UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA
AMBIENTAL

LUDIMILA FABIANA DA SILVA

Estudo do campo térmico da cidade de São Carlos (SP) em um episódio
climático de inverno

São Carlos

2011

LUDIMILA FABIANA DA SILVA

Estudo do campo térmico da cidade de São Carlos (SP) em um episódio
climático de inverno

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Ciências da Engenharia Ambiental, da Escola de
Engenharia de São Carlos, Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências
- Programa de Ciências da Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Assoc. FRANCISCO ARTHUR
DA SILVA VECCHIA

São Carlos
2011

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

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

S586e	Silva, Ludimila Fabiana da Estudo do campo térmico da cidade de São Carlos (SP) em um episódio climático de inverno / Ludimila Fabiana da Silva ; orientador Francisco Arthur da Silva Vecchia. -- São Carlos, 2011. Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011. 1. Climatologia dinâmica. 2. Clima urbano. 3. Ilha de calor. 4. Campo térmico. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): Licenciada LUDIMILA FABIANA DA SILVA.

Tese defendida e julgada em 17.02.2011 perante a Comissão Julgadora:

Aprovado ✓

Prof. Associado **FRANCISCO ARTHUR DA SILVA VECCHIA** – (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada ✓

Prof.^a. Dr.^a. **MARIA SOLANGE GURGEL DE CASTRO FONTES**
(Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/UNESP/campus de Bauru)

Aprovada ✓

Prof.^a. Dr.^a. **SANDRA ELISA CONTRI PITTON**

(Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”/UNESP/campus de Rio Claro)

Aprovada ✓

Prof.^a. Dr.^a. **GIANNA MELO BARBIRATO**
(Universidade Federal de Alagoas/UFAL)

APROVADA ✓

Prof. Dr. **RICARDO AUGUSTO FELICIO**
(Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas/USP)

Prof. Associado **EVALDO LUIZ GAETA ESPINDOLA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Ciências da Engenharia Ambiental

Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho aos meus pais e à minha irmã Andréa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por nunca me desamparar e me dar força para superar todos os obstáculos.

Aos meus pais, à minha irmã Andréa e ao meu cunhado Claudemir, por sempre acreditarem em mim, mesmo quando eu já não acreditava mais.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Vecchia, por compartilhar seu conhecimento, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

Ao meu amigo Chico Vecchia, por todos os conselhos e amizade.

Aos professores Ricardo Augusto Felício, Gianna Melo Barbirato, Maria Solange Gurgel de Castro Fontes e Sandra Pitton, pelo aceite em participar como membro da banca de defesa dessa tese.

Ao Prof. Dr. Ary Menardi Júnior, por sua participação como membro da banca de qualificação desse trabalho.

Ao prof. Dr. António Lopes, da Universidade de Lisboa, por sua ajuda e incentivo na realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa de doutorado.

Aos meus amigos de laboratório, Pedro Caballero, Marcos Pereira Lima e Marcos José por toda ajuda e incentivo.

Ao meu amigo e colega de trabalho Ricardo Victor, por toda paciência, ajuda, incentivo e compreensão.

A todos aqueles que contribuíram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

SILVA, Ludimila. Fabiana da. Estudo do campo térmico da cidade de São Carlos (SP) em um episódio climático de inverno. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Dentro da abordagem dinâmica do clima, o presente trabalho visou a estudar a configuração espaço-temporal do campo térmico da cidade de São Carlos-SP, dentro de suas variações diurnas e das condições impostas pelos diferentes tipos de tempo, com o intuito de caracterizá-lo quanto à sua intensidade e identificar a formação de ilhas urbanas de calor no período de inverno. Para tanto foram utilizados dados climáticos registrados por três estações automáticas localizadas em pontos distintos da malha urbana, imagens do satélite GOES e cartas de pressão atmosféricas reduzidas ao nível do mar. De acordo com os resultados obtidos, a ilha de calor urbana é mais pronunciada na fase de Domínio da massa Polar Atlântica, sendo que as maiores diferenças térmicas foram observadas durante o período diurno. Sob as condições impostas pela massa Polar Atlântica as diferenças observadas entre os campos térmicos da região mais próxima do centro urbano de São Carlos e as duas regiões mais afastadas ficaram entre 2,0 e 3,0 °C.

Palavras-chave: Climatologia Dinâmica, Clima Urbano, Ilha de Calor, Campo térmico.

ABSTRACT

SILVA, Ludimila. Fabiana da. *Study of the thermal field of São Carlos (SP) in winter climatic episode*. Thesis (Ph.D. in Environmental Engineering Sciences) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

On the dynamical approach of climate, the present work aimed the study the time-space configuration of the thermal field of the city of São Carlos-SP, within the diurnal variations and the conditions imposed by the different weather types, in order to characterize its intensity and identify the formation of urban heat islands during winter. Thus climatic data registered by three automatic stations located in distinct points of the urban network, GOES satellite images and atmospheric pressure letters at sea level were used. According to the obtained results, the urban heat island is more pronounced in the activity of Polar Atlantic air mass, with the biggest thermal differences being observed during the diurnal period. Under the conditions imposed by the Polar Atlantic mass the observed differences between the thermal fields of the nearest downtown region of São Carlos and the two distant regions were between 2.0 and 3.0 °C.

Keywords: Dynamical Climatology, Urban Climate, Heat Island, Thermal Field.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – a) Localização do Estado de São Paulo no Brasil, (b) localização do município de São Carlos no Estado de São Paulo e (c) municípios limítrofes e localização geográfica do município de São Carlos.....	41
Figura 2 – Divisão Geomorfológica do Estado de São Paulo	42
Figura 3 – Bacias hidrográficas: Mogi-Guaçu e Tietê-Jacaré	43
Figura 4 – Hipsometria do município de São Carlos.....	44
Figura 5 – Verticalização das edificações no município de São Carlos.....	45
Figura 6 – Padrão de uso do solo no município de São Carlos	46
Figura 7 – Densidade demográfica do município de São Carlos	47
Figura 8 – Padrão ocupacional no município de São Carlos	48
Figura 9 - Sistemas Atmosféricos da América do Sul.....	50
Figura 10 – Classificação climática do território paulista	53
Figura 11 – Localização das estações automáticas na cidade de São Carlos	56
Figura 12 – a) Localização das quatro estações automáticas na malha urbana de São Carlos sobre modelo digital de terreno, mostrando a conformação do relevo na cidade com indicação das diferentes altitudes em cada estação climática; b) perfil topográfico transversal da área urbana de São Carlos com a localização das quatro estações climáticas	57
Figura 13 – Localização da Estação 1	58
Figura 14 – Equipamento de medição da Estação 1	59
Figura 15 – Localização da Estação 2	60
Figura 16 – Equipamento de medição da Estação 2.....	61
Figura 17 – Localização da Estação 3	62
Figura 18 – Localização da Estação 4	63
Figura 19 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, pressão atmosférica, pluviosidade, velocidade máxima e direção do vento no dia 10/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 10/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 10/06/2004.....	73
Figura 20 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 10/06/2004 na Estação 1	74
Figura 21 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 11/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal	

infravermelho, às 9h do dia 11/06/2004. c) Carta de pressão ao nível do mar, às 9h do dia 11/06/2004	78
Figura 22 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 11/06/2004 na Estação 1	79
Figura 23 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 12/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 12/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 12/06/2004.....	83
Figura 24 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 12/06/2004 na Estação 1	84
Figura 25 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 13/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 13/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 13/06/2004.....	88
Figura 26 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 13/06/2004 na Estação 1	89
Figura 27 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 14/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 14/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 14/06/2004.....	93
Figura 28 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 14/06/2004 na Estação 1	94
Figura 29 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 15/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 15/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 15/06/2004.....	98
Figura 30 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 15/06/2004 na Estação 1	99

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento das variáveis climáticas do mês de junho de 2004 através de dados registrados pela Estação 1	67
Gráfico 2 – Análise rítmica do período compreendido entre os dias 10 e 15 do mês de junho de 2004 através de dados registrados pela Estação 1	68
Gráfico 3 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 10/06/2004 nas três estações	74
Gráfico 4 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 10/06/2004	76
Gráfico 5 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 11/06/2004 nas três estações	79
Gráfico 6 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 11/06/2004	81
Gráfico 7 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 12/06/2004 nas três estações	84
Gráfico 8 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 12/06/2004	86
Gráfico 9 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 13/06/2004 nas três estações	89
Gráfico 10 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 13/06/2004	91
Gráfico 11 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 14/06/2004 nas três estações ..	94
Gráfico 12 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 14/06/2004	96
Gráfico 13 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 15/06/2004 nas três estações ..	99
Gráfico 14 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 15/06/2004	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição da Estação Automática	59
Quadro 2 - Quadro-síntese dos dados disponíveis nas cinco estações automáticas no período de inverno (maio/04 a setembro/04).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normais Climatológicas da cidade de São Carlos para o mês de Junho	66
Tabela 2 – Resultados obtidos por meio da Estação 1, durante o episódio representativo de inverno.....	102
Tabela 3 – Dados de temperatura do ar registrados em cada estação, durante o episódio representativo de inverno.....	103
Tabela 4 – Diferenças máximas na temperatura do ar entre as estações, durante o episódio representativo de inverno.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

%	- Por cento
'	- Minutos
''	- Segundos
ΔP	- Variação da pressão atmosférica
ΔQ_A	- advecção líquida
ΔQ_S	- densidade de fluxo de armazenamento de energia na camada intraurbana e solo
ΔT	- Amplitude térmica
BA	- Bahia
E	- Leste
EESC	- Escola de Engenharia de São Carlos
FADISC	- Faculdade de Direito de São Carlos
FINEP	- Financiadora de Estudos e Projetos
GOES	- <i>Geostationary Operations Environmental Satellite</i>
h	- Hora
hPA	- Hecta Pascal
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
km/h	- Quilômetro por hora
km ²	- Quilômetros quadrado
LCC	- Laboratório de Construção Civil
m/s	- Metros por segundo
mEA	- Massa Equatorial Atlântica
mEC	- Massa Equatorial Continental
min	- Minuto
mm	- Milímetros

mm.Hg	-	Milímetros de Mercúrio
mPA	-	Massa Polar Atlântica
mPP	-	Massa Polar Pacífica
mTA	-	Massa Tropical Atlântica
mTC	-	Massa Tropical Continental
mTP	-	Massa Tropical Polar
N	-	Norte
NE	-	Nordeste
NW	-	Noroeste
°	-	Graus
°C	-	Graus Célsius
Q^*	-	Fluxo de radiação líquida
Q_E		Fluxo de calor turbulento latente
Q_F	-	Fluxo de calor antropogênico
Q_H		Fluxo de calor turbulento sensível
$R_{máx}$	-	Radiação solar máxima
$R_{méd}$	-	Radiação solar média
RS	-	Rio Grande do Sul
S	-	Sul
SE	-	Sudeste
SP	-	São Paulo
SW	-	Sudoeste
T_{E1}	-	Temperatura do ar na Estação 1
T_{E2}	-	Temperatura do ar na Estação 2
T_{E3}	-	Temperatura do ar na Estação 3
$T_{máx}$	-	Temperatura máxima

$T_{\text{méd}}$	-	Temperatura média
$T_{\text{mín}}$	-	Temperatura mínima
$UR_{\text{máx}}$	-	Umidade relativa máxima
$UR_{\text{méd}}$	-	Umidade relativa média
$UR_{\text{mín}}$	-	Umidade relativa mínima
USP	-	Universidade de São Paulo
$v_{\text{máx}}$	-	Velocidade máxima
$v_{\text{máx}}$	-	Velocidade máxima do vento
W	-	Oeste
W/m^2	-	Watts por metro quadrado

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	29
CAPITULO 1	33
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA METODOLÓGICA	33
1.1 Clima Urbano	35
1.2 Ilha de Calor Urbana.....	37
CAPITULO 2	41
A CIDADE DE SÃO CARLOS	41
2.1 Localização da cidade de São Carlos	41
2.2 Hipsometria	43
2.3 Uso do Solo	45
2.4 Densidade demográfica	47
2.5 Caracterização climática.....	48
CAPITULO 3	55
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	55
2.1 Aquisição de dados	55
2.1.1 Estações climáticas	57
Estação 1	57
Estação 2.....	59
Estação 3.....	61
Estação 4.....	62
2.1.2 Tratamento dos dados climáticos	63
2.2 Definição do episódio climático representativo de inverno	65
CAPITULO 3	71
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
CAPITULO 4	105
CONCLUSÕES	105
REFERÊNCIAS	109
ANEXO A – BOLETIM CLIMANÁLISE, JULHO DE 2004	115
ANEXO B – ESCALA DE BEAUFORT	119

INTRODUÇÃO

A população mundial encontra-se distribuída entre áreas rurais e urbanas. Com a Revolução Industrial, no século XVIII, houve um grande aumento da população nas cidades em relação ao campo. Segundo a Organização das Nações Unidas, no ano de 2000 a população urbana representava 47% da população global e atualmente, de acordo com suas estimativas, mais de 50% da população mundial vive em cidades. Em 2007, foi constatado que a população urbana superou a população rural em níveis mundiais.

Há muito tempo o homem vem modificando o meio em que vive com o intuito de assegurar sua sobrevivência e seu conforto. O processo acelerado de urbanização ocasionou consideráveis modificações na atmosfera urbana. Atividades como agricultura, pecuária e construções de cidades afetam diretamente o meio ambiente, alterando as características naturais da região, refletindo no clima urbano e na formação de ilha(s) de calor. São marcantes as diferenças climáticas entre grandes cidades e as áreas que as circundam. Em regiões urbanizadas as temperaturas do ar são maiores, a umidade relativa do ar menor e há uma maior concentração de poluentes. A combinação destes fatores pode causar certo desconforto ao homem.

Estudos do clima urbano têm mostrado que os processos atmosféricos locais podem ser influenciados pela cidade, ou seja, a área urbanizada, ao alterar algumas características naturais, como materiais constituintes, permeabilidade do solo para a água, índice de vegetação, superfícies expostas à radiação solar, modifica o balanço de energia local, provocando variações nas condições iniciais do clima (ASSIS, 2003). De acordo com Barbirato, Souza e Torres (2007) uma redução na permeabilidade do solo gera uma redução da umidade do ar e da evaporação da área urbana, resultando em uma maior quantidade de calor acumulado e temperaturas elevadas na malha urbana.

