

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE INTERFERÊNCIAS CAUSADAS PELA
RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E PELA VELOCIDADE DOS VENTOS EM
MEDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS DA TEMPERATURA DO AR

Aluno: Marcos José de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Francisco Arthur Silva Vecchia

Monografia apresentada ao curso de
graduação em Engenharia Ambiental
da Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo como
Trabalho de Conclusão de Curso.

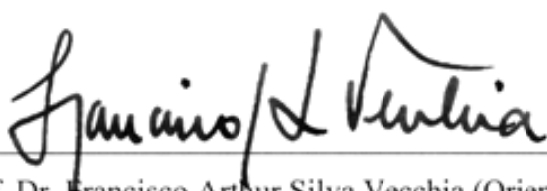
São Carlos, SP

2007

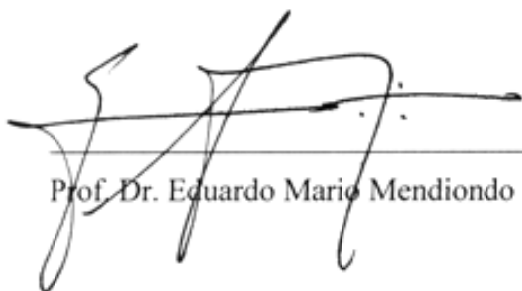
FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Marcos José de Oliveira

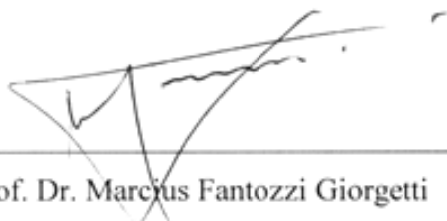
Monografia defendida e aprovada em: 03 de dezembro de 2007 pela Comissão Julgadora:



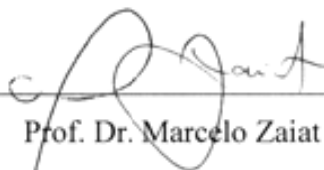
Prof. Dr. Francisco Arthur Silva Vecchia (Orientador)



Prof. Dr. Eduardo Mario Mendiolo



Prof. Dr. Marcus Fantozzi Giorgetti



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina SHS-0342- Trabalho de Graduação

*A ciência se compõe de erros que,
por sua vez, são os passos até a verdade.*

Júlio Verne

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida.

Aos meus pais, Marcos e Nicélia, pelos princípios e valores.

Ao Prof. Dr. Francisco Vecchia, pela orientação e amizade.

Aos amigos, Anthony e Rodrigo, pela colaboração essencial.

À FAPESP, pela bolsa de iniciação científica.

À Thermaltake do Brasil, pela doação de ventoinhas.

À EESC, pela minha formação na graduação em Engenharia Ambiental.

A todos os docentes que se dedicaram ao curso.

Aos meus irmãos, Nelson e Antônio, pela convivência.

Aos amigos de república: Érik (Pincel), Simon (Sassá) e Francisco (Pancho).

A Rose, recepcionista do SHS, pela carinho e dedicação.

A todos os funcionários da USP de São Carlos.

RESUMO

OLIVEIRA, M. J. **Avaliação experimental de interferências causadas pela radiação solar global e pela velocidade dos ventos em medições climatológicas da temperatura do ar.** 2007. 127p. Monografia. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

A presente investigação tratou da verificação e quantificação da influência da radiação solar global e da velocidade do vento nas medições automáticas de temperatura exterior do ar. O estudo foi realizado por meio de uma estação experimental climatológica automática, CR10X Campbell Scientific Inc., sendo as medições de temperatura tomadas por sensores termoeletricos do tipo termopar, acondicionados em quatro diferentes tipos de abrigos meteorológicos e, assim, avaliaram-se as diferenças dos valores de temperatura obtidas no interior destes abrigos. Para avaliação da influência da radiação, utilizou-se um material isolante plástico de superfície metalizada (*foil*); e para avaliação da interferência da ventilação, utilizou-se de aspiração forçada do abrigo, que foi obtida pela instalação de ventiladores comumente utilizados em microcomputadores (ventoinha). Na série de dados coletados, e comparando as temperaturas obtidas nos diferentes abrigos para um mesmo horário, verificou-se uma diferença máxima de valores de temperatura de 3,7 °C em um dia representativo de condição ensolarada, diferença observada entre o abrigo sem proteção contra radiação solar global e sem ventilação forçada em relação ao abrigo com isolamento térmico e com ventilação forçada. Os dados de radiação solar e da velocidade dos ventos foram coletados simultaneamente de forma automática e, a partir deles, foram feitas as análises da influência desses dois parâmetros, tomados de forma combinada e isoladamente. Verificou-se que as diferenças entre os valores das temperaturas obtidos são diretamente proporcionais à intensidade de radiação solar global e, ao contrário, inversamente proporcionais à velocidade dos ventos. Os resultados obtidos permitiram chegar à conclusão de que a ventilação forçada é um efeito atenuante significativo e mais eficiente que o uso de isolamento térmico.

Palavras-chave: Climatologia Dinâmica, aquecimento global, erros em medições de temperatura do ar, abrigos térmicos de termômetros.

ABSTRACT

OLIVEIRA, M. J. **Experimental evaluation of interference caused by global solar radiation and the wind speed in climatological measurements of air temperature.** 2007. 127p. Monography. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

The present study dealt with the verification and quantification of the influence of the global solar radiation and the wind speed on the automatic measurements of the air temperature. The study was carried through an experimental climatological automatic station, CR10X Campbell Scientific Inc., and the measurements of temperature were taken by thermocouple sensors, conditioned in four different types of meteorological shields and, thus, had evaluated the differences of the values of temperature between these shelters. For evaluation of the influence of the radiation, a plastic isolating material with metallized surface (foil) was used; and for evaluation of the interference of the ventilation, was used forced aspiration from the shield, obtained by the installation of fans, commonly used in microcomputers. In the series of collected data, and comparing the temperatures gotten in the different shields, the maximum difference of temperature values verified was 3,7 °C in one sunny representative day, difference observed between the shield without protection against global solar radiation and without forced ventilation in comparison to the shield with thermal insulation and forced ventilation. The data for solar radiation and the wind speed had been collected simultaneously and had been made the analysis of the influence of these two parameters, taken in combined and separately way. It was verified that the differences between the values of the measured temperatures are directly proportional to the intensity of global solar radiation and, in contrast, inversely proportional to the wind speed. The results obtained allow the conclusion that the forced ventilation is a significant attenuating effect and more efficient than the use of thermal insulation.

Keywords: Dynamic Climatology, global warming, air temperature measurements errors, air temperature radiation shields/screens.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo das escalas empregadas nos estudos climáticos..	17
Figura 2 – Termógrafo.....	26
Figura 3 – Principais características de um termômetro de mercúrio	27
Figura 4 – Sistema automático de aquisição de dados Campbell Scientific Inc.....	29
Figura 5 – Detalhes da caixa ambientalmente selada e os componentes do sistema automático de aquisição de dados.....	30
Figura 6 – Sensor de Temperatura e Umidade Relativa do ar modelo HMP45C.....	31
Figura 7 – Modelo de um termômetro de resistência de platina	33
Figura 8 – Sensor HMP45C e abrigo de radiação 41003	33
Figura 9 – Representação esquemática do princípio de funcionamento de um termopar.....	34
Figura 10 – Gráfico do comportamento da temperatura sob influências da cobertura vegetal exibindo o padrão cíclico da variação diária da temperatura externa do ar tomado em dois bairros da cidade de São Carlos, bosque correspondendo a uma região melhor vegetada e a praça correspondendo ao espaço árido do centro da cidade	38
Figura 11 – Gráfico do dia 25 de janeiro demonstrando o comportamento da temperatura sob influências da incidência da radiação solar direta, contendo os registros da temperatura externa do ar, tomada em abrigo meteorológico, sem isolamento e sem aspiração do ar, que ocasionou essa aparência de “orelhas”, às 7h30 e às 16h30 distorcendo a senóide habitual	39
Figura 12 – Representação esquemática, com vista em planta, da disposição dos abrigos de proteção.....	49

Figura 13 – Representação gráfica do conjunto de termopares com diferentes abrigos de PVC de 4 polegadas	51
Figura 14 - Comportamento da temperatura ao longo do dia 13 de maio de 2006 para os diferentes abrigos em estudo.....	56
Figura 15 – Diferenças de temperatura ao longo do dia 13 de maio de 2006 para os diferentes abrigos em estudo.	57
Figura 16 – Histogramas: distribuição das diferenças relativas ao abrigo #3.....	58
Figura 17 – Correlações dos valores das medições de temperatura entre os abrigos...	59
Figura 18 – Distribuição das diferenças dos valores de temperatura ao longo do dia.	60
Figura 19 – Mês de maio de 2006, sob escala de abordagem de episódios climáticos .	62
Figura 20 – Imagens em infravermelho captadas pelo satélite GOES para as fases da massa de ar fria com entrada no dia 16 de maio de 2006.....	64
Figura 21 – Correlações da diferenças de temperatura <i>versus</i> radiação solar global...	66
Figura 22 – Distribuição em representação do tipo <i>boxplot</i> das diferenças de temperatura <i>versus</i> radiação solar, em condições de velocidade do vento externo abaixo de 1 m/s	67
Figura 23 – Correlações das diferenças de temperatura <i>versus</i> velocidade média do ar externo.....	69
Figura 24 – Distribuição em representação do tipo <i>boxplot</i> das diferenças de temperatura <i>versus</i> velocidade do vento exterior, em condições de radiação solar acima de 150 w/m ²	70
Figura 25 – Temperatura dos abrigos ao longo da noite da passagem do dia 13 para o dia 14 de setembro de 2006.....	71
Figura 26 – Diferenças de temperatura dos abrigos ao longo da noite da passagem do dia 13 para o dia 14 de setembro de 2006	72

Figura 27 – Análise dos dias 26, 27 e 28 de maio de 2006 com o uso do sensor HMP45C acoplado ao abrigo 41003.....	75
Figura 28 – Imagens em infravermelho captadas às 12h pelo satélite GOES nos dias 12, 15 e 16 de setembro	78
Figura 29 – Temperatura dos abrigos ao longo do dia 12 de setembro de 2006, com registros realizados a cada 5 minutos.	79
Figura 30 – Temperatura dos abrigos ao longo do dia 12 de setembro de 2006, com registros realizados a cada 30 minutos.....	79
Figura 31 – Diferenças de temperatura dos abrigos ao longo do dia 12 de setembro de 2006, abrigo #3 como referência, com registros a cada 5 minutos.....	81
Figura 32 – Diferenças de temperatura dos abrigos ao longo do dia 12 de setembro de 2006, abrigo #3 como referência, com registros a cada 30 minutos.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constituição dos abrigos experimentais.....	50
Tabela 2 – Valores de temperatura (°C) obtidos pelo sensor HMP45C comparados aos abrigos experimentais.....	76
Tabela 3 – Valores de temperatura (°C) nos diferentes abrigos, sob diferentes intervalos de registros	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
CIMO	Commission for Instruments and Methods of Observation
GOES	Geostationary Operational Environment Satellite
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISO	International Organization for Standardization
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
TECO	Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation
WMO	World Meteorological Organization
T1	Temperatura do abrigo experimental #1
T2	Temperatura do abrigo experimental #2
T2	Temperatura do abrigo experimental #3
T3	Temperatura do abrigo experimental #4
41003	Abrigo térmico do sensor de temperatura
AM16/32	Multiplexador
CR10X	Sistema automático de aquisição e armazenamento de dados (<i>datalogger</i>)
HMP45C	Sensor de temperatura
PC208W	Programa aplicativo de importação dos dados do <i>datalogger</i>
PS12	Bateria do <i>datalogger</i>
SC32A	Interface de comunicação entre <i>datalogger</i> e computador

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	grau Celsius
m	metro
s	segundo
V	Volt
W	Watt

SUMÁRIO

RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	2
1.2. REFERENCIAL TEÓRICO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	4
2. OBJETIVOS	5
2.1. OBJETIVO PRINCIPAL	5
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
3. REVISÃO DA LITERATURA	7
3.1. O CLIMA	7
3.1.1. Tempo e clima.....	7
3.1.2. Abordagens clássica e dinâmica.....	8
3.1.2.1. Climatologia Clássica	8
3.1.2.2. Climatologia Dinâmica.....	9
3.1.3. Frentes e massas de ar	10
3.1.4. Ritmo climático e episódios representativos	11
3.1.5. Componentes climáticos	12
3.1.5.1. Fatores genéticos.....	13

3.1.5.2. Fatores modificadores.....	14
3.1.5.3. Fatores resultantes (elementos climáticos)	15
3.1.6. Escalas de abordagem têmporo-espacial	15
3.1.7. O clima de São Carlos	17
3.1.7.1. Visão clássica.....	18
3.1.7.2. Visão dinâmica	18
3.2. TEMPERATURA.....	19
3.2.1. Definição e erros	19
3.2.2. Transmissão de calor	21
3.2.2.1. Condução.....	21
3.2.2.2. Convecção.....	22
3.2.2.3. Radiação	23
3.3. MEDIÇÕES CLIMATOLÓGICAS DA TEMPERATURA DO AR	24
3.3.1. Modalidades terrestres de medição	25
3.3.1.1. Estação meteorológica clássica	25
3.3.1.2. Estação meteorológica automática.....	29
3.3.2. Interferências nas medições terrestres.....	35
3.3.2.1. Influência da cobertura vegetal	36
3.3.2.2. Influência da incidência de radiação solar direta	39
3.3.2.3. Influência do ambiente construído.....	40
3.3.2.4. Influências dos ventos e da radiação solar nos abrigos térmicos.....	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1. EQUIPAMENTOS.....	47
4.1.1. Equipamentos de campo	47
4.1.1.1. Estação experimental.....	48
4.1.1.2. Estação de referência.....	48
4.1.2. Equipamentos de gabinete	48
4.2. PROCEDIMENTOS.....	49
4.2.1. Instalação da estação experimental e aquisição dos dados.....	49
4.2.2. Análise preliminar dos dados e determinação de episódios	52

4.2.3. Aquisição de imagens de satélite	53
4.2.4. Elaboração de gráficos e análise dos dados.....	54
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
5.1. ANÁLISE DOS EFEITOS.....	55
5.1.1. Dia típico representativo	55
5.1.2. Correlação entre as temperaturas dos diferentes abrigos.....	58
5.1.3. Episódio climático	61
5.2. ANÁLISE DAS CAUSAS.....	65
5.2.1. Correlação das temperaturas com a radiação solar global.....	65
5.2.2. Correlação das temperaturas com o fluxo dos ventos.....	68
5.3. ANÁLISES COMPLEMENTARES	71
5.3.1. Perdas por radiação noturna	71
5.3.2. Comportamento do sensor HMP45C-Vaisala acoplado ao abrigo 41003	74
5.3.3. Alteração da escala temporal de aquisição de dados	77
6. CONCLUSÃO	84
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICES.....	97

1. INTRODUÇÃO

A temperatura do ar na superfície terrestre (troposfera) é uma das variáveis básicas no estudo e na análise do clima, devido a sua atual e relevante possível atribuição dos impactos de responsabilidade da ação antrópica nas mudanças climáticas globais, representando ainda uma tarefa difícil e complexa na Meteorologia Operacional e na Climatologia, e demandando atenção contínua da sociedade científica (VAN DER MEULEN; BRANDSMA, 2007).

Uma vez realizada a medição de temperatura, esta requer armazenamento, transmissão e envio a um sistema de registros digitais. Em todas essas etapas, erros ou modificações, potencialmente incorretas e não registradas, podem ser incorporados à série de dados (THORNE et al., 2005).

A ordem de grandeza dos valores do aumento da temperatura média global está em torno dos décimos de graus centígrados. Entretanto, os erros de medição relativos aos sensores de temperatura são de maior magnitude que as diferenças dos registros da temperatura média global desde o início do século (LIN, 1999).

Qualquer erro na aquisição de registros da temperatura implica na redução da confiança nas previsões não só das condições climáticas existentes, assim como das

previsões das mudanças do clima, ou na determinação de possíveis mudanças climáticas em distintas escalas de abordagem tempo e espaço.

Pesquisas atuais têm focado na identificação e na remoção destes erros, sendo crucial estarem aptas na distinção das mudanças climáticas reais e das virtuais, estas causadas por mudanças de técnicas de observação e mudança de abrigos térmicos para os sensores de temperatura (SPETALEN; LOFSEIK; NORDLI, 2000).

1.1. Justificativa

A temperatura do ar na superfície terrestre é um elemento do clima de grande importância, justificando a necessidade de estudos que quantifiquem a magnitude da relação de dependência das condições climáticas com as diferenças de temperatura obtidas devido a diferentes fatores interferentes nos processos de medições.

Neste contexto de atualidade e relevância da pesquisa no panorama mundial, a presente investigação tratou da verificação e quantificação da influência da radiação solar global e da velocidade do vento nas medições de temperatura exterior do ar.

1.2. Referencial teórico

As investigações realizadas, de caráter experimental, tiveram em comum o método baseado nos princípios da Climatologia Dinâmica, que, no Brasil, teve seus fundamentos alicerçados por intermédios de Monteiro (1973) como uma abordagem que considera a gênese do clima, os processos atmosféricos e os elementos do espaço geográfico que nele interferem.

A aplicação da abordagem dinâmica representou um aspecto essencial neste estudo, pois, entre outras vantagens, permitiu discernir quais foram os processos que governaram as flutuações do tempo meteorológico (circulação geral e regional da atmosfera), considerando-se a atuação de sistemas atmosféricos (massas de ar) e, identificando episódios representativos do clima e dias típicos experimentais, de acordo com Vecchia (1997) e Vecchia e Nolasco (2005).

Os resultados apresentam qualitativa e quantitativamente as diferenças observadas ao longo de episódios climáticos representativos do clima, escolhidos dentre os períodos de medição realizados ao longo do ano, descrevendo as modalidades de medição, os tipos de sensores, as variações determinadas na forma de medições (à sombra, velocidade do vento, insolação, aspiração do ar por entre os sensores, etc.)

Ressalte-se que a proposta desta pesquisa se restringiu à verificação das diferenças existentes devido à ação desses elementos do clima, radiação e ventilação, não se tratando de analisar a acurácia e a precisão dos sensores existentes. Além disso, também se restringe ao registro das condições em que essas variações ocorreram. A pesquisa considerou os estados atmosféricos – domínio das massas de ar atuantes no momento das medições, e os valores da radiação e da velocidade do ar tomados, no mínimo, em valores horários – com registros pontuais tomados a cada vinte segundos, totalizando 180 medições por hora.

1.3. Organização do trabalho

Além da introdução (item 1), em que se justifica o propósito da realização e as bases teóricas utilizadas no trabalho, o conteúdo está dividido em:

- Item 2: retrata os objetivos gerais e específicos do trabalho;
- Item 3: exhibe temas e conceitos utilizados na elaboração da pesquisa, tais como conceitos de clima (abordagens clássica e dinâmica, ritmo climático, episódios representativos, escalas de abordagem do clima, entre outros); temperatura (definições e erros, mecanismos de transmissão de calor); e por fim, medições climatológicas da temperatura do ar (tipos de modalidade de medições, e diferentes influências nas medições).
- Item 4: descreve os equipamentos de campo (estações experimental e de referência) e equipamentos de gabinete utilizados (computador, *hardware* e *software*), assim como os procedimentos realizados nas diferentes etapas do trabalho para atingir os objetivos propostos.
- Item 5: trata dos resultados e discussão obtidos a partir dos dados experimentais, apresentando análise dos efeitos e causas das interferências nas medições de temperatura.
- Item 6: apresenta as considerações finais do trabalho, conclusões, recomendações e contribuições da pesquisa.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo principal

O objetivo principal do estudo foi adquirir e analisar dados obtidos experimentalmente de medições automáticas da temperatura do ar, por meio da utilização de sensores termoeletricos (termopares do tipo T) acondicionados em abrigos expostos a diferentes condições de radiação solar e de velocidade dos ventos, verificando a influência destes fatores externos na obtenção dos valores de temperatura climatológica do ar.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos que conduziram a investigação foram:

- Montar e instalar uma estação experimental constituída por abrigos que permitam registrar, por meio de termopares, a temperatura em abrigos expostos a diferentes condições de radiação solar e de velocidade dos ventos, de forma que essas variáveis sejam analisadas combinada e isoladamente.
- Analisar os dados provenientes das medições de temperatura da estação experimental e medições meteorológicas da estação de referência, de modo a determinar a influência qualitativa e quantitativa dos fatores interferentes.

- Estabelecer comparações e correlações que permitam entender a magnitude da influência da radiação solar global e da velocidade dos ventos, assim como verificar a eficiência de atenuação dos dispositivos – barreira contra radiação (*foil*) e ventilação forçada (ventoinhas) – aplicados aos abrigos.
- Utilizar conceitos de episódios representativos do fato climático tomados em escala regional e microclimática, e de dias típicos experimentais, com base nos conceitos da abordagem dinâmica do clima.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. O Clima

3.1.1. Tempo e clima

Algumas considerações são necessárias para a compreensão dos fenômenos climáticos. A primeira dela é a própria definição e diferenciação entre *tempo* e *clima*. Ambas são combinações realizadas por certos valores de elementos climáticos, tais como temperatura do ar, umidade, pressão, regime de ventos, pluviosidade, entre outros. Tais combinações são chamadas de *estado da atmosfera*. O *tempo* se caracteriza por um estado passageiro e efêmero da atmosfera; enquanto que o *clima* é caracterizado por um conjunto de tendências estáveis e duradouras, oriundas de combinações permanentes analisadas e estudadas ao longo de um período, definido por normas, de no mínimo 30 anos (VECCHIA, 1990).

Vecchia (1990) sintetiza os dois conceitos, definindo:

O *tempo* é o estado atmosférico, num dado momento, considerado em relação a todos os fenômenos meteorológicos. Esse estado atmosférico variável e que sob certas condições permite identificar, ao longo do tempo, algumas de suas peculiaridades que, caracterizadas, se constituem no que se denomina de *clima*.

Portanto, o *clima* pode ser entendido como um conjunto de elementos estudados por meio de registros meteorológicos ao longo de muitos anos, enquanto

que o conceito de tempo pode ser visto como a experiência atual, momentânea, ou seja, que expressa as condições atmosféricas observadas em um determinado instante na atmosfera (CUNHA; VECCHIA, 2007).

3.1.2. Abordagens clássica e dinâmica

A Climatologia – área do conhecimento na qual se estudam as características da atmosfera em contato com a superfície terrestre e a divisão espacial dessas características – apresentou uma evolução nos conceitos de clima, em que se verificam duas diferentes abordagens: a *clássica* e a *dinâmica*.

3.1.2.1. Climatologia Clássica

As definições clássicas do clima, propostas por Hann¹ (1882, apud SORRE, 2006) e Köppen² (1948, apud PITTON, 1985) compreendiam o clima como o estado médio da atmosfera sobre um lugar, fundamentadas em parâmetros estáticos, cujo objetivo era calcular as médias, abrangendo longas séries de observações e, por meio da avaliação de cada uma destas e de sua comparação, se chegar à caracterização do clima.

Porém, de acordo com Conti³ (1997, apud SILVA, 2001), as dificuldades encontradas nessa abordagem quando do trato da realidade e o elevado grau de

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.

³ CONTI, J. B. Epistemologia: Métodos e Técnicas em Geografia Física – Climatologia. In: **VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA**. V. II. Curitiba: UFPR, 1997.

abstração do método. A Climatologia Clássica não vai além da descrição, quase nada contribuindo para a explicação ou gênese dos fenômenos climáticos.

3.1.2.2.Climatologia Dinâmica

No início da segunda metade do séc. XX, rompendo com a concepção estática do clima, Sorre (1951) foi o responsável pela introdução de uma definição do clima como a “síntese do tempo” ou “ambiente atmosférico constituído pela série de estados da atmosfera acima de um dado local, em sua sucessão habitual” (Tipos de Tempo).

A grande vantagem desse conceito de clima, segundo Tarifa e Armani (2001), é o dinamismo que se atribuiu ao clima, dado pela sucessão habitual. Enquanto que para Hann (1882) o que definia o clima de um lugar era o estado médio da atmosfera, o movimento e o encadeamento de tipos de tempo vinculam-se mais com a vida e com as práticas sociais e econômicas.

A Climatologia Dinâmica consiste no estudo do clima por meio de eventos climáticos, abordagem distinta da proposta clássica, esta que estuda o clima utilizando-se de medições de longos períodos e desvinculada das condições dos fenômenos da atmosfera (SPECIAN, 2003).

No Brasil, essa visão da climatologia foi introduzida por Monteiro (1969, 1971 e 1973), que define o clima como sendo a “sucessão habitual dos tipos de tempo”. Nimer⁴ (1979, apud SPECIAN, 2003) destaca a importância dos estudos de massas de

⁴ NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Série recursos naturais e Meio Ambiente, N. 4. Rio de Janeiro: FIBGE – Superintendência de Recursos Naturais e Meio Ambiente (SUPREN). 1979.

ar como fundamento da climatologia moderna. O estudo do deslocamento, frequência e intensidade das massas de ar, constituem a base da climatologia dinâmica.

A análise dinâmica do clima volta-se ao estudo do ritmo climático de uma determinada localidade. Segundo Monteiro (1971), o ritmo climático só poderia ser compreendido por meio da representação concomitante dos elementos fundamentais do clima, em unidade de tempo cronológico, pelo menos diários, compatíveis com a representação da circulação atmosférica regional, geradora dos estados atmosféricos que se sucedem e constituem o fundamento do ritmo.

Para Monteiro (1969), o ritmo é a essência da análise dinâmica, sendo que a seqüência, sucessão de tipos de tempo, ou seja, encadeamento dos estados atmosféricos sobre determinado local, é que conduz ao ritmo. Dessa forma, a análise dinâmica reveste-se de um estudo dos tipos de tempo, sobre um determinado lugar, considerando os valores reais registrados e usando a análise do ritmo climático para interpretar o fenômeno atmosférico.

