

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

MARCOS VINÍCIUS BUENO DE MORAIS

Efeitos da vegetação sobre os termos do balanço de energia em áreas urbanas

São Paulo
2014

MARCOS VINÍCIUS BUENO DE MORAIS

Efeitos da vegetação sobre os termos do balanço de energia em áreas urbanas

Tese apresentada ao Instituto de Astronomia,
Geofísica e Ciências Atmosféricas da
Universidade de São Paulo como condição
parcial para a obtenção do título de Doutor em
Ciências.

Área de Concentração: Meteorologia

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Dias de Freitas

São Paulo
2014

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

Para minha princesinha, Fabiana.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Edmilson pela orientação durante todo o doutorado.

À minha família, que contribuiu muito para o desenvolvimento e na finalização desta tese. Em especial minha esposa, a Vivi, que, além de toda a paciência durante a elaboração desta tese, me ajudou 100% no trabalho de campo.

A professora Eleonora da UFMG pela ajuda com a metodologia do cálculo do Fator de Visão do Céu.

Ao pessoal do LABAUT-FAU, em especial, à professora Dra Denise Duarte pela ajuda com os outros métodos de obtenção do FVC.

Ao Vinícius Roggério pela ajuda com os dados do MODIS.

À Sue Grimmond e Mariana Gouvêa do Kings College, pelo fornecimento do código em Fortran que também obtém o FVC.

Ao pessoal da Climatempo, em especial à equipe de Modelagem e Desenvolvimento, pelo apoio na reta final deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro (Processo: 11/01345-6).

“And the men who hold high places
Must be the ones who start
To mold a new reality
Closer to the heart”

Trecho da música Closer to the Heart - RUSH

RESUMO

MORAIS, M.V.B. **Efeitos da vegetação sobre os termos do balanço de energia em áreas urbanas.** 144 f. Tese Doutorado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Neste trabalho é apresentada uma análise do impacto da cobertura vegetal e da caracterização das propriedades da superfície urbana na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Para isto, foi introduzido no modelo de interação dossel urbano – atmosfera TEB (Town Energy Budget), acoplado ao BRAMS, uma metodologia de ponderação dos fluxos turbulentos a fim de considerar a vegetação nas áreas urbanas. Analisando os índices estatísticos com base em dados modelados e observados, verificou-se que o modelo forneceu uma melhor representação das variáveis atmosféricas. A partir disto, foram realizados testes de sensibilidade alterando parâmetros da superfície, razão geométrica, NDVI e tipo de vegetação. Os resultados foram comparados com uma simulação controle, através da análise no efeito da Ilha de Calor Urbana (ICU) e do conforto térmico humano para ambientes externos. Em ambos os casos, pequenas alterações nas características dinâmicas e termodinâmicas das superfícies e da vegetação podem contribuir para uma redução da ICU e alterar a sensação térmica percebida pelas pessoas. Além destes testes numéricos, um trabalho de campo utilizando uma câmera digital e lente do tipo olho-de-peixe foi realizado para obter o Fator de Visão do Céu (FVC) em pontos de regiões urbanas com características similares, obtidas através da análise de imagens de satélites. O FVC pode ser utilizado para caracterizar a estrutura e os elementos urbanos de uma região. Os valores obtidos foram bastante diferentes daqueles calculados com a álgebra do fator de forma, e a inserção destes dados no modelo numérico contribuiu para uma melhora nos índices estatísticos obtidos das comparações entre valores simulados e observados das variáveis atmosféricas próximas à superfície.

Palavras chave: BRAMS, vegetação urbana, balanço de energia, fator de visão do céu.

ABSTRACT

MORAIS, M.V.B. **Effects of vegetation on the terms of energy budget in urban areas.** 144 p. PhD. Thesis – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2014.

This work presents an analysis of the impact of land cover and the characterization of urban surface properties in the Metropolitan Region of São Paulo (MASP). It was implemented in the urban canopy – atmosphere interaction model TEB (Town Energy Budget), coupled to BRAMS model, a methodology for weighting the turbulent fluxes in order to consider the vegetation in urban areas. By analyzing statistical indices based on modeled and observed data, the model could better represent the atmospheric variables. Sensitivity tests, by changing surface parameters, aspect ratio, NDVI and the type of vegetation were performed. The results were compared with a control simulation, analyzing the effect on Urban Heat Island (UHI) and human thermal comfort for outdoor environments. In both cases, small changes in the dynamic and thermodynamic characteristics of the surfaces and vegetation can contribute to a reduction in UHI and the thermal sensation of people. In addition to these numerical tests, a field work using a digital camera and fish-eye lens was carried out to obtain the Sky View Factor (SVF) at points in urban areas with similar characteristics, obtained through analysis of satellites images. The SVF can be used to characterize the structure and elements of an urban region. The values obtained were quite different from those calculated with shape factor algebra, and the integration of these data into numerical model contributed to an improvement in the statistical indices, when compared with observational data.

Keywords: BRAMS, urban vegetation, energy budget, sky view factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 –	Projeção de mudanças na população urbana e rural entre 2011 e 2050. Valores em milhões. Retirado de UN REPORT (2012b).....	19
Figura 1.2 –	Variação da temperatura para diversos pontos nas regiões rurais, suburbana e urbana. ΔT_{u-r} representa a diferença entre a temperatura na região mais urbanizada e a região rural. Adaptado de Oke (1987; retirado de Urbina Guerrero, 2010).....	20
Figura 1.3 –	Esquema do balanço de energia no dossel urbano. Retirado de Oke (1988)....	21
Figura 1.4 –	Comparação entre evolução diurna da altura da camada limite (h^*) na área urbana (linha contínua e índice u) e rural (linha tracejada e índice r). Baseado em Cermak <i>et al.</i> (1995).	22
Figura 1.5 –	Localização geográfica da RMSP.....	24
Figura 1.6 –	Topografia da RMSP. Escala de cores em metros.....	25
Figura 2.1 –	Esquema de execução do BRAMS.	31
Figura 2.2 –	Esquema da transferência de calor e umidade entre os elementos no LEAF-3 e uma célula de grade com dois patches, onde A indica a atmosfera, C o ar no dossel, V a vegetação, S indica neve e o solo está indicado pela letra G. Somente um dos patches contém neve. As setas indicam os sentidos dos fluxos, a primeira letra do texto que acompanha as setas indica a que está associada ao fluxo (transferência de calor [h], transferência de água [w] ou transferência radiativa de onda longa [r]); a segunda e a terceira letras indicam a fonte e o receptor, respectivamente. Retirado de WALKO <i>et al.</i> (2000).....	35
Figura 2.3 –	Cânion formado por dois prédios considerando três camadas para cada elemento. T_r , T_w e T_R indicam temperaturas para as camadas da rua, paredes e telhados. W_r e W_R indicam o conteúdo de água na superfície e telhados e W_{snow_r} e W_{snow_R} o conteúdo de água na superfície e telhados. δ_R e δ_r correspondem às frações de água para os telhados e as ruas, δ_{snow_R} e δ_{snow_r} às frações de neve para os telhados e as ruas. T_{i_bid} é a temperatura internados prédios. Adaptado de MASSON (2000).	36
Figura 2.4 –	Esquematização da ponderação dos fluxos turbulentos no ponto de grade do modelo. Adaptado de Brown e Williams (1998).	38
Figura 3.1 –	Resultado da classificação da superfície urbana utilizada para esta simulação, com espaçamento de grade de 500 m, para a RMSP. A cor azul corresponde ao tipo suburbano, a cor verde ao tipo urbano 3, a cor amarela ao tipo urbano 2 e a cor vermelha ao tipo urbano 1.	43
Figura 3.2 –	Evolução diária da radiação solar global observada na estação do Mirante de Santana.....	44
Figura 3.3 –	Grades aninhadas utilizadas nas simulações.....	44

Figura 3.4 – NDVI para a RMSP com espaçamento de 250 m.....	45
Figura 3.5 – Evolução diária da Temperatura do ar a 2 metros, em graus Celsius, onde a linha vermelha representa à simulação TEB, a linha azul representa a simulação VTEB e a linha preta, as observações. a) São Caetano, b) Guarulhos, c) Congonhas, d) Campo de Marte, e) Mirante de Santana e f) IAG.	49
Figura 3.6 – Evolução diária da umidade específica do ar a 2 metros, em g/kg, onde a linha vermelha representa à simulação TEB, a linha azul representa a simulação VTEB e a linha preta, as observações. a) IAG, b) Guarulhos, c) Congonhas, d) Campo de Marte e e) Mirante de Santana.....	50
Figura 3.7 – Diferença de temperatura, em graus Celsius, entre a simulação e dados de radiossondagem, sendo a linha vermelha os resultados com o VTEB e a linha azul com o TEB, para a) 00Z do dia 18 de julho, b) 12Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 de julho e d) 12Z do dia 19 de julho.....	51
Figura 3.8 – Diferença de umidade específica, em g/kg, entre a simulação e dados de radiossondagem, sendo a linha vermelha os resultados com o VTEB e a linha azul com o TEB, para a) 00Z do dia 18 de julho, b) 12Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 de julho e d) 12Z do dia 19 de julho.....	52
Figura 3.9 – Imagem do sensor MODIS do satélite TERRA do dia 9 de julho de 2008 sobre a região de São Paulo. Horário da passagem é de 13h55Z	54
Figura 3.10 – Temperatura da superfície (°C) durante o dia a) MODIS, e temperatura da superfície da vegetação (°C) das simulações b) TEB e c) VTEB do dia 19 de julho de 2008 das 14Z.....	55
Figura 3.11 – Isolinhas de temperatura do ar a 2 m (°C) e vento horizontal (m/s) no primeiro nível. A coluna da esquerda representa as saídas da simulação TEB para as a) 00Z e c) 15Z do dia 18 de julho e, e) 00Z e g) 15Z do dia 19 de julho. A coluna da direita representa as saídas da simulação VTEB para as b) 00Z e d) 15Z do dia 18 de julho e, f) 00Z e h) 15Z do dia 19 de julho.	57
Figura 3.12 – Campo de convergência do vento (s^{-1}) para a RMSP. A coluna da esquerda representa as saídas da simulação VTEB para as a) 13Z do dia 18 de julho e c) 21Z do dia 19 de julho. A coluna da direita são as saídas da simulação TEB para as b) 13Z do dia 18 de julho e d) 21Z do dia 19 de julho.	58
Figura 3.13 – Diferença de fluxo de calor sensível (em $W \cdot m^{-2}$) entre as simulações TEB e VTEB para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.....	59
Figura 3.14 – Diferença de fluxo de calor latente (em $W \cdot m^{-2}$) entre as simulações TEB e VTEB para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.....	60
Figura 3.15 – Diferença da razão de Bowen entre as simulações TEB e VTEB para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.	60

Figura 3.16 – Corte vertical de diferença de umidade relativa (em %) entre a simulação TEB e VTEB, na latitude -23,5, central a RMSP, para a) 15 Z e b) 18 Z do dia 18 de julho, c) 15 Z e d) 18 Z do dia 19 de julho.	61
Figura 3.17 – Diferença de saldo de radiação (em $W \cdot m^{-2}$) entre as simulações TEB e VTEB para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.....	62
Figura 3.18 – Diferença de fluxo de calor armazenado no solo (em $W \cdot m^{-2}$) entre as simulações TEB e VTEB para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.....	63
Figura 4.1 – Evolução diária da intensidade da ICU para um ponto central da RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha verde a simulação com albedo do telhado igual a 0,08 e a linha vermelha a simulação com o albedo do telhado igual a 0,90.	68
Figura 4.2 – Campos de intensidade de ICU. A coluna da esquerda é relativa à simulação com albedo igual a 0,08 e a da direita relativa à simulação com albedo igual a 0,90. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 18 de julho.	69
Figura 4.3 – Campos de intensidade de ICU. A coluna da esquerda é relativa à simulação com albedo igual a 0,08 e a da direita relativa à simulação com albedo igual a 0,90. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 19 de julho.	70
Figura 4.4 – Evolução diária da intensidade da temperatura efetiva para um ponto central da RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha verde a simulação com albedo do telhado igual a 0,08 e a linha vermelha a simulação com o albedo do telhado igual a 0,90.	70
Figura 4.5 – Campos da diferença entre a temperatura efetiva da simulação controle e daquela com albedo modificado. A coluna da esquerda é relativa à simulação como albedo igual a 0,08 e a da direita é relativa à simulação com albedo igual a 0,90. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 18 de julho; e) e f) 00Z, g) e h) 15Z do dia 19 de julho.....	71
Figura 4.6 – Evolução diária da intensidade da ICU para um ponto central da RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com emissividade das superfícies aumentada para 1.	73
Figura 4.7 – Campos de intensidade de ICU para as a) 00 Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 15Z do dia 18 de julho obtidos da simulação com emissividade igual a 1.	73
Figura 4.8 – Campos de intensidade de ICU para as a) 18Z do dia 18 de julho e b) 00Z do dia 19 de julho obtidos da simulação com emissividade igual a 1.	74
Figura 4.9 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com emissividade das superfícies aumentada para 1. A linha horizontal contínua representa o limite da situação agradável – levemente fresco para levemente quente.	74

- Figura 4.10 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação com emissividade 1 e simulação controle para as a) 00 Z, b) 15Z, c) 18Z do dia 18 de julho e d) 00Z, e) 15Z e f) 18Z do dia 19 de julho..... 75
- Figura 4.11 – Evolução diária da intensidade da ICU para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com a condutividade térmica das superfícies reduzida 10 vezes..... 77
- Figura 4.12 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com a condutividade térmica das superfícies reduzida 10 vezes. A linha horizontal contínua representa o limite da situação agradável – levemente fresco para levemente quente. 77
- Figura 4.13 – Campos de intensidade da ICU para a simulação com a condutividade térmica reduzida 10 vezes da simulação controle às a) 00 Z, d) 15Z, c) 18Z do dia 18 de julho e d) 00Z, e) 15Z e f) 18Z do dia 19 de julho..... 78
- Figura 4.14 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre simulação controle e a simulação com a condutividade térmica reduzida 10 vezes para a) 00 Z, b) 15Z, c) 18Z do dia 18 de julho, e d) 00Z, e) 15Z e f) 18Z do dia 19 de julho. 79
- Figura 4.15 – Evolução diária da intensidade da ICU para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com a capacidade de calor das superfícies aumentada em 10 vezes. 81
- Figura 4.16 – Campos de intensidade da ICU para a simulação com a capacidade térmica aumentada 10 vezes obtidos da simulação controle das a) 00 Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 15Z, e) 18Z do dia 18 de julho, e f) 00Z, g) 15Z e h) 18Z do dia 19 de julho.81
- Figura 4.17 – Campos de intensidade da ICU para a simulação com a capacidade térmica aumentada 10 vezes da simulação controle das a) 00 Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 15Z, e) 18Z do dia 18 de julho e f) 00Z, g) 15Z e h) 18Z do dia 19 de julho..... 82
- Figura 4.18 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com a capacidade de calor das superfícies aumentada 10 vezes. A linha horizontal contínua representa o limite da situação agradável – levemente fresco para levemente quente. 83
- Figura 4.19 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e a simulação com a capacidade térmica aumentada em 10 vezes para a) 00 Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 15Z do dia 18 de julho..... 83
- Figura 4.20 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e a simulação com a capacidade térmica aumentada em 10 vezes para a) 18Z do dia 18 de julho, b) 00Z, c) 15Ze d) 18Z do dia 19 de julho..... 84
- Figura 4.21 – Evolução diária da intensidade da ICU para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha azul representa a simulação com o valor da razão geométrica de todo o uso de solo urbano multiplicada por dois

- e a linha verde, com a razão geométrica reduzida pela metade do seu valor original. 85
- Figura 4.22 – Campos de intensidade da ICU. A coluna da esquerda é relativa à simulação com razão geométrica reduzida pela metade e a da direita relativa à simulação com o dobro do seu valor original. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 18 de julho. 86
- Figura 4.23 – Campos de intensidade da ICU. A coluna da esquerda é relativa à simulação com razão geométrica reduzida pela metade e a da direita relativa à simulação com o dobro do seu valor original. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 19 de julho. 87
- Figura 4.24 – Evolução diária da TE para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha azul representa a simulação com o valor da razão geométrica de todo o uso de solo urbano multiplicada por dois e a linha verde a simulação com a razão geométrica reduzida pela metade do seu valor original. As linhas horizontais representam os limites de conforto térmico descritos na Tabela 4.1. 88
- Figura 4.25 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e as simulações com razão geométrica pela metade (coluna da esquerda) e com razão geométrica multiplicada por dois (coluna da direita), para a) e b) 15 Z e c) e d) 18 Z do dia 18 de julho. 88
- Figura 4.26 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e as simulações com razão geométrica pela metade (coluna da esquerda) e com razão geométrica multiplicada por dois (coluna da direita), para a) e b) 15 Z e c) e d) 18 Z do dia 19 de julho. 89
- Figura 4.27 – Evolução da intensidade da ICU para o ponto central da RMSP. A linha preta é relativa à simulação controle, a linha azul é relativa à simulação com NDVI aumentado em 20% e a linha verde é relativa à simulação com redução em 20% do NDVI. 90
- Figura 4.28 – Campos de intensidade da ICU para a simulação com o NDVI com aumento de 20% do seu valor original para a) as 10Z e c) 18Z do dia 18 de julho. 91
- Figura 4.29 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha verde a simulação com NDVI aumentado em 20% e a linha azul a simulação com redução de 20% do seu valor original. A linha horizontal contínua representa o limite da situação agradável – levemente fresco para levemente quente. 92
- Figura 4.30 – Diferença de temperatura efetiva entre as simulações com a) NDVI com aumento de 20%, b) NDVI com redução de 20% e a simulação controle para as 08 Z do dia 19 de julho. 93
- Figura 4.31 – Evolução da intensidade da ICU para o ponto central da RMSP. A linha preta é relativa à simulação controle, a azul é relativa à simulação com vegetação urbana do tipo floresta mista (alta) e a linha verde é relativa à simulação com vegetação do tipo grama baixa. 94

Figura 4.32 – Campo de intensidade da ICU para a simulação com o a) vegetação alta e b) vegetação baixa para as 15 Z do dia 18 de julho.	95
Figura 4.33 – Diferença de a) fluxo de calor latente e b) radiação solar incidente na superfície entre as simulações com vegetação alta e a simulação controle para as 15 Z do dia 18 de julho.....	95
Figura 4.34 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP, para as simulações controle (linha preta), com vegetação alta (linha azul) e com vegetação baixa (linha verde).	96
Figura 4.35 – Diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e as simulações com vegetação alta para as a) 15 Z do dia 18 de julho e c) 00 Z do dia 19 de julho e vegetação baixa para b) 15 Z do dia 18 de julho e d) 00 Z do dia 19 de julho.	97
Figura 5.1 – Fator de visão do céu em função da razão geométrica. Baseado em Morais (2010).....	98
Figura 5.2 – Obstrução causada pela edificação. Retirado de Ribeiro (2009).	99
Figura 5.3 – Perspectiva de um cânion com comprimento infinito, onde h é altura das construções e w a largura do cânion. Adaptado de Harman (2003).	100
Figura 5.4 – Modelos de câmera fotográfica digital e lente olho-de-peixe utilizados neste trabalho.	101
Figura 5.5 – Diagrama desenvolvido para projeção equidistante. Os valores do fator de forma são calculados a partir da projeção da abóbada celeste no plano horizontal (SANTOS et al, 2003).	102
Figura 5.6 – Localidades onde se obteve os valores empíricos de FVC (pontos azuis). A figura de baixo amplifica o local, marcado no retângulo em vermelho no mapa da RMSP. Os números indicam a localidade da tabela A1 no anexo A.	103
Figura 5.7 – FVC interpolado para a cidade de São Paulo.....	104
Figura 5.8 – Evolução diária da Temperatura do ar a 2 metros, em Celsius, em que a linha cinza contínua representa a simulação VTEB, a linha preta tracejada representa a simulação SVF e a linha preta contínua as observações. Os painéis representam os valores obtidos em a) São Caetano, b) Guarulhos, c) Congonhas, d) Campo de Marte, e) Mirante de Santana e f) IAG.....	106
Figura 5.9 – Evolução diária da umidade específica do ar a 2 metros, em g/kg, em que a linha cinza contínua representa a simulação VTEB, a linha preta tracejada representa a simulação SVF e a linha preta contínua, as observações. a) IAG, b) Guarulhos, c) Congonhas, d) Campo de Marte e e) Mirante de Santana.....	108
Figura 5.10 – Diferença de temperatura entre a simulação SVF e VTEB para a RMSP das 15Z e 18Z. Os campos apresentados em a) e b) são referentes ao dia 18/07 e os apresentados em c) e d) ao dia 19/07.	109

Figura 5.11 – Esquema de resistências e perfil do vento no interior do cânion. Retirado de Masson (2000).	111
Figura 5.12 – Evolução diária da intensidade da velocidade horizontal do vento no interior do cânion urbano para os 4 tipos de uso de solo da RMSP. A linha verde corresponde à simulação FVC com os valores de fator de visão do céu empíricos, enquanto a linha preta corresponde ao modelo VTEB com os valores de razão geométrica apresentadas na coluna mais a direita da Tabela 5.2.....	112
Figura 5.13 – Campos de diferença de temperatura no interior do cânion entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentadas na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 12Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 12Z do dia 19 de julho.....	114
Figura 5.14 – Campos de diferença de fluxo de calor sensível entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentadas na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 15Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 15Z do dia 19 de julho.	115
Figura 5.15 – Campos de diferença de fluxo de calor latente entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentadas na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 15Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 15Z do dia 19 de julho.	116
Figura 5.16 – Campo de diferença de saldo de radiação entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentados na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 15Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 15Z do dia 19 de julho.	117
Figura 5.17 – Campo de diferença de fluxo de calor no solo entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentados na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 15Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 15Z do dia 19 de julho.	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais características e parametrizações disponíveis no BRAMS (COTTON et al, 2003).	32
Tabela 3.1 – Opções disponíveis no BRAMS, utilizadas neste estudo.	42
Tabela 3.2 – Valores de alguns parâmetros utilizados dentro do TEB para as simulações. Os valores do albedo das superfícies foram obtidos de Morais <i>et al</i> (2009).....	42
Tabela 3.3 – Estações utilizadas na RMSP para validação do modelo.....	45
Tabela 3.4 – Índices estatísticos para temperatura do ar a 2 m, para avaliação das simulações com dados das estações da Tabela 3.3. BIAS corresponde ao viés da simulação, RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio, PC é a porcentagem correta, SS é o <i>skill</i> score da simulação e MAPE é o erro percentual médio absoluto. Definições dos índices podem ser encontradas em Wilks (2006). D_{Pielke} é o índice de Pielke (2002) proposto por Hallak e Pereira Filho (2011).	47
Tabela 3.5 – Índices estatísticos para umidade específica do ar a 2 m, calculados para avaliação das simulações com dados das estações da Tabela 3.3. Os índices são os mesmos da Tabela 3.4. A estação de São Caetano não foi avaliada por indisponibilidade de dados observados.....	48
Tabela 4.1 – Classificação das condições de conforto térmico humano pela temperatura efetiva. Fonte: HENTSCHEL (1986; citado em SUPING et al.,1992).	66
Tabela 4.2 – Valores da condutividade térmica (em $W m^{-1} K^{-1}$) da simulação controle para as três camadas que compõem as superfícies dos prédios no TEB (Figura 4.9). Valores obtidos em Freitas (2003). Para a simulação do teste de sensibilidade, os valores da condutividade foram reduzidos 10 vezes do seu valor original. .	76
Tabela 4.3 – Valores da capacidade térmica (em $10^6 J K m^{-3}$) da simulação controle para as três camadas que compõem as superfícies dos prédios no TEB (Figura 7). Valores obtidos em Freitas (2003). Para a simulação do teste de sensibilidade, estes valores foram aumentados 10 vezes do seu valor original.....	80