Dessa forma, os processos de urbanização e de expansão das áreas urbanas não devem ser considerados como um fator isolado e sim dentro de um planejamento eficaz, visando adequar o ambiente construído ao clima de um determinado local. Segundo os autores citados anteriormente, tal adequação significa construir espaços que possibilitem melhores condições de conforto ao homem, além de permitir a valorização dos aspectos sócio culturais e ambientais das diferentes regiões que compõem o planeta.

A climatologia urbana moderna começou na Europa, no fim do século XVII ou início do século XIX, baseada em observações instrumentais. No entanto, o real crescimento da

climatologia urbana se deu a partir dos anos 20 (OLIVER, 1987). Segundo Oke (1982), até os anos 70, o estudo da climatologia urbana estava calcado no reconhecimento e descrição dos fenômenos e sua ligação com outros fatores. Somente a partir desta década, as investigações climáticas tornaram-se menos descritivas e mais orientadas para a modelagem teórica e quantitativa (FONTES, 1998).

Trabalhos como o de Pitton (1997) têm mostrado a importância de se considerar os aspectos climáticos das cidades no processo de planejamento, já que eles fornecem informações que podem auxiliar nas tomadas de decisão.

Nesse contexto, o presente trabalho investigou a configuração do campo térmico urbano na cidade de São Carlos (SP) no período de inverno, tornando possível uma análise quantitativa da intensidade da ilha de calor urbano nesse período. Para alcançar tal objetivo foi necessário:

- Identificar e caracterizar os tipos de tempo atuante do período de inverno, compreendidos em episódios climáticos representativos para a região de São Carlos;
- Analisar a intensidade das diferenças de temperatura do ar existentes entre diferentes áreas do meio urbano dentro de suas variações diurnas e variações impostas pelos diferentes tipos de tempo atuante;
- Estudar o comportamento do campo térmico através da distribuição da temperatura do ar em pontos distintos da cidade de São Carlos;
- Compreender a influência dos elementos naturais e urbanos no campo térmico da cidade e na formação de ilhas de calor no ambiente urbano durante o período de inverno.

A escolha da cidade de São Carlos como objeto de estudo se deu pelos seguintes aspectos:

- A cidade possui quatro estações automáticas localizadas em meio urbano, as quais possuem dados horários de, no mínimo, cinco anos e uma estação clássica situada em meio rural, com dados horários de, no mínimo, trinta anos;
- Conhecimento da malha urbana;
- Disponibilidade de mapas de uso do solo e densidade populacional;
- Disponibilidade de imagens de satélite referentes à área de estudo.

Cabe destacar a existência de outros trabalhos relacionados ao campo térmico de São Carlos e sua vizinhança. A influência da cidade no clima local foi estudada por Souza (1996) através de dados de temperatura do ar. Posteriormente, Fontes (1998) estudou como as áreas

de fundo de vale influenciam o clima urbano de São Carlos. O presente trabalho complementa um estudo realizado por Barbosa (2009), que em sua tese de doutoramento investigou o comportamento térmico e a intensidade da ilha de calor na cidade de São Carlos, durante o período de verão.

A presente tese encontra-se dividida em quatro partes. A primeira delas, Capítulo 1, refere-se à fundação teórica metodológica, abordando conceitos e trabalhos importantes para a realização desta.

A segunda parte, Capítulo 2, trata-se dos procedimentos metodológicos adotados nesta pesquisa. Neste capítulo encontra-se a descrição das estações automáticas, das quais foram obtidos os dados utilizados no estudo do comportamento térmico urbano e na definição do episódio climático representativo de inverno.

Os resultados obtidos e a discussão desses são apresentados no Capítulo 3, mostrando o efeito da urbanização no clima da cidade através da identificação da formação de ilha de calor urbana. A quarta e última parte refere-se às conclusões deste estudo.

CAPITULO 1

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA METODOLÓGICA

A palavra clima tem sua origem no grego “klima”, que significa tendência, inclinação, obliquidade de um ponto da terra em relação ao sol. Atualmente é possível encontrar diversas definições para clima. De acordo com a definição de Hann (1882)¹ apud Monteiro (1976), clima pode ser definido como: *um conjunto de fenômenos meteorológicos que caracterizam o estado médio da atmosfera sobre determinado lugar da Terra*. Nesta mesma linha, Köppen (1906)² apud Monteiro (1991) define clima como: *o estado médio e o processo ordinário de tempo em dado lugar, considerando-se que o tempo meteorológico se altera, porém o clima se mantém constante*.

Segundo Monteiro (1976) a definição de Hann é insuficiente por corresponder à média, que é uma abstração desprovida de realidade e por omitir o desenrolar dos fenômenos no tempo, devido seu caráter estático e artificial. As definições apresentadas por Hann e Köppen pressupõem que os elementos climáticos são independentes e não interagem entre si e, de acordo com Caracristi (2002), representam bem a climatologia separatista, ou climatologia clássica.

Sorre (1951) dá uma definição para clima com uma visão distinta dos autores citados anteriormente. Ele deixa de lado a idéia de que o clima é dado por valores médios e o define como: *ambiente atmosférico constituído pela série de estados da atmosfera, em determinado lugar, em sua sucessão habitual*. Nesta definição a noção de tempo meteorológico é enfatizada como uma unidade complexa. Surge, então, um novo paradigma, o ritmo em substituição à média dos elementos discretamente dissociados da atmosfera e expressos como meras propriedades extensivas.

O termo ritmo exprime “*não mais a distância quantitativa dos valores sucessivos, mas o retorno mais ou menos regular dos mesmos estados*” (MONTEIRO, 1976). O novo paradigma coloca sobre as propriedades intensivas (o tempo e seu desempenho sequencial) a maior responsabilidade em revelar a natureza do clima. Nesse sentido, o autor enfatiza as regras definidas em Sorre (1951) para esclarecer o novo paradigma. Tais regras são:

---

¹ HANN, J. *Handbuch der Klimatologie*, Wien. 1882.

² KÖPPEN, W. *Climatología*. Sección de Obras Geografía, México: Editorial Fondo de Cultura Económica 1948. 478 pp.

- a) *Os valores numéricos a reter pelas escalas são os valores críticos para as principais funções orgânicas.*
- b) *Uma definição climatológica deveria abranger a totalidade dos elementos do clima suscetíveis de agir sobre o organismo.*
- c) *Os elementos climáticos deveriam ser considerados em suas interações.*
- d) *Toda classificação biológica deve atingir de perto a realidade viva.*
- e) *O fator tempo (duração) é essencial na definição dos climas.*

Apesar de o autor (*op. cit.*) não ter praticado a pesquisa climatológica, só o fato de ele rever o conceito de clima e propor um novo paradigma já foi uma contribuição inestimável.

Em Monteiro (1971) a definição apresentada anteriormente foi reescrita como: *ambiente atmosférico constituído pela série de estados atmosféricos, na forma encadeada e sucessiva de tipos de tempo*. As definições apresentadas por Sorre e Monteiro evidenciam o caráter dinâmico do clima, e que os estados atmosféricos variam no tempo cronológico, dando fundamentos para a climatologia dinâmica.

De acordo com Vecchia (1997), o conceito de “tipos de tempo” estabelece a noção de ritmo climático, permitindo a compreensão das flutuações que ocorrem em intervalos irregulares de tempo. Os elementos climáticos decorrentes destes tipos de tempo que ocorrem de forma sucessiva e encadeada são expressos basicamente por: temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar incidente, direção e velocidade dos ventos e períodos de calmaria. Em função deste ritmo, o regime de monitoramento destas variáveis deve ser o mais detalhado possível.

O presente trabalho abordou o clima de forma dinâmica, visto que esta abordagem permite a compreensão da interação entre os fenômenos atmosféricos, proporcionando às análises um caráter qualitativo e não meramente quantitativo. Isso permite a definição de episódios representativos, nos quais, de acordo com Vecchia (1997), são consideradas as propriedades das massas de ar que atuam sobre determinado lugar. Dessa forma, a partir da compreensão da circulação geral e regional da atmosfera, entende-se o funcionamento do clima local.

As massas de ar podem ser definidas como volumes de ar de centenas ou milhares de quilômetros de comprimento e vários quilômetros de altura. Suas propriedades físicas (temperatura e umidade) são uniformes no plano horizontal e suas características (quente, fria, úmida ou seca) são modificadas pelo contato com a superfície das regiões geográficas ao longo de seu avanço (CUADRAT, 1997). As peculiaridades do tempo meteorológico

dependem das propriedades iniciais da massa de ar e das mudanças que ela sofre ao longo de sua trajetória (MODNA e VECCHIA, 2003).

De acordo com Caracristi (2002), a climatologia dinâmica está fundamentada na teoria das massas de ar e dos fenômenos frontogenéticos. Segundo Monteiro (1976), o domínio das massas de ar atuantes pode ser dividido em duas etapas principais, denominadas Pré e Pós-Frontal.

A primeira delas representa períodos que antecedem a penetração do sistema frontal e é dividida nas fases Prenúncio e Avanço. A fase de Prenúncio caracteriza-se pela elevação dos valores de temperatura do ar e redução dos valores de umidade relativa. Queda da pressão atmosférica e ruptura do regime de ventos predominantes (velocidades acima do normal e fortes rajadas) são peculiares da fase de Avanço.

A etapa Pós-Frontal representa os períodos que sucedem a penetração da frente fria e é composta pelas fases de Domínio e Tropicalização. Caracteriza-se por redução nos valores de temperatura do ar, aumento da umidade relativa, aumento da pressão atmosférica, possível ocorrência de precipitações e alteração no quadrante dos ventos predominantes (vem de outras direções e com diferentes velocidades).

1.1 Clima Urbano

O clima pode sofrer alterações nas suas condições iniciais tanto por causas naturais quanto, provavelmente, por ações antrópicas que vêm sendo discutidas nas escalas local, regional e global (WENG, 2001).

Diversos autores têm relatado as diferenças microclimáticas promovidas nas cidades pelo processo de urbanização (LOWRY, 1967; OKE, 1987; PITTON, 1997). Ao se alterarem algumas características naturais do meio podem se provocar variações climáticas no local. Como exemplo dessas variações Landsberg (1981) encontrou: redução da radiação solar, elevação da temperatura devido ao calor liberado nas cidades, aumento da umidade relativa, aumento da produção de núcleos de condensação, redução da queda de neve, diminuição da velocidade dos ventos e aumento dos períodos de calmaria.

Clima urbano pode ser definido como uma modificação substancial do clima local, resultado das condições particulares do meio ambiente urbano, seja pela sua rugosidade,

ocupação do solo, orientação, permeabilidade e propriedades dos materiais constituintes, entre outros fatores (OKE, 1987). De acordo com Givoni (1981), qualquer elemento construído pelo homem, um edifício, uma fábrica, uma área de estacionamento e outros, pode criar ao redor e acima dele um clima modificado com o qual ele interage.

Monteiro (1976) afirma que o tratamento do clima urbano, como um dos componentes da qualidade do ambiente, não poderia mais ser considerado insignificante para o mundo moderno.

Alguns aspectos da urbanização que alteram o ambiente físico, acarretando modificações no balanço de energia e nas condições térmicas, em comparação à periferia, foram apresentados por Oke (1981). São eles:

- o Poluição do ar (aumento da radiação de ondas longas emitidas pela atmosfera, devido à maior absorção das ondas curtas e radiação de ondas longas emitidas pelos poluentes);
- o Calor antropogênico (calor desprendido no processo de combustão);
- o Superfícies impermeáveis (aumento da admitância térmica das superfícies e materiais construtivos, aumentando o calor acumulado durante o dia e desprendimento do calor armazenado durante a noite);
- o Geometria das superfícies (aumento da absorção de ondas longas devido à retenção entre edificações);
- o Diminuição da perda de calor por turbulência causada pela estagnação entre as edificações;
- o Diminuição da perda da radiação por ondas longas do espaço entre edificações pela redução da área de céu visível.

Entre os elementos do clima, os que melhor podem ser tomados para análise das modificações das condições iniciais do clima causadas pelo processo de urbanização ou modificação da cobertura natural do solo são: temperatura, umidade relativa, ventos, nebulosidade, precipitações e insolação.

De acordo com Lombardo (1985), a cidade modifica o clima através de alterações na superfície, podendo alterar o fluxo de ventos, umidade e precipitações, resultando, na maioria das vezes, em condições adversas.

Segundo Gomes e Amorim (2003), a forma como ocorre o uso e a ocupação do solo urbano relacionada à disposição do relevo pode provocar alterações significativas no campo térmico urbano. A diferença primária entre os processos térmicos da área urbana e de seu

entorno natural ou rural está na repartição entre os fluxos turbulentos de calor sensível e de calor latente. As áreas naturais ou rurais vizinhas às cidades perdem mais calor através da evaporação, enquanto que nas cidades, onde as superfícies possuem maior capacidade térmica e elevado grau de impermeabilização, a maior parte do fluxo térmico é de calor sensível, o responsável pelo desconforto térmico humano (OKE, 1987).

1.2 Ilha de Calor Urbana

Grande parte dos estudos relacionados ao clima urbano tem dado um enfoque especial para o fenômeno “Ilha de Calor”, visto que as variações de temperatura verificadas nos espaços urbanos constituem um dos aspectos mais significativos para caracterizar o clima urbano (FONTES, 1998).

De acordo com Voogt e Oke (2003) as ilhas de calor podem ser referidas ao excesso de aquecimento da atmosfera urbana em relação ao seu redor não-urbanizado, sendo mais expressivas com céu claro e calmaria, durante o período noturno, quando a diferença de resfriamento radiativo é máxima entre a localização urbana e rural. A geometria urbana pode interferir, em nível local, no processo de formação das ilhas de calor, uma vez que as formas urbanas por ela geradas influem nas trocas de calor ocorridas entre as superfícies e a atmosfera adjacente (SOUZA, 1996).

A ilha de calor está presente em todas as cidades e metrópoles, no entanto sua intensidade é variável (LANDSBERGER, 1981; OKE, 1987). Diversos são os mecanismos que contribuem para a sua formação e os fatores que agravam sua intensidade vão desde a localização geográfica até as condições climatológicas do dia. Características específicas da cidade, como tamanho, densidade populacional, além das variações diurnas e sazonais também podem influenciar (LOMBARDO, 1985).

As principais causas da formação das ilhas de calor são ressaltadas por Givoni (1989). São elas:

- A diferença no balanço total da radiação entre área urbana e rural (particularmente a pequena taxa de resfriamento durante a noite);
- O armazenamento de energia solar nas edificações durante o dia e liberada durante a noite; produção de calor pelas atividades de transporte, indústria etc.;
- Baixa evaporação do solo e da vegetação em áreas densas;

- o Fontes sazonais de calor (aquecimento e resfriamento do ar com consequente desprendimento de calor para o ar urbano).