3.1.3. Frentes e massas de ar

Entre os conceitos meteorológicos mais difundidos, destacam-se as *massas de ar* e as *frentes*. *Massa de ar* é definida como uma grande porção de ar, de grande espessura, que apresenta certa homogeneidade horizontal, em que as propriedades físicas são quase uniformes no mesmo nível, principalmente em relação à temperatura e umidade (ANUNCIACÃO, 1984). Por *frente* entende-se que é a linha de contato dentre duas massas de ar, de qualidades diferentes, formando uma instabilidade

térmica e barométrica, sendo, portanto, uma zona de instabilidade (DEFFUNE, 1993).

3.1.4. Ritmo climático e episódios representativos

Podem-se identificar ciclos de acordo com a penetração de massas de ar frio sobre uma dada região: as massas polares, por exemplo, a massa Polar Atlântica (mPA), em que ocorrem entradas no sudeste brasileiro ao longo do ano todo, variando-se a intensidade e o rigor das mesmas.

A sucessão de entradas de massas polares sobre o sudeste brasileiro permite ainda identificar o seu padrão cíclico, denominado por Monteiro (1967), de sucessão encadeada de tipos de tempo. Esse encadeamento de tipos de tempo remete ao estudo dinâmico do clima, situação em que os mecanismos da circulação da atmosfera são imprescindíveis para a sua compreensão. Decorre dessa abordagem a constituição de *episódios de clima*, seqüência de dias em que ocorre a atuação de uma massa de ar polar, dividida em quatro fases distintas:

1. *Prenúncio* da penetração de uma massa polar sobre a região definida;
2. *Avanço* da frente fria sobre a região (momento da entrada da frente e efetiva atuação da massa polar);
3. *Domínio* da massa polar; e
4. *Transição* ou *Tropicalização* da massa polar.

De acordo com Monteiro (1967), os estados atmosféricos podem ser subdivididos em duas categorias básicas: a etapa *pré-frontal* e a *pós-frontal*.

- *Pré-frontal*: expressa os períodos que antecedem a penetração da frente fria e é subdividida nas fases de prenúncio e avanço. Caracteriza-se pela elevação dos valores de temperatura do ar e pela redução dos valores da umidade do ar; e na fase de avanço, pela queda da pressão atmosférica e pela ruptura do regime de ventos predominantes – ocorrência de ventos com velocidades muito acima dos valores habituais (rajadas).
- *Pós-frontal*: expressa os períodos que sucedem a penetração da frente fria e divide-se nas fases de domínio e transição. É caracterizado pela redução dos valores de temperatura do ar e pela elevação da umidade do ar, dependendo das propriedades da massa de ar dominante. Pode estar acompanhada de períodos chuvosos e com ventos predominantes nesse período, oriundos de direções distintas das da fase anterior, apresentando comportamento também diferenciado de suas velocidades. Percebe-se também um aumento da pressão atmosférica.

Os episódios podem ser recortados de acordo com a necessidade de cada estudo, sem perder a precisão e a representatividade dos dados meteorológicos, que, obedecendo à gênese do clima, permite análise mais apurada e conclusões mais próximas da realidade concreta.

3.1.5. Componentes climáticos

O estudo do clima e o conhecimento de sua gênese implicam necessariamente no entendimento dos fatores relacionados à circulação atmosférica e marítima global e

os elementos fisiográficos que atuam como modificadores do clima em diversas regiões (SILVA, 2001).

3.1.5.1.Fatores genéticos

Os fenômenos meteorológicos têm origem na radiação solar e nas circulações atmosférica e marítima, fatores dinâmicos que condicionam inicialmente o clima.

- *Radiação solar*: fator predominante e mais importante do clima, pois promove processos de trocas térmicas globais em função do aquecimento da superfície terrestre. A absorção de energia é maior na faixa equatorial (superávit energético), decrescendo com o aumento das latitudes até os pólos (déficit de energia). O processo de transferência da energia absorvida na faixa equatorial em direção aos pólos ocorre por meio da circulação geral da atmosfera e das correntes marítimas (STRAHLER⁵, 1971, apud CARLETTO, 2005).
- *Circulação geral da atmosfera*: este fator decorre da ação combinada de dois fatores principais: a *força térmica* – a exemplo da lei dos cossenos, da lei das massas e o fotoperíodo, que tende a igualar o aquecimento diferencial das diversas zonas, estabelecendo uma circulação meridiana (sentido norte-sul); e a *força dinâmica* – provocada pela rotação da terra e que introduz uma profunda modificação no fluxo de ar (força de Coriolis), que tende a definir uma circulação zonal (sentido leste-oeste) (VECCHIA, 2001).
- *Correntes marítimas*: transferem o calor das regiões quentes para as regiões frias, por meio de suas correntes quentes. O mesmo processo, inversamente,

⁵ STRAHLER, A. N. **The earth sciences**. 2d. Ed. New York: Harper & Row. 1971.

arrefece as regiões menos quentes, com a ação das correntes frias. As correntes atuam de duas maneiras principais sobre o espaço geográfico: aumentando os valores de pressão de vapor d'água (umidade do ar); e modificando o regime de ventos predominantes (VECCHIA, 2001).

3.1.5.2. Fatores modificadores

Uma vez determinadas as condições iniciais do clima, fatores estáticos (geográficos, topológicos, biológicos e culturais) atuam sobre elas e criam variações localizadas. Quase sempre, essas variações assumem magnitudes extraordinárias, sendo necessária a distinção em escalas climáticas (macro, meso, local e microclima).

Vecchia (1990) resume os principais fatores modificadores na seguinte ordem decrescente de magnitude:

- *Geográficos*: latitude; altitude/elevação acima do nível do mar; e relação entre massas de terra e água.
- *Topográficos*: elevação; orientação do sol; e estrutura do solo.
- *Biológicos*: fauna (incluindo os microorganismos) e flora.
- *Culturais*: alterações do solo pelo ambiente construído (asfalto, edificações); poluição atmosférica (poeira, fuligem, gases do efeito estufa); modificação da dinâmica hidrológica (redução da capacidade de retenção de água devido ao aumento do escoamento superficial e redução da infiltração – impermeabilização).

3.1.5.3. Fatores resultantes (elementos climáticos)

A designação *elementos do clima* é preferível em relação a *elementos meteorológicos*, uma vez que a primeira é mais ampla e inclui não só as condições dos fenômenos meteorológicos (fatores genéticos), mas, igualmente, as influências exercidas pelas condições exercidas pelas condições do local (fatores modificadores).

Segundo Vecchia (1990, 2001), os elementos do clima são:

- *Temperatura do ar;*
- *Umidade do ar;*
- *Pressão atmosférica;*
- *Ventos predominantes (direção e velocidade);*
- *Nebulosidade; e*
- *Precipitações atmosféricas (chuva, neve, granizo).*

3.1.6. Escalas de abordagem têmporo-espacial

A escolha adequada da escala de abordagem, no tempo e espaço, é componente importante na análise dos elementos do clima, tendo em vista a adequação da representatividade e a resolução dos dados climáticos com os quais se trabalha.

Nesse contexto, Cuadrat e Pita (1997) ressaltam que na análise de clima é comum diferenciar quatro escalas, onde cada uma delas tem características próprias e permite níveis de generalizações. São elas:

- *Macroclimática:* ou clima zonal, que representa o campo das grandes áreas geográficas, de milhares de km² de superfície, controlado pela circulação geral

da atmosfera. A permanência temporal de um estado climático, nesta escala, pode durar de uma semana a alguns meses.

- *Mesoclimática*: ou clima regional, que constitui uma faixa do clima zonal de dimensões lineares variando entre 200 a 2000 km, com tempo de atuação de 1 a 30 dias. A compreensão dos climas de escala regional apóia-se na busca do ritmo da variação anual, sazonal e mensal dos elementos do clima e estes, por sua vez, estão ligados aos centros de ação intermediários, que ocorrem entre a circulação geral e secundária, e podem ser representados pelas massas de ar e frentes.
- *Local*: corresponde a unidades menores do clima regional, apresentando significativas variações em seu interior devido à ação de determinadas feições fisiográficas ou antrópicas, com extensão no sentido horizontal entre 100 e 1.000 m, e no sentido vertical, em torno de 100 m. Apresenta escala temporal análoga à escala do nível regional.
- *Microclimática*: representa os climas de lugares pequenos e bem delimitados, onde a natureza dos elementos climáticos está muito mais condicionada por fatores do entorno imediato do que por fatores regionais. Permite o registro de pequenas mudanças ambientais em condições muito específicas (na maioria dos casos a menos de 2,0 m de altura), e em períodos de tempo curto, porque a proximidade com o solo faz com que as variações das condições atmosféricas sejam muito rápidas.

A **Figura 1**, a seguir, representa as escalas do clima propostas por Cuadrat e Pita (1997).

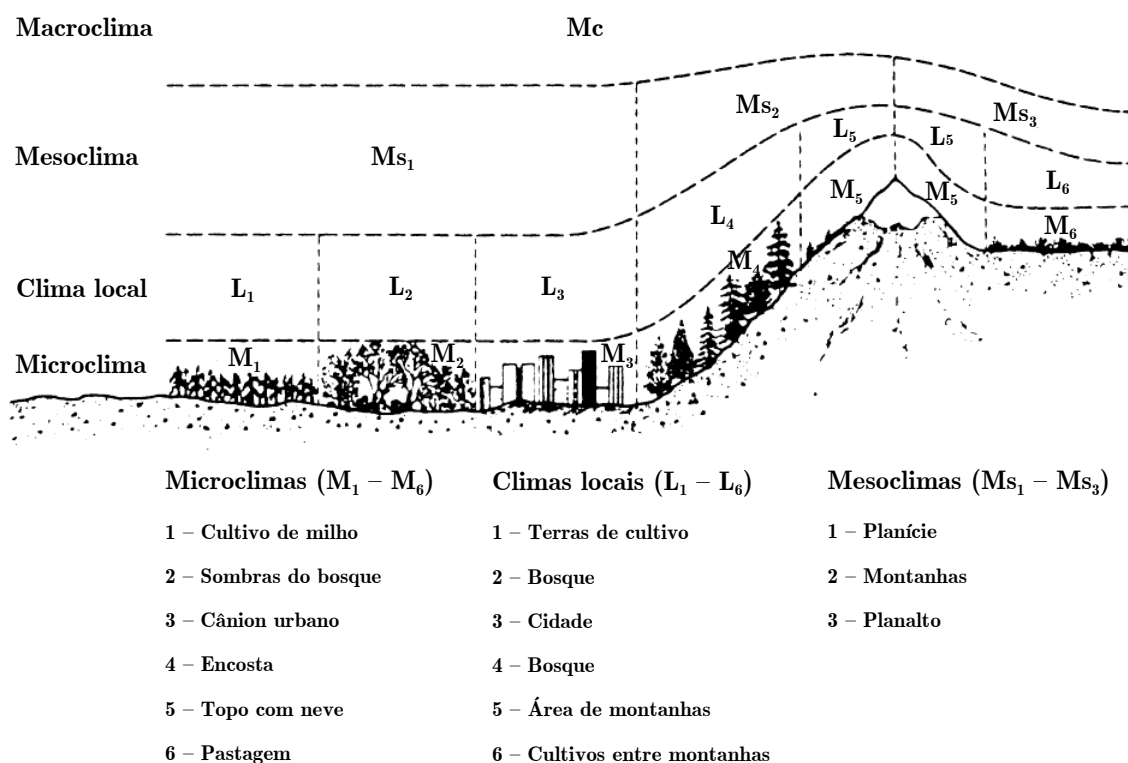


Figura 1 – Esquema representativo das escalas empregadas nos estudos climáticos. Fonte: Cuadrat e Pita (1997).

Quanto à escala temporal, Cuadrat e Pita (1997) indicam que três escalas temporais de análise são usadas com mais frequência: paleoclimática, secular e instantânea. A escala paleoclimática intenciona reconstruir as condições atmosféricas do passado, com investigações apoiadas em evidências do tipo geológico. As escalas secular e instantânea se apóiam em fontes diretas procedentes de estações de observação meteorológica existentes em superfície e por meio de sensores remotos instalados em satélites.

3.1.7. O clima de São Carlos

São Carlos, município situado no estado de São Paulo, tem como coordenadas geográficas 22° 01' 23" de latitude sul, 47° 53' 60" de longitude oeste, e possui altitude média de 855 m. Sua localização em planalto, e dividindo as bacias do Rio

Pardo e Tietê, impõe características climáticas específicas, que são acentuadas pela sua situação topográfica, estando sujeita a intensa ocorrência de ventos e insolação.

3.1.7.1. Visão clássica

De acordo com a visão clássica da climatologia, que toma por parâmetro as normais climatológicas, o clima de São Carlos é do tipo *Cwa* de acordo com a classificação de Köppen (1900, apud PITTON, 1985), sendo *C* – grupo mesotérmico; *w* – inverno seco e frio; *a* – verão quente e úmido, em que a temperatura média do ar no mês mais quente é maior do que 22° C.

3.1.7.2. Visão dinâmica

Carletto (2005) define que, de um modo geral, na fase de *prenúncio* e *avanço*, pode-se caracterizar o comportamento do clima de São Carlos por meio de seus elementos climáticos, que sofrem significativas variações. Por exemplo, nessas fases, conforme tendência habitual, o regime de ventos apresenta ventos de nordeste (NE) como a frequência de ocorrência de maior expressão. Na entrada da frente, surgem ventos episódicos de sudoeste (SW) e de noroeste (NW), quase sempre apresentados com elevadas velocidades do ar e na forma de rajadas.

Na fase de *domínio* é possível observar uma profunda alteração na direção dos ventos, que assume nessa fase o sentido sudeste-noroeste. Surgem assim, os ventos de sudeste (SE), de escala zonal, que atuam na região devido a sua localização geográfica, principalmente, em função da altitude e da localização na parte mais alta e desprotegida das *cuestas basálticas* existentes. São ventos frios e úmidos, com velocidades em torno de 3,0 m/s (CARLETTO, 2005).

De forma geral, a fase *pré-frontal* apresenta as seguintes características:

- *Tempo quente e seco*: tendência geral dessa relação entre temperatura e a umidade do ar. A temperatura do ar tende a se elevar e, ao contrário, os valores da umidade relativa tendem a diminuir.
- *Pressão atmosférica*: sofre uma diminuição dos valores.

Já as características da fase *pós-frontal* são:

- *Tempo frio e úmido*: tendência mais habitual depende do vigor da frente fria, que carrega diferentes proporções de umidade, uma vez que as massas polares são formadas sobre o continente antártico e sobre o Mar de Weddell (anticiclones migratórios ou móveis) e penetram em direção às latitudes menores.
- *Pressão atmosférica*: sofre uma descontinuidade no seu ritmo, rompendo a senóide diária habitual e, posteriormente, assume valores mais elevados na fase de domínio da massa polar.

3.2. Temperatura

3.2.1. Definição e erros

A *temperatura* é definida por Emiliani (1987) como sendo o nível da energia cinética interna de um sistema ou de um corpo. A energia interna, por sua vez, é resultante da movimentação de seus constituintes atômicos e moleculares. Ao conceito de temperatura está associado intrinsecamente o conceito de *calor*. Isaacs (1985) acrescenta que a temperatura é uma propriedade física de um corpo ou de região do espaço que determina se haverá transferência de calor para, ou, de sua

vizinhança. Se não há transferência de calor entre os corpos ou regiões, eles estão em equilíbrio termodinâmico e, logo, na mesma temperatura; se há transferência, o calor será transferido da região de maior temperatura para a de menor temperatura (GRAY; ISAACS, 1975).

Se há alguma premissa básica para medições de qualquer propriedade é essa: não existe nenhuma medida que não esteja associada a um erro, uma vez que nem o valor exato da propriedade medida nem o valor exato do erro associado à medida podem ser determinados (BENEDICT, 1984).

O erro pode ser causado por instrumentos que não estejam bem calibrados e/ou tenham más condições de uso, assim como nas usuais variações de parâmetros que afetam as medições (ASTM, 1987). Os resultados da maioria dos experimentos são baseados em medições. A confiabilidade das medidas não depende apenas das variações de parâmetros controlados, dependem também, de modo geral, de variações de fatores que não são controlados e que muitas vezes são desconhecidos. Alguns desses fatores que podem afetar as medições são: operador, equipamento, e condições do ambiente. Erros causados pelo operador e pelo equipamento podem ser minimizados por meio de leituras de diferentes observadores além de utilizar diferentes equipamentos de medição (BENEDICT, 1984).

Não obstante, medições de temperatura estão submetidas a erros de diferentes proveniências – vide item 3.3.2. Interferências nas medições terrestres, pág. 35 – sendo as variações de radiação e dos ventos dois fatores que influenciam na determinação desta propriedade.

3.2.2. Transmissão de calor

Segundo Kreith (1973), a energia térmica é transmitida sempre que existir um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou, quando dois sistemas com diferentes temperaturas são colocados em contato. O processo pelo qual a energia é transportada é chamado de *transmissão de calor*. O fluxo de calor é um processo pelo qual a energia interna de um sistema é alterada em um regime não permanente, sendo o fenômeno governado por uma combinação de leis da física. Os três modos de transmissão de calor são: condução, convecção e radiação.

3.2.2.1. Condução

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de maior temperatura para outra de temperatura menor nos sólidos opacos, em comunicação molecular direta, sem apreciável deslocamento das moléculas. Ela também ocorre nos fluidos, mas nesse caso é normalmente combinada com a convecção e em alguns casos com a radiação (KREITH, 1973).

Num corpo sólido, os átomos se acham em posições de equilíbrio determinadas pelo retículo cristalino, ao redor das quais eles podem oscilar. Suas vibrações são tanto mais intensas quanto maior a temperatura dos corpos. Aumentando-se a temperatura, e conseqüentemente, a amplitude das vibrações por aquecimento, essa vibração se propagará e a energia será transmitida das partes mais quentes para as mais frias. Após tempo suficiente para o equilíbrio ser atingido, o corpo possuirá uma temperatura uniforme (SALMONI, 1966).

A transmissão por simples condução se dá também nos líquidos e nos gases, porém é muito difícil evitar que seja acompanhada por convecção, uma vez que o aquecimento ou esfriamento de fluidos provoca via de regra a formação de correntes convectivas, devido o gradiente de densidade.

Condutividade térmica é uma propriedade física dos materiais que descreve a habilidade de conduzir calor. *Coeficiente de condutividade térmica* (k) é uma característica da natureza do material. Corresponde à quantidade de energia transmitida através de um corpo homogêneo, por unidade de espessura, unidade de área e unidade de tempo.

3.2.2.2. Convecção

É a transferência de calor entre corpos com temperaturas diferentes que devem estar em contato molecular, de forma que o começo do processo se realize por condução e depois, devido à alteração de temperatura sofrida pelo fluido, tem a sua densidade modificada, originando-se um movimento convectivo ascendente ou descendente, dependendo do modo como for a troca de calor. Ocorre, portanto, simultaneamente um fluxo não só de calor, mas também de matéria (fluido).

Para Kreith (1973), a convecção é um processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, do armazenamento de energia e do movimento de mistura. A convecção é mais importante como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás.

A transmissão de calor por convecção é classificada de acordo com o modo de motivação do transporte, podendo ser classificada em *convecção natural* e *convecção forçada*.

Quando o movimento de mistura tem lugar meramente como resultado das diferenças de densidades causadas pelos gradientes de temperatura, verifica-se a convecção natural ou livre. Quando o movimento de mistura é induzido por algum agente externo, tal como bomba ou ventilador, o processo é chamado de convecção forçada. A velocidade do ar, junto com as diferenças de temperatura, é o fator fundamental na determinação da quantidade de calor transmitido.

3.2.2.3. Radiação

Todos os corpos possuem energia térmica e a transforma em energia radiante por meio da emissão de ondas eletromagnéticas. As duas principais características da onda eletromagnética são o seu comprimento de onda (λ) e a sua frequência (ν). A energia radiante é classificada de acordo com o comprimento de onda. Quanto menor o comprimento de onda, maior é a energia associada a esta onda.

Para Kreith (1973), radiação é um termo aplicado a todas as formas de fenômenos de ondas eletromagnéticas, mas para a transmissão de calor, só interessam as formas que resultam da diferença de temperatura. Como as ondas eletromagnéticas se propagam no vácuo, a transferência de calor de um corpo a outro ocorre mesmo se não existir meio material entre os dois, ao contrário da condução e da convecção.

A energia incidente em um corpo receptor pode ser transmitida, absorvida, e refletida em quantidades que dependem das propriedades físicas do corpo. A energia

absorvida se transforma em calor, enquanto que a radiação refletida e transmitida não sofre modificações, mantendo o mesmo comprimento de onda.

Ainda segundo Kreith op. cit., quatro principais formas de transmissão de calor por radiação podem influenciar o comportamento dos sensores de temperatura:

1. *Radiação direta do Sol*: de pequeno comprimento de onda (onda curta);
2. *Radiação difusa*: de pequeno comprimento de onda proveniente do céu;
3. *Radiação refletida*: de pequeno comprimento de onda (albedo); e
4. *Radiação reemitida*: de onda longa que é produzida no processo de absorção das superfícies, aquecendo o solo ou superfícies, materiais, objetos, etc.

3.3. Medições climatológicas da temperatura do ar

Os valores da temperatura do ar podem ser determinados, de um modo geral, por três diferentes métodos de medição: observações de superfície, observações de satélite e observações por radiosondas. As medições de superfície, por sua vez, são divididas em dois tipos: em superfície terrestre, tendo os sensores de temperatura dispostos em abrigos; e em superfície marinha, em que são realizadas medições em navios ou por meio de bóias. (PANEL ON RECONCILING TEMPERATURE OBSERVATIONS, 2000).

Embora a tecnologia de construção de termômetros precisos e de confiança para medições ambientais, *in situ*, exista há mais de 150 anos, e nos últimos 30 anos, com o avanço da microeletrônica, existam sensores elétricos de grande precisão, ainda estão presentes muitos problemas no processo de medição de dados por meio destes instrumentos.

Apesar dos problemas, o registro do clima por meio de instrumentos em superfície pode proporcionar uma boa noção da distribuição espacial e previsões da temperatura em muitas áreas do mundo. Porém, considerando-se a magnitude dos erros de medição, a não homogeneidade nos registros das variáveis climáticas na superfície terrestre pode estar produzindo uma série de erros no diagnóstico do clima atual e, portanto, no diagnóstico do clima futuro (LIN, 1999).

3.3.1. Modalidades terrestres de medição

As modalidades de medição utilizadas nos registros de valores da temperatura do ar devem ser tomadas, em primeiro lugar, de acordo com as Normas Técnicas da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e, também, as que são adotadas em estações meteorológicas, clássicas e automáticas, para a medição dessa variável climática.

3.3.1.1. Estação meteorológica clássica

- **Termógrafo**

O termógrafo é um instrumento que registra a temperatura do ar por meio de uma agulha com tinta que marca um papel envolto em um cilindro. Os termógrafos são baseados na expansão sofrida por metais distintos sob alterações de temperatura. A maioria consiste em lâminas metálicas (bronze, latão, etc.) que possuem distintos coeficientes de dilatação. Também são utilizadas outras ligas que possuem alto coeficiente de dilatação. Quando a temperatura varia, uma das lâminas se dilata mais que a outra, resultando na movimentação de todo o mecanismo sob a lâmina mais curta.

Tais movimentos se amplificam por meio de um sistema de alavancas que possui na outra extremidade uma agulha, que indica o valor da temperatura. Geralmente esse tipo de instrumento é utilizado para obtenção de registros contínuos do comportamento da temperatura do ar, uma vez que um tambor cilíndrico coberto por um papel graduado e ajustado a um relógio permite este registro (AYLLÓN, 1996). O mecanismo de funcionamento pode ser observado na **Figura 2A**.

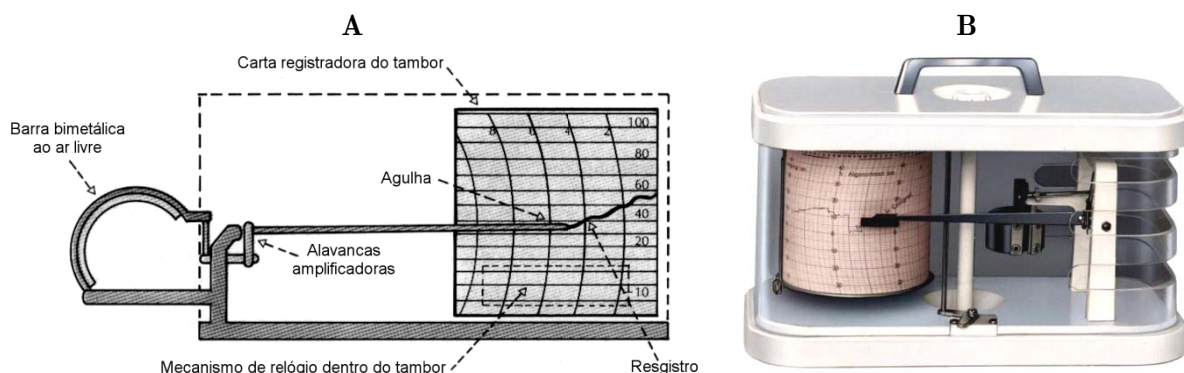


Figura 2 – Termógrafo. (A) Mecanismo de funcionamento de um termógrafo; (B) Foto de um termógrafo moderno. Fonte: Ayllón (1996).