Tabela 5.1 – Valores de FVC obtidos pela câmera digital com lente olho-de-peixe e com a álgebra do fator de forma (Equação 5.1).	104
Tabela 5.2 – Índices estatísticos para temperatura do ar a 2 m, para avaliação das simulações com dados das estações da Tabela 3.3. BIAS corresponde ao viés da simulação, RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio, PC é a porcentagem correta, SS é o skill score da simulação e MAPE é o erro percentual médio absoluto. Definições dos índices podem ser encontradas em Wilks (2006). D_{Pielke} é o índice de Pielke (2002) proposto por Hallak e Pereira Filho (2011).	107
Tabela 5.3 – Índices estatísticos para umidade específica do ar a 2 m, calculados para avaliação das simulações com dados das estações da Tabela 3.3. Os índices são os mesmos da Tabela 5.2. A estação de São Caetano não foi avaliada por indisponibilidade de dados observados.....	109
Tabela A. 1 – ID, rua, localização, foto e valores de FVC obtidos empiricamente, apresentados na Figura 5.6.....	140

LISTA DE ABREVIATURAS

BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
BRAMS	Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System
CAD	Computer Aided Design – Desenho Assistido por Computador
CBERS	Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres
CLS	Camada Limite Superficial
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
FVC	Fator de Visão do Céu
FPAR	Fração Fotossinteticamente Ativa da Radiação
GFS	Global Forecast System
GPS	Global Positioning System
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	Ilha de Calor Urbana
ISAN	Isentropic Analysis package
LDAS	Land Data Assimilation System
LEAF	Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model
LES	Large Eddy Simulation

MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
NASA	National Atmospheric and Space Administration
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NIR	Infravermelho próximo
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SiB	Simple Biosphere Model
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SR	Razão Simples
STM	Secretaria de Transportes Metropolitanos
SVF	Sky-View Factor
TE	Temperatura Efetiva
TEB	Town Energy Budget
TSMO	Teoria da Similaridade de Monin-Obukhov
TVM-NH	Topographic Vorticity-Mode Model – Non-Hydrostatic
USGS	United States Geological Survey
Veg-TEB	Vegetated Town Energy Budget
VUCM	Vegetated-Urban Canopy Model

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
1.1	Objetivo	28
2	MODELO BRAMS	30
2.1	Superfície.....	33
2.1.1	LEAF	33
2.1.2	TEB.....	35
2.1.2.1	Inclusão do efeito da vegetação.....	37
3	AVALIAÇÃO	41
3.1	Análise Qualitativa	45
3.1.1	Radiosondagens.....	50
3.1.2	Área	53
3.2	Análise Quantitativa	55
3.3	Sumário.....	63
4	TESTES DE SENSIBILIDADE.....	65
4.1	Albedo da Superfície	67
4.2	Emissividade da Superfície	72
4.3	Condutividade Térmica	76
4.4	Capacidade Térmica	80
4.5	Razão Geométrica.....	84
4.6	NDVI	89
4.7	Tipo de Vegetação	93
5	FATOR DE VISÃO DO CÉU.....	98
5.1	Metodologia.....	101
5.2	Simulações.....	104
5.2.1	Avaliação	105
5.2.2	Testes de Sensibilidade.....	110
6	CONCLUSÕES	119
6.1	Sugestões e trabalhos futuros	124
	REFERÊNCIAS	127
	ANEXO A	141

1 INTRODUÇÃO

Desde 1969, as Nações Unidas realiza estudos sobre crescimento da população urbana e projeções para todo o mundo (UN REPORT, 1969). Num relatório mais recente (UN REPORT, 2012b), somente na América Latina, a população urbana irá crescer em 178 milhões de pessoas até 2050 (Figura 1.1).

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) tem tido uma atenção especial das Nações Unidas desde 1993, quando um relatório especial apontou o crescimento da população urbana de 5% ao ano entre as décadas de 50 e 70, com possibilidades de alcançar a segunda cidade mais populosa do mundo no início de 2000, perdendo apenas para Tóquio, e com uma política pública escassa (UN REPORT, 1993). Apesar de o crescimento populacional ter sido abaixo do esperado, a RMSP é a sexta região mais populosa do mundo e a segunda da América Latina (UN REPORT, 2012a). Neste último relatório, as Nações Unidas apontam uma previsão de crescimento anual de 1,08% no número de habitantes entre 2011 e 2025.

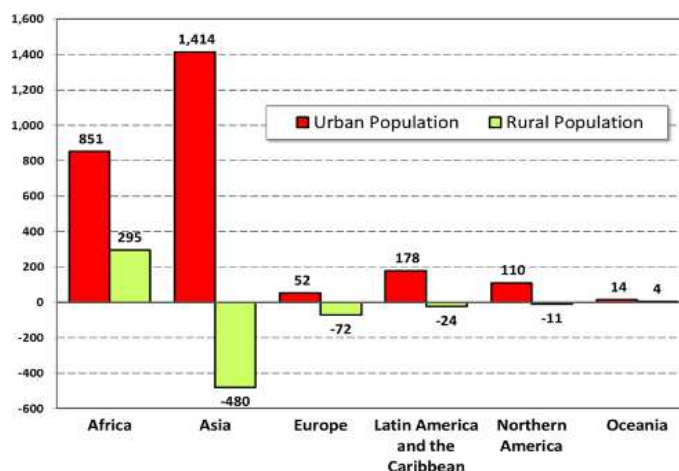


Figura 1.1 – Projeção de mudanças na população urbana e rural entre 2011 e 2050. Valores em milhões. Retirado de UN REPORT (2012b).

Com o aumento da população nas cidades nota-se um crescimento da área urbanizada, assim, superfícies naturais são trocadas por superfícies artificiais, alterando suas propriedades térmicas (p. ex., capacidade de calor; SHEPHERD *et al.*, 2002). Esta modificação da superfície provoca alterações no padrão de rugosidade, na redução da intensidade do vento, da umidade disponível no solo e a nas propriedades radiativas (KALNAY E CAI, 2003). Todas estas mudanças caracterizam um efeito no microclima local conhecido como Ilha de Calor Urbana (ICU). Esta é uma característica transiente das áreas urbanas, onde a temperatura do ar próximo à superfície da cidade é mais elevada que a temperatura das áreas rurais circunvizinhas (Figura 1.2).

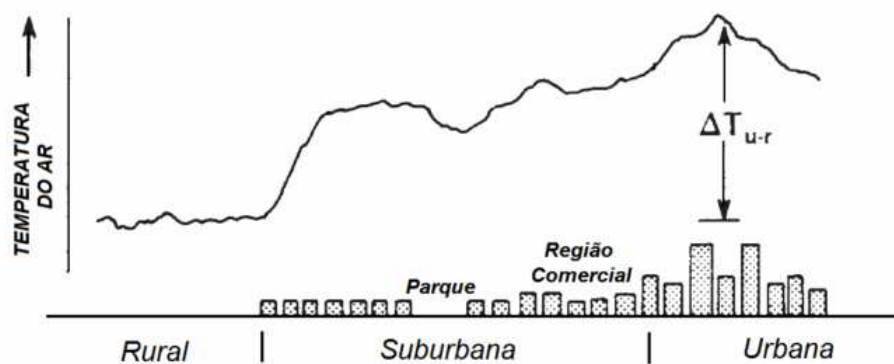


Figura 1.2 – Variação da temperatura para diversos pontos nas regiões rurais, suburbana e urbana. ΔT_{u-r} representa a diferença entre a temperatura na região mais urbanizada e a região rural. Adaptado de Oke (1987; retirado de Urbina Guerrero, 2010)

Arnfield (2003) destaca os fatores determinantes que contribuem para a magnitude e a estrutura da ICU, e que o papel da área rural na determinação destas modificações não pode ser entendido. Sua intensidade pode variar com relação ao tamanho da cidade, velocidade do vento, cobertura de nuvens (ATKINSON, 2003), além da localização geográfica da região urbana. Oke (1988), Montálvez *et al.* (2000) e Morris e Simmonds (2000) demonstraram que, em latitudes médias, a ICU é mais intensa durante o período noturno, enquanto que em latitudes tropicais, o seu desenvolvimento se dá durante o dia. No caso da RMSP, uma região

de transição entre regimes de latitudes médias e tropicais, Freitas (2003), através de estudos de modelagem numérica, identificou intensidades maiores no período noturno. Freitas *et al.* (2007) mostrou que a ICU pode gerar uma circulação que pode contribuir para um aumento de concentração de poluentes, no caso da RMSP, assumindo topografia plana. Também para a RMSP, Moraes (2010) mostrou que a intensidade da ICU é capaz de gerar e manter uma circulação associada ao gradiente horizontal de temperatura.

Outro aspecto importante das cidades é a presença de uma contribuição antropogênica bastante intensa no balanço de energia. Segundo Oke (1988), sobre uma região urbana o balanço de energia na superfície pode ser representado através do balanço em um elemento de volume correspondente ao dossel urbano (Figura 1.3), e pode ser expresso como

$$R_N + Q_F = H + LE + G + Q_A \quad (1.1)$$

em que R_N é o saldo de radiação, Q_F é o fluxo de energia antropogênica, H é o fluxo turbulento de calor sensível, LE é o fluxo turbulento de calor latente, G (conforme mostrado na Figura 1.3) é o fluxo armazenado no dossel e Q_A é a advecção horizontal de energia.

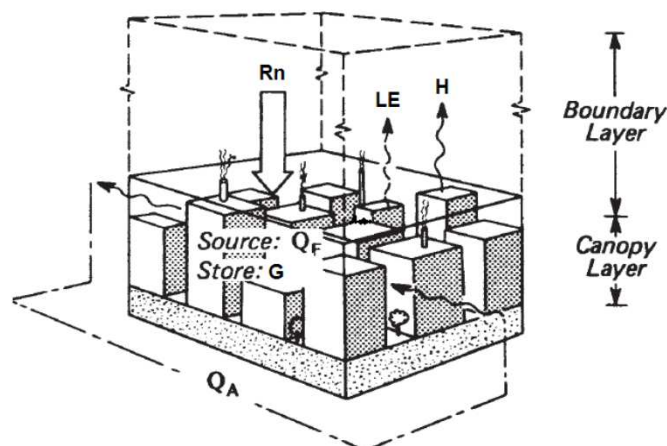


Figura 1.3 – Esquema do balanço de energia no dossel urbano. Retirado de Oke (1988).

Comparativamente a regiões rurais adjacentes, em geral, esta fonte extra de energia associada à atividade antropogênica aumenta a quantidade de energia disponível, intensificando o aquecimento da camada limite e a ICU. Conforme descrito em Morais (2010), esta quantidade de energia gera um aumento da camada de mistura durante o dia e, durante a noite, é possível observar convecção térmica sobre a região urbana com intensidade suficiente para gerar uma camada de mistura (CERMAK *et al.*, 1995; Figura 1.4).

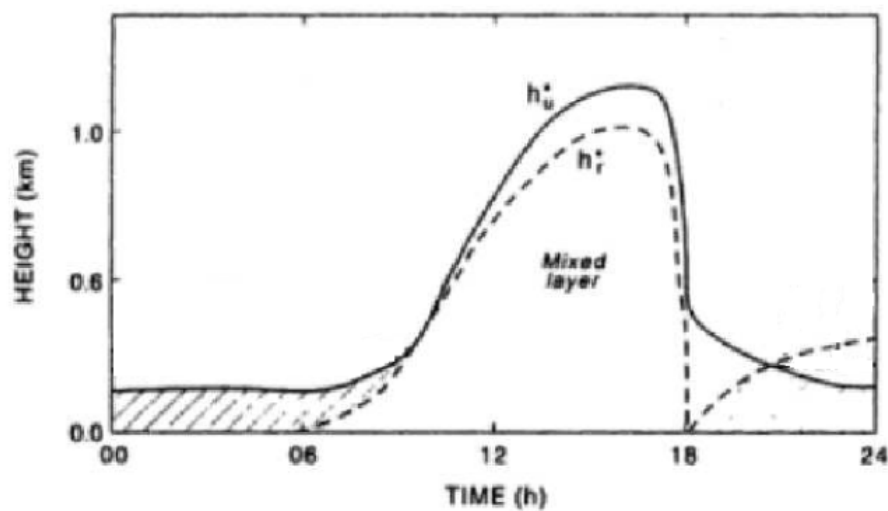


Figura 1.4 – Comparação entre evolução diurna da altura da camada limite (h^*) na área urbana (linha contínua e índice u) e rural (linha tracejada e índice r). Baseado em Cermak *et al.* (1995).

Visto a importância das áreas urbanas no microclima de uma região, estudar as propriedades térmicas e dinâmicas de uma cidade é importante para uma série de aplicações. O estresse resultante de uma ICU pode se tornar um problema de saúde pública (DABBERT *et al.*, 2000), assim como a dispersão de poluentes devido a características locais (OKE, 1988; FREITAS, 2003) e condições sinóticas (KETZEL *et al.*, 2002; URBINA GUERRERO, 2010). Além disso, arquitetos e engenheiros civis necessitam de conhecimento detalhado do vento em áreas urbanas, para determinar o comprimento da estrutura e a energia necessária para novos prédios (BRITTER E HANNA, 2003; HARMAN, 2003). Assim, com o crescimento

computacional e o aumento da resolução, os modelos numéricos de previsão de tempo têm se tornado uma importante ferramenta no estudo da camada limite urbana.

Martilli (2007) e Freitas (2008) destacam a importância de uma boa representação das características das superfícies nos modelos numéricos. Desde 2000, os modelos numéricos começaram a representar as regiões urbanas através de cânions, que consiste de duas colunas paralelas representando as construções, baseado na proposta inicial de Nunez e Oke (1977). Vários modelos foram desenvolvidos, desde os chamados “camada simples”, como os propostos por Masson (2000) e Kusaka *et al.* (2001), que consistem de diversas aproximações empíricas e atuam apenas como representação da superfície; aos “multicamadas”, como o proposto por Martilli *et al.* (2002), no qual o esquema de interação superfície-urbano-atmosfera conta com níveis verticais e construções de diversas alturas num único ponto de grade. Estes esquemas contribuem para uma melhor representação do efeito da ICU e da circulação em regiões urbanas (FREITAS, 2003; MORAIS, 2010), além do efeito local do transporte vertical e horizontal de poluentes (SILVA JUNIOR, 2009; CARVALHO, 2010; ITIMURA, 2010; URBINA GUERRERO, 2010).

Nestes esquemas, uma importante variável que define a estrutura urbana é o Fator de Visão do Céu (FVC). O FVC é definido como sendo a razão entre o ângulo sólido pelo qual um dado ponto da rua ou da parede “vê” a superfície irradiadora (céu) e o ângulo sólido subentendido pelo céu (MARCIOOTTO, 2008). Santamouris (2001) destaca que o próprio aspecto geométrico, envolvendo o FVC, influi na geração e intensidade da ICU, visto que contribui para uma diminuição na emissão de radiação de onda longa pelo cânion, resultante das interações entre as superfícies. Eliasson (1996) mostrou uma correlação entre a temperatura da superfície e o FVC para uma região próxima a um parque na cidade de Gotemburgo, na Suécia. Para a RMSP, Marciotto *et al.* (2010) mostraram que a evolução da temperatura segue

um comportamento similar ao do fluxo de calor sensível com relação ao FVC, com uma diminuição à medida que a razão geométrica aumenta no período diurno.

Atualmente formado por 39 municípios, a RMSP ($23^{\circ}30'S$, $46^{\circ}30'O$; Figura 1.5) tem aproximadamente 21 milhões de habitantes numa área de quase 8500 km² (IBGE, 2010), sendo quase 12 milhões apenas na cidade de São Paulo. Com uma frota de aproximadamente 5,5 milhões de automóveis (STM, 2014) e mais de 55 mil indústrias, a cidade apresenta sérios problemas de saúde relacionados à poluição (BRAGA *et al.*, 2001; RIBEIRO E CARDOSO, 2003; GURJAR *et al.*, 2010).

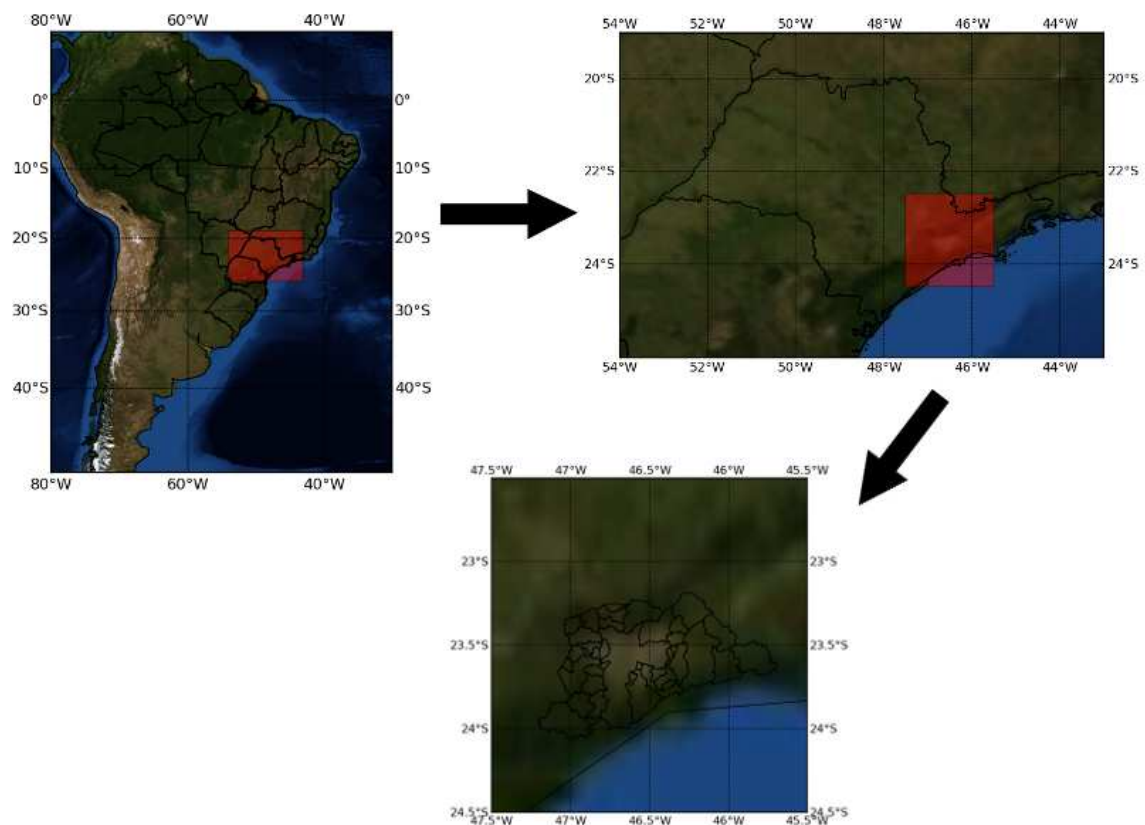


Figura 1.5 – Localização geográfica da RMSP.

Típico de regiões subtropicais do Brasil, o clima da cidade de São Paulo é caracterizado por um inverno seco e verão úmido (OLIVEIRA *et al.*, 2003). O regime de ventos é determinado

por ventos de N-NE durante o verão e de NE-E durante o inverno. Os ventos médios são fracos, oscilam entre 1 e 2 m s⁻¹, favorecendo a formação e desenvolvimento de circulações locais associados aos efeitos de topografia e da ocupação do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2003). A topografia da RMSP é caracterizada, na direção leste-oeste, pela presença do Vale do Rio Tietê (Figura 1.6), e pode alcançar picos de até 1000 m no extremo Norte. Apesar de não muito acidentada, a topografia da RMSP se distribui de forma a intensificar as circulações de brisa marítima e terrestre através da superposição dessas brisas com a circulação do tipo vale-montanha (OLIVEIRA *et al.*, 2003; FREITAS, 2003; PEREIRA DE SOUSA, 2006).

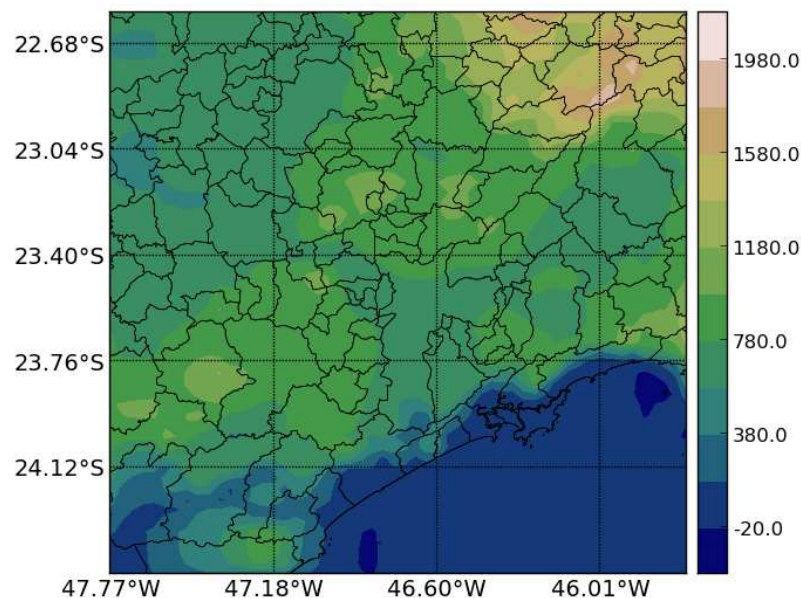


Figura 1.6 – Topografia da RMSP. Escala de cores em metros.

Gouvêa (2007) realizou estudos observacionais e numéricos para identificar o conforto térmico humano na RMSP. Tanto os dados quanto as simulações apontaram que as regiões consideradas altamente urbanizadas apresentaram o maior número de casos de desconforto, enquanto regiões mais arborizadas mostraram-se mais confortáveis. Apesar dos resultados observados por Gouvêa (2007), Gonçalves *et al.* (2011), analisando uma área altamente densa na região da Luz, afirma que o efeito de sombreamento causado pelas diferentes construções

associado ao clima da cidade de São Paulo, contribui para a qualidade do espaço urbano, no que se refere à entrada de energia solar e conforto térmico. Resultados similares foram encontrados por Johansson *et al.* (2013), utilizando o modelo de microescala ENVI-met (BRUSE, 2010) e um índice de conforto térmico subjetivo desenvolvido para a cidade de São Paulo (MONTEIRO E ALUCCI, 2011). Analisando a população a partir dos 65 anos, Gonçalves *et al.* (2013) mostram que, para a RMSP, resultados sugerem que durante o verão a população geriátrica sente mais desconforto devido ao calor e menos desconforto durante o período de inverno.

O resultado apresentado por Gouvêa (2007) mostra o importante papel da vegetação nas cidades. Uma área urbana é uma combinação de elementos como prédios, casas, bosques, etc. Sheets e Manzer (1991) mostraram que, adicionando vegetação ao longo de uma rua ocorre uma melhora na qualidade de vida das pessoas. Santamouris (2001) mostra que a vegetação em regiões urbanas contribui para minimizar o calor, devido ao efeito de sombreamento, entre outras contribuições, como valorização do lugar e minimizar o excesso de sons. Duarte e Serra (2003) mostram uma relação direta entre a quantidade de vegetação e a temperatura de uma região. Picot (2004) destaca o uso da vegetação urbana em Milão, na Itália, na tentativa de minimizar o efeito da radiação solar no conforto térmico e contribuir para o planejamento urbano. Georgi e Dimitriou (2010), variando o tipo de vegetação de um local, mostram que as áreas verdes em cidades diminuí o efeito da ICU devido à redução da temperatura e aumento da evaporação, influenciando a percepção e o comportamento humano sobre diferentes contextos urbanos, como o econômico e fisiológico. Além do efeito subjetivo nas pessoas, Jauregui (1990) mostrou, a partir da observação, que a precipitação convectiva pode ser menor em regiões com parques e bosques. Esta redução foi atribuída aos ventos em baixos níveis, causado pelas árvores mais altas nos parques, aumentando a intensidade da turbulência. Outro efeito da vegetação é com relação à qualidade do ar. Taha (1996), usando

um modelo de mesoescala com um módulo fotoquímico, mostrou que a vegetação diminui a concentração de ozônio. As simulações foram realizadas utilizando três tipos de espécies de árvores que emitem hidrocarbonetos.

