

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

MARIANA LINO GOUVÊA

**Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto
térmico humano na cidade de São Paulo**

**São Paulo
2007**

MARIANA LINO GOUVÊA

Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico
humano na cidade de São Paulo

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Departamento de Ciências Atmosféricas do
Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo
como condição parcial para obtenção do título
de Mestre em Ciências Atmosféricas.

Área de Concentração: Meteorologia aplicada

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Dias de Freitas

São Paulo
2007

À minha irmã Cristina, arquiteta e amiga.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Edmilson, pelo suporte e incentivo em todos os momentos.

À minha família, pelo carinho e apoio incondicional.

Aos amigos, pela companhia e descontração. Um agradecimento especial às amigas Samara e Valéria, companheiras de todas as horas.

Aos professores do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG.

À equipe do Laboratório MASTER, pelo suporte técnico.

À equipe do LABAUT, pelas discussões e trocas, pela abertura a um ponto de vista diferente.

À Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DGI/INPE) pela concessão das imagens do CBERS-2 utilizadas neste trabalho.

À Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) pelo fornecimento dos dados das estações automáticas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro fornecido a este trabalho.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1. Introdução.....	11
1.1. Motivação e proposta	11
1.2. Objetivos e estrutura do trabalho.....	12
1.3. A ilha de calor urbana.....	14
1.4. Efeitos da vegetação em áreas urbanas.....	17
1.5. Conforto térmico humano.....	19
1.6. Aplicação da meteorologia ao planejamento urbano.....	23
2. Descrição do modelo numérico e parametrizações de superfície.....	25
2.1. Características gerais do modelo RAMS.....	25
2.2. Características gerais do modelo BRAMS	26
2.3. Parametrizações físicas dos modelos.....	27
2.4. Representação de superfícies vegetadas (LEAF)	29
2.4.1. Representação de múltiplas superfícies (<i>patches</i>).....	31
2.5. Representação de superfície urbana (TEB)	32
3. Estudos observacionais.....	35
3.1. Refinamento da condição de superfície.....	35
3.1.1. Procedimento de classificação e definição da ocupação do solo.....	36
3.2. Determinação da fração vegetada.....	39

3.2.1. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).....	39
3.2.2. Conversões e Cálculos.....	40
3.2.3. Resultado do processo de cálculo do NDVI e fração vegetada.....	42
3.3. Estudo qualitativo com dados de superfície.....	43
3.3.1. Resultados.....	45
3.3.2. Conclusão.....	48
4. Estudo numérico.....	50
4.1. Metodologia e configuração das simulações numéricas.....	50
4.2. Simulações utilizando o RAMS 4.3.....	56
4.2.1. Desenvolvimento da ilha de calor urbana.....	68
4.2.2. Conforto térmico humano.....	71
4.3. Simulação utilizando o BRAMS 3.2.....	74
5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	78
5.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	80
Referências Bibliográficas.....	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema ilustrativo do bolsão térmico formado sobre áreas urbanas (adaptada de SANTAMOURIS, 2001).....	15
Figura 2.1 – Esquematização da geometria de cânion, utilizada no esquema TEB. As setas azuis representam as múltiplas reflexões a que estão sujeitos os raios solares incidentes no cânion.	33
Figura 3.1 – Resultado da classificação da superfície a partir de imagens do satélite CBERS-2, com resolução de 20m, sobre toda a área imageada.....	36
Figura 3.2 – Resultado da classificação da superfície a partir de imagens do satélite CBERS-2, com resolução de 20m, sobre a RMSP.....	37
Figura 3.3 – Fotos representativas do tipo de superfície classificado como urbano 1.	38
Figura 3.4 – Fotos representativas do tipo de superfície classificado como urbano 2.	38
Figura 3.5 – Fotos representativas do tipo de superfície classificado como urbano 3.	38
Figura 3.6 – Foto representativa do tipo de superfície classificado como suburbano.....	38
Figura 3.7 – NDVI na RMSP e arredores (resolução 20 m).	42
Figura 3.8 - Fração ocupada por vegetação em grade de 1km (a partir do NDVI com resolução de 20 m).....	43
Figura 3.9 – Imagens de satélite das estações da CETESB (a) Ibirapuera, (b) São Miguel Paulista, (c) Parque D. Pedro II e (d) São Caetano do Sul. (Fonte: www.google.com/maps).....	45
Figura 3.10 – Série da Temperatura Efetiva calculada com a máxima temperatura diária no período de 1996 a 2006 a para as estações da CETESB (a) Ibirapuera, (b) São Miguel Paulista, (c) Parque D. Pedro II e (d) São Caetano do Sul. Em vermelho os intervalos de conforto apresentados na Tabela 3.2.	46

Figura 3.11 – Porcentagem de ocorrência de cada faixa do índice de temperatura efetiva em cada estação.	47
Figura 3.12 : Taxa de ocupação, coeficiente de aproveitamento, percentagem de superfícies d'água e de arborização brutos versus média das temperaturas registradas às 8h, 14h e 20h na cidade de Cuiabá-MT (Adaptada de DUARTE & SERRA, 2003).....	48
Figura 4.1 – Cobertura da superfície para a simulação de controle (somente urbano). Codificação dos tipos de superfície na Tabela 4.2. Os códigos 13 e 16 referem-se aos tipos urbano 1 e urbano 2, respectivamente, segundo codificação do USGS adaptada por FREITAS (2003).	51
Figura 4.2 – Cobertura da superfície para as simulações: cenário A (25% de vegetação), cenário B (50% de vegetação) e cenário C (100% de vegetação). Nos cenários A e B enfoque somente sobre a área urbanizada, para melhor visualização. Codificação dos tipos de superfície na Tabela 4.2, segundo classificação do USGS adaptada por FREITAS (2003).	53
Figura 4.3 – Campo de umidade do solo ao nível da superfície (à esquerda, utilizado para inicialização do BRAMS) e perfil da umidade do solo no ponto central da grade (à direita, para inicialização do RAMS).	55
Figura 4.4 – Localização das estações da CETESB assinaladas nos pontos A, B, C e D. Ao fundo a condição de superfície do modelo, segundo a codificação USGS adaptada por FREITAS (2003) dada na Tabela 4.2.	56
Figura 4.5 – Comparação entre temperatura observada em cada estação e simulada com o RAMS 4.3 no nível de 14,3 m.	57
Figura 4.6 – Comparação entre umidade relativa observada em cada estação e simulada com o RAMS 4.3 no nível de 14,3 m.	58
Figura 4.7 – Fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) na simulação de controle.	61

Figura 4.8 – Fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$) na simulação de controle.	62
Figura 4.9 – Diferença no fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$) entre a simulação de controle e o cenário A (à esquerda), cenário B (ao centro) e cenário C (à direita), às 19 UTC.....	63
Figura 4.10 – Diferença no fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$) entre a simulação de controle e o cenário A (à esquerda), cenário B (ao centro) e cenário C (à direita), às 17 UTC.....	63
Figura 4.11 – Perfis de temperatura potencial (K) no ponto de 32,48S; 46,50W.	64
Figura 4.12 – Evolução dos campos de razão de mistura ($g.kg^{-1}$) e vento horizontal ($m.s^{-1}$) simulados na condição controle, no nível e 14,3 m, das 13 UTC do dia 15 de dezembro às 00 UTC do dia 16 de dezembro de 2003. Aqui é necessário acertar a posição das legendas depois que o texto for corrigido.....	66
Figura 4.13 – Topografia (m) no domínio simulado.	67
Figura 4.14 – Diferença de temperatura entre a simulação com o cenário C (somente vegetação) e as simulações: de controle (somente urbano), com o cenário A (25% de vegetação) e com o cenário B (50% vegetado), nos horários das 09 UTC e 20 UTC, ao nível de 14,3 m.	68
Figura 4.15 – Campos de temperatura efetiva (TE) calculada a partir da simulação de controle com o modelo RAMS 4.3, das 14 UTC do dia 15 de dezembro às 00 UTC do dia 16 de dezembro, no nível de 14.3 m.	72
Figura 4.16 – Comparação entre a temperatura efetiva calculada a partir das simulações com o RAMS 4.3, no nível de 14,3 m, e a partir de observações nas estações da CETESB.	73
Figura 4.17 – Comparação entre temperatura e umidade relativa observadas nas estações da CETESB e simuladas com o BRAMS.....	75
Figura 4.18 – Taxa de precipitação ($mm.h^{-1}$) simulada pelo modelo BRAMS.	76
Figura 4.19 – Precipitação observada pelo radar meteorológico (mm/h) (Fonte: SAISP – Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo).....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Coeficiente de calibração (CC) e irradiância solar incidente no topo da atmosfera (F ₀) para as bandas 3 e 4. Fonte: PONZONI et al. (2005).....	41
Tabela 3.2 – Classificação das condições de conforto térmico humano pela temperatura efetiva. Fonte: HENTSCHEL (1986; citado em SUPING et al.,1992).	44
Tabela 4.1 – Parâmetros característicos dos tipos urbanos.	51
Tabela 4.2 – Codificação dos tipos de superfície, baseado na base de dados do USGS adaptada por FREITAS (2003).....	52
Tabela 4.3 – Proporção entre áreas urbanas e vegetadas em cada cenário.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS

ATMET	Atmospheric, Meteorological and Environmental Technologies
BRAMS	Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
CBERS	China-Brasil Earth Resources Satellite
CCD	Couple Charged Device
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CLP	Camada limite planetária
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CSU	Colorado State University
CTH	Conforto térmico humano
DGI	Divisão de Geração de Imagens
DPI	Divisão de Processamento de Imagens
FAU	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGBP	International Geosphere Biosphere Programme
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LABAUT	Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética
LDAS	Land Data Assimilation Systems
LEAF	Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model
MASTER	Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCAR	National Center of Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction

ND	Números digitais
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PAR	Photosynthetically Active Radiation
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SPRING	Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas
TE	Temperatura efetiva
TEB	Town Energy Budget
TRM	Temperatura radiante média
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
USGS	United States Geological Survey
USP	Universidade de São Paulo

RESUMO

GOUVEA, M. L. **Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo. 2007.** 87 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Este projeto de pesquisa de mestrado buscou identificar os impactos das propriedades da superfície urbana sobre as condições meteorológicas da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), buscando um melhor entendimento dos mesmos para que atividades de planejamento urbano possam ser melhor organizadas. O trabalho utilizou como principais ferramentas produtos de sensoriamento remoto, para definir algumas propriedades da superfície urbana, medidas em superfície de variáveis meteorológicas, para determinação de índices de conforto humano, e a modelagem numérica da atmosfera, para identificação de condições atmosféricas e construção de cenários úteis ao planejamento urbano. Com o uso de imagens de satélite, foram criados arquivos de ocupação do solo e da fração vegetada na área urbana da RMSP em altíssima resolução (20 m). Após a definição das propriedades da superfície, valores medidos pela CETESB de temperatura e umidade relativa foram associados a padrões de ocupação urbana. Verificou-se que as regiões de São Caetano do Sul e do Parque D. Pedro II foram as que apresentaram o maior número de casos de desconforto por calor moderado. Regiões como São Miguel Paulista e Ibirapuera mostraram-se mais confortáveis. Na maior parte dos casos, as regiões apresentaram um nível agradável a levemente quente, seguidos pela condição agradável a levemente fresca. Após a análise diagnóstica, foram construídos cenários contemplando atividades de planejamento urbano em busca da melhoria das condições de conforto térmico humano. Os experimentos realizados indicam que os fluxos turbulentos em superfície são consideravelmente modificados e que a temperatura pode sofrer uma diminuição gradativa até cerca de 1,5 °C com a substituição de 50% da superfície urbana por vegetação, chegando a mais de 2,2 °C quando esta substituição é completa. O perfil de temperatura potencial na Camada Limite Planetária também foi consideravelmente modificado com o aumento da porção vegetada no domínio modelado.

Palavras-Chave: Planejamento Urbano, Conforto Térmico Humano, BRAMS.

ABSTRACT

GOUVEA, M. L. **Scenarios of surface properties impacts over the human thermal comfort in the city of São Paulo. 2007.** 87 f. Master degree Dissertation – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

This master's research project has the goal of indentifying the impacts of urban surface properties over the meteorological conditions of the Metropolitan Area of São Paulo (MASP), in order to obtain a better understanding of them and to provide means of better organized urban planning activities. The work was made by using as principal tools, remote sensing derived products, in order to define some surface properties, surface measurements of atmospheric variables, in order to obtain human thermal comfort indexes, and numerical modeling of the atmosphere, in order to identify atmospheric conditions and simulate useful scenarios for urban planning. By using satellite images, land use and vegetated fraction files were created over the MASP with very high resolution (20 m). Afterwards, temperature and relative humidity measured by CETESB were associated to urban land use patterns. It was verified that regions like São Caetano do Sul and Parque D. Pedro II are more likely to have greater discomfort sensation by moderate heat. Regions like São Miguel Paulista and Ibirapuera were identified to be more comfortable. In the majority of cases, the regions presented a pleasant to lightly warm, followed by pleasant to lightly fresh conditions. After the definition of the surface properties, scenarios were built comprehending urban planning activities, looking for the improvement of human thermal comfort conditions. The experiments showed that the surface turbulent fluxes are considerably changed and that temperature was gradually reduced in up to 1,5 °C with the replacement of 50% of the urban surface by vegetation, reaching more than 2,2 °C when this replacement was complete. The potential temperature profile inside the Planetary Boundary Layer was also considerably modified following the increase of vegetated area in the modeled domain.

Key-words: Urban Planning, Human Thermal Comfort, BRAMS.

1. Introdução

1.1. Motivação e proposta

O processo de urbanização é um dos principais modificadores ambientais geridos pelo homem. É no espaço urbano que ocorre o máximo da atuação humana sobre a organização da superfície terrestre (LOMBARDO, 1984). A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), foco deste trabalho, viveu nos últimos sessenta anos uma expressiva expansão em sua mancha urbana, tendo sua população aumentada cerca de dez vezes. A RMSP é constituída por 39 municípios e ocupa uma área de aproximadamente 8000 km² (FREITAS, 2003), localiza-se numa bacia sedimentar cercada por serras e morros, numa região climática de transição entre o clima tropical úmido de altitude, com período seco bem definido, e o subtropical do Brasil meridional, permanentemente úmido (TARIFA & ARMANI, 2001). Segundo o IBGE, em 2006 a população de toda a RMSP era superior a 19 milhões de habitantes, sendo a grande maioria residente em áreas urbanas.

As transformações introduzidas pela ação antrópica, como a inserção de edificações e a impermeabilização do solo, associada às características naturais da área ocupada, resultam em comportamentos diferenciados da temperatura, umidade do ar e precipitação, que, não raramente, transformam a cidade num caos (MARQUES, 2003). A substituição da superfície natural por edificações, ruas e calçadas altera as propriedades térmicas e radiativas do meio, gerando modificações nas condições atmosféricas locais. A inserção de materiais artificiais, como concreto e asfalto, por exemplo, além de alterar a capacidade térmica do meio altera o albedo da superfície. A introdução de estruturas verticais, com geometrias específicas, também interfere nos processos de absorção e reflexão de radiação. Além disso, as cidades possuem uma significativa fonte extra de calor, através de emissões veiculares, industriais e até mesmo domésticas. Todos estes fatores modificam o balanço de energia em superfície,

resultando num armazenamento de energia no dossel urbano e um maior aquecimento nas áreas urbanizadas.

Num estudo sobre o potencial efeito da presença de vegetação no ambiente urbano, AVISSAR (1996) demonstra que a vegetação pode afetar substancialmente o vento, temperatura, umidade e regime de precipitação em áreas urbanizadas. A vegetação possui um controle importante na partição de energia, contribuindo para a manutenção de temperaturas mais amenas. Através dos processos de evapotranspiração a vegetação transfere umidade do solo para os baixos níveis da atmosfera, além de proporcionar sombra. AVISSAR (1996) aponta que a vegetação possui aplicações práticas muito importantes no planejamento urbano, tanto no que diz respeito ao aquecimento e resfriamento das construções, quanto na dispersão de poluentes e clima urbano.

Com isso, este trabalho se propõe a estudar propriedades da superfície urbana e sua influência sobre as condições meteorológicas locais, bem como o impacto sentido pela população no que diz respeito às condições de conforto térmico humano (CTH). Mais especificamente há a proposta de investigar como a inserção de vegetação pode mitigar este impacto, e assim fornecer subsídios científicos que possam auxiliar a tomada de decisões acerca do planejamento urbano.

Em meio a este contexto conceitual, definido tanto pelo estudo de fenômenos físicos na atmosfera quanto pela sua aplicação social, este trabalho possui ainda um caráter bastante prático do ponto de vista operacional, uma vez que foi utilizada como uma das ferramentas a modelagem numérica, que permite a representação e análise de condições hipotéticas (que não podem ser medidas ou reproduzidas em experimentos de campo).

1.2. Objetivos e estrutura do trabalho

O objetivo principal desta dissertação de mestrado foi estudar, através da modelagem numérica, medidas em superfície de variáveis atmosféricas e de produtos de sensoriamento

remoto, os efeitos causados pela modificação nas propriedades da ocupação do solo, altamente heterogênea, existente na cidade de São Paulo e vizinhanças, sobre as condições atmosféricas locais. Mais especificamente, foi analisado o efeito da presença de vegetação dentro de uma área altamente urbanizada, a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), e sua influência sobre a ilha de calor urbana e, sobre as condições de conforto térmico humano. Isto foi feito fundamentalmente através de simulações numéricas com duas versões do modelo de mesoescala *Regional Atmospheric Modeling System* – RAMS (COTTON et al., 2003): a versão 4.3 utilizada por FREITAS (2003) e a versão brasileira, atualmente conhecida por BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*); propondo e avaliando cenários com diferentes proporções de áreas vegetadas dentro do ambiente urbano.

Além deste objetivo principal, foram objetivos secundários:

- A criação de um arquivo de ocupação do solo mais detalhado e em alta resolução espacial (20 m), a fim de descrever melhor a superfície urbana através do agrupamento de regiões semelhantes e também de incluir heterogeneidades como a presença de áreas vegetadas e descampadas;
- Identificar indícios da relação entre a urbanização e a deterioração das condições de conforto térmico humano;
- A proposta de medidas, através da inserção de vegetação, para a melhoria das condições de conforto térmico humano, bem como a verificação de como as mudanças propostas podem alterar as condições meteorológicas locais.

A partir destes objetivos o trabalho foi estruturado com uma descrição inicial dos conceitos e ferramentas utilizados e em seguida a apresentação dos estudos observacionais e numéricos.

Inicialmente é apresentada uma discussão acerca dos principais conceitos envolvidos neste trabalho, sendo estes: o fenômeno da ilha de calor urbana, o impacto da vegetação em

áreas urbanizadas, o conceito de conforto térmico humano, além de uma discussão sobre a aplicação da meteorologia a questões de planejamento urbano. Em seguida, no Capítulo 2, é realizada uma descrição dos modelos numéricos utilizados neste trabalho, enfocando as principais características dos mesmos e também as parametrizações utilizadas na representação de áreas urbanas e vegetadas, bem como a possibilidade de representação de múltiplas superfícies coexistindo dentro de uma célula de grade. Na sequência são mostrados no Capítulo 3 os estudos de caráter observacional: os procedimentos de geração de um arquivo de superfície refinado e de determinação da fração ocupada por vegetação dentro da área urbanizada, os quais permitiram uma descrição mais detalhada da superfície da área em estudo; e também um estudo qualitativo que, utilizando dados de superfície, buscou evidenciar a relação entre as propriedades da superfície e as condições de conforto térmico humano. No Capítulo 4 é descrita a metodologia empregada e são apresentados os resultados obtidos com as simulações numéricas. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.3. A ilha de calor urbana

A temperatura do ar em áreas densamente urbanizadas é maior que a temperatura das áreas rurais adjacentes, o que constitui o fenômeno chamado “ilha de calor” (SANTAMOURIS, 2001). O processo de urbanização produz alterações no balanço de energia das cidades, gerando bolsões térmicos sobre as áreas urbanizadas (Figura 1.1) e formando assim a ilha de calor urbana (LOMBARDO, 1984). O fenômeno recebe este nome devido ao seu aspecto visual, no qual se observa um núcleo mais quente (área urbana) rodeado por regiões mais frias (áreas rurais), de modo que as isotermas desenham uma ilha com contornos fechados ao redor deste núcleo. Trata-se de um exemplo bastante conhecido da modificação das condições atmosféricas pela ação humana.

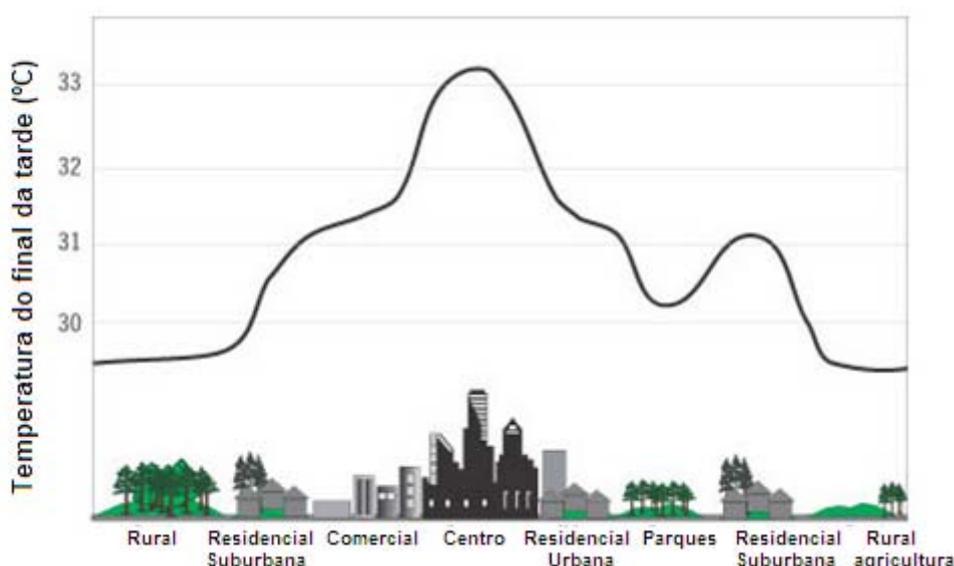


Figura 1.1 – Esquema ilustrativo do bolsão térmico formado sobre áreas urbanas (adaptada de SANTAMOURIS, 2001)

ERIKSEN (1978, citado em LOMBARDO, 1984) atribui a formação da ilha de calor urbana aos seguintes fatores: efeitos da transformação de energia no interior da cidade, com formas específicas (estruturas verticais artificialmente criadas), cores (albedos) e materiais de construção (condutibilidade); redução do resfriamento, causado pela diminuição da evaporação devido à presença de poucas áreas verdes e do transporte de água da chuva através de canalização; e produção de energia antropogênica, através da emissão de calor pelas indústrias, tráfego de veículos e habitações. Além disso, existem outras atividades ou contribuições humanas que ocorrem nessas áreas e que intensificam a ilha de calor, o calor metabólico produzido no corpo humano é um exemplo.

OKE (1981) ressalta ainda processos importantes associados à poluição do ar (que, dependendo do poluente, pode causar aumento na radiação de onda longa emitida pela atmosfera, devido a uma maior absorção de radiação de onda curta incidente, e maior emissão de onda longa pelos poluentes) e à geometria da superfície (que provoca aumento na absorção de onda curta, pelo aprisionamento no interior dos cânions, e diminuição na emissão de onda longa, devido à redução do fator de visão do céu, definido como a razão entre a largura das

ruas e a altura das construções), além das fontes de calor antropogênicas, impermeabilização da superfície e propriedades térmicas dos materiais das construções, citados anteriormente.

SANTAMOURIS (2001) detalha cada um destes fatores, conforme descrito a seguir:

- Propriedades térmicas dos materiais: podem aumentar o armazenamento de calor sensível na malha urbana durante o dia e liberar o calor armazenado para a atmosfera urbana após o pôr-do-sol. Além disso, a substituição do solo ou vegetação natural por materiais como concreto e asfalto, usados nas cidades, reduz o potencial de diminuição da temperatura ambiente pela evaporação e transpiração das plantas.
- Geometria de cânion: contribui para a diminuição da perda de radiação de onda longa, como resultado de complexas interações. As várias superfícies das construções e ruas no interior dos cânions emitem radiação de onda longa, as construções que cobrem uma fração do céu com superfícies mais quentes recebem grande parte desta radiação infra-vermelha e irradiam de volta uma quantidade ainda maior. Esta geometria também diminui o albedo efetivo do sistema, devido à múltipla reflexão da radiação de onda curta pelas superfícies do cânion (paredes e ruas).
- Calor antropogênico: calor gerado pela queima de combustíveis de fontes móveis ou estacionárias, e também pelo metabolismo dos animais.
- Redução de superfícies evaporativas: afeta a partição de energia no interior das cidades, acrescentando mais energia na forma de calor sensível e menos na forma de calor latente.
- Efeito estufa urbano: contribui para o aumento da radiação de onda longa incidente a partir da atmosfera urbana poluída, esta incidência extra na cidade diminui a perda de radiação líquida.

Estudos com modelagem numérica da atmosfera sugerem que os maiores gradientes de temperatura encontrados entre a área urbana de São Paulo e as áreas rurais adjacentes atingem valores superiores a 4 °C no inverno, sendo os maiores gradientes térmicos observados

durante a madrugada (FREITAS, 2003). A intensidade da ilha de calor, no entanto, é altamente influenciada pela condição sinótica atuante (FREITAS & SILVA DIAS, 2005). A condição de ventos fracos em escala sinótica favorece o desenvolvimento da ilha de calor urbana, já que ventos fortes misturariam o ar da cidade e das áreas rurais e diminuiriam o contraste de temperatura.