Termógrafos modernos são construídos com materiais resistentes à corrosão, normalmente são utilizados alumínio, além de peças cromadas (**Figura 2B**). A acurácia de tais instrumentos é da ordem de $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, possuindo graduações de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

- **Termômetro de mercúrio**

O termômetro de mercúrio (**Figura 3**) é um instrumento muito simples que permite medições relativamente acuradas, podendo ser realizadas sob um extenso intervalo de temperatura. (QUINN, 1983). O funcionamento deste tipo de termômetro é baseado na expansão do líquido de acordo com a variação da temperatura, ou seja, o líquido atua como um transdutor em converter energia

térmica em uma forma mecânica. Assim que o líquido no bulbo se aquece, ele se expande e é forçado a subir o capilar da haste (NICHOLAS; WHITE, 1994). A temperatura do bulbo é indicada pela posição do topo da coluna de mercúrio de acordo com a respectiva escala marcada. A escala é necessária para permitir ao usuário a leitura da temperatura indicada pela coluna. Para um termômetro bem construído, a variação da coluna é proporcional à mudança do volume e da temperatura (NICHOLAS; WHITE, 1994).



Figura 3 – Principais características de um termômetro de mercúrio. Fonte: BENEDICT (1984).

- **Termômetro de máximas e mínimas**

O termômetro de máxima do tipo líquido em vidro tem como elemento sensível o mercúrio. Possui como característica uma constrição no capilar, que impede o retorno do bulbo, indicando a maior temperatura ocorrida. Já no termômetro de mínima, existe no interior do tubo um indicador no formato de Haltere (H) cuja extremidade oposta ao bulbo indica a menor temperatura do ar ocorrida (AYLLÓN, 1996).

- **Higrógrafo**

Instrumento para registro contínuo da umidade relativa do ar, o higrógrafo é baseado na propriedade que apresenta o cabelo humano de aumentar de comprimento

com a elevação da umidade e vice-versa. Esse movimento é amplificado por sistema de alavancas por meio de uma pena que registra diretamente a umidade relativa do higrôgrama colocado em um mecanismo de relojoaria.

- **Psicrômetro**

O psicrômetro é um instrumento para determinação da temperatura e a umidade relativa do ar atmosférico, constituído de dois termômetros de mercúrio, bulbo úmido (*wet*) e bulbo seco, sendo que o de bulbo úmido é envolto em gaze e deve ser mantido constantemente molhado. Quanto mais seco estiver o ar, maior será a quantidade de água evaporada, apresentando como consequência a redução da temperatura do termômetro de bulbo úmido. A diferença da temperatura entre os termômetros indica indiretamente a umidade relativa do ar com o uso de uma tabela psicrométrica.

- **Anemógrafo universal**

O anemógrafo universal é um instrumento para medição da velocidade instantânea, velocidade acumulada e a direção do vento. Esse equipamento é constituído por sensor da direção do vento (em forma de seta) que aciona um sistema de alavancas, sendo o registro efetuado por meio de quatro penas. O sensor da velocidade instantânea (rajadas) é representado por um sistema de pressão-sucção (princípio de Pitot) cujos orifícios se abrem na extremidade da seta e junto ao eixo do instrumento. E o sensor de velocidade acumulada é constituído por um sistema de três conchas. As medidas de velocidades e direção são tomadas a 10 metros de altura.

3.3.1.2. Estação meteorológica automática

- Sistema de aquisição automático de dados tipo CR10X Campbell Scientific Inc.

O sistema (**Figura 4**) mantém conectados, além dos sensores meteorológicos, sensores termopares tipo T, que estão conectados ao multiplexador AM416 que transfere os dados registrados ao sistema de aquisição e armazenamento de dados CR10X (*datalogger*) por meio de cabos telefônicos.

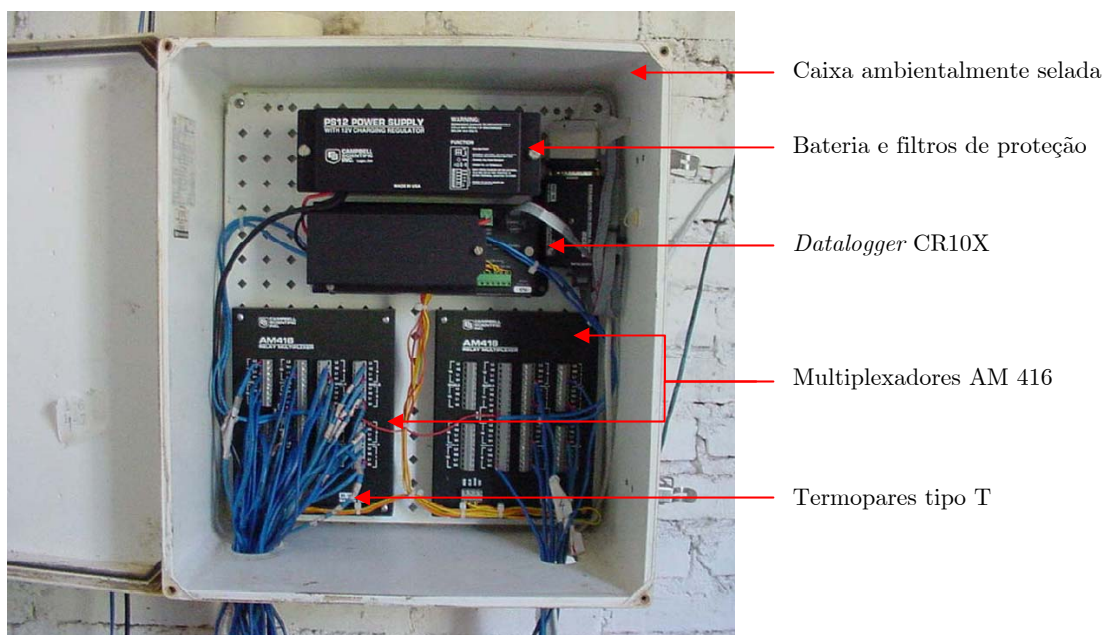


Figura 4 – Sistema automático de aquisição de dados Campbell Scientific Inc.

Os sensores meteorológicos comumente utilizados são: anemômetro WIND SENTRY 03001; anemoscópio WIND SENTRY 03001; painel solar MSX10; sensor pressão atmosférica CS105 (PTA 427); sensor de umidade relativa CS 500, sensor de temperatura do ar CS 500; sensor tipo piranômetro LI 200X; pluviômetro TR-525M. O sistema completo contém: uma caixa termicamente isolada do meio exterior (foto (A) da **Figura 5**), contendo sílica gel em seu interior para evitar condensações, com

suporte para fixação do sistema de aquisição e armazenamento dos registros do monitoramento, o CR10X vide fotos (A) e (B) da **Figura 5**. Além disso, permite ainda acoplar um multiplexador de canais, tipo AM416, que amplia a capacidade de aquisição de dados, passando de 8 canais analógicos para 40 canais. Um de conjunto bateria de 12 V, reguladores de voltagem, filtros contra ruídos de origem elétrica, proteção contra queda de raios, etc., também fazem parte do sistema de monitoramento.

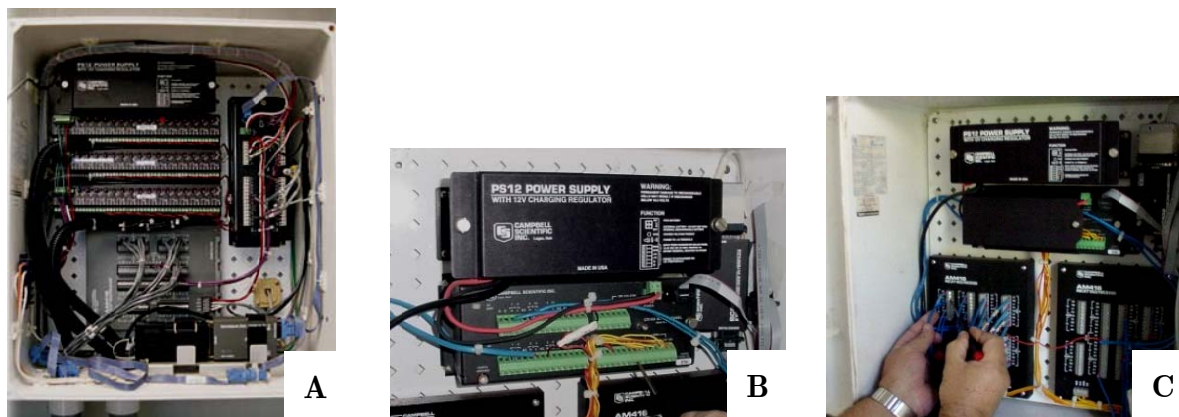


Figura 5 – Detalhes da caixa ambientalmente selada e os componentes do sistema automático de aquisição de dados. (A): Caixa ambientalmente selada que abriga a bateria 12V (abastecida por painel solar), com o datalogger CR10X, composto ainda pelo multiplexador de 32 canais AM416. (B) e (C): Detalhes do conjunto CR10X, bateria de 12V e multiplexador AM 416 de 32 canais.

- **Sensor de radiação solar global**

O sensor de radiação solar global da marca LI-COR, em céu aberto e em condições de luz do dia desobstruída, é comparável favoravelmente a piranômetros de primeira linha do tipo termopilha. O piranômetro da LI-COR é caracterizado por um detector fotovoltaico de silicone montado sob um cabecote em miniatura com correção de cossenos (LI-COR Inc, 2004a).

A saída da corrente, que é diretamente proporcional à radiação solar, é calibrada de acordo com um Piranômetro Espectrômetro de Precisão tipo Eppley – adotado pela OMM como um radiômetro de primeira classe (UO SOLAR RADIATION MONITORING LABORATORY, 2000) – sob condições de luz diária natural em unidades de Watts por metro quadrado. Sob condições de luz diária natural, o erro é menor que 5% (LI-COR, Inc 2004b).

- **Sensor de temperatura e umidade relativa do ar**

O sensor do tipo HMP45C-Vaisala, acoplado a uma estação automática, (**Figura 6**) é um robusto e acurado sensor de temperatura e de umidade relativa do ar desenvolvido para aplicações de medições automáticas e de longo prazo. Porém, para resultados confiáveis, o instrumento deve ser anualmente (re)calibrado. As medidas de temperatura utilizam o mecanismo *PRT* – *Platinum Resistance Thermometer* (CAMPBELL SCIENTIFIC INC, 2004).

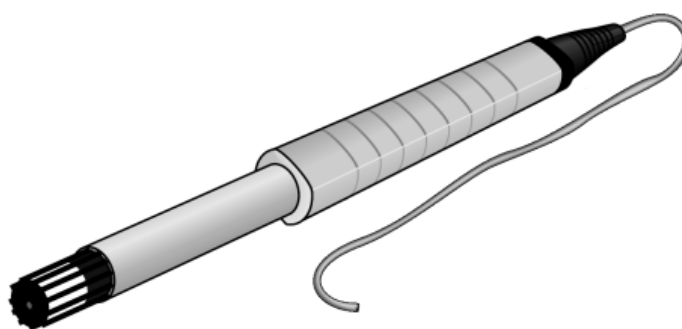


Figura 6 – Sensor de Temperatura e Umidade Relativa do ar modelo HMP45C. Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC INC, 2004.

Os *PRTs* são sensores de temperatura de grande qualidade e precisão. A resistência elétrica de platina é registrada por um dispositivo de saída conectada ao

sensor. A resistência do sensor, medida em ohms, é convertida para valores de temperatura por meio de um programa aplicativo (*software*) no dispositivo de leitura da saída, utilizando coeficientes únicos de caracterização do sensor, que são armazenados na memória do dispositivo de saída (ICL CALIBRATION LABORATORIES INC, s.d.). O princípio de funcionamento dos termômetros de resistência é baseado no fato de que a resistência de qualquer material oferece à passagem de uma corrente elétrica é dependente da sua temperatura. A utilização da platina como o material resistor é devida à alta ductibilidade (capacidade de produção de fios finos), pela característica de ser relativamente imune à corrosão e por estar disponível em um estado altamente puro e reproduzível (BAKER, H.; RYDER; BAKER, N., 1961).

Os termômetros de resistência são constituídos: 1.) pelo sensor, 2.) por um circuito elétrico cuja resistência varia de acordo com a temperatura, 3.) por uma estrutura na qual se sustenta o sensor, 4.) por uma capa protetora, e finalmente, 5.) por fios através dos quais o sensor é conectado ao instrumento de medida, que é utilizado para indicar os efeitos das variações no sensor resistor. Uma representação gráfica de um *PRT* pode ser observada na **Figura 7**.

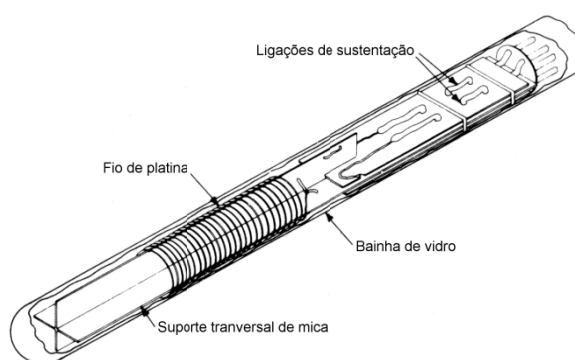


Figura 7 – Modelo de um termômetro de resistência de platina. Fonte: QUINN, 1983.

- **Abrigos de proteção para os sensores de temperatura de umidade do ar**

O abrigo de proteção contra radiação solar direta e também contra as precipitações modelo 41003 R.M. Young é acoplado ao sensor de temperatura e umidade relativa (**Figura 8**). O funcionamento ocorre sem ventilação artificial e nele são instalados os sensores de umidade e de temperatura do ar. O fabricante afirma que este abrigo assegura a reflexão de parte da radiação solar global e reduz o acúmulo de calor (inércia térmica), porém admite que ele proporciona interferências nas medições da temperatura do ar.

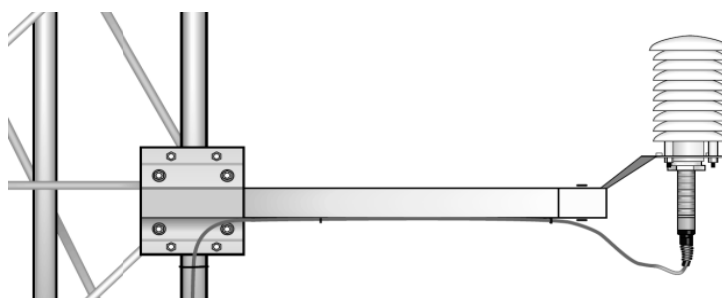


Figura 8 – Sensor HMP45C e abrigo de radiação 41003. Fonte: CAMPBELL SCIENTIFIC INC, 2003.

- **Termopares tipo T**

Os termopares são instrumentos muito utilizados tanto para medidas de temperaturas elevadas (até 1600°C) quanto para temperaturas reduzidas (até 1°C), como também de pequenas diferenças de temperatura (ANTUNES, 1966). Tal instrumento fornece a medida da diferença da temperatura entre junções quente e fria por meio da medida da diferença de potencial elétrico entre dois termo-elementos, compostos por fios de diferentes metais, soldados em uma das extremidades em uma junção de temperatura mais baixa (QUINN, 1983). Em outras palavras, se dois metais distintos são soldados em uma das extremidades (A), vide **Figura 9**, e esta é mantida a uma temperatura (T_A), diferente da temperatura da extremidade não soldada (T_B), pode-se medir entre os dois metais uma diferença de potencial elétrico. A esse fenômeno dá-se o nome de efeito termoelétrico.



Figura 9 – Representação esquemática do princípio de funcionamento de um termopar.
Fonte: ANTUNES, 1966.

O bipolo constituído por dois metais, consideradas as duas extremidades não soldadas como terminais acessíveis, mantidas a certa temperatura (T_B) e estando a junção outra temperatura (T_A), constitui um gerador. A força eletromotriz desse gerador depende, de modo geral, das temperaturas das extremidades (T_A e T_B) e se denomina f.e.m. (força eletromotriz) termoelétrica (ANTUNES, 1966). O conjunto que compõe um termopar consiste basicamente em um ou mais dos componentes:

sensor composto por dois diferentes fios metálicos, sustentados ou separados por um isolante elétrico e soldados um ao outro em uma das extremidades; tubo de proteção com o intuito de evitar efeitos deletérios no sensor na presença de atmosferas e ambientes hostis.

Os termopares do Tipo T são resistentes à corrosão em atmosferas úmidas e são apropriados para o uso em medições de temperatura do ar, uma vez que sua faixa de aplicação está situada entre -270 a 400°C e ainda pelo fato de se oxidarem em atmosferas oxidantes somente em ambientes acima de 370°C . A constituição deste tipo de termopar é de cobre e constantan – liga metálica de cobre e níquel ($\text{Cu} + 43\% \text{ Ni}$) (ASTM, 1987). A acurácia dos termopares é tal que as temperaturas podem ser medidas com erro de $\pm 0,1$ ou $0,2^{\circ}\text{C}$ com alguns tipos de termopares, desde que estejam precisamente calibrados e em ótimas condições de uso e aplicação (KINZIE, 1973).

3.3.2. Interferências nas medições terrestres

Vários fatores têm influenciado nas medições de temperatura do ar, principalmente, sobre o continente terrestre. O uso dos solos, principal fator, mudou devido à urbanização e, assim, muitos dos termômetros responderam às mudanças das propriedades térmicas de suas vizinhanças, indicando mudanças na temperatura que são reais, mas que não estão relacionadas às causas em larga escala da mudança climática global (COMMITTEE ON SURFACE TEMPERATURE RECONSTRUCTIONS FOR THE LAST 2,000 YEARS, 2006).

Além deste, outros fatores não climáticos têm gerado dados não representativos da atual variação climática que vem ocorrendo, tais como: mudanças nos instrumentos, práticas de observação, locais das estações, fórmulas para cálculo de médias. Todos estes desvios podem gerar erros que levam a interpretações errôneas do clima, a não ser que sejam ajustados ou evitados estes fatores. (PANEL ON RECONCILING TEMPERATURE OBSERVATIONS, 2000)

Da discussão dos fatores anteriormente citados é importante detalhar os erros de medições da temperatura provenientes tanto do sensor quanto e, principalmente, do sistema de aquisição de dados associado, particularmente da ineficiência dos abrigos de proteção contra os efeitos radiação. (SUN; BAKER, 2004)

Portanto, medições adequadas da temperatura do ar, representativa para a área que a estação representa, requerem minimização dos efeitos locais relacionados à situação da estação, como por exemplo, a presença de árvores e prédios, além de minimização dos efeitos ambientais que influenciam as medições da temperatura na posição em que se encontra o sensor.

3.3.2.1. Influência da cobertura vegetal

Em estudo sobre o efeito da vegetação na atenuação do calor, Shashua-Bar e Hoffman (2000) mostram indicações de que as principais variáveis que afetam os registros da temperatura do ar são as áreas sombreadas por árvores, que atenuam o aquecimento do solo pela radiação solar direta, incluindo o efeito secundário da temperatura do ar junto a essas áreas circundantes.

Da mesma forma, o efeito da umidificação do ar se mostra proporcional ao de resfriamento. O estudo realizado por Dimoudi e Nikolopoulou (2003), com base em simulações do comportamento microclimático, em diferentes texturas urbanas, concluíram que o aumento das dimensões de áreas verdes implica na diminuição da temperatura do ar nas imediações. Há indicações de que ocorre decréscimo de 1 °C, na temperatura do ar, para cada 100 metros quadrados de vegetação adicionada.

Estudos⁶ realizados trataram de comparar valores da temperatura e da umidade do ar em diversos pontos da cidade de São Carlos. Os resultados obtidos demonstram que os valores de temperatura tendem a ser menores em áreas arborizadas do que em áreas áridas, assim como acontece para os valores da amplitude térmica. Foram verificadas diferenças de 2 a 3 °C, nas horas mais quentes do dia, entre os locais de estudos selecionados. Tais resultados são similares aos obtidos em outras investigações⁷. Outros resultados também relativos aos valores da temperatura externa do ar corroboram com outros obtidos em estudos anteriores⁸, indicando que a vegetação arbórea provoca a atenuação da amplitude térmica em comparação com áreas não vegetadas, conforme pode ser observado na **Figura 10**.

⁶Trabalho intitulado “Influência das áreas arborizadas na temperatura e umidade do ar do ambiente urbano de São Carlos – SP”.

⁷ BARBOSA; BARBINATO; VECCHIA, 2004; LINACRE; GEERTS, 1997; TAHA, 1997.

⁸ MODNA; VECCHIA, 2003; SHASHUA-BAR; HOFFMANN, 2000.

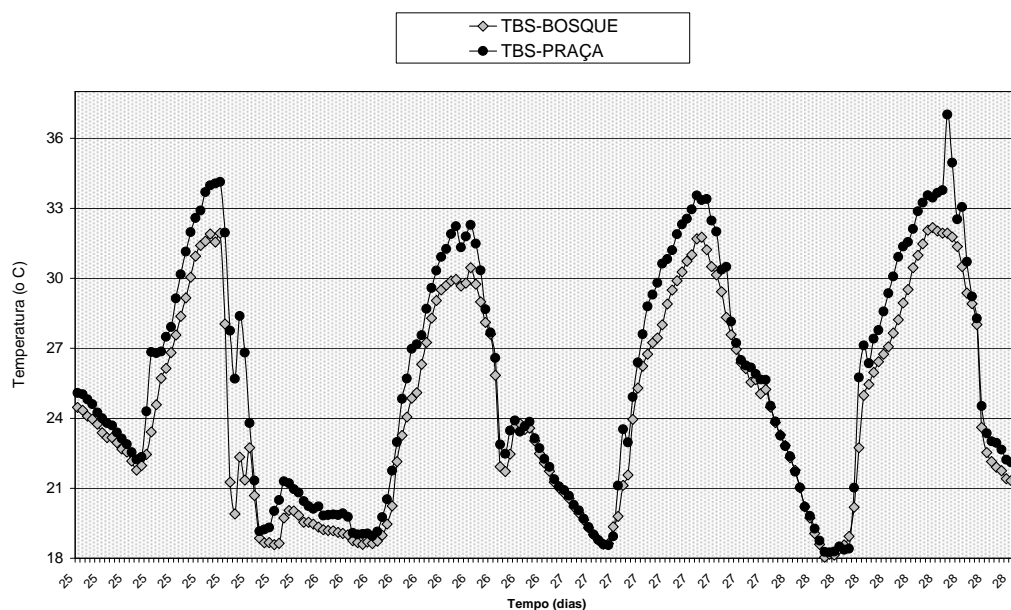


Figura 10 – Gráfico do comportamento da temperatura sob influências da cobertura vegetal exibindo o padrão cíclico da variação diária da temperatura externa do ar tomado em dois bairros da cidade de São Carlos, bosque correspondendo a uma região melhor vegetada e a praça correspondendo ao espaço árido do centro da cidade. Fonte: Modna e Vecchia (2003).

Outra indicação que se obteve ao longo da investigação foi quanto à diminuição dos valores de temperatura promovida pelas áreas verdes. As constatações feitas a partir dos resultados deste trabalho - de que a diferença de temperatura entre um local arborizado e outro árido é pequena em termos absolutos - são semelhantes às constatações de outros pesquisadores (MODNA; VECCHIA, 2003). Há que se considerar também, em estudo posterior, as diferenças existentes entre as árvores que compõem as áreas verdes, como discutem Ochoa e Marincic (2003) e Barry e Chorley (1980). Fatores estruturais e morfológicos como a geometria das copas, o número de indivíduos, o tipo de folhas e das adaptações ao meio influenciam o clima característico das áreas verdes.

3.3.2.2. Influência da incidência de radiação solar direta

As medições de temperatura do ar realizadas por Modna e Vecchia (2003), em duas regiões de São Carlos, em janeiro de 2002, registraram a ocorrência de uma senóide com duas inexplicáveis “orelhas de Batman” às 7 horas e 30 minutos e outra às 16 horas e 30 minutos, conforme a **Figura 11**. Nesse primeiro momento nada parecia justificar esses dois registros que distorciam o comportamento em formato senoidal habitual das temperaturas do ar. Mais tarde, descobriu-se que esses desvios ocorreram pela incidência direta da radiação solar sobre os abrigos de proteção, pois nessa época do ano, janeiro, a trajetória aparente do Sol se desloca sobre o quadrante Sul, quando o abrigo ficou exposto aos raios solares. Isso ocorreu por que os sensores não ficaram totalmente abrigados (à sombra) no pátio da escola e, nesses dois horários específicos, a exposição à radiação elevou os valores da temperatura do ar.

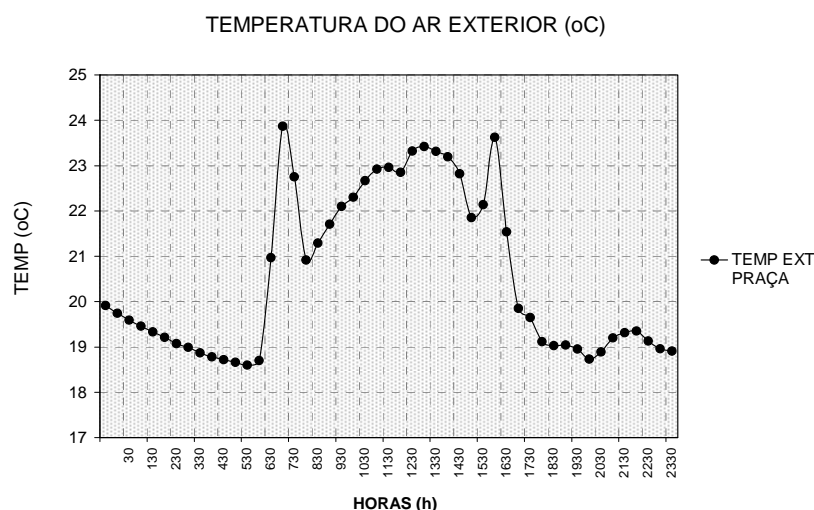


Figura 11 – Gráfico do dia 25 de janeiro com o comportamento da temperatura externa do ar sob influências da incidência da radiação solar direta, tomada em abrigo meteorológico sem isolamento e sem aspiração do ar, que ocasionou a aparência de “orelhas”, às 7h30 e às 16h30 distorcendo a senóide habitual. Fonte: Modna e Vecchia (2003).