A mudança no balanço de energia também é apontada por Landsberg (1974) como o principal fator da geração da ilha de calor.

O balanço de energia é resultado das trocas de radiações entre a Terra, o Sol e o ar, representando a diferença entre as radiações recebidas pela superfície terrestre e às devolvidas ao espaço, após as interações térmicas entre as superfícies e o ar.

De acordo com a maioria dos modelos, o balanço de energia é dado pela seguinte equação:

$$Q^* + Q_F = \Delta Q_S + \Delta Q_A + Q_H + Q_E$$

Em que:

Q^* = fluxo de radiação líquida, em função do albedo, energia solar difusa e direta, radiação infravermelha emitida pelo topo da camada intraurbana e densidade de fluxo infravermelho da atmosfera;

Q_F = fluxo de calor antropogênico (combustão, condicionamento do ar, etc.);

ΔQ_S = densidade de fluxo de armazenamento de energia na camada intraurbana e solo;

ΔQ_A = advecção líquida;

Q_H = fluxo de calor turbulento sensível;

Q_E = fluxo de calor turbulento latente.

Segundo Landsberg (1974), o calor armazenado pelo tecido urbano (Q_S) e o fluxo de calor antropogênico (Q_F) são a principal causa da formação de ilhas de calor, visto que, apesar da troca do albedo causada pela mudança de superfícies naturais para materiais construtivos não ser tão grande, as mudanças na condutividade térmica e na capacidade térmica dos materiais que constituem a área urbana são marcantes.

A configuração espacial da ilha de calor não é uma estrutura única, e sim um conjunto de microclimas, podendo ter vários núcleos. Sua forma e intensidade dependem do regime climático, estações do ano e características da cidade, podendo apresentar uma variabilidade periódica ou aperiódica (Souza, 1996).

De acordo com Fontes (1998), para o estudo do clima de uma cidade é necessário o conhecimento sobre o sítio onde a cidade está assentada, visto que além de ser o meio natural

que serve de suporte para a cidade, interage com a mesma, configurando diferentes comportamentos na atmosfera. Nesse contexto, o capítulo a seguir apresenta algumas das principais características da cidade de São Carlos e de seu entorno.

CAPITULO 2

A CIDADE DE SÃO CARLOS

2.1 Localização da cidade de São Carlos

O objeto de pesquisa do presente trabalho foi o município de São Carlos, localizado na região central do Estado de São Paulo - Brasil ($47^{\circ}43'04''$ - $48^{\circ}05'26''$ W, $21^{\circ}35'45''$ - $22^{\circ}09'30''$ S) (Figura 1). Possui uma área total de aproximadamente 1.140 km^2 , sendo que a área urbana corresponde a 6% da área total ($67,5 \text{ km}^2$) e a área urbana ocupada é de $33,0 \text{ km}^2$.

São Carlos é considerado um centro regional importante no interior do Estado de São Paulo, limitando-se ao Norte com os municípios de Rincão, Luís Antonio e Santa Lúcia; ao Sul com Ribeirão Bonito, Itirapina e Brotas, a Leste com Descalvado e Analândia e a Oeste com Ibaté, Araraquara e Américo Brasiliense (Figura 1c).

Figura 1 – a) Localização do Estado de São Paulo no Brasil, (b) localização do município de São Carlos no Estado de São Paulo e (c) municípios limítrofes e localização geográfica do município de São Carlos.

Fonte: Barbosa (2009)

São Carlos está inserida em duas grandes bacias hidrográficas: Mogi-Guaçu e Tietê-Jacaré, que são subdivididas em dez microbacias, sendo as de maior relevância: Bacia do Monjolinho, Bacia do Feijão e Bacia do Quilombo (Figura 3). A maior parte da zona urbana encontra-se na bacia Tietê-Jacaré (PMSC, 2004).

Figura 3 – Bacias hidrográficas: Mogi-Guaçu e Tietê-Jacaré
Fonte: Barbosa (2009)

2.2 Hipsometria

A altitude média do município é de 850 metros acima do nível do mar. As menores cotas (520 metros) estão localizadas na área de alagamento próxima ao Rio Mogi-Guaçu, ao

Norte, e as cotas mais altas atingem 1.000 metros, na porção Sudeste. A hipsometria do município pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Hipsometria do município de São Carlos
Fonte: PMSC (2004)

2.3 Uso do Solo

Em relação ao uso do solo, há uma tendência de verticalização das edificações, induzida pela legislação urbanística em vigor, colocando em risco o patrimônio de interesse histórico e cultural que é bastante significativo no município e que ainda não possui incentivos para sua preservação. A tendência de verticalização das edificações na cidade de São Carlos pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 – Verticalização das edificações no município de São Carlos
Fonte: Adaptado de PMSC (2004)

A Figura 6 ilustra o padrão do uso do solo na cidade de São Carlos. A lógica de ocupação do solo tem sido regulada pelo interesse do mercado imobiliário, não vinculada às condições de infraestrutura, gerando problemas de mobilidade, moradia e degradação ambiental (PMSC, 2004).

Figura 6 – Padrão de uso do solo no município de São Carlos
Fonte: PMSC (2004)

2.4 Densidade demográfica

A análise da densidade demográfica do período de 1991 a 2000 evidencia um processo de aumento de moradores na periferia. Em contrapartida, houve uma sensível redução do uso residencial na região central da cidade, onde se pode constatar uma crescente mudança de uso para comércio e serviços (PMSC, 2004).

Os mapas referentes à densidade demográfica e padrão ocupacional do município de São Carlos podem ser observados, respectivamente, nas Figura 7 e Figura 8.

Figura 7 – Densidade demográfica do município de São Carlos
Fonte: PMSC (2004)

Figura 8 – Padrão ocupacional no município de São Carlos
Fonte: PMSC (2004)

2.5 Caracterização climática

Antes de falar sobre o clima da região de São Carlos é de extrema importância contextualizá-lo dentro de uma escala climática maior. Nesse sentido Nimer (1979) e Vianello e Alves (1991) afirmam, respectivamente, que:

- “A experiência tem-nos mostrado que nenhum fenômeno da natureza pode ser compreendido, quando encarado isoladamente, fora dos demais circundantes. Qualquer acontecimento natural pode ser convertido num contra-senso quando analisado fora das

condições que o rodeiam; ao contrário, se considerado em ligação com os demais poderá ser compreendido e justificado.”

- *“Qualquer tentativa de entendimento da dinâmica atmosférica, sobre uma área, deve iniciar-se com uma visão mais global, na qual a localidade de interesse esteja inserida.”*

Sendo assim, a seguir apresenta-se uma breve contextualização climática envolvendo a América do Sul, o Sudeste Brasileiro e por fim a região de São Carlos.

O clima da América do Sul sofre influência da atuação das células convectivas de Hadley e Walker, da entrada de sistemas frontais e de outros mecanismos atmosféricos de menor escala.

As principais massas de ar que influenciam as condições climáticas da América do Sul são: Equatorial Atlântica (mEA), Equatorial continental (mEC), Tropical Atlântica (mTA), Tropical Continental (mTC), Tropical Pacífica (mTP), Polar Atlântica (mPA) e Polar Pacífica (mPP). Direta ou indiretamente todas elas atuam no Brasil (NIMER, 1979), provocando variações de precipitação e temperatura.

A Figura 9, extraída de Monteiro (1973), ilustra as regiões climáticas da América do Sul. Nela é possível observar que as características climáticas não são homogêneas, tornando-se conveniente caracterizar o clima por regiões.

A região Norte apresenta clima equatorial chuvoso, sem estação seca e pequena flutuação térmica durante o ano. No Nordeste tem-se clima de regiões semiáridas, com baixos níveis pluviométricos e estação chuvosa concentrada em poucos meses, enquanto que as regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul sofrem influências de latitudes médias e dos trópicos, com estação seca bem definida (no inverno) e estação chuvosa de verão com chuvas convectivas; além disso, sistemas frontais causam chuvas na maior parte do ano.

Enquanto o Nordeste constitui a região de maior variação climática em relação à distribuição de chuva, à marcha estacional da precipitação e ao regime de duração e época do período seco, o Sudeste representa a região de maior diversificação climática, levando-se em consideração o regime de temperatura. Quanto à complexidade, o clima dessa região pode ser comparado ao clima nordestino. Tal complexidade se deve a fatores de natureza estática (posição, topografia) ou dinâmica (NIMER, 1979).

Figura 9 - Sistemas Atmosféricos da América do Sul
Fonte: Monteiro, 1973

O território paulista encontra-se no limite de duas zonas climáticas – intertropical e subtropical. Na primeira desenvolvem-se climas controlados por massas equatoriais e tropicais enquanto na segunda as principais massas atuantes são as tropicais e as polares. De acordo com Monteiro (1973), essa região recebe uma farta quantidade de chuvas, oscilando seus valores anuais entre 1.100 e 2.000 mm. Os altos valores de pluviosidade são consequência das principais correntes da circulação atmosférica atuantes na costa leste da América do Sul e, principalmente, do choque entre elas. A frente polar Atlântica, que oscila do rio da Prata até as regiões adjacentes do Equador, é a principal responsável pela gênese das chuvas no Sudeste do Brasil.

Os valores pluviométricos não são constantes e variam de um ano para outro. Essas variações se devem às diferenças das atividades das massas polares. Nos anos em que há

grande atividade polar há um aumento considerável na pluviosidade do território paulista, enquanto que em anos com baixa atividade polar observa-se uma redução nos valores pluviométricos.

Além da variação da pluviosidade através dos anos, há também uma oscilação da distribuição das chuvas no decorrer do ano. É durante o inverno que os menores valores de precipitação são observados (exceto no litoral e sudeste paulista), constituindo o auge da estação seca. Nesse período a gênese das chuvas se deve, quase que totalmente, à atuação dos sistemas frontais. Cabe ressaltar que, mesmo com as variações quantitativas anuais, sobretudo sazonais das chuvas, não há alterações na sua gênese.

Como já mencionado anteriormente, São Carlos está localizada na região central do Estado de São Paulo e devido à sua altitude elevada fica exposta a ventos de escala zonal. Devido a essa posição não existem barreiras que atenuem ou desviem esses fluxos de ar, o que permite a sua penetração com maior facilidade, contribuindo significativamente para a determinação de suas características climáticas (MODNA e VECCHIA, 2003). A topografia acidentada e a falta de obstáculos nos quadrantes Nordeste e Sudeste contribuem para a grande ventilação na área urbana (FONTES, 1998).

De acordo com Modna e Vecchia (2003) a cidade de São Carlos apresenta situações em que podem ocorrer episódios de estresse térmico, influenciadas pela localização geográfica, entradas de massas de ar, uso do solo e atividades socioeconômicas. É notável uma tendência à verticalização das edificações, com consequente adensamento urbano nas regiões centrais e a quantidade de áreas verdes é insuficiente para atenuar as consequências impostas ao clima pelo processo de urbanização.

A região em que São Carlos se localiza é influenciada por entradas de massas de ar equatoriais e tropicais. Sobre ela podem atuar a mTA, mEC e mPA. A mTA origina-se nas regiões marítimas do Atlântico Sul, apresentando-se quente e com temperaturas homogêneas, enquanto que a mEC se forma na superfície aquecida e coberta de florestas da região central do continente, tornando-se uma massa de ar quente e úmida. A mPA é a responsável pelas entradas das frentes frias na região, acompanhadas de mau tempo e intensa redução da temperatura.

Segundo Tolentino (1967) o clima de São Carlos é caracterizado pela existência de duas estações bem definidas pelos seus valores pluviométricos: seca e chuvosa. A estação seca estende-se de maio a setembro, caracterizada por precipitações escassas, nebulosidade baixa, umidade baixa e temperaturas menores. Em média, o mês mais seco é agosto, seguido de

julho. Nesse período predominam a mTA e a mPA sobre a região. As pressões mais elevadas notadas no inverno correspondem a um reforço da mTA. Durante os outros meses a predominância da mEC contribui para a estação chuvosa, com temperaturas elevadas, alta porcentagem de umidade e precipitações abundantes.

Vecchia (1997) relata, em seu trabalho, a entrada de, aproximadamente, 60 massas de ar polar por ano na região de São Carlos que provocam mudanças bruscas no tempo meteorológico da cidade e que, sob a óptica da climatologia dinâmica, caracteriza-se por uma região de passagem de frentes frias ao longo de todo ano.

Para o município de São Carlos pode-se admitir como o normal de pressão: 690,67 mm.Hg. Os ventos mais frequentes nesta região são os de Nordeste, associados à mTA, que predominam durante todos os meses do ano, atingindo sua maior frequência em maio e menor em novembro. Entretanto, ventos de Sudoeste e de Noroeste são observados com a penetração de uma frente, enquanto que ventos de Sudeste são peculiares da fase Domínio de uma massa.

Monteiro (1973) identificou as diferentes feições climáticas do território paulista, dividindo-o, assim, em regiões climáticas (Figura 10). São Carlos encontra-se em uma das três grandes fácies da região V (Centro-Norte), que podem ser distinguidas pela morfologia. A região V é caracterizada fundamentalmente pela existência de um período seco muito nítido. É uma região que conta com grande participação da mTA que em certos invernos é mais ativa nesta área do que no litoral norte submetido a passagens da massa polar.

A primeira das fácies fica na parte setentrional da Depressão Paulista ao Norte de Limeira (Va), caracterizada por pouca nebulosidade e umidade do ar moderada. A Oeste desta faixa tem-se a segunda das fácies, onde se localizam São Carlos e Brotas (Vb). Esta revela um ligeiro aumento na quantidade de precipitação, no entanto permanece unida à área pelo ritmo. Mesmo com um aumento de pluviosidade, por efeito orográfico no inverno, o número de dias de chuva mantém a unidade dentro da área.

O setor norte (Vc) mantém a nitidez do período seco, habitualmente entre 100 e 200 mm de chuva e apenas 10 a 15 dias de precipitação (durante o inverno observam-se valores inferiores a 50 mm e frequência inferior a 5 dias), contrastando com um período chuvoso de maiores valores que os das outras duas fácies.