FREITAS et al. (2007) descreve a interação entre a circulação associada à ilha de calor urbana e a brisa marítima na Região Metropolitana de São Paulo. O gradiente de temperatura que caracteriza a ilha de calor urbana, descrito anteriormente, gera um movimento de convergência de ar em superfície na região do núcleo mais quente (centro da cidade). A penetração da frente de brisa nesta condição é favorecida até a região central da cidade, ou seja, a brisa é acelerada enquanto a sua direção de propagação é coincidente com a direção do vento em superfície. A partir desta região central as direções (de propagação da brisa e do vento em superfície) passam a ser opostas, de modo que a frente de brisa passa a ser desacelerada dali em diante. Sabe-se que o calor e a convergência associados à ilha de calor, somados à umidade trazida pela brisa marítima, são fatores que contribuem para a formação de tempestades severas na RMSP (FREITAS & SILVA DIAS, 2004).

1.4. Efeitos da vegetação em áreas urbanas

A vegetação desempenha um papel importante nos fluxos turbulentos de superfície. Através da vegetação, água é retirada do solo e transportada para a atmosfera na forma de fluxo de calor latente. Com uma maior quantidade de umidade nas porções mais baixas da atmosfera (solo, partes da vegetação como troncos e folhas), grande parte da energia solar é utilizada na evaporação da água diminuindo a energia disponível para o aquecimento da atmosfera pelo fluxo de calor sensível.

A partição de energia absorvida na superfície, entre os fluxos de calor latente e sensível (chamada de razão de Bowen), depende fortemente da disponibilidade de água na superfície

para evaporação e transpiração das plantas (AVISSAR, 1992). Sob condições de solo seco esta energia é usada para aquecer a atmosfera e a superfície. Em áreas urbanas, completamente secas devido à impermeabilização do solo, esta partição de energia resulta em altos fluxos de calor sensível e altas temperaturas na superfície. Em áreas mais úmidas onde há vegetação não estressada do ponto de vista hídrico, os fluxos de calor sensível são mais baixos e as temperaturas mais amenas, enquanto os fluxos de calor latente são mais expressivos, uma vez que a energia é utilizada nos processos de evaporação e transpiração das plantas (AVISSAR, 1996).

Sabe-se que a maior taxa de aquecimento sobre a área urbana (seca) gera forte mistura turbulenta, de forma que sobre a área urbana desenvolve-se uma camada limite planetária (CLP) mais instável e estratificada. A menor taxa de aquecimento sobre e a vegetação transpirante limita o desenvolvimento da CLP, que permanece rasa nesta área (AVISSAR, 1996). É esta a base física para o desenvolvimento da ilha de calor urbana, citada na seção anterior. A partir deste princípio infere-se que a presença de vegetação no ambiente urbano pode afetar também o desenvolvimento da camada limite planetária e a instabilidade da atmosfera.

O controle das trocas entre as plantas e o meio é determinado, porém, pelo gradiente de umidade entre o solo e atmosfera, ou seja, a demanda atmosférica por vapor d'água, pois é este gradiente que controla a abertura e fechamento dos estômatos (orifício por onde a planta realiza as trocas hídricas através do processo de evapotranspiração, além das trocas gasosas de oxigênio e dióxido de carbono). A planta sob uma situação de estresse hídrico mantém os estômatos fechados, a fim de não perder água para o meio, reduzindo assim as trocas de calor latente com a atmosfera.

A vegetação também produz alterações na interação com a radiação solar, alterando o albedo da superfície. Outro efeito proporcionado pela vegetação é o sombreamento, este,

porém, é de mais difícil avaliação. Atualmente, existe grande preocupação em determinar o possível benefício que a introdução de áreas verdes em grandes centros urbanos possa trazer na mitigação dos efeitos indesejáveis observados nesses centros. Estudos realizados pelo Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT) da FAU-USP mostram que existe uma relação direta entre a quantidade de vegetação e a temperatura de uma região (DUARTE & SERRA, 2003).

1.5. Conforto térmico humano

O homem é uma espécie homeotérmica, sendo seu organismo mantido a uma temperatura interna sensivelmente constante, da ordem de 37 °C (FROTA & SHIFFER, 1988). Quando por algum motivo esta temperatura é alterada o organismo aciona os chamados mecanismos termorreguladores, responsáveis pela redução ou aumento das perdas de calor, a fim de restabelecer a sua temperatura normal (THOM, 1959). No caso de alta temperatura corporal os principais mecanismos termorreguladores são a vasodilatação e o suor. No caso de baixa temperatura corporal ocorre a vasoconstrição, tiritar e eriçar de pelos.

O conceito de conforto térmico engloba aspectos fisiológicos e psicológicos (MAIA, 2002). Sob o aspecto fisiológico, enfoque deste trabalho, a sensação de conforto térmico está ligada ao conceito de neutralidade térmica, quando não é necessária a intervenção de nenhum mecanismo termorregulador para manter a temperatura do corpo estável. Em outras palavras, na condição de conforto térmico o organismo perde para o ambiente o calor produzido pelo metabolismo sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação. Segundo THOM (1959), o corpo humano pode ser comparado a uma máquina térmica, que produz e dissipa calor continuamente, em maior ou menor grau dependendo de uma série de fatores. Neste contexto o conceito de conforto térmico implica em balanço de energia, ou seja, todo o calor gerado ou ganho pelo organismo é eliminado na mesma proporção para que o corpo mantenha sua

temperatura estável. Já o aspecto psicológico envolve a idéia de satisfação com o ambiente, sendo de mais difícil avaliação por envolver sensações humanas.

MAIA (2002) destaca que o grau de conforto ou desconforto térmico sentido pelas pessoas não se deve a um único fator, mas sim ao efeito conjugado de uma série de fatores como a produção de calor metabólico, fatores ambientais e também o tipo de vestimenta utilizada pela pessoa. JOHANSSON (2001) explica mais detalhadamente cada um destes fatores, definindo quatro variáveis ambientais que afetam o conforto térmico humano: temperatura do ar (à sombra), temperatura radiante média (TRM, descrita adiante), umidade do ar e velocidade do vento; e duas variáveis pessoais: o isolamento pela vestimenta e o nível de atividade física.

O entendimento da influência de cada um destes fatores baseia-se na equação do balanço térmico para o corpo humano, dada por (HÖPPE, 1999):

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0 \quad (1.1)$$

em que M é a taxa metabólica (produção interna de energia), W a perda por trabalho físico, R a radiação líquida do corpo, C o fluxo de calor convectivo, E_D o fluxo de calor latente associado à evaporação de água através da pele (transpiração imperceptível), E_{Re} a soma dos fluxos para aquecimento e umidificação do ar inspirado (termo associado à respiração), E_{Sw} o fluxo de calor devido à evaporação do suor e S o calor armazenado para aquecimento e resfriamento da massa corpórea. Os termos desta equação são dados em unidades de Watts e possuem sinal positivo se resultam num ganho de energia, de modo que M é sempre positivo e W , E_D e E_{Sw} são sempre negativos. HÖPPE (1999) cita a relação de cada um dos termos com as variáveis meteorológicas, estabelecendo que a temperatura do ar influencia os fluxos C e E_{Re} , a umidade do ar afeta E_D , E_{Re} e E_{Sw} , a velocidade do vento interfere em C e E_{Sw} , enquanto a temperatura radiante média afeta R .

JOHANSSON (2001) explica com maior detalhe estas relações. Segundo este autor a temperatura do ar é um dos principais fatores climáticos que influencia o conforto térmico. Com o aumento da temperatura do ar há uma diminuição nas perdas de calor convectivo (C) e pela respiração seca (E_{Re}), se a temperatura do ar excede a temperatura da superfície corporal então há um ganho de calor convectivo. JOHANSSON (2001) explica também que um aumento na umidade provoca diminuição das perdas evaporativas (por evaporação do suor e difusiva, E_{Sw} e E_D) e pela respiração úmida (E_{Re}). Ele destaca que especialmente em condições quentes, em que os fluxos convectivo e radiativo (C e R) são pequenos, a evaporação do suor (E_{Sw}) é um mecanismo importante para manter o conforto, uma vez que a evaporação do líquido sobre a pele retira calor latente do corpo produzindo um efeito de resfriamento.

A velocidade do vento também é um fator majoritário sobre o estado de conforto térmico. Ainda segundo JOHANSSON (2001), um aumento na velocidade do vento aumenta as perdas de calor convectivo e por evaporação do suor (C e E_{Sw}). Isto ocorre porque os coeficientes de transferência de calor convectivo e evaporativo aumentam em magnitude, uma vez que a camada de isolamento ao redor do corpo diminui de espessura. No entanto, para altas temperaturas do ar (próximas à temperatura superficial da pele) a perda de calor convectivo é desprezível, de modo que fortes movimentos de ar representam uma desvantagem em climas frios e um benefício em climas quentes.

A perda radiativa de calor (R) é dependente da temperatura radiante média (TRM), que é definida para ambientes fechados como “a temperatura uniforme de um ambiente fechado em que a transferência radiativa de calor do corpo humano se iguala a transferência radiativa de calor no ambiente real não-uniforme” (ASHRAE, 1997; citado em JOHANSSON, 2001). A determinação da TRM em ambientes abertos é muito mais complicada, dadas as grandes variações espaciais e temporais nos ambientes externos e também a vasta gama de interações

radiativas, de modo que esta pode ser obtida mais precisamente através de medições ou pode ser estimada através de cálculos. Ainda de acordo com JOHANSSON (2001), um aumento na TRM causa uma diminuição na perda radiativa de calor, quando a TRM é maior que a temperatura da superfície corporal então há um ganho de calor.

O estabelecimento de critérios para a estimativa do conforto térmico humano (CTH) data do início do século XIX, na Europa, com o início do movimento para melhoria das condições de trabalho nas indústrias (MAIA, 2002). Os estudos nesta área começaram a evoluir no início do século XX, motivados em parte pelo advento do ar condicionado, de modo que a grande maioria dos estudos acabou se concentrando em descrever e correlacionar as variáveis apenas em ambientes climatizados (MONTEIRO & ALUCCI, 2005a). Os índices de conforto mais comumente usados em ambientes fechados (*indoor*) são baseados no balanço de calor do corpo humano (JOHANSSON, 2001).

Os índices de conforto térmico humano podem ser classificados em três tipos: 1) biofísicos, que se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a estes elementos; 2) fisiológicos, que se baseiam nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e TRM; ou 3) subjetivos, que se baseiam nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos do conforto térmico variam (FROTA & SHIFFER, 1988).

Neste trabalho, no entanto, o enfoque encontra-se na análise das condições de conforto térmico humano em ambientes abertos. Um apanhado histórico, bem como uma descrição dos principais índices de conforto térmico adaptados a ambientes abertos, pode ser encontrado em MONTEIRO & ALUCCI (2005 a e b).

O desconforto térmico influencia no desempenho de atividades e pode provocar acidentes. A poluição do ar também pode causar desconforto, porém, é difícil avaliar o seu

impacto através de um índice. Sabe-se, no entanto, que um indivíduo já estressado termicamente sofrerá mais sob influência de uma atmosfera poluída (MAIA, 2002).

1.6. Aplicação da meteorologia ao planejamento urbano

A meteorologia e as questões de planejamento urbano estão fortemente ligadas por um eixo comum, o urbanismo visa o bem estar da população das cidades e as condições climáticas locais são um dos fatores associados a este bem estar. É importante ressaltar que o conforto climático é apenas um destes fatores, de modo que cabe ao urbanista ponderar seu peso entre os demais fatores sócio-econômicos e tomar decisões acerca do planejamento urbano. Por outro lado, o papel do meteorologista é fornecer subsídios científicos acerca dos fatores ambientais que possam auxiliar nesta tomada de decisão. A proposta deste trabalho se encaixa nesse perfil.

A arquitetura, assim como a meteorologia, envolve diferentes escalas, e estas escalas encontram-se conectadas. Enquanto na meteorologia pode-se tratar de fenômenos em micro e mesoescala, analisando fenômenos desde trocas entre a atmosfera e a superfície até o desenvolvimento de circulações locais, a arquitetura abrange as escalas de dimensão humana ou de cidade, tratando desde o conforto ambiental no interior das edificações até o planejamento de vias de acesso e conexões entre grandes áreas.

A questão do conforto térmico humano, discutida na seção anterior, elo de ligação entre a arquitetura e a meteorologia neste trabalho, é um fenômeno em pequena escala. As condições de conforto experimentadas por um indivíduo dependem fortemente de condições meteorológicas locais, bem como de fatores pessoais como a vestimenta, a atividade física e até mesmo o biótipo do indivíduo. A proximidade com a vegetação, o efeito de sombreamento e mudanças na intensidade do vento por obstáculos interferem diretamente nas condições de conforto sentidas. Neste estudo, porém, o enfoque encontra-se na dimensão urbana como um todo, ou na mesoescala se falarmos em termo meteorológicos. Desta forma, este trabalho se

propõe a fazer uma conexão entre as escalas, avaliando a questão do conforto térmico sob um outro ponto de vista, sem o detalhamento em escala humana mas com possíveis avaliações na escala da cidade.

2. Descrição do modelo numérico e parametrizações de superfície

Neste capítulo é apresentada uma descrição das principais características dos modelos numéricos RAMS 4.3 e BRAMS 3.2, bem como das parametrizações de superfície relevantes no contexto deste trabalho.

2.1. Características gerais do modelo RAMS

O modelo atmosférico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*, PIELKE et al., 1992, COTTON et al., 2003) é um modelo numérico de múltipla finalidade, designado para simular circulações atmosféricas que vão desde a micro até a grande escala (FREITAS, 2003). O conceito inicial do modelo foi criado na Universidade do Estado do Colorado (*CSU – Colorado State University*), EUA, na década de 80 e veio sendo aprimorado ao longo dos anos (TREMBACK & WALKO, 1997), sendo largamente utilizado hoje em dia, tanto para finalidade operacional quanto de pesquisa. O modelo é baseado nas equações primitivas que governam os movimentos da atmosfera, discretizadas em diferenças finitas. Uma descrição detalhada destas equações pode ser encontrada em FREITAS (1999) e MENEZES (1997). O modelo é equipado com um esquema de aninhamento múltiplo de grades, permitindo a solução das equações simultaneamente em malhas computacionais interativas em diferentes escalas espaciais (TREMBACK & WALKO, 1997). As grades de maior resolução são utilizadas para modelar detalhes de sistemas atmosféricos de menor escala, como escoamentos sobre terrenos complexos e circulações termicamente induzidas pela superfície. As grades mais grossas, por sua vez, são usadas para modelar o ambiente destes sistemas menores, fornecendo condições de fronteira para as malhas mais finas, bem como para simular sistemas atmosféricos de grande escala, que interagem com os sistemas de mesoescala resolvidos nas grades mais finas (TREMBACK & WALKO, 1997).

O modelo possui um grande número de parametrizações físicas para a radiação, convecção, microfísica de nuvens e turbulência, além de um avançado esquema de interação Solo-Superfície-Atmosfera, através do módulo LEAF (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model*, WALKO et al., 2000), o qual trata os efeitos de diferentes tipos de uso do solo, inclusive áreas urbanizadas, através do módulo TEB (*Town Energy Budget*, MASSON, 2000). Adiante, na seção 2.3, é feita uma breve descrição dessas parametrizações e, em seguida, nas seções 2.4 e 2.5, uma descrição mais detalhada dos módulos LEAF e TEB.

2.2. Características gerais do modelo BRAMS

O BRAMS (*Brazilian Regional Atmospheric Modeling System*) é a versão brasileira do RAMS, desenvolvido numa parceria entre a ATMET (Atmospheric, Meteorological and Environmental Technologies – EUA), CPTEC-INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) e do IAG-USP (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo), e objetiva a correta simulação de fenômenos típicos das regiões tropicais. O BRAMS na versão 3.2 diferencia-se do RAMS pela introdução da parametrização de cumulus rasos (*shallow cululus*; SOUZA & SILVA, 2003), de uma nova parametrização de convecção profunda (esquema de fluxo de massa com diversos fechamentos, baseado em GRELL & DEVENYI, 2002), do processo de assimilação de umidade do solo heterogênea (GEVAERD & FREITAS, 2006), da parametrização de superfície SIB2 (SELLERS et al., 1996) e de um novo conjunto de dados no LEAF-3 com parâmetros observacionais para biomas da América do Sul, bem como aprimoramentos do código para melhor eficiência computacional, como a reprodutibilidade binária (mesmo resultado com qualquer número de processadores). Em sua versão mais recente o modelo conta com uma parametrização para os processos fotoquímicos na atmosfera (FREITAS et al.,

2005), além do tratamento adequado para áreas urbanas através do esquema TEB (MASSON, 2000), introduzido inicialmente na versão 4.3 do modelo RAMS (FREITAS et al., 2007).

2.3. Parametrizações físicas dos modelos

O RAMS contém dois conjuntos de esquemas radiativos: o esquema descrito por MAHRER & PIELKE (1977) e o esquema descrito por CHEN & COTTON (1983). O esquema de MAHRER e PIELKE possui a vantagem de ser bastante eficiente para a execução, entretanto, não inclui o efeito de nuvens. O esquema de radiação de onda curta de MAHRER e PIELKE é um esquema simples, que leva em consideração o espalhamento por oxigênio, ozônio e dióxido de carbono de maneira empírica e trata a absorção por vapor d'água. Efeitos da topografia também são levados em conta nesse esquema. Para a radiação de onda longa o esquema MAHRER e PIELKE leva em consideração a emissão e absorção infravermelha do dióxido de carbono e do vapor d'água, mas não trata nuvens ou material condensado de maneira alguma. O esquema de CHEN e COTTON para a radiação de onda curta é uma solução completa da equação de transferência radiativa e para a radiação de onda longa é um esquema de 3 bandas que, da mesma maneira que o esquema de onda curta, parametriza os efeitos das nuvens.

Para representar os processos convectivos o modelo utiliza nas grades de menor resolução a parametrização convectiva baseada em KUO (1974). Em todas as outras grades, a parametrização explícita de microfísica pode ser ativada. Desde a versão 4.3 do RAMS, foi desenvolvido um código microfísico global (*bulk*) descrito em WALKO et al. (1995) que é uma generalização das versões anteriores e pode tratar vapor d'água, chuva, *pristine*, gelo, neve, agregados, *graupel* e granizo como uma distribuição gama generalizada. Esse esquema leva em conta a nucleação homogênea e heterogênea de *pristine* de gelo e a conversão entre as categorias de *pristine* grande e pequeno, resultante da deposição de vapor ou sublimação.

Uma nova rotina de sedimentação permite velocidades de queda diferenciais baseadas na distribuição gama de tamanhos.

Para a parametrização dos coeficientes de difusão turbulenta na horizontal e na vertical o modelo conta com quatro opções. A primeira dessas opções é baseada na formulação de SMAGORINSKY (1963) para os coeficientes de difusão horizontais, os quais são calculados como o produto da taxa de deformação horizontal (gradientes horizontais da velocidade do vento) e do quadrado da escala de comprimento. Nessa opção, a difusão vertical é parametrizada seguindo o esquema de MELLOR & YAMADA (1982) através da energia cinética turbulenta prognosticada pelo modelo. A segunda opção utiliza a mesma parametrização anterior para os coeficientes horizontais e para os coeficientes verticais é utilizado o análogo unidimensional do esquema de Smagorinsky. Essas duas opções são apropriadas para o caso em que o espaçamento de grade na horizontal é muito maior que na vertical, tal que os movimentos convectivos dominantes não sejam resolvidos.

Na terceira opção os coeficientes de difusão na horizontal e na vertical são calculados como um produto entre o tensor tensão de cisalhamento, ou tensor tensão de Reynolds, e o quadrado da escala de comprimento. A quarta opção utiliza o esquema de DEARDORFF (1980) e faz uso da energia cinética turbulenta para o cálculo dos coeficientes de difusão horizontal e vertical. Tanto no esquema de Deardorff quanto no esquema de Mellor e Yamada a energia cinética turbulenta é gerada por meio dos processos de cisalhamento e empuxo e um termo pressão-trabalho parametrizado. Essa energia é destruída por esses mesmos processos e também por um termo de dissipação. Existe também a advecção e difusão de energia cinética turbulenta. O resultado desses processos permite a geração de um campo de energia cinética turbulenta do qual os coeficientes de difusão são localmente diagnosticados.

2.4. Representação de superfícies vegetadas (LEAF)

Para a condição de fronteira inferior o modelo utiliza o LEAF (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model*, WALKO et al., 2000). O LEAF é uma representação dos aspectos da superfície, incluindo vegetação, solo, lagos e oceanos e suas influências uns sobre os outros e sobre a atmosfera. Inclui equações prognósticas para: temperatura do solo e umidade em múltiplas camadas; temperatura da vegetação e água na superfície (incluindo orvalho e precipitação interceptada e energia termal para múltiplas camadas); e temperatura e razão de mistura do vapor d'água do ar do dossel. Os termos de troca nestas equações prognósticas incluem trocas turbulentas, condução de calor, difusão de água e percolação nas camadas do solo, transferências radiativas de onda curta e onda longa, transpiração e precipitação. Um dos aspectos importantes do LEAF é sua habilidade em representar variações de escala fina nas características da superfície, tais como tipo de vegetação, inclinação do terreno, tipo de solo e umidade e corpos d'água, os quais freqüentemente variam consideravelmente sobre curtas distâncias horizontais. Cada tipo de superfície responde às influências da atmosfera adjacente de uma maneira própria. Idealmente, cálculos em grades computacionais suficientemente finas seriam empregados em modelos atmosfera-ecossistema para resolver tanto os aspectos de superfície quanto a sua completa resposta atmosférica. Entretanto, fontes computacionais são sempre um fator limitante na resolução do modelo e normalmente não permitem uma simulação ideal. Felizmente, o LEAF é relativamente de baixo custo computacional quando comparado com a representação dos processos atmosféricos no modelo.

A implementação do LEAF dentro do RAMS, e do BRAMS, traz a vantagem de permitir múltiplos tipos de superfície coexistirem dentro de uma única célula de grade, resolvida numa coluna de ar, através da definição de *patches* (seção 2.4.1). Um claro benefício desta aproximação é a habilidade em representar vários tipos de superfície (floresta, grama, solo nu,

por exemplo) dentro de uma mesma célula de grade, onde cada tipo de superfície ocupa uma fração da grade e é tratado separadamente. Outro benefício é a habilidade de tratar unicamente para cada *patch* a precipitação simulada atingindo o solo. Por exemplo, chuva ou neve freqüentemente escorrem em áreas inclinadas e se acumulam em vales antes de percolarem dentro do solo. Parte da umidade que percola nas áreas inclinadas, freqüentemente tende a escoar levemente dentro da camada de solo. Isto leva a uma secagem relativa do solo em algumas áreas e umedecimento em outras, sobre escalas de comprimento horizontal que incluem a escala sub-grade. O efeito resultante sobre os fluxos de calor e umidade para a atmosfera pode ser bastante diferente do caso de percolação uniforme. Em ambos os exemplos, respostas não lineares da vegetação para o *patch* na umidade do solo e nos fluxos radiativos, podem complicar ainda mais a interação entre atmosfera, solo e ecossistema.

Como o LEAF realiza o transporte de água somente na vertical, é necessária a utilização de algum recurso para representar o transporte lateral da água no solo. Para esta tarefa, o LEAF utiliza o TOPMODEL (BEVEN et al., 1984, SIVAPALAN et al., 1987, BAND et al., 1993), modelo hidrológico que representa o transporte lateral inclinado da água dentro de regiões saturadas do solo. O acoplamento entre estes dois modelos pode simultaneamente representar, tanto o transporte vertical como o horizontal e suas interações.

O transporte de água dentro do solo é relativamente lento, com um deslocamento lateral de somente alguns poucos metros por dia ou menos. Conseqüentemente, o TOPMODEL representa o transporte de água em escalas muito mais finas que as típicas dimensões das células de grade horizontal no modelo. O acoplamento mais apropriado é o TOPMODEL trocar a umidade do solo entre *patches* mais do que entre células de grade. Assim, na região de interesse do TOPMODEL, um *patch* é identificado como uma região na qual pode-se ganhar ou perder umidade do solo, devido ao transporte lateral. A troca de água vertical no LEAF responde à distribuição de água e às taxas de transporte calculadas pelo TOPMODEL.

Para a definição dos parâmetros da vegetação, o LEAF utiliza o BATS (*Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme*, DICKINSON et. al., 1986) e os parâmetros fornecidos pelo *NASA/Land Data Assimilation Systems* (NASA/LDAS) que podem ser verificados no endereço <http://ldas.gsfc.nasa.gov>. Os parâmetros de vegetação adotados no BATS incluem o índice de área foliar, comprimento de raízes, cobertura fracional, altura do plano de deslocamento, rugosidade, albedo e emissividade. Algumas das categorias utilizadas no BATS podem ser vistas em SETH et. al. (1994) ou no arquivo RAMSIN (*namelist* para execução do RAMS/BRAMS).

2.4.1. Representação de múltiplas superfícies (*patches*)

Como citado anteriormente, um dos grandes benefícios obtidos com a parametrização de superfície do modelo é a representação de múltiplos tipos de superfície coexistindo dentro de uma única célula de grade, resolvida numa coluna de ar. Assumindo que os fluxos horizontais entre diferentes tipos de superfície dentro de um elemento de grade do modelo são pequenos se comparados aos fluxos verticais, superfícies do mesmo tipo localizadas em lugares diferentes dentro do elemento de grade são agrupadas em classes (AVISSAR, 1996). Desta forma são constituídos os chamados *patches*, que descrevem os tipos de superfície dados como condição de fronteira inferior ao modelo. O primeiro *patch* é atribuído somente a corpos d'água, o segundo contém o tipo de superfície predominante em cada célula de grade, o terceiro contém o tipo de superfície secundário e assim por diante. Cada *patch* consiste de sua própria vegetação, camadas de solo e ar do dossel (exceto para corpos d'água), sendo as variáveis prognósticas evoluídas para todos estes componentes em cada *patch* separadamente (FREITAS, 2003).