Visto a importância do papel da vegetação nas regiões urbanas, deve-se levar em conta a caracterização da vegetação em esquemas de interação dossel urbano-atmosfera. Realizando simulações de maneira *off-line*, Hamdi e Schayes (2008) incluíram a fração de vegetação no modelo TVM-NH (Topographic Vorticity-Mode Model – Non-Hydrostatic; SCHAYES *et al.*, 1996; THUNIS E CLAPPIER, 2000) no módulo urbano proposto por Martilli *et al.* (2002). Os resultados mostraram que com a inclusão da vegetação, as simulações reproduzem de forma mais correta os dados observados na região da Basileia, Suíça. Da mesma maneira, utilizando o modelo RAMS com o módulo TEB (Town Energy Budget, MASSON, 2000), Gouvêa (2007) verificou que a presença da vegetação na RMSF atua na diminuição do aquecimento na área urbana, limitando o desenvolvimento da camada limite, que, geralmente, permanece mais rasa sobre estas áreas. Desta forma, a vegetação também pode atuar na instabilidade da atmosfera. Estes resultados são semelhantes ao de Avissar (1996).

Recentemente, modelos de interação dossel urbano-vegetação-atmosfera têm sido desenvolvidos para serem executados simultaneamente, ou seja, de maneira *online*. Lee e Park (2007) desenvolveram o VUCM (Vegetated-Urban Canopy Model), baseado no TEB. Além dos três balanços de energia calculados pelo TEB (parede, rua e telhado), são incluídos mais dois (folha e solo), referentes à vegetação. Efeitos no balanço de radiação, no vento e no tamanho do vórtice turbulento, também são considerados. O modelo em questão foi avaliado para Vancouver, no Canadá, e Marselha, na França. Em ambos os casos, os resultados mostraram que o modelo simula bem as observações de temperatura da superfície,

temperatura do ar e umidade específica do dossel, fluxo de momentum, saldo de radiação e a partição de energia em fluxos turbulentos e armazenado.

Outro modelo desenvolvido foi o *Veg-TEB* (LEMONSU *et al.*, 2012). Este modelo, considerado uma melhoria no TEB, é mais simples que o VUCM, pois pondera os fluxos turbulentos e só leva em consideração o efeito de reflexão múltipla entre a vegetação e o cânion urbano. Os resultados mostram que, apesar de simples, a presença da vegetação melhora a representatividade da vegetação da forma do cânion e a acurácia da simulação do microclima do cânion.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo principal a caracterização das propriedades da superfície e do impacto da cobertura vegetal no planejamento da RMSP. Para isto, foram realizados os seguintes passos:

- Aprimoramento e validação da representação de áreas vegetadas nas regiões urbanas dentro do TEB, para a análise do impacto da vegetação nas variáveis meteorológicas e no balanço de energia na superfície;
- Determinação experimental do FVC para cada tipo de solo urbano através de uma lente olho-de-peixe;
- Realização de estudos de sensibilidade, variando as propriedades dinâmicas, radiativas e termodinâmicas, além da fração de área vegetada e o tipo de vegetação no dossel urbano.

O capítulo 2 apresenta um detalhamento do modelo BRAMS e as parametrizações utilizadas neste trabalho, com foco no esquema urbano TEB e a modificação para inclusão da vegetação no módulo. No capítulo 3, uma avaliação desta implantação para um dia de céu claro, juntamente com uma análise qualitativa e quantitativa da vegetação na RMSP é realizada. Testes de sensibilidade variando as propriedades térmicas e dinâmicas da superfície, além da estrutura da vegetação no dossel urbano, são investigados no capítulo 4. O capítulo 5 apresenta a metodologia e os resultados obtidos com a câmera digital e a lente olho-de-peixe para os valores de FVC na RMSP. Além disso, simulações foram realizadas e os resultados avaliados com os valores obtidos pela álgebra do FVC (original no modelo TEB). Também foi realizado um teste de sensibilidade verificando o papel do FVC e, conseqüentemente, da estrutura dos cânions urbanos no microclima local. Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 MODELO BRAMS

Desenvolvido na Colorado State University, o RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*; COTTON *et al*, 2003) é um modelo de previsão numérica de tempo que simula as circulações da atmosfera numa escala desde todo o hemisfério até simulação de grandes turbilhões (LES) da camada limite planetária (COTTON *et al*, 2003). Foi originalmente desenvolvido para entender a dinâmica de nuvens cumulus (TRIPOLI e COTTON, 1982).

O modelo BRAMS (*Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System*; FREITAS *et al*, 2009) é um modelo de mesoescala baseado no RAMS com várias modificações para melhor representar os processos atmosféricos para regiões tropicais e subtropicais.

A execução do BRAMS é esquematizada na Figura 2.1. No pré-processamento, as saídas do modelo global (CPTEC, GFS 0.5, GFS 1°, Reanálise, etc.) são utilizadas pelo programa GERADP, que realiza a formatação para ser inseridas como condições iniciais e nudging do modelo. O MAKESFC insere os dados de superfície, como temperatura da superfície do mar, topografia, uso de solo, etc. Estes dados geralmente são obtidos por sensoriamento remoto. Para finalizar o pré-processamento, o MAKEVFILE une todas as informações do GERADP e do MAKESFC e interpola na grade do modelo. Nesta etapa, dados de superfície também podem ser utilizados para a condição inicial e paranudging através do pacote RAMS-ISAN (TREMBACK, 1990). O INITIAL é o comando no namelist do BRAMS (RAMSIN) que representa a execução do modelo. O pós-processamento é dado pelo programa RAMSPOST, que gera as variáveis desejadas (como temperatura e umidade a 2m, velocidade do vento a

10m) num formato que pode ser utilizado em softwares de visualização, como o GrADS, o python ou MATLAB.

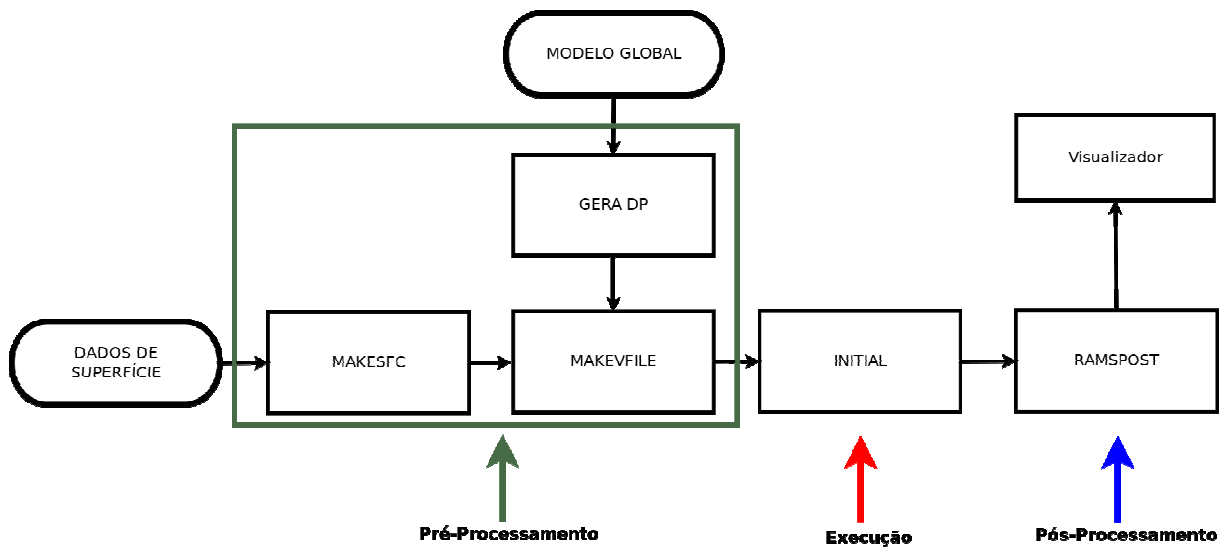


Figura 2.1 – Esquema de execução do BRAMS.

A versão do modelo BRAMS utilizada neste trabalho foi a 3.2 (baseada no RAMS 5.04). O modelo tem como base o conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico, incluindo parametrizações dos diversos processos físicos presentes nestas equações. Uma descrição detalhada das equações e parametrizações do modelo pode ser encontrada em Freitas (1999). A Tabela 2.1 mostra algumas opções de parametrizações e características disponíveis no modelo BRAMS.

Para a condição de fronteira inferior, o BRAMS representa os processos de interação entre a atmosfera e a superfície mediante a utilização do LEAF-3 (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model*, WALKO et al., 2000) para áreas cobertas por vegetação, água ou solo nu. O Town Energy Budget (TEB; MASSON, 2000; FREITAS, 2003; FREITAS *et al.*, 2007) é utilizado na representação dos processos de interações entre as áreas urbanizadas e a atmosfera. Alguns aspectos sobre estes módulos dentro do BRAMS serão apresentados a seguir.

Tabela 2.1 – Principais características e parametrizações disponíveis no BRAMS (COTTON et al, 2003).

Dimensão	-2D -3D
Coordenada Vertical	- Coordenada Cartesiana Padrão - Coordenada de altura seguindo o terreno sigma z - Coordenada de altura que intersecta o terreno (“shaved ETA”)
Coordenada Horizontal	- Transformação polar estereográfica
Estrutura de grade	- Arakawa-C - Grades aninhadas - Razão dimensão espacial e temporal das grades determinadas pelo usuário - Habilidade de adicionar ou remover grades
Diferença no tempo	- Combinação híbrida de Leap-Frog e avançado no tempo
Fechamento turbulento	- Esquema de fechamento de Smagorinsky (1963) (deformação-K closure) com modificações na estabilidade feitas por Lilly (1962) e Hill (1974). - Esquema de Deardorff level 2.5 – viscosidade turbulenta como função da Energia Cinética Turbulenta - Esquema Mellor-Yamada 2.5 (Mellor e Yamada, 1982) - Esquema subgrade de Kosovic (1997)
Microfísica	Cinco espécies de condensado de gelo - Level 1 – Sem nuvens - Level 2 – Somente condensação - Level 3 – Esquema single-moment bulk (WALKO et al, 1995) - Level 4 – Esquema 2-moment bulk (Meyers et al (1997). - Level 5 – Esquema 2-moment – University of Tel-Aviv, Tzivionet al (1987) e Reisin et al (1996)
Radiação	- Modelo de onda longa e onda curta sem processos de nuvens –Mahrer e Pielke (1977) - Modelo de onda longa e onda curta com processos de nuvens considerando todo condensado como líquido - Chen e Cotton (1983) - Modelo de onda longa e onda curta: esquema “two-stream” que interage com líquido e espectro do tamanho do hidrometeoro gelo de Harrington (1997) - Modelo CARMA (Community Aerosol & Radiation Model Atmosphere; Toon et al, 1988; Westphalet al, 1988; Westphal e Toon, 1991)
Camada inferior	- Parametrização solo-vegetação-neve LEAF 3 (WALKO et al, 2000)
Condições laterais	- Condição radiativa –Klemp e Wilhelmson (1978) - Condições limites de grande escala (nudging; Davies, 1983) - Limites cíclicos e periódicos
Inicialização	- Horizontalmente homogênea, a partir de uma radiossondagem - Pacote RAMS-ISAN – análise usando modelos de grande escala combinados com dados observados – Tremback (1990)
Assimilação de dados	- Análise 4D (nudging) de dados observados
Aspectos computacionais	- Sistemas UNIX/LINUX - Processamento paralelo usando MPI (Message Passing Interface) em plataformas com memórias compartilhadas e distribuídas

2.1 Superfície

2.1.1 LEAF

Para condição limite inferior, o BRAMS utiliza o LEAF (Land Ecosystem-Atmosphere Feedback Model; LEE, 1992), que é uma representação das características da superfície, tais como vegetação, solo, neve, lagos e oceano. Este módulo calcula a influência de um compartimento sobre os outros e sobre a coluna atmosférica. Inclui equações prognósticas para temperatura do solo e umidade para várias camadas, temperatura da vegetação e água superficial, incluindo orvalho e precipitação interceptada, massa da cobertura de neve e energia térmica para múltiplas camadas, assim como também contém equações para a temperatura e razão de mistura do vapor d'água no dossel. Os termos de troca nestas equações prognósticas incluem trocas turbulentas, condução do calor, difusão de água e percolação em camadas de solo e neve, transferências radiativas de onda longa e curta, transpiração e precipitação. Os fluxos de calor latente para evaporação do solo, da água interceptada pela vegetação e da transpiração das plantas são calculados separadamente.

Uma evolução da primeira versão do LEAF para o LEAF-2 (WALKO et al, 2000) é a inclusão dos *patches*, que é uma subdivisão de cada célula de grade em diferentes tipos de superfície (Figura 2.2). Esta aproximação tem a finalidade de representar de melhor forma as variações nas características da superfície (tipo de solo, umidade, inclinação, tipo de vegetação, corpos de água). As equações prognósticas são evoluídas para cada componente ou *patch* na célula de grade. 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, como descrito em Avissar (1996):

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

em que k refere-se ao tipo de fluxo turbulento (calor, umidade ou momento), ϕ_j^k é o fluxo total no elemento de grade j , n é o número de classes, ϕ_{ij}^k é o fluxo k calculado para a classe i , A_{ij} é a área ocupada pela classe i dentro da grade j .

No LEAF-2, além do transporte de água na vertical já introduzido na primeira versão, o modelo hidrológico TOPMODEL (BEVEN *et al.*, 1984, SIVAPALAN *et al.*, 1987, BAND *et al.*, 1993) é utilizado para representar o transporte lateral inclinado da água dentro de regiões saturadas do solo.

Outra evolução no LEAF, passando de sua segunda para a terceira versão (WALKO e TREMBACK, 2005), é inclusão de dados obtidos por sensoriamento remoto na obtenção de parâmetros de vegetação, como a fração de vegetação a partir do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada). Além disso, na definição dos parâmetros da vegetação o LEAF-3 se utiliza o BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme; DICKINSON *et al.*, 1986) e os parâmetros fornecidos pelo National Aeronautics and Space Administration/Land Data Assimilation Systems (NASA/LDAS). Os parâmetros de vegetação adotados no BATS incluem índice de área foliar, comprimento de raízes, altura do plano de deslocamento, rugosidade, albedo e emissividade.

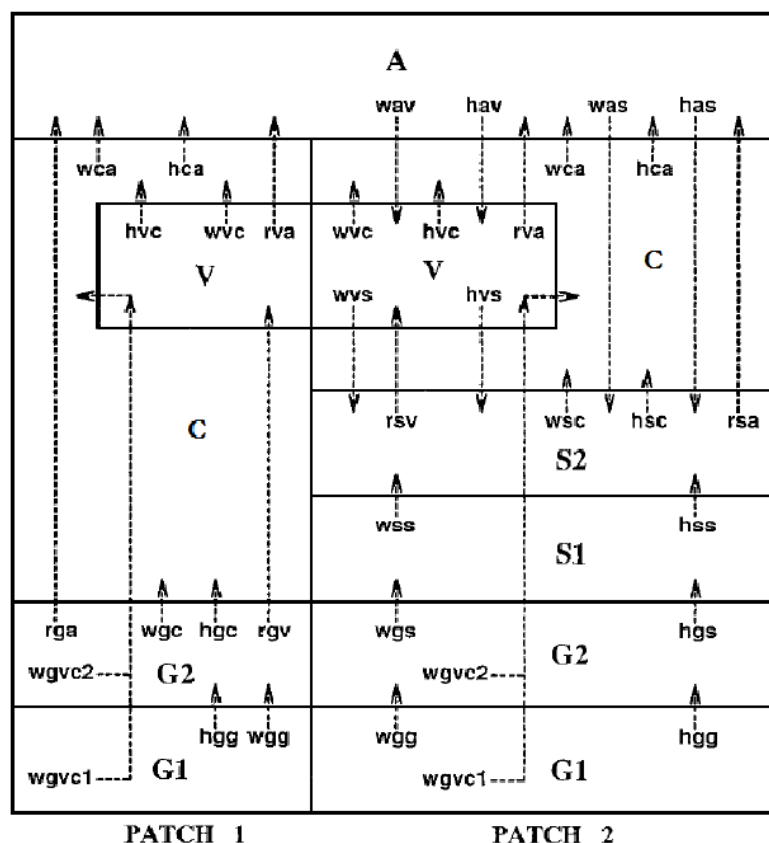


Figura 2.2 – Esquema da transferência de calor e umidade entre os elementos no LEAF-3 e uma célula de grade com dois patches, onde A indica a atmosfera, C o ar no dossel, V a vegetação, S indica neve e o solo está indicado pela letra G. Somente um dos patches contém neve. As setas indicam os sentidos dos fluxos, a primeira letra do texto que acompanha as setas indica a que está associada ao fluxo (transferência de calor [h], transferência de água [w] ou transferência radiativa de onda longa [r]); a segunda e a terceira letras indicam a fonte e o receptor, respectivamente. Retirado de WALKO et al. (2000).

2.1.2 TEB

No BRAMS, o TEB (*Town Energy Budget*; MASSON, 2000), funciona como uma sub-rotina do LEAF, aplicada somente para áreas urbanas. É um esquema desenvolvido utilizando a aproximação de cânion, formada pela junção de duas paredes e uma rua. Este conceito foi inicialmente proposto por Nunez e Oke (1987). Esta parametrização urbana tem como objetivo simular os fluxos turbulentos, bem como as interações dinâmicas e termodinâmicas que surgem entre a atmosfera e as cidades, aplicável para modelos de mesoescala.

Dada a complexidade existente na superfície da cidade, o balanço de energia é calculado considerando três partes: telhados, paredes e ruas. Podem ser consideradas várias camadas para cada elemento (geralmente três camadas) no tratamento dos fluxos de condução para/de o interior das construções (Figura 2.3). Isto deve ser feito, pois o uso de uma única temperatura para toda a região urbana não é aplicável na subcamada rugosa pela TSMO (MASSON, 2000).

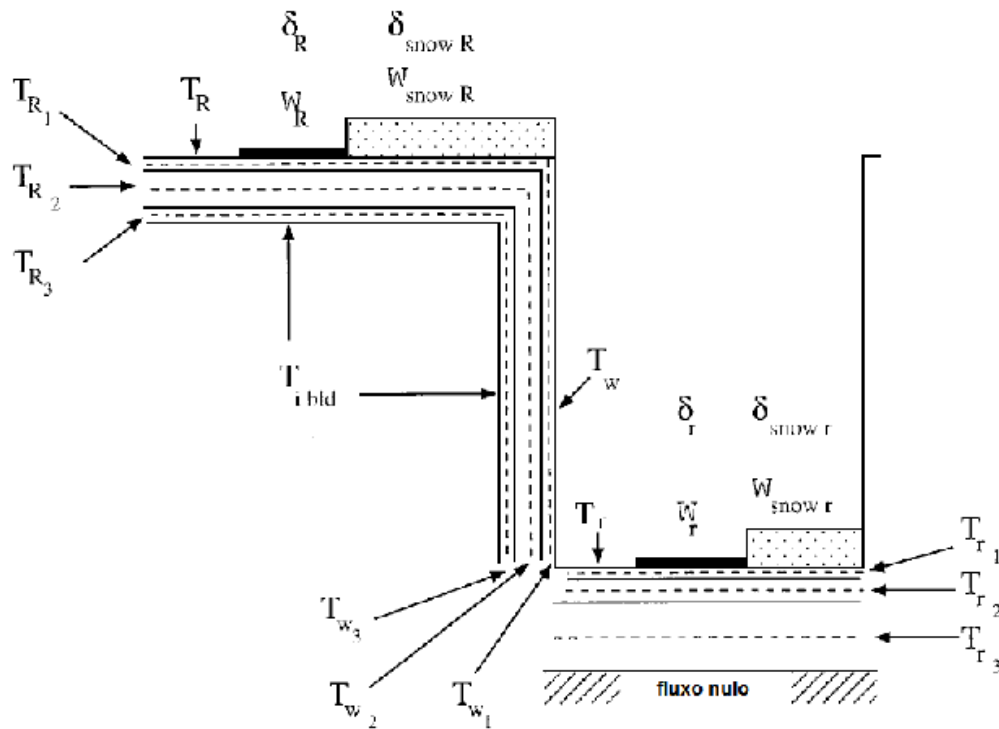


Figura 2.3 – Cânion formado por dois prédios considerando três camadas para cada elemento. T_r , T_w e T_R indicam temperaturas para as camadas da rua, paredes e telhados. W_r e W_R indicam o conteúdo de água na superfície e telhados e $W_{snow r}$ e $W_{snow R}$ o conteúdo de água na superfície e telhados. δ_R e δ_r correspondem às frações de água para os telhados e as ruas, $\delta_{snow R}$ e $\delta_{snow r}$ às frações de neve para os telhados e as ruas. $T_{i bld}$ é a temperatura interna dos prédios. Adaptado de MASSON (2000).

Os efeitos da orientação para as paredes e ruas são mediados em 360°, portanto as formas individuais das construções não são levadas em conta. Assim, a representação das cidades no TEB é caracterizada por:

1. As construções têm a mesma altura e largura (na grade do modelo), com o nível do telhado no nível da superfície do modelo atmosférico;
2. Construções estão localizadas ao longo de ruas idênticas, o comprimento de cada uma é maior que sua largura;
3. Qualquer orientação de rua é possível, e todas existem com a mesma probabilidade;
4. 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.

A temperatura interna dos prédios é independente da temperatura externa e se assume um valor constante. Esta temperatura externa e a velocidade do vento no interior do cânion são calculados por Lemonsu *et al.* (2004). O calor é conduzido através das paredes e telhados para a atmosfera. Os fluxos de calor e umidade associados à combustão são especificados pelo usuário dependendo da região de estudo. Os fluxos associados ao tráfego veicular modificarão o balanço de momento e energia dentro do cânion, enquanto que os associados à atividade industrial influenciarão a atmosfera diretamente. Uma descrição detalhada das relações do TEB pode ser encontrada em Masson (2000) e sua adaptação para o BRAMS em Freitas (2003).

2.1.2.1 Inclusão do efeito da vegetação

Inicialmente sugerido por Nunez e Oke (1977), a vegetação em áreas urbanas é parametrizada a partir da ponderação dos fluxos turbulentos de acordo com a fração de área de vegetação no ponto de grade urbano (Figura 2.4).