Climas Zonais	Climas regionais	FEIÇÕES CLIMÁTICAS INDIVIDUALIZADAS NOS CLIMAS REGIONAIS, SEGUNDO AS UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS					
		Litoral	Planalto Atlântico	Vale do Paraíba	Maniqueira	Depressão	Planalto Ocidental
Controlados por massas equatoriais e tropicais	Climas úmidos das costas expostas às massas T_m A_1	I Norte	Bacia superior do Paraíba	III Vale do Paraíba	IV Serra (borda do Planalto)		
	Climas tropicais alternadamente secos e úmidos A_2				Contrafortes	V Setor Norte VI "Percée" do Tietê	Norte Serra de São Carlos VII Serra de Botucatu VIII Oeste
Controlados por massas tropicais e polares	Climas úmidos da face oriental e sub-tropical dos continentes dominado por massa T_m B	II Centro Sul	Bacia Paulistana Bacia do Paranapanema				IX Sudoeste

Figura 10 – Classificação climática do território paulista

Fonte: Monteiro (1973)

CAPITULO 3

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A realização deste trabalho foi dividida em quatro etapas distintas. Na primeira realizou-se uma análise bibliográfica envolvendo os conceitos fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa, o que permitiu identificar as principais características climáticas do objeto de estudo.

Em seguida foi feito um levantamento dos dados climatológicos, coletados em superfície através de estações automáticas, disponíveis para a cidade de São Carlos. Estes foram organizados e padronizados.

A terceira etapa consistiu na definição do período de análise e na escolha do episódio climático. Este trabalho se limitou ao estudo das condições climáticas impostas pelos tipos de tempo de um episódio climático representativo do período de inverno.

Por último, os resultados obtidos foram analisados e discutidos, tornando possível o conhecimento do comportamento do campo térmico na cidade de São Carlos, em suas dimensões temporais, e a identificação da formação de ilhas de calor.

2.1 Aquisição de dados

Como pontos amostrais para a observação do comportamento do campo térmico na cidade de São Carlos foram escolhidos os locais onde estão situadas estações automáticas que coletam dados contínuos de temperatura do ar, umidade relativa, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos, radiação solar incidente e pluviosidade.

As estações automáticas localizam-se em pontos distintos da malha urbana, com diferentes padrões de uso e ocupação do solo e em diferentes cotas altimétricas. As estações encontram-se instaladas nos *Campus* I e II da Universidade de São Paulo (USP), no Residencial Samambaia e na Faculdade de Direito de São Carlos (FADISC). Tais estações foram adquiridas por meio de projetos elaborados por diferentes grupos de pesquisa da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP).

Na Figura 11, por meio de uma imagem de satélite, pode-se visualizar a localização das quatro estações. Observa-se que a região do *Campus I* é a região com maior índice de urbanização, enquanto que o Residencial Samambaia encontra-se numa região de transição entre a zona urbana e a rural.

Figura 11 – Localização das estações automáticas na cidade de São Carlos

Fonte: *Google Earth* (acessado em 30/06/2009)

A Figura 12 ilustra a localização dessas estações sobre modelo digital de terreno, mostrando a conformação do relevo na cidade com indicação das diferentes altitudes em cada estação climática. As cotas altimétricas variam entre 820 metros (*Campus I*) e 900 metros (FADISC).

Figura 12 – a) Localização das quatro estações automáticas na malha urbana de São Carlos sobre modelo digital de terreno, mostrando a conformação do relevo na cidade com indicação das diferentes altitudes em cada estação climática; b) perfil topográfico transversal da área urbana de São Carlos com a localização das quatro estações climáticas

Fonte: Barbosa (2009)

A seguir têm-se as principais características dos equipamentos de cada estação e do seu entorno

2.1.1 Estações climáticas

Estação 1

A Estação 1 encontra-se instalada no *Campus I* da USP, próxima ao Laboratório de Construção Civil (LCC), no bairro Arnold Schmidt, uma porção central da cidade (Figura 13). Está situada a 820 metros acima do nível do mar, numa região de fundo de vale. A distância, em linha reta, entre essa estação e as estações situadas na FADISC, Residencial Samambaia e

Campus II da USP são, respectivamente, 4 km na direção Oeste, 5,5 km na direção Sul e 3 km na direção Sudeste.

Como pode ser observado na Figura 13, asfalto é o tipo de cobertura do solo predominante no entorno da estação. Observa-se também que a área, em comparação com as outras áreas, é densamente construída, apresentando uso tanto residencial quanto comercial.

Figura 13 – Localização da Estação 1
Fonte: *Google Earth* (acessado em 30/06/2009)

Em relação às características do equipamento, a Estação 1 é composta por sensores da *Campbell* (Figura 14), que registram dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (%), radiação solar (W/m^2), velocidade média do vento (m/s), obtida através da média aritmética dos valores de velocidade em intervalos de 30 minutos, a 3 metros solo, momento da velocidade máxima do vento (h), direção do vento ($0 - 360^{\circ}$) e precipitação total (mm). Tais dados, registrados em médias aritméticas em intervalos de 30 minutos, resultaram num total de 48 registros por dia.

Figura 14 – Equipamento de medição da Estação 1
Fonte: Lopes (2007)

A composição instrumental da Estação 1 encontra-se no Quadro 1.

Quadro 1 – Composição da Estação Automática

01 CR21X (<i>Datalogger</i>)	01 Controle de tensão
02 Anemômetros	01 Sensor de temperatura e umidade relativa do ar
01 Anemoscópio	01 Sensor para pressão barométrica
01 Painel Solar	01 Pluviômetro (com báscula de 1 mm de chuva)
01 Bateria Recarregável de 12 V	01 Piranômetro (sensor de radiação solar global)

Fonte: Adaptado de Lopes (2007)

Estação 2

A segunda estação (Estação 2) é parte do projeto *Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Diretor do Município de São Carlos-SP*, financiado pela FINEP em 2002.

Localiza-se nas proximidades da Faculdade de Direito de São Carlos (FADISC), no bairro Vila Nery, porção Leste da cidade (Figura 15) e possui uma cota altimétrica de 900

metros. A distância, em linha reta, dessa estação em relação às estações situadas nos *Campus* I e II da USP e no Residencial Samambaia são respectivamente, 4 km na direção Leste, 7 km na direção Sudeste e 7 km na direção Sul.

Como pode ser observada na figura citada anteriormente, a área é pouco construída e apresenta bastante vegetação, com cobertura do solo predominante de gramíneas. O principal tipo de uso do solo é o residencial.

Quanto às características do equipamento, a Estação 2 trata-se, também, de um equipamento da *Campbell* (Figura 16), composta por sensores de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (%), radiação solar (W/m^2) e pressão atmosférica (mmHg). Os dados foram registrados em médias de intervalos de 30 minutos, totalizando 48 registros diários, assim como foi feito na Estação 1.

Figura 15 – Localização da Estação 2
Fonte: *Google Earth* (acessado em 30/06/2009)

Figura 16 – Equipamento de medição da Estação 2
Fonte: a autora (2009)

Estação 3

A terceira (Estação 3) situa-se no Condomínio Residencial Samambaia, porção Norte da cidade, afastado do centro urbano (Figura 17). A altitude em relação ao nível do mar é de 850 metros. A área é de uso predominantemente residencial, com muitas áreas verdes em seu interior e entorno.

A distância, em linha reta, dessa estação em relação às estações situadas nos *Campus* I e II da USP e na FADISC são respectivamente, 5,5 km na direção Norte, 6,6 km na direção Nordeste e 7 km na direção Noroeste.

Quanto ao equipamento que compõe a estação, ao contrário das outras, a Estação 3 possui um equipamento da *Davis*, modelo *Vantage Pro 2 Wireless*, versão *Plus*, com conjunto de sensores integrados. Tais sensores coletam dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), radiação solar (W/m^2) e precipitação total (mm), que são registrados de 5 em 5 minutos, resultando em 288 registros diários. Para manter o padrão das outras estações, estes foram tabulados em médias aritméticas em intervalos de 30 minutos.

Figura 17 – Localização da Estação 3
 Fonte: *Google Earth* (acessado em 30/06/2009)

Estação 4

A quarta estação (Estação 4) encontra-se no *Campus II* da USP, no Jardim Santa Angelina (Figura 18), porção Oeste da cidade, com uma cota altimétrica de 840 metros. O uso predominante do solo é o residencial, apresentando densidade moderada de construção.

A Estação 4 dista, em linha reta, 3 km na direção Noroeste da Estação 1, 7 km na direção Oeste da Estação 2 e 6,6 km na direção Sudoeste da Estação 3.

Assim como as Estações 1 e 2, esta estação é composta por sensores da *Campbell*, composta por sensores de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa (%), radiação solar (W/m^2), pressão atmosférica (mm de Hg), velocidade do vento a 3 metros do solo (m/s), direção do vento (0 - 360°) e precipitação total (mm). Tais dados, foram registrados em médias aritméticas em intervalos de 30 minutos, resultaram num total de 48 registros diários.

Figura 18 – Localização da Estação 4
Fonte: *Google Earth* (acessado em 30/06/2009)

2.1.2 Tratamento dos dados climáticos

Os dados coletados pelas quatro estações foram organizados e padronizados. Com isso obteve-se um quadro-síntese onde puderam ser observados os dias em que todas as estações registraram, concomitantemente, os dados de temperatura e umidade relativa do ar, pluviosidade, pressão atmosférica, radiação solar incidente e velocidade e direção dos ventos sem falhas (Quadro 2).

Quadro 2 - Quadro-síntese dos dados disponíveis nas cinco estações automáticas no período de inverno (maio/04 a setembro/04)

		dia de referência																															
		Est.	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Maio	1																																
	2																																
	3																																
	4																																
Junho	1																																
	2																																
	3																																
	4																																
Julho	1																																
	2																																
	3																																
	4																																
Agosto	1																																
	2																																
	3																																
	4																																
Setembro	1																																
	2																																
	3																																
	4																																

Legenda:

	Dados inexistentes		Não convém
	Dados incompletos		Convém parcialmente
	Dados completos		Convém

Apesar da existência de quatro estações automáticas, para o ano de 2004 não há registros de dados da Estação 4, sendo assim todo o trabalho foi desenvolvido com os dados registrados pelas outras três estações, adotando a Estação 1 como referência para a área central urbanizada, a Estação 2 para área central menos urbanizada e a Estação 3 como área de transição.

Analisando o Quadro 2 observou-se que os meses mais adequados para serem utilizados seriam junho e julho, entretanto os menores valores de temperatura do ar ocorreram no mês de junho, que foi escolhido como o primeiro recorte do presente trabalho.

2.2 Definição do episódio climático representativo de inverno

Com o mês de junho de 2004 definido como primeiro recorte, o próximo passo do presente estudo foi o delineamento dos episódios climáticos ocorridos nesse mês. Para tanto foram utilizados os dados climáticos registrados pela Estação 1, visto que essa foi a única estação que apresentou dados concomitantes de temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, pressão atmosférica, pluviosidade e direção e velocidade dos ventos.

O comportamento dessas variáveis ao longo do mês pode ser visualizado no Gráfico 1. Os resultados obtidos foram confrontados com as análises do Boletim Climanálise do Centro de Previsão de Tempo e Clima do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

De acordo com o Boletim, no mês de junho, a precipitação foi baixa em grande parte do Brasil. Os maiores valores pluviométricos, superiores a 50 mm, ocorreram no sul de São Paulo e no norte do Espírito Santo. De modo geral, as chuvas observadas ficaram próximos ao comportamento esperado em toda a Região.

Nesse período houve a atuação de sete sistemas frontais. A média climatológica entre as latitudes 35°S e 20°S é de seis sistemas. Os dois primeiros sistemas estiveram associados às massas de ar frio que atuaram na primeira quinzena do mês.

O primeiro sistema frontal configurou-se na altura do litoral do Rio de Janeiro, a partir de uma ciclogênese que se formou próxima ao Rio Grande do Sul, no dia 03. Essa frente fria se deslocou até o litoral do Nordeste, intensificada pela atuação do cavado em altos níveis, posicionando-se sobre o oceano no dia 08. Tal frente proporcionou aumento da nebulosidade e poucas chuvas no litoral das Regiões Sudeste e Nordeste do Brasil. No dia 06, a segunda frente fria atuou no extremo sul da Região Sul, deslocando-se posteriormente para o oceano.

O terceiro sistema frontal originou-se de uma baixa pressão que se configurou sobre a Região Sul no dia 10, causando chuvas que excederam os 50 mm no leste do Rio Grande do Sul e centro-oeste de Santa Catarina e Paraná. Pelo litoral, essa frente fria deslocou-se desde Torres-RS até Caravelas-BA, onde permaneceu estacionária entre os dias 14 e 15. Embora tenha se deslocado pelo interior das Regiões Sudeste e Centro-Oeste, esse sistema frontal apresentou fraca intensidade, proporcionando aumento da nebulosidade e poucas chuvas.

No dia 17, a quarta frente fria ingressou pelo sul do Rio Grande do Sul, com rápido deslocamento até Iguape-SP, indo para o oceano no dia seguinte.

Os quinto e sexto sistemas frontais atuaram rapidamente no litoral das Regiões Sudeste e Sul do Brasil, respectivamente. O sexto sistema frontal, em particular, atuou em conjunto

com o jato em baixos níveis no sudoeste do Brasil, proporcionando chuvas superiores a 40 mm em localidades no oeste do Rio Grande do Sul e no sul do Mato Grosso do Sul, entre os dias 23 e 25.

O último sistema frontal apresentou comportamento similar ao da quarta frente fria, deslocando-se rapidamente desde a Região Sul, no dia 27, até Santos-SP, no dia 28, quando foi para o oceano. Ressalta-se que, no dia 26, houve intensificação da convergência em baixos níveis no oeste do Brasil, com a ocorrência de chuvas que excederam os 50 mm no oeste do Paraná e no sul do Mato Grosso do Sul. (O boletim completo encontra-se no Anexo A)

Como episódio representativo foi escolhido o terceiro sistema frontal, devido às baixas temperaturas registradas entre os dias 12 e 14, que foram inferiores à média das mínimas indicadas pelas Normais Climatológicas (Tabela 1).

Tabela 1 – Normais Climatológicas da cidade de São Carlos para o mês de Junho

Temperatura Mínima	12,0 °C
Temperatura Máxima	22,7 °C
Pressão Atmosférica	890,3 hPA
Precipitação Total	40,4 mm
Umidade Relativa	66,0 %

Gráfico 1 – Comportamento das variáveis climáticas do mês de junho de 2004 através de dados registrados pela Estação 1

O Gráfico 2 ilustra a análise do ritmo para o período compreendido entre o dia 10 e 15 de junho, sendo possível identificar as diferentes etapas da atuação de um sistema frontal.