Nessa aproximação todos os *patches* interagem com a mesma coluna de ar, cada um de acordo com a sua cobertura fracional. Os fluxos totais de cada elemento de grade são

calculados de acordo com a área relativa das diferentes classes presentes dentro do elemento de grade, da seguinte maneira (AVISSAR, 1996):

$$\Phi_j^k = \frac{\sum_{i=1}^n A_{i,j} \phi_{i,j}^k}{\sum_{i=1}^n A_{i,j}} \quad (2.1)$$

em que:

$k = 1, 2, 3, \dots$ refere-se aos fluxos de calor latente e sensível, fluxo de momento, etc.;

Φ_j^k é o fluxo total no elemento de grade j ;

n é o número de classes;

$\phi_{i,j}^k$ é o fluxo k calculado para uma classe i particular;

$A_{i,j}$ é a área ocupada pela classe i dentro do elemento de grade j .

Desta forma é levada em conta a contribuição de cada tipo de superfície, ao invés de considerar um único tipo predominante em cada célula de grade.

2.5. Representação de superfície urbana (TEB)

Para a representação das áreas urbanizadas no modelo é utilizado o esquema TEB (*Town Energy Budget*), proposto por MASSON (2000) e introduzido inicialmente na versão 4.3 do RAMS por FREITAS (2003). Segundo MASSON (2000), o esquema TEB visa simular os fluxos turbulentos para a atmosfera, representando tanto a superfície urbana quanto a subcamada de rugosidade, de modo a fornecer condição de fronteira inferior a modelos de mesoescala na forma de uma única camada. Este esquema utiliza uma geometria de cânion, que considera três superfícies distintas: telhados, paredes e ruas, para representar o efeito das construções. Nesta geometria, proposta por Oke e colaboradores na década de 70, uma rua é margeada por duas faces de paredes, sendo o espaço entre elas denominado cânion. A Figura 2.1 apresenta uma esquematização desta geometria.

O esquema TEB considera uma temperatura representativa de cada uma das superfícies (telhados, paredes e ruas), ao invés de aproximar uma única temperatura representativa de

toda a superfície urbana, explicitando assim múltiplos balanços de energia (MASSON, 2000). Esta aproximação é relativamente simples, mas ainda permite a reprodução da maioria dos efeitos físicos associados ao balanço de energia urbano, incluindo o aprisionamento de radiação (de onda longa e onda curta), o fluxo de momento, os fluxos turbulentos de calor latente e sensível, o armazenamento de calor e a interceptação de água e neve (MASSON et al., 2002). Para o tratamento dos fluxos de condução através de cada superfície (para/do interior das construções, no caso dos telhados e paredes, ou do solo, para as ruas), cada tipo de superfície é discretizada em camadas, sendo as equações que descrevem a evolução da temperatura das camadas baseadas em considerações do balanço de energia. O conjunto completo destas equações, bem como a descrição detalhada dos processos radiativos, cálculo dos fluxos turbulentos e evolução de reservatórios de água, podem ser encontrados em MASSON (2000) e FREITAS (2003).

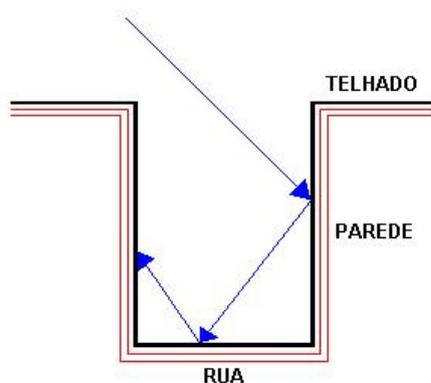


Figura 2.1 – Esquemática da geometria de cânion, utilizada no esquema TEB. As setas azuis representam as múltiplas reflexões a que estão sujeitos os raios solares incidentes no cânion.

Para parametrizar as interações dinâmicas e termodinâmicas entre a cidade e a atmosfera, segundo a hipótese de cânions, é necessário considerar características médias espacialmente, não sendo levadas em conta formas individuais das construções. Com isso, são feitas três importantes considerações (MASSON, 2000):

- Em um mesmo tipo urbano as construções possuem as mesmas dimensões (altura e largura), sendo o nível dos telhados o nível de superfície do modelo;
- As construções são localizadas ao longo de ruas ideais, cujo comprimento é considerado muito maior que a largura;
- Nenhuma discretização é feita com relação à orientação, de modo que qualquer orientação das ruas é possível e todas existem com a mesma probabilidade. Desta forma, são consideradas forçantes médias (com relação à posição do Sol e direção do vento) para superfícies de paredes e ruas.

Note-se que paredes ensolaradas ou sombreadas são tratadas em conjunto, uma vez que estas são idênticas para todos os processos físicos com exceção da radiação solar direta (FREITAS, 2003).

Os parâmetros do esquema TEB dependem diretamente da forma e material das construções, o que torna fácil a sua inicialização (MASSON, 2000), sendo dados como entrada parâmetros geométricos (como altura das construções, fator de visão do céu e comprimento de rugosidade), radiativos (albedo e emissividade das superfícies) e térmicos (capacidade térmica e condutividade das camadas de cada superfície). Os fluxos antropogênicos, veicular e industrial, também são prescritos, bem como o aquecimento doméstico implicitamente computado pelo uso de uma temperatura mínima interna às construções (MASSON et al., 2002).

3. Estudos observacionais

3.1. Refinamento da condição de superfície

Embora não seja possível a representação explícita das áreas verdes nos modelos de mesoescala utilizados, o esquema de *patches* descrito no capítulo anterior permite ponderar a fração coberta por vegetação, ou qualquer outro tipo de ocupação do solo, dentro de uma célula de grade do modelo. Tendo isto em vista foi proposto um refinamento na condição de superfície dada ao modelo, a fim de inserir o efeito de áreas verdes dentro do ambiente urbano, de acordo com a sua cobertura fracional, bem como uma melhor caracterização da própria área urbanizada.

Esta nova descrição da ocupação do solo na RMSP e arredores foi obtida através de um processo de classificação de imagens de satélite, com resolução espacial de 20 m, em substituição à descrição anterior, com resolução de 1 km. Este processo foi realizado através do software SPRING (www.inpe.br/spring), um sistema de informações geográficas (SIG) desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas espaciais (DPI-INPE).

Foram utilizadas imagens do satélite CBERS-2 (*China-Brasil Earth Resources Satellite*), obtidas através do catálogo de imagens da DGI-INPE (Divisão de Geração de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (www.dgi.inpe.br/CDSR). Estas imagens foram utilizadas devido à sua alta resolução espacial (20 m), bem como pela facilidade e gratuidade na aquisição. Foram utilizadas imagens em três regiões espectrais: verde (0,59 - 0,59 μm), vermelho (0,63 - 0,69 μm) e infravermelho próximo (0,77 - 0,89 μm), correspondentes às bandas 2, 3 e 4 do sensor CCD (*Couple Charged Device*) do satélite (www.cbbers.inpe.br).

A seguir são apresentados os procedimentos utilizados na geração do arquivo de ocupação do solo refinado.

3.1.1. Procedimento de classificação e definição da ocupação do solo.

No processo de classificação do uso do solo foram utilizadas imagens das bandas 2, 3 e 4 do satélite CBERS-2, apontadas por GONÇALVES et al. (2005) como a melhor composição para a separabilidade de usos intra-urbanos, bem como o software SPRING – Sistema de Processamento de Imagens Georreferenciadas (www.dpi.inpe.br/spring).

A partir da composição destas três bandas foi realizado no SPRING um procedimento chamado de classificação supervisionada por pixel. Neste procedimento foram escolhidas amostras da composição de imagens com aspectos semelhantes, representativas dos tipos de uso de solo que se desejava identificar, a partir das quais o software realizou a classificação de toda a área. Neste processo automático de classificação foi utilizado um classificador do tipo MAXVER, que considera a ponderação das distâncias entre médias dos níveis de cinza digitais das imagens, utilizando parâmetros estatísticos. O resultado é apresentado na Figura 3.1 em toda a área imageada e em detalhe sobre a Região Metropolitana de São Paulo na Figura 3.2.

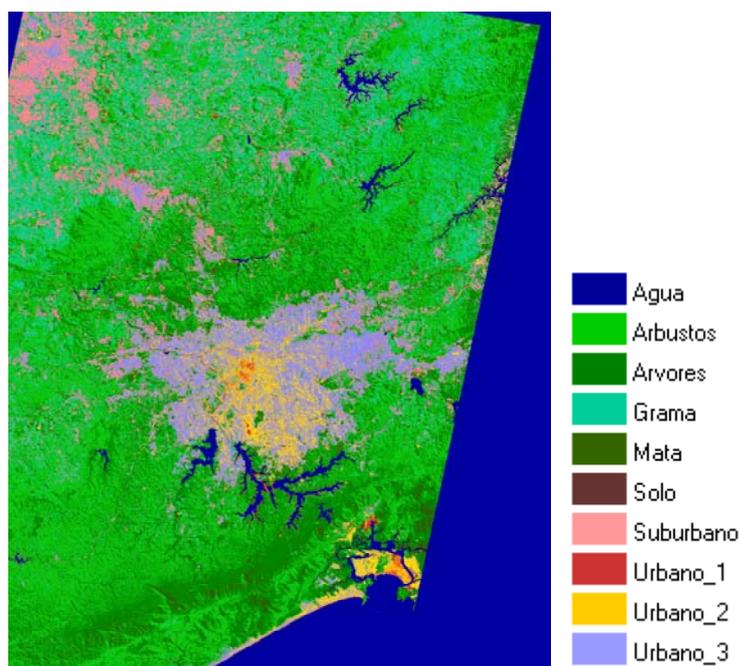


Figura 3.1 – Resultado da classificação da superfície a partir de imagens do satélite CBERS-2, com resolução de 20 m, sobre toda a área imageada.

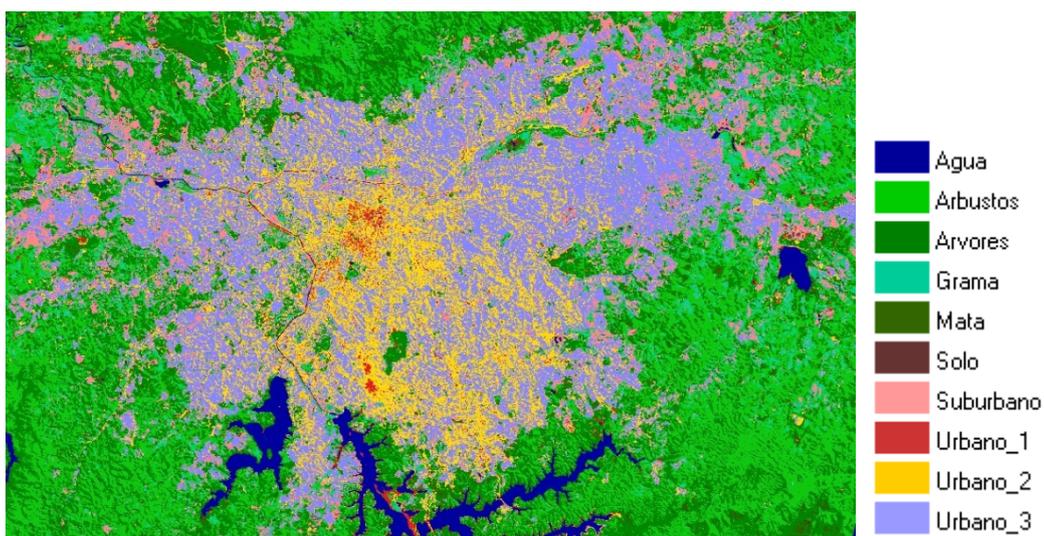


Figura 3.2 – Resultado da classificação da superfície a partir de imagens do satélite CBERS-2, com resolução de 20 m, sobre a RMSP.

Nestas imagens foram identificados quatro tipos urbanos distintos, a partir de suas propriedades espectrais conforme descrito acima. Cabe então identificar as características físicas locais de cada tipo de superfície. O tipo chamado de urbano 1 engloba a região central da cidade, com alta densidade de construções e verticalidade pronunciada, bem como avenidas largas de intenso tráfego veicular, conforme ilustrado na Figura 3.3. O tipo denominado urbano 2, localizado no entorno desta região central e estendendo-se a sudeste, também é caracterizado por uma alta densidade de edificações, porém já com uma mescla de construções de médio porte, este tipo urbano é exemplificado na Figura 3.4. O tipo classificado como urbano 3 já possui uma característica mais residencial, com construções mais baixas e ruas estreitas, como ilustrado na Figura 3.5. Finalmente, o tipo identificado como suburbano, situado na periferia da área urbanizada, representa a transição entre a área urbana e a rural, apresentando construções de pequeno porte mais esparsas, como apresentado, por exemplo, na Figura 3.6.



Figura 3.3 – Fotos representativas do tipo de superfície classificado como urbano 1.



Figura 3.4 – Fotos representativas do tipo de superfície classificado como urbano 2.

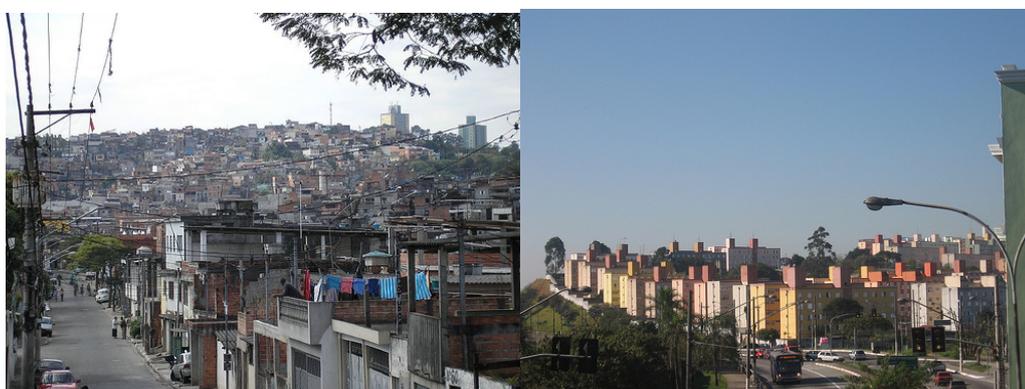


Figura 3.5 – Fotos representativas do tipo de superfície classificado como urbano 3.



Figura 3.6 – Foto representativa do tipo de superfície classificado como suburbano.

3.2. Determinação da fração vegetada.

Outra informação que também pode ser fornecida como condição de fronteira ao modelo atmosférico é a fração da superfície coberta por vegetação. A estimativa da fração ocupada por vegetação na Região Metropolitana de São Paulo foi então feita através do cálculo de um índice de vegetação numa resolução superior à das grades utilizada no modelo. O índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) foi utilizado para detectar a presença de vegetação, numa resolução de 20 m, e a partir desta informação foi gerado um campo com resolução de 1 km contendo a fração ocupada por vegetação em cada ponto de grade. O NDVI foi calculado a partir das imagens nas bandas 3 e 4 do satélite CBERS-2 (descritas na seção 3.1).

3.2.1. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI).

Plantas verdes absorvem radiação na região espectral PAR (*Photosynthetically Active Radiation* – radiação fotossinteticamente ativa), que é utilizada como fonte de energia para o processo de fotossíntese. Na região espectral do infravermelho próximo as folhas espalham radiação, pois o nível de energia por fóton nesse domínio não é suficiente para ser útil na síntese de moléculas orgânicas, de modo que uma grande absorção resultaria somente no superaquecimento da planta e possível dano aos tecidos. Assim, plantas verdes aparecem escuras no PAR e mais brilhantes no infravermelho próximo.

Desta forma, a assinatura espectral característica de uma vegetação verde e sadia mostra um evidente contraste entre a região do visível, especificamente no vermelho, e do infravermelho próximo. Quanto maior for esse contraste, maior o vigor da vegetação na área imageada (MOREIRA, 2003). O NDVI (*Normalized Difference Vegetatioan Index*), índice de vegetação por diferença normalizada, baseia-se neste contraste para detectar se o alvo observado contém ou não vegetação, sendo dado por:

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{RED}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{RED}}} \quad (3.1)$$

em que R_{RED} é a refletância na região espectral do vermelho e R_{NIR} é a refletância na região espectral do infravermelho próximo.

O NDVI de uma vegetação densa e sadia tende a valores positivos aproximadamente entre 0,3 e 0,8, dadas as características descritas acima. Solos geralmente apresentam refletância no infravermelho próximo um pouco maior que no vermelho, de modo que apresentam baixos valores de NDVI, mas ainda positivos, em torno de 0,1 a 0,2. A água possui uma baixa refletância em ambas as bandas, resultando em valores próximos a zero. Nuvens e neve possuem valores negativos.

3.2.2. Conversões e Cálculos.

É importante notar que a grandeza extraída das imagens de satélite é constituída de números digitais (ND), que são valores adimensionais entre 0 e 255 correspondentes a uma escala de cinza dentro de cada banda do satélite. Para o cálculo do NDVI é necessário converter estes dados para valores de refletância, num processo de calibração do sensor.

PONZONI et al. (2005) realizaram este procedimento para o sensor CCD das imagens utilizadas neste trabalho. Eles determinaram coeficientes de calibração (CC) e estabeleceram uma relação entre radiância e números digitais, da seguinte maneira:

$$L_{\lambda} = \frac{ND_n}{CC_n} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}) \quad (3.2)$$

em que L_{λ} é a radiância espectral, ND_n é o número digital extraído da imagem na banda n e CC_n é o coeficiente de calibração para a banda n . Estes coeficientes CC_n determinam, de maneira geral, quantos NDs são necessários para representar uma unidade de L_{λ} . Para as bandas 3 e 4, utilizadas neste trabalho, PONZONI et al. (2005) encontraram os valores de coeficientes de 1,154 e 2,127 $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ respectivamente.

Uma vez obtida a radiância espectral (L_λ), pode-se determinar a refletância no comprimento de onda λ :

$$R_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot d^2}{\mu_0 \cdot F_{0\lambda}} \quad (3.3)$$

em que d é a distância Terra-Sol (em unidades astronômicas), $F_{0\lambda}$ é a irradiância solar espectral incidente no topo da atmosfera e μ_0 é o cosseno do ângulo zenital solar. Os valores de $F_{0\lambda}$ das imagens utilizadas nas bandas 3 e 4 são tabelados em PONZONI et al. (2005), sendo respectivamente 1548,97 e 1096,21 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$.

Substituindo a expressão de refletância (Equação 3.3) na definição de NDVI (Equação 3.1), obtém-se uma expressão simplificada:

$$\begin{aligned} NDVI &= \frac{\left(\frac{\pi \cdot L_{NIR} \cdot d^2}{\mu_0 \cdot F_{0NIR}}\right) - \left(\frac{\pi \cdot L_{RED} \cdot d^2}{\mu_0 \cdot F_{0RED}}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot L_{NIR} \cdot d^2}{\mu_0 \cdot F_{0NIR}}\right) + \left(\frac{\pi \cdot L_{RED} \cdot d^2}{\mu_0 \cdot F_{0RED}}\right)} = \frac{\left(\frac{\pi \cdot d^2}{\mu_0}\right) \left(\frac{L_{NIR}}{F_{0NIR}} - \frac{L_{RED}}{F_{0RED}}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot d^2}{\mu_0}\right) \left(\frac{L_{NIR}}{F_{0NIR}} + \frac{L_{RED}}{F_{0RED}}\right)} \\ \Rightarrow NDVI &= \frac{\left(\frac{L_{NIR}}{F_{0NIR}} - \frac{L_{RED}}{F_{0RED}}\right)}{\left(\frac{L_{NIR}}{F_{0NIR}} + \frac{L_{RED}}{F_{0RED}}\right)} \quad (3.4) \end{aligned}$$

Utilizando esta última expressão (Equação 3.4) foi calculado o NDVI, a partir dos dados extraídos das imagens nas bandas 3 e 4. A Tabela 3.1 apresenta um resumo com a definição espectral de cada banda e das grandezas utilizadas no cálculo do NDVI, extraídas de PONZONI et al. (2005).

Tabela 3.1 – Coeficiente de calibração (CC) e irradiância solar incidente no topo da atmosfera (F_0) para as bandas 3 e 4. (Fonte: PONZONI et al., 2005).

	Faixa espectral (μm)	CC ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)	F_0 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$)
Banda 3	0,63 - 0,69 (vermelho)	1,154	1548,97
Banda 4	0,77 a 0,89 (infra-vermelho próximo)	2,127	1096,21

3.2.3. Resultado do processo de cálculo do NDVI e fração vegetada.

O resultado do cálculo do NDVI sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e arredores é apresentado na Figura 3.7. A mancha urbana é claramente identificada por tons mais escuros na figura, caracterizada por baixos valores de NDVI, abaixo de 0,2. Nas serras do Mar e da Mantiqueira, a sudeste e nordeste da mancha urbana respectivamente, observa-se a vegetação mais vigorosa em tons de amarelo claro, com valores próximos a 0,7. Os corpos d'água também ficam bem delimitados, com valor zero, em azul escuro. As tonalidades intermediárias identificam regiões suburbanas e com vegetação pouco vigorosa.

Enfocando a região mais urbanizada é possível observar em detalhes a presença de heterogeneidades, dada a alta resolução das imagens (20 m). Podem-se identificar grandes áreas vegetadas, como o Parque do Estado, na região sul da cidade de São Paulo, o Ibirapuera, mais ao centro, e o Campo de Marte, mais ao norte, bem como o Parque Ecológico do Tietê, a nordeste, entre outros. Assim verifica-se que, apesar de não considerar o efeito da atmosfera, este índice apresenta resultados satisfatórios para um dos objetivos estabelecidos neste trabalho, que foi o de identificar áreas vegetadas dentro do ambiente urbano.

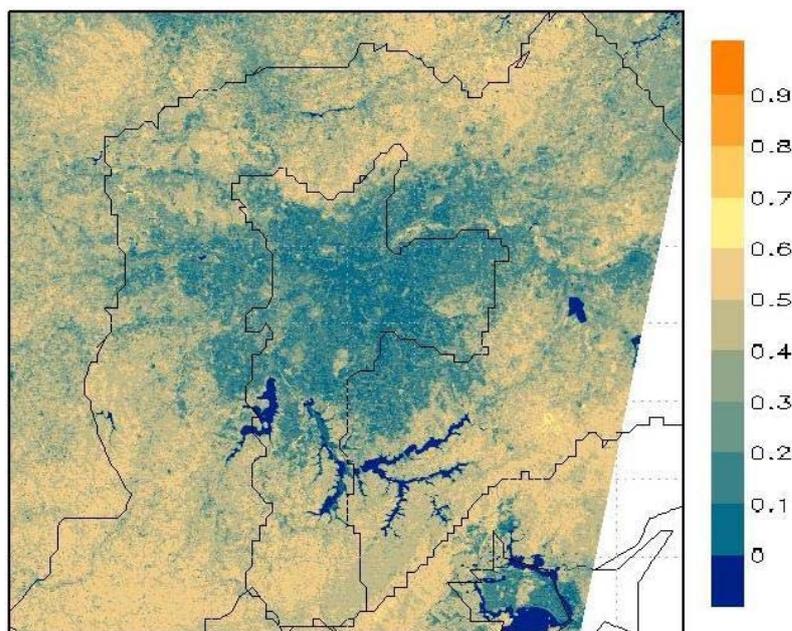


Figura 3.7 – NDVI na RMSP e arredores (resolução 20 m).

Com isso foi determinada a fração ocupada por vegetação na grade utilizada no modelo numérico, com 1 km de resolução, a partir do campo de NDVI, com resolução de 20 m. Dadas as características espectrais descritas anteriormente, foi estabelecido um limiar para o NDVI de 0,3, acima do qual foi considerada a presença de vegetação. Desta forma, a estimativa da porcentagem de vegetação foi feita pela contagem de pixels com NDVI maior que 0,3 em áreas de 1 km x 1 km. O resultado é apresentado na Figura 3.8.

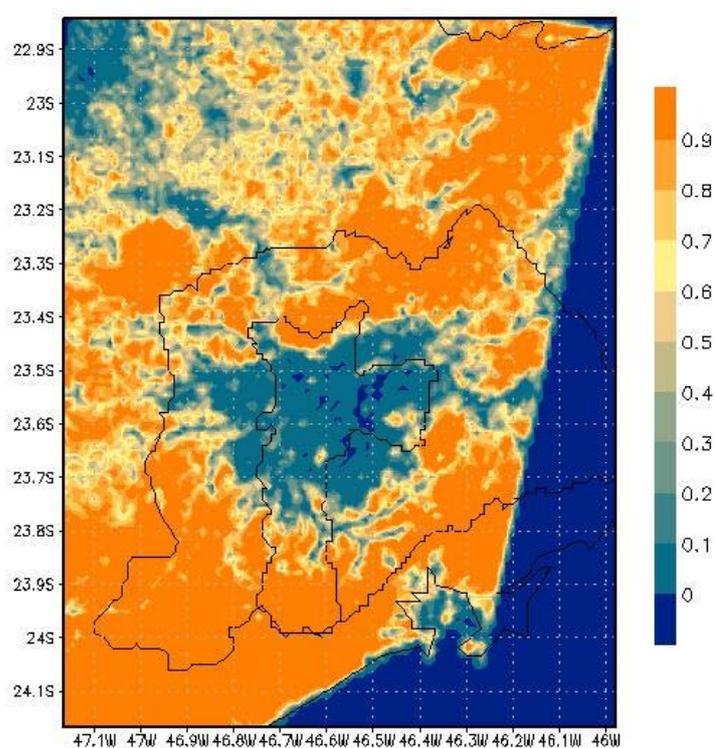


Figura 3.8 – Fração ocupada por vegetação em grade de 1km (a partir do NDVI com resolução de 20 m).