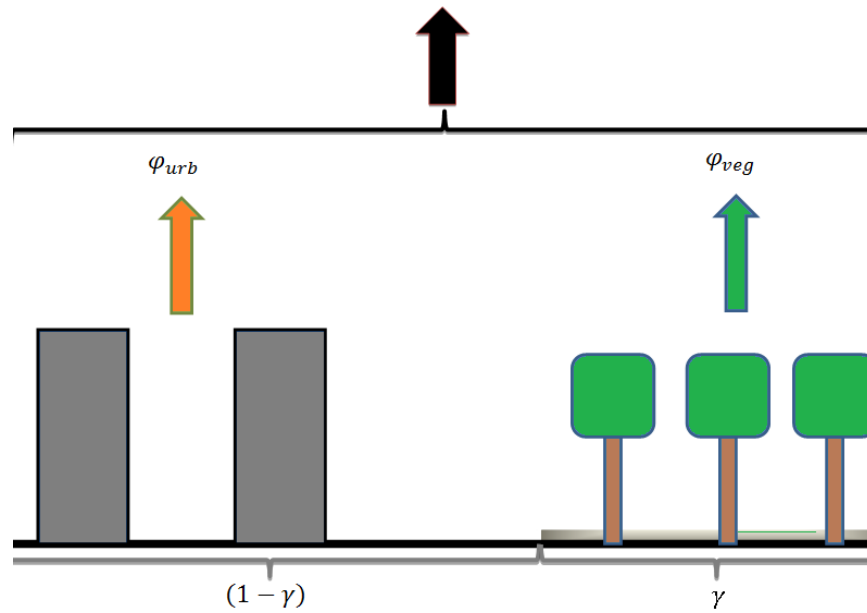


Figura 2.4 – Esquematização da ponderação dos fluxos turbulentos no ponto de grade do modelo. Adaptado de Brown e Williams (1998).

$$\Phi_i = (1 - \gamma)\varphi_{urb} + \gamma\varphi_{veg} \quad (2.2)$$

Onde φ_{urb} e φ_{veg} são os fluxos turbulentos de calor ou momentum para a região urbana e vegetada, respectivamente, Φ_i é o fluxo total no ponto de grade, e γ é a fração de vegetação no ponto de grade urbano.

Este tipo de ponderação já foi utilizado em diversos trabalhos. Marciotto (2008), utilizando um modelo de fechamento de segunda ordem e variando a fração de vegetação num ponto representativo da RMS, verificou que a redução da presença da cobertura vegetal atua de maneira a aumentar a temperatura e no aumento do fluxo de calor sensível.

Gouvêa (2007) verificou que para a RMS, o fluxo de calor latente aumentou em até $280 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, enquanto o fluxo de calor sensível diminuiu em até $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, entre simulações com vegetação e uso de solo puramente urbano. Além disso, observou-se o efeito da vegetação na

estabilização da atmosfera. Conforme os cenários construídos, quanto maior a fração vegetada, mais próximo da neutralidade ou da estabilidade ficará o ambiente.

Hamdi (2005), utilizando uma fração de vegetação constante de 16% para a região da Basileia, na Suíça, também verificou que com a presença de áreas verdes, o pico de temperatura diminui durante o verão. Fazendo testes de sensibilidade, alterando o valor da fração de vegetação para 50%, Hamdi e Schayes (2008), verificaram que, após o pôr-do-sol, uma redução de até 0,4 °C era percebida devido à redução do calor armazenado no dossel.

Geralmente, a ponderação dos fluxos é feita de forma “off-line”. São realizadas duas simulações, uma com a cidade e outra apenas com a vegetação, e o fluxo final é obtido da ponderação de cada ponto de grade para cada passo tempo. Outra limitação em trabalhos que avaliam o impacto da vegetação em regiões urbanas é que a fração de vegetação constante.

Neste trabalho, para cada passo de tempo, e em cada ponto de grade, o φ_{urb} é calculado através do TEB, e os φ_{veg} com o LEAF. Este cálculo só foi possível com a alteração da tabela de uso de solo do LEAF, onde os parâmetros correspondentes aos tipos urbanos são substituídos pelas características da vegetação naquele tipo urbano. Portanto, esta parametrização permite o uso de uma vegetação específica e diferente para cada tipo urbano.

Outro detalhe importante na modificação do TEB para a inclusão da vegetação é que, neste caso, cada ponto de grade possui uma fração de vegetação diferente, obtida a partir do dado do NDVI, dada pela relação empírica (SELLERS *et al*, 1996):

$$\gamma_v = \gamma_{v_{max}} = (1 - e^{-E_v L_T}) \quad (2.3)$$

onde L_T é o índice de área foliar verde e E_v o calor latente de vaporização.

Então, a saída do fluxo para o primeiro nível atmosférico, para ser incluído no *patch*, inclui a substituição dos termos H_{town} e LE_{town} , apresentados abaixo:

$$H_{town} = a_{bld}H_R + (1 - a_{bld})H_{top} + H_{industry} \quad (2.4)$$

$$LE_{town} = a_{bld}LE_R + (1 - a_{bld})LE_{top} + LE_{industry} \quad (2.5)$$

onde H e LE são os fluxos turbulentos de calor sensível e latente, respectivamente, e a_{bld} é a fração da construção no ponto de grade. Os índices *top*, *town* e *industry*, referem-se aos fluxos no topo do cânion, na escala da cidade e industrial, respectivamente.

3 AVALIAÇÃO

Para uma primeira análise do efeito da vegetação nos termos do balanço de energia em áreas urbanas, foram realizadas duas simulações para a RMSP, uma com a versão do TEB original (que chamaremos de *TEB*) e outra com a inclusão da ponderação dos fluxos da vegetação nas áreas urbanas (que chamaremos de *VTEB*), conforme descrito na seção 2.1.2.1.

As características e parametrizações utilizadas nas simulações são apresentadas na Tabela 3.1. Na Tabela 3.2, têm-se alguns dos parâmetros utilizados no esquema TEB para cada tipo de uso do solo urbano e sua respectiva vegetação, baseada no Atlas Ambiental da cidade de São Paulo (SVMA, 2004). Outros parâmetros, como capacidade térmica das paredes, ruas e telhados, são os mesmos de Freitas (2003) e Freitas *et al.* (2007).

A Figura 3.1 apresenta o uso do solo urbano utilizado em ambas as simulações. As características das construções para a RMSP seguem o padrão proposto por Gouvêa (2007). O tipo chamado de urbano 1 é considerado a região central da cidade, com alta densidade de construções e verticalidade pronunciada, bem como avenidas largas de intenso tráfego veicular. Já o tipo denominado urbano 2, está localizado no entorno desta região central, e é caracterizado por uma alta densidade de edificações, porém já com uma mescla de construções de porte médio. O urbano 3 possui uma característica mais residencial, com construções mais baixas e ruas estreitas, enquanto o suburbano, situado na periferia da área urbanizada, representa a transição entre a área urbana e a rural.

Tabela 3.1 – Opções disponíveis no BRAMS, utilizadas neste estudo.

Variável	Opção utilizada
Número de pontos para nudging nas fronteiras laterais	5
Escala de tempo para nudging nas fronteiras laterais	3600 s
Escala de tempo para nudging no topo do domínio	1800 s
Nudging Central	3600 s
Condição de fronteira lateral	Klemp e Wilhelmson (1978)
Frequência da atualização na tendência de radiação	1800 s
Parametrização de radiação de onda curta/longa	Chen e Cotton (1983)
Número de camadas do solo	4
Profundidade das camadas do solo	-2,0 m, -1,5 m, -0,25 m, -0,05 m
Grau de saturação das camadas de solo	0,65, 0,59, 0,57, 0,50
Parametrização de turbulência	Deformação anisotrópica (Smagorinsky, 1963) baseada nas modificações das formulações de Lilly (1962) e Hill (1974).

Tabela 3.2 – Valores de alguns parâmetros utilizados dentro do TEB para as simulações. Os valores do albedo das superfícies foram obtidos de Morais *et al* (2009).

	Urbano 1	Urbano 2	Urbano 3	Suburbano
Albedo Telhado	0,18	0,18	0,18	0,18
Albedo Rua	0,08	0,08	0,08	0,08
Albedo Parede	0,14	0,14	0,14	0,14
Emissividade Telhado	0,9	0,9	0,9	0,9
Emissividade Rua	0,95	0,95	0,95	0,95
Emissividade Parede	0,9	0,9	0,9	0,9
Altura das construções (m)	50	20	10	5
Razão Geométrica	10	2	1,25	0,6
Comprimento de Rugosidade	3	2	1	0,5
Fluxo de calor sensível do tráfego ($W \cdot m^{-2}$)	90	60	60	10
Fluxo de calor latente do tráfego ($W \cdot m^{-2}$)	10	10	5	5
Fluxo de calor sensível industrial ($W \cdot m^{-2}$)	14	14	10	10
Fluxo de calor latente industrial ($W \cdot m^{-2}$)	50	50	30	30
Fração urbana	0,7	0,6	0,5	0,5
Tipo de vegetação	Gramma curta	Floresta Mista	Árvores Perenes	Gramma Curta

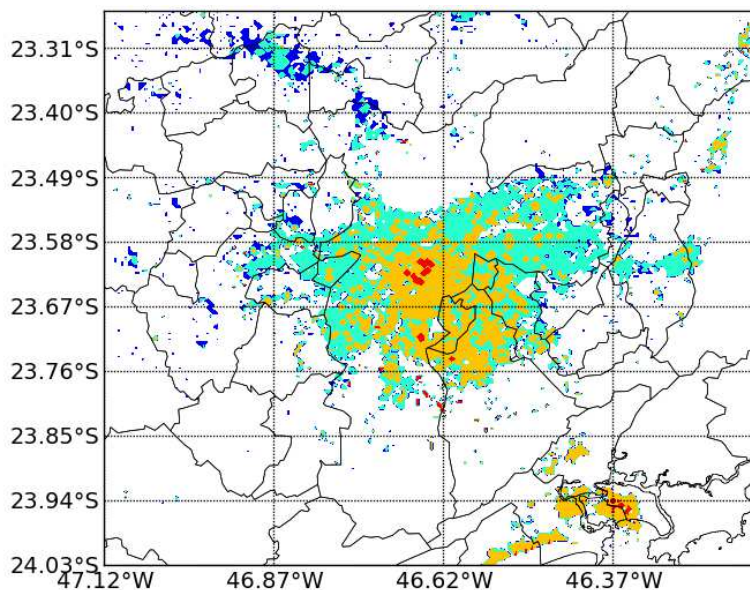


Figura 3.1 – Resultado da classificação da superfície urbana utilizada para esta simulação, com espaçamento de grade de 500 m, para a RMSF. A cor azul corresponde ao tipo suburbano, a cor verde ao tipo urbano 3, a cor amarela ao tipo urbano 2 e a cor vermelha ao tipo urbano 1.

As condições iniciais e de contorno utilizadas foram baseadas nas análises do GFS, com espaçamento de grade horizontal de 1°. Todas as simulações foram de 72 horas, inicializando às 00Z do dia 17 de julho de 2008. Este período foi escolhido por apresentar dias de céu claro, baseado nos dados observados de radiação solar global (Figura 3.2), conforme descrito em Bárbaro (2008), e nas imagens de satélite (Figura 3.9). Foram utilizadas três grades aninhadas (Figura 3.3), sendo o espaçamento horizontal (de menor a maior resolução) de 16 km, 4 km e 1 km. Os arquivos de topografia do USGS (*U.S. Geological Survey*), com resolução espacial de 1 km, foram utilizados sem nenhum tipo de modificação.

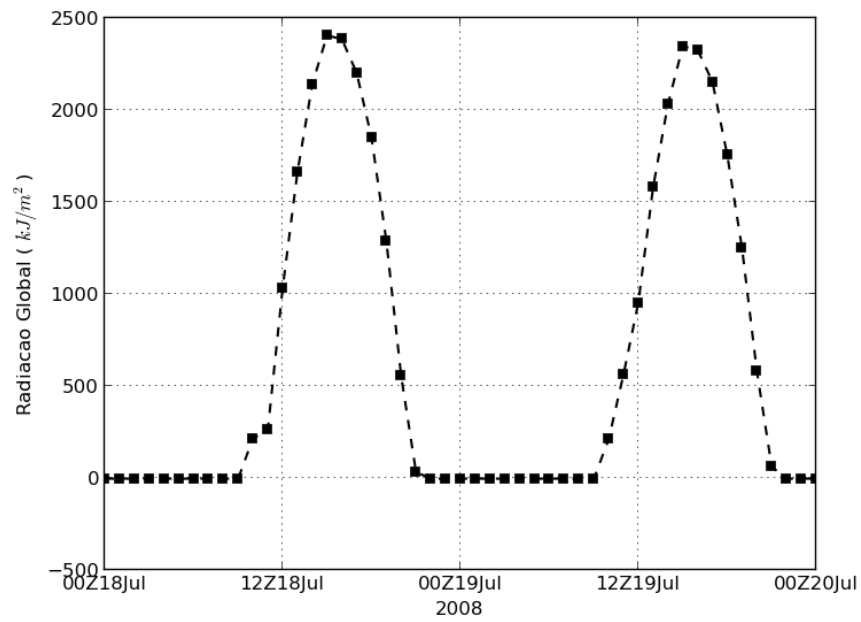


Figura 3.2 – Evolução diária da radiação solar global observada na estação do Mirante de Santana.

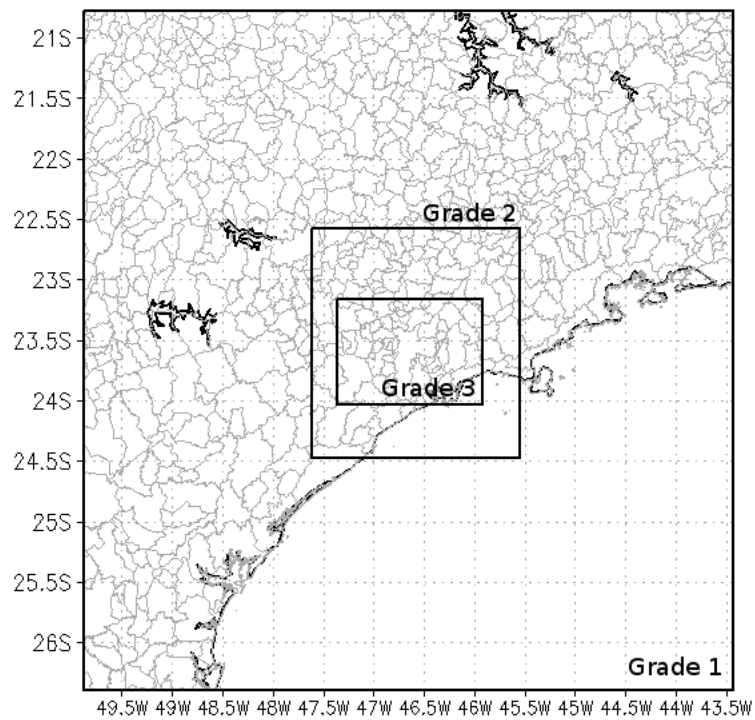


Figura 3.3 – Grades aninhadas utilizadas nas simulações.

Para a fração de vegetação, foram utilizados dados de NDVI derivados do sensor MODIS instalado nos satélites EOS-AQUA/EOS-TERRA, para o dia 18 de julho de 2008, com espaçamento de 250 m (Figura 3.4).

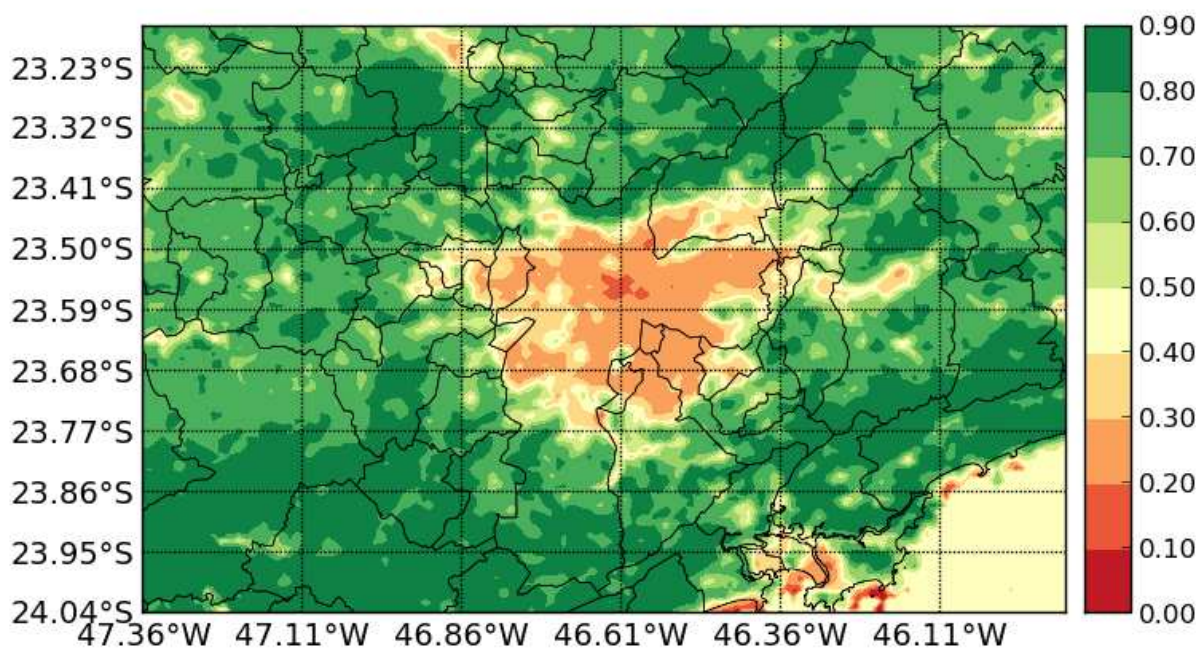


Figura 3.4 – NDVI para a RMSP com espaçamento de 250 m.

3.1. Análise Qualitativa

Para avaliar os modelos, realizou-se uma análise qualitativa através de índices estatísticos para seis estações localizadas na RMSP (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Estações utilizadas na RMSP para validação do modelo.

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Aeroporto de Congonhas (METAR)	23° 38' 03" S	46° 38' 59" O	802
Mirante do Santana (INMET)	23° 29' 47" S	46° 37' 12" O	792
Aeroporto de Guarulhos (METAR)	23° 26' 00" S	46° 28' 00" O	751
São Caetano (CETESB)	23° 36' 10" S	46° 34' 29" O	740
IAG (Estação de superfície)	23° 39' 04" S	46° 37' 21" O	799
Aeroporto do Campo de Marte (METAR)	23° 30' 00" S	46° 39' 00" O	722

A análise qualitativa será feita com foco no *skill* de uma simulação, proposto por Pielke (2002), que propõe como critério de desempenho de um modelo a avaliação da proximidade do desvio padrão entre as simulações e as observações e a raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*; WILKS, 2006) deve ser menor que o desvio padrão da observação. Para simplificar esta avaliação, um índice de Pielke foi definido por Hallak e Pereira Filho (2011). Este índice possui um valor ilimitado maior que zero, o qual mostra um melhor desempenho para valores próximos de zero e destreza do modelo com valores menores que 2:

$$D_{\text{Pielke}} = \left| 1 - \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \right| + \frac{\text{RMSE}}{\sigma_o} + \frac{\text{RMSE} - \text{BIAS}}{\sigma_s} \quad (3.1)$$

em que σ é o desvio padrão (índice s é para simulação e índice o para observação). *BIAS* é o viés e apresenta o erro sistemático da variável prevista:

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (p_t - o_t) \quad (3.2)$$

RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio, que fornece uma magnitude típica para os erros de previsão numérica:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (p_t - o_t)^2} \quad (3.3)$$

Outros índices também foram utilizados para avaliação. Entre eles o *MAPE*, ou erro médio percentual absoluto, que é uma porcentagem da precisão da previsão com o valor observado:

$$\text{MAPE} = \sum_{t=1}^N \frac{(p_t - o_t)}{o_t} \quad (3.4)$$

O *Skill Score* (*SS*) de uma previsão é uma representação do erro da previsão que relaciona a acurácia da previsão com uma referência:

$$SS = 1 - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (|p_t - o_t|) \cdot \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{1}{o_t} \quad (3.5)$$

Para comparação com dados observados, as primeiras 24 horas de simulação foram ignoradas para evitar o efeito de *spin-up* (DALEY, 1991). A Figura 3.5 mostra a evolução da temperatura do ar a 2 m. Os índices de avaliação são mostrados na Tabela 3.4. Ambas as simulações podem fornecer bons *skills* para todas as estações, porém, a inclusão do efeito da vegetação apresenta um menor índice de Pielke (Tabela 3.4). Na estação de São Caetano (Figura 3.5b), a simulação *VTEB* subestima a temperatura, enquanto que a simulação *TEB* superestima. Nas duas simulações, as fases da temperatura são bem reproduzidas. A simulação *TEB* tem mais dificuldade em representar a amplitude de temperatura em comparação com a simulação *VTEB*.

Tabela 3.4 – Índices estatísticos para temperatura do ar a 2 m, para avaliação das simulações com dados das estações da Tabela 3.3. BIAS corresponde ao viés da simulação, RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio, PC é a porcentagem correta, SS é o *skill score* da simulação e MAPE é o erro percentual médio absoluto. Definições dos índices podem ser encontradas em Wilks (2006). D_{Pielke} é o índice de Pielke (2002) proposto por Hallak e Pereira Filho (2011).

Estação	TEB					VTEB				
	BIAS	RMSE	SS	MAPE	D_{Pielke}	BIAS	RMSE	SS	MAPE	D_{Pielke}
Congonhas	1,2	2,0	91,1	9,6	0,94	0,6	1,6	93,3	7,3	0,83
Mirante	0,9	1,4	94,4	5,8	0,74	0,2	1,1	95,0	5,3	0,71
Guarulhos	3,2	4,2	77,7	32,2	1,60	2,5	3,8	79,2	29,4	1,59
São Caetano	0,4	1,7	93,0	8,3	0,91	-0,3	1,7	92,7	7,9	0,89
IAG	3,1	3,9	78,8	26,4	1,54	2,2	3,3	82,1	22,1	1,40
Campo de Marte	3,1	3,9	82,8	24,2	1,42	2,3	3,4	85,9	20,5	1,34

Também foi avaliada a umidade específica (Figura 3.6). Seu valor observado foi obtido para estações a partir de valores de pressão na superfície, umidade relativa ou temperatura no ponto de orvalho. Como observado na Figura 3.6, o seu valor não é tão bem representada pelas simulações. Em todos os casos, o índice de Pielke é maior que 2 (Tabela 3.5). Entretanto, a simulação *VTEB* apresenta um viés menor que a simulação *TEB*. Somente no caso de Campo de Marte e no IAG, a simulação *VTEB* subestima a umidade específica mais que a simulação *TEB*. Para pontos com maior índice de área verde, o índice de Pielke tem uma substancial melhora com a inclusão da modelagem de vegetação.

Tabela 3.5 – Índices estatísticos para umidade específica do ar a 2 m, calculados para avaliação das simulações com dados das estações da Tabela 3.3. Os índices são os mesmos da Tabela 3.4. A estação de São Caetano não foi avaliada por indisponibilidade de dados observados.