Gráfico 2 – Análise rítmica do período compreendido entre os dias 10 e 15 do mês de junho de 2004 através de dados registrados pela Estação 1

Cabe lembrar que a etapa Pré-Frontal é composta pelas fases de Prenúncio e Avanço e a fase Pós-Frontal pelas fases de Domínio e Tropicalização. A descrição para cada uma das etapas encontra-se na primeira seção do Capítulo 1.

No capítulo a seguir, tem-se a classificação dos dias compreendidos pelo episódio climático definido no presente estudo de acordo com a etapa e a fase da atuação de um sistema frontal.

CAPITULO 3

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a definição do episódio climático representativo de inverno para o município de São Carlos, o passo seguinte foi analisar a intensidade do campo térmico urbano e investigar a possível formação de ilhas de calor. Para tanto se estudou o comportamento térmico nos três pontos amostrais do município (Estações 1, 2 e 3).

Os resultados obtidos são apresentados na seguinte ordem: inicialmente tem-se a análise horária das variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar incidente, pressão atmosférica, pluviosidade e velocidade e direção dos ventos) coletadas pela Estação 1, acompanhada da imagem do canal 4 (infravermelho) do satélite GOES-12 registrada às 9h (horário local) do dia em estudo e da carta de pressão reduzida ao nível do mar para o mesmo horário.

Posteriormente, para estudo do comportamento térmico e investigação da formação de ilhas de calor e sua intensidade, têm-se os gráficos da variação diária da temperatura do ar das três estações e das diferenças térmicas entre as Estações 1 e 2 (Temperatura do ar registrada na Estação 1 “menos” Temperatura do ar registrada na Estação 2), Estações 1 e 3 (Temperatura do ar registrada na Estação 1 “menos” Temperatura do ar registrada na Estação 3) e Estações 2 e 3 (Temperatura do ar registrada na Estação 2 “menos” Temperatura do ar registrada na Estação 3).

Para uma melhor compreensão dos resultados cabe lembrar que a Estação 1 está localizada numa região central urbanizada, a Estação 2 e uma região central menos urbanizada e a Estação 3 em uma região de transição entre a área urbana e a rural.

○ **Dia 10 de junho de 2004**

O dia 10/06/04 apresentou uma amplitude térmica de 7,8 °C, variando entre 18,0 °C e 25,8 °C, sendo a máxima registrada às 14h30min e a mínima às 7h. Amplitude térmica elevada é uma das características de São Carlos durante todo ano, entretanto, é durante os meses de inverno que ela é mais acentuada.

O comportamento das variáveis meteorológicas para esse dia pode ser visualizado na Figura 19. Os índices de umidade relativa foram elevados ao longo de todo o dia, sendo 50% o valor mínimo, registrado às 14h30min (horário de maior aquecimento) e o máximo, aproximadamente 81%, registrado às 21h.

Entre o final da manhã e início da tarde pôde-se observar um pouco de nebulosidade. Nesse período houve uma redução de 661 W/m^2 (às 11h30min) para 455 W/m^2 (às 12h30min). O pico da radiação solar incidente (669 W/m^2) ocorreu por volta das 13h30min. Em 11,5 horas de insolação o valor médio foi de 315 W/m^2 . Os valores reduzidos se devem aos ângulos de incidência da radiação solar, que resultam em menores ganhos térmicos por absorção no período de inverno (Vecchia, 1997).

Durante a madrugada e o período matutino houve variações nos valores registrados para pressão atmosférica, enquanto que nos períodos vespertino e noturno tal variável permaneceu praticamente constante. O valor mínimo (935 mb) foi observado entre 4 e 5h e o máximo (938 mb) por volta das 10h30min.

Nesse dia não houve registro de dados pluviométricos.

As velocidades dos ventos permaneceram abaixo de $3,0 \text{ m/s}$ ($10,8 \text{ km/h}$) durante a madrugada. No período da manhã pôde-se observar a ocorrência de ventos moderados, atingindo a velocidade máxima de, aproximadamente, $6,0 \text{ m/s}$ ($21,6 \text{ km/h}$) entre 10 e 11h. O termo “moderado” foi atribuído com base na Escala de ventos de Beaufort (Anexo B).

No período matutino houve uma redução nos valores, chegando a $1,0 \text{ m/s}$ ($3,6 \text{ km/h}$). Durante a noite as velocidades voltaram a subir, atingindo valores próximos de $4,0 \text{ m/s}$ ($14,4 \text{ km/h}$).

De acordo com a “rosa dos ventos” apresentada na Figura 20, a direção predominante dos ventos foi de Nordeste, direção típica dos ventos em condições atmosféricas normais no município de São Carlos, com pequena ocorrência de ventos oriundos do quadrante Norte-Leste.

As condições atmosféricas desse dia podem ser atestadas pelas imagens do satélite GOES-12 e da carta de pressão ao nível do mar apresentadas juntamente com os gráficos referentes às variáveis analisadas anteriormente (Figura 19).

a)

b)

c)

Figura 19 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, pressão atmosférica, pluviosidade, velocidade máxima e direção do vento no dia 10/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 10/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 10/06/2004

Figura 20 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 10/06/2004 na Estação 1

No dia 10/06/2004, o comportamento térmico do ar nas três estações foi semelhante, indicando certa homogeneidade no campo térmico urbano. Durante a madrugada todas as estações apresentaram valores reduzidos para a temperatura do ar. No período matutino observou-se um aumento contínuo dos valores, devido ao ganho de energia solar (ondas curtas) e no período noturno uma redução na temperatura, que está relacionada à perda de energia por radiação terrestre (ondas longas). Tal comportamento pode ser visualizado no Gráfico 3.

As Estações 2 e 3 registraram temperatura mínima às 7h30min (17,0 °C e 17,6 °C respectivamente) e a Estação 1 às 7h (18,0 °C). As máximas foram registradas às 14h (24,2 °C) pela Estação 2 e às 14h30min pelas Estações 1 e 3 (25,8 °C e 25,1 °C respectivamente).

Gráfico 3 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 10/06/2004 nas três estações

De acordo com o Gráfico 4, as diferenças térmicas mais significativas ocorreram entre as estações situadas no *Campus* 1 (Estação 1) e na FADISC (Estação 2). A Estação 1 registrou temperaturas, em média, 1,0 °C acima dos valores registrados pela Estação 2 durante a madrugada. No período matutino a diferença máxima foi de 1,6 °C (às 10h30min) e no vespertino 2,0 °C (às 14h30min). Os dados indicam que das 20h30min até as 21h não houve diferença significativa entre os campos térmicos das duas estações. Após esse horário a Estação 1 apresentou-se cerca de 1,0 °C mais aquecida que a Estação 2.

Em relação à Estação 3, a Estação 1 registrou temperaturas mais elevadas em praticamente todo o dia 10/06/2004. Na Estação 3 foram registrados dados de temperatura levemente inferiores durante a madrugada, nos períodos matutino e vespertino a diferença máxima foi de 1,0 °C e à noite 0,6 °C (às 21h30min). Por volta das 20h30min observou-se uma rápida inversão no comportamento térmico das estações.

Comparando as Estações 2 e 3 verificou-se que a segunda esteve mais aquecida do que a primeira em praticamente todo o dia. Durante a madrugada e o período matutino as maiores diferenças observadas foram, respectivamente, 0,8 °C (à 1h30min) e 0,7 °C (entre 9h e 10h30min). A máxima diferença térmica para esse dia (1,3 °C) ocorreu no período vespertino, por volta das 14h30min. No início da noite os registros apontaram uma diferença de 0,7 °C, após as 20h30min os valores foram praticamente constantes (0,4 °C).

Gráfico 4 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 10/06/2004

○ **Dia 11 de junho de 2004**

A Figura 21 apresenta o gráfico referente aos dados climáticos registrados no dia 11/06/2004, acompanhados da imagem do canal infravermelho do satélite GOES-12 e da carta de pressão atmosférica ao nível do mar.

A amplitude térmica observada nesse dia foi 9,3 °C. O valor máximo da temperatura do ar (26,0 °C) foi registrado às 15h30min e o valor mínimo (16,8 °C) às 7h.

A umidade relativa média foi de, aproximadamente, 70%, sendo a máxima (85%) registrada às 7h (horário de menor aquecimento) e a mínima (aproximadamente 47%) às 16h.

O gráfico correspondente à radiação solar mostra que nesse dia houve um pouco de nebulosidade, que também pode ser observada na imagem do satélite GOES-12. Em 11,5 horas de insolação o valor médio da radiação solar incidente foi de 324 W/m², sendo que o pico ocorreu às 13h30min (691 W/m²).

A pressão atmosférica variou entre 936 e 939 mb. Permanecendo praticamente constante durante a madrugada e o período noturno. Durante a manhã houve uma elevação dos valores e na parte da tarde uma redução.

Nesse dia não houve nenhum registro de precipitação.

A velocidade dos ventos foi superior a 4,0 m/s (14,4 km/h) das 8h30min às 14h, sendo registrada a máxima velocidade (4,7 m/s, equivalente a 17 km/h) às 11h30min. Até o final do período matutino a direção predominante dos ventos foi Nordeste, enquanto que no período vespertino houve predominância de ventos do quadrante Noroeste. No final da tarde e durante a noite pôde-se observar períodos de calmaria, em que os valores registrados para a velocidade dos ventos foram muito pequenos ou até mesmo nulos. A Figura 22 ilustra a “rosa dos ventos”, indicando a direção predominante para o dia em questão.

O dia 11/06/2010 pode ser classificado como um dia de Prenúncio, que tem por característica ventos de Nordeste, temperaturas mais elevadas e presença de nuvens do tipo Cirrus.

a)

b)

c)

Figura 21 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 11/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 11/06/2004. c) Carta de pressão ao nível do mar, às 9h do dia 11/06/2004

Figura 22 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 11/06/2004 na Estação 1

No Gráfico 5 pode-se observar o comportamento térmico do ar registrado nas três estações. A Estação situada no *Campus I* da USP apresentou valores mais elevados de temperatura do ar do que as outras duas estações, tanto no período matutino quanto no vespertino. Após o pôr-do-sol os menores valores de temperatura do ar foram registrados nessa estação. A amplitude térmica foi de 9,3 °C, variando entre 16,8 °C (às 7h) e 26,1 °C (às 15h30min). As máximas e mínimas foram registradas nos mesmos horários nas outras duas estações. As amplitudes térmicas foram de 8,1 °C, variando entre 16,2 °C e 24,3 °C na Estação 2 e 8,6 °C na Estação 3 (mínima de 16,3 °C e máxima de 24,9 °C).

Gráfico 5 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 11/06/2004 nas três estações

As diferenças entre os campos térmicos das Estações 2 e 3 em relação à Estação 1 e da Estação 3 em relação a Estação 2 podem ser analisadas através do Gráfico 6. As menores diferenças são observadas entre as Estações 2 e 3, o que já era esperado, visto que as duas se encontram em áreas mais afastadas do centro urbano.

Durante a madrugada a diferença mínima de temperatura do ar registrada entre as Estação 1 e 2 foi de 1,0 °C, e a máxima de 1,5 °C, que ocorreu por volta das 5h30min. Nos períodos matutino e vespertino a Estação 1 chegou a apresentar temperaturas em torno de 2,0 °C mais elevadas do que as registradas pela Estação 2. No período noturno houve uma inversão entre os comportamentos térmicos das estações. Os dados indicam que a Estação 1, situada na área mais urbanizada, esteve menos aquecida do que a Estação 2. A diferença máxima (1,7 °C) ocorreu às 20h.

Comportamento semelhante foi observado entre as Estações 1 e 3. As máximas diferenças térmicas durante a madrugada, manhã e tarde foram, respectivamente, 1,1 °C, 1,6 °C e 1,4 °C. No período noturno a Estação 1, que permaneceu mais aquecida até o momento, apresentou maior resfriamento, registrando, às 22h30min, valor para temperatura do ar 2,2 °C inferior ao registrado pela Estação 3.

Comparando as Estações 2 e 3, estações situadas em regiões menos urbanizadas, observou-se que, durante a madrugada, a Estação 3 esteve mais aquecida do que a Estação 2, sendo que a diferença máxima (0,9 °C) foi observada por volta de 1h30min. Os dados indicam que no início da manhã os valores de temperatura do ar foram bem próximos e às 10h30min a diferença entre as duas estações voltou a ser 0,9 °C. No período vespertino, às 13h, houve uma diferença levemente superior (1,1 °C). Durante a noite, entre 19h30min e 20h30min notou-se uma inversão no comportamento térmico das estações. Após as 20h30min a Estação 3 voltou a registrar temperaturas mais elevadas e por volta das 22h30min observou-se a maior diferença de todo o dia 11/06/2004, que foi de 1,2 °C.

Gráfico 6 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 11/06/2004

○ Dia 12 de junho de 2004

Em relação aos dois dias analisados anteriormente o dia 12/06/2004 apresentou diferenças significativas no comportamento da maioria das variáveis climáticas registradas pela Estação 1 (Figura 23).

Para a temperatura do ar observou-se, até o momento, valores reduzidos durante a madrugada, um aumento contínuo na parte da manhã, atingindo um valor máximo no período vespertino e a partir de então uma redução na temperatura. Comportamento contrário ocorreu para a umidade relativa do ar.

Nesse dia a temperatura máxima (19,2 °C) foi registrada no início da madrugada, à 1h. Os dados apontam uma queda dos valores, atingindo 14,6 °C às 6h30min. A partir desse horário houve um rápido aquecimento e em praticamente toda a manhã a temperatura do ar manteve-se entre 17,0 e 18,0 °C. Nos períodos vespertino e noturno observou-se, novamente, uma queda nos valores de temperatura do ar, sendo a mínima (10,2 °C) registrada às 23h30min, resultando numa amplitude térmica de 9,0 °C.

A umidade relativa permaneceu alta ao longo de todo o dia, em média 91%, sendo registrado o valor mínimo (aproximadamente 74%) à 1h (horário de maior aquecimento) e o valor máximo (96%) no mesmo horário em que se registrou o mínimo valor de temperatura do ar.

Os dados de radiação solar incidente mostram que esse foi um dia nublado, ocorrendo o pico de radiação (120 W/m²) às 14h. Em 11,5 horas de insolação a média foi de 41 W/m², um valor muito inferior aos observados nos dias 10 e 11.