3.3. Estudo qualitativo com dados de superfície

Foi realizado também um estudo de caráter qualitativo, a fim de associar as condições de conforto térmico humano em diferentes áreas da RMS, determinadas a partir de dados medidos em superfície, com o grau de urbanização de cada área, estimado através de imagens de satélite em alta resolução. Este estudo possui grande importância à medida que evidencia, a partir de dados observados, a relação que se quer representar nas simulações numéricas.

Nesta análise foram utilizados dados horários de temperatura e umidade relativa do ar, medidos em estações da CETESB localizadas em regiões da RMSP com características distintas, no período de 1996 a 2006. A partir destes dados foi calculado um índice de conforto térmico humano para estimar a sensação de conforto/desconforto sentida pela população. O índice utilizado foi a Temperatura Efetiva (TE), proposto por MISSENARD (1937; citado em SUPING et al.,1992):

$$TE = T - 0,4(T - 10) \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \quad (3.5)$$

em que T é a temperatura do ar em °C e UR a umidade relativa em %.

HENTSCHEL (1986; citado em SUPING et al.,1992) aponta a temperatura efetiva como o indicador mais adequado para ambientes externos (*outdoor*) em condições de calor, e estabelece que valores de TE entre 12 °C e 24 °C estão associados a sensação confortável para pessoas exercendo atividades de recreação, turismo e da vida cotidiana. Um resumo da classificação estabelecida por HENTSCHEL (1986; citado em SUPING et al.,1992) é apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Classificação das condições de conforto térmico humano pela temperatura efetiva. Fonte: HENTSCHEL (1986; citado em SUPING et al.,1992).

TE (°C)	Sensação térmica humana
> 30	Calor extremo
24 a 30	Calor moderado
18 a 24	Agradável – levemente quente
12 a 18	Agradável – levemente fresco
0 a 12	Fresco
-12 a 0	Frio
< -12	Frio extremo

Os resultados deste índice foram então confrontados com imagens de satélite (extraídas de www.google.com/maps) em alta resolução (aproximadamente 50 m) nas vizinhanças de

cada estação. Através das imagens, apresentadas na Figura 3.9, foi avaliado qualitativamente o grau de urbanização de cada área, principalmente pelo adensamento de construções e presença de vegetação.

Inicialmente são apresentadas séries do índice temperatura efetiva calculado no horário de máxima temperatura do dia (Figura 3.10). Em seguida, foi calculada a porcentagem de ocorrência de cada faixa de conforto do índice em cada estação (Figura 3.11). Assim, foi estabelecida uma relação entre as características das diferentes superfícies e as condições de conforto térmico humano, ressaltando-se o enfoque qualitativo deste estudo.

3.3.1. Resultados

A estação Ibirapuera (Figura 3.9 a) localiza-se num grande parque da cidade, sendo uma área densamente vegetada ao redor de um lago, contrastante com o ambiente urbano na qual está imersa. A estação, no entanto, encontra-se no interior do parque, sofrendo menor influência da urbanização. Esta estação apresenta valores sistematicamente mais baixos da temperatura efetiva (Figura 3.10 a) e nela ocorre a maior incidência de condições de frescor, tanto agradáveis (39,4%) quanto levemente desconfortáveis (4,0%) (Figura 3.11).

(a) Ibirapuera



(b) São Miguel Paulista



(c) Parque D. Pedro II

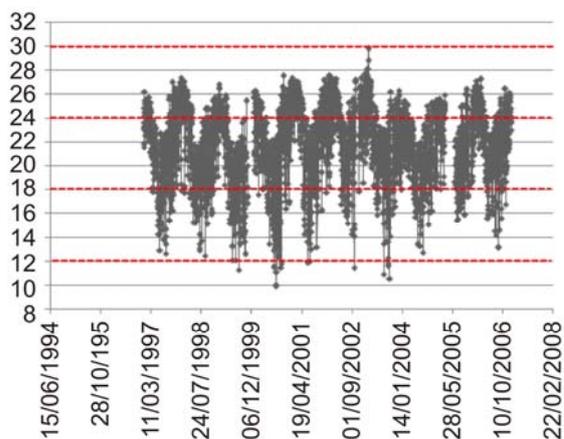


(d) São Caetano do Sul

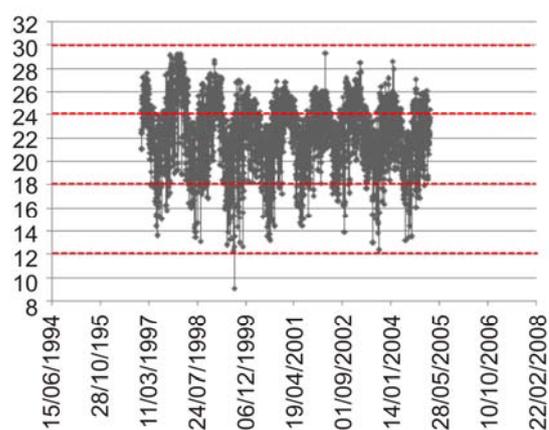


Figura 3.9 – Imagens de satélite das estações da CETESB (a) Ibirapuera, (b) São Miguel Paulista, (c) Parque D. Pedro II e (d) São Caetano do Sul. (Fonte: www.google.com/maps)

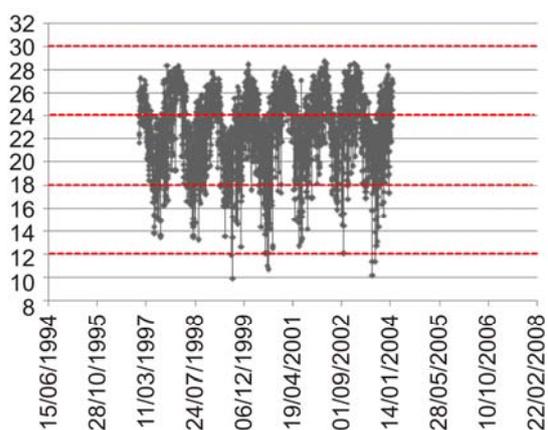
(a) Ibirapuera



(b) São Miguel Paulista



(c) Parque D. Pedro II



(d) São Caetano do Sul

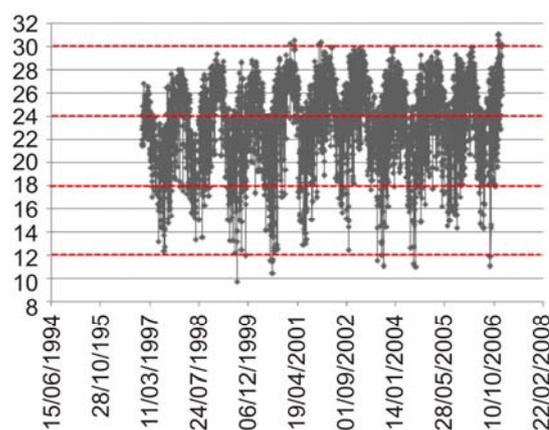


Figura 3.10 – Série da Temperatura Efetiva calculada com a máxima temperatura diária no período de 1996 a 2006 para as estações da CETESB (a) Ibirapuera, (b) São Miguel Paulista, (c) Parque D. Pedro II e (d) São Caetano do Sul. Em vermelho os intervalos de conforto apresentados na Tabela 3.2.

A estação São Miguel Paulista (Figura 3.9 b) encontra-se numa região residencial, também arborizada, com construções baixas e pouco adensadas, a maioria de telhados de barro, podendo ser considerada com um baixo nível de urbanização. Entre as áreas urbanizadas esta estação apresentou a maior frequência de condições de conforto ($12 < TE < 24$), tendo 34,1% de condições agradáveis a levemente frescas e 57,2% de condições agradáveis a levemente quentes (Figura 3.11). Também, esta estação apresentou a menor amplitude anual do índice, ou seja, menor diferença entre valores máximos (atingidos no verão) e mínimos (no inverno) (Figura 3.10 b).

A estação Parque D. Pedro II (Figura 3.9 c) já apresenta uma urbanização mais intensa, com edificações de grande porte em concreto e ruas mais largas e movimentadas, em contato com algumas áreas descampadas ou ocupadas por ambulantes (com coberturas de lona) e muito pouca vegetação. Nesta estação já foi registrada incidência significativa de níveis de desconforto pelo calor (11,2%), bem como uma diminuição gradual nas condições de conforto em relação a São Miguel Paulista e até um leve aumento no desconforto pelo frescor (Figura 3.11).

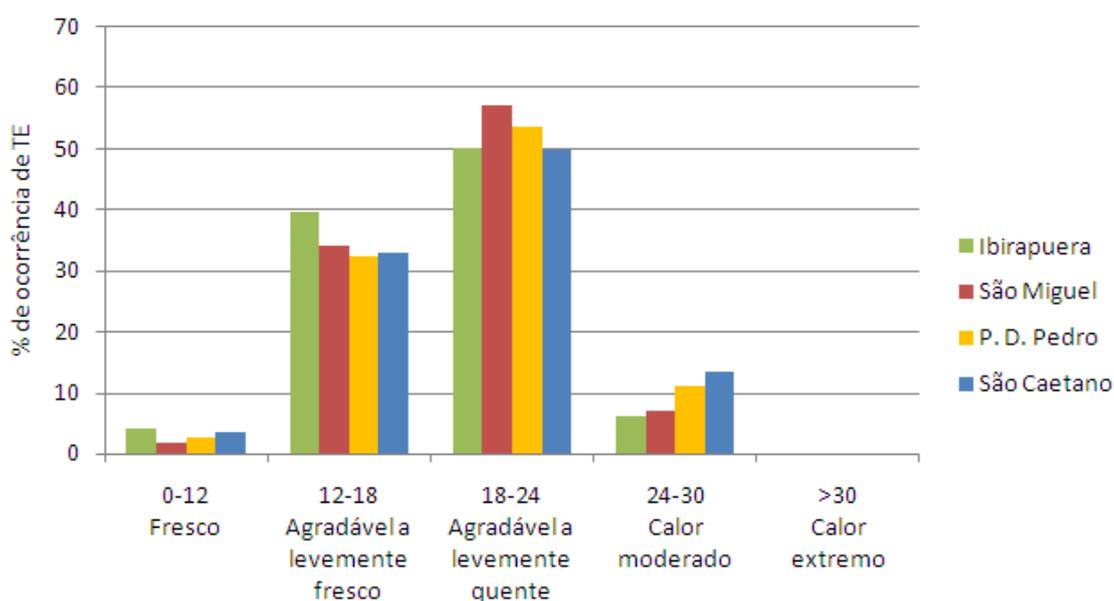


Figura 3.11 – Porcentagem de ocorrência de cada faixa do índice de temperatura efetiva em cada estação.

A estação São Caetano do Sul (Figura 3.9 d) tem como característica marcante um elevado grau de urbanização, com um grande adensamento de construções, ainda que baixas, sendo uma grande porção em concreto e nenhuma vegetação. O asfalto e concreto em grande quantidade dão um aspecto acinzentado à imagem, apesar da presença de alguns telhados de barro. Esta estação se sobressaiu em relação às demais por apresentar destacadamente maiores valores do índice e também grande amplitude anual (Figura 3.10 d), de modo que registrou a maior ocorrência de desconforto devido ao calor (13,5%) e também incidência significativa de desconforto pelo frescor (3,6%) (Figura 3.11). A estação de São Caetano do Sul foi a única a

registrar valores de TE acima de 30 °C, indicando condições de calor extremo causando grande desconforto, no período analisado foram registradas 24 ocorrências horárias desta condição.

Num estudo com caráter mais quantitativo, DUARTE & SERRA (2003) estabeleceram uma relação mais direta entre a ocupação do solo e a temperatura na região central do Brasil, de acordo com a Figura 3.12. Neste estudo a taxa de ocupação e o coeficiente de aproveitamento do solo, bem como a porcentagem de áreas arborizadas e de corpos d'água, são apontados como fatores relevantes na quantificação da relação entre as propriedades da superfície e a caracterização de microclimas urbanos.

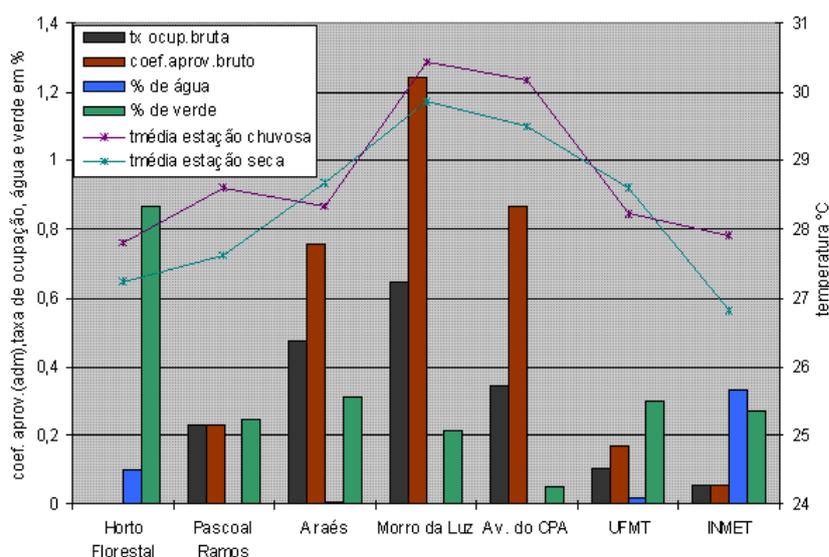


Figura 3.12 – Taxa de ocupação, coeficiente de aproveitamento, porcentagem de superfícies d'água e de arborização brutos versus média das temperaturas registradas às 8h, 14h e 20h na cidade de Cuiabá-MT (Adaptada de DUARTE & SERRA, 2003)

3.3.2. Conclusão

Os resultados evidenciam, ainda que de forma qualitativa, que de fato existe uma relação entre as propriedades da superfície, associadas à urbanização e à presença de vegetação, e as condições de conforto térmico humano, que dependem das condições meteorológicas locais, conforme constatado quantitativamente por DUARTE & SERRA (2003). As regiões com um maior grau de urbanização (São Caetano do Sul e Parque D. Pedro II), caracterizadas por uma alta densidade de construções, muito concreto e pouca vegetação, apresentaram maior

tendência a condições de desconforto principalmente devido ao calor. Estas regiões, porém, por apresentarem grandes oscilações do índice, também registraram condições de desconforto associadas ao frio. A maior incidência da condição de conforto foi registrada na área com menor intensidade da urbanização, por assim dizer, com construções mais esparsas e presença de vegetação (São Miguel Paulista). As características dentro de um parque densamente vegetado (Ibirapuera) apresentaram uma tendência a baixos valores de temperatura efetiva e também certa oscilação do índice.

4. Estudo numérico

4.1. Metodologia e configuração das simulações numéricas

A partir do estudo descrito na seção 3.3, foi selecionado como data para realização das simulações numéricas o dia 15 de dezembro de 2003. Esta data foi selecionada por ter registrado um alto índice de desconforto térmico, sendo uma das poucas ocasiões em que o índice de temperatura efetiva atingiu valor superior a 30 °C (condição de desconforto extremo pelo calor) na estação São Caetano do Sul (estação na área mais densamente urbanizada) e valores próximos a este também nas demais estações (Figura 3.10). Foi escolhida para simulação uma data associada a condições extremas de desconforto com o intuito de melhor avaliar o impacto de alterações nas características da superfície sobre estas condições.

Foram propostas então quatro diferentes condições de superfície a serem simuladas nesta data, com diferentes proporções entre área urbanizada e vegetada, a fim de verificar a influência da presença de vegetação, conforme os objetivos deste trabalho.

Usualmente é utilizado como condição de superfície, tanto para fins acadêmicos quanto operacionalmente em centros de previsão, o mapa de ocupação do solo fornecido pelo programa IGBP (*International Geosphere Biosphere Programme*) do USGS (*United States Geological Survey*), com resolução de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km na região equatorial), o qual possui uma classificação com 17 tipos de superfícies, como diferentes tipos de vegetação, plantações, corpos d'água, entre outros. A partir deste mapa o modelo numérico faz uma conversão para a sua própria codificação de tipos de ocupação do solo. Neste trabalho, porém, foi utilizado como base um refinamento deste mapa sobre a área ocupada pela Região Metropolitana de São Paulo e arredores, elaborado por FREITAS (2003), onde são incluídos dois tipos de superfície urbana, denominados de tipos urbano 1 e 2. Os parâmetros característicos destes tipos urbanos são apresentados na Tabela 4.1 e durante as simulações foram mantidos conforme ajuste realizado previamente no laboratório MASTER.

O tipo chamado urbano 1 é representativo de grandes centros, com construções altas e avenidas largas, enquanto o tipo urbano 2 representa áreas mais residenciais, com construções baixas e ruas estreitas. Note-se, porém, que nesta classificação não há nenhum tipo de vegetação no interior das áreas identificadas como urbanas.

Tabela 4.1 – Parâmetros característicos dos tipos urbanos.

	Urbano 1	Urbano 2
Comprimento de rugosidade (Z_0)	3,0	0,5
Fração ocupada por prédios	0,5	0,7
Altura das construções	50,0	5,0
Relação entre altura e largura das construções (H/L)	4,4	2,4

Inicialmente foi realizada uma simulação chamada de controle, na qual foi utilizada a condição de superfície estabelecida por FREITAS (2003) na sua forma original, ou seja, onde a Região Metropolitana foi coberta somente por superfície urbana. Esta condição de cobertura da superfície é mostrada na (Figura 4.1).

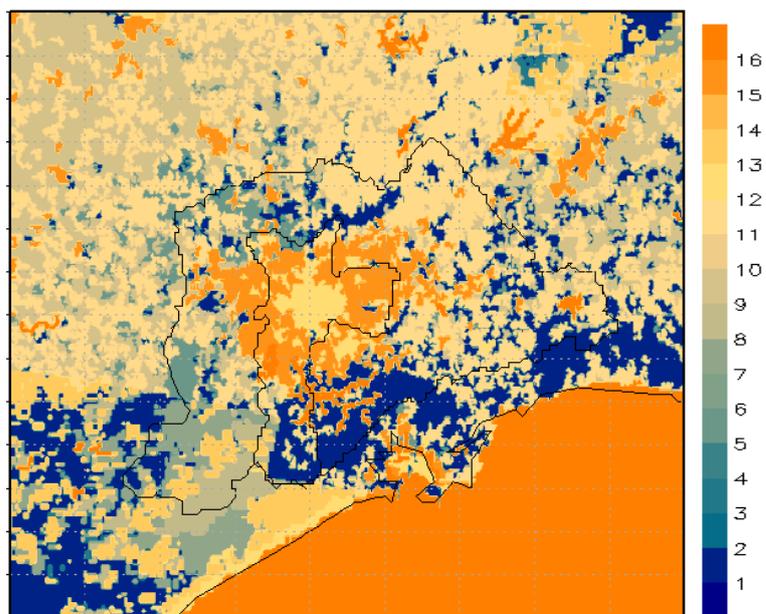


Figura 4.1 – Cobertura da superfície para a simulação de controle (somente urbano). Codificação dos tipos de superfície na Tabela 4.2. Os códigos 13 e 16 referem-se aos tipos urbano 1 e urbano 2, respectivamente, segundo codificação do USGS adaptada por FREITAS (2003).

Tabela 4.2 – Codificação dos tipos de superfície, baseado na base de dados do USGS adaptada por FREITAS (2003).

Código	Tipo de superfície
1	Floresta sempre verde de folhas agulhadas
2	Floresta sempre verde de folhas largas
3	Floresta decídua de folhas agulhadas
4	Floresta decídua de folhas largas
5	Floresta mista
6	Arbustos fechados
7	Arbustos
8	Savana silvestre
9	Savana
10	Gramado
11	Pântano
12	Plantação
13	Urbano 1
14	Mosaico de vegetação natural/plantação
15	Neve e gelo
16	Urbano 2
17	Corpos d'água

Na seqüência foram propostos três cenários hipotéticos, nos quais a condição de superfície foi alterada pela inserção de vegetação em diferentes proporções dentro da área urbanizada. A princípio, 25% da área urbanizada foram substituídos por vegetação, o que foi chamado de cenário A. Em seguida foi criada uma condição de superfície com a proporção de 50% de área urbana e 50% de vegetação, chamada de cenário B. Finalmente, toda a área urbana foi substituída por vegetação, no chamado cenário C. Estas alterações foram feitas diretamente no arquivo dado como condição de fronteira ao modelo. Para criação do cenário A, por exemplo, a cada 4 pontos consecutivos identificados como superfície urbana, 1 ponto foi substituído por vegetação. Para criar o cenário B esta substituição foi feita a cada 2 pontos, enquanto no cenário C todos os pontos identificados como urbanos foram substituídos por

vegetação. A vegetação inserida foi do tipo arbustos (código 7 da classificação USGS, conforme a Tabela 4.2). A cobertura da superfície em cada um dos cenários é mostrada na Figura 4.2 e uma síntese das modificações realizadas nas simulações é apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Proporção entre áreas urbanas e vegetadas em cada cenário.

	Área urbana	Área vegetada
Controle	100%	-
Cenário A	75%	25%
Cenário B	50%	50%
Cenário C	-	100%

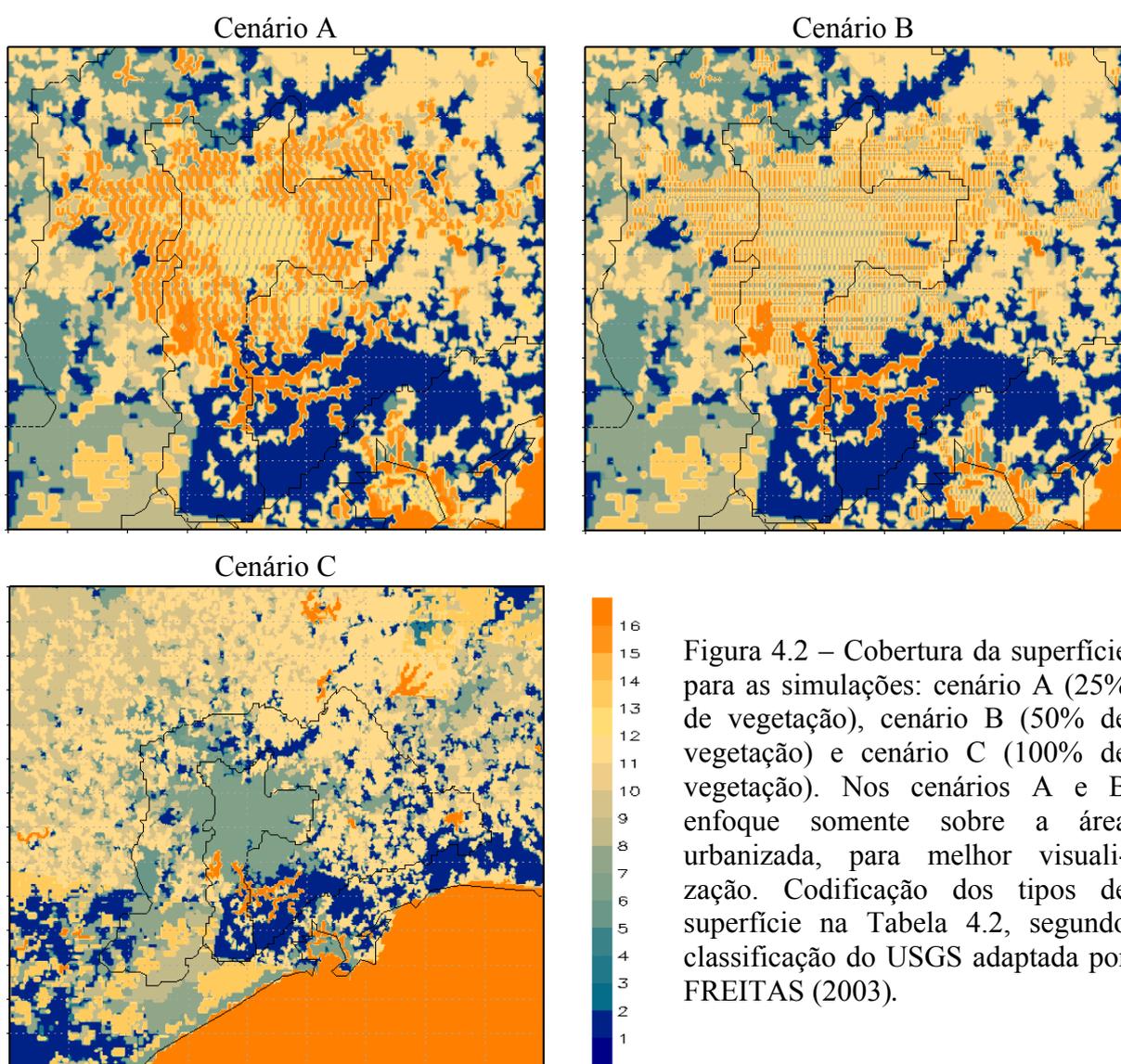


Figura 4.2 – Cobertura da superfície para as simulações: cenário A (25% de vegetação), cenário B (50% de vegetação) e cenário C (100% de vegetação). Nos cenários A e B enfoque somente sobre a área urbanizada, para melhor visualização. Codificação dos tipos de superfície na Tabela 4.2, segundo classificação do USGS adaptada por FREITAS (2003).