Estação	TEB					VTEB				
	BIAS	RMSE	SS	MAPE	D _{Pielke}	BIAS	RMSE	SS	MAPE	D _{Pielke}
Congonhas	0,2	0,6	93,6	6,6	2,14	-0,1	0,6	92,6	7,6	2,22
Mirante	0,3	0,6	82,2	8,0	2,68	0,1	0,7	91,3	8,9	2,86
Guarulhos	-1,0	1,2	84,5	15,3	4,05	-1,	1,2	84,1	15,7	4,16
IAG	-0,3	1,6	80,2	20,1	10,08	-0,7	1,6	80,1	20,0	9,40
Campo de Marte	-0,3	0,7	91,1	8,9	3,39	-0,4	0,8	90,3	9,6	3,47

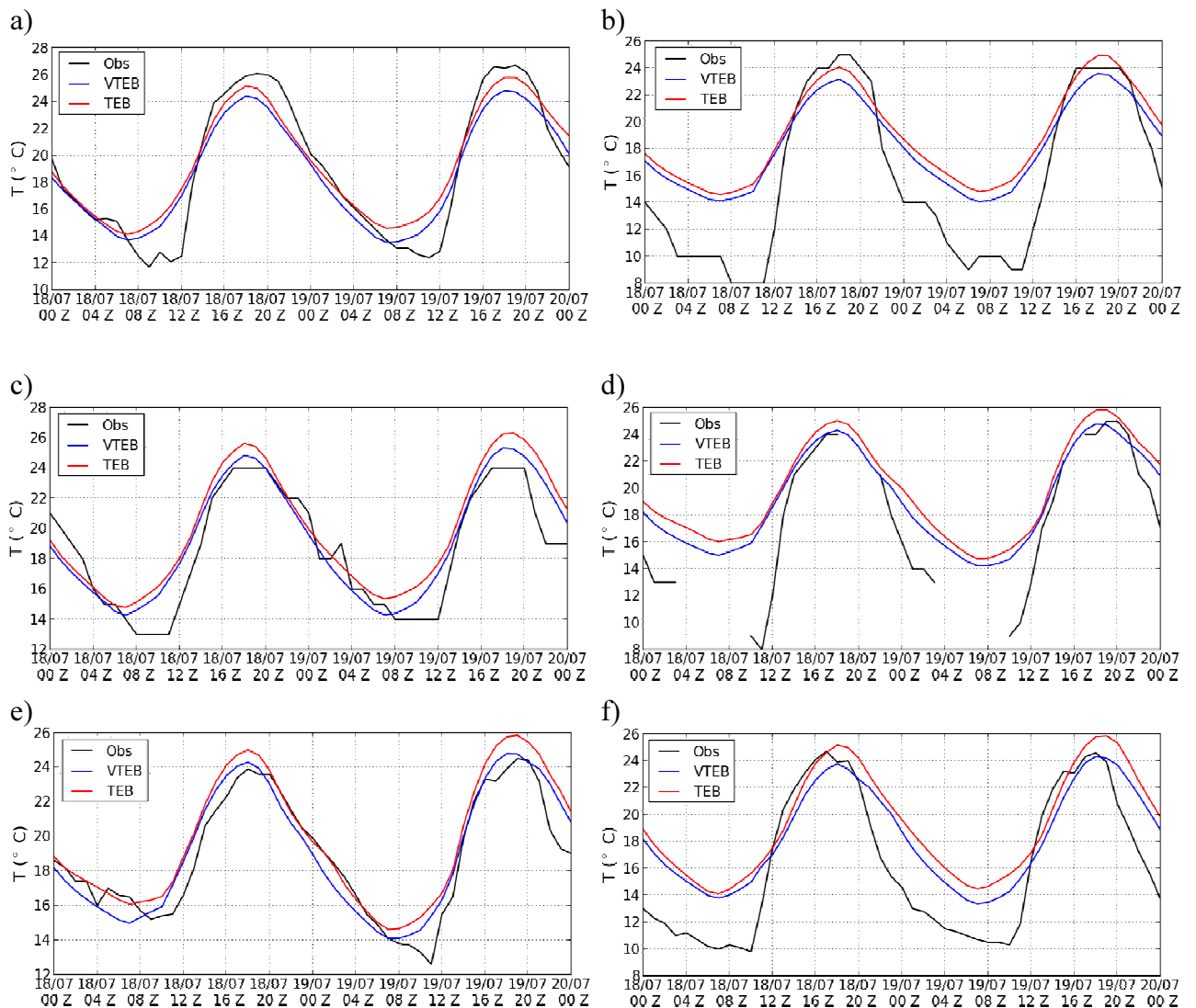


Figura 3.5 – Evolução diária da Temperatura do ar a 2 metros, em graus Celsius, onde a linha vermelha representa à simulação TEB, a linha azul representa a simulação VTEB e a linha preta, as observações. a) São Caetano, b) Guarulhos, c) Congonhas, d) Campo de Marte, e) Mirante de Santana e f) IAG.

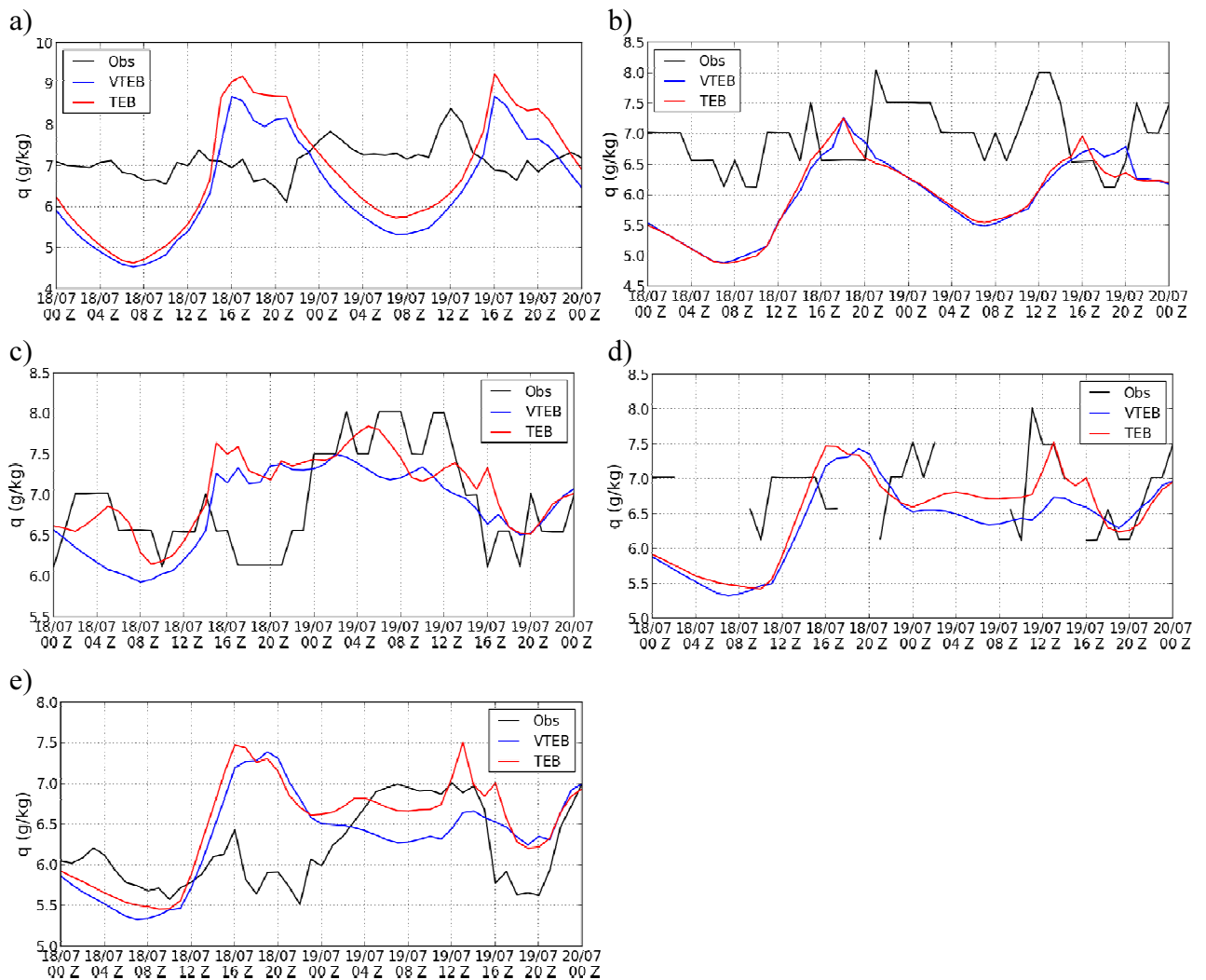


Figura 3.6 – Evolução diária da umidade específica do ar a 2 metros, em g/kg, onde a linha vermelha representa à simulação TEB, a linha azul representa a simulação VTEB e a linha preta, as observações. a) IAG, b) Guarulhos, c) Congonhas, d) Campo de Marte e e) Mirante de Santana.

3.1.1 Radiosondagens

A análise do impacto da vegetação nos níveis verticais foi feita comparando dados de radiosondagem, obtidas diariamente, às 00 e 12Z, no Campo de Marte (Tabela 3.3), com as simulações *TEB* e *VTEB*. As Figuras 3.7 e 3.8 mostram os perfis da diferença de temperatura

e umidade específica, respectivamente, entre a simulação e o dado, para os dias 18 e 19 de julho.

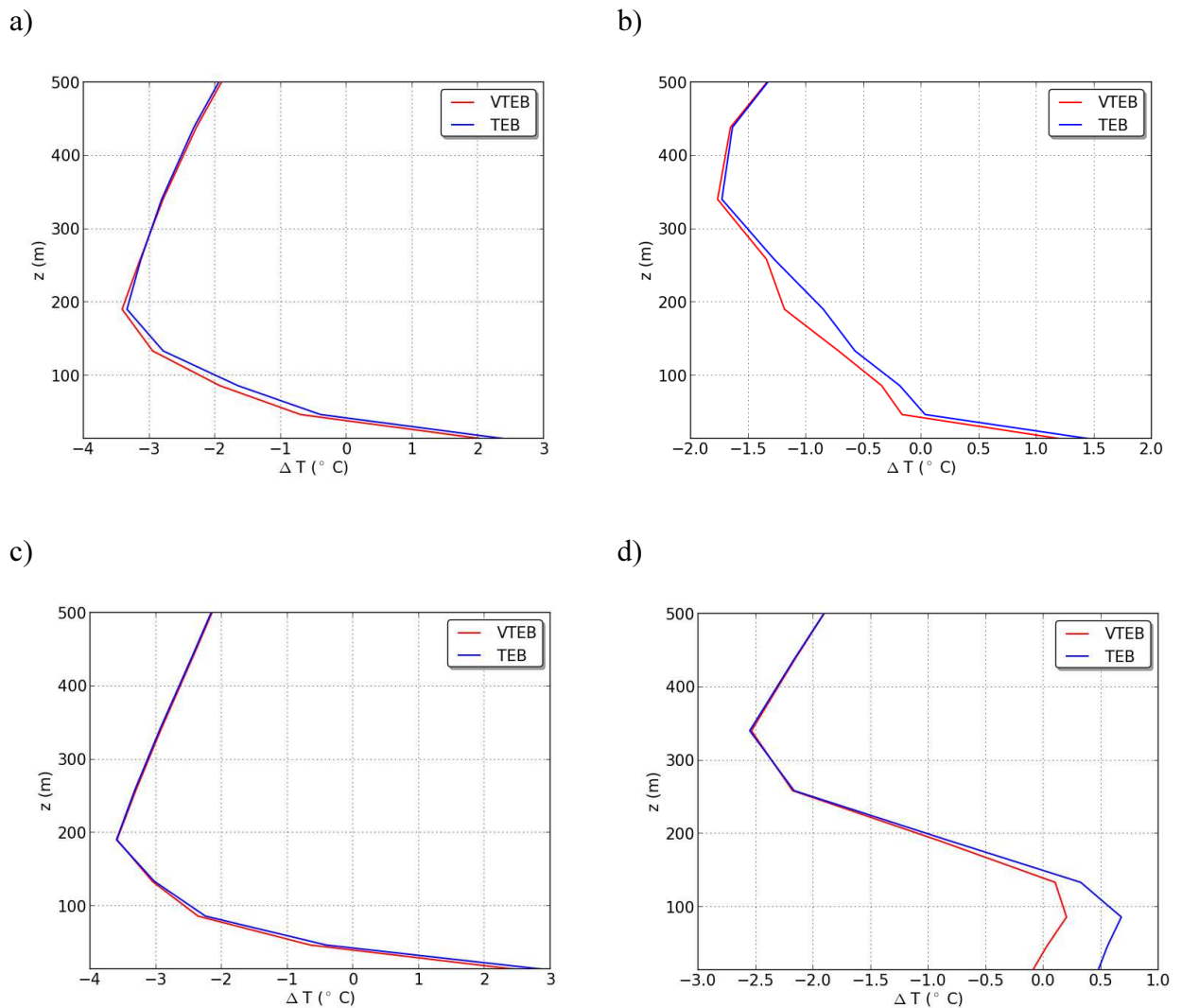


Figura 3.7 – Diferença de temperatura, em graus Celsius, entre a simulação e dados de radiosondagem, sendo a linha vermelha os resultados com o VTEB e a linha azul com o TEB, para a) 00Z do dia 18 de julho, b) 12Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 de julho e d) 12Z do dia 19 de julho.

Na Figura 3.7, vemos que o modelo *VTEB* representa melhor os dados de temperatura na camada do dossel urbano (aproximadamente 50 m acima da superfície). Ambos os modelos subestimam a temperatura na camada de fluxo constante (também conhecida como subcamada inercial, na qual a Teoria de Similaridade de Monin-Obukhov se aplica; ROTH,

2000), com o *VTEB* obtendo valores menores que o modelo *TEB* a uma mesma altura. A subcamada inercial e a camada de dossel urbano formam a camada limite superficial (CLS) na camada limite urbana (MORAIS, 2010). No caso do dia 19 de julho às 12 Z (Figura 3.7d), a CLS é bem representada pelo modelo *VTEB*, obtendo valores de diferença de temperatura próximos à zero.

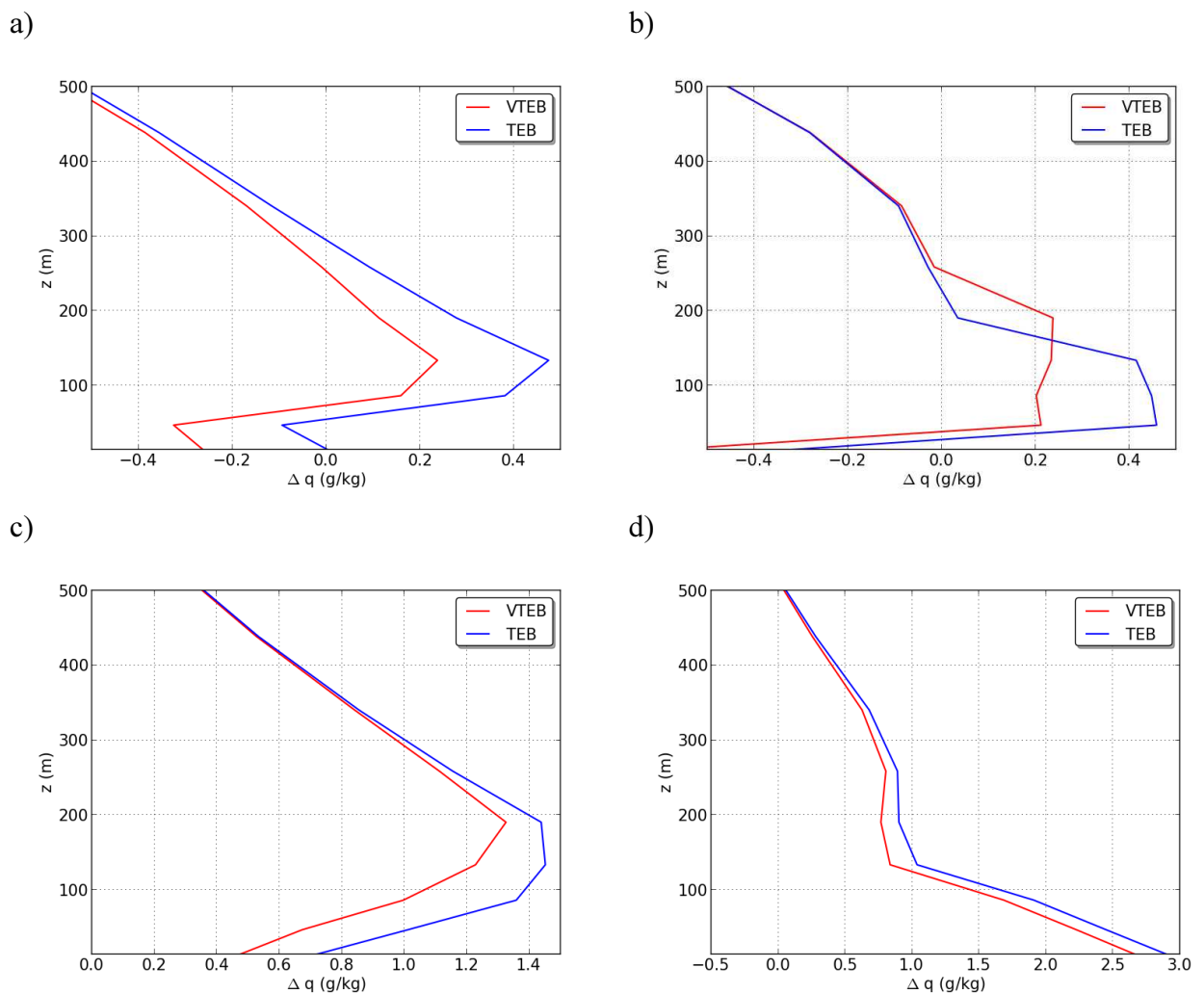


Figura 3.8 – Diferença de umidade específica, em g/kg, entre a simulação e dados de radiossondagem, sendo a linha vermelha os resultados com o VTEB e a linha azul com o TEB, para a) 00Z do dia 18 de julho, b) 12Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 de julho e d) 12Z do dia 19 de julho.

Para o caso da umidade específica, as Figura 3.8a e 3.8b mostram que, no dia 18 de julho, o modelo *VTEB* representa melhor os dados observados na camada inercial, enquanto que o

modelo *TEB* subestima na camada limite urbana. Já no dia 19 de julho, mesmo superestimando os dados observados, a simulação *VTEB* simula melhor a CLS tanto em condições estáveis (Figura 3.8c) quanto em condições convectivas (Figura 3.8d).

3.1.2 Área

A temperatura da superfície vegetada simulada foi comparada com a temperatura da superfície obtida através do produto MOD11A1 do satélite TERRA. Este produto fornece o campo de temperatura da superfície com espaçamento horizontal de 1 km e é gerado a partir do mapeamento dos pixels do produto MOD11_L2 diariamente.

Dado que este campo é formado por um mosaico da informação coletada pelo MODIS, foram utilizadas as saídas dos modelos *TEB* e *VTEB* das 14 Z, horário mais próximo da passagem do satélite TERRA sobre a região de São Paulo (13h55min Z; Figura 3.9). Na Figura 3.10 é mostrada a comparação da temperatura da superfície do MODIS com a temperatura da vegetação das simulações.

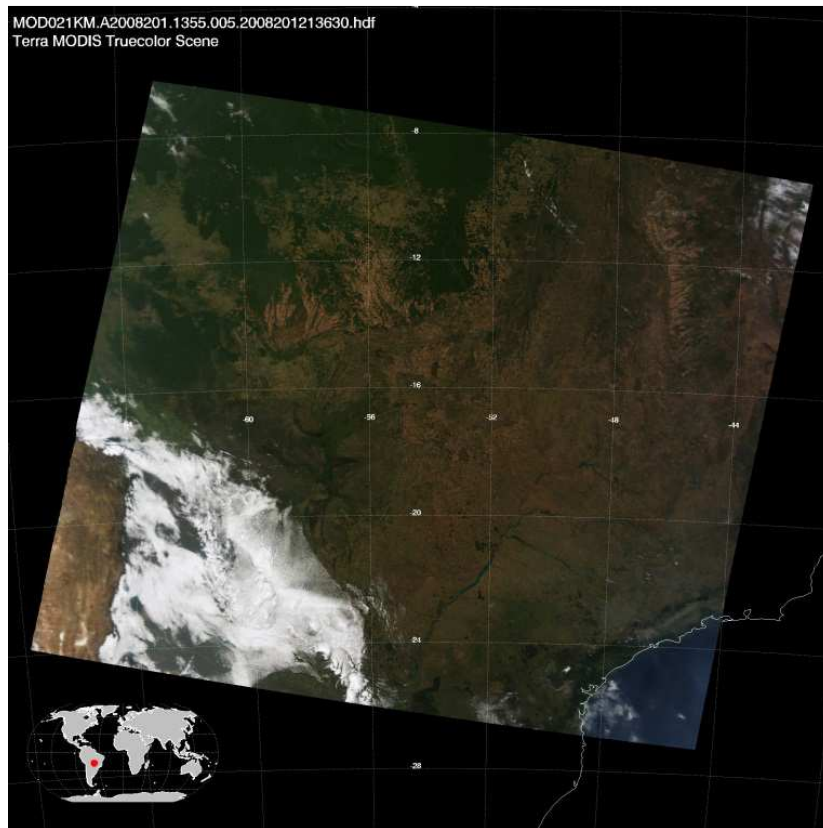


Figura 3.9 – Imagem do sensor MODIS do satélite TERRA do dia 19 de julho de 2008 sobre a região de São Paulo. Horário da passagem é de 13h55Z

Ambas as simulações subestimam a temperatura da superfície para a RMSP e superestimam a temperatura na região costeira (Figura 3.10). A ponderação dos fluxos permite uma melhor representatividade da região central da cidade (Figura 3.10c). A estrutura da região suburbana na simulação *TEB* (Figura 3.10b), com razão geométrica pequena, permite um maior aquecimento da superfície, devido ao efeito de retenção de radiação (MARTILLI, 2003; ROULET *et al.*, 2005; MORAIS, 2010; GROLEAU e MESTAYER, 2012). Este efeito é minimizado pela presença da vegetação na simulação *VTEB*. Com isso, uma maior heterogeneidade das isolinhas de temperatura da superfície é observada neste último caso, similar ao ocorrido no campo obtido pelo sensoriamento remoto (Figura 3.10a).

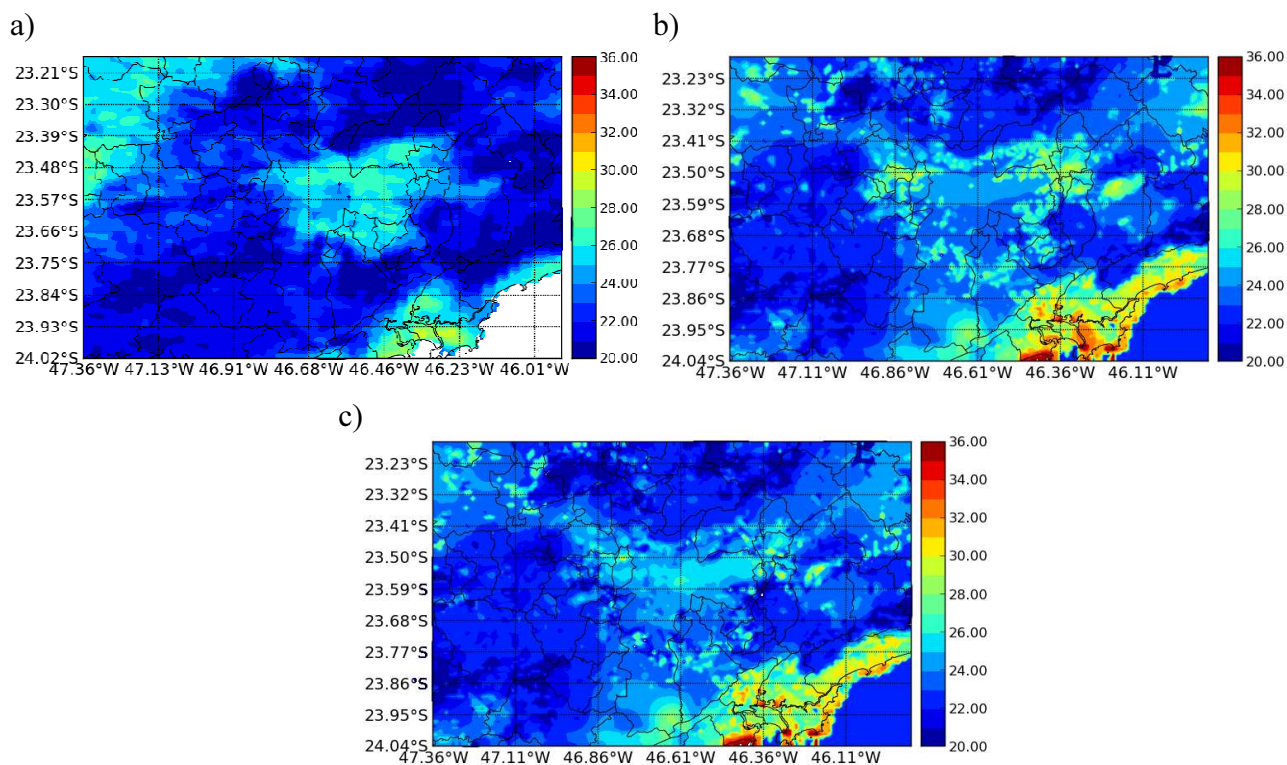


Figura 3.10 – Temperatura da superfície (°C) durante o dia a) MODIS, e temperatura da superfície da vegetação (°C) das simulações b) TEB e c) VTEB do dia 19 de julho de 2008 das 14Z.