Portanto, concluiu-se que ocorria uma alteração na leitura de aproximadamente três graus Celsius quando o abrigo estava exposto à radiação solar. Para corrigir a ação da radiação foi aplicado um isolamento por barreira de radiação (*foil*) sobre o abrigo e instalado uma ventoinha de computador para aspiração do ar no abrigo meteorológico. Após a instalação desses dispositivos os registros da temperatura externa do ar não apresentaram distorções, voltando a possuir a aparência habitual de senóides.

3.3.2.3. Influência do ambiente construído

No tema ilhas de calor apontado por Gonçalves et al. (2004), em Lisboa, medições nos anos 70 indicaram um gradiente térmico de 1 a 2 graus Celsius, com base nos valores das temperaturas mínimas médias mensais do período entre 1958 e 1967. Posteriormente, entre 1968 e 1981, identificou-se um alongamento da ilha de calor e provável gradiente de intensificação para 2 a 3 graus Celsius. Segundo Alcoforado (1988), a ilha de calor possui uma intensidade que não excede os 5 graus Celsius e que é mais freqüente durante o período noturno e durante a estação de verão, sem que, no entanto, tenha sempre a mesma intensidade e configuração.

Gonçalves et al. (2004) ainda afirma que a atenuação e a mobilidade da ilha de calor se deve à influencia do oceano (30 km de distância) além dos parâmetros climáticos que, segundo ele, mais determinam o estabelecimento de ilhas de calor em Lisboa, que são: o regime de ventos predominantes, a nebulosidade (que impede a penetração da radiação solar direta) e a ocorrência de nevoeiro (mesma perturbação que a anterior). As diferenças encontradas para os valores médios da temperatura

externa do ar registradas nas estações urbanas de Lisboa comparativamente à estação de referência não foram significativas nas estações de Telheiras e da Praça de Espanha. Para as estações próximas ao rio Tejo e outras, essas diferenças foram superiores, cerca de 1,3 e 0,8 graus Celsius, respectivamente.

3.3.2.4. Influências dos ventos e da radiação solar nos abrigos térmicos

A radiação do sol e a radiação refletida pelas nuvens, pelo solo e por outros objetos circunvizinhos atravessam o ar sem proporcionar alterações apreciáveis na sua temperatura, mas um termômetro exposto ao ar livre pode absorver radiação considerável. Como consequência, a temperatura indicada pode ser diferente da temperatura real do ar, sendo a diferença dependente da intensidade da radiação e a taxa de radiação absorvida transformada para dissipação de calor (WMO, 1996).

Consequentemente, a fim de assegurar-se que o termômetro está indicando a verdadeira temperatura do ar, é necessário proteger o termômetro contra radiação com o uso de um abrigo, que ao mesmo tempo tem a função de suporte. Este abrigo ainda evita interferências da precipitação, permite a circulação livre de ar em torno do termômetro, e previne danos acidentais (WMO, 1996).

Medições adequadas da temperatura do ar, representativa para a área que a estação representa, requerem minimização dos efeitos locais relacionados à situação da estação, como por exemplo, a presença de árvores e prédios, além de minimização dos efeitos ambientais que influenciam a medida da temperatura na posição em que se encontra o sensor (VAN DER MEULEN, 2007).

Deste modo, as condições ambientais afetam os abrigos de modos diferentes, cada um gerando um microclima próprio e, muitas vezes, provocando alterações indevidas nas medições realizadas pelos sensores abrigados.

Van der Meulen (1998) lista várias circunstâncias ambientais que podem influenciar nas medições de temperatura do ar. Dentre elas as mais relevantes são:

- Radiação direta do Sol no sensor – radiação de onda curta;
- Radiação indireta (após reflexão na superfície terrestre, água, no abrigo do sensor) do Sol no sensor;
- Radiação infravermelha direta e indireta pelo abrigo e por outras fontes externas no sensor – radiação de onda longa;
- Ventilação natural ou artificial insuficientes do ar interno ao abrigo, causando efeitos micro-climáticos típicos;

O princípio primário da medição de temperaturas do ar com estações automáticas é o fornecimento de dados de qualidade e fidelidade para que possam ser usados pelas ciências atmosféricas e relacionadas. Vários estudos têm demonstrado que para atingir medições precisas de temperatura são necessários ambos eficientes abrigo de radiação e sistema de ventilação. (LIN; HUBBARD; MEYER, 2004).

Quando se pretende medir a temperatura externa do ar, o abrigo de radiação do sensor não permite bloquear toda a radiação solar e radiação infravermelha sem que se reduza a velocidade do fluxo de ar nas vizinhanças do sensor de temperatura. Um abrigo ideal contra efeitos de radiação seria aquele que bloqueasse toda a

radiação solar, mas isto é impossível por causa das aberturas necessárias para o ar fluir através do abrigo (LIN; HUBBARD, 2001).

Portanto, torna-se evidente que, para minimizar a influência de radiações de ondas curtas e longas, o sensor de temperatura necessita condicionamento em abrigo térmico. Quanto ao efeito da ventilação, existem estudos que determinam coeficientes de correção de temperatura em abrigos com ventilação natural em condições de baixa ventilação, a exemplo de Nakamura e Mahrt (2005), porém o sugerido pela OMM (WMO, 1996) e pela maioria dos estudos é a tomada de temperaturas em abrigos com ventilação artificial.

Embora existam termômetros e sensores de diferentes formatos, tipo e qualidade, estes dispositivos tendem, em princípio, a convergirem para uma padronização. Entretanto, o projeto e construção de abrigos demonstram diferenças significativas. O fato é que termômetros e sensores podem ser calibrados em concordância com padrões e normas aprovadas internacionalmente. Já os abrigos não estão, porém, sujeitos a nenhuma padronização. No Manual de Instrumentos e Métodos de Observação (WMO, 1996) sugestões para utilização de abrigos são apresentadas, mas não é recomendado nenhum abrigo padrão típico (VAN DER MEULEN, 1998).

Logo, mesmo existindo diretrizes internacionais que especificam a obtenção de uniformidade das medições, nenhum abrigo padrão foi definido. Conseqüentemente, muitos abrigos estão em uso no mundo, cada um com suas características específicas (VAN DER MEULEN, 2007).

Enquanto não são estabelecidas tais normas, e devido à disponibilidade comercial de inúmeros modelos de abrigos, aspirados e não-aspirados, avaliações experimentais⁹ têm sido realizadas na tentativa de comparação e avaliação da eficiência de cada modelo.

A preocupação com a falta de padronização de abrigos resultou na decisão da OMM (WMO, 2003) em criar junto a *International Organization for Standardization* (ISO) uma norma¹⁰ de métodos de comparação de desempenho de abrigos, que recentemente foi aprovada e publicada.

Assim, conforme Brandsma e Van der Meulen (2007), inter-comparações de abrigos tem sido realizadas por vários autores¹¹, comparando abrigos utilizados no passado com termômetros de mercúrio com os abrigos mais novos utilizados em sistemas automáticos de aquisição de dados. Estudos recentes¹² têm avaliado apenas as diferenças entre os abrigos da nova geração.

Os autores op. cit. acusaram a falta de trabalhos de inter-comparações de abrigos de temperatura ao redor do mundo, alertando sobre a necessidade de estudos que quantifiquem a magnitude da relação de dependência das condições climáticas com as diferenças de temperatura entre os abrigos.

⁹ FUCHS; TANNER, 1965; SPARKS, 1972; TANNER 1990; QUAYLE et al., 1991; ANDERSSON; MATTISON, 1992; WARNE, 1995; GUTTMAN; BAKER, 1996; TANNER; SWIATEK; MAUGHAN, 1996; VAN DER MEULEN, 1998; HUBBARD; LIN; WALTER-SHEA, 2001; LIN; HUBBARD; MEYER, 2001; LIN; HUBBARD; WALTER-SHEA, 2001.

¹⁰ ISO 17714: Meteorology – Air temperature measurements – Test methods for comparing the performance of thermometer shields/screens and defining important characteristics.

¹¹ MAWLEY, 1897; SPARKS, 1972; PARKER, 1994; BARNETT, HATTON; JONES, 1998; HATTON, 2002.

¹² ANDERSON; MATTISSON, 1991; LEFEBVRE, 1998; LARRE; HEGG, 2002.

Van der Meulen e Brandsma (2007) relataram que a *Commission for Instruments and Methods of Observation* (CIMO) recomendou a organização de um estudo internacional de inter-comparação de abrigos de temperatura em diferentes regiões climatológicas, evidenciando a necessidade do entendimento do comportamento destes abrigos em condições variadas.

Tal estudo de inter-comparação¹³ teve início em fevereiro de 2006 com envio de convites aos membros representativos permanentes da OMM espalhados mundialmente. A seleção de participantes potenciais foi realizada em maio, e participantes definitivos em julho. As preparações dos locais de instrumentos e abrigos foram realizadas de julho a novembro. A inter-comparação teve início efetivo das medições em meados de 2007, com previsão de coleta de dados por um período de um ano. Por fim, em 2008 será elaborado o relatório final. (WMO, 2006b).

Além desta inter-comparação, nos dias 4 a 6 de dezembro de 2006 foi realizada em Genebra, Suíça, a TECO-2006¹⁴. Nesta Conferência foram apresentados dois pôsteres^{15,16} na seção “*Quality Management, Calibration, Testing And Comparison of Instruments and Observing Systems*”, que demonstraram a atual preocupação da comunidade acadêmica com este tema.

¹³ Detalhes em <<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/IMOP/intercomparisons.html>>, acesso em 10 jan. 2007.

¹⁴ WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation

¹⁵ Nagy, Z. Effects of thermometer screens on accuracy of temperature measurements. WMO, Geneva, 2006.

¹⁶ Xiong, A. Influence of changes of sensor and shelter on air temperature observation, and analysis to its causes. WMO, Geneva, 2006.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Equipamentos

Os equipamentos utilizados na realização dessa pesquisa podem ser divididos em dois grupos:

1. *Equipamentos de campo*: utilizados na aquisição automática dos dados meteorológicos e do comportamento dos abrigos nos respectivos registros das temperaturas no interior deles;
2. *Equipamentos de gabinete*: utilizados na tabulação, tratamento e análise dos dados obtidos experimentalmente.

4.1.1. Equipamentos de campo

As estações experimental e de referência (vide **APÊNDICE A** e **APÊNDICE B**) foram instaladas no campus 1 da USP de São Carlos (latitude: 22°00' Sul, Longitude: 47°53' Oeste), em uma área de cobertura uniforme de grama típica, ao lado do “Laboratório de Ecotecnologias: Novos Materiais e Procedimentos” – equipado com computadores que possibilitaram a análise dos dados coletados.

4.1.1.1. Estação experimental

Para avaliação dos objetivos propostos, utilizou-se de um conjunto constituído por 4 tubos de PVC, dispostos horizontalmente em um suporte metálico à altura de 2 m do solo com os respectivos sensores termoeletrônicos no interior de cada tubo em um sistema automático de aquisição de dados CR10X¹⁷.

4.1.1.2. Estação de referência

Logo ao lado da estação experimental, uma estação automática de referência – contendo o sistema de aquisição de dados CR10X, com multiplexador AM416, bateria de 12 V, e painel solar – foi responsável pela coleta e armazenamento dos dados de: radiação solar global; velocidades médias e máximas do ar; umidade relativa, e valores de temperatura, estes obtidos pelo sensor de temperatura e umidade relativa modelo HMP45C¹⁸–Vaisala, acoplado ao abrigo de proteção modelo 41003¹⁹ da fabricante R.M. Young, conforme exibido na **Figura 8**, página 33.

4.1.2. Equipamentos de gabinete

Os equipamentos de gabinete consistem de computador e acessórios periféricos (*hardware*) e programas aplicativos (*softwares*). Os dados coletados passam por uma análise de consistência no programa aplicativo Microsoft Excel, o qual proporciona posteriormente a elaboração de análises estatísticas e confecção de gráficos.

¹⁷ Manual disponível em <<http://www.campbellsci.ca/Catalogue/CR10X.html>>. Acesso em 25 nov. 2007.

¹⁸ Manual disponível em <<http://www.campbellsci.ca/Catalogue/HMP45C.html>>. Acesso em 25 nov. 2007.

¹⁹ Manual disponível em < <http://www.campbellsci.ca/Catalogue/41003-X.html> >. Acesso em 25 nov. 2007.

4.2. Procedimentos

Além da revisão da literatura, foram executados alguns procedimentos necessários à consecução dos objetivos, de modo a possibilitar a realização dessa investigação. De forma sequencial os procedimentos realizados foram: instalação do equipamento e aquisição dos dados; análise preliminar dos dados e determinação de episódios; aquisição de imagens de satélite; elaboração e confecção de gráficos e tabelas; análise e discussão dos dados.

4.2.1. Instalação da estação experimental e aquisição dos dados

Foi construído um conjunto constituído de por 4 tubos de PVC de cor branca, de 30 cm de comprimento e 4 pol. de diâmetro cada, dispostos horizontalmente em um suporte metálico à altura de 2 m do solo – de acordo com recomendação da OMM (WMO, 1996), com os respectivos sensores termoelétricos no interior de cada tubo. Os tubos consistem nos abrigos de proteção da incidência de radiação. Tais abrigos dos sensores foram pendurados paralelos uns aos outros com uma distância de 45 cm entre eles, sendo o suporte disposto na direção norte-sul, perpendicular a direção do percurso do sol, leste-oeste, conforme mostrado na **Figura 12**.

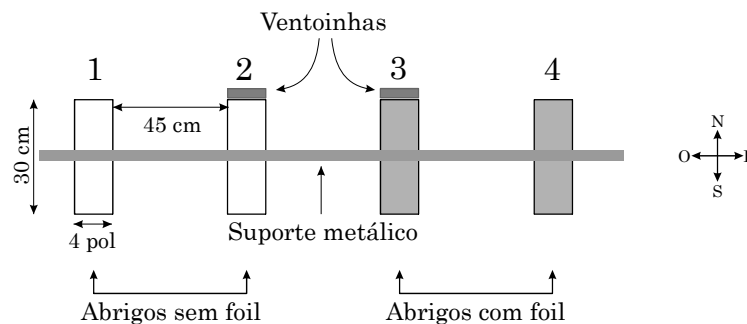


Figura 12 – Representação esquemática, com vista em planta, da disposição dos abrigos.

Esta configuração adotada não permite a incidência direta de radiação solar, e, portanto, evita-se o surgimento de “orelhas de Batman”, ou seja, desvios de temperatura com aspecto de dois picos de nos valores do gráfico senoidal de temperatura ao longo do dia, já descritos em trabalho realizado por Modna e Vecchia (2003). Além disso, com o fato de os abrigos estarem suspensos evita-se condução térmica proporcionada pelo contato direto com o suporte metálico.

Para a avaliação comparativa dos efeitos das duas variáveis em estudo, radiação global e da velocidade do dos ventos, cada abrigo foi construído de modo a se determinar qual a importância da influência isolada e combinada dessas variáveis. A **Tabela 1** e a **Figura 13** sintetizam a constituição dos 4 diferentes abrigos utilizados no presente estudo (ver também **APÊNDICE C**).

Para avaliação da influência da radiação, aplicou-se uma camada dupla de material isolante plástico de superfície metalizada (*foil*); e para avaliação da interferência da ventilação, a aspiração forçada do abrigo foi obtida pela instalação de ventiladores comumente utilizados em microcomputadores (ventoinha) – acoplados aos tubos de PVC e fixados a eles por quatro braçadeiras plásticas. Foram utilizadas ventoinhas modelo *Smart Case Fan II - Thermaltake*, que possuem alto desempenho e ajuste de velocidade, protegidas da precipitação por uma extensão do *foil*.

Tabela 1 – Constituição dos abrigos experimentais

Abrigo	Dispositivo	
	Ventoinha	<i>Foil</i>
1	Não possui	Não possui
2	Possui	Não possui
3	Possui	Possui
4	Não possui	Possui

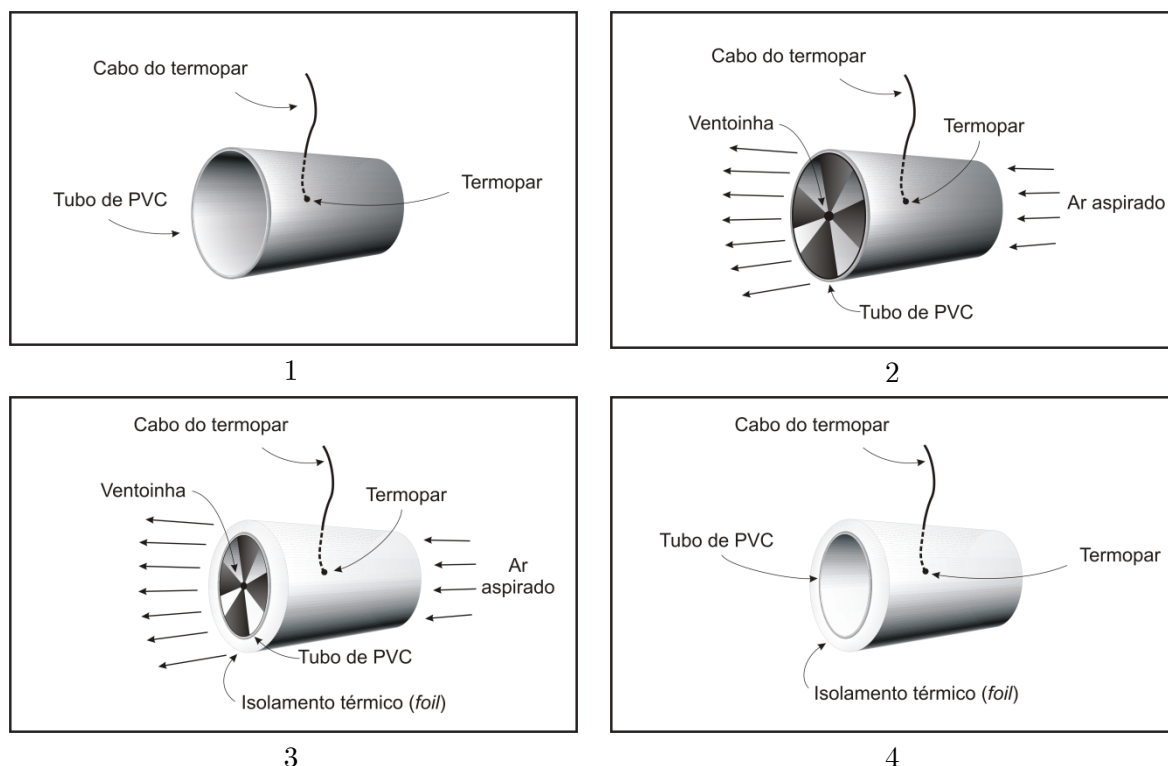


Figura 13 – Representação gráfica do conjunto de termopares com diferentes abrigos de PVC de 4 polegadas. (1) Abrigo de PVC com aspiração interna natural e sem isolamento térmico; (2) Abrigo de PVC com aspiração interna artificial, dada pelo uso de uma ventoinha de 12V; (3) Abrigo de PVC com aspiração artificial e com isolamento térmico por barreira de radiação (*foil*); (4) Abrigo de PVC com isolamento térmico e sem aspiração interna artificial.

Como sensores de temperatura foram utilizados termopares do tipo T (Seção 2x24 AWG). A extremidade sensível às alterações térmicas de cada termopar foi disposta no centro dos abrigos. A outra extremidade foi ligada ao multiplexador AM16/32²⁰ da Campbell Scientific Inc. de 32 canais, protegida dentro de uma caixa termicamente isolada do meio exterior. Do multiplexador os dados são transferidos e registrados no *datalogger* CR10X (sistema de aquisição e armazenamento de dados) para posteriores coletas e análise dos dados. Ainda fazem parte do sistema de

²⁰ Manual disponível em <<http://www.campbellsci.ca/Catalogue/AM1632.html>>. Acesso em 25 nov. 2007.

monitoramento uma bateria de 12 V, modelo PS12²¹, da Campbell Scientific Inc., e fonte de alimentação para as ventoinhas utilizadas nos abrigos. O **APÊNDICE D** exibe em detalhes uma foto do interior da caixa ambientalmente selada que contém os componentes acima listados.

No início das atividades experimentais, no programa aplicativo do *datalogger* CR10X o intervalo de tempo entre as aquisições dos valores de temperatura no interior dos abrigos era de 20 segundos. Além disso, os registros dos valores de temperatura – que são as totalizações obtidas por meio das médias dos valores adquiridos, eram realizados a cada 30 minutos. Nos últimos seis meses de pesquisa, o intervalo das aquisições foi reduzido para 10 segundos, e as totalizações para intervalos de 5 minutos. Com esta alteração do intervalo de tempo, tanto das tomadas dos valores quanto das totalizações registradas, pretendeu-se verificar alguma melhoria na visibilidade do processo por meio do aumento da resolução dos dados.

4.2.2. Análise preliminar dos dados e determinação de episódios

Os dados armazenados no *datalogger* eram coletados periodicamente em intervalos de aproximadamente 15 dias. A extração de dados era realizada por meio da conexão estabelecida – com um cabo tipo 25/9 pinos, filtro e interface de comunicação SC32A²² – entre o sistema de armazenamento e um microcomputador

²¹ Manual disponível em <<http://www.campbellsci.ca/Catalogue/PS12-LA.html>>. Acesso em 25 nov. 2007.

²² Manual disponível em <<http://www.campbellsci.ca/Catalogue/SC32A.html>>. Acesso em 25 nov. 2007.

portátil, que reconhecia o *datalogger* pelo programa aplicativo PC208W²³ da Campbell Scientific Inc.

Uma vez importados os dados, estes foram convertidos para formato acessível em planilha do Microsoft Excel, no qual era possível identificar episódios representativos do fato climático, para o estudo das interferências causadas pela radiação solar global incidente e pela ação dos ventos nos abrigos dos sensores de temperatura.

A escolha da escala temporal foi determinada de acordo com os propósitos do objetivo do estudo, bem como do tempo de amostragem do monitoramento. Deste modo, utilizou-se a escala instantânea (tempo real), considerando informações meteorológicas horárias.

4.2.3. Aquisição de imagens de satélite

Uma vez selecionados os episódios representativos e dias típicos experimentais, foram adquiridas, por meio da *Internet*, imagens infravermelho de satélite do satélite GOES (*Geostationary Operational Environment Satellite*), no sítio eletrônico²⁴ do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A análise das imagens de satélite e do comportamento dos elementos do clima obtidos nas estações permite uma melhor compreensão dos episódios climáticos de interesse.

²³ Manual disponível em <<http://www.campbellsci.ca/Catalogue/PC208W.html>>. Acesso em 25 nov. 2007.

²⁴ Disponível em <<http://satellite.cptec.inpe.br/>>. Acesso em 25 nov. 2007.

4.2.4. Elaboração de gráficos e análise dos dados

Os procedimentos anteriormente descritos forneceram as bases necessárias para o diagnóstico da influência exercida pelas duas variáveis em estudo. Gráficos dos perfis da temperatura dos diferentes abrigos foram confeccionados, permitindo em primeira análise verificar os efeitos provocados pela radiação e pelo vento na aquisição de temperatura dos sensores. Em seguida foram elaborados gráficos de inter-comparações e correlações entre as temperaturas dos abrigos, destacando as diferenças observadas. Por fim, elaboraram-se gráficos que correlacionaram as causas das influências e os respectivos efeitos nos abrigos, possibilitando a verificação da magnitude de interferência cada variável, assim como dos efeitos da utilização dos dispositivos atenuantes dos efeitos interferentes – ventilação forçada e barreira contra radiação (*foil*).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise dos efeitos

Nesta seção procura-se demonstrar qualitativa e quantitativamente os efeitos causados pela radiação solar global incidente e pela ação dos ventos nos abrigos da estação experimental.

5.1.1. Dia típico representativo

Baseando-se na definição de episódios climáticos representativos, elaborados de acordo com VECCHIA (1997), e dia típico representativo, de caráter experimental (VECCHIA e NOLASCO, 2005), e de acordo com as necessidades de análise, adotou-se o dia típico representativo para obtenção e discussão dos resultados do estudo.

Sob a abordagem em escala temporal diária, por meio de um dia típico representativo, a **Figura 14** apresenta o comportamento da temperatura externa do ar, ao longo do dia 13 de maio de 2006, dia que apresentou nos seis primeiros meses a maior diferença de temperatura entre os abrigos: com 2,3 °C de diferença entre o abrigo sem *foil* e sem ventilação forçada (abrigo #1, em vermelho) em comparação com o abrigo com *foil* e com ventilação forçada (abrigo #3, azul).

Observando-se os perfis de temperatura em forma aparente aproximada de uma senóide, verifica-se diferença considerável entre os valores de temperatura evidenciada no intervalo das 13h às 17h, ou seja, de maior incidência solar no dia.

Analisando isoladamente cada um dos parâmetros, a radiação e o fluxo do ar, pode-se perceber uma redução maior na diferença de temperatura para o caso da utilização da ventoinha e conseqüente aumento do fluxo de ar, enquanto que para o caso da minimização do efeito da radiação com a presença de *foil*, o referido efeito é pouco considerável.