Foram realizados, então, dois conjuntos de simulações, utilizando diferentes versões dos modelos RAMS e BRAMS. Este procedimento se fez necessário uma vez que no modelo BRAMS ainda não foi possível a representação fracionada de superfícies. Desta forma, foi utilizada a versão 4.3 do modelo RAMS para investigação do potencial efeito proporcionado pela vegetação, através da utilização das diferentes condições de superfície descritas acima (cenários A, B e C), enquanto com o modelo BRAMS foi realizada somente uma simulação com a condição totalmente urbana (simulação de controle), a fim de comparar seu desempenho com relação ao RAMS 4.3 e inferir o possível benefício da implantação deste recurso no modelo, mais adequado às condições locais.

As simulações foram iniciadas às 00 UTC do dia 15 de dezembro de 2003 e tiveram duração de 36 horas, de modo a analisar tanto a evolução diurna das variáveis de interesse quanto os padrões no período noturno. A inicialização foi feita a partir de dados observacionais interpolados numa grade com 1° de resolução, fornecidos pelas reanálises do NCEP-NCAR (KALNAY et al., 1996). Para evitar instabilidade numérica pela redução abrupta do espaçamento de grade da condição inicial, foram utilizadas 3 grades aninhadas, com resoluções espaciais de 16 km, 4 km e 1 km. Na vertical foram utilizados 33 níveis, com espaçamento inicial de 30 m e aumentando a uma taxa de 1,2 a cada nível até atingir 1 km de altitude, acima do qual o espaçamento foi mantido constante e igual a 1 km. Esta configuração de níveis verticais, denominada grade telescópica, foi utilizada para um maior detalhamento dos processos na camada limite planetária.

Na simulação com o BRAMS foi utilizado o modelo de umidade do solo heterogênea (GEVAERD & FREITAS, 2006), baseado em observações de satélite. No modelo RAMS, dada a ausência deste recurso, a umidade do solo foi inicializada de forma homogênea, sendo traçado um perfil médio com base nestes mesmos dados observados. O campo de inicialização heterogênea da umidade do solo (utilizada para inicialização do BRAMS) no

nível da superfície e o perfil no ponto central do domínio (utilizada para inicialização homogênea no RAMS) são apresentados na Figura 4.3.

Foi utilizada microfísica nível 3 (WALKO et al., 1995), a mais completa disponível, incluindo água de nuvem, chuva e gelo. Para radiação foi utilizada a parametrização de Chen e Cotton (CHEN & COTTON, 1983), que considera material condensado na atmosfera, ainda que sem diferenciar sua forma. Dada a resolução espacial das simulações, 20 km ou maior, não foi ativada a parametrização de convecção, uma vez que este tipo de parametrização deve ser utilizado somente quando a resolução espacial for grossa a ponto do modelo não conseguir desenvolver sua própria circulação convectiva.

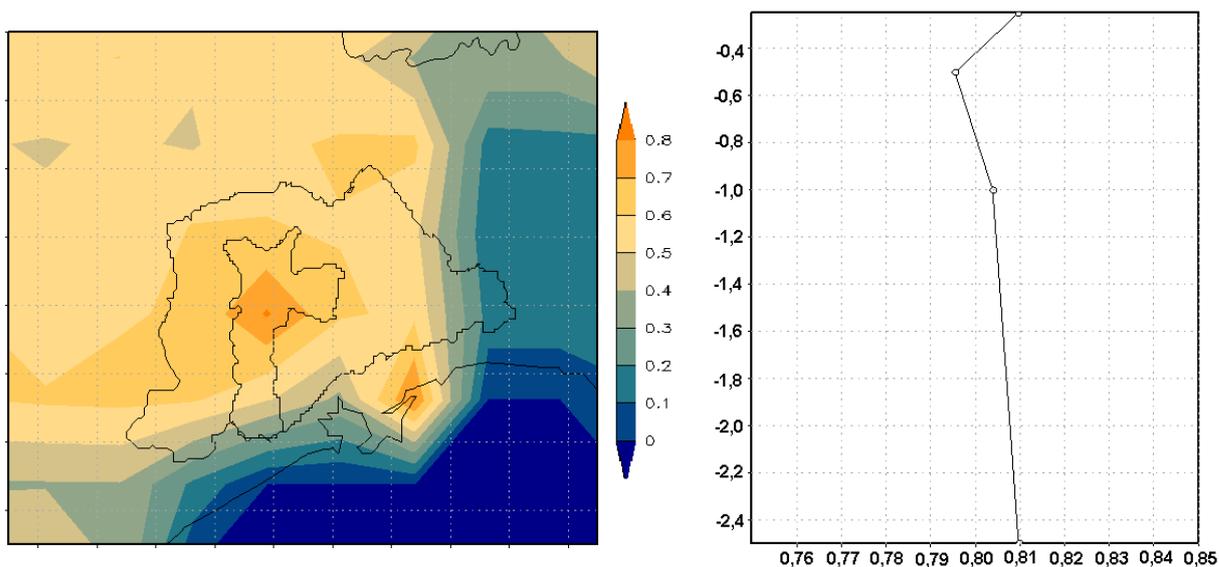


Figura 4.3 – Campo de umidade do solo ao nível da superfície (à esquerda, utilizado para inicialização do BRAMS) e perfil da umidade do solo no ponto central da grade (à direita, para inicialização do RAMS).

As simulações foram analisadas sob dois aspectos: pontualmente e espacialmente. As análises pontuais foram feitas em comparação com os dados medidos em superfície nas estações da CETESB de Ibirapuera, Parque D. Pedro II, São Caetano do Sul e São Miguel Paulista, as mesmas apresentadas no estudo qualitativo descrito na seção 3.3. A localização espacial das estações é apresentada na Figura 4.4, sendo a comparação com as simulações feita no ponto de grade mais próximo a cada estação. É importante notar que as estações

Ibirapuera, Parque D. Pedro II e São Caetano do Sul encontram-se sobre a superfície tipo urbano 1 no modelo, enquanto somente a estação São Miguel Paulista está localizada sobre superfície do tipo urbano 2, lembrando que o tipo urbano 1 é característico de uma urbanização mais intensa e o urbano 2 de áreas mais residenciais. Em seguida foram avaliadas as variações e diferenças espaciais entre os diferentes cenários, inferindo o impacto da vegetação na formação da ilha de calor urbana e analisado o impacto sobre as condições de conforto térmico humano.

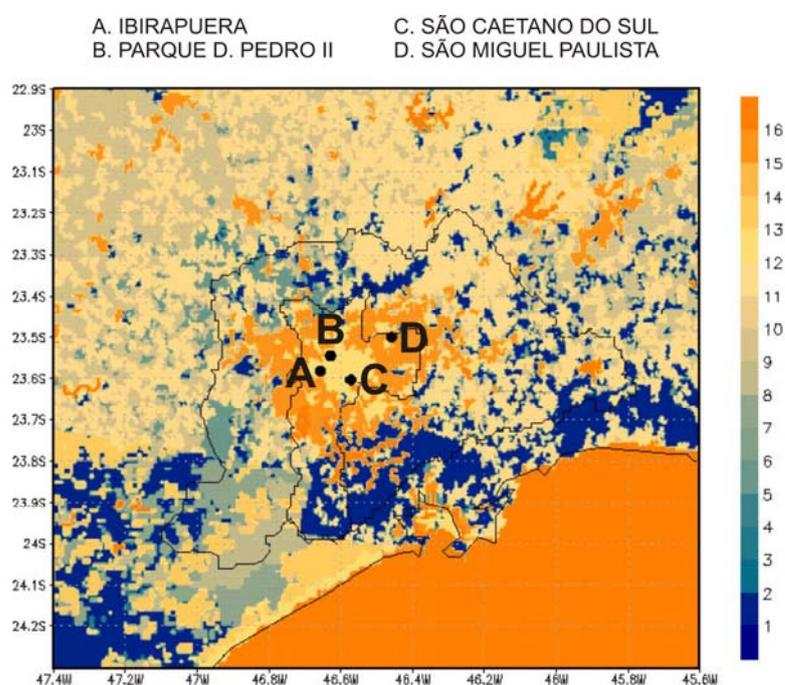


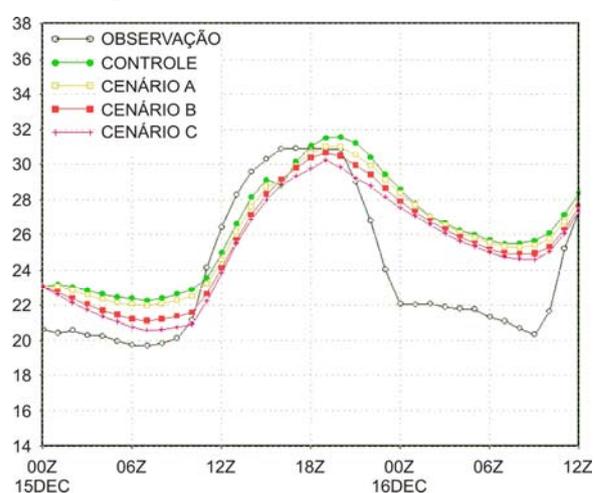
Figura 4.4 – Localização das estações da CETESB assinaladas nos pontos A, B, C e D. Ao fundo a condição de superfície do modelo, segundo a codificação USGS adaptada por FREITAS (2003) dada na Tabela 4.2.

4.2. Simulações utilizando o RAMS 4.3

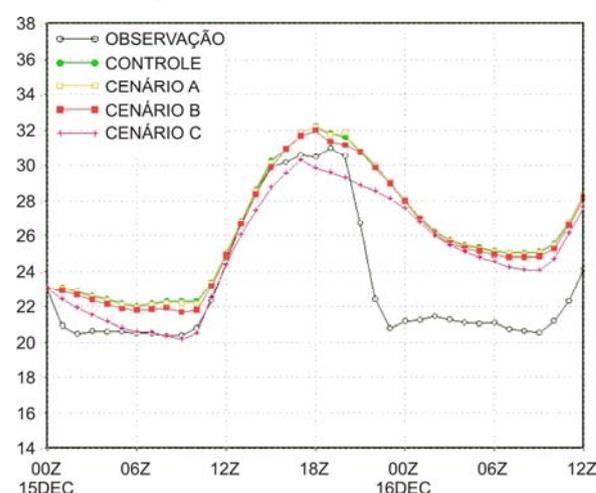
Inicialmente foi feita uma comparação entre os dados de temperatura e umidade relativa medidos nas estações da CETESB e os valores simulados com os diferentes cenários propostos, sendo o cenário controle somente com cobertura de superfície urbana na área da RMSP, o cenário A com inserção de vegetação em 25% da área urbanizada, o cenário B com 50% de vegetação e 50% de superfície urbana e o cenário C com toda a superfície urbana

substituída por vegetação. Note-se que para esta comparação foi selecionado nas simulações o ponto de grade mais próximo à localização de cada estação. Foram utilizados dados de temperatura e umidade extraídos do primeiro nível disponível do modelo, o nível de 14,3 m. Este primeiro nível, representativo da superfície, localiza-se no ponto central do primeiro espaçamento vertical (30 m) descontando-se a profundidade no solo (1,5 m). A comparação da temperatura é mostrada na Figura 4.5 e da umidade relativa na Figura 4.6.

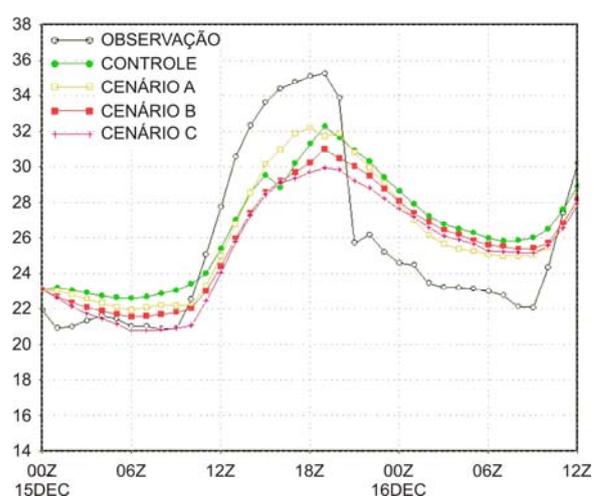
(a) Ibirapuera



(b) São Miguel Paulista



(c) Parque D. Pedro II



(d) São Caetano do Sul

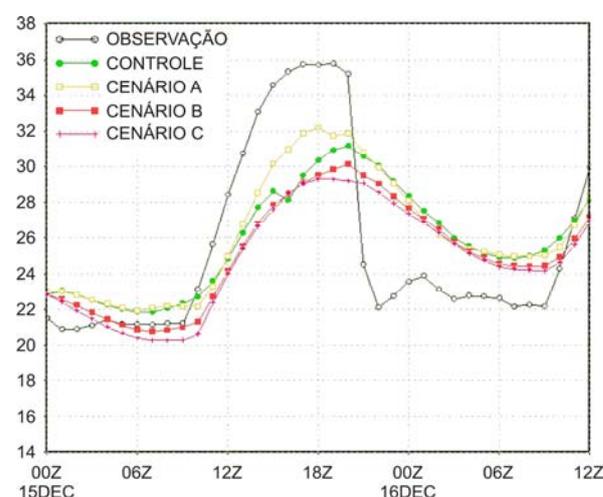
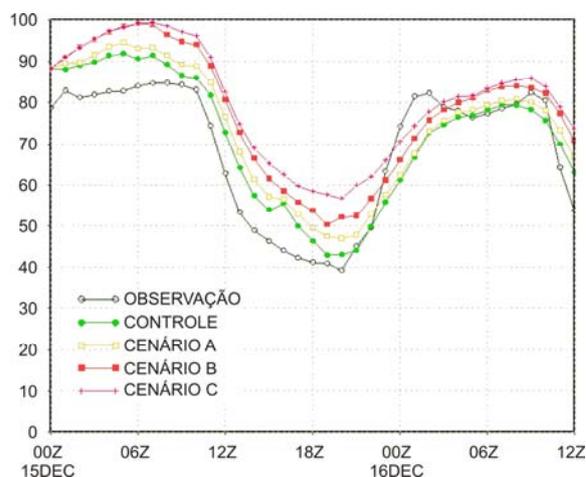
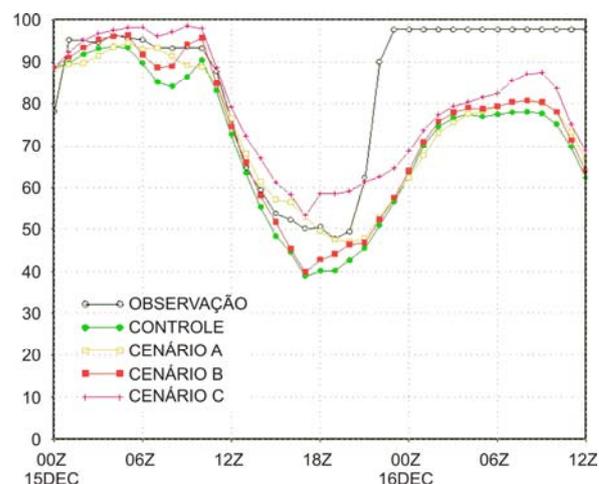


Figura 4.5 – Comparação entre temperatura observada em cada estação e simulada com o RAMS 4.3 no nível de 14,3 m.

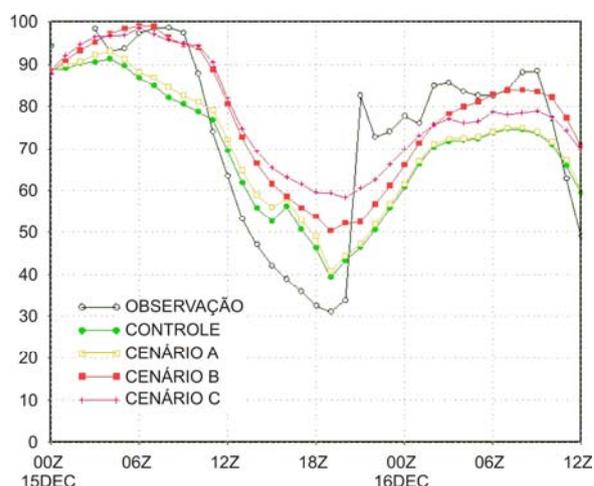
(a) Ibirapuera



(b) São Miguel Paulista



(c) Parque D. Pedro II



(d) São Caetano do Sul

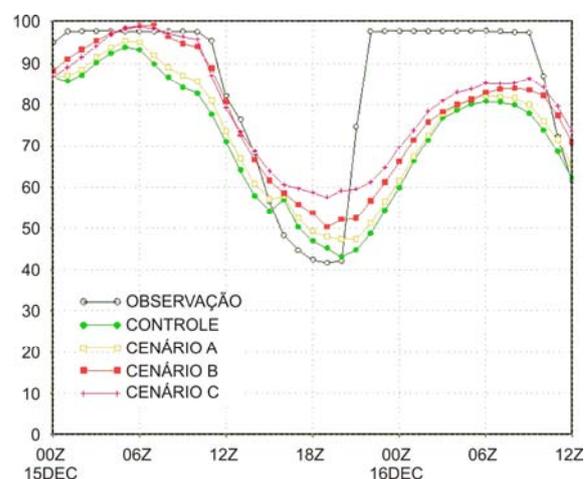


Figura 4.6 – Comparação entre umidade relativa observada em cada estação e simulada com o RAMS 4.3 no nível de 14,3 m.

Na Figura 4.5 observa-se claramente que o modelo simulou adequadamente o padrão diurno da temperatura nas estações Ibirapuera e São Miguel Paulista, duas estações com menor efeito da urbanização, conforme detalhado na seção 3.3, onde as temperaturas foram mais amenas. Nas demais estações a máxima temperatura prevista esteve entre 2 e 3 °C abaixo das observações. Este resultado pode ser atribuído a um déficit na representação dos fluxos urbanos. Note-se pelas Figuras 4.7 e 4.8 que o modelo simulou os fluxos de calor sensível e latente com valores típicos de áreas urbanas, em torno de 200 W.m⁻² para o calor sensível e 50 W.m⁻² para o calor latente no período da tarde. Observa-se, porém, que o mesmo não

representou adequadamente somente as estações com urbanização mais intensa (Parque D. Pedro II e São Caetano do Sul, conforme discutido na seção 3.3). Desta forma pode-se inferir que as considerações de homogeneidades espaciais na representação numérica das superfícies urbanas (conforme descrito na seção 2.5) não permitiram a representação de características particulares destas estações. No caso das estações Parque D. Pedro II e São Caetano do Sul pode ter havido uma subestimativa das fontes de calor antropogênicas locais.

Observa-se também notadamente na Figura 4.5 que após às 20 UTC todas as simulações tornaram-se sistematicamente mais quentes do que a temperatura observada. Isto ocorre devido ao modelo não ter simulado precipitação em nenhum dos cenários. A precipitação que ocorreu sobre a cidade provocou uma queda brusca nas temperaturas observadas, enquanto as simulações apresentaram um desaquecimento mais gradual. Observa-se na Figura 4.11 que o modelo representou certa instabilidade termodinâmica no ambiente no período da tarde, de acordo com os perfis decrescentes de temperatura potencial (θ) em baixos níveis. Na Figura 4.12 também fica evidenciada a disponibilidade de umidade, uma vez que a razão de mistura de vapor esteve aproximadamente entre 14 e 16 g.kg⁻¹ no período da tarde. A ausência de precipitação no modelo é então atribuída à falta de um mecanismo de disparo da convecção, já que não foi atingido o máximo aquecimento observado (de forma que não houve a representação da máxima convergência e movimento ascendente) e que a chegada da frente de brisa foi atrasada devido à condição de grande escala, com ventos de NW em quase todo o domínio simulado. A Figura 4.13 apresenta os campos de vento à superfície e razão de mistura, mostrando este padrão de penetração da frente de brisa.

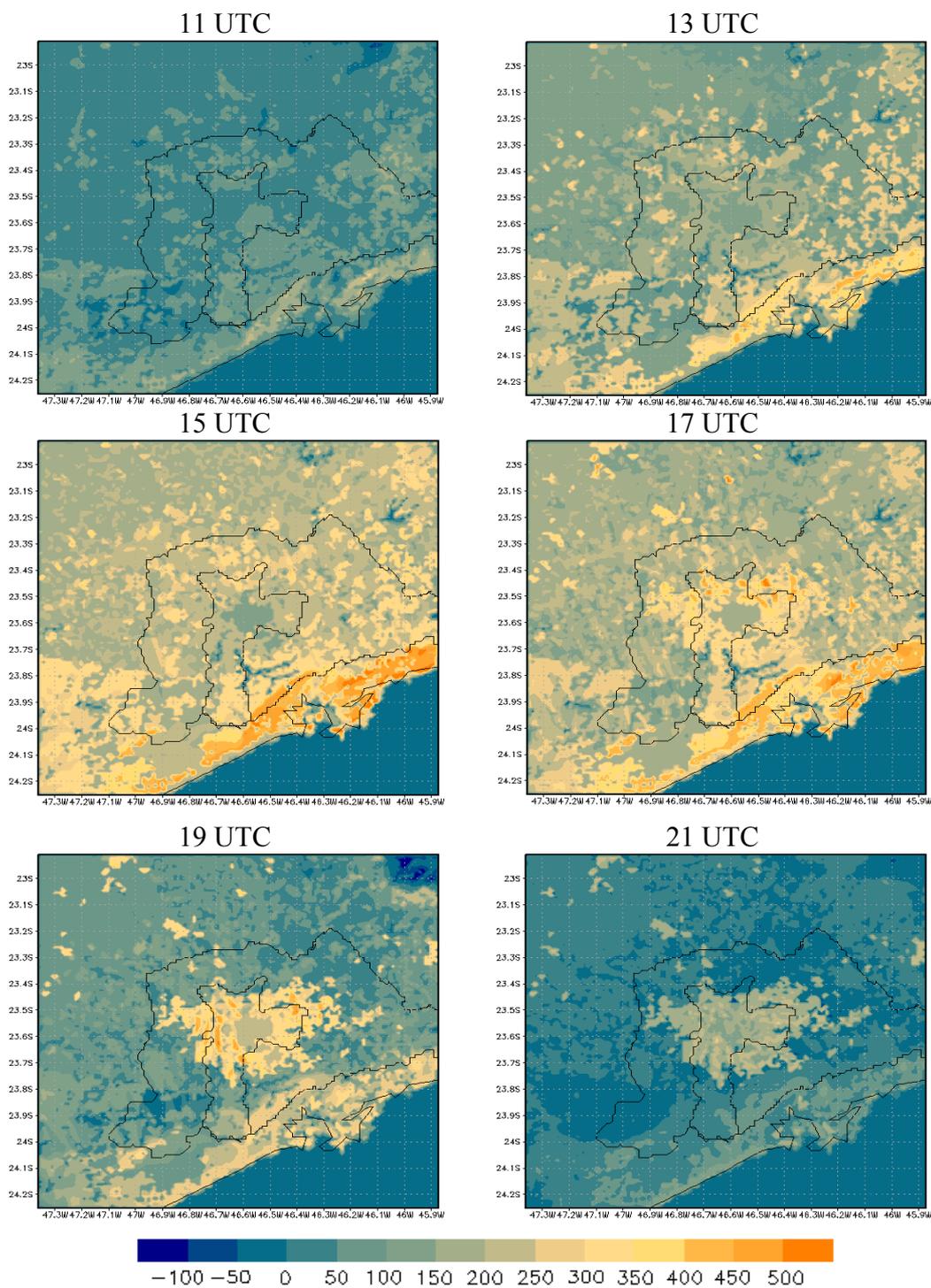
Na estação Ibirapuera (Figura 4.5 a) as simulações com os diferentes cenários apresentaram padrões semelhantes de evolução da temperatura, gradativamente mais frios acompanhando o aumento da proporção de vegetação nos cenários (curvas paralelas de temperatura), com maiores diferenças entre os cenários nas primeiras horas de simulação e

também no final da tarde. Vale lembrar que o cenário A é caracterizado por uma proporção de 75% de superfície urbana e 25% de superfície vegetada, o cenário B por uma proporção de 50% para cada tipo de superfície, o cenário C somente por superfície vegetada e a simulação de controle é o caso inteiramente urbano.

Na estação São Miguel Paulista (Figura 4.5 b) ocorreu um comportamento análogo, porém as diferenças de temperatura (distância entre as curvas de temperatura) foram bem menores entre os cenários de controle, A e B (urbano, 25% vegetado e 50% vegetado, respectivamente), enquanto a simulação no cenário completamente coberto por vegetação (cenário C) foi cerca de 1 °C mais fria.

As estações Parque D. Pedro II e São Caetano do Sul (Figura 4.5 c e d) apresentaram padrões semelhantes entre si, com temperaturas no cenário A mais baixas que o controle durante a madrugada e mais quentes durante a tarde, enquanto os cenários B e C seguiram as características da estação Ibirapuera.

Analisando a umidade relativa (Figura 4.6) foram observados padrões análogos aos de temperatura, com aumento gradativo da umidade conforme o aumento da vegetação na estação Ibirapuera (Figura 4.6 a) e diferença mais marcante somente no cenário C na estação São Miguel Paulista (Figura 4.6 b), sendo ainda as maiores diferenças nas primeiras horas de simulação e no final da tarde. Nas estações Parque D. Pedro II e São Caetano do Sul distinguiram-se dois conjuntos de curvas, com maior umidade nos cenários B e C e menor umidade no cenário A e de controle.