A variação na pressão atmosférica foi 3 mb, com valor máximo de 939 mb (das 10h às 12h) e mínimo de 936 mb (das 3h às 4h30min e das 16h às 16h30min).

Nesse dia houve ocorrência de chuvas, no período entre 9h e 16h30min a precipitação acumulada foi de aproximadamente 16 mm.

Durante a madrugada a velocidade dos ventos foi inferior a 1,0 m/s (3,6 km/h). No decorrer do dia houve uma elevação nos valores, atingindo 4,6 m/s (16,6 km/h) às 15h e a partir de então uma redução. No período noturno a velocidade média foi inferior a 1,0 m/s.

Quanto à direção a Figura 23 e a Figura 24 evidenciam a ocorrência de ventos oriundos do quadrante Norte/Nordeste durante a madrugada e no restante do dia do quadrante Sudoeste/Oeste, com predominância de ventos de Oeste.

Ventos de Sudoeste, Oeste e Noroeste são característicos da fase de Avanço no momento da penetração da massa de ar sobre a região. Tais ventos se devem a reposicionamento dos anticiclones semi-fixos Tropical e Polar Atlântico. Além da alteração no regime dos ventos tal fase também é caracterizada por: redução na temperatura do ar, aumento da umidade relativa, nebulosidade e precipitação.

a)

b)

c)

Figura 23 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 12/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 12/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 12/06/2004

Figura 24 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 12/06/2004 na Estação 1

O comportamento térmico do ar foi semelhante nas três estações e pode ser visualizado no Gráfico 7.

As três estações registraram praticamente o mesmo valor para a temperatura máxima do ar, que ocorreu logo no início da madrugada, enquanto que a mínima ocorreu no final da noite, por volta das 23h30min. As Estações 1 e 3 registraram um valor de, aproximadamente, 10,0 °C e a Estação 2 de 8,7 °C.

Gráfico 7 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 12/06/2004 nas três estações

O Gráfico 8 apresenta as diferenças térmicas do ar entre as três estações observadas no dia 12/06/2004. As curvas referentes às diferenças de temperatura entre a Estação 1 (região mais urbanizada) e as estações situadas em regiões mais afastadas do centro urbano (Estações 2 e 3) apresentaram comportamentos semelhantes.

Durante a madrugada a Estação 1 registrou menores valores para a temperatura do ar do que as Estações 2 e 3. As diferenças mais significativas ocorreram às 5h30min, quando as Estações 2 e 3 registraram, respectivamente, 1,3 °C e 1,6 °C acima do valor registrado pela Estação 1. Configuração inversa foi observada em praticamente todo o restante do dia.

Nos períodos matutino e vespertino as diferenças de temperatura entre as Estações 1 e 2 ficaram em torno de 1,0 °C e por volta das 22h30min observou-se a maior diferença térmica (1,6 °C). Para os mesmos períodos observaram-se valores menores entre as Estações 1 e 3, ocorrendo a maior diferença (0,8 °C) durante a manhã, às 8h30min.

Comparando as Estações 2 e 3, situadas em áreas menos urbanizadas, observou-se que, em praticamente todo o dia, a Estação 3 apresentou-se mais aquecida. Durante a madrugada a Estação 3 chegou a registrar valores para a temperatura do ar cerca de 1,0 °C acima dos registrados pela Estação 2. Durante a manhã e início da tarde as diferenças foram pequenas. Por volta das 15h o valor observado foi de 1,2 °C e partir das 22h30min houve uma elevação contínua chegando a aproximadamente 2,0 °C às 23:30h.

Gráfico 8 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 12/06/2004

○ **Dia 13 de junho de 2004**

A Figura 25 ilustra o comportamento térmico das variáveis climáticas ao longo do dia 13/06/04. Nesse dia a temperatura do ar variou entre 6,9 °C (às 7h30min) e 17,6 °C (às 15h30min), resultando em uma amplitude térmica de 10,7 °C.

A umidade relativa média foi de, aproximadamente, 77%, variando entre 97% (às 2h) e 54% (horário de maior aquecimento).

Com base no gráfico referente à radiação solar incidente pode-se dizer que nesse dia houve predominância de céu claro, somente por volta das 11h houve indício de nebulosidade. A imagem do satélite GOES-12 confirmou a ausência de nuvens sobre a região. O valor máximo da incidência de radiação solar foi 722 W/m², às 12h. Em 11 horas de insolação o valor médio foi de 402 W/m².

A variação na pressão atmosférica foi de 5 mb (a maior variação observada durante o período analisado). Durante a madrugada e início da manhã a pressão atmosférica manteve-se abaixo de 939 mb, sendo registrado o menor valor para tal variável (937 mb) às 7h. A partir desse horário até as 10h30min observou-se um aumento contínuo nos valores, atingindo 941 mb. Durante a tarde houve um decréscimo de 1 mb e durante a noite os dados voltaram a indicar 941 mb, por volta das 23h registrou-se o maior valor para a pressão atmosférica, 942 mb.

Nesse dia houve dois registros de pluviosidade (0,3 mm cada). O primeiro deles ocorreu por volta de 1h30min e o segundo às 8h.

No início da madrugada pôde-se observar um período de calmaria, seguido de ventos com velocidade de, aproximadamente, 2,0 m/s (7,2 km/h). Durante a manhã a velocidade máxima dos ventos foi de 3,8 m/s (13,7 km/h), ultrapassando 4,0 m/s (14,4 km/h) no início da tarde. No restante do período vespertino e início do período noturno as velocidades foram inferiores a 3,0 m/s (10,8 km/h) e por volta das 22h30min registrou-se a velocidade máxima para esse dia, que foi de 4,3 m/s (15,5 km/h), havendo após esse horário uma redução nas velocidades.

A direção predominante dos ventos foi de Sudeste, com ocorrência de ventos de Leste e Sul (Figura 26). Ventos de Sul e Sudeste são peculiares da atuação da mPA e resultam do reposicionamento do anticiclone semi-fixo Polar Atlântico. Tal característica indica que o dia 13/06/2004 esteve sob o Domínio da mPA.

a)

b)

c)

Figura 25 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 13/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 13/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 13/06/2004

Figura 26 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 13/06/2004 na Estação 1

O comportamento térmico do ar nas três estações pode ser visualizado no Gráfico 9. A menor temperatura mínima (5,9 °C) foi registrada pela Estação 2 às 6h30min, enquanto que as Estações 2 e 3 registraram, respectivamente, 6,8 e 6,9 °C às 7h30min. Os valores máximos para a temperatura dos três pontos amostrais foram registrados no mesmo horário, às 15h30min, sendo que o maior aquecimento ocorreu na Estação 1 (17,6 °C). A temperatura máxima registrada nas Estações 2 e 3 foi de aproximadamente 16,0 °C.

Gráfico 9 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 13/06/2004 nas três estações

As diferenças dos valores de temperaturas do ar entre as estações podem ser observadas no Gráfico 10.

Ao longo de todo o dia a Estação 1 se apresentou mais aquecida do que a Estação 2. Por volta das 0h30min a diferença entre as duas foi de, aproximadamente, 2,0 °C. A partir desse horário houve uma aproximação dos valores registrados e por volta das 3h30min a diferença térmica foi inferior a 0,5 °C. A diferença máxima (2,2 °C) ocorreu durante a manhã, por volta das 8h30min. No período da tarde os valores ficaram entre 1,0 e 2,0 °C e durante a noite houve uma redução, sendo 1,4 °C a maior diferença térmica nesse período.

Comparando a Estação 1 com a Estação 2, observou-se que a segunda se apresentou mais aquecida, praticamente, em toda a madrugada. Comportamento inverso foi observado durante o restante do dia. As maiores diferenças térmicas ocorreram pela manhã. Por volta das 8h30min a Estação 1 esteve 2,7 °C mais aquecida que a Estação 2. As diferenças diminuíram gradualmente ao longo do dia, ficando abaixo de 1,0 °C durante a noite.

A Estação 3 registrou, durante a madrugada e a noite, temperaturas mais elevadas do que a Estação 2, ocorrendo a diferença máxima (2,1 °C) por volta da 1h. No período matutino os valores de temperatura não ultrapassaram 0,4 °C e no período noturno chegaram a 1,0 °C.

Gráfico 10 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 13/06/2004

○ Dia 14 de junho de 2004

Nesse dia observou-se a maior amplitude térmica de todo o período analisado. As temperaturas mínima e máxima do ar foram, respectivamente, 6,9 °C (às 4h) e 21,9 °C (às 14h), resultando em uma amplitude térmica de 15,0 °C.

A umidade relativa foi alta durante todo dia, sendo a mínima (64%) registrada no horário de maior aquecimento e a máxima (94%) por volta das 4h30min. A média de umidade relativa foi de, aproximadamente, 82%.

Quanto à radiação solar incidente, pôde-se observar um pouco de nebulosidade após as 12h30min, horário em que a radiação atingiu seu auge (682 W/m²). A média, em 11,5 horas de insolação, foi de 344 W/m².

A variação da pressão atmosférica foi de 3 mb, sendo 939 mb o menor valor registrado (das 15h30min às 17h) e 942 mb o maior (das 9h30min às 12h). Os dados indicam que durante a madrugada e o período noturno a pressão manteve-se praticamente constante.

Por volta das 20h houve um registro de pluviosidade (0,5 mm).

De acordo com os dados de velocidade dos ventos, durante a madrugada houve calma. No período entre 8h30min e 14h a velocidade dos ventos foi superior a 3,0 m/s (10,8 km/h) e por volta das 13h os ventos atingiram a velocidade máxima de 4,0 m/s (14,4 km/h). Tanto no gráfico referente à direção dos ventos da Figura 27 quanto na “rosa dos ventos” (Figura 28) observa-se que a direção predominante foi de Nordeste, com ocorrência de ventos de Norte e Leste.

Nota-se que a temperatura mínima manteve o mesmo valor do dia anterior, entretanto o valor da temperatura máxima foi superior e a direção predominante dos ventos voltou a ser de Nordeste, o que indica um enfraquecimento da mPA, dando início à fase de Tropicalização.

a)

c)

Figura 27 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 14/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 14/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 14/06/2004

Figura 28 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 14/06/2004 na Estação 1

O Gráfico 11 mostra o comportamento térmico do ar registrado nas três estações. Durante a madrugada pôde-se observar um comportamento térmico distinto entre as estações. As temperaturas máximas registradas pelas Estações 1, 2 e 3 foram, respectivamente, 21,9 °C (às 14h), 20,6 °C e 20,9 °C (às 16h), enquanto que as mínimas foram 6,9 °C (às 4h), 7,6 °C (às 0h30min) e 8,4 °C (às 3h30min).

Gráfico 11 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 14/06/2004 nas três estações

No Gráfico 12 têm-se as diferenças térmicas observadas entre as três estações automáticas, comparadas duas a duas.

As diferenças nos valores de temperatura do ar foram significativas, atingindo 4,0 °C (às 4h) entre as Estações 1 e 2; 3,5 °C entre as Estações 1 e 3 (às 5h) e 2,1 °C entre as Estações 2 e 3, às 4h (A Estação 2 mais aquecida que a Estação 3). Quanto às duas últimas estações observou-se, também, uma inversão no comportamento térmico do ar. No início da madrugada a Estação 3 apresentava os maiores valores de temperatura e por volta das 2h30min os dados apontaram um maior aquecimento na Estação 2.

Durante o período diurno a Estação 1 esteve, em média, 1,3 °C mais aquecida do que a Estação 2, atingindo uma diferença máxima de 1,8 °C entre 8h e 8h30min e por volta das 14h. Durante a noite as diferenças nas temperaturas entre as duas estações oscilaram em torno de 1,0 °C.

Quanto à Estação 3 observou-se que durante os períodos matutino e vespertino as diferenças térmicas também ficaram em torno de 1,0 °C. Durante a noite os registros indicaram uma queda nos valores de temperatura e a partir das 22h a diferença no campo térmico das duas estações foi praticamente nula.

Comparando as Estações 2 e 3 observou-se que a Estação 3 permaneceu mais aquecida durante praticamente todo o dia. As diferenças térmicas máximas foram de 1,1 °C (às 8h), 0,6 °C (às 13h30min e 15h30min) e 1,3 °C (às 22h30min).

Gráfico 12 – Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 14/06/2004

○ Dia 15 de junho de 2004

A Figura 29 ilustra o comportamento das variáveis climáticas durante o dia 15/06/2004. A amplitude térmica registrada foi de 8,3 °C e a umidade relativa média de, aproximadamente, 83%. Às 15h30min foram observados o valor máximo de temperatura do ar (21,9 °C) e o mínimo da umidade relativa (61%). No final da noite, por volta das 23h30min registrou-se o inverso, temperatura mínima de 13,6 °C e umidade relativa máxima de 93%.

O gráfico referente à radiação solar incidente indica a presença de nebulosidade entre 12h30min e 13h30min, horário do pico da radiação (694 W/m²). Para esse dia o valor médio foi de 284 W/m². Na imagem do satélite GOES-12 foi possível observar a presença de nuvens sobre parte do Estado de São Paulo.

A pressão atmosférica variou entre 941 mb (das 10h30min às 11h) e 937 mb (das 15h30min às 17h30min). Pequenos valores pluviométricos (1,5 mm) foram registrados no período matutino, entre 7h30min e 8h.

Durante a madrugada a velocidade dos ventos oscilou em torno de 1,0 m/s (3,6 km/h). Por volta das 8h registrou-se a máxima velocidade, de 4,4 m/s (15,8 km/h). No período entre 10h30min e 14h30min os valores ficaram entre 2,0 e 3,0 m/s (7,2 e 10,8 km/h respectivamente). Após esse horário os ventos tiveram menor velocidade, podendo-se observar após as 17h períodos de calmaria.

De acordo com o gráfico referente à direção dos ventos e com a “rosa dos ventos” apresentada na Figura 30 a direção predominante dos ventos foi Nordeste, com ocorrência de ventos oriundos dos quadrantes Oeste e Norte.

Na carta de pressão ao nível do mar apresentada na Figura 29 pôde-se observar o que anticiclone situado sobre o sudeste do país apresentou-se mais fraco que no dia anterior e que o sistema frontal que atuou em São Carlos já se encontrava sobre o oceano Atlântico. Sendo assim o dia 15/06/2004 pôde ser enquadrado na fase de Tropicalização da mPA.