3.2 Análise Quantitativa

Nesta seção vamos mostrar a diferença entre as simulações quantitativamente. A **!Error!** **Argumento de modificador desconhecido.** mostra as isolinhas de temperatura e o campo de vento das simulações *TEB* e *VTEB* para as 00 Z e 15 Z dos dias 18 e 19 de julho de 2008. À noite, a presença da vegetação diminui a intensidade da ilha de calor urbana em até 0,5 °C, na região mais central da cidade (Figura 11e e 11f). Isto acontece porque a presença de maior área verde gera mais umidade nesta região (LANDSBERG, 1951; SAILOR, 1993; HARMAN, 2003; HAMDI, 2005). Durante o período convectivo, a simulação *TEB* apresentou até 1,0 °C a mais na região urbana (Figuras 3.11g e 3.11h).

A vegetação na região urbana reduz a velocidade da entrada da brisa marítima (vetor vento na Figura 3.11h). Isto demonstra que a cidade tem influência na manutenção da brisa durante o período convectivo, sendo este um resultado semelhante ao encontrado por Freitas (2003).

Este padrão também é visto analisando a divergência do vento (Figura 3.12). Percebe-se que o impacto da vegetação no fluxo de momentum, com convergência do vento na região urbana 2, que possui árvores mais altas do tipo “Floresta Mista” (Tabela 3.2). Às 13Z, nota-se que este padrão é mais bem definido com a presença da vegetação (Figura 3.12a e b). Durante a noite, a presença da cidade também é sentida, com uma divergência menor com a presença da vegetação (21Z do dia 19 de julho), que reduz ainda mais a temperatura no dossel urbano (Figura 3.12c e d).

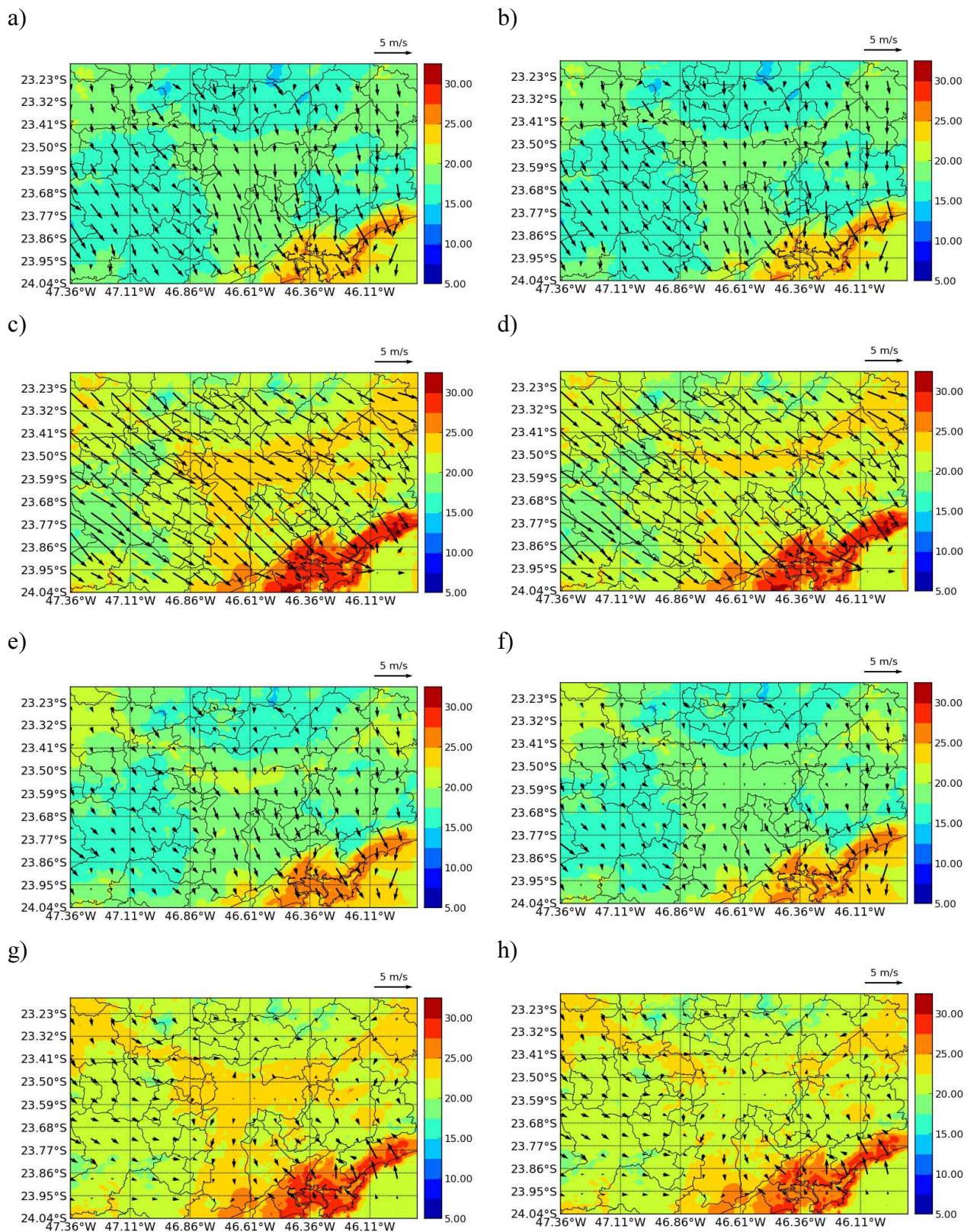


Figura 3.11 – Isolinhas de temperatura do ar a 2 m ($^{\circ}\text{C}$) e vento horizontal (m/s) no primeironível. A coluna da esquerda representa as saídas da simulação TEB para as a) 00Z e c) 15Z do dia 18 de julho e, e) 00Z e g) 15Z do dia 19 de julho. A coluna da direita representa as saídas da simulação VTEB para as b) 00Z e d) 15Z do dia 18 de julho e, f) 00Z e h) 15Z do dia 19 de julho.

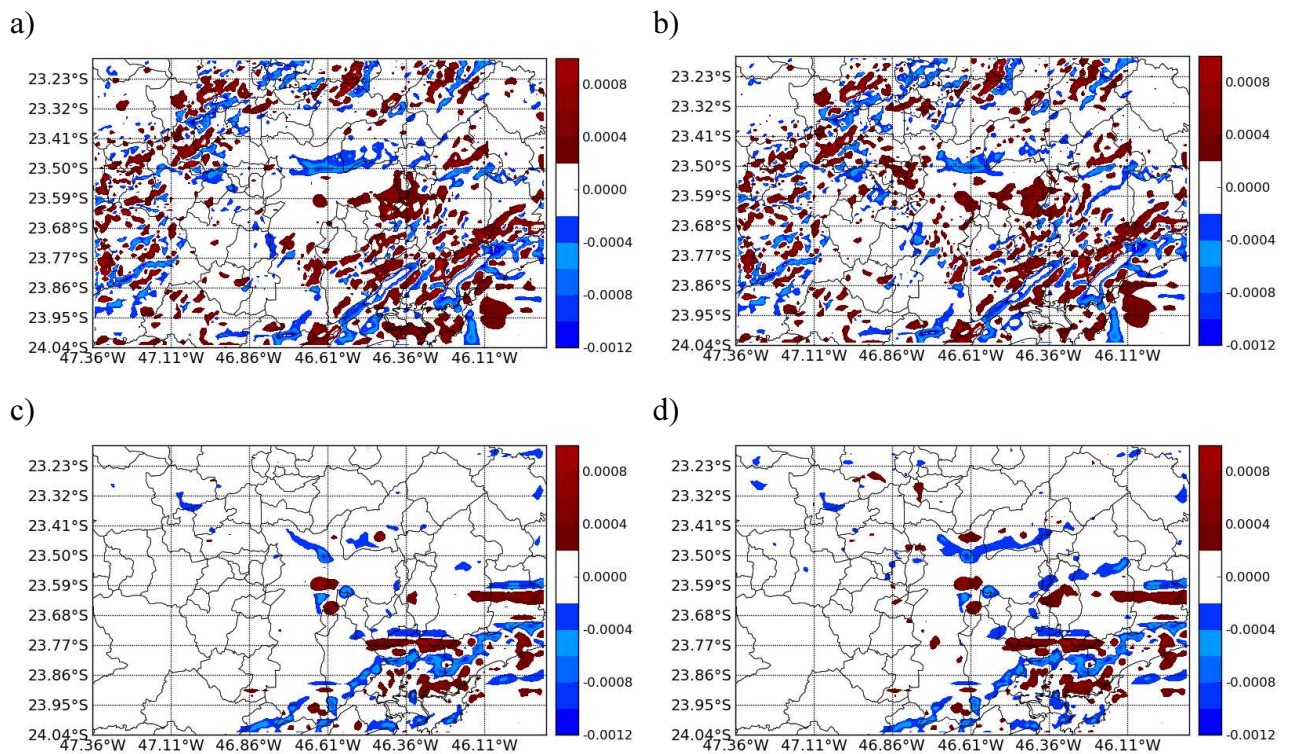


Figura 3.12 – Campo de convergência do vento (s^{-1}) para a RMSF. A coluna da esquerda representa as saídas da simulação VTEB para as a) 13Z do dia 18 de julho e c) 21Z do dia 19 de julho. A coluna da direita são as saídas da simulação TEB para as b) 13Z do dia 18 de julho e d) 21Z do dia 19 de julho.

Com relação ao fluxo de calor sensível (Figura 3.13), durante o período diurno, o vento, que contribui para a advecção de temperatura, favorece o aumento do calor sensível nas regiões adjacentes à RMSF (Figuras 3.13b e 3.13d), alcançando até $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. À noite, a simulação TEB alcança valores até $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ maiores que a simulação VTEB (Figuras 3.13a e 3.13c).

A presença da vegetação aumenta em até $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ a intensidade do fluxo de calor latente. Às 15Z do dia 19 de julho (Figura 3.14d), nota-se um fluxo de calor latente maior na simulação TEB na região adjacente à cidade em até $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Durante a noite, percebe-se que o fluxo de calor latente na região urbana mantém o padrão, com intensidade maior para a simulação com presença da vegetação (Figura 3.14a e 3.14c). Esta diferença nos fluxos de calor latente

apresenta um padrão idêntico ao que geralmente indica a literatura (OKE, 1988; HAMDI E SCHAYES, 2008; LEE E BAIK, 2011).

Já a diferença entre a razão de Bowen (razão entre os fluxos de calor sensível e latente H/LE) entre as simulações (Figura 3.15), nota-se um padrão bem definido, com o valor mais alto no período diurno (Figuras 3.15b e 3.15d) e com valores negativos no período noturno maior (Figura 3.15a e 3.15c).

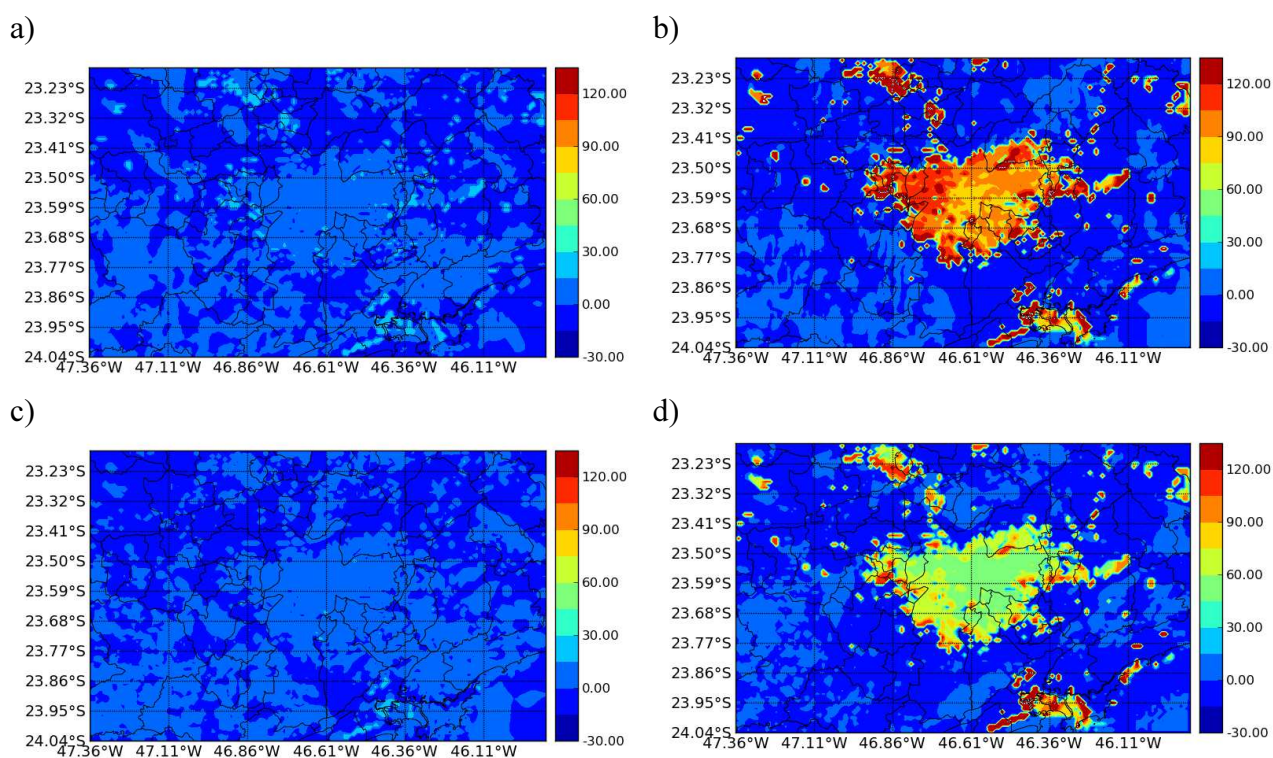


Figura 3.13 – Diferença de fluxo de calor sensível (em $W \cdot m^{-2}$) entre as simulações TEB e VTEB para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.

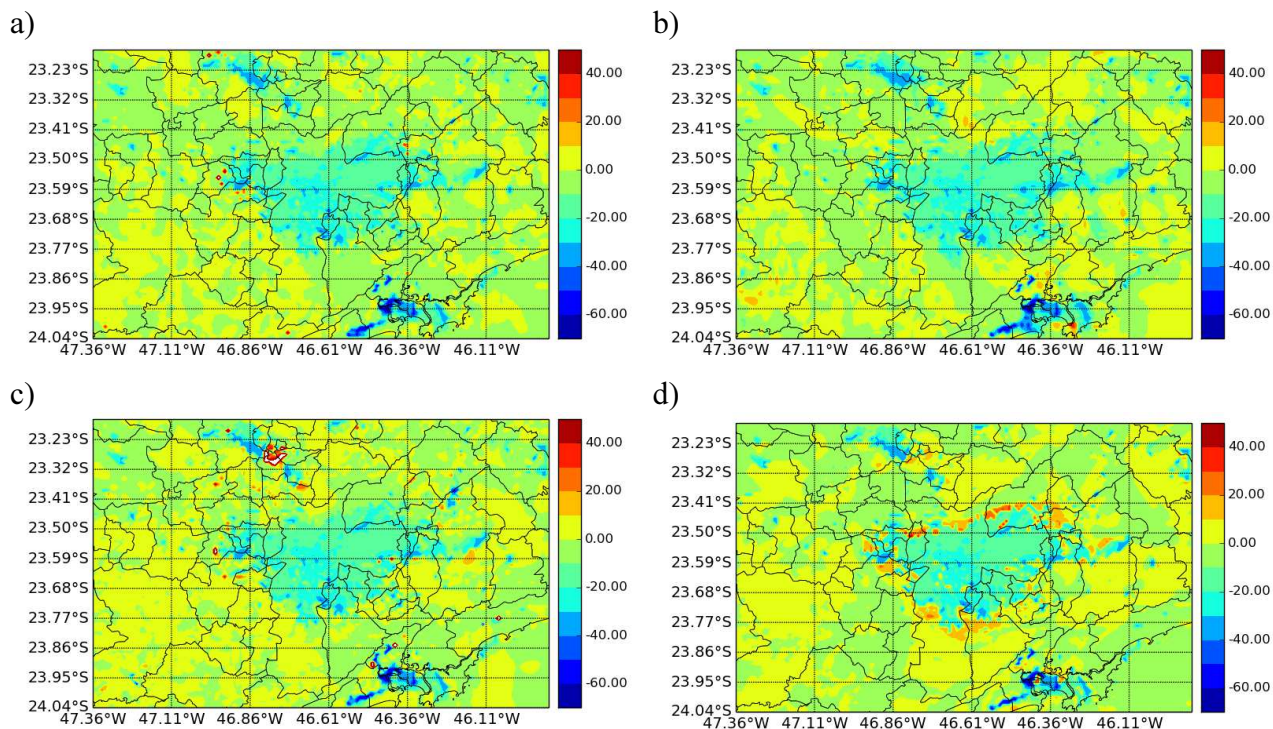


Figura 3.14 – Diferença de fluxo de calor latente (em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) entre as simulações TEB e VTEB para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.

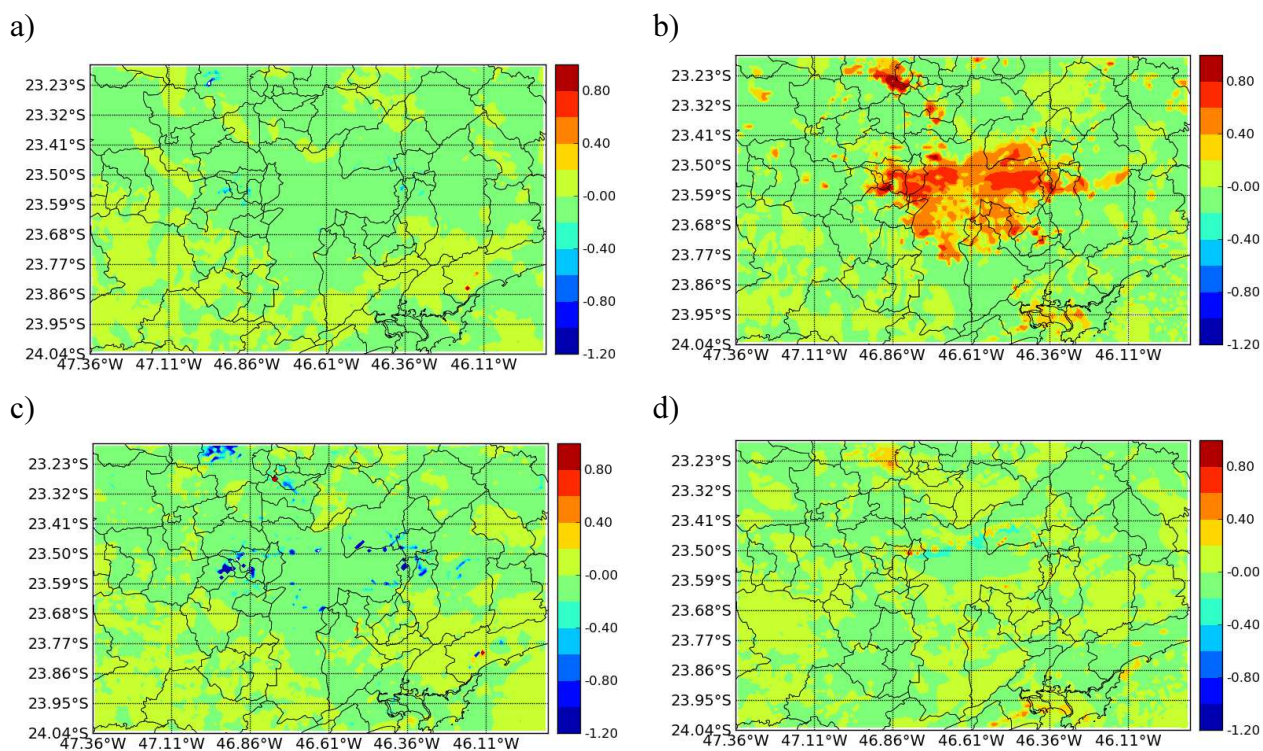


Figura 3.15 – Diferença da razão de Bowen entre as simulações TEB e VTEB para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.

Para verificar este impacto nos fluxos turbulentos de calor latente, foi feita uma análise do corte vertical na latitude central da RMSP. A Figura 3.16 mostra a diferença entre as simulações *TEB* e *VTEB* na umidade relativa nos níveis verticais. Em todos os casos, a simulação *VTEB* apresenta um valor de umidade relativa superior ao caso *TEB* próximo a superfície, devido à presença da vegetação, chegando a atingir valores de até 6% mais elevados (Figura 3.16c). Este aumento de umidade contribui para o aumento do fluxo de calor latente a redução da temperatura nas simulações *VTEB*.