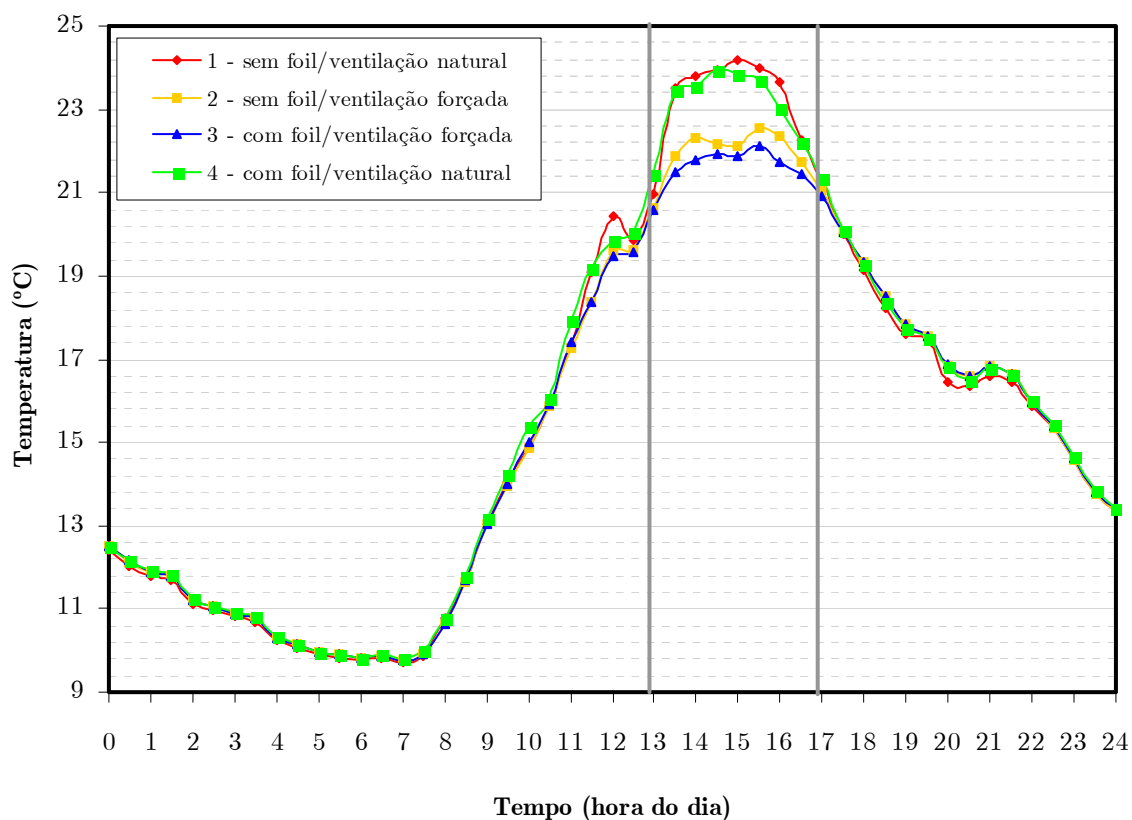


Figura 14 - Comportamento da temperatura ao longo do dia 13 de maio de 2006 para os diferentes abrigos em estudo.

Adotou-se o abrigo #3 como referência, pois ele apresentou os menores valores de temperatura ao longo do dia. Assim, por meio da **Figura 15** é possível observar as diferenças entre as temperaturas dos diferentes abrigos, sobretudo entre 13 e 18h. Nota-se uma diferença máxima de 2,3 °C entre os abrigos #1 e #3, além de 2,0 °C entre os abrigos #2 e #3, e 0,6 °C entre os abrigos #4 e #3. Portanto, por meio destes gráficos já é possível inferir que a ventilação é o fator com maior influência atenuante das diferenças dos valores de temperatura, sendo que a utilização do *foil* representa influência pouco significativa.

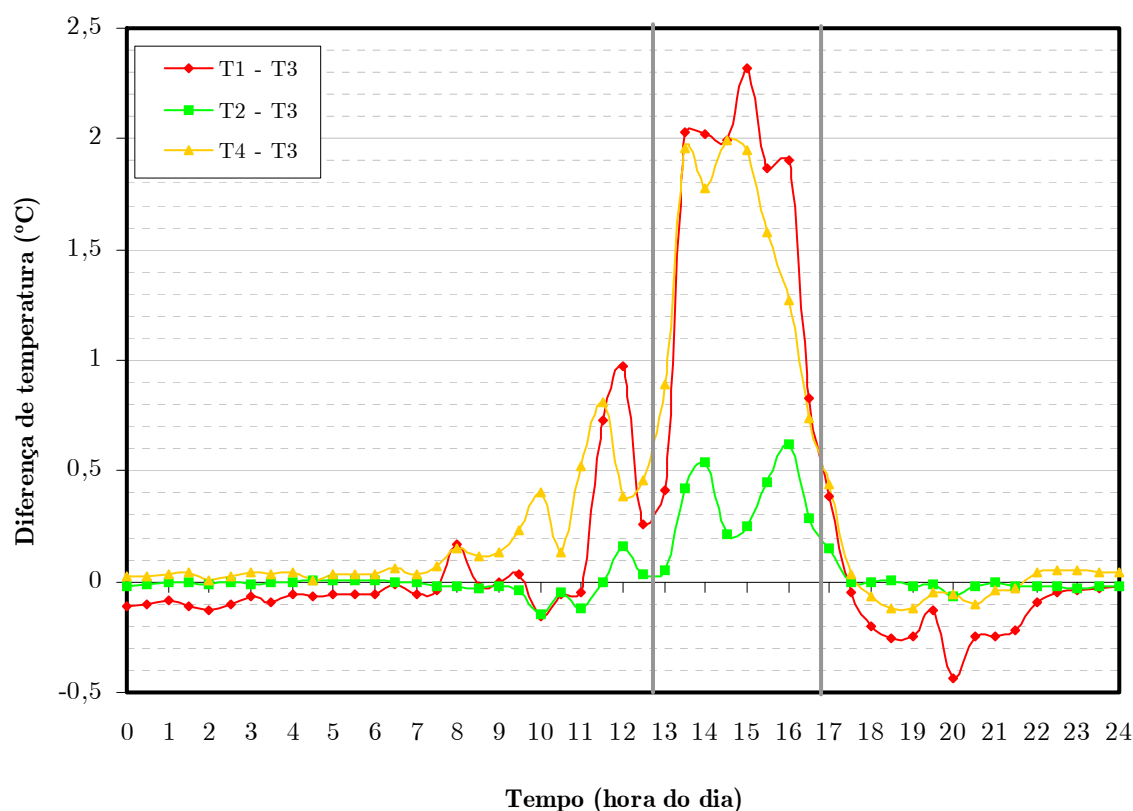


Figura 15 – Diferenças de temperatura ao longo do dia 13 de maio de 2006 para os diferentes abrigos em estudo.

5.1.2. Correlação entre as temperaturas dos diferentes abrigos

Tomando como referência a temperatura do abrigo #3 (com *foil* e ventoinha), foi possível calcular o erro relativo dos outros abrigos. Analisando o intervalo de dados do mês de maio de 2006, gráficos de distribuição (histogramas) foram gerados, conforme apresentados na **Figura 16**.

Nele é possível observar-se, no histograma (A), uma maior concentração dos erros positivos para o abrigo #1 (sem *foil* e sem aspiração forçada), devido ao fato de este estar sujeito a maiores interferências da radiação solar e do fluxo de vento.

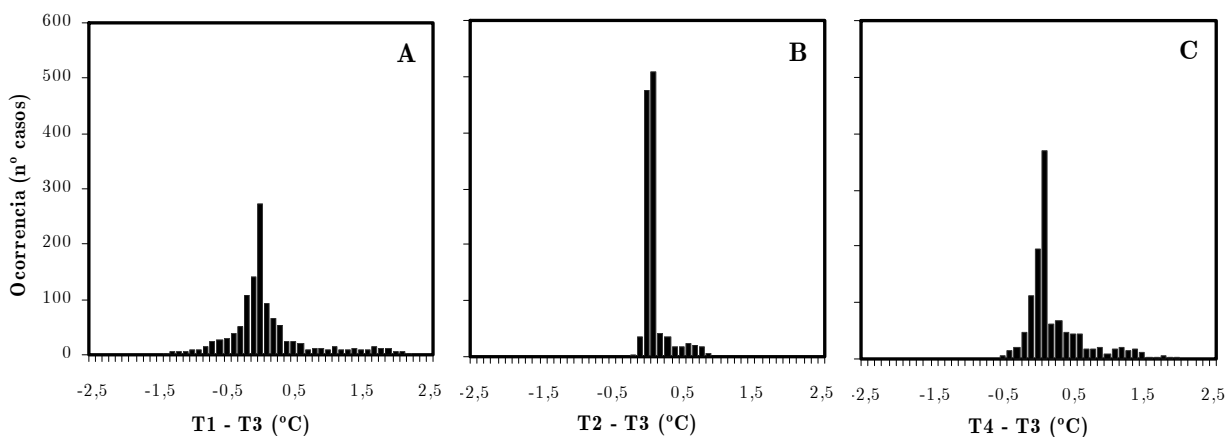


Figura 16 – Histogramas: distribuição das diferenças relativas ao abrigo #3. (A) Diferença de temperatura entre os abrigos #1 e #3; (B) Diferença de temperatura entre os abrigos #2 e #3; (C) Diferença de temperatura entre os abrigos #4 e #3. Obs.: escala vertical idêntica para os três gráficos; escala horizontal com subdivisões em 0,1 °C.

Comparando os histogramas, evidentemente percebe-se um melhor desempenho do abrigo #2 (sem *foil*, com ventoinha) no gráfico (B), pois teve maior concentração dos pontos em intervalos de diferenças pequenas. Para o gráfico (A), 90% das diferenças relativas se encontram entre os valores $-1,0$ e $1,0$ °C; para o gráfico (B),

90% se encontram no intervalo $-0,2$ a $0,2$ °C; e para o gráfico (C), 90% das diferenças se encontram no intervalo $-0,8$ a $0,8$ °C.

Esta análise é compatível com a análise anterior do dia típico representativo, ou seja, pode-se perceber que a ventilação forçada é uma característica de maior influência na atenuação das diferenças de temperatura, e o uso de *foil* atenua muito pouco a influência da radiação solar no aquecimento indesejado do abrigo de PVC.

Ainda, adotando-se como referência os valores do abrigo #3, é possível correlacionar os valores de temperatura deste abrigo com os dos demais, resultando na obtenção dos gráficos mostrados na **Figura 17**.

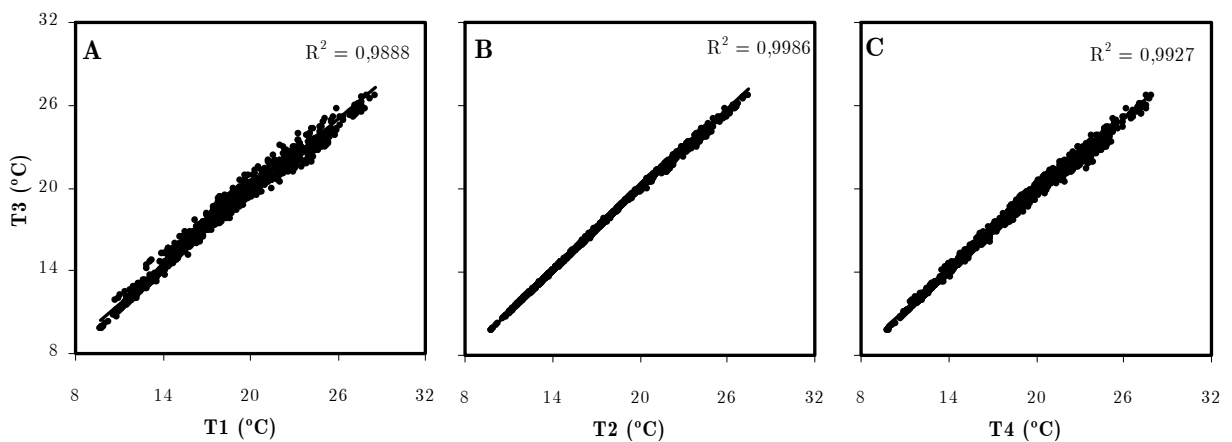


Figura 17 – Correlações dos valores das medições de temperatura entre os abrigos. (A) Correlação entre os abrigos #3 e #1; (B) Correlação entre os abrigos #3 e #2; (C) Correlação entre os abrigos #3 e #4. Obs.: escala vertical idêntica para os três gráficos.

Pela figura anterior nota-se que o gráfico (B) apresenta boa concordância entre os valores das temperaturas entre os abrigos de referência e o abrigo #2, reforçando a hipótese de que a influência do fluxo de ar interno forçado pela ventoinha é mais

relevante que a influência do uso de *foil* na mitigação dos efeitos do aquecimento dos abrigos pela radiação solar incidente.

Uma última análise é dada pela **Figura 18**, em que as diferenças de temperatura entre os abrigos são distribuídas ao longo dos horários do dia, utilizando-se de dados de todos os dias disponíveis. Por meio da constatação do gráfico (B), verifica-se, portanto, mais uma vez a hipótese de que a ventilação forçada é a medida mitigadora que apresenta maior eficiência na diminuição das diferenças de temperatura, tanto durante o dia quanto durante a noite.

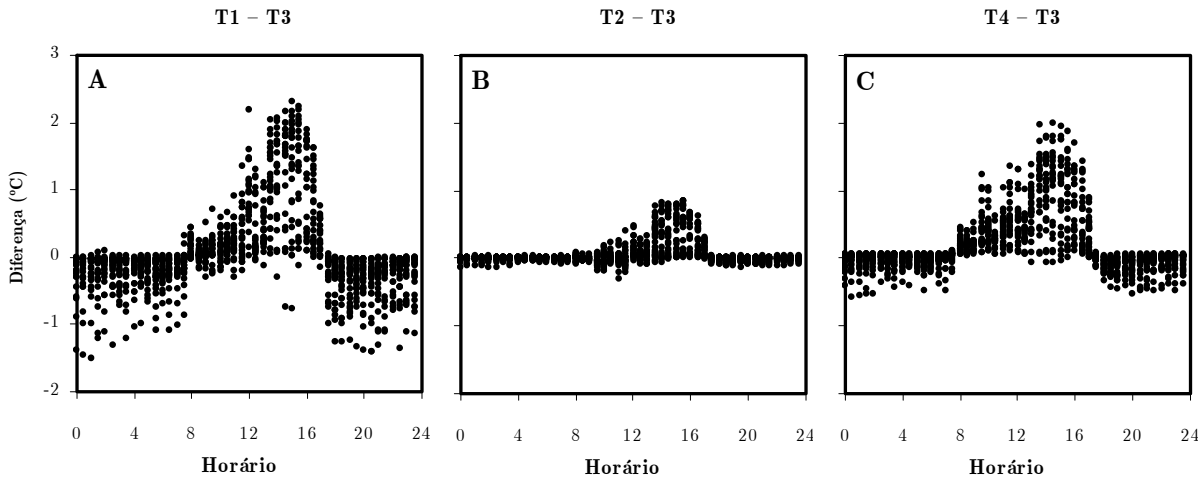


Figura 18 – Distribuição das diferenças dos valores de temperatura ao longo do dia. (A) Diferenças entre os abrigos #3 e #1; (B) Diferenças entre os abrigos #3 e #2; (C) Diferenças entre os abrigos #3 e #4. Obs.: escala vertical idêntica para os três gráficos.

É interessante observar ainda o fato de que existem diferenças negativas consideráveis nos casos (A) e (C) para o período noturno de aquisição dos dados, com diferença máxima negativa de $-1,5$ e $-0,6$ °C, respectivamente, nos abrigos #1 e #4. O abrigo #2, apresentada no gráfico (B), apresentou diferença máxima negativa de apenas $-0,3$ °C.

5.1.3. Episódio climático

As diferenças negativas noturnas observadas na **Figura 18** podem ser mais bem visualizadas por meio da abordagem do clima sob a ótica dos episódios climáticos representativos. Tal análise é ilustrada por um trecho da série total de dados coletados e está apresentada pela **Figura 19**, referente às variações de temperatura, diferenças de temperatura entre os abrigos, velocidades máxima e média do vento externo e radiação solar para o mês de maio de 2006.

Pela **Figura 19** observa-se que as maiores diferenças negativas nos abrigos ocorrem em dois episódios, um durante a noite do dia 9 para o dia 10, e outro durante as noites dos dias 16 a 19. Estes dias representam períodos que antecedem a aproximação de uma frente fria e conseqüente domínio de uma massa de ar polar, fases do prenúncio e de avanço da massa de ar fria. Tal fato é verificado pela queda de temperatura nos dias seguintes – dia 11 para o 1º episódio e dias 20 a 23 para o segundo – e pela diminuição da radiação solar incidente, que é o efeito da nebulosidade, nesta fase de domínio da massa de ar polar.

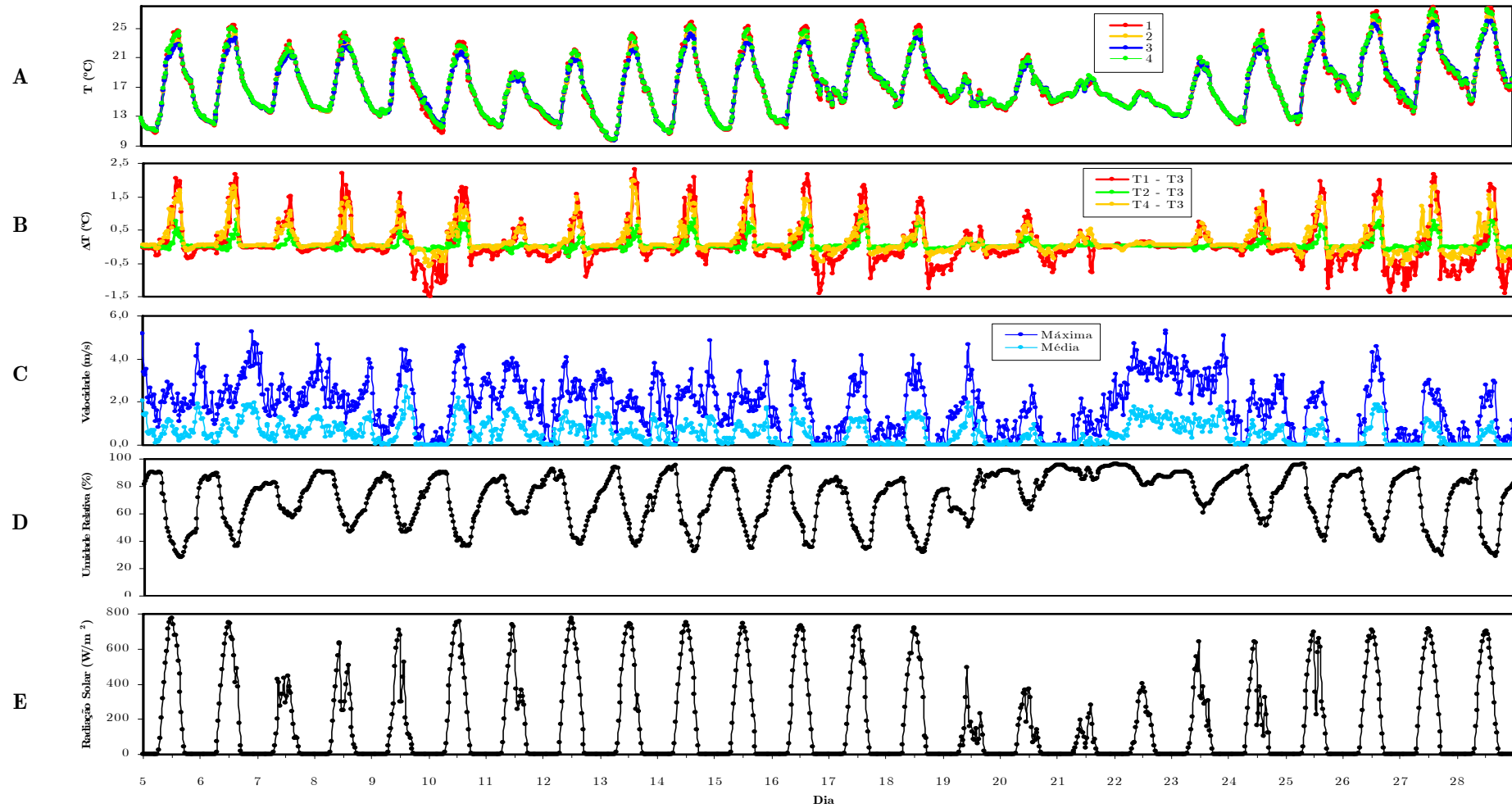


Figura 19 – Mês de maio de 2006, sob escala de abordagem de episódios climáticos. **(A)** Perfis de temperatura para os diferentes abrigos; **(B)** Diferenças de temperatura entre os abrigos; **(C)** Velocidades máxima e média do vento; **(D)** Umidade relativa do ar; **(E)** Radiação solar local. Obs. Escala horizontal idêntica para os gráficos.

Verifica-se também que o segundo episódio apresenta maior magnitude que o primeiro, estando sob domínio da massa de ar frio por 5 dias, até que a partir do dias 24 e 25, inicia-se a fase de tropicalização da massa de ar fria e conseqüente recuperação dos comportamentos de temperatura e radiação solar típicos de massa de ar quente.

Tomando-se como base o segundo episódio de entrada de uma frente fria, o fato dos valores negativos da diferença entre as temperaturas dos abrigos tem sido observado nos períodos que antecedem a chegada da massa de ar fria. Tal comportamento da diferenças de temperatura negativas é devido à radiação noturna em períodos que não apresentam nebulosidade, ocorrendo a perda de calor por irradiação para o céu, mecanismo melhor discutido no item 5.3.1. Perdas por radiação noturna, página 71.

Nas noites dos dias 17 a 19, o perfil de temperatura é alterado, possuindo amplitude menor que a dos dias anteriores que estão sob domínio de massa de ar quente. Pode-se ainda observar que nas noites dos dias 17 a 19, a velocidade do vento se mantém totalmente nula (período de calmaria), demonstrando um estado de atmosfera estável.

A **Figura 20** é composta por imagens do satélite GOES que compreendem as fases de *prenúncio*, *avanço*, *domínio* e *tropicalização* do episódio representativo que inicia se no dia 16 de maio de 2006.

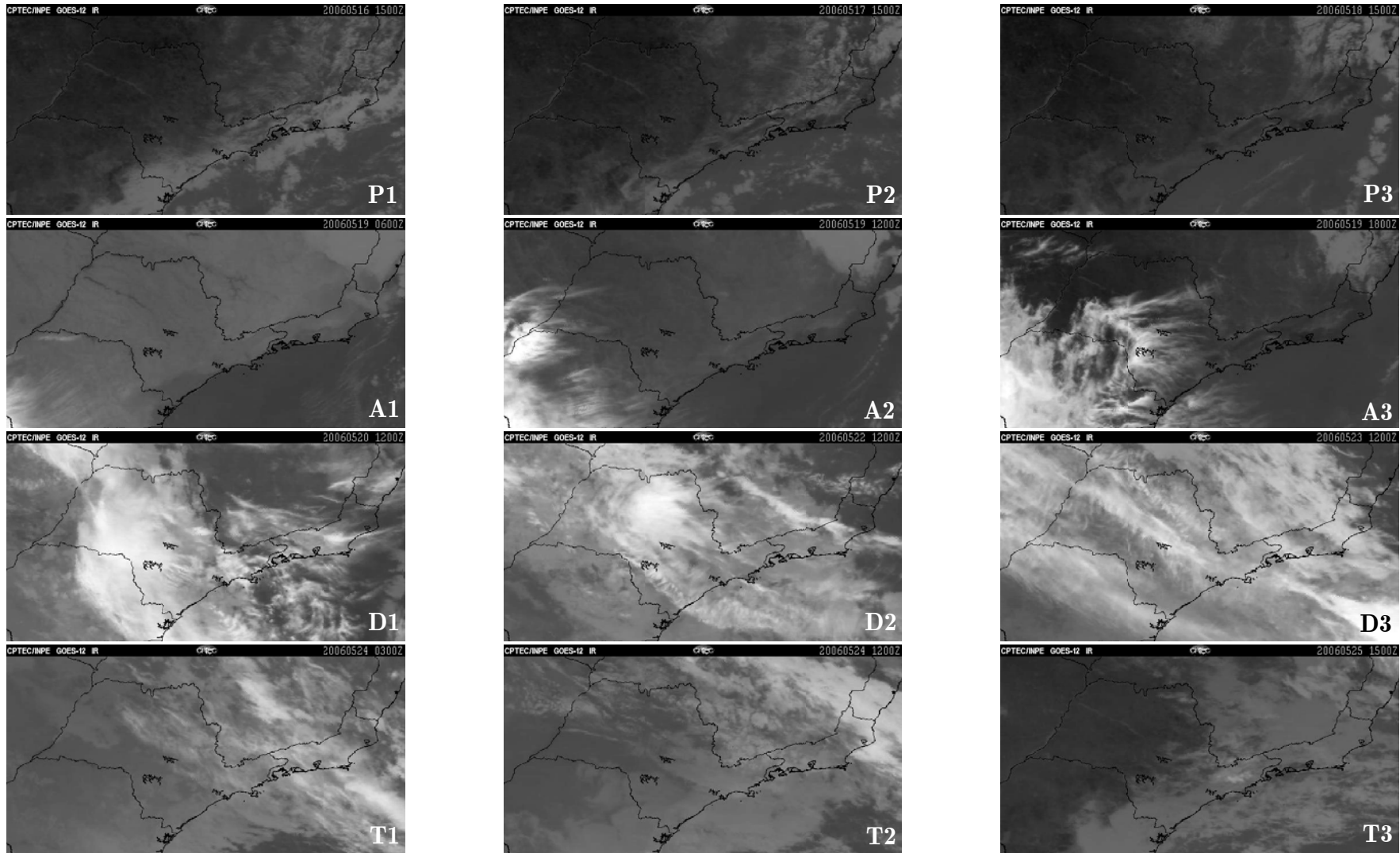


Figura 20 — Imagens em infravermelho captadas pelo satélite GOES para as fases da massa de ar fria com entrada no dia 16 de maio de 2006. **P1, P2 e P3**: Fase de *prelúdio* às 15h dos dias 16, 17 e 18, respectivamente; **A1, A2 e A3**: Fase de *avanço* às 6, 12 e 16h do dia 19, respectivamente; **D1, D2 e D3**: Fase de *domínio* às 12h dos dias 20, 22 e 23, respectivamente; **T1, T2 e T3**: Fase de *tropicalização* às 3, 12 e 15h do dia 24, respectivamente. **Fonte**: INPE, 2007.