Notou-se também que a temperatura máxima foi a mesma do dia 14/06/2010, no entanto houve uma elevação considerável no valor da temperatura mínima do ar, que se deve ao efeito da tropicalização da massa de ar.

a)

b)

c)

Figura 29 – a) Análise horária da temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, direção e velocidade dos ventos no dia 15/06/2004. b) Imagem do satélite GOES-12, canal infravermelho, às 9h do dia 15/06/2004. c) Carta de pressão reduzida ao nível do mar, às 9h do dia 15/06/2004

Figura 30 – Rosa dos ventos indicando a direção predominante dos ventos no dia 15/06/2004 na Estação 1

O Gráfico 13 mostra os dados de temperatura do ar registrados pelas três Estações automáticas, a cada meia hora, ao longo do dia 15/06/2004. Na Estação 3 só houve registro dos dados até às 15h, impossibilitando a análise completa do comportamento térmico para este dia.

Gráfico 13 – Comportamento térmico do ar registrado no dia 15/06/2004 nas três estações.

Durante a madrugada os valores de temperatura do ar registrados nas Estações 1 e 3 mantiveram-se entre 15,0 e 16,0 °C, enquanto que na Estação 2 ficaram entre 14,0 e 15,0 °C.

As temperaturas máxima e mínima na primeira estação foram, respectivamente, 21,9 °C (às 15h30min) e 13,6 °C (às 22h30min). O maior valor para a temperatura do ar nas outras duas estações foi de 20,4 °C, sendo 15h o horário de maior aquecimento na Estação 2 e 14h na Estação 3. Os valores mínimos registrados nessas estações foram 14,2 °C (às 8h30min) e 14,6 °C (às 8h), respectivamente.

As diferenças entre os campos térmicos dos três pontos amostrais podem ser visualizadas no Gráfico 14.

Durante a madrugada a Estação 1 apresentou-se mais aquecida do que a Estação 2, sendo que a diferença entre os dados coletados não ultrapassaram 0,9 °C. Durante o período matutino houve um aumento da diferença de temperatura, chegando a 2,0 °C por volta das 11h30min. Durante a tarde notou-se uma variação entre 2,6 °C (às 13h30min) e 0,5 °C (às 16h). No final da tarde e início da noite observou-se uma rápida redução nas diferenças e por volta das 20h houve uma inversão no comportamento térmico. A Estação 1 que permaneceu mais aquecida durante praticamente todo o dia apresentou maior resfriamento após as 20h. Por volta das 22h os dados indicaram uma diferença de 1,3 °C, valor que permaneceu praticamente constante até a madrugada do dia seguinte.

Devido à falta de dados da Estação 3 a análise das diferenças do comportamento térmico do ar entre essa e as Estações 1 e 2 só foi possível para as primeiras 14,5 horas do dia 15/06/2004. As diferenças entre as Estações 1 e 3 não foram muito significativas durante a madrugada e início da manhã. Por volta do meio-dia a Estação 1 registrou valores de temperatura cerca de 1,0 °C mais elevado do que a Estação 2 e às 15h (último valor registrado nesse dia) a diferença entre a temperatura do ar das duas estações atingiu 1,5 °C.

A Estação 3 apresentou valores superiores aos registrados pela Estação 2. Durante a madrugada essa diferença foi praticamente constante, em torno de 0,8 °C. No final da manhã observou-se uma elevação dessa diferença, chegando a 1,2 °C às 11h. Tal valor foi novamente alcançado por volta das 13h30min e após esse horário os dados indicaram uma possível inversão no comportamento térmico do ar das Estações. Entretanto não é possível dizer se essa inversão foi momentânea ou se perdurou no restante do dia.

Gráfico 14 — Diferenças no comportamento térmico do ar entre as três estações registradas no dia 15/06/2004

Para facilitar a compreensão dos resultados apresentados anteriormente as tabelas a seguir mostram parte desses resultados agrupados de acordo com a fase do episódio representativo de inverno (Prenúncio, Avanço, Domínio e Tropicalização).

A Tabela 2 refere-se aos dados registrados pela Estação 1 e facilita a visualização dos tipos de tempo atuante em cada uma das fases do episódio. Nessa pode-se observar a amplitude térmica (ΔT) diária, os horários em que ocorreram as temperaturas máxima ($T_{\text{máx}}$) e mínima ($T_{\text{mín}}$), as umidades relativas máxima ($UR_{\text{máx}}$), mínima ($UR_{\text{mín}}$) e média ($UR_{\text{méd}}$), a máxima radiação solar incidente ($R_{\text{máx}}$), o horário em que ocorreu a $R_{\text{máx}}$, a radiação solar média ($R_{\text{méd}}$), a variação na pressão atmosférica (ΔP), a pluviosidade acumulada, a velocidade máxima do vento ($v_{\text{máx}}$) e sua direção.

Tabela 2 – Resultados obtidos por meio da Estação 1, durante o episódio representativo de inverno

		<i>Prenúncio</i>	<i>Avanço</i>	<i>Domínio</i>		<i>Tropicalização</i>
Temperatura	ΔT	9,3 °C	9,0 °C	10,7 °C	15,0 °C	8,3 °C
	Hora $T_{\text{mín}}$	7:00	23:00	7:30	4:00	23:30
	Hora $T_{\text{máx}}$	15:30	1:00	15:30	14:00	15:30
Umidade Relativa	$UR_{\text{máx}}$ (%)	85	96	97	94	93
	$UR_{\text{mín}}$ (%)	47	74	53	64	61
	$UR_{\text{méd}}$ (%)	70	91	77	82	83
Radiação Solar	$R_{\text{máx}}$ (W/m ²)	691	120	722	682	694
	Hora $R_{\text{máx}}$	13:30	14:00	12:00	12:30	1:30
	$R_{\text{méd}}$ (W/m ²)	324	41	402	344	284
Pressão Atmosférica	ΔP (mb)	3	3	5	3	4
Pluviosidade	(mm)	0	16	0,6	0,5	1,5
Vento	$v_{\text{máx}}$ (m/s)	4,7	4,6	4,3	4,0	4,4
	Direção	NE	W	SE	NE	NE

A Tabela 3 é composta por dados de temperatura do ar registrados pelas três estações durante o episódio representativo de inverno. Além dos valores de temperaturas do ar mínima ($T_{\text{mín}}$) e máxima ($T_{\text{máx}}$) tem-se também o horário em que essas ocorreram e a amplitude térmica (ΔT).

Na Tabela 4 podem-se visualizar as máximas diferenças de temperatura do ar observadas entre as três estações, permitindo diagnosticar, com maior facilidade, os períodos em que ocorreu a formação da ilha de calor e a sua intensidade. A primeira coluna (ΔT_E) representa as diferenças térmicas observadas entre as estações, comparadas duas a duas ($T_{E1} - T_{E2}$: temperatura da Estação 1 “menos” temperatura da Estação 2; $T_{E1} - T_{E3}$: temperatura da

Estação 1 “menos” temperatura da Estação 3; temperatura da Estação 2 “menos” temperatura da Estação 3). Os valores em azul indicam valores positivos e os valores em vermelho indicam valores negativos.

Tabela 3 – Dados de temperatura do ar registrados em cada estação, durante o episódio representativo de inverno

		<i>Prenúncio</i>	<i>Avanço</i>	<i>Domínio</i>		<i>Tropicalização</i>
<i>Estação 1</i>	$T_{\min}$	16,8 °C	10,2 °C	6,9 °C	6,9 °C	13,6 °C
	Horário $T_{\min}$	7h	23h30min	7h30min	4h	23h30min
	$T_{\max}$	26,1 °C	19,2 °C	17,6 °C	21,9 °C	21,9 °C
	Horário $T_{\max}$	15h30min	1h	15h30min	14h	15h30min
	ΔT	9,3 °C	9,4 °C	10,7 °C	15,0 °C	8,3 °C

<i>Estação 2</i>	$T_{\min}$	16,2 °C	8,7 °C	5,9 °C	7,6 °C	14,2 °C
	Horário $T_{\min}$	7h	23h30min	6h30min	0h30min	8h30min
	$T_{\max}$	24,3 °C	19,3 °C	15,9 °C	20,5 °C	24,0 °C
	Horário $T_{\max}$	15h30min	1h	15h30min	16h	15h
	ΔT	8,1 °C	10,6 °C	10,0 °C	12,9 °C	6,4 °C

<i>Estação 3</i>	$T_{\min}$	16,3 °C	10,3 °C	6,8 °C	8,4 °C	14,6 °C
	Horário $T_{\min}$	7h	23h30min	7h30min	3h30min	8h
	$T_{\max}$	24,9 °C	19,3 °C	16,1 °C	20,9 °C	24,0 °C
	Horário $T_{\max}$	15h30min	0h30min	15h30min	16h	14h
	ΔT	8,6 °C	9,0 °C	9,3 °C	12,5 °C	5,8 °C

Tabela 4 – Diferenças máximas na temperatura do ar entre as estações, durante o episódio representativo de inverno

ΔT_E		<i>Prenúncio</i>	<i>Avanço</i>	<i>Domínio</i>		<i>Tropicalização</i>
$T_{E1} - T_{E2}$	Madrugada	1,5	1,3	1,9	4,0	0,9
	Manhã	2,0	1,2	2,2	1,8	2,0
	Tarde	2,1	1,5	2,1	1,8	2,6
	Noite	1,7	1,6	1,4	1,4	1,4

$T_{E1} - T_{E3}$	Madrugada	1,1	1,6	0,8	3,5	0,4
	Manhã	1,6	1,5	2,7	1,2	1,1
	Tarde	1,4	0,4	1,8	1,7	1,5
	Noite	2,2	0,5	0,6	0,6	Sem dados

$T_{E2} - T_{E3}$	Madrugada	0,9	1,1	2,1	2,1	0,8
	Manhã	0,9	0,6	1,3	1,1	1,2
	Tarde	1,1	1,2	0,8	0,6	1,2
	Noite	1,2	1,8	1,0	1,3	Sem dados

CAPITULO 4

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados e discutidos no capítulo anterior mostram que, no período de inverno, o campo térmico na cidade de São Carlos não é homogêneo. Com base nos três pontos amostrais tomados para o presente estudo pode-se dizer que, além das condições impostas pelos diferentes tipos de tempo, as características locais, tais como urbanização e vegetação, interferem no campo térmico local.

Dentro da abordagem dinâmica do clima foi possível identificar e caracterizar os tipos de tempo atuantes do período de inverno, compreendidos em um episódio climático representativo de inverno. Além de analisar a intensidade das diferenças de temperatura do ar existentes entre áreas distintas do meio urbano, dentro de suas variações diurnas e das variações impostas pelos diferentes tipos de tempo.

Através de uma análise quantitativa da intensidade da ilha de calor urbana, os resultados obtidos no presente estudo contribuem para uma maior compreensão da configuração do campo térmico urbano de São Carlos, durante o período de inverno. Através de tal análise pôde-se observar que a intensidade da ilha de calor urbano está relacionada ao cenário atmosférico imposto pelos diferentes tipos de tempo, sendo mais representativa no domínio da frente.

Em praticamente todo o período analisado as maiores amplitudes térmicas e temperaturas máximas mais altas foram observadas na Estação 1, localizada numa região central urbanizada.

Na fase do Prenúncio, caracterizada por temperaturas mais elevadas, a maior temperatura máxima foi registrada pela Estação 1, enquanto que as mínimas registradas pelas três estações tiveram valores semelhantes. As três estações registraram as temperaturas mínima e máxima no mesmo horário, respectivamente, às 7h e às 15h30min. Na presença de ventos fracos e pouca nebulosidade as maiores diferenças térmicas entre as Estações 1 e 2 e 1 e 3 foram observadas nos períodos matutino e vespertino, nos quais a Estação 1 esteve cerca de 2,0 °C mais aquecida do que a Estação 2 e em média 1,5 °C que a Estação 3.

Durante a noite pôde-se observar comportamento inverso, ou seja, maior resfriamento na Estação 1 do que nas outras estações. Tal comportamento se deve ao fato da Estação 1

estar localizada em uma região de fundo de vale, que é uma região sensível à ocupação urbana e que possui um micro clima peculiar. Quanto às Estações 2 e 3 as maiores diferenças térmicas ocorreram durante a noite, onde a Estação 3 apresentou-se cerca de 1,2 °C mais aquecida que a Estação 2.

Durante a fase de Avanço da mPA notou-se uma maior homogeneidade no campo térmico da cidade de São Carlos. A presença de nebulosidade ao longo de todo o dia e os elevados índices de umidade relativa do ar podem ter contribuído para tal configuração. Os valores registrados para as temperaturas máxima e mínima foram bem próximos, quando não iguais. Nessa fase pôde-se observar um comportamento do campo térmico urbano distinto da fase anterior. Devido o avanço da frente fria ao longo do dia, as temperaturas máximas foram registradas durante a madrugada, enquanto que as mínimas no período noturno.

Durante a madrugada a Estação 1 registrou temperaturas inferiores às registradas pelas outras estações, tal comportamento se deve, possivelmente, à presença de nebulosidade sobre a região, fazendo com que a radiação terrestre (onda longa) permanecesse na camada intra-urbana. Nos períodos matutino, vespertino e noturno as temperaturas foram, em média, 1,4 °C superiores às da Estação 2. Quanto à Estação 3, observou-se comportamento contrário durante a manhã.

No Domínio da mPA, fase em que a região esteve sob o predomínio das condições de tempo impostas pela massa, observaram-se as maiores amplitudes térmicas e os menores valores de temperaturas mínimas. Durante a madrugada, manhã e tarde a Estação 1 registrou temperaturas em torno de 2,0 °C mais elevadas do que a Estação 2. Em relação à Estação 3, a diferença térmica chegou a atingir 2,7 °C, indicando a possível formação de ilha de calor.

No segundo dia dessa fase (dia 14/06/2004), em que a já havia indícios de um enfraquecimento da mPA, foi possível observar uma inversão na configuração térmica durante a madrugada, nesse período as Estações 2 e 3 apresentaram maior aquecimento do que a Estação 1. No período diurno essa se manteve mais aquecida e as diferenças térmicas ficaram entre 1,0 e 2,0 °C.

Durante a fase de Tropicalização as três estações registraram valores semelhantes para a temperatura mínima do ar. As Estações 2 e 3, localizadas respectivamente nas regiões central menos urbanizada e de transição entre a zona urbana e rural, apresentaram o mesmo valor para a temperatura máxima, enquanto que a estação localizada na região central mais urbanizada (Estação 1) registrou temperatura inferior, cerca de 3,0 °C. Novamente as maiores

diferenças térmicas entre as três estações foram observadas nos períodos matutino e vespertino.