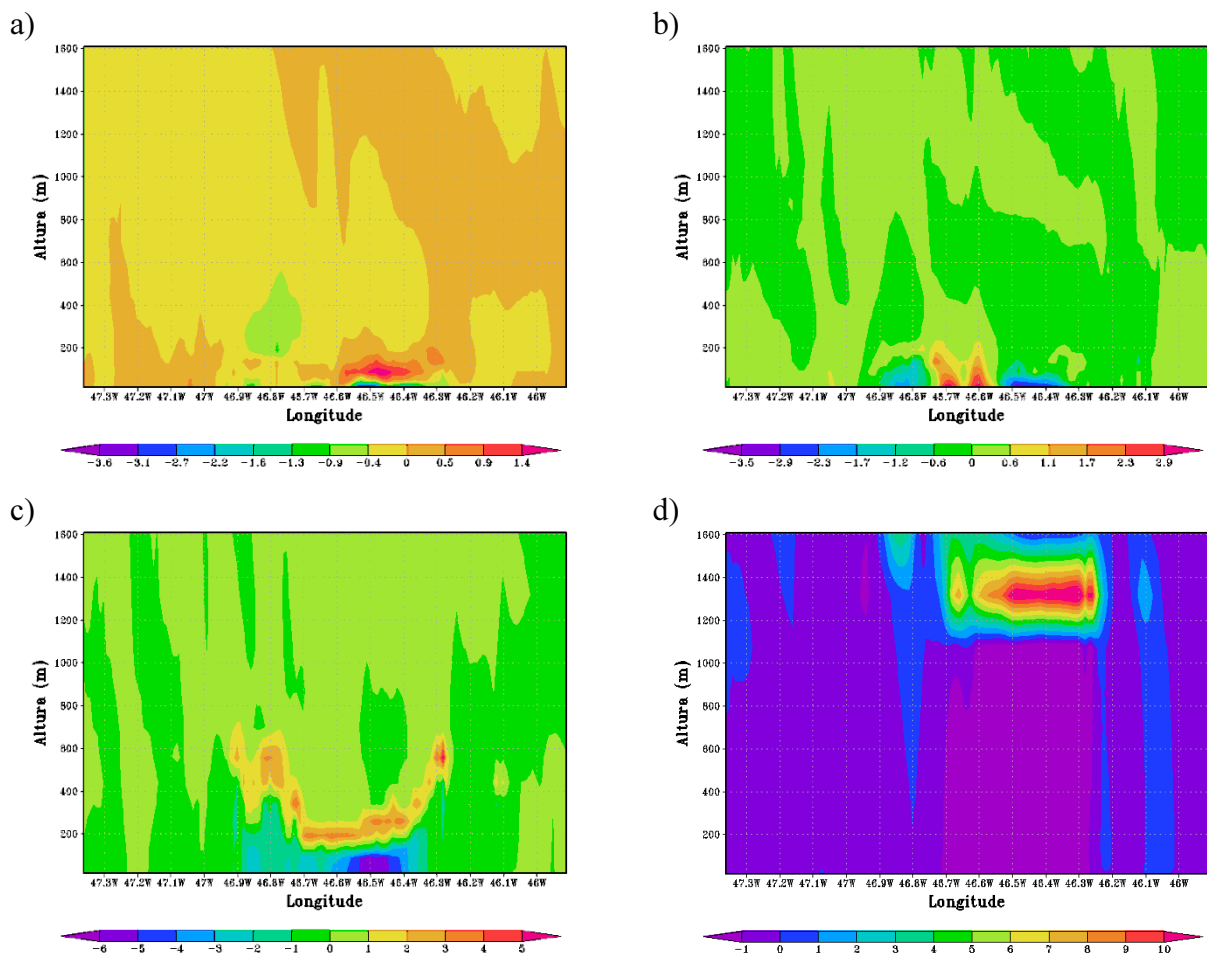


Figura 3.16 – Corte vertical de diferença de umidade relativa (em %) entre a simulação *TEB* e *VTEB*, na latitude $-23,5$, central a RMSP, para a) 15 Z e b) 18 Z do dia 18 de julho, c) 15 Z e d) 18 Z do dia 19 de julho.

A diferença do saldo de radiação entre a simulação *TEB* e *VTEB* é apresentada na Figura 3.17. A maior temperatura da superfície e menor umidade do ar resultam num menor saldo de radiação na simulação *TEB*. Este efeito é mais evidente no período diurno, alcançando valores de até $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, onde o albedo efetivo composto pela superfície vegetada e urbana atua junto com a radiação solar (Figura 3.17b e 3.17d).

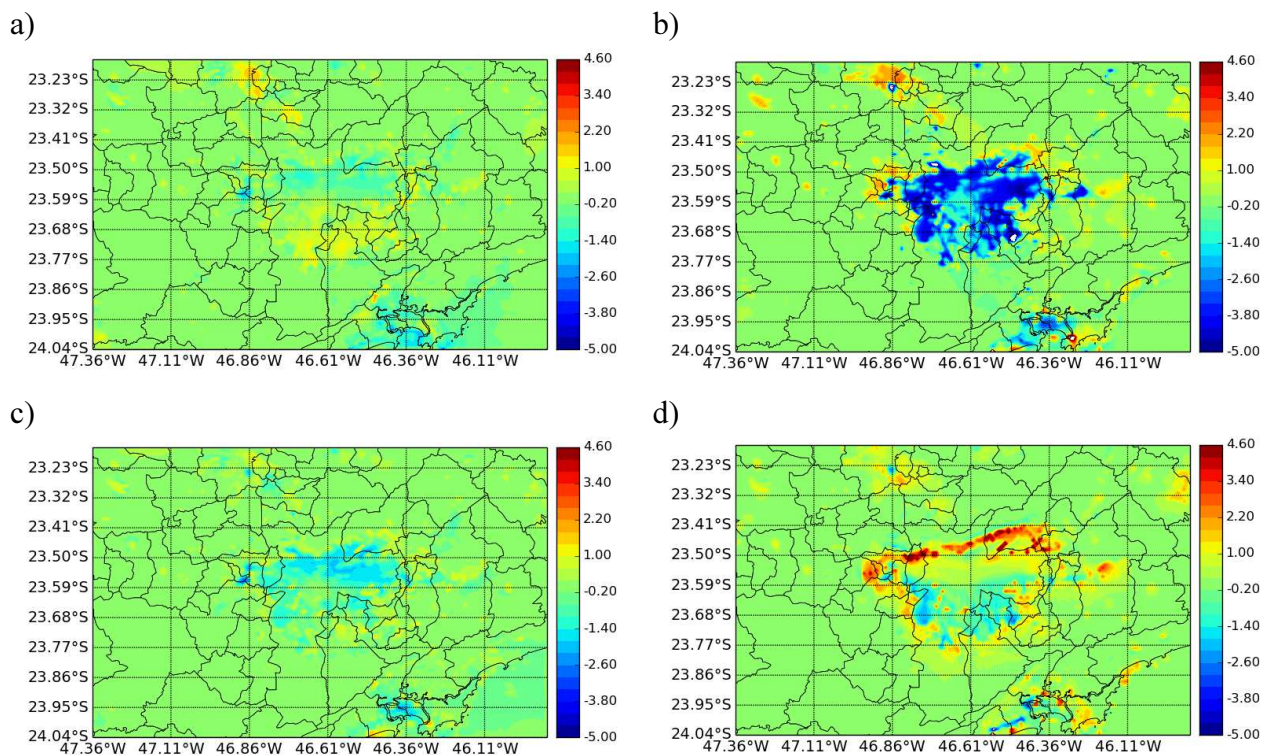


Figura 3.17 – Diferença de saldo de radiação (em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) entre as simulações *TEB* e *VTEB* para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.

A última componente da equação do balanço de energia (Equação 1.1) é apresentada na Figura 3.18, que mostra o fluxo de calor armazenado na superfície. O cálculo desta variável foi feito utilizando o modelo de histerese (GRIMMOND *et al.*, 1991; ROBERTS *et al.*, 2006).

em que $a_1=0,58$, $a_2=0,48$ (h) e $a_3=-35,7$ (W/m^2) são coeficientes médios obtidos por FERREIRA (2010) para a cidade de São Paulo. Estes valores podem variar significativamente de um lugar para outro (MARCIOTTO, 2013). No dia 18 de julho às 15 Z (Figura 3.18b), a simulação *TEB* apresenta até $4,80 W \cdot m^{-2}$ a mais de intensidade de fluxo de calor armazenado no solo que a simulação *VTEB*.

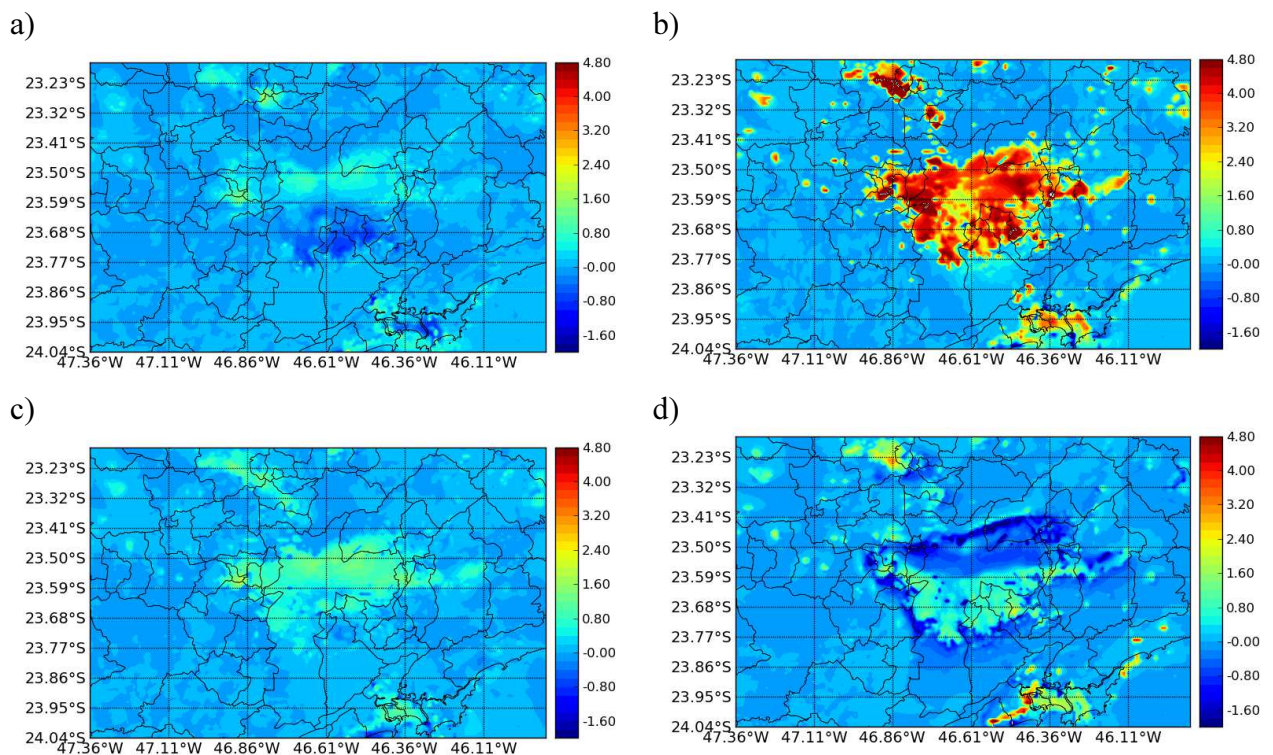


Figura 3.18 – Diferença de fluxo de calor armazenado no solo (em $W \cdot m^{-2}$) entre as simulações *TEB* e *VTEB* para a) 00Z do dia 18 julho, b) 15Z do dia 18 de julho, c) 00Z do dia 19 julho e d) 15Z do dia 19 julho.

3.3 Sumário

Neste capítulo o processo de ponderação dos fluxos turbulentos foi introduzido no BRAMS para considerar a influência da vegetação em áreas urbanas. O modelo foi avaliado de diversas maneiras: comparação com dados observados de superfície, sondagem e sensoriamento remoto. Em todos os casos, os resultados mostraram uma clara melhora

qualitativa da previsão numérica considerando a vegetação na área urbana. Além disso, o efeito da presença da vegetação foi discutido e comparado com uma simulação sem consideração de áreas verdes em regiões urbanas.

4 TESTES DE SENSIBILIDADE

Após avaliação e validação da implantação da vegetação na parametrização urbana TEB, que chamamos de *VTEB*, uma série de testes de sensibilidades alterando os parâmetros radiativos, dinâmicos e termodinâmicos da estrutura que compõe o cânion urbano é realizada.

A simulação controle corresponde à simulação *VTEB* descrita no capítulo 3. O período de simulação, juntamente com as condições de contorno e iniciais, também são os mesmos. A partir desta integração, as mudanças nos parâmetros foram:

- Modificação no material das construções: através de variação do albedo, da emissividade, da capacidade térmica e condutividade térmica da superfície da parede, rua e telhado;
- Modificação na estrutura urbana: Razão Geométrica;
- Modificação na vegetação: variação no NDVI e tipo de vegetação.

Os testes de sensibilidade são avaliados a partir da intensidade da ICU e no Conforto Térmico para ambientes Externos. A avaliação destes dois parâmetros é importante, pois o primeiro demonstra o impacto da cidade sob o microclima local (ROTH, 2000; ATKINSON, 2003; TURSILOWAT *et al.*, 2012), enquanto o segundo sobre o comportamento do ser humano (ALI-TOUDERT *et al.*, 2006; HONJO, 2009; MINELLA *et al.*, 2011). Para o cálculo da ICU, uma simulação substituindo a região urbana pela vegetação do tipo Floresta Mista foi

utilizada. Este tipo de vegetação foi escolhido por ser a predominante no entorno da RMSP (FREITAS, 2003).

Para este trabalho, o conforto térmico é calculado a partir da relação de Temperatura Efetiva (TE) proposta por Missenard (1937, citado por GOUVÊA, 2007). Esta relação considera a temperatura e a umidade relativa do ar no nível do pedestre (geralmente a 2 m acima da superfície):

$$TE = T - 0,4(T - 10) \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \quad (4.1)$$

em que TE é a temperatura efetiva ($^{\circ}\text{C}$), T é a temperatura do ar a 2 m ($^{\circ}\text{C}$) e UR é a umidade relativa do ar a 2 m (em %). Os níveis de conforto definidos por este índice são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Classificação das condições de conforto térmico humano pela temperatura efetiva. Fonte: HENTSCHEL (1986; citado em SUPING et al.,1992).

TE ($^{\circ}\text{C}$)	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

4.1 Albedo da Superfície

O albedo é uma propriedade importante que tem grande influência no efeito da ilha de calor urbana, pois atua no principal meio da superfície ganhar calor, desde que representa a razão entre a radiação solar refletida pela superfície e a radiação solar incidente. Muitos estudos indicam que a mudança do albedo pode contribuir para a redução da intensidade da ICU, alterando o tipo de material das construções, ou até mesmo, pintando-as (TAHA, 1997; BRETZ *et al*, 1998; OLESON *et al*, 2010).

Para avaliar este tipo de proposta, duas simulações foram realizadas com o modelo VTEB, alterando apenas o albedo do telhado das construções, mantendo as outras configurações, condições iniciais e de contorno as mesmas descritas no Capítulo 3 e comparando os resultados com aqueles obtidos na simulação controle. Na primeira simulação, o albedo foi modificado para 0,08, reduzindo em até 55% do seu valor original. Este valor seria semelhante de um material do tipo asfalto. A segunda simulação tenta recriar a proposta do “telhado branco”, no qual o albedo do telhado de todas as construções foi alterado para 0,90 (albedo semelhante ao da neve).

A Figura 4.1 mostra a evolução diária da intensidade da ICU, com base na temperatura a 2 m, obtidas da simulação VTEB como albedo original (0,18) e das simulações com a modificação do albedo do telhado num ponto central da RMSP (latitude de $-23,5^{\circ}$ e longitude $-46,5^{\circ}$). A redução do albedo do telhado (Figura 4.1) aumenta a ICU em até $0,2^{\circ}\text{C}$. No caso do albedo 0,90, a hipótese do “telhado branco”, a intensidade em toda a mancha urbana se reduz em até 1°C . Com maior radiação solar sendo refletida pela superfície dos telhados, menos radiação é absorvida, diminuindo a temperatura e o efeito da ilha de calor. Este efeito pode ser mais bem evidenciado analisando o campo de intensidade da ICU (Figuras 4.2 e 4.3).

Obviamente que a hipótese do “telhado branco” não seria um procedimento eficaz a ser realizado num grande centro, como a RMSP, devido à poluição das cidades que compõe a região metropolitana, conforme mencionado em Freitas (2012).



Figura 4.1 – Evolução diária da intensidade da ICU para um ponto central da RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha verde a simulação com albedo do telhado igual a 0,08 e a linha vermelha a simulação com o albedo do telhado igual a 0,90.

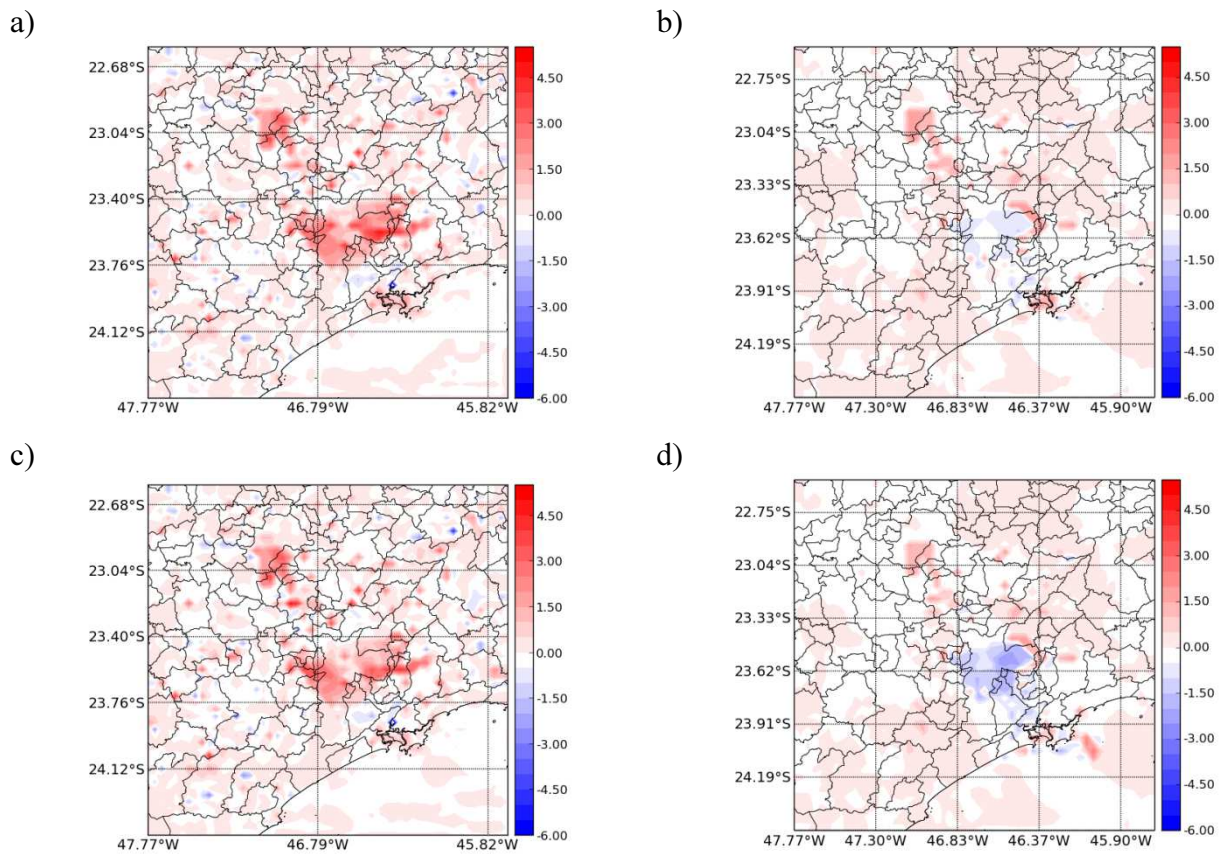


Figura 4.2 – Campos de intensidade de ICU. A coluna da esquerda é relativa à simulação com albedo igual a 0,08 e a da direita relativa à simulação com albedo igual a 0,90. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 18 de julho.

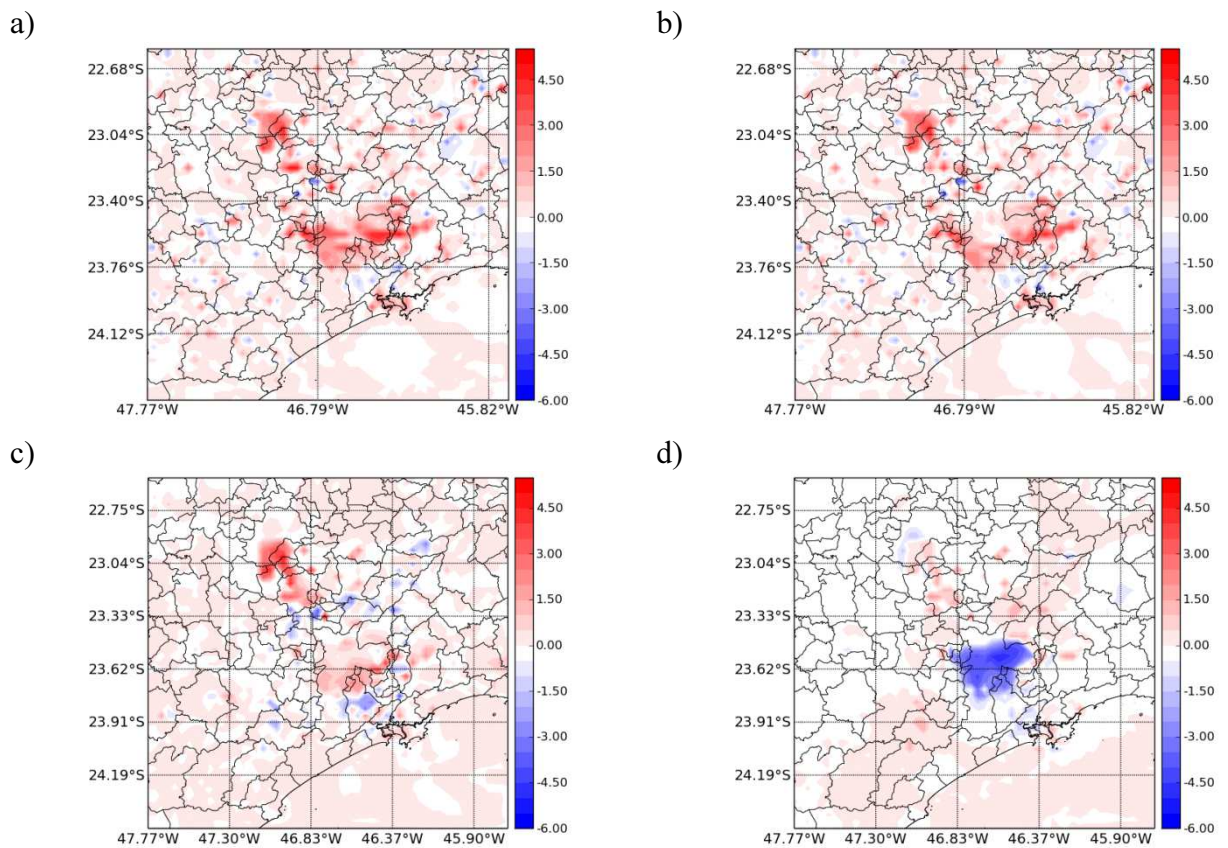


Figura 4.3 – Campos de intensidade de ICU. A coluna da esquerda é relativa à simulação com albedo igual a 0,08 e a da direita relativa à simulação com albedo igual a 0,90. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 19 de julho.

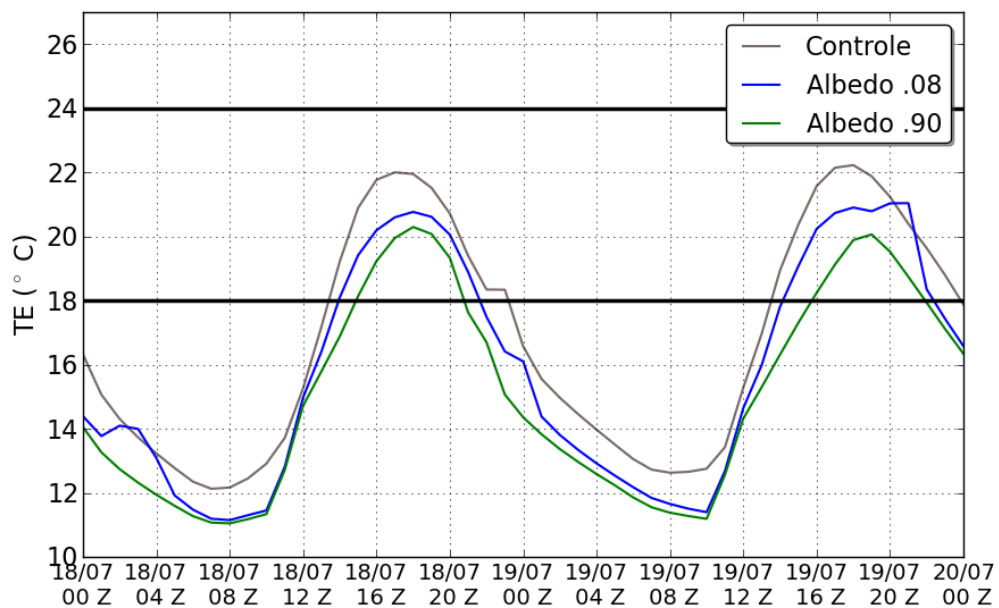


Figura 4.4 – Evolução diária da intensidade da temperatura efetiva para um ponto central da RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha verde a simulação com albedo do telhado igual a 0,08 e a linha vermelha a simulação com o albedo do telhado igual a 0,90.