Figura 4.7 – Fluxo de calor sensível ($W \cdot m^{-2}$) na simulação de controle.

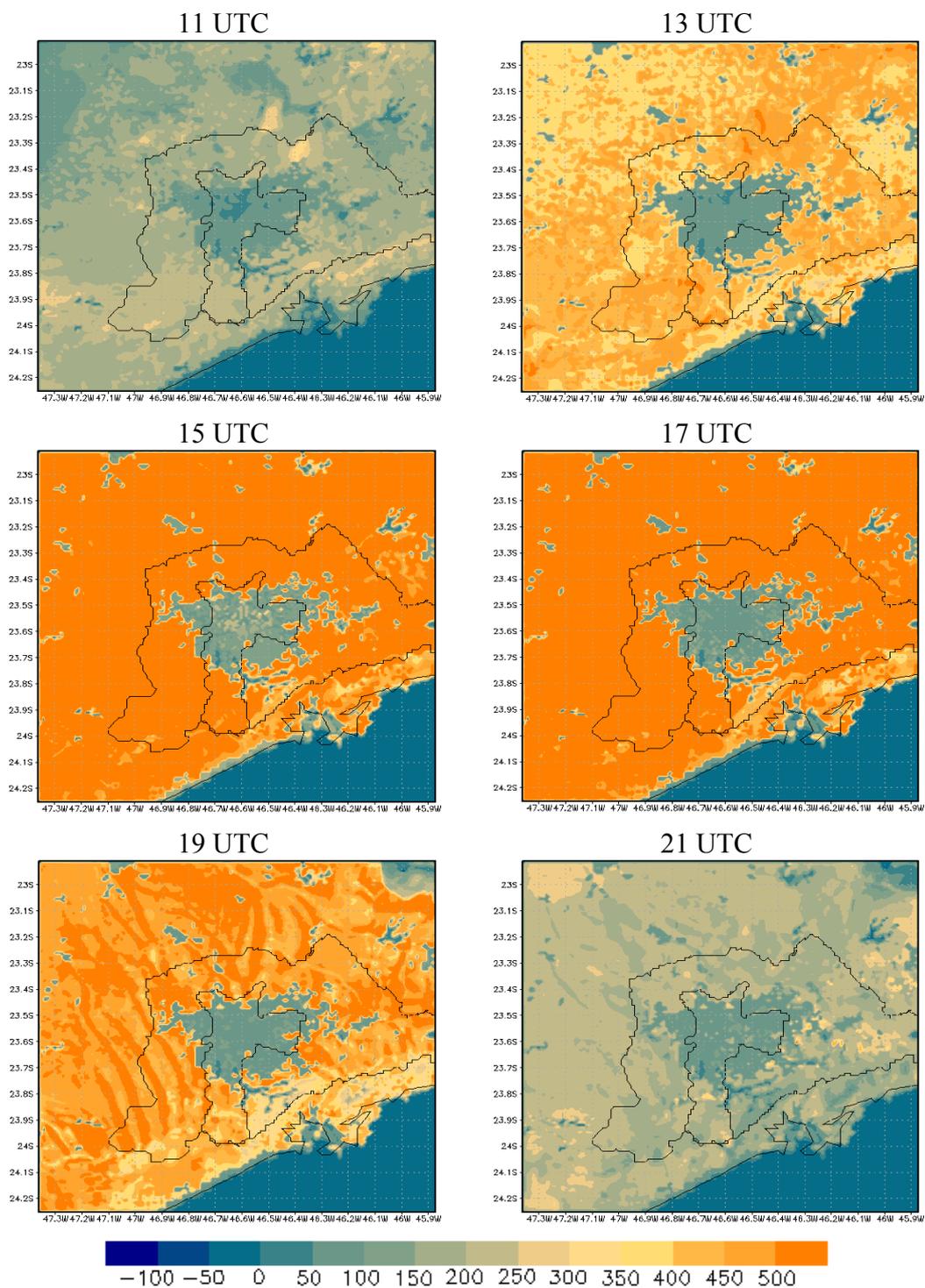


Figura 4.8 – Fluxo de calor latente (W.m^{-2}) na simulação de controle.

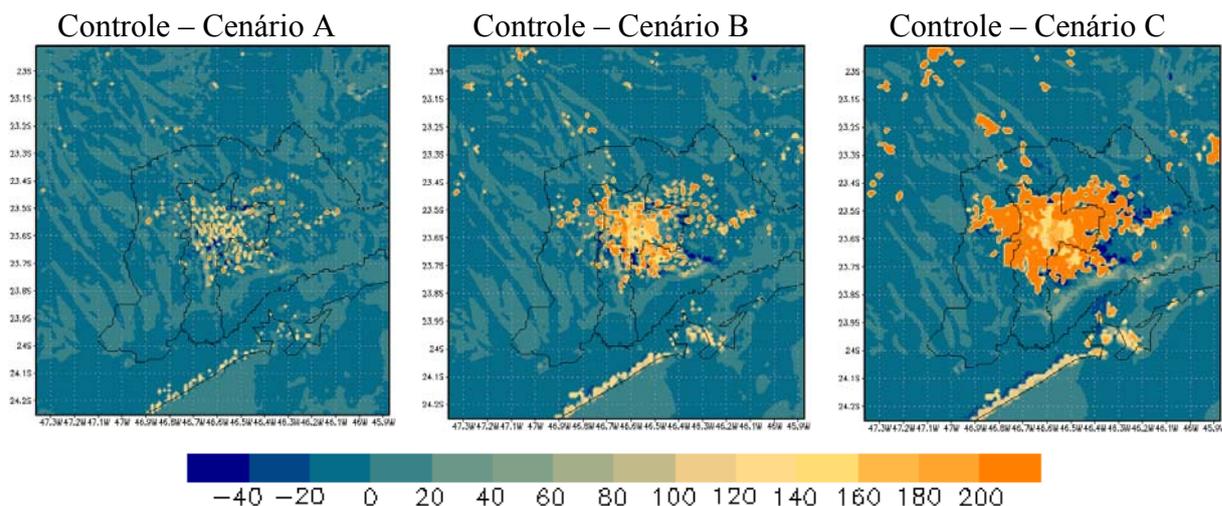


Figura 4.9 – Diferença no fluxo de calor sensível (W.m^{-2}) entre a simulação de controle e o cenário A (à esquerda), cenário B (ao centro) e cenário C (à direita), às 19 UTC.

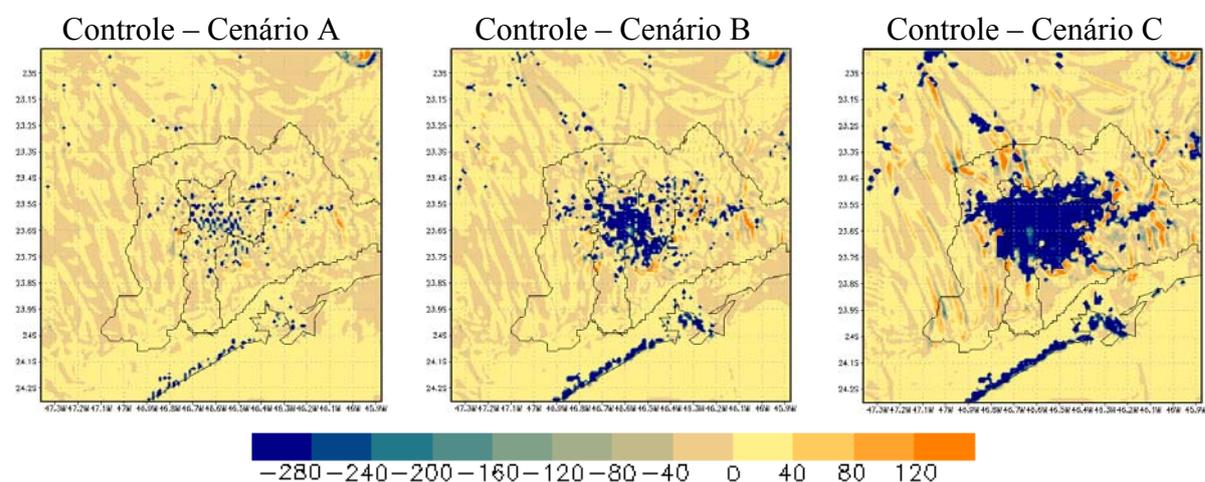


Figura 4.10 – Diferença no fluxo de calor latente (W.m^{-2}) entre a simulação de controle e o cenário A (à esquerda), cenário B (ao centro) e cenário C (à direita), às 17 UTC.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 é possível quantificar o impacto da vegetação sobre os fluxos de calor latente e sensível. Conforme discutido na seção 1.4, a vegetação modifica a partição de energia ao realizar o processo de evapotranspiração, aumentando o fluxo de calor latente a diminuindo o de calor sensível. Na Figura 4.9, que mostra a diferença entre os fluxos de calor sensível da simulação com condição de superfície inteiramente urbana e os diferentes cenários (A com 25% de vegetação, B com 50% de vegetação e C com 100% de vegetação), observa-se uma diminuição no fluxo superior a 200 W.m^{-2} devido à inserção de vegetação. Na Figura 4.10, que mostra esta diferença para o fluxo de calor latente, fica evidenciado um aumento

superior a 280 W.m^{-2} . É importante notar que este impacto se mostra bastante localizado. Lembrando que a inserção de vegetação foi feita em pontos espalhados no domínio da superfície (a cada 4 pontos no cenário A e a cada 2 no cenário B), observa-se que as diferenças nos fluxos localizam-se marcadamente sobre os pontos vegetados. Esta análise fica clara ao se comparar as Figuras 4.9 e 4.10 (que mostram as diferenças nos fluxos) à Figura 4.2 (que mostra as alterações feitas na condição de superfície).

A Figura 4.11 apresenta uma comparação dos perfis de temperatura potencial em diferentes horários, mostrando o impacto da presença de vegetação também sobre a instabilidade atmosférica. Observa-se claramente que a condição inteiramente vegetada está associada à maior estabilidade. Entre 15 e 21 UTC os perfis passam de instáveis a pouco instáveis, no caso com maior quantidade de vegetação o perfil chega a tornar-se neutro. No horário das 12 UTC é possível notar também que a mudança no uso do solo afeta também o desenvolvimento da camada limite planetária, sendo esta mais rasa no cenário mais vegetado.

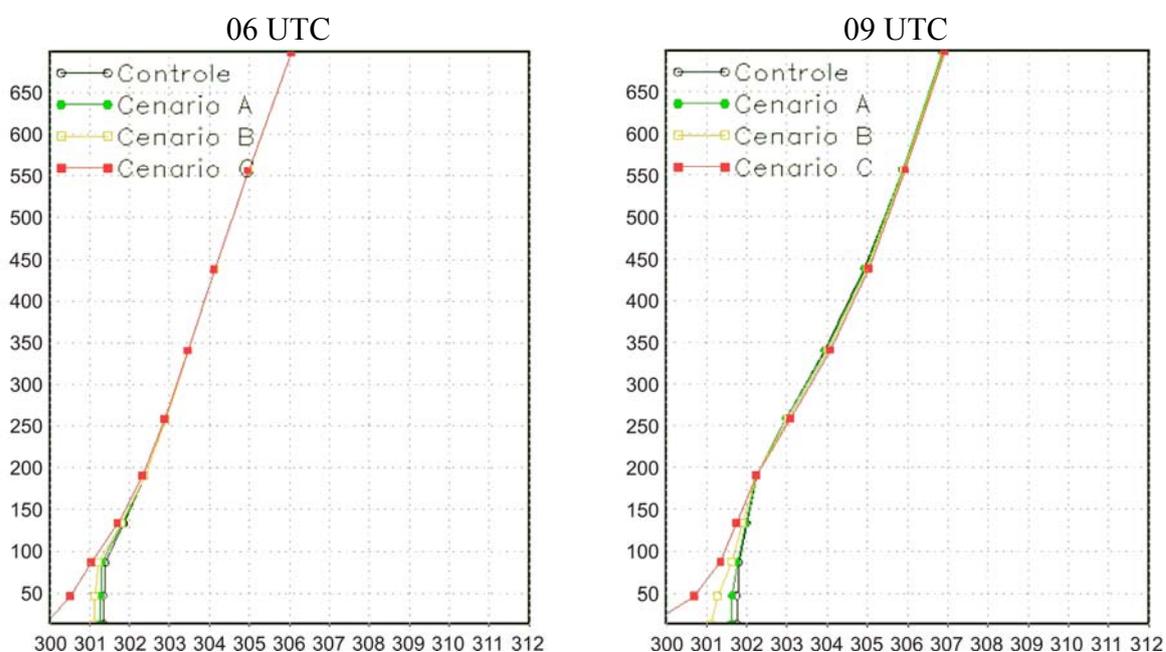


Figura 4.11– Perfis de temperatura potencial (K) no ponto 23,48S; 46,50W.

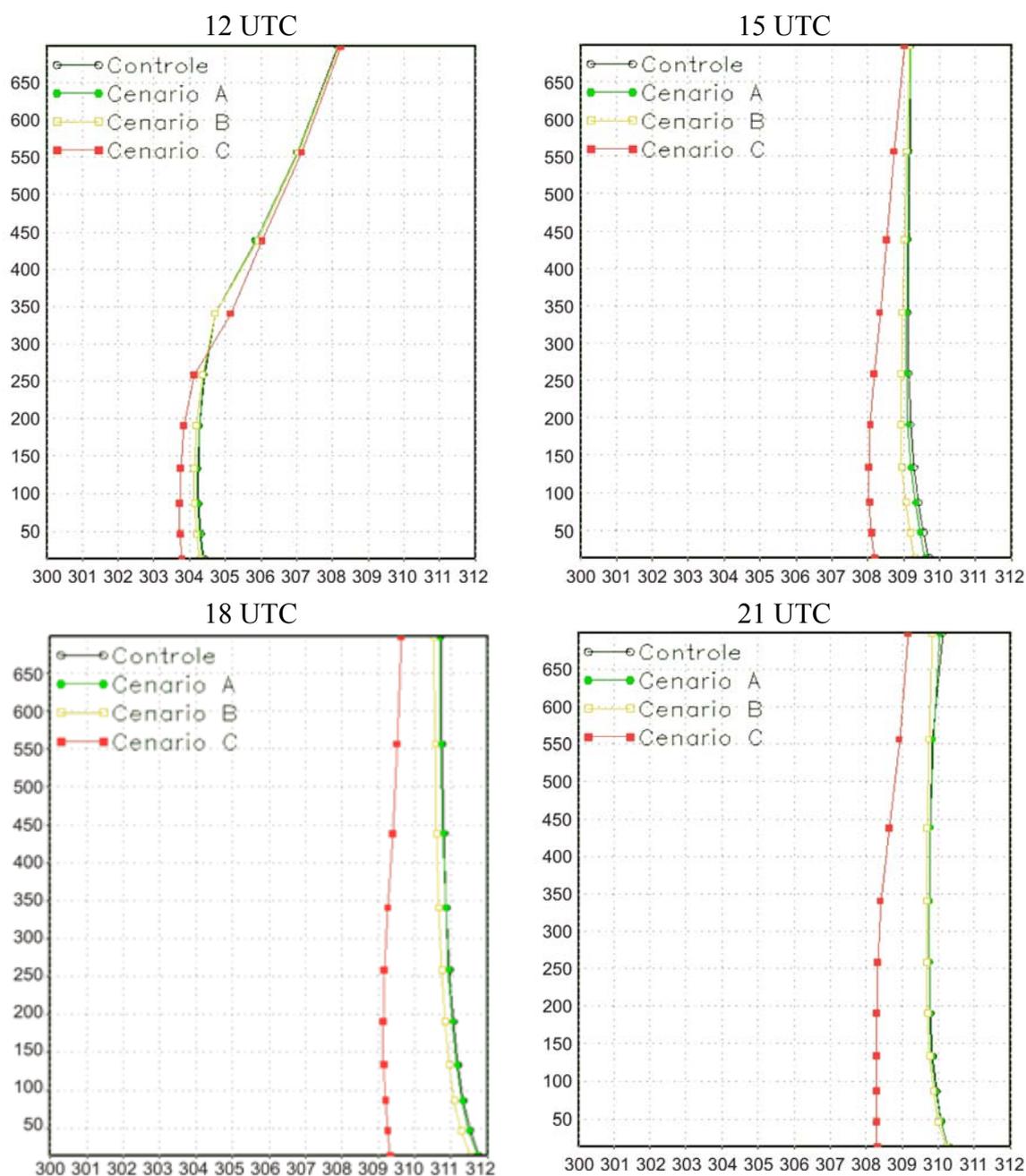


Figura 4.11 – Conclusão.

A Figura 4.12 mostra a evolução diurna dos campos de vento e umidade à superfície. Em relação à umidade observa-se uma região sistematicamente mais seca no centro da cidade, entre as 15 e 20 UTC observa-se uma região levemente mais úmida ao norte. No campo de umidade também fica claramente marcado o deslocamento da massa de ar mais úmida vinda do oceano, evidenciando a penetração da brisa marítima sobre o continente. Nesta figura também fica evidente o padrão de deslocamento da frente de brisa descrito em FREITAS &

SILVA DIAS (2005), onde a entrada da brisa é retardada devido ao campo de vento predominantemente de NW. Fica evidente também o efeito da topografia da região (Figura 4.13), uma vez que a cidade de São Paulo encontra-se num altiplano entre duas serras.

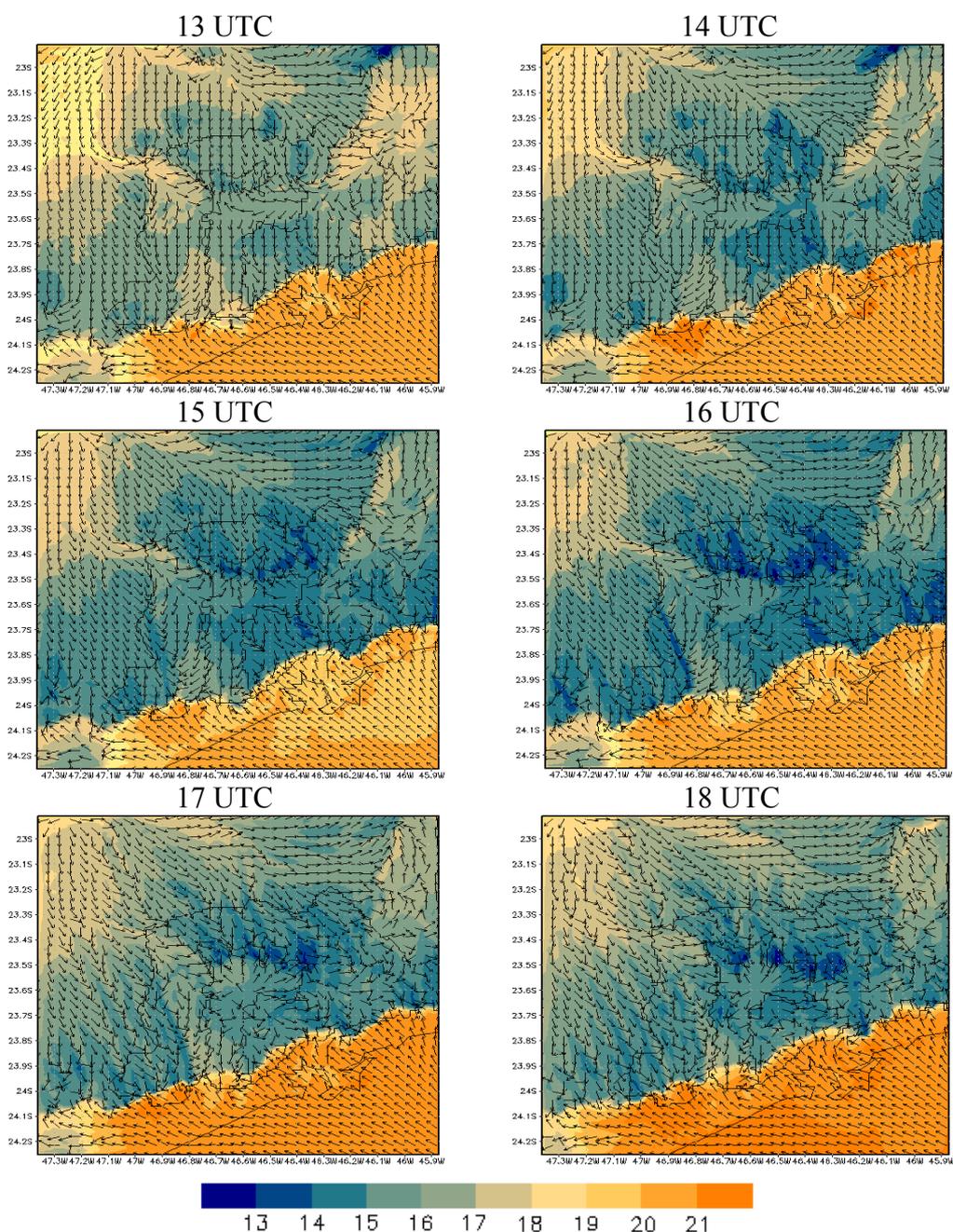


Figura 4.12 – Evolução dos campos de razão de mistura (g.kg⁻¹) e vento horizontal (m.s⁻¹) simulados na condição controle, no nível e 14,3 m, das 13 UTC do dia 15 de dezembro às 00 UTC do dia 16 de dezembro de 2003.

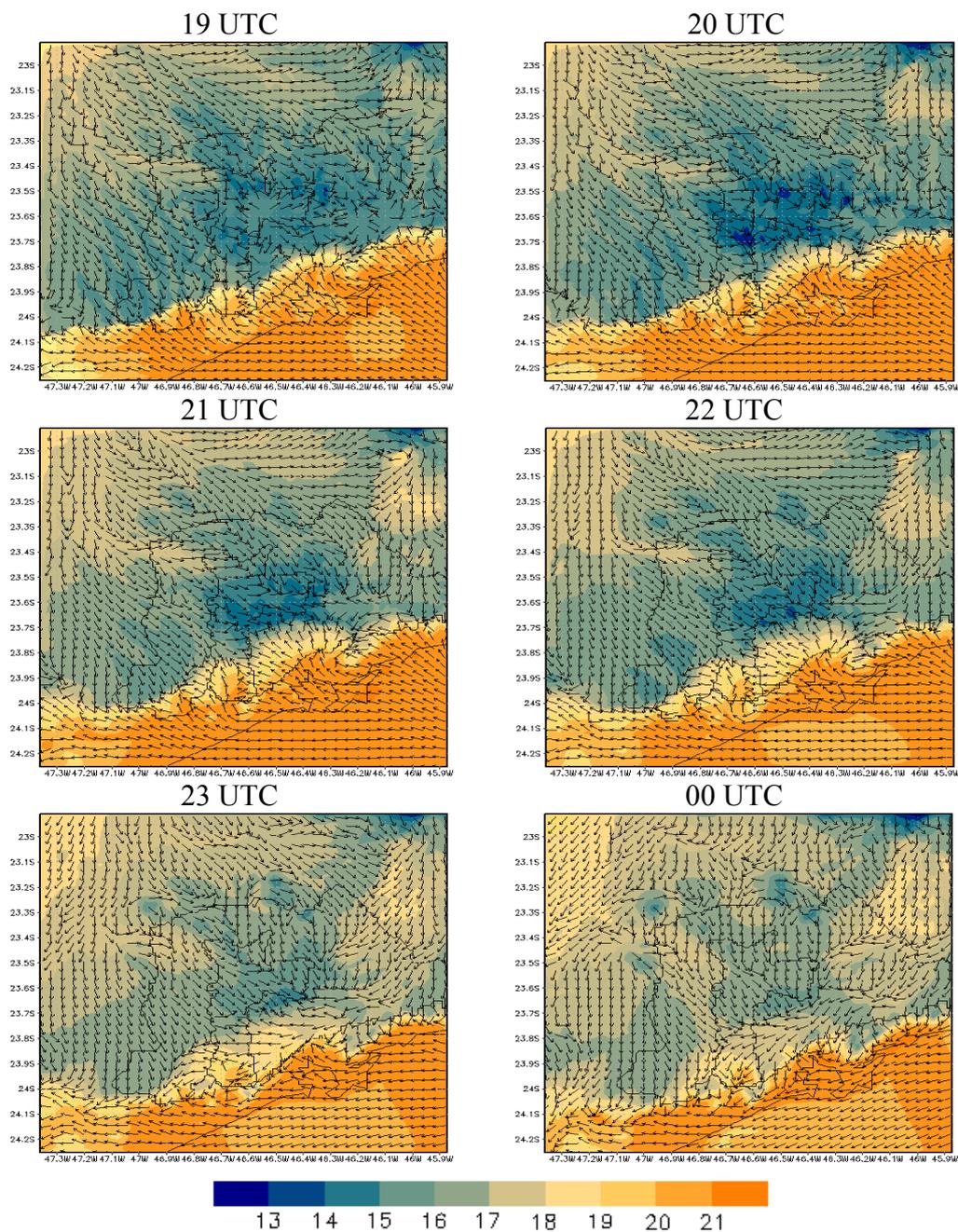


Figura 4.12 – Conclusão.