Com base nos resultados conclui-se que, durante o inverno, a ilha de calor é mais pronunciada no período diurno, durante a fase de Domínio da mPA, em que predominam condições de céu claro. Em tais condições pôde-se constatar que o entorno construído influencia o comportamento térmico da malha urbana, gerando diferenças térmicas de 2,0 até 3,0 °C entre as regiões monitoradas.

Tal comportamento está de acordo com o trabalho realizado por Camargo e Tavares (1985) para a cidade de Rio Claro (SP), distante aproximadamente 65 km da cidade de São Carlos. Os autores também encontraram indícios da formação de ilhas de calor na cidade no período diurno, durante o inverno.

O presente trabalho pode ser comparado ao estudo de Barbosa (2009) que, através da mesma metodologia adotada neste, estudou o comportamento térmico de São Carlos no período de verão, encontrando diferenças térmicas entre os mesmos pontos amostrais de até 5,0 °C durante a atuação da mTA. Através dessa comparação é possível concluir que para a cidade de São Carlos as maiores intensidades da ilha de calor ocorrem no verão. Este comportamento é coerente ao esperado para cidades de latitudes médias, onde a intensidade da ilha de calor tende a ser maior no verão (LANDSBERG, 1981; OKE, 1982), evidenciando que essa maior intensidade não se deve ao calor antropogênico, visto que a sua geração tende a ser máxima durante o período de inverno (UNWIN, 1980).

Com base em tudo que foi dito anteriormente, conclui-se que os objetivos iniciais propostos nessa tese foram alcançados. Assim, espera-se que as análises anteriores e as conclusões obtidas com o presente estudo sirvam de contribuição para o planejamento urbano, proporcionando uma melhor qualidade de vida para a população.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F.F. M. (1974) *Fundamentos geológicos do relevo paulista*. IGEOG, Séries Teses e Monografias, n. 14.

ASSIS, E.S. (2003) Métodos preditivos da climatologia como subsídios ao planejamento urbano; aplicação em conforto térmico. *Terra Livre*, v. 1, n. 30, p. 145-158. Jan/Jul.

BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L. C. L.; TORRES, S. C. (2007) – *Clima e cidade: A abordagem climática como para estudos urbanos*. UFAL, Maceió.

BARBOSA, R.V.R (2009). *Estudo do campo térmico urbano de São Carlos (SP): análise da intensidade da ilha de calor urbano em episódio climático de verão*. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

CAMARGO, J. C. G.; TAVARES, A. C. (1985) A influência da cidade de Rio Claro na temperatura e na umidade do ar. *Rio Claro, Geografia*, 10(20), outubro, p.149-168.

CARACRISTI, I. (2002) Geografia e representações gráficas: uma breve abordagem crítica e os novos desafios técnico-metodológicos perpassando pela climatologia. *Revista Brasileira de Cartografia*, 55/02.

CLIMANÁLISE: boletim de monitoramento e análise climática (2004). Cachoeira Paulista, SP: CPTEC/INPE, v. 19, n. 6. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/0604/index.html>. Acesso em: 23 jan. 2008.

CUADRAT, J.M.; PITA, M.F. (1997) *Climatologia*. Ediciones Cátedra, España, 496p.

FONTES, M.S.G.C. (1998) *Efeito climático das áreas de fundo de vale no ambiente urbano: O Caso de São Carlos - SP*. (Tese – Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

GIVONI, B. (1981) *Man, climate and architecture*. Londres, 2º ed, Applied Science Publishers, 483p.

_____ (1989) *Urban design in different climates*. W.M.O./TD-No.346, Dez.

GOMES, M.A.S.; AMORIM, M.C.C.T. (2003) Arborização e conforto térmico no

espaço urbano: Estudo de caso nas praças públicas de Presidente Prudente (SP). *Caminhos da Geografia*, v. 7, n. 10, p. 94-108, set.

LANDSBERGER, H.E. (1974) *Energy and the social sciences: An examination of research needs*. Resources for the Future, Washington.

_____ (1981) *The urban climate*. New York: Academic Press, 276p.

LOMBARDO, M.A. (1985) *Ilha de calor nas metrópolis: o exemplo de São Paulo*. São Paulo. Hucitec.

LOPES, L.A.R. (2007) *Análise do Comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura*. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

LOWRY, W. (1967) The climate of cities. *Scientific American*, v. 217, n. 2, p. 15-24.

MODNA, D.; VECCIA, F. (2003) *Calor e Áreas Verdes: um estudo preliminar do clima de São Carlos, SP*. ENCAC – COTEDI 2003, Curitiba – PR – Brasil, 5 a 7 de novembro de 2003.

MONTEIRO, C. A. de F. (1971) *Análise rítmica em Climatologia: problemas da atualidade climática e achegas para um programa de trabalho*. São Paulo, Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo (IGEO – USP). Série Climatologia n° 1.

_____ (1973) *A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo: estudo geográfico sob a forma de atlas*. São Paulo, Instituto de Geografia da USP.

_____ (1976) *Teoria e Clima Urbano*. São Paulo: IGEOG, Universidade de São Paulo (Série Teses e Monografias, 25).

_____ (1991) *Clima e Excepcionalismo: Conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico*, 2ª Ed, Florianópolis, Ed. da UFSC, 233p.

NIMER, E. (1979) *Climatologia do Brasil*. Série Recursos Naturais e Meio Ambiente, n° 4, 422p, Rio de Janeiro.

OKE, T.R. (1981) Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparisons of scale model and field observation. *J. Clim.* 1, p. 237-254.

_____ (1982) The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, p.1-24.

_____ (1987) *Boundary Layer climates*. 2^a ed. Londres, Methven & Co, 372p.

OLIVEIRA, P. M. P. de, (1987) *Cidade Apropriada ao clima: a forma urbana como instrumento de controle do clima urbano*. Tese (mestrado) – Universidade de Brasília.

OLIVER, J. E. (1987) *The encyclopedia of climatology*. New York, Van Nostrand Reinbold, p. 889-901.

PITTON, S. E. C. (1997) *As cidades como indicadoras de alterações térmicas*. São Paulo, 272 p. Tese (Doutorado em Ciências) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

PMSC (2004) – Prefeitura Municipal de São Carlos. *Plano Diretor de São Carlos I: diagnóstico da Cidade*, Proc. 2146.03, PL 215, Cd-rom.

SORRE, M. (1951) *Le climat. Les fondements de la géographie humaine*. Paris: Armand Colin.

SOUZA, L.C.L. (1996) *Influência da geometria urbana na temperatura do ar ao nível do pedestre*. 1996. 100 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

TOLENTINO, M. (1967) *Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos*. Concurso de monografias municipais. São Carlos.

UNWIN, D.J. (1980) The synoptic climatology of Birmingham's urban heat island. *Weather*, v.35, p. 43-50.

VECCHIA, F. A. S. (1997) *Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano*. São Paulo. 316p. (Tese – Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

VIANELO, R. L; ALVES, A. R. (1991) *Meteorologia Básica e Aplicações*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 449p.

VOOGT, J.A.; OKE, T.R. (2003) Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, v.86, p.370-384.

WENG, Q. (2001) A remote sensing-GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, Londres, v.22, n.10, p.1999-2014.

ANEXOS

ANEXO A – BOLETIM CLIMANÁLISE, JULHO DE 2004

Durante o mês de junho, choveu pouco em grande parte do Brasil. Entretanto, os setores norte e leste da Região Nordeste apresentaram totais de precipitação acima da média, com ocorrência de transtornos e perdas materiais na zona urbana. O cenário mudou na Região Sul do Brasil, onde se observou predominância de chuvas abaixo da média histórica. Na Região Norte, destacaram-se chuvas abaixo da média principalmente no norte de Roraima, no noroeste do Amazonas e em parte do Pará.

Os sistemas frontais atuaram em sete episódios e apenas dois, no início do mês, estiveram associados à entrada de massas de ar frio. Houve declínio acentuado de temperatura nas áreas serranas da Região Sul e na Região Sudeste do Brasil.

A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) continuou com anomalias características de neutralidade no Pacífico, ou seja, sem indicar episódios associados ao fenômeno ENOS.

As queimadas aumentaram em relação a maio passado, o que pode ser considerado normal nos períodos de estiagem. Em comparação ao mesmo período do ano passado, houve aumento de aproximadamente 30% em todo o País.

Análise da Precipitação no Brasil

Em junho, destacaram-se as chuvas observadas no leste da Região Nordeste do Brasil. A ocorrência de aglomerados de nuvens associados à propagações de distúrbios de leste, proporcionou valores que ultrapassaram, em até 300 mm a média histórica no litoral de Alagoas. As Figuras 13 e 14 mostram a precipitação observada em todo o Brasil e os desvios em relação aos valores médios históricos. A distribuição espacial das estações utilizadas na análise de precipitação é mostrada na Figura 15. A análise detalhada do comportamento das chuvas para cada uma das Regiões do Brasil é feita a seguir.

Região Sudeste

Os maiores totais de precipitação, superiores a 50 mm, ocorreram no sul de São Paulo e no norte do Espírito Santo. De modo geral, as chuvas observadas ficaram próximas à

climatologia em toda a Região, com destaque para os valores acima da média, em até 100 mm, no extremo norte do Espírito Santo.

Perturbações Atmosféricas sobre o Brasil: Sistemas Frontais e Frontogênese

Sete sistemas frontais atuaram no mês de junho (Figura 22). A climatologia é de seis sistemas entre as latitudes 35°S e 20°S. Os dois primeiros sistemas estiveram associados às massas de ar frio que atuaram na primeira quinzena do mês. Houve apenas uma ciclogênese que se configurou no início de junho e foi intensificada pela formação de um vórtice ciclônico e cavado nos médios e altos níveis da atmosfera.

O primeiro sistema frontal configurou-se na altura do litoral do Rio de Janeiro, a partir de uma ciclogênese que se formou próximo ao Rio Grande do Sul, no dia 03. Esta frente fria deslocou-se até o litoral do Nordeste, intensificada pela atuação do cavado em altos níveis, posicionando-se sobre o oceano no dia 08. Esta frente proporcionou aumento da nebulosidade e poucas chuvas no litoral das Regiões Sudeste e Nordeste do Brasil. No dia 06, a segunda frente fria atuou no extremo sul da Região Sul, deslocando-se posteriormente para o oceano.

O terceiro sistema frontal originou-se de uma baixa pressão que se configurou sobre a Região Sul no dia 10, causando chuvas que excederam os 50 mm no leste do Rio Grande do Sul e centro-oeste de Santa Catarina e Paraná. Pelo litoral, esta frente fria deslocou-se desde Torres-RS até Caravelas-BA, onde permaneceu estacionária entre os dias 14 e 15. Embora tenha se deslocado pelo interior das Regiões Sudeste e Centro-Oeste, este sistema frontal apresentou fraca intensidade, proporcionando aumento da nebulosidade e poucas chuvas.

No dia 17, a quarta frente fria ingressou pelo sul do Rio Grande do Sul, com rápido deslocamento até Iguape-SP, indo para o oceano no dia seguinte.

O quinto e sexto sistemas frontais atuaram rapidamente no litoral das Regiões Sudeste e Sul do Brasil, respectivamente. O sexto sistema frontal, em particular, atuou em conjunto com o jato em baixos níveis no sudoeste do Brasil, proporcionando chuvas superiores a 40 mm em localidades no oeste do Rio Grande do Sul e no sul do Mato Grosso do Sul, entre os dias 23 e 25.

O último sistema frontal apresentou comportamento similar à quarta frente fria, deslocando-se rapidamente desde a Região Sul, dia 27, até Santos-SP, dia 28, quando foi para o oceano. Ressalta-se que, no dia 26, houve intensificação da convergência em baixos níveis

no oeste do Brasil, com a ocorrência de chuvas que excederam os 50 mm no oeste do Paraná e no sul do Mato Grosso do Sul.

FIGURA 22 - Seções estação versus tempo dos sistemas frontais que penetraram no Brasil em JUNHO-2004. As linhas indicam que a frente passou pela estação entre 09:00 (HL) do dia anterior e às 09:00 (HL) do dia indicado.(Fontes: 7.DISME e CPTEC)

Massas de Ar Frio e Geadas

Duas massas de ar frio, com características continentais, favoreceram o declínio de temperatura entre os dias 06 e 07 e no período de 12 a 15 de junho. No Rio Grande do Sul, foram registrados episódios de geada em 11 municípios, com destaque para José Castilhos e Farroupilha, onde foi notado o maior número de dias com geadas (5). A segunda massa de ar frio foi mais intensa, atingindo regiões do sul da Amazônia, como a cidade de Vilhena, em Rondônia. No município de Bom Jesus-RS, registrou-se temperatura mínima igual a 13°C, no dia 11, passando a -4°C no dia 12.

ANEXO B – ESCALA DE BEAUFORT

Grau	Classificação	Velocidade do ar		Influência em terra
		Km/h	m/s	
0	Calmaria	0-1	0-0,5	A fumaça sobe verticalmente.
1	Aragem	2-6	0,6-1,7	A direção da aragem é indicada pela fumaça, mas a grimpadora ainda não reage.
2	Brisa leve	7-12	1,8-3,3	Sente-se o vento no rosto, movem-se as folhas das árvores e a grimpadora começa a funcionar.
3	Brisa fraca	13-18	3,4-5,2	As folhas das árvores se agitam e as bandeiras se desfraldam.
4	Brisa moderada	19-26	5,3-7,4	Poeira e pequenos papéis soltos são levantados. Movem-se os galhos das árvores.
5	Brisa forte	27-35	7,3-9,8	Movem-se as pequenas árvores. Nos a água começa a ondular.
6	Vento fresco	36-44	9,9-12,4	Assobios na fiação aérea. Movem-se os maiores galhos das árvores. Guarda-chuva usado com dificuldade.
7	Vento forte	45-54	12,5-15,2	Movem-se as grandes árvores. É difícil andar contra o vento.
8	Ventania	55-65	15,3-18,2	Quebram-se os galhos das árvores. É difícil andar contra o vento.

9	Ventania forte	66-77	18,3-21,5	Danos nas partes salientes das árvores. Impossível andar contra o vento.
10	Tempestade	78-90	21,6-25,1	Arranca árvores e causa danos na estrutura dos prédios.
11	Tempestade violenta	90-104	25,2-29,9	Muito raramente observado em terra.
12	Furacão	>105	>30	Grandes estragos.