5.2. Análise das causas

Uma vez caracterizados, na seção anterior (5.1. Análise dos efeitos, pág. 55), qualitativa e quantitativamente os efeitos causados pela radiação solar global incidente e pela ação do fluxo dos ventos nos abrigos, a seção atual tem o propósito de correlacionar as diferenças de temperatura com os agentes causadores destas interferências.

5.2.1. Correlação das temperaturas com a radiação solar global

Os resultados e as respectivas análises anteriormente discutidos tiveram enfoque nos efeitos gerados nos diferentes abrigos em estudo, ou seja, foram caracterizadas detalhadamente as diferenças registradas nas medições de temperatura de cada abrigo, sob abordagem de um único dia, considerado como típico representativo de uma dada situação; e sob a abordagem de episódios climáticos, ou seja, de uma sucessão habitual de tipos de tempo. Tal estudo do domínio de sistemas atmosféricos atuantes na região de monitoramento, tomado em escala microclimática e regional, foi realizado com base nos conceitos da abordagem dinâmica do clima.

Uma vez realizadas as análises dos efeitos da influência, caracterizados qualitativamente, da radiação solar e da velocidade dos ventos externos, torna-se necessária a compreensão quantitativa das causas e a magnitude dos parâmetros, sob a ótica dos efeitos combinados e isolados destes fatores de influência em medições de temperatura do ar exterior.

Uma primeira análise quantitativa combinada é dada pela **Figura 21**, onde estão representados todos os valores das diferenças de temperatura com relação à

radiação solar global, para todas as velocidades do vento exterior. O fato já verificado pelas análises anteriores, de que o abrigo que não apresenta ventoinha nem isolante térmico (*foil*) apresenta maiores diferenças, também é observado no gráfico (A) desta figura. Além disso, pode-se verificar que as maiores diferenças ocorrem para os maiores valores de radiação solar, indicando a tendência de que estas grandezas são diretamente proporcionais.

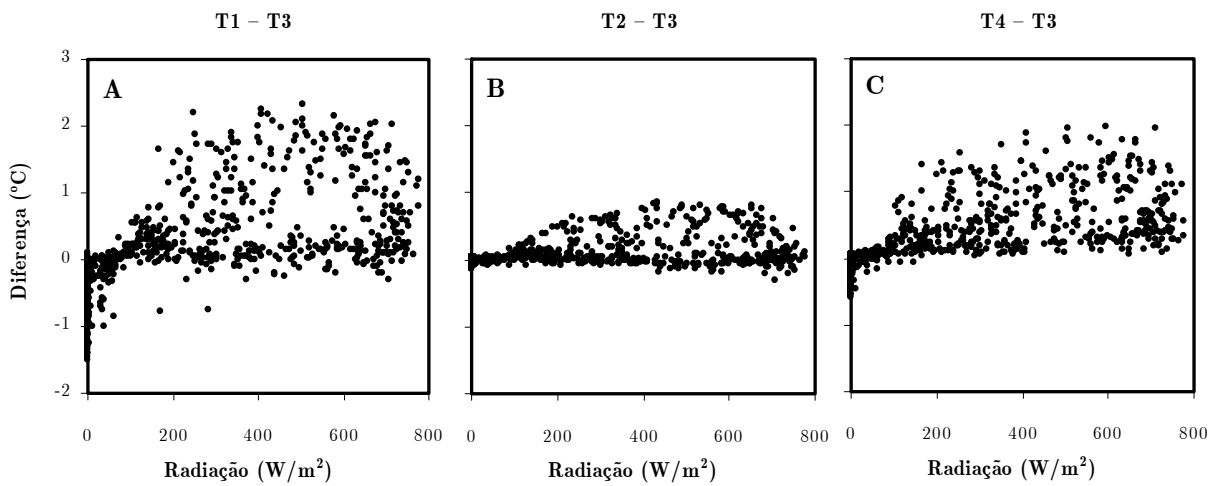


Figura 21 – Correlações da diferenças de temperatura *versus* radiação solar global. (A) Correlação da diferença de temperatura entre os abrigos #3 e #1; (B) Correlação da diferença entre os abrigos #3 e #2; (C) Correlação da diferença entre os abrigos #3 e #4. Obs.: escala vertical idêntica para os três gráficos.

Analisando isoladamente o efeito da radiação, gerou-se a **Figura 22**, em que são representadas as distribuições por meio de diagrama do tipo *boxplot* das diferenças de temperatura em relação à radiação solar, divididas em oito classes de 100 W/m^2 cada. Para tal análise utilizou-se de dados de radiação que se encontravam em condições de velocidade média do ar abaixo de 1 m/s . Para o gráfico (A), observa-se que até valores de 600 W/m^2 a radiação possui efeito de aumento dos valores da diferença de temperatura.

A tendência esperada seria de aumento para valores compreendidos no intervalo de 700 a 800 W/m², porém a quantidade de ocorrência de valores que se encontravam neste intervalo é muito pequena.

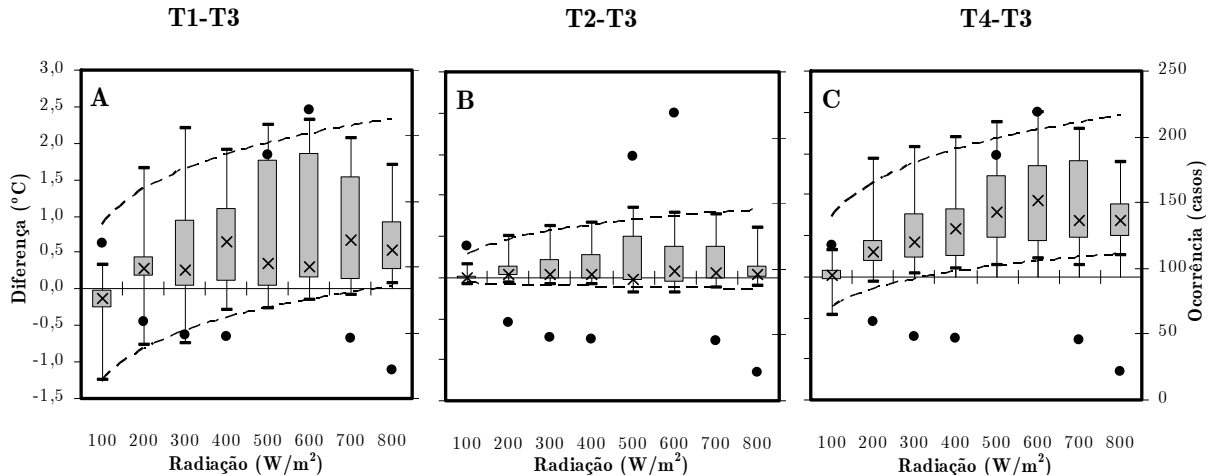


Figura 22 – Distribuição em representação do tipo *boxplot* das diferenças de temperatura *versus* radiação solar, em condições de velocidade do vento externo abaixo de 1 m/s. Cada barra preenchida cinza (*box*) representa 50% dos dados; o valor médio é representado pelo símbolo (x); os valores de máximos e mínimos são representados por meio das barras lineares superior e inferior, respectivamente; e as curvas tracejadas superior e inferior representam os respectivos ajustes dos valores máximos e mínimos. O número de amostras para cada classe de radiação está representado por pontos (●), com escala secundária à direita. (A) *Boxplot* da diferença entre os abrigos #3 e #1; (B) *Boxplot* da diferença entre os abrigos #3 e #2; (C) *boxplot* da diferença entre os abrigos #3 e #4. Obs.: escalas verticais idênticas para os três gráficos.

Já o gráfico (B) apresenta um comportamento de aumento da diferença de temperatura até o valor de 500 W/m², apresentando diminuição da diferença a partir deste valor. Quanto ao gráfico (C), a análise é análoga ao do gráfico (A).

As curvas tracejadas ajustadas proporcionam uma melhor visualização do perfil esperado de variação das diferenças de temperatura conforme variação da radiação. Percebe-se que a diferença de temperatura cresce com o aumento da

radiação solar, se tornando menos dependente a partir dos valores maiores de radiação.

É interessante observar nestes gráficos o efeito da radiação nos abrigos que não apresentam dispositivos de atenuação do efeito da radiação. O abrigo #4, que apresenta apenas *foil* é ligeiramente mais eficiente que o abrigo #1, que não apresenta nenhum tipo de proteção. Já o abrigo #2, que não possui *foil*, mas possui ventilação interna forçada proporcionada pela ventoinha, apresenta menores valores nas diferenças de temperatura.

Deste modo, este gráfico permite inferir que a ventilação interna é medida mitigadora mais eficiente que o *foil* no que se refere aos efeitos do aquecimento interno dos abrigos pela radiação solar incidente.

5.2.2. Correlação das temperaturas com o fluxo dos ventos

Análise análoga ao do caso da radiação solar está apresentada na **Figura 23**, em que os valores das diferenças de temperatura são comparados em relação à velocidade média do ar externo, para todas as os valores de radiação. Pode-se verificar que as maiores diferenças ocorrem nos menores valores de velocidade do vento, indicando a tendência de que estas grandezas são inversamente proporcionais.

A faixa da velocidade do vento se apresentou pouco extensa, pois o ideal seria ter a ocorrência de ventos médios acima de 3 m/s, para que assim fossem avaliadas com melhor precisão as indicações de que as diferenças de temperatura para abrigos não aspirados são significativamente reduzidas em condições de ventos fortes.

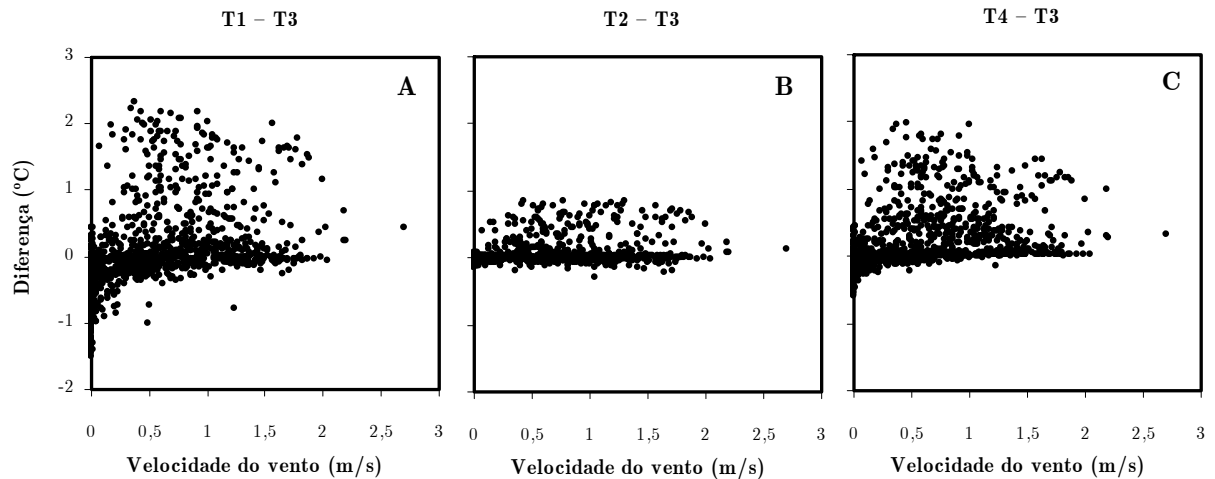


Figura 23 – Correlações das diferenças de temperatura *versus* velocidade média do ar externo. (A) correlação da diferença entre os abrigos #3 e #1; (B) correlação da diferença entre os abrigos #3 e #2; (C) correlação da diferença entre os abrigos #3 e #4. Obs.: escala vertical idêntica para os três gráficos.

Portanto, pelas caracterizações quantitativas das causas combinadas da radiação e da velocidade do vento, pode-se deduzir que a tendência é que quanto maior for a radiação e quanto menor for a velocidade do vento, maiores serão as diferenças entre os abrigos que não apresentam nenhum tipo de dispositivo que atenua a ação destes fatores.

Fazendo a análise do efeito isolado da velocidade do vento exterior, gerou-se a **Figura 24**, em que estão representadas as diferenças de temperatura em relação à velocidade do vento, dividido em quatro classes de 0,5 m/s cada, com radiação fixada em valores acima de 1 W/m^2 , ou seja, restringindo os valores obtidos apenas durante o dia.

Os gráficos apresentados permitem verificar que existe uma sutil tendência na redução das diferenças de temperatura com o aumento da velocidade exterior do ar. Tal comportamento não está claramente visível, pois a série de dados não apresentou

valores com velocidade acima de 2,5 m/s, limitando a série a apenas estes resultados indicativos.

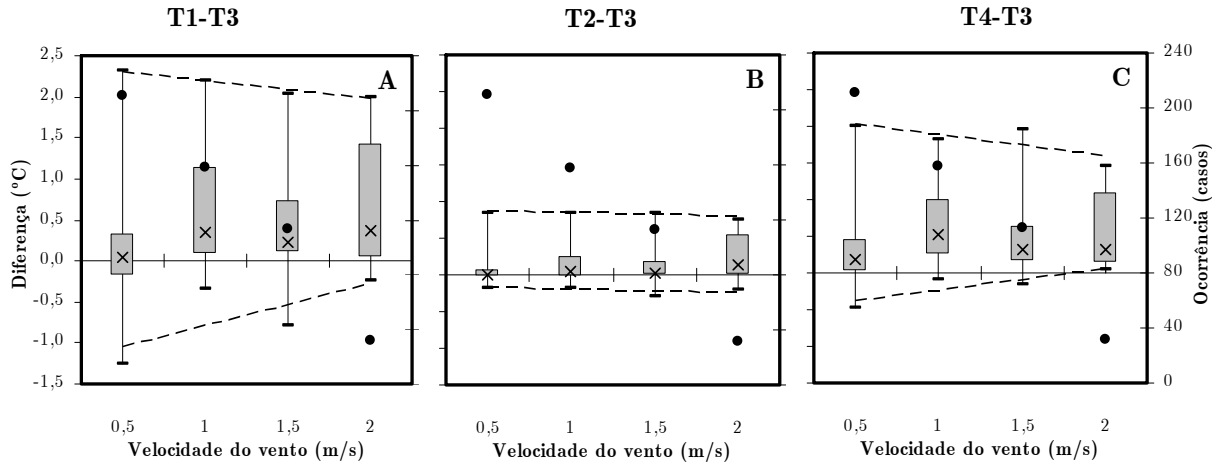


Figura 24 – Distribuição em representação do tipo *boxplot* das diferenças de temperatura *versus* velocidade do vento exterior, em condições de radiação solar acima de 150 w/m². Cada barra preenchida cinza (*box*) representa 50% dos dados; o valor médio é representado pelo símbolo (×); os valores de máximos e mínimos são representados por meio das barras lineares superior e inferior, respectivamente; e as linhas tracejadas superior e inferior representam os respectivos ajustes dos valores máximos e mínimos. O número de amostras para cada classe de radiação está representado por pontos (●), com escala secundária à direita. (A) *Boxplot* da diferença entre os abrigos #3 e #1; (B) *Boxplot* da diferença entre os abrigos #3 e #2; (C) *Boxplot* da diferença entre os abrigos #3 e #4. Obs.: escalas verticais idênticas para os três gráficos.

As linhas tracejadas de ajuste ajudam na visualização desta influência, principalmente nos gráficos (A) e (C). Nota-se também nestas linhas, no gráfico (B), que a velocidade do vento externo não influencia o abrigo #2, uma vez que este possui ventilação interna forçada.

Destes gráficos deduz-se, portanto, que a ventilação interna forçada implica na redução das diferenças de temperatura, pois o fluxo constante de ar dentro do abrigo é responsável pela minimização do aquecimento decorrente da radiação solar

incidente. Deduz-se também que a ventilação externa do ar (vento) não é suficiente para redução destes efeitos da radiação nas condições de velocidades analisadas.

5.3. Análises complementares

5.3.1. Perdas por radiação noturna

O mês de setembro de 2007 foi o que apresentou ausência de nebulosidade mais evidente no período, favorecendo a ocorrência de efeitos mais significativos de perda de calor dos abrigos por radiação noturna. A noite típica representativa selecionada para análise deste comportamento ocorreu na passagem do dia 13 para o dia 14 de setembro, sendo o perfil de temperaturas ilustrado na **Figura 25**.

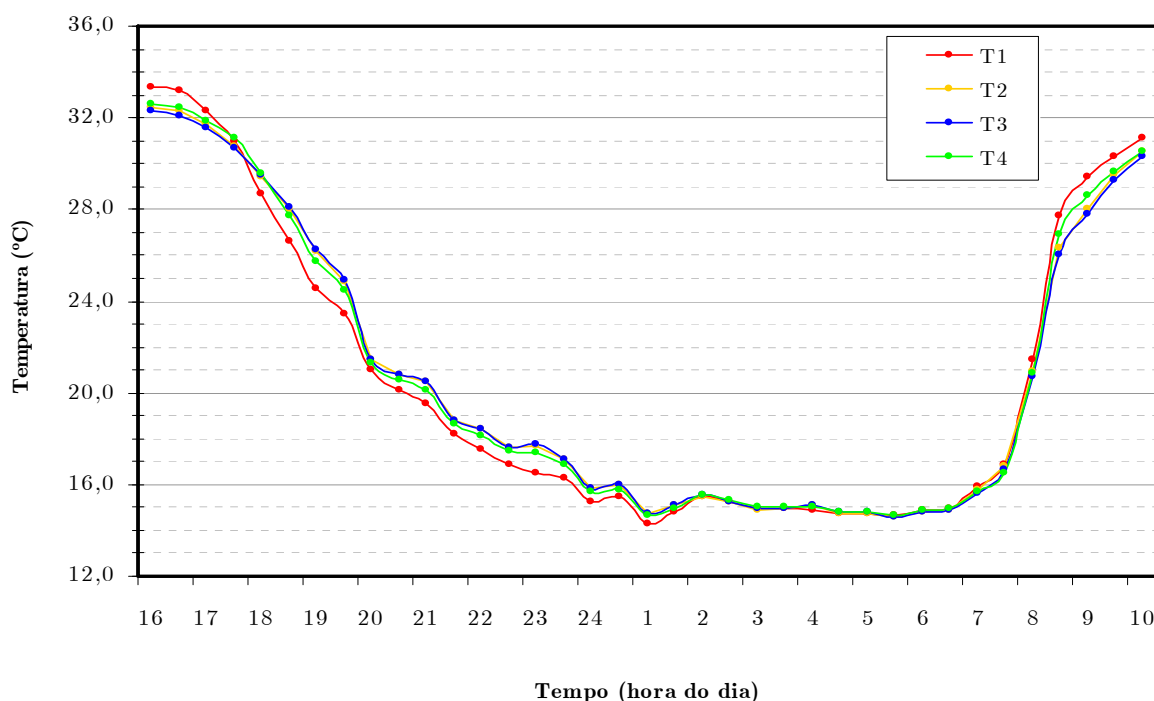


Figura 25 – Temperatura dos abrigos ao longo da noite da passagem do dia 13 para o dia 14 de setembro de 2006.

Melhor visualização é fornecida pela **Figura 26**, que apresenta as diferenças de temperatura entre os abrigos para a noite em questão. Verifica-se que o início da alteração do comportamento dos abrigos ocorre por volta das 18h, horário em que a radiação solar global não exerce mais efeito significativo no aquecimento dos abrigos. Tomando o abrigo #1 como o exemplo do caso mais extremo, por não apresentar nem dispositivo de barreira de radiação (*foil*) nem aspiração forçada (ventoinha), e tendo como referência a temperatura do abrigo #3, observa-se que por volta das 19h é atingida uma diferença de temperatura de 1,6 °C. Esta diferença vai diminuindo até as 2h da manhã do dia 14, permanecendo a partir de então praticamente nula até o aparecimento do sol, que ocorre entre 6 e 7h da manhã do dia 14.

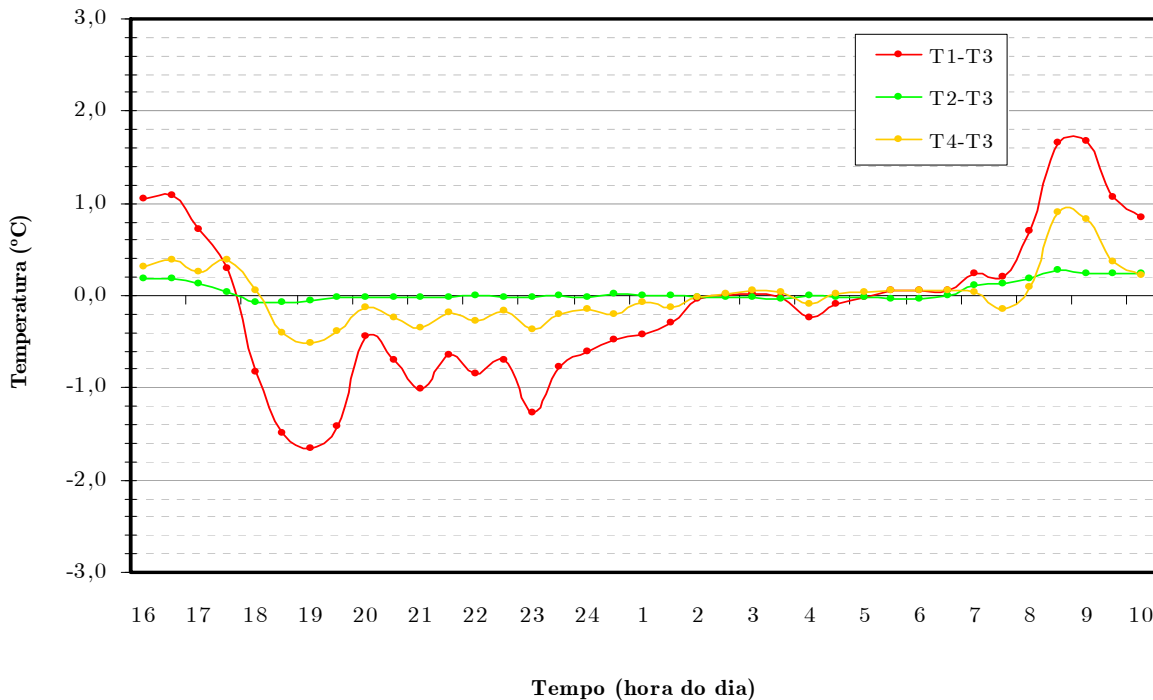


Figura 26 – Diferenças de temperatura dos abrigos ao longo da noite da passagem do dia 13 para o dia 14 de setembro de 2006.

Podem ser definidas três fases distintas no comportamento do abrigo #1 em relação ao abrigo #3 de referência, caso extremo que apresenta as maiores diferenças de temperatura:

- 1ª Fase: é iniciada com o entardecer seguido pelo crepúsculo, fase em que as diferenças de temperatura deixam de ser positivas e se tornam negativas, indicando que o ar no interior do abrigo #1 está deixando de ser mais quente e passando a ser mais frio que o ar que se encontra no abrigo #3. Nesta fase ocorre a perda mais significativa de calor por radiação noturna, fato devido ao alto calor específico do abrigo #1, uma vez que, por este ser o mais fácil de aquecer e ganhar calor durante o dia por meio da radiação solar global, também é o mais fácil de se resfriar e perder durante a noite o calor acumulado de dia, por meio de radiação noturna – perda de energia para o céu, corpo negro que absorve toda a radiação que nele incide.
- 2ª Fase: com início às 19h do dia 13, instante em que as diferenças de temperatura deixam de aumentar e iniciam uma diminuição gradual até às 2h da manhã do dia 14, esta fase se caracteriza pelo aumento gradual da temperatura do abrigo #1 em um intervalo de cerca de 7 horas. Este aumento no abrigo #1 é devido ao ganho de calor que está sendo irradiado pelo solo, que recebe enorme quantidade de energia durante o dia, mas que, durante a noite, a re-emite por irradiação, porém, com uma taxa menor que a perda ocorrida no abrigo, pois o solo possui calor específico menor.
- 3ª Fase: inicia-se às 2h da manhã do dia 14 e termina com o alvorecer, sendo caracterizada pelo equilíbrio térmico entre todos os abrigos e o ar exterior,

implicando em diferenças praticamente nulas entre as temperaturas medidas pelos termopares no interior dos abrigos.

Sintetizando, o fenômeno observado pelas perdas noturnas de calor ocorre provavelmente devido às diferenças de calor específico dos abrigos. Enquanto que durante o dia o abrigo #1, que não possui barreira de radiação (*foil*), é aquecido mais rapidamente, durante a noite ele é resfriado também mais rapidamente.

5.3.2. Comportamento do sensor HMP45C-Vaisala acoplado ao abrigo 41003

Conforme mencionado, foi realizada na estação de referência a coleta simultânea dos dados de temperatura com o sensor de temperatura e umidade relativa modelo HMP45C-Vaisala acoplado ao abrigo de proteção modelo 41003-R.M. Young, vide **Figura 8** – pág. 33.

Como intervalo de análise adotaram-se como dias típicos representativos os dias 26, 27 e 28 de maio de 2006, que apresentam características semelhantes, conforme ilustra a **Figura 27**. Nesta figura estão apresentadas respectivamente: (A) os perfis de temperatura; (B) perfis de diferenças de temperatura; (C) velocidades média e máxima dos ventos; e (D) radiação solar global.