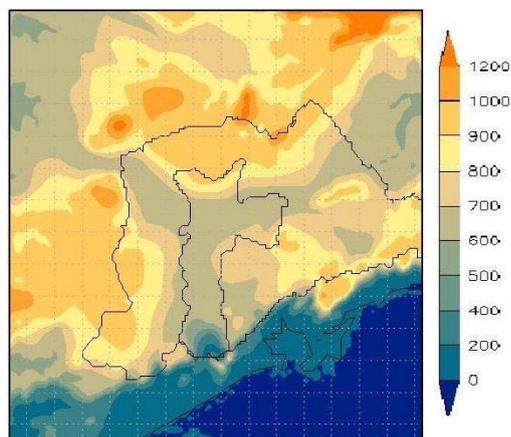
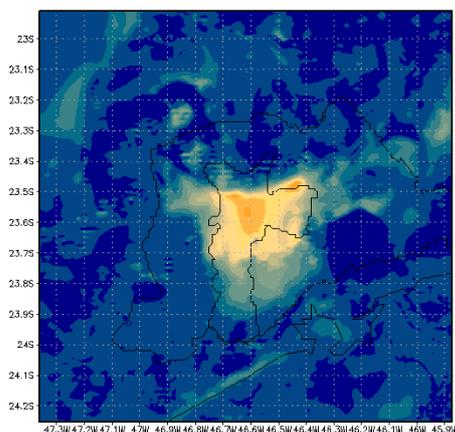


Figura 4.13 – Topografia (m) no domínio simulado.

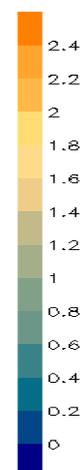
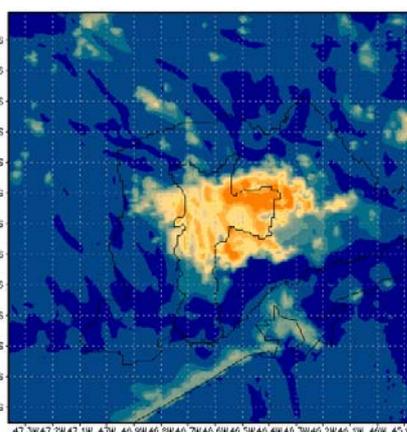
4.2.1. Desenvolvimento da ilha de calor urbana

Nesta seção foram analisadas as influências das alterações propostas sobre a superfície no desenvolvimento da ilha de calor urbana. Na Figura 4.14 são apresentados campos de diferença de temperatura entre a simulação com condição de superfície inteiramente coberta por vegetação (cenário C) e com condições de superfície inteiramente urbana (controle) e com 25% e 50% da superfície urbana substituída por vegetação (cenários A e B, respectivamente) nos horários de 09 UTC (7:00 HL) e 20 UTC (18:00 HL), horários que apresentaram as maiores diferenças entre as simulações.

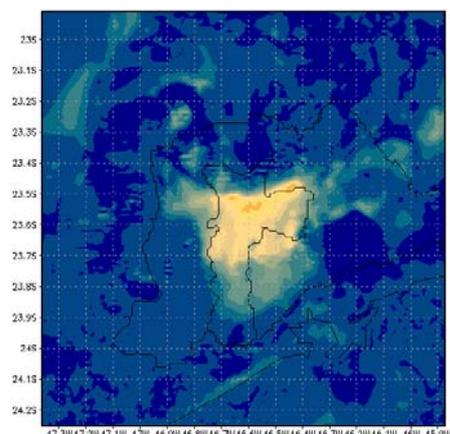
(a) Controle – Cenário C (09 UTC)



(b) Controle – Cenário C (20 UTC)



(c) Cenário A – Cenário C (09 UTC)



(d) Cenário A – Cenário C (20 UTC)

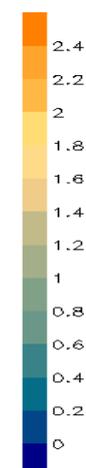
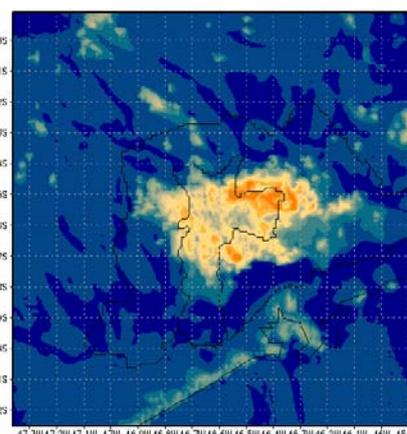


Figura 4.14 – Diferença de temperatura entre a simulação com o cenário C (somente vegetação) e as simulações: de controle (somente urbano), com o cenário A (25% de vegetação) e com o cenário B (50% vegetado), nos horários das 09 UTC e 20 UTC, ao nível de 14,3 m.

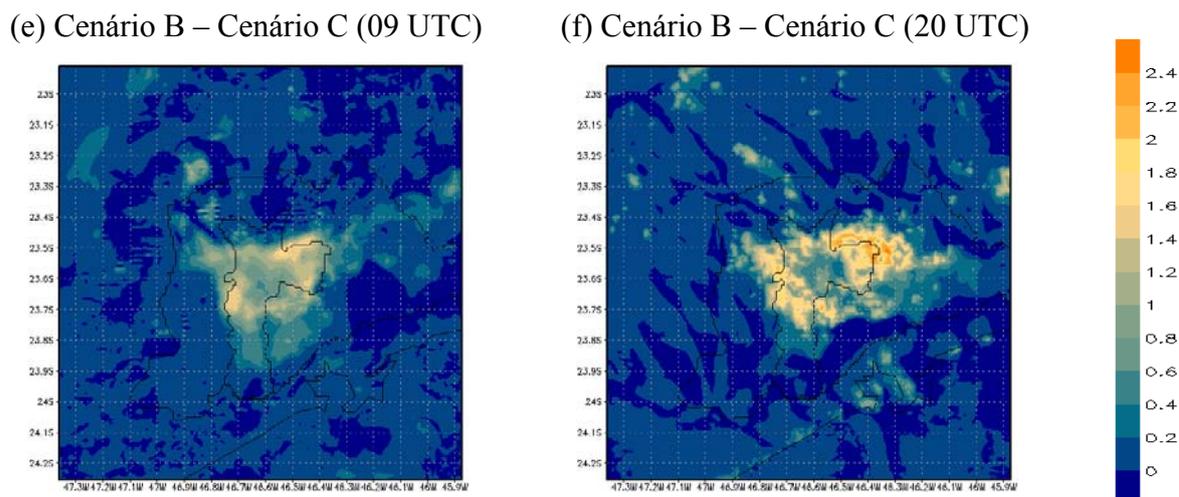


Figura 4.14 – Conclusão.

A Figura 4.14 (a) e (b) demonstra a ilha de calor segundo a sua definição, pela diferença de temperatura entre a condição de superfície totalmente urbana e a totalmente vegetada (simulação de controle menos o cenário C). Neste caso observaram-se claramente as diferenças de temperatura limitadas à área urbanizada. No primeiro horário a diferença de temperatura esteve em 1,8 °C, com um núcleo coincidente com a superfície tipo urbano 1 com diferença de até 2,2 °C. À tarde o contraste entre a área urbanizada e vegetada ao seu redor ficou mais bem definido e a diferença de temperatura chegou a ser superior a 2,4 °C, porém sem o aspecto visual de uma ilha (com isotermas circunscritas ao redor de um mesmo núcleo quente), mas com as maiores diferenças espalhadas principalmente na porção nordeste da área urbanizada.

Os demais campos na Figura 4.14 demonstram o efeito da presença de vegetação na desintensificação da ilha de calor urbana, uma vez que estes campos mostram a diferença de temperatura entre os cenários parcialmente urbanizados e o completamente vegetado. Analisando o cenário A (Figura 4.14 c e d), com 25% de vegetação, observa-se que a diferença em relação ao cenário C (completamente vegetado) diminuiu ligeiramente se comparado ao caso anterior (diferença entre o cenário inteiramente urbano e o inteiramente vegetado). Às 09 UTC a diferença permaneceu em torno de 1,6 °C, com apenas um pequeno

núcleo mais quente na porção norte da área urbanizada, e às 20 UTC o padrão de diferenças foi análogo ao caso anterior, porém com menor intensidade. Já a condição do cenário B (50% de vegetação), apresentada na Figura 4.14 (e) e (f), se sobressaiu em relação às demais. Pela manhã a diferença em relação ao cenário vegetado foi da ordem de 1,0 °C, enquanto à tarde esteve em torno de 2,0 °C. Neste último cenário observa-se uma característica interessante. Nota-se que a diferença de temperatura diminuiu de forma mais acentuada na área coberta pela superfície tipo urbano 1 (superfície mais intensamente urbanizada descrita no capítulo anterior, Figura 4.1 e Tabela 4.1). Às 20 UTC (Figura 4.14 f) este contorno ficou bem marcado e a diferença em relação ao cenário inteiramente vegetado não passou de 0,6 °C sobre a superfície tipo urbano 1.

Desta análise são extraídos alguns pontos importantes:

- A presença de vegetação de fato contribui para a diminuição da temperatura nas áreas urbanizadas e este efeito é representado satisfatoriamente pelo modelo;
- As diferenças de temperatura devido à inserção de vegetação são mais intensas no período da tarde (às 18:00 HL). Este resultado vai de acordo com AVISSAR (1996), que indica que de maneira geral a máxima intensidade das circulações de mesoescala ocorre tipicamente em torno de 15:00 HL. AVISSAR (1996) explica que no início da manhã a baixa incidência de radiação solar gera pequenos gradientes de temperatura e pressão, e também que a defasagem com relação à máxima incidência de radiação é devida à resposta não linear da CLP ao aquecimento da superfície.
- A relação entre a quantidade de vegetação inserida na área urbana e a diminuição da temperatura não é linear, visto que ao acrescentar porções iguais de vegetação não foram observados decréscimos proporcionais na temperatura. Isto se deve não só à complexidade das trocas entre a superfície e a atmosfera, que envolve uma grande quantidade de fatores, mas também à resposta atmosférica a estas trocas. Um fator de extrema importância é a

modificação causada na razão de Bowen, $\beta = H/LE$, sendo H o fluxo de calor sensível e LE o fluxo de calor latente, geralmente expressos em unidades de $W m^{-2}$. Embora a fração vegetada seja a mesma em todos os pontos de grade modificados, o fluxo de calor latente é altamente dependente da umidade do solo, que, sob influência da topografia (percolação), pode apresentar padrões distintos, em diferentes regiões do domínio simulado.

- A inserção de vegetação mostrou-se ser mais eficiente na diminuição da temperatura na área descrita como mais intensamente urbanizada (tipo urbano 1), com construções mais altas e ruas mais largas. É importante lembrar que nas simulações realizadas não foi inserida vegetação em meio à área urbana, mas sim em substituição a esta, de modo que foram eliminadas as fontes de calor (fontes antropogênicas, armazenamento de calor devido às propriedades térmicas dos materiais e à geometria de cânion, etc., conforme descrito na seção 2.2) que eram mais intensas nesta área.

4.2.2. Conforto térmico humano

A Figura 4.15 mostra a evolução do campo de temperatura efetiva (índice de conforto térmico humano) na simulação de controle no período mais crítico em relação ao conforto térmico humano (horário de maior aquecimento). O índice de temperatura efetiva é descrito na seção 3.3, onde é apresentada sua fórmula (Equação 3.5) e sua faixa de valores de conforto (Tabela 3.2). Observa-se na Figura 4.15 que os campos de TE são semelhantes espacialmente aos campos de temperatura, que por sua vez sofrem forte influência da topografia da região, estando a cidade de São Paulo no planalto entre as Serras do Mar e da Cantareira. Entre as 14 UTC do dia 15 e as 00 UTC do dia 16 (ou 12:00 a 22:00 HL) a temperatura efetiva permaneceu na faixa de sensação de calor moderado (entre 24 e 30 °C, Tabela 3.2) sobre a RMSP, atingindo o valor máximo de 28 °C entre 18 UTC e 20 UTC (ou 16:00 e 18:00 HL). Nos demais horários a TE permaneceu na faixa agradável a levemente quente (entre 18 e 24 °C, Tabela 3.2).

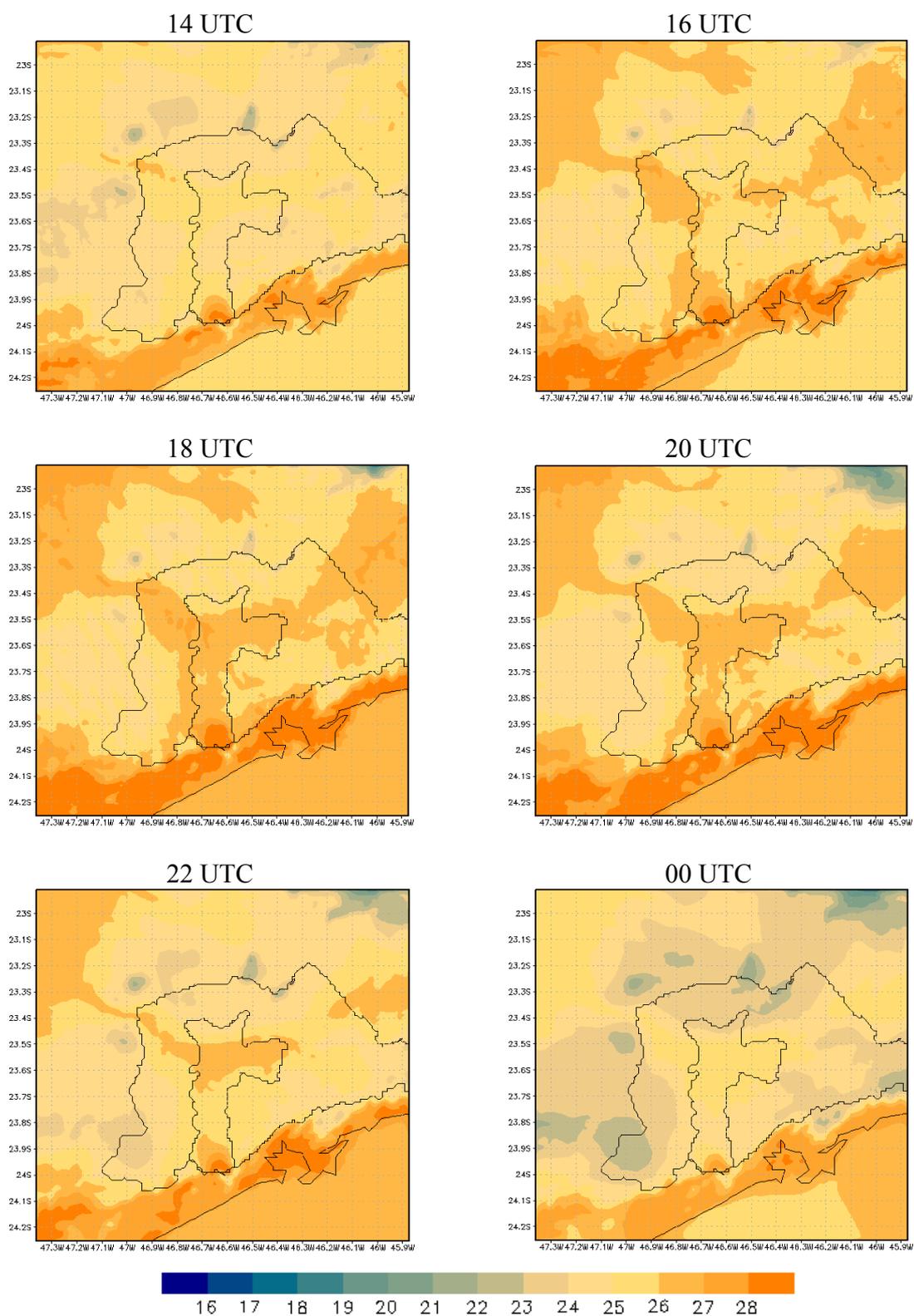


Figura 4.15 – Campos de temperatura efetiva (TE) calculada a partir da simulação de controle com o modelo RAMS 4.3, das 14 UTC do dia 15 de dezembro às 00 UTC do dia 16 de dezembro, no nível de 14.3 m.

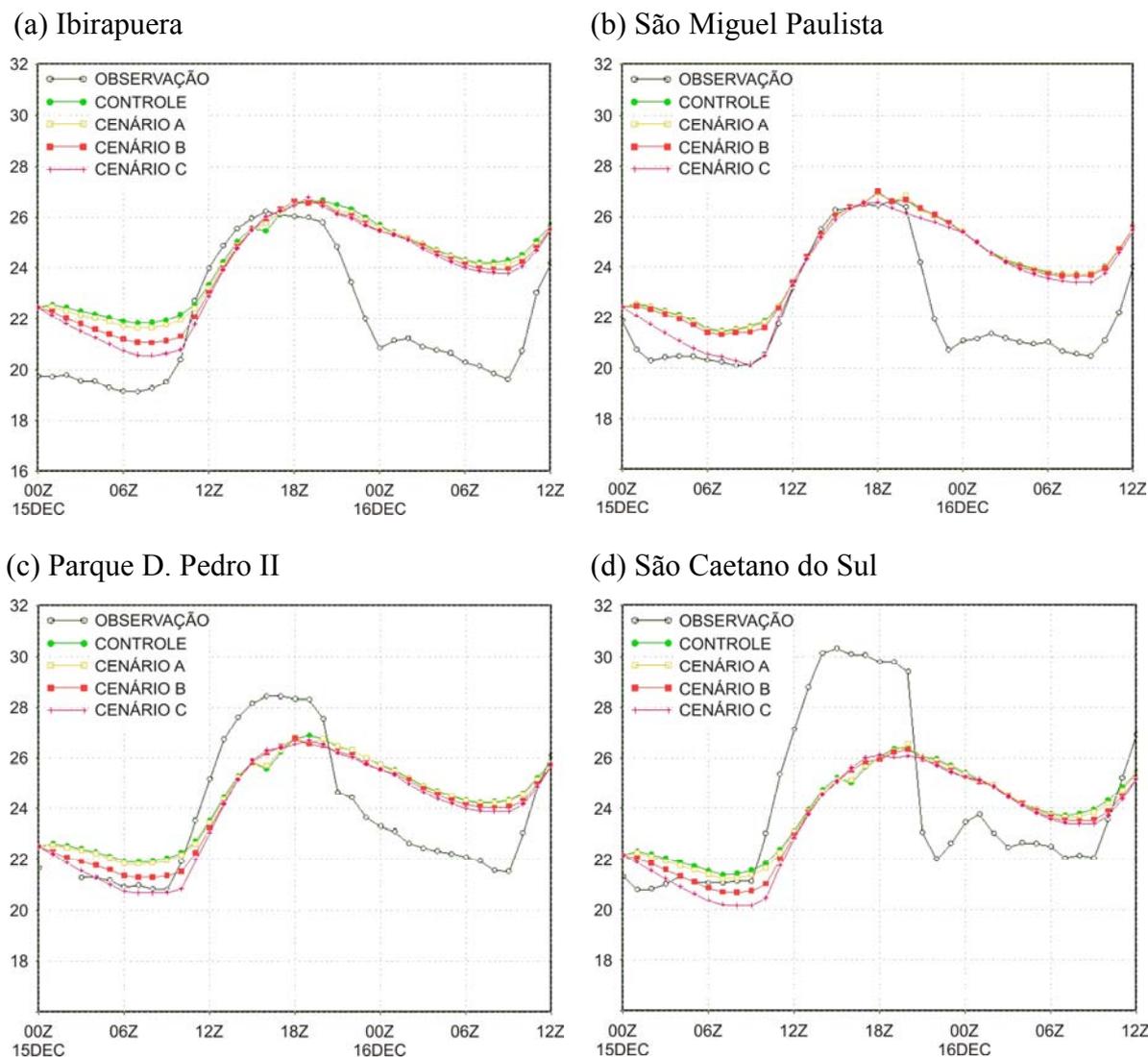


Figura 4.16 – Comparação entre a temperatura efetiva calculada a partir das simulações com o RAMS 4.3, no nível de 14,3 m, e a partir de observações nas estações da CETESB.

Foi constatado, no entanto, que as alterações propostas nos diferentes cenários não produziram efeito significativo sobre o índice de temperatura efetiva, a não ser nas primeiras horas de simulação. Nos horários de maior desconforto, as diferenças entre as simulações foram inferiores a $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, o que significa pouco impacto na sensação térmica humana.

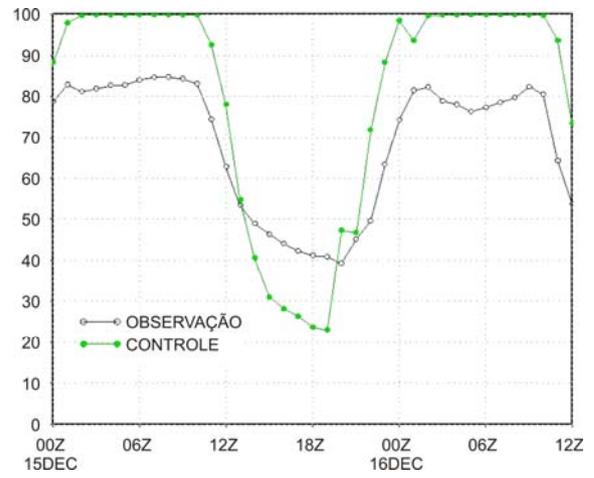
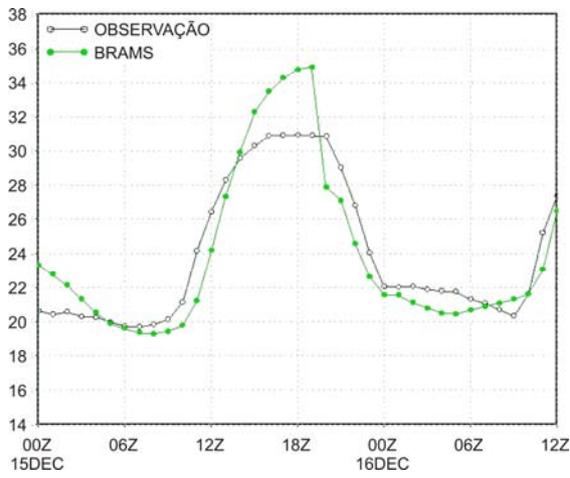
Este resultado, a ausência de impacto significativo, remonta à escala de estudo, uma vez que a análise em mesoescala não se atém às variações mais localizadas, em microescala (apesar de ter dependência e interagir com esta), que certamente exercem forte influência sobre a sensação térmica de conforto. Conforme discutido anteriormente, neste estudo a

vegetação foi inserida em substituição à superfície urbana, e não em meio a esta, de modo que efeitos como trocas locais e o sombreamento não foram levados em conta. Desta forma, foi aqui avaliado um efeito médio sobre a atmosfera, e não um efeito localizado sobre uma pessoa.

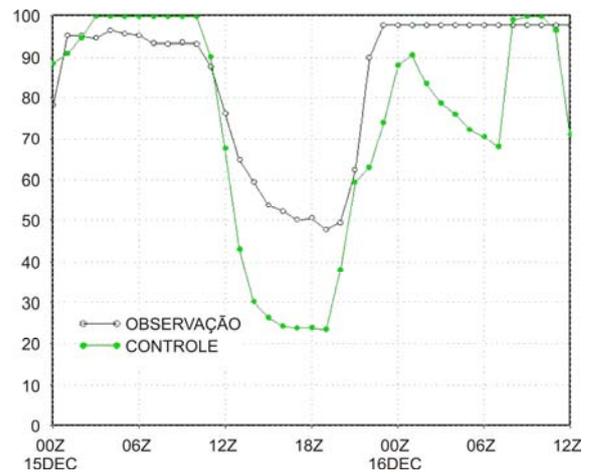
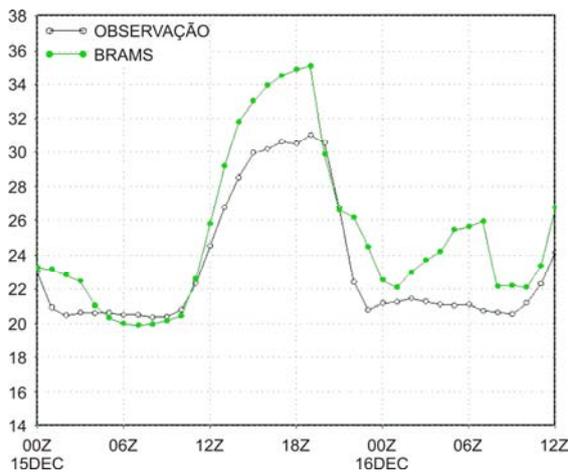
4.3. Simulação utilizando o BRAMS 3.2

A Figura 4.17 mostra que a simulação com o modelo BRAMS esteve mais próxima às observações do que a versão anterior. Nas estações Ibirapuera e São Miguel Paulista (Figura 4.17 a e b), áreas menos urbanizadas, com temperaturas mais amenas, a simulação superestimou a máxima temperatura do dia em aproximadamente 2,5 °C. Já nas estações Parque D. Pedro II e São Caetano do Sul (Figura 4.17 c e d), regiões mais densamente urbanizadas onde as temperaturas foram mais elevadas, a série de temperatura simulada foi semelhante às observações. Já a umidade relativa foi subestimada no período da tarde em todas as estações (Figura 4.17). Os mínimos simulados de umidade relativa foram muito inferiores àqueles observados. Esse aspecto poderia explicar a superestimativa de temperatura em algumas localidades, mas nem sempre essa relação é bem clara, ou seja, superestimativa de temperatura e subestimativa de umidade, que poderiam alterar a partição de energia próximo a superfície. A simulação com o modelo BRAMS, diferentemente das anteriores, simulou a precipitação ocorrida do final da tarde do dia 15, conforme evidenciado na comparação entre o campo de precipitação simulado (Figura 4.18) e observado com o radar meteorológico (Figura 4.19). Observa-se que a precipitação foi simulada com uma leve subestimativa na intensidade das células mais intensas e com certo atraso em relação às observações do radar, porém o padrão em forma de linhas com orientação noroeste-sudeste foi bem representado.