Verifica-se que a temperatura medida pelo sensor HMP45C apresenta, durante o dia, valores menores que os valores de temperatura dos abrigos #1 e #4 (ambos sem aspiração forçada); e valores maiores que os abrigos #2 e #3 (ambos com aspiração forçada).

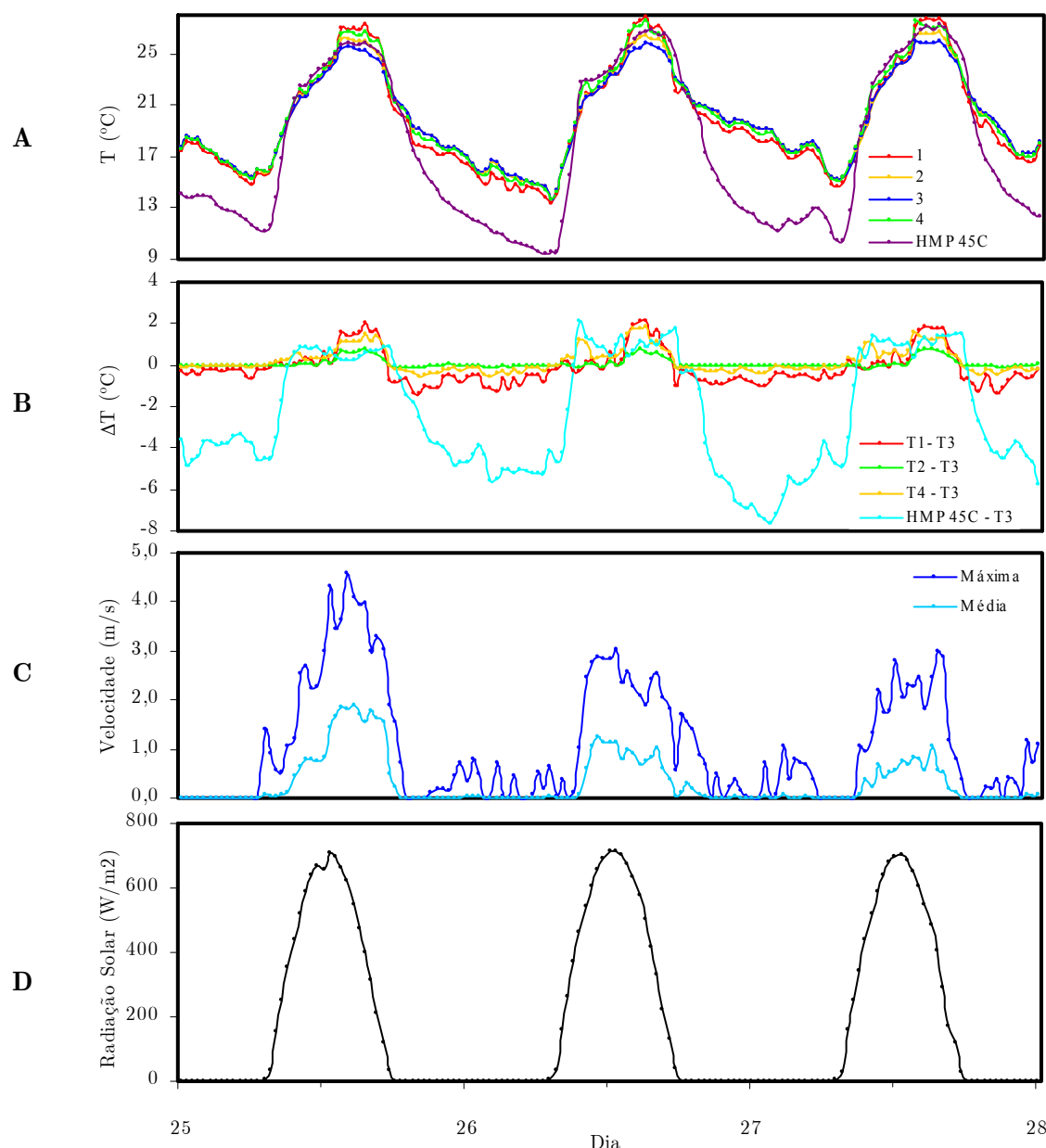


Figura 27 – Análise dos dias 26, 27 e 28 de maio de 2006 com o uso do sensor HMP45C acoplado ao abrigo 41003. (A) Perfis de temperatura para os diferentes abrigos; (B) Diferenças de temperatura entre os abrigos; (C) Velocidades máxima e média do vento exterior; (D) Radiação solar local. Obs. Escala horizontal idêntica para os gráficos.

Tal fato permite dizer que o comportamento do abrigo 41003 é equivalente, mas, com desempenho ligeiramente superior aos abrigos experimentais não aspirados utilizados. Isto pode ser devido a dois fatores: o material plástico do abrigo 41003 não ser o mesmo dos tubos de PVC utilizados como abrigo dos termopares, e, portanto,

apresentando características físicas diferentes, tal como no comportamento térmico; e também pelo *design* característico do abrigo, formado por dez pratos plásticos sobrepostos que criam um micro-clima distinto daquele observado nos abrigos experimentais.

Porém, é interessante destacar a nítida diferença que o abrigo 41003 apresenta no período noturno, demonstrando que as perdas por radiação noturna neste abrigo é muito significativa. Pela **Tabela 2** é possível verificar as temperaturas máximas e mínimas dos diferentes abrigos, assim como as diferenças de temperatura, tendo como referência o abrigo experimental #3. Nota-se que a maior diferença das temperaturas máximas (no período com luz solar) entre o abrigo 41003 e o abrigo #3 ocorreu no dia 27, apresentando o valor de 2,1 °C de diferença. Já a maior diferença das temperaturas mínimas (período noturno), ocorreu no dia 28, com o valor de -7,6 °C de diferença.

Tabela 2 – Valores de temperatura (°C) obtidos pelo sensor HMP45C comparados aos abrigos experimentais.

Temperatura	Máxima			Mínima		
	Dia 26	Dia 27	Dia 28	Dia 26	Dia 27	Dia 28
T1	27,2	27,9	27,7	14,8	13,4	14,7
T2	26,1	26,4	26,6	15,4	13,7	15,2
T3	25,5	25,8	26,0	15,4	13,7	15,2
T4	26,7	27,6	27,6	15,3	13,6	15,0
HMP45C	25,8	26,8	27,3	11,2	9,4	10,4
T1 – T3	2,0	2,2	1,9	-1,4	-1,3	-1,4
T2 – T3	0,8	0,8	0,8	-0,1	-0,1	-0,2
T4 – T3	1,5	1,8	1,5	-0,5	-0,5	-0,5
HMP45C – T3	0,9	2,1	1,5	-4,9	-7,0	-7,6

T1, T2, T3, T4 e HMP45C: Temperaturas dos abrigos experimentais #1, #2, #3, #4 e do abrigo 41003 com o sensor HMP45C, respectivamente.

5.3.3. Alteração da escala temporal de aquisição de dados

O intervalo entre as aquisições dos valores de temperatura no interior dos abrigos foi reduzido de 20 para 10 segundos, e os registros dos valores de temperatura, que são totalizações obtidas pela média dos valores adquiridos, tiveram o seu intervalo reduzido de 30 para 5 minutos. Tal medida aumentou de 48 para 288 registros diários de temperatura para cada abrigo, permitindo assim o aumento da resolução dos dados, conforme pode ser observado na **Figura 29**, relativa ao dia 12 de setembro.

Sob a abordagem em escala temporal diário e por meio de um dia típico representativo, o dia 12 de setembro se encontrava sob domínio de massa tropical, verificado pela alta amplitude térmica – em torno de 10 °C a diferença entre a máxima e mínima temperatura do dia; pela alta incidência solar; e pela ausência de nebulosidade, conforme pode ser verificado na imagem de satélite (A) da **Figura 28**. Nesta figura também estão apresentadas outras duas imagens de satélite, de caráter comparativo: a imagem (B) do dia 15 ilustrando o prenúncio de entrada de uma frente fria no estado de SP, verificado pelas nuvens (em branco) nos estados da Região Sul; e a imagem (C) do dia 16 ilustrando o domínio da massa polar no estado de São Paulo, totalmente coberto pelas nuvens.

As características do dia 12 descritas anteriormente contribuíram para a ocorrência de maiores diferenças de temperatura entre os abrigos, com 3,7 °C de diferença máxima entre o abrigo sem *foil* e sem ventilação forçada (abrigo #1, em

vermelho) em comparação com o abrigo com *foil* e com ventilação forçada (abrigo #3 de referência, azul).

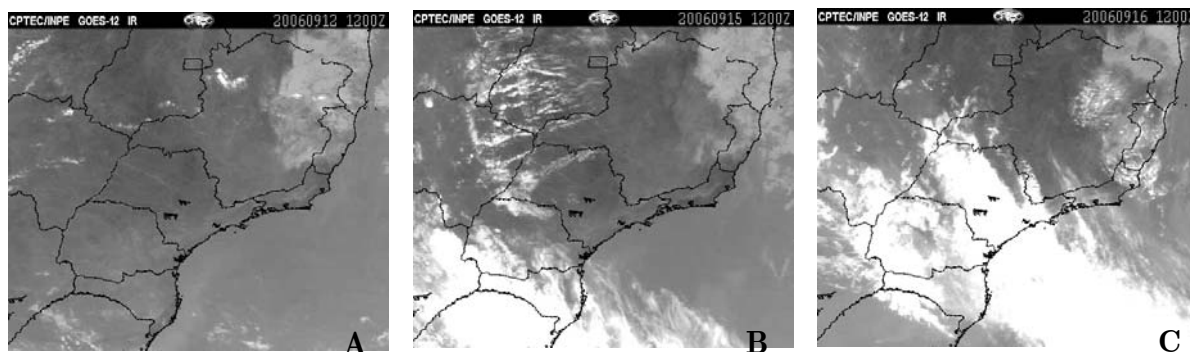


Figura 28 – Imagens em infravermelho captadas às 12h pelo satélite GOES nos dias 12, 15 e 16 de setembro. **A:** imagem do dia 12, sob o domínio de massa tropical; **B:** imagem do dia 15, apresentando a fase de *prelúdio* da entrada da frente fria; **C:** imagem do dia 16, com o estado de SP sob o domínio da massa polar. Fonte: INPE, 2006.

Para fins de comparação e verificação visual de diferenças, elaborou-se um gráfico do mesmo dia com valores médios da temperatura em intervalos de 30 minutos, sendo estes valores obtidos pela média aritmética dos dados experimentalmente obtidos a cada 5 minutos, com o resultado mostrado na **Figura 30**. Comparando com a **Figura 29**, verifica-se um aumento da resolução dos dados, sendo que o aumento da discretização tende a um comportamento menos suave dos perfis de temperatura.

Os sensores termoeletrônicos, acondicionados nos abrigos, estão muito sujeitos à ação dos ventos e do micro-clima gerado em cada abrigo, sendo que, tendo os ventos grandes variações a cada instante, estes causam efeitos mais significativos nos abrigos com ventilação natural. A aparência, portanto, dos perfis de temperatura para o caso de registros em intervalos de 5 minutos é de uma curva com ruídos de alta frequência.

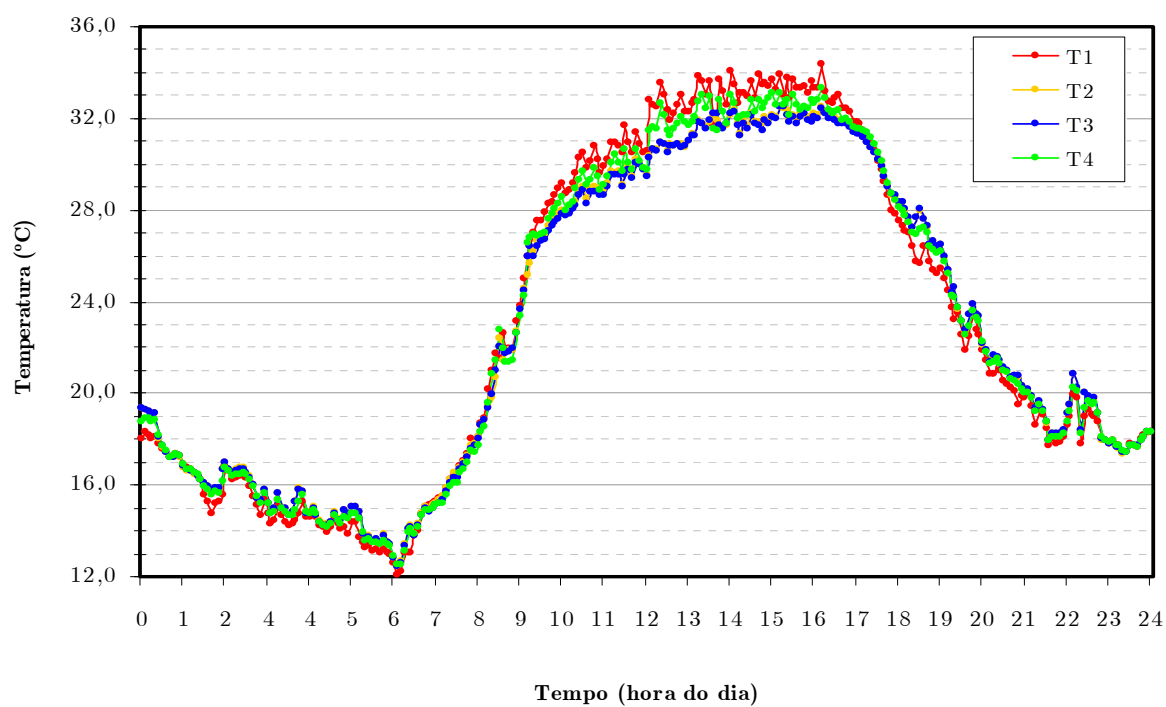


Figura 29 – Temperatura dos abrigos ao longo do dia 12 de setembro de 2006, com registros realizados a cada 5 minutos.

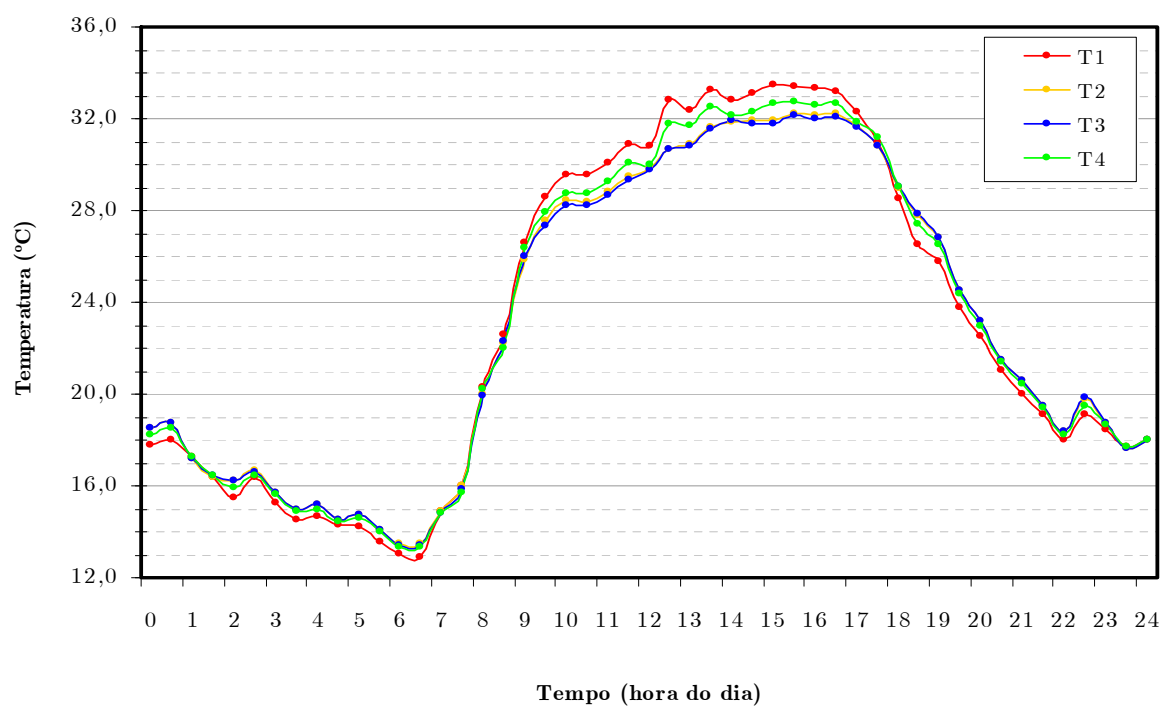


Figura 30 – Temperatura dos abrigos ao longo do dia 12 de setembro de 2006, com registros realizados a cada 30 minutos.

A verificação dessa mudança de resolução, de que o aumento da resolução não permitiu melhor visualização do processo, fica melhor evidenciada por meio da comparação dos valores de máxima diferença entre os abrigos #1 e #3, diferença esta que de 3,7 °C no caso de registros a cada 5 minutos, adquire valor de 2,2 °C no caso dos valores médios obtidos em intervalos de 30 minutos. Esta redução dos valores máximos da diferença entre os valores de temperatura é também observada nos outros dois abrigos, conforme apresentado na **Tabela 3**. Nesta tabela verifica-se ainda que os valores de temperatura máxima para cada abrigo também é reduzido, e, ao contrário, os valores de temperatura mínima são aumentados.

Tabela 3 – Valores de temperatura (°C) nos diferentes abrigos, sob diferentes intervalos de registros

Abrigo	Máxima			Mínima		
	R ₅	R ₃₀	R ₅ – R ₃₀	R ₅	R ₃₀	R ₅ – R ₃₀
T1	34,4	33,5	0,9	12,1	12,9	-0,8
T2	32,5	32,3	0,3	12,5	13,4	-1,0
T3	32,5	32,2	0,4	12,5	13,4	-1,0
T4	33,3	32,7	0,6	12,5	13,3	-0,8
T1 – T3	3,7	2,2	1,6	-2,3	-1,3	-1,0
T2 – T3	0,4	0,2	0,1	-0,3	-0,1	-0,2
T4 – T3	1,8	1,2	0,6	-0,8	-0,4	-0,4

R₅ e R₃₀: Registros realizados a cada 5 e 30 min., respectivamente.

T1, T2, T3 e T4: Temperaturas dos abrigos #1, #2, #3 e #4, respectivamente.

Inferre-se, portanto, que os registros realizados a cada 5 minutos apresentam desvios positivos para valores de temperatura máxima e desvios negativos para os valores de temperatura mínima em comparação aos valores de temperatura obtidos com os registros médios de 30 minutos. Assim, fica demonstrado que o registro em intervalos de 30 minutos proporciona perfis de temperatura mais suaves e menos

sujeitos às variações bruscas nos abrigos naturalmente ventilados devido à ação instantânea dos ventos, e, assim, atenuando as oscilações e ruídos indesejáveis dos valores de temperatura. Tais oscilações são facilmente observadas comparando-se os gráficos da **Figura 31** – pág. 81, e, **Figura 32** – pág. 82, que exibem as diferenças de temperatura dos abrigos – tendo como referência o abrigo #3, com os registros em intervalos de 5 e 30 minutos, respectivamente.

É interessante destacar que segundo recomendações da WMO (2006a), as aquisições de valores devem ser realizadas em intervalos de 1 a 10 minutos, e as totalizações registradas em intervalos de 30 minutos a 24 horas. Comumente realizam-se aquisições a cada 1 minuto e totalizações a cada 1 hora para a maioria das aplicações meteorológicas e climatológicas.

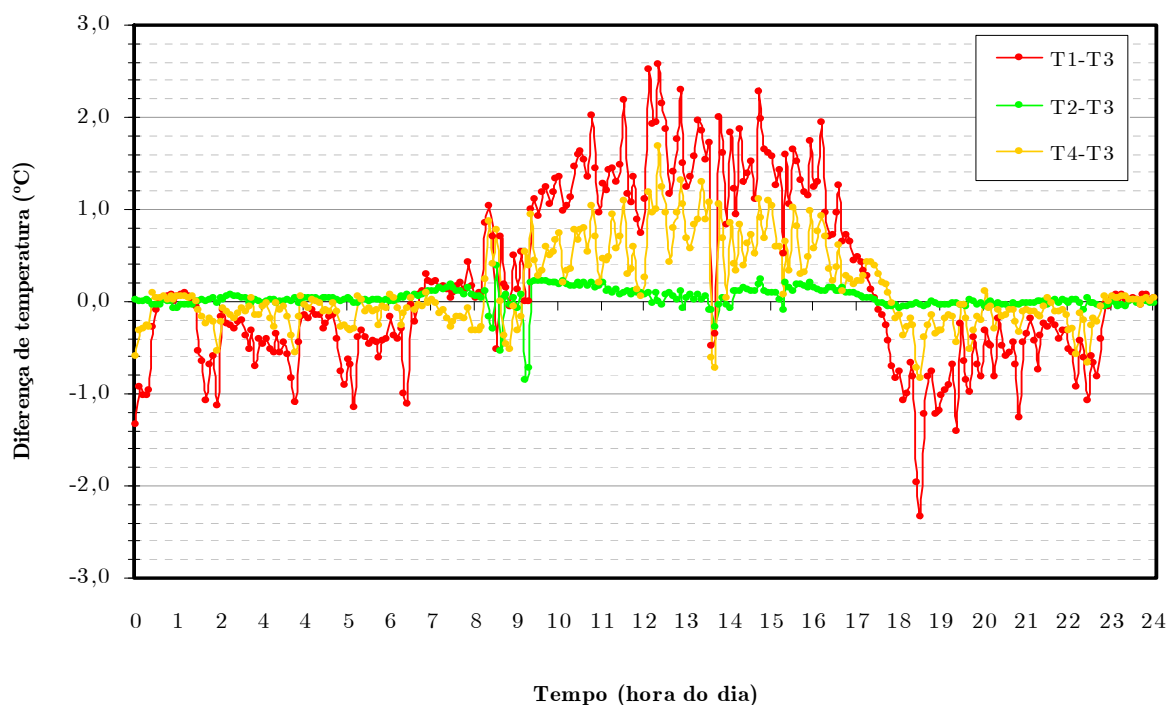


Figura 31 – Diferenças de temperatura dos abrigos ao longo do dia 12 de setembro de 2006, abrigo #3 como referência, com registros a cada 5 minutos.

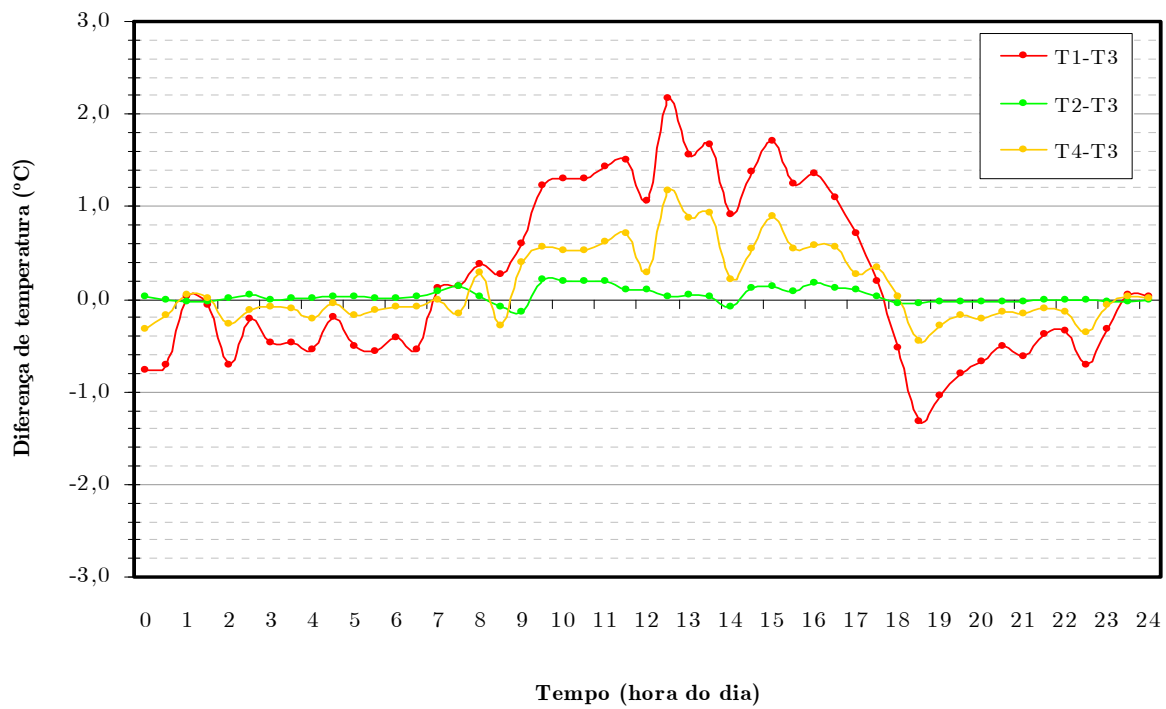


Figura 32 – Diferenças de temperatura dos abrigos ao longo do dia 12 de setembro de 2006, abrigo #3 como referência, com registros a cada 30 minutos.

6. CONCLUSÃO

No contexto da possível atribuição dos impactos da responsabilidade da ação antrópica nas mudanças climáticas globais, embora não tenha sido objetivo deste projeto ter discutido a magnitude nem testado a validade dessas mudanças, esta pesquisa permitiu verificar que existem fatores inerentes ao processo de medição da temperatura do ar – parâmetro chave nas discussões do clima passado, atual e principalmente no clima futuro – e, sobretudo, além da constatação quantitativa dos efeitos da radiação solar global e da velocidade dos ventos, foi possível quantificar e correlacionar estes parâmetros interferentes nessas medições.