(a) Ibirapuera



(b) São Miguel Paulista



(c) Parque D. Pedro II

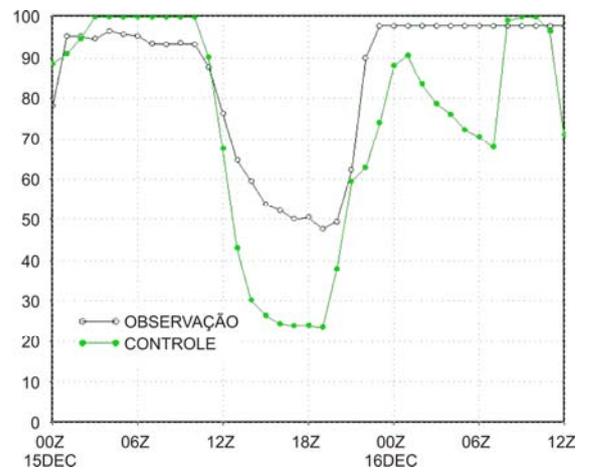
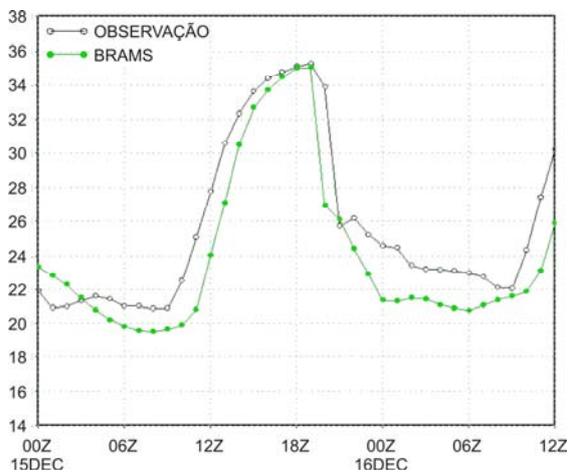


Figura 4.17 – Comparação entre temperatura e umidade relativa observadas nas estações da CETESB e simuladas com o BRAMS.

(d) São Caetano do Sul

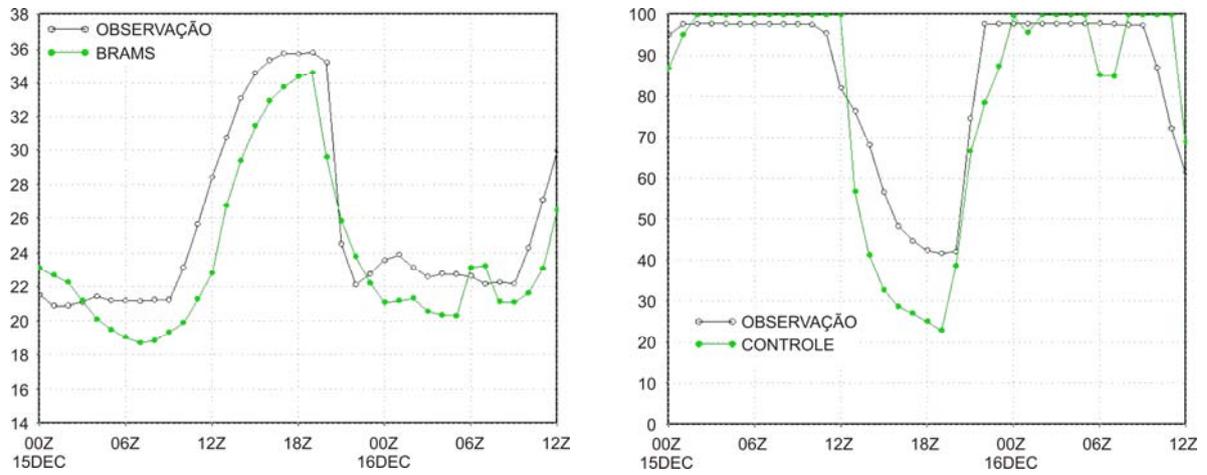


Figura 4.17 – Conclusão.

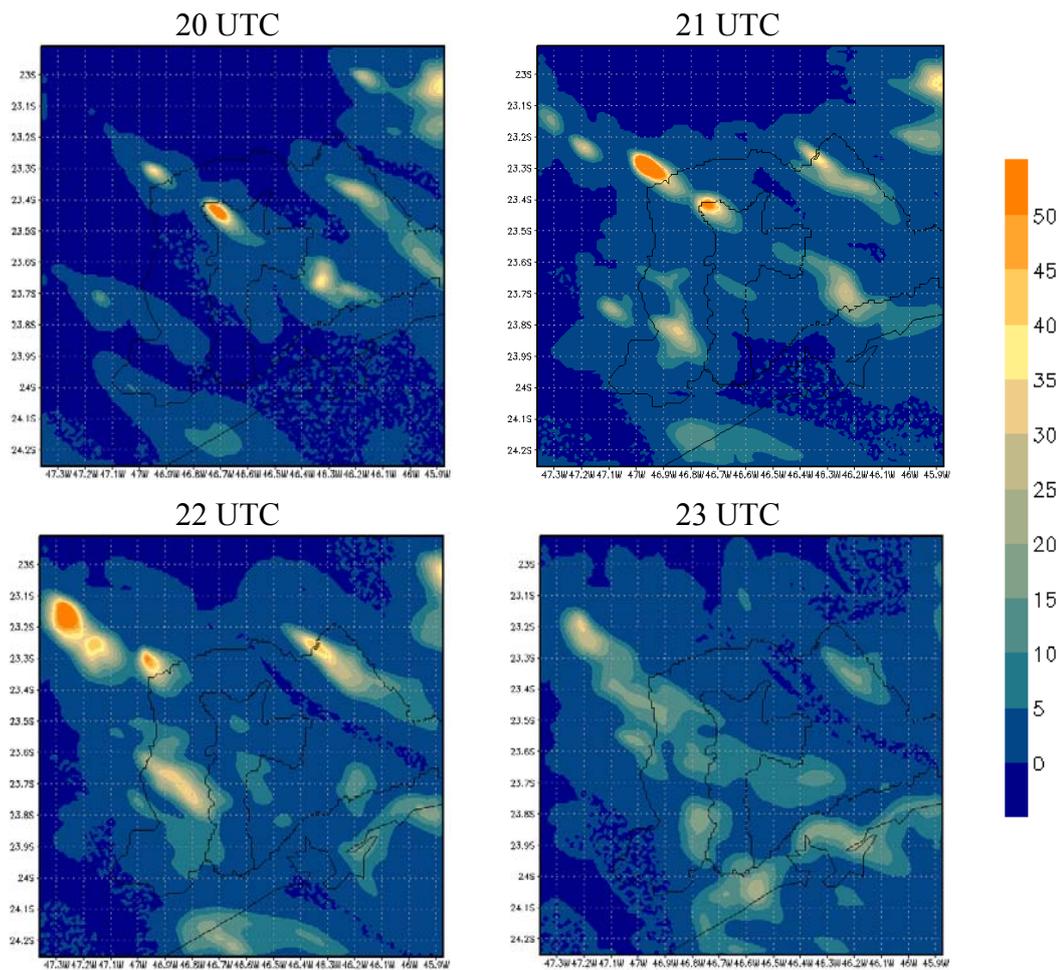


Figura 4.18 – Taxa de precipitação (mm.h⁻¹) simulada pelo modelo BRAMS.

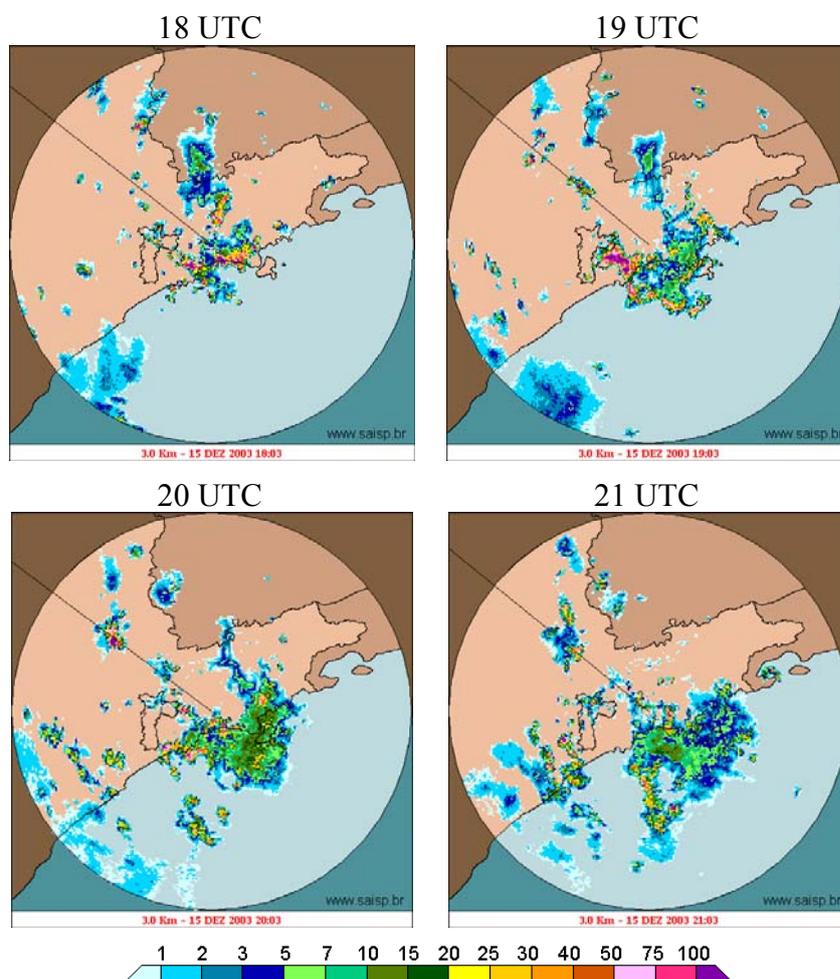


Figura 4.19 – Precipitação observada pelo radar meteorológico (mm/h)
(Fonte: SAISP – Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo).

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Este estudo foi caracterizado por um caráter prático bastante marcante e dele constaram três etapas importantes.

A primeira delas foi a criação de um arquivo de vegetação refinado com base em imagens de satélite em altíssima resolução, através do sistema de informações geográficas SPRING, para um maior detalhamento da Região Metropolitana de São Paulo. Nesta etapa foram detectados quatro tipos de ocupação urbana distintos na Região Metropolitana de São Paulo. O primeiro, urbano 1, constituído por uma alta densidade de edificações com alto desenvolvimento vertical. O segundo, urbano 2, constituído de uma mescla de edificações de alto e médio porte. O terceiro, urbano 3, apresenta uma característica mais residencial com edificações menores e ruas estreitas. O quarto tipo, suburbano, representa a transição entre as regiões urbanizadas e a região rural. Foi estimado também, através do cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que dentro da área urbanizada há somente cerca de 10% de cobertura da superfície por vegetação. Apesar desta condição de superfície mais detalhada ainda não ter sido implantada neste estudo, este constitui um passo importante no estudo da área e servirá como base para trabalhos futuros.

Em segundo lugar esteve a constatação, de forma qualitativa, da relação entre a urbanização e a degradação das condições de conforto térmico humano. Ficou evidenciada, pela avaliação de uma série de 11 anos de dados medidos em superfície pela rede operacional da CETESB em locais com características distintas de ocupação urbana, a influência de fatores como o adensamento de construções e presença de vegetação sobre as condições de conforto. Através do cálculo do índice Temperatura Efetiva, verificou-se que as regiões de São Caetano do Sul e do Parque D. Pedro II, regiões consideradas altamente urbanizadas, foram as que apresentaram o maior número de casos de desconforto por calor moderado. Regiões como São Miguel Paulista, menos urbanizada, e Ibirapuera, em que as medidas são

feitas em um parque com uma grande quantidade de vegetação, mostraram-se mais confortáveis. Na maior parte dos casos, as regiões apresentaram um nível agradável e levemente quente, seguido pela condição agradável e levemente fresca.

A terceira etapa constituiu-se do estudo numérico do potencial efeito da presença de vegetação dentro do ambiente urbano. Esta última etapa foi caracterizada por um árduo esforço na área computacional, na tentativa de representar adequadamente os cenários desejados. Constatou-se que o modelo RAMS na versão 4.3 foi capaz de simular os efeitos da presença de vegetação, verificando que esta presença diminui o aquecimento na área urbana desintensificando o efeito da ilha de calor. Nos cenários com 25% de vegetação, as diferenças máximas entre a temperatura da área urbana e a situação em que esta área foi totalmente substituída por vegetação atingiram 2,5 °C. Com 50% de substituição por área vegetada essas diferenças caíram para valores em torno de 2,0 °C, com o detalhe de que nas áreas menos urbanizadas a diminuição foi menor, mantendo-se em grande parte da região urbano 2 a diferença de 2,5 °C. Na comparação entre a simulação de controle e a substituição total da área urbanizada, as diferenças na temperatura estiveram próximas a 2,4 °C em praticamente toda a área substituída, com valores superiores nas áreas suburbanas. Foi verificado também o impacto da presença de vegetação sobre a partição de energia, constatando-se um aumento superior a 280 W.m⁻² no fluxo de calor latente e uma diminuição de mais de 200 W.m⁻² no fluxo de calor sensível nas áreas onde havia vegetação. Observou-se ainda o efeito da vegetação na estabilização da atmosfera. Os perfis de temperatura potencial entre os diferentes cenários foram significativamente alterados. No horário das 9 UTC estas alterações ocorreram principalmente entre a superfície e cerca de 200 m acima desta. Às 12 UTC essa influência foi observada até 300 m e nos horários entre 15 e 21 UTC acima do nível de 600 m. Conforme os cenários construídos, quanto maior a fração vegetada, mais próximo da neutralidade ou da estabilidade ficará o ambiente. Não foi possível, porém, verificar impactos

em mesoescala sobre as condições de conforto térmico humano. Foi constatado ainda que o modelo BRAMS simulou mais adequadamente as condições meteorológicas locais, dando indicativos de que a representação de áreas verdes neste modelo poderia fornecer resultados mais realísticos.

È importante notar que nos experimento realizados neste trabalho a vegetação foi inserida em substituição à superfície urbana, e não em meio a esta, o que acarreta dois fatores importantes: a eliminação das fontes de calor oriundas da superfície urbana (seja por emissões antropogênicas, características térmicas dos materiais ou efeitos radiativos) e a não consideração do efeito de sombreamento.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Com os estudos realizados neste trabalho, ficou clara a importância da correta representação da fração vegetada nas áreas urbanas. Sendo assim, sugere-se para trabalhos futuros:

- o aprimoramento da representação de áreas fracionais vegetadas no modelo BRAMS. Esta atividade envolve a modificação do código do modelo para que o mesmo possa utilizar as informações obtidas nesta dissertação. Essas modificações devem ser feitas no módulo de interação solo-superfície-atmosfera (LEAF), adequando-se os patches de qualquer tipo urbano existente.
- a aplicação da condição da superfície refinada com detalhamento de distintos tipos urbanos. Para isso, é necessário que sejam definidas as propriedades dessas áreas urbanas (altura das construções, largura, espaçamento, tipo de cobertura, albedo e outras propriedades térmicas) para as quatro regiões definidas neste trabalho.
- como identificado neste trabalho, simulações com resolução de 1 km não são suficientes para simular os efeitos físicos sentidos na escala do pedestre. Embora esse seja um fator limitado pela disponibilidade computacional e até de avanços tecnológicos, é necessário que

sejam realizadas simulações cada vez com maior resolução para identificar o espaçamento de grade mínimo para que se possa identificar esses efeitos e permitir a aplicação direta do modelo nos estudos de planejamento urbano.

Referências Bibliográficas

- ASHRAE. 1997 ASHRAE Handbook: Fundamentals (SI Edition). *Atlanta, American Society of Heating , Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.*
- AVISSAR, R. Potential effects of vegetation on the urban thermal environment. *Atmos. Environ.*, v. 30, n. 3, p. 437-448, 1996.
- AVISSAR, R. Conceptual aspects of a statistical-dynamical approach to represent landscape subgrid-scale heterogeneities in atmospheric models. *J. Geo. Res.*, v. 97(D3), p. 2729-2742, 1992.
- BAND, L. E; PATTERSON, P.; NEMANI, R.; RUNNING, S. W. Forest ecosystem processes at the watershed scale - Incorporating hillslope hydrology. *Agri. Forest Meteorol.*, v. 63:(1-2), p. 93-126, 1993.
- BEVEN, K. J; KIRKBY, M. J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A. F. Testing a physically-based flood forecasting-model (TOPMODEL) for 3 UK catchments. *J. Hydrol.*, v. 69:(1-4), p. 119-143, 1984.
- CHEN, C. & COTTON, W. R. A one dimensional simulation of the stratocumulus capped mixed layer. *Bound- Layer Meteor.*, v. 25, p. 289-321, 1983.
- COTTON, W. R.; PIELKE SR. R. A.; WALKO, R. L.; LISTON, G. E.; TREMBACK, C. J.; JIANG, H.; MCANELLY, R. L.; HARRINGTON, J. Y.; NICHOLLS, M. E.; CARRIO, G. G.; MCFADDEN, J. P. RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteor. Atmos. Phys.*, v. 82, p. 5-29, 2003.
- DEARDORFF, J. W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model, *Bound-Layer Meteorol.*, vol. 18, p. 495-527, 1980.
- DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J.; WILSON, M. F. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme for the NCAR Community Climate Model. NCAR Tech. Rep. NCAR/TN 2751STR, 69 pp. [Available from NCAR, P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307-3000.], 1986.

- DUARTE, D. H. S. & SERRA, G. G. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira. Correlações e proposta de um indicador. *Ambiente Construído* (Online), Porto Alegre, v. 3, n. n.2, p. 7-20, 2003.
- ERIKSEN, W. “Okologische crapekte der umwelt belastung Hannovers stadtklina und lutverunreinigung”, *Hannover und sein Unland*, Hannover, 1978.
- FREITAS, E. D. Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes. São Paulo, 2003, 156p. *Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo*.
- FREITAS, E. D. & SILVA DIAS, P. L. Interação entre fatores envolvidos na formação e desenvolvimento de tempestades severas na Região Metropolitana de São Paulo *In: I Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, Florianópolis-SC. Anais do I Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais*. GEDN/UFSC, 665-679, 2004.
- FREITAS, E. D. & SILVA DIAS, P. L. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 3, p. 355-366, 2005.
- FREITAS, E. D.; MARTINS, L. D.; SILVA DIAS, P. L.; ANDRADE, M. F. A simple photochemical module implemented in RAMS for tropospheric ozone concentration forecast in the Metropolitan Area of São Paulo - Brazil: Coupling and validation. *Atmos. Environ.*, v. 39, n. 34, p. 6352-6361, 2005.
- FREITAS, E. D.; ROZOFF, C; COTTON, W. R.; SILVA DIAS, P. L. Interactions of urban heat island and sea breeze circulations during winter over the Metropolitan Area of São Paulo – Brazil. *Bound-Layer Meteorol.*, v. 122, n. 1, p. 43-65, 2007.
- FREITAS, S. R. Modelagem numérica do transporte e das emissões de gases e aerossóis de queimadas no cerrado e floresta tropical da América do Sul. São Paulo, 1999. 185p. *Tese de Doutorado do Instituto de Física da Universidade de São Paulo*.
- FROTA, A. B. & SCHIFFER, S. R. Manual de conforto térmico, *Livraria Nobel, São Paulo*, 1988.

- GEVAERD, R.; FREITAS, S. R. Estimativa operacional da umidade do solo para iniciação de modelos de previsão numérica da atmosfera. Parte I: Descrição da metodologia e validação. *Rev. Bras. Met.*, v. 21, n. 3, p. 59-73, 2006.
- GONÇALVES, C. D. A. B.; PEREIRA, M. N.; SOUZA, I. M. Uso de imagens CBERS para mapeamento de uso do solo urbano como subsídio ao planejamento. *In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia-GO. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, 2005.*
- GRELL, G. A.; DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble data and data assimilation techniques. *Geo. Res. Lett.*, v.39, n. 14, 2002.
- HENTSCHEL, G. A human biometeorology classification of climate for large and local scales. *World Climate Programme Applications No.1*, World Meteorological Organization, p. 120-138, 1986.
- HÖPPE, P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, v. 43, p. 71-75, 1999.
- JOHANSSON, E. Urban design and its consequences on the environment, comfort and energy consumption of buildings. *PhD Thesis at Lund University, Sweden*, 2001.
- KALNAY et al., The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470, 1996.
- KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, p. 1232-1240, 1974.
- LOMBARDO, M. A. Ilha de calor da metrópole paulistana. São Paulo, 1984, 210p. *Tese de Doutorado do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.*
- MAHRER, Y. & PIELKE, R. A. A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Beitrag zur Physik der Atmosphere*, v. 50, p. 98-113, 1977.

- MAIA, J. A. Uma análise do conforto térmico e suas relações meteorológicas na cidade de São Paulo. São Paulo, 2002, 136p. *Dissertação de Mestrado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.*
- MARQUES, A. B. A. Uma contribuição ao estudo da associação entre o clima e a urbanização da cidade de São Paulo. Taubaté, 2003, 92p. *Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado ao Departamento de Ciências Sociais e Letras da Universidade de Taubaté.*
- MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.*, v. 94, p. 357-397, 2000.
- MASSON, V.; GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Evaluation of the Town Energy Budget (TEB) Scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *J. Appl. Meteorol.*, v. 41, n. 10, p. 1011-1026, 2002.
- MELLOR, G. L. & YAMADA, T. Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys.*, v. 20, n. 4, p. 851-875, 1982.
- MENEZES, W. F. Tempestades severas: um modelo para latitudes médias. São Paulo, 1997. 174p. *Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.*
- MISSENARD, A. L'homme et le climat. *Paris*, 1937.
- MONTEIRO, L. M. & ALUCCI, M. P. Índices de conforto térmico em espaços abertos parte 1: revisão histórica. *In: ENAC – ELACAC, Maceió-AL, 2005a.*
- MONTEIRO, L. M. & ALUCCI, M. P. Índices de conforto térmico em espaços abertos parte 2: estado da arte. *In: ENAC – ELACAC, Maceió-AL, 2005b.*
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 2.ed – Viçosa:UVF, 2003
- OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, v. 1, p. 237-254, 1981.

- PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, L. R.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, v. 49, p. 69-91, 1992.
- PONZONI, F. J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAMPARELLI, R. A. C. Calibração absoluta da câmera CCD/CBERS-2. In: *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia-GO. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, 2005.*
- SANTAMOURIS, M. Energy and Climate in the Urban Built Environment. *James & James Science Publishers Ltd., London, 2001, 402p.*
- SELLERS, P. J.; RANDALL, D. A.; COLLATZ, G. J.; BERRY, J. A.; FIELD, C. B.; DAZLICH, D. A.; ZHANG, C.; COLLELO, G. D.; BOUNUOA, L. A revised land surface parameterization (SIB2) for atmospheric GCMs. Part I: Model formulation. *Journal of Climate*, v. 9, p. 676-705, 1996.
- SETH, A.; GIORGI, F.; DICKINSON, R. E. Simulating fluxes from heterogeneous land surfaces: Explicit subgrid method employing the biosphere-atmosphere transfer scheme (BATS). *J. Geophys. Res-Atmos.*, v. 99 (D9), p. 18651-18667, 1994.
- SIVAPALAN, M.; BEVEN, K.; WOOD, E. F. On hydrologic similarity .2. A scaled model of storm runoff production. *Water Resour. Res.*, v. 23, n. 12, p. 2266-2278, 1987.
- SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment. *Mon Wea. Rev.*, v. 91, p. 99-164, 1963.
- SOUZA, E. P.; SILVA, E. M. Impacto da implementação de uma parametrização de convecção rasa em um modelo de mesoescala. Descrição e testes de sensibilidade do esquema. *Rev. Bras. Met.*, v. 18, n. 1, p. 33-42, 2003.
- SUPING, Z.; GUANGLIN, M.; YANWEN, W.; JI, L. Study of the relationship between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distande runners. *International Journal of Biometeorology*, v. 36, p. 63-68, 1992.
- TARIFA, J. R. & ARMANI, J. Os climas urbanos. In *TARIFA, J. R. & AZEVEDO, T. R. Os climas na cidade de São Paulo: Teoria e prática. São Paulo, Pró-Reitoria de Cultura e*

Extensão. Universidade de São Paulo. Laboratório de Climatologia – FFLCH. Coleção Novos Caminhos, v. 4, Cap. 3, p. 47-70, 2001.

THOM, E. C. The discomfort index. *Weatherwise*, v. 12, p. 57-60, 1959.

TREMBACK, C. J. & WALKO, R. L. The Regional Atmospheric Modeling System (RAMS): development for parallel processing computer architectures. *In: Third RAMS Users' Workshop. Echuca, Victoria, Australia, 1997.*

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization Part I: the single moment scheme. *Atmos. Res.*, v. 38, p. 29 – 62, 1995.

WALKO, R. L.; BAND, L. E.; BARON, J.; KITTEL, T. G. F.; LAMMERS, R.; LEE, T. J.; OJIMA, D.; PIELKE, R. A.; TAYLOR, C.; TAGUE, C.; TREMBACK, C. J.; VIDALE, P. L. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. *J. Appl. Meteorol.*, v. 39, n. 6, p. 931-944, 2000.