O acompanhamento e consulta constante da bibliografia relacionada permitiu não só ter noção da importância do estudo deste tema, mas também da atualidade da atenção que tem sido dada ao assunto pelos pesquisadores do mundo todo. Os resultados aqui obtidos se apresentaram compatíveis com os observados mundialmente, e tem a contribuir com a comunidade científica no sentido da inovação em ter utilizado a abordagem dos processos sob o ponto de vista da Climatologia Dinâmica, que permitiu identificar episódios representativos do clima e dias típicos experimentais na medida necessária para o entendimento dos diferentes comportamentos das influências nos abrigos em diferentes condições do tempo.

A utilização dos episódios representativos e dos dias típicos experimentais foi de fundamental importância nessa investigação, sendo utilizados como ferramenta metodológica aplicada ao estudo dos elementos do clima e a relação de causa e efeito no comportamento dos abrigos térmicos que estão sujeitos às intempéries climáticas, e, portanto, vulneráveis a inevitável ocorrência de um microclima interno que interfere nas aquisições da temperatura do ar pelos sensores.

De acordo com a ISO (2007), os abrigos podem ser aquecidos pela radiação solar direta e indireta, aquecendo também o ar interior e inferindo valores de temperatura de um ar que não corresponde ao ar exterior. Além disso, o vento ou a ventilação artificial podem proporcionar uma influência benéfica no desempenho, reduzindo drasticamente os efeitos da radiação.

Esta pesquisa de caráter experimental permitiu notar a forte correlação existente entre a temperatura, a radiação (solar e noturna) e a ventilação (natural ou forçada), que é facilmente observada pelos resultados e gráficos obtidos.

A hipótese levantada no decorrer dos resultados permite concluir que os abrigos sofrem aquecimento ao longo do dia, propagando parte deste calor aos sensores de temperatura, que, conseqüentemente, registram um valor de temperatura acima da temperatura real do ar externo.

Além disso, o efeito de ganho de calor ao longo do dia é análogo ao fenômeno de perda deste calor no período noturno, em que foram verificadas perdas de calor na ausência de radiação. A partir destas verificações, conclui-se que os abrigos que não oferecem nenhum tipo de proteção contra radiação, diurna ou noturna, são os que

apresentam maior susceptibilidade às interferências nas leituras de temperatura do ar, proporcionando diferenças positivas ao longo do dia e negativas no período noturno.

Como medidas de minimização destas influências ocasionadas pela radiação, foram avaliadas os usos de dois dispositivos, que atuam de dois modos: primeiro preventivamente, por meio do bloqueio e isolamento térmico da radiação, por meio da utilização de isolante metálico refletor (*foil*); e segundo de modo corretivo, por meio da aspiração forçada do ar interno com o uso de ventoinhas, que renovam o ar que foi aquecido pelo microclima gerado pelo abrigo.

Destas medidas, foi verificado que o uso das ventoinhas foi a medida mais eficiente na atenuação dos efeitos de aquecimento da radiação sobre as medidas de temperatura, resultado coerente com afirmação da ISO (2007).

Verificou-se ainda que as diferenças entre os valores de temperaturas possuem relação diretamente proporcional à intensidade de radiação solar global e relação inversamente proporcional à velocidade externa do vento.

Portanto, conforme WMO (2006), o abrigo “que proporciona um ambiente interno uniforme e com as mesmas condições do ar externo” foi aquele que apresentava simultaneamente proteção contra radiação e ventilação forçada, ou seja, o abrigo #3 utilizado como referência no estudo.

É conveniente ressaltar que no decorrer da pesquisa a estação experimental foi acompanhada periodicamente para verificação do correto funcionamento do sistema de aquisição de dados e das ventoinhas utilizadas na aspiração dos abrigos artificialmente ventilados. As devidas manutenções foram executadas quando

necessárias, como, por exemplo, a troca das ventoinhas por motivo de queima pela exaustão natural dos componentes mecânicos e/ou elétricos ou pelo excesso de chuvas e ventos que danificavam o seu funcionamento.

Além disso, a localização da investigação apresentou a vantagem de não necessitar de grandes deslocamentos. A disponibilidade de um instrumento automático de aquisição e armazenamento de dados, o *datalogger* CR10X Campbell Scientific Inc., assim como os sensores (termopares tipo T), dispensou os custos financeiros com aquisição de equipamento. Os equipamentos utilizados permitiram que os registros fossem coletados em pequenos intervalos, inicialmente registrados a cada 30 minutos, e posteriormente a cada 5 minutos, implicando assim em uma resolução suficiente para as análises requeridas para este estudo em escala microclimática.

A aquisição automática dos dados eliminou a utilização de equipamentos individuais, o que poderia acarretar diversas incorreções na hora da coleta dos dados, bem como dispensou o auxílio de recursos humanos necessários quando a coleta é de forma convencional. É conveniente destacar que assim como existem interferências nos abrigos utilizados nas estações automáticas também existem nas estações convencionais, ficando como recomendação para futuros estudos a avaliação dessas influências e comparações entre os tipos de estações.

REFERÊNCIAS

- ALCOFORADO M. J. **O clima na região de Lisboa**. Vento, insolação e temperatura. Faculdade de Letras de Lisboa, 1988.
- ANDERSSON, T.; MATTISION, I. A Field Test of Thermometer Screens. **Instr. and Obs. Meth. Rep.** 49. WMO No. 462, p. 436, 1992.
- ANTUNES, A.A.N. **Propriedades da Matéria**. L. P. M., 1966.
- ANUNCIAÇÃO, P. E. M. **Meteorologia para Agricultura**. Maringá: Gráfica Clichetec. 1984.
- ASTM (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS). **Manual on the use of Thermocouples in Temperature Measurement**. Philadelphia: ASTM Special Publication 470B, 1987.
- AYLLÓN, T. **Elementos de meteorología y climatología**. México: Trillas, 1996.
- BAKER, H. D.; RYDER, E. A.; BAKER, N. H. **Temperature in Measurement In Engineering**, Vol. 2. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1961.
- BARBOSA, R. V. R.; BARBIRATO, G.; VECCHIA, F. Vegetação urbana: análise experimental em cidade de clima quente e úmido. In: **Anais do VII ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**. PUC - PR, Curitiba, 2004.
- BARNETT A, HATTON D. B.; JONES D. W. **Recent changes in thermometer screen design and their impact**. Geneva: WWW/OSY (Instruments and observing methods, Report No.: 66). WMO/TD871. 1998, 12pp.
- BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmósfera, tiempo y clima**. 3 ed. Barcelona, Omega, 1980. 395 p.
- BENEDICT, R. P. **Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements**. 3 ed. New York: Wiley, 1984.
- BRANDSMA, T.; VAN DER MEULEN, J. P. Thermometer Screen Intercomparison in De Bilt (the Netherlands) - Part II: Description and modeling of mean temperature differences and extremes. **International Journal of Climatology**, (aceito), 2007.
- CAMPBELL SCIENTIFIC INC. **Model HMP45C Temperature and Relative Humidity Probe Instruction Manual**. 2004. Disponível em: <ftp://ftp.campbellsci.com/pub/outgoing/manuals/hmp45c.pdf> Acesso em: 6 abr. 2005.

- _____. **Naturally Aspirated Radiation Shields**. Logan, Campbell Scientific, 2003. Disponível em: <ftp://ftp.campbellsci.com/pub/outgoing/lit/b_radshields.pdf> Acesso em: 14 abr. 2005.
- CARLETTO, C. **Subcoberturas**: aplicação de isolantes térmicos em sistemas de coberturas. 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.
- COMMITTEE ON SURFACE TEMPERATURE RECONSTRUCTIONS FOR THE LAST 2,000 YEARS. **Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years** (Prepublication Copy). National Research Council, The National Academies Press. Washington, 2006.
- CUADRAT, J. M.; PITA, M. F. **Climatologia**. Madrid: Editora Catedra. 1997.
- CUNHA, D. G. F.; VECCHIA, F. As abordagens clássica e dinâmica de clima. **Ciência e Natura**, v. 29, p. 137-149, 2007.
- DEFFUNE, G. **O estudo do clima e do tempo atmosférico e o planejamento Ambiental**. Maringá: UEM, n. 16, p.47 (Série Apontamentos). 1993.
- DIMOUDI, A.; NIKOLOPOULOU, M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. **Energy and Buildings**, n. 35: 69-76, 2003.
- EMILIANI, C. **Dictionary of the Physical Sciences**. New York: Oxford University Press, 1987.
- FUCHS, M.; TANNER, C. B. Radiation shields for air temperature thermometers. **J. Appl. Meteor.**, 4, 544-547, 1965.
- GONÇALVEZ, H. et al. **Ambiente construído, clima urbano e utilização racional de energia nos edifícios da cidade de Lisboa**. Lisboa, Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, Departamento de Energias renováveis, 2004.
- GRAY, H. J.; ISAACS, A. **A New Dictionary of Physics**. Second Edition. London: Longman Group Limited, 1975.
- GUTTMAN, N. B.; BAKER, C. B. Exploratory analysis of the difference between temperature observations recorded by ASOS and conventional methods. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 77, 2865-2873, 1996.

- HATTON, D. B. Results of an intercomparison of wooden and plastic thermometer screens. In: papers presented at the WMO Technical Conference on Meteorological Instruments and Methods of Observation (TECO-2002), Bratislava, Slovak Republic, 23–25 September 2002, P1.1 (19). **Instruments and Observing Methods report No.75 (WMO/TD – No 1123)**, WMO, Geneva, 2002.
- HUBBARD, K. G.; LIN, X.; WALTER-SHEA, E. A.. The effectiveness of the ASOS, MMTS, Gill and CRS air temperature radiation shields. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, 18, 851-864, 2001.
- ICL CALIBRATION LABORATORIES INC. **PRT Calibration**. S.d. Disponível em: <http://www.icllabs.com/prt_calibration.htm> Acesso em: 6 abr. 2005.
- INPE. **Imagens de Satélite**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 12 imagens de satélite. 65 KB por imagem. Dias 16, 17, 18, 19 e 24 de maio e 12, 15, 16 de setembro de 2006. Disponível em <http://satelite.cptec.inpe.br/anteriores/goes_ant.htm> Acesso em 10 jan. 2007.
- ISAACS, A. **Concise Dictionary of Physics**. Oxford: Oxford University Press, 1985.
- ISO (International Organization for Standardization). Norma N. 17714. **Meteorology - Air temperature measurements**: Test methods for comparing the performance of thermometer shields/screens and defining important characteristics, Geneva, 2007.
- KINZIE, P. A. **Thermocouple Temperature Measurement**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1973.
- KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda. 1973.
- LARRE, M.H.; HEGG, K. Norwegian national thermometer screen intercomparison. In: papers presented at the WMO Technical Conference on Meteorological Instruments and Methods of Observation (TECO-2002), Bratislava, Slovak Republic, 23–25 September 2002, P1.1 (1). **Instruments and Observing Methods report No.75 (WMO/TD – No 1123)**, WMO, Geneva, 2002.
- LEFEBVRE, G. Comparison of Meteorological Screens for Temperature Measurement, Paper presented at TECO-98 (Casablanca), **Instruments and Observing Methods Report No. 70 (WMO/TD–No. 877)**, pp. 315, Geneva, 1998.
- LI-COR, Inc. **LI-COR HomeLI-200 Pyranometer Sensor**: Measures Total Solar Radiation. 2004a. Disponível em: <http://www.licor.com/env/Products/Sensors/200/li200_description.jsp>. Acesso em 25 abr. 2005.

- _____. **LI-COR HomeLI-200 Specifications**. 2004b. Disponível em:
 <http://www.licor.com/env/Products/Sensors/200/li200_specifications.jsp>
 Acesso em 25 abr. 2005.
- LIN, X. **Microclimate inside air temperature radiation shields**. University of Nebraska. Lincoln, 1999.
- _____; HUBBARD, K. G.; MEYER, G. E. Airflow characteristics of commonly used temperature radiation shields. **J. Atmos. Oceanic Technol.**, 18, 329-339, 2001.
- _____; _____. Relating temperature errors to underlying surface characteristics. *In* **Automated Weather Stations for Applications in Agriculture and Water Resources Management: Current Use and Future Perspectives**. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 93-110, 2001.
- _____; _____. Radiation loading model for evaluating air temperature errors with a non-aspirated radiation shield. **Trans. ASAE**, 44, 1299-1306. 2001.
- _____; _____. MEYER, G. E. Sensor and electronic biases/errors in air temperature measurements in common weather networks. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**. 21(7): 1025-1032, 2004.
- LINACRE, E.; GEERTS, B. **City trees and the urban climate**. 1997. Disponível em:
 <http://www.das.uwyo.edu/~geerts/cwx/notes/chap01/city_trees.htm> Acesso em: jun. 2002.
- MAWLEY, E. Shade temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, XXIII (102):69-87, 1897.
- MODNA, D.; VECCHIA, F. Calor e áreas verdes: um estudo preliminar do clima urbano de São Carlos, SP. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC. 2003. 1 CD-ROM.
- MONTEIRO, C. A. F. **Ritmo hibernar da frente polar e as chuvas na fachada subtropical atlântica do Brasil**: contribuição metodológica à análise geográfica dos tipos de tempo no Brasil. 1967. Tese (Doutorado). São Paulo: FFLCH. 1967.
- _____. **A frente polar atlântica e as chuvas na fachada sul-oriental do Brasil**. Série Teses e Monografias. N. 1. São Paulo: IGEOG-USP. 1969.
- _____. **Análise rítmica em climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho**. São Paulo: IGEOG-USP. 1971.

- _____. **A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo:** estudo geográfico sob forma de Atlas. São Paulo. Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia. 1973. 68p.
- NAGY, Z. Effects of thermometer screens on accuracy of temperature measurements. *In:* Posters presented at the WMO Technical Conference on Meteorological Instruments and Methods of Observation (TECO-2006), Geneva, Switzerland, 4-6 December 2006. **Instruments and Observing Methods report No. 94.** WMO, Geneva, 2006. Disponível em: <[http://www.wmo.int/web/www/IMOP/publications/IOM-94-TECO2006/P3\(14\)_Nagy_Hungary.pdf](http://www.wmo.int/web/www/IMOP/publications/IOM-94-TECO2006/P3(14)_Nagy_Hungary.pdf)>, Acesso em: 10 jan. 2007
- NAKAMURA, R.; MAHRT, L. Air temperature measurement errors in a naturally ventilated radiation shield. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.** 22: 1046-1058, 2005.
- NICHOLAS, J. V.; WHITE, D. R. **Traceable temperatures:** an introduction to temperature measurement and calibration – Wiley series in measurement science and technology. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.
- OCHOA, J. M.; MARINCIC, I. *In:* ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC. 2003. 1 CD-ROM.
- PANEL ON RECONCILING TEMPERATURE OBSERVATIONS. **Reconciling Observations of Global Temperature Change.** National Research Council The National Academies Press. Washington, 2000.
- PARKER, D. E. Effects of changing exposure of thermometers at land stations. **International Journal of Climatology**, 14: 1–31, 1994.
- PITTON, S. E. C. **Análise de Sistemas de Organização Climática do Espaço.** 1985. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: IGE/UNESP. 1985.
- QUAYLE, R. G.; EASTERLING, D. R.; KARL, T. R.; HUGHES, P. Y. Effects of recent thermometer changes in the Cooperative Station Network. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 72, 1718-1723, 1991.
- QUINN, T. J. **Monographs in Physical Measurement:** Temperature. London: Academic Press Inc., 1983.
- SALMONI, R. **Transmissão de Calor.** São Paulo: Editora Gustavo Gilli. 1966.

- SHASHUA-BAR, L.; HOFFMANN, M. E. Vegetation as a climactic component in the design of an urban street: an empirical model of predicting the cooling effect of urban green areas with trees. **Energy and Buildings**, v. 31, n.3: 221-235, 2000.
- SILVA, A. C. **Estudos Climáticos e Ambiente Construído no Município de Descalvado – SP**. 92p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2001.
- SORRE, M. (1951). Le Climat. In: **Le fondaments de La Geographie Humain**. 3 ed. Paris: Armand Colin.
- _____. Object and method of climatology. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 18, p. 89-94, 2006. Disponível em
<http://www.geografia.fflch.usp.br/publicacoes/RDG/RDG_18/RDG18_089_094.pdf>. Acesso em 26 nov. 2007.
- SPARKS, W. R. **The Effect of Thermometer Screen Design on the Observed Temperature**, WMO-No. 315, 1972.
- SPECIAN, V. **Clima e Ambiente Construído. Análise da Predicting Indoor Air Temperature Formula**. 2003. 189 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.
- SPETALEN, A.; LOFSEIK, C.; NORDLI, P. Ø. A Comparison of air temperature radiation screens by field experiments and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. In: Papers presented at the WMO Technical Conference on Meteorological Instruments and Methods of Observation (TECO-2000), Beijing, China, 23-27 October 2000. **Instruments and Observing Methods report No. 74 (WMO/TD – No 1028)**. WMO, Geneva, 54-57, 2000.
- SUN, B.; BAKER, C. B. A comparative study of ASOS and CRN temperature measurements. In: XII Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for Atmosphere, Oceans, and Land Surface - **84th AMS Annual Meeting**. Seattle, 2004.
- TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v. 25: 99-103, 1997.
- TANNER, B. D. Automated weather stations. **Remote Sens. Rev.** 5, 73-98, 1990.
- _____; SWIATEK, E.; MAUGHAN, C. Field comparisons of naturally ventilated and aspirated radiation shields for weather station air temperature measurements. **Preprints, 22d Conf. on Agricultural and Forest Meteorology**, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., 227-230, 1996.

- TARIFA, J. R.; ARMANI, G. As unidades climáticas urbanas da cidade de São Paulo: os clima e a (re)produção do espaço nas metrópoles. In: VII ENCUESTRO DE GEÓGRAFOS DE AMÉRICA LATINA. Santiago do Chile: Universidad de Chile. 2001.
- THORNE, P. W.; PARKER, D. E.; CHRISTY, J. R.; MEARS, C. A. Uncertainties in Climate Trends: Lessons from Upper-Air Temperature Records. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 86: 1437-1442, 2005.
- UO SOLAR RADIATION MONITORING LABORATORY. **Eppley Precision Spectral Pyranometer (PSP)**. 2000. Disponível em:
<<http://solardat.uoregon.edu/EppleyPSP.html>>. Acesso em 25 abr 2005.
- VAN DER MEULEN, J. P. A Thermometer Screen Intercomparison. **Instruments and Observing Methods Reports**. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. n. 70, pg. 319, 1998.
- _____; BRANDSMA, T. Thermometer Screen Intercomparison in De Bilt (the Netherlands) - Part I: Understanding temperature differences for particular days. **International Journal of Climatology**, (aceito), 2007.
- VECCHIA, F. **Condicionantes termo-energeticas das edificacoes. Sao carlos como estudo de caso**. São Paulo, 1990. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 1990.
- _____. **Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada ao Conforto Humano**. São Paulo, 1997. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH USP), Universidade de São Paulo, São Paulo. 1997.
- _____. **Projeto Conforto Térmico: Estudo comparativo do comportamento térmico de sistemas de cobertura**. Projeto Conforto, Convênio Eternit S.A. São Carlos: EESC/FIPAI. 2001c.
- _____; NOLASCO, G. C. Comportamiento térmico de casa experimental construida con bajareque mejorado. **Ciencia y Tecnología en la Frontera**, México, v. 1, n. 1, p. 25-33, 2005.
- WARNE, J. **Temperature Screen Comparison**. Australian Bureau of Meteorology Test Facility, Melbourne, Australia. 1995.
- WMO (World Meteorological Organization). **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation**. WMO-No. 8, Sixth edition, 1996.

- _____. **Commission for Instruments and Methods of Observation:** Bridged Final Report with Resolutions and Recommendations, thirteenth session. WMO-No. 947, Geneva, Switzerland. 2003.
- _____. **Commission for Instruments and Methods of Observation:** WMO Combined Intercomparison of Thermometer Screens/Shields in Conjunction with Humidity Measuring Instruments, Operational Aspects of the Intercomparison. Geneva, Switzerland. 2006b. Disponível em
<http://www.wmo.int/web/www/IMOP/intercomparisons/Temp-Hum-2007/Algeria_Operational-Aspects.doc>, acesso em 10 jan. 2007.
- _____. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation.** WMO-No. 8, Preliminary Seventh Edition. Geneva, 2006a. Disponível em
<http://www.wmo.ch/web/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/WMO-No_8.pdf>, acesso em 10 jan. 2007.
- XIONG, A. Influence of changes of sensor and shelter on air temperature observation, and analysis to its causes. *In:* Posters presented at the WMO Technical Conference on Meteorological Instruments and Methods of Observation (TECO-2006), Geneva, Switzerland, 4-6 December 2006. **Instruments and Observing Methods report No. 94.** WMO, Geneva, 2006. Disponível em:
<[http://www.wmo.int/web/www/IMOP/publications/IOM-94-TECO2006/P3\(07\)_Xiong_China.pdf](http://www.wmo.int/web/www/IMOP/publications/IOM-94-TECO2006/P3(07)_Xiong_China.pdf)>, Acesso em: 10 jan. 2007.

APÊNDICES

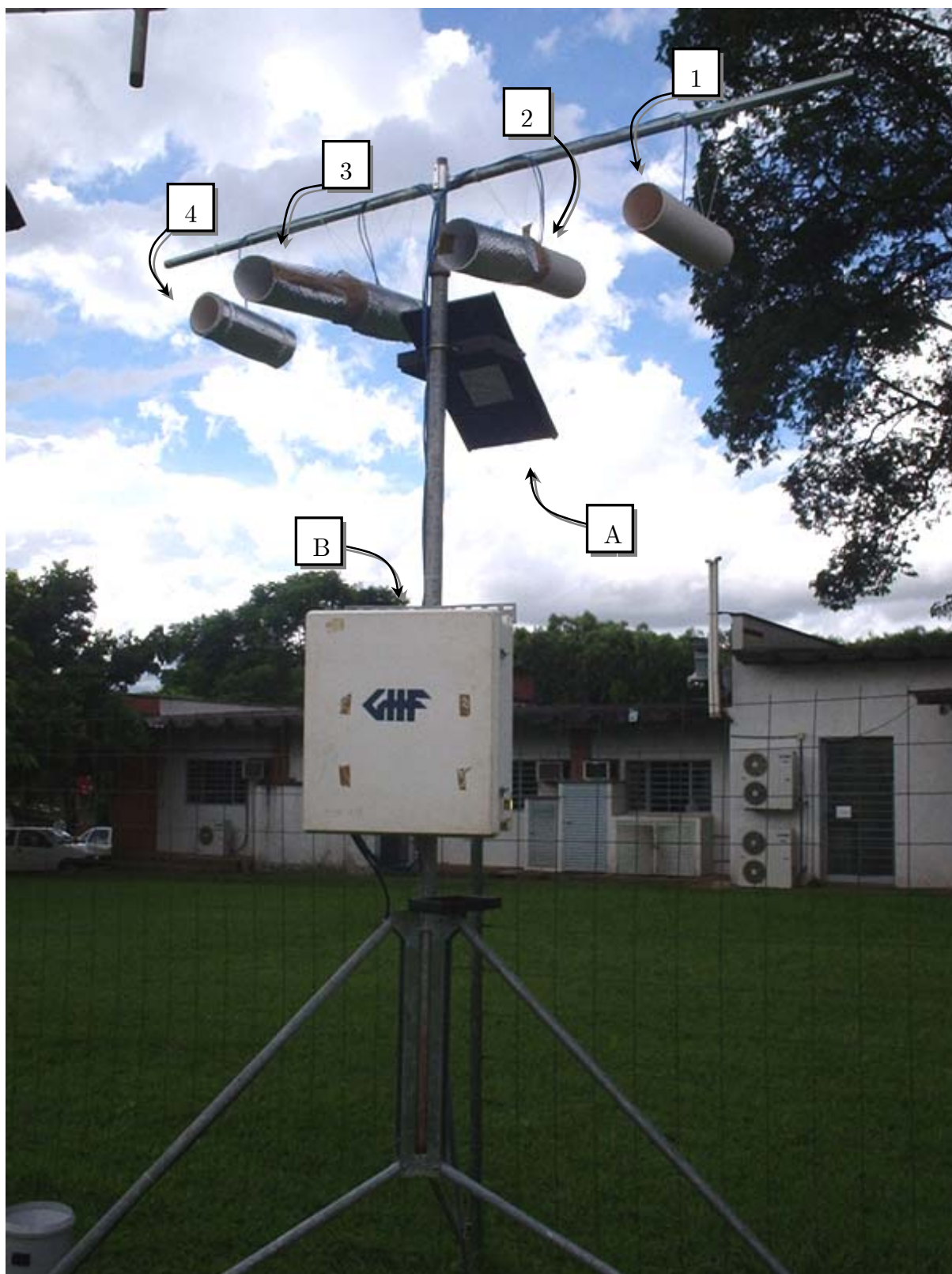
APÊNDICE A – Vistas panorâmicas opostas das estações experimental e de referência.



APÊNDICE B – Estações experimental (esquerda) e de referência (direita). Ao fundo, Laboratório de Ecotecnologias: Novos Materiais e Procedimentos.



APÊNDICE C – Estação experimental. Disposição dos abrigos: (1) Abrigo sem *foil* e ventilação natural; (2) Abrigo sem *foil* e ventilação forçada; (3) Abrigo com *foil* e ventilação forçada; (4) Abrigo com *foil* e ventilação natural. (A) Painel solar, fonte de energia da bateria; (B) Caixa ambientalmente vedada.



APÊNDICE D – Detalhe do interior da caixa ambientalmente selada. (A) Bateria de 12 V modelo PS12 da Campbell Scientific Inc.; (B) Multiplexador AM 16/32 da Campbell Scientific Inc. de 32 canais; (C) Sistema de aquisição e armazenamento de dados (*datalogger*) CR10X Campbell Scientific Inc.; (D) Fonte de alimentação para as ventoinhas.