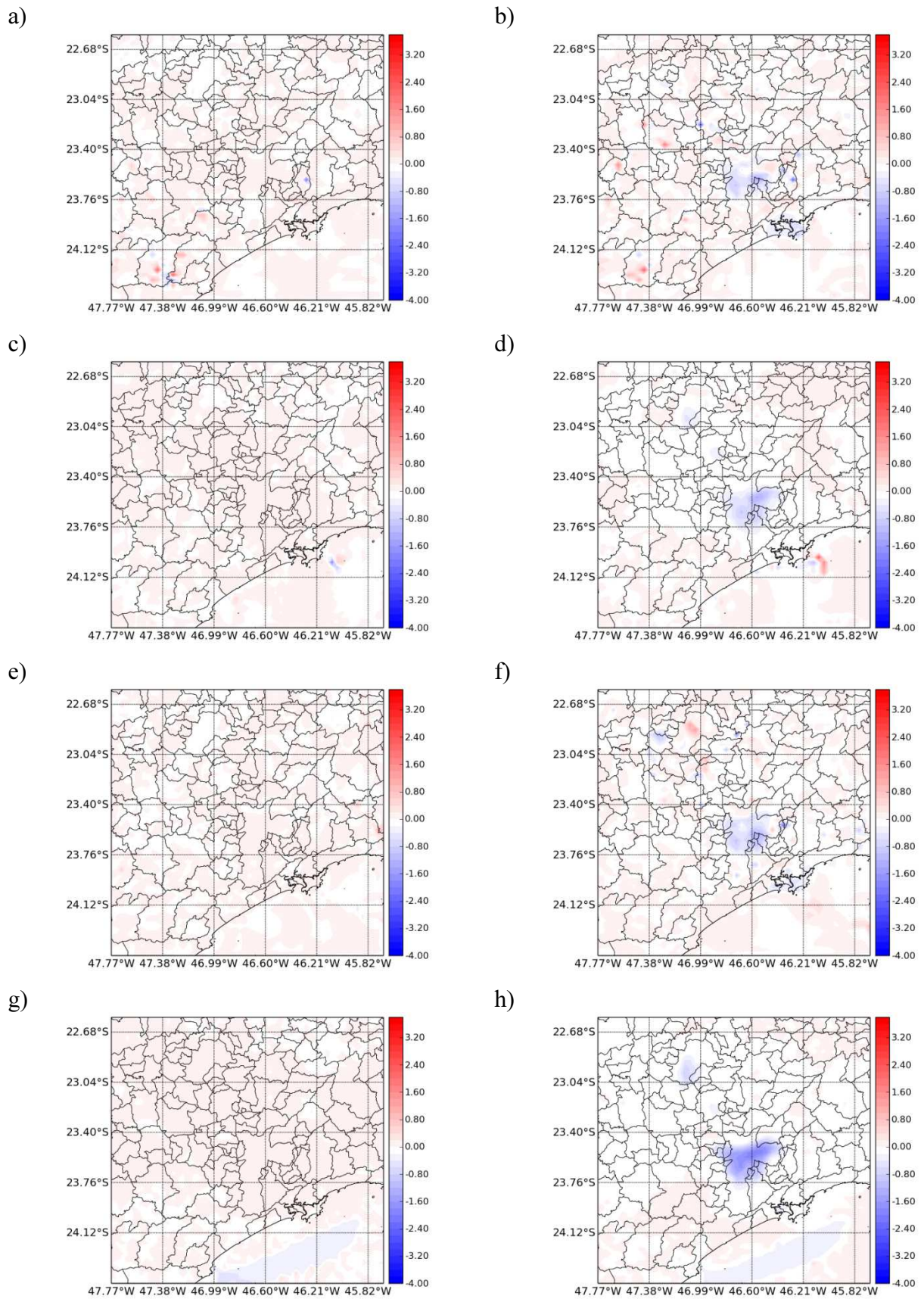


Figura 4.5 – Campos da diferença entre a temperatura efetiva da simulação controle e daquela com albedo modificado. A coluna da esquerda é relativa à simulação como albedo igual a 0,08 e a da direita é relativa à simulação com albedo igual a 0,90. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 18 de julho; e) e f) 00Z, g) e h) 15Z do dia 19 de julho.

4.2 Emissividade da Superfície

A emissividade tem um papel fundamental na quantidade de radiação de onda longa emitida por uma superfície. O seu alto valor tende a reduzir a intensidade da temperatura durante o dia (HARMAN, 2003; FERREIRA, 2010), pois mais radiação térmica é emitida por esta superfície.

Na simulação controle, a emissividade das paredes, da rua e do telhado foi de 0,85, 0,90 e 0,90, respectivamente, sendo estes os mesmos valores utilizados em Freitas (2003). Estes valores foram elevados para 1, considerado, assim, um corpo negro (toda radiação absorvida por esta superfície é totalmente emitida pela mesma). A Figura 4.6 mostra a evolução da intensidade da ICU entre a simulação original e com o aumento da emissividade para um ponto central na RMSP. Percebe-se que grande parte do dia, a intensidade da ICU é menor na simulação em que a emissividade é maior. Neste caso, a diferença entre as simulações fica entre 0,4 °C e 0,6 °C, semelhante ao obtido pelo modelo de balanço de energia de Oke *et al* (1991) e Atkinson (2003). Às 00Z do dia 18 de julho, este valor atinge 2°C. Somente no período entre às 8Z e às 12Z do dia 18 de julho obtêm-se uma situação inversa quando a emissividade é maior. Isto se deve ao comportamento do campo de temperatura no horário (Figuras 4.7 e 4.8) e a entrada da brisa marítima no período em questão (FREITAS, 2003).

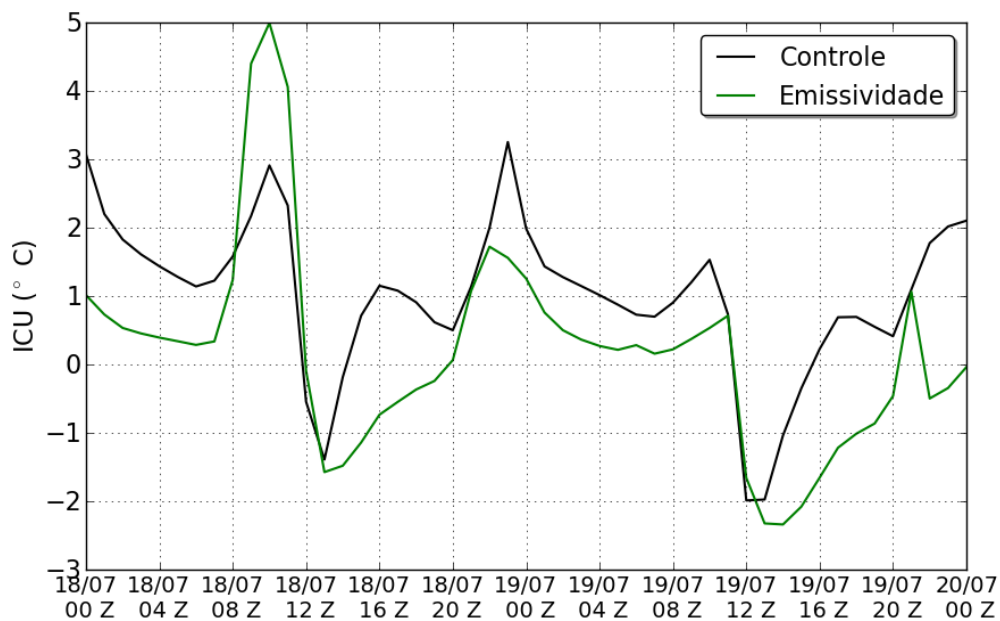


Figura 4.6 – Evolução diária da intensidade da ICU para um ponto central da RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com emissividade das superfícies aumentada para 1.

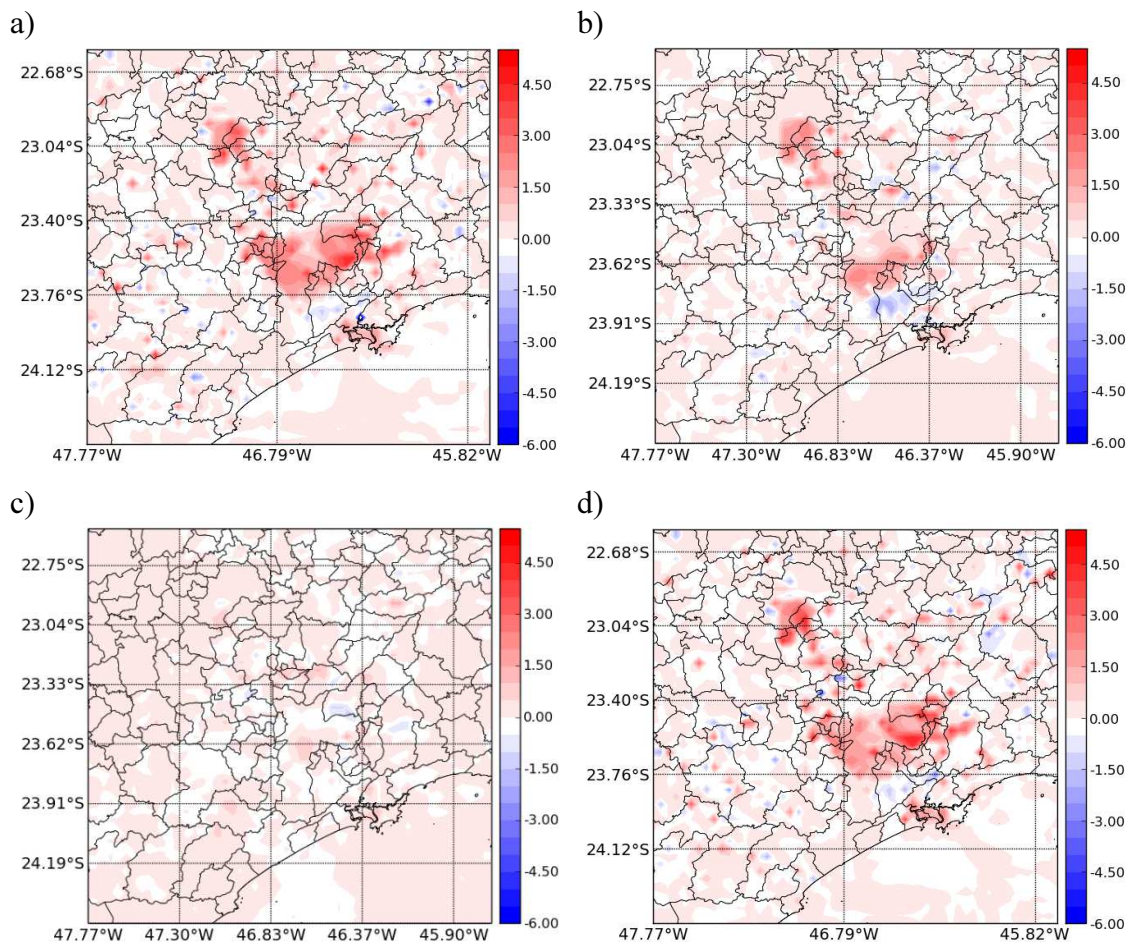


Figura 4.7 – Campos de intensidade de ICU para as a) 00 Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 15Z do dia 18 de julho obtidos da simulação com emissividade igual a 1.

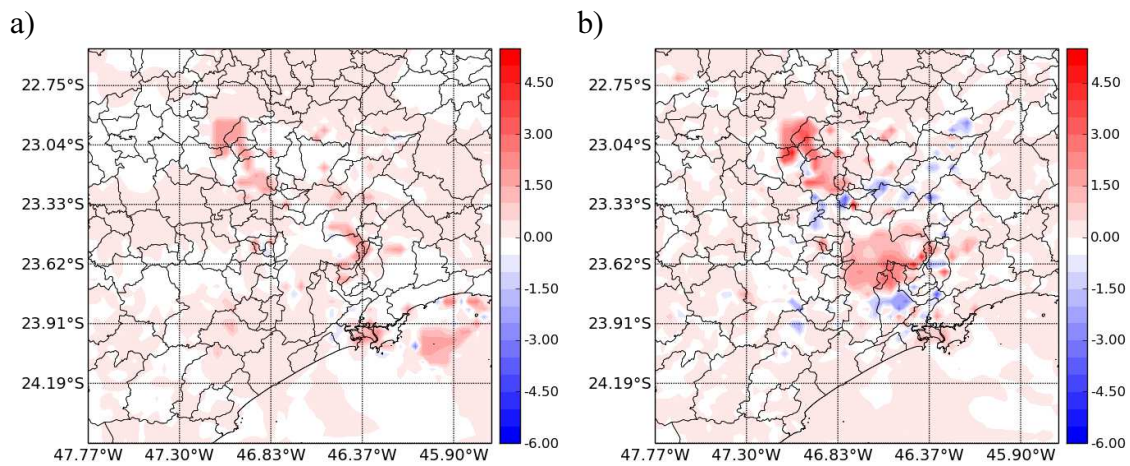


Figura 4.8 – Campos de intensidade de ICU para as a) 18Z do dia 18 de julho e b) 00Z do dia 19 de julho obtidos da simulação com emissividade igual a 1.

A Figura 4.9 mostra a evolução da TE comparando a saída da simulação controle e a com o aumento da emissividade. Assim como no caso da ICU, com o aumento da emissividade, a temperatura efetiva diminui, sendo reduzida em até 1,6 °C às 17Z do dia 18 de julho. A Figura 4.10 mostra que este efeito é mais evidente na região central da RMSP, devido às características das construções na região, com altas construções e baixa razão geométrica, armazenando e, assim, liberando energia para a atmosfera.

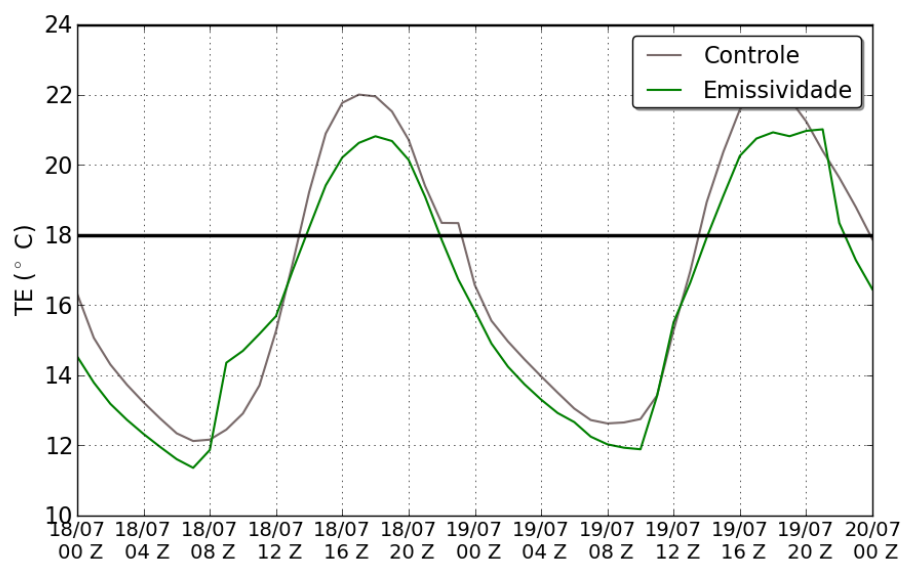


Figura 4.9 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com emissividade das superfícies aumentada para 1. A linha horizontal contínua representa o limite da situação agradável – levemente fresco para levemente quente.

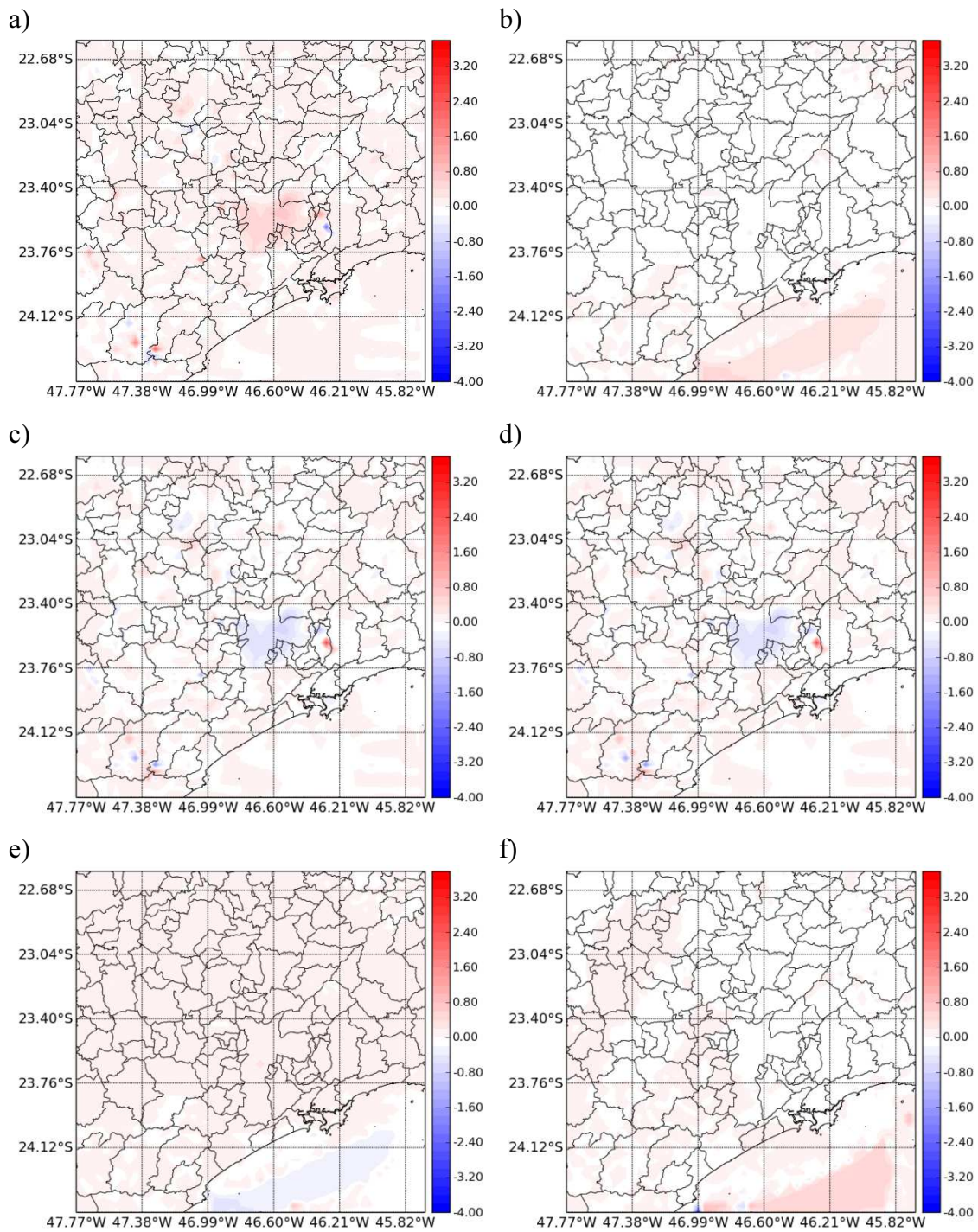


Figura 4.10 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação com emissividade 1 e simulação controle para as a) 00 Z, b) 15Z, c) 18Z do dia 18 de julho e d) 00Z, e) 15Z e f) 18Z do dia 19 de julho.

4.3 Condutividade Térmica

Este parâmetro tem um impacto na temperatura do material e, assim, na interface superfície/ar. Desde que a condutividade mostra como o calor se difunde por um material, a diminuição do seu valor deveria induzir uma redução de sua temperatura.

A Figura 4.11 mostra a evolução da intensidade da ICU quando a condutividade térmica é reduzida por um fator de 10 vezes o seu valor na simulação controle (Tabela 4.2). Ao contrário do caso da emissividade, o comportamento da evolução para a condutividade térmica reduzida em 10 vezes é similar ao caso controle. Isto também pode ser verificado na Figura 4.13, que mostra o campo da ICU. Em alguns casos, esta diferença pode alcançar até 3 °C, como às 21Z do dia 18 de julho. Hamdi e Schayes (2008) atribuem a redução da temperatura do ar dentro do cânion ao efeito das paredes, visto que é a superfície que recebe maior radiação solar. No caso deles, a diferença de temperatura alcançou os mesmos 3°C no período do pôr-do-sol, para a cidade de Basileia, na Suíça.

Para o caso do conforto térmico, a evolução diária mostra um efeito semelhante ao caso da emissividade (Figura 4.12). A temperatura efetiva é sempre de menor intensidade para o caso da mudança nos valores de condutividade do material. A diferença pode alcançar até 1,6 °C às 18Z do dia 18 de julho (Figura 4.14).

Tabela 4.2 – Valores da condutividade térmica (em $W m^{-1} K^{-1}$) da simulação controle para as três camadas que compõem as superfícies dos prédios no TEB (Figura 4.9). Valores obtidos em Freitas (2003). Para a simulação do teste de sensibilidade, os valores da condutividade foram reduzidos 10 vezes do seu valor original.

Superfície	Camada 1	Camada 2	Camada 3
Paredes	0,81	0,81	0,81
Rua	1,0103	1,0103	1,0103
Telhado	0,41	0,05	0,03

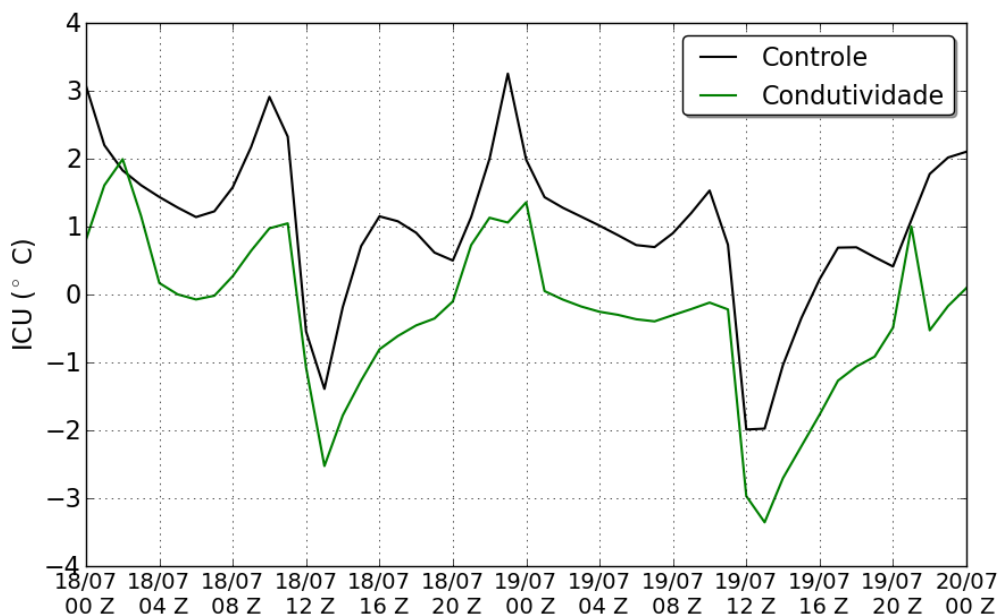


Figura 4.11 – Evolução diária da intensidade da ICU para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com a condutividade térmica das superfícies reduzida 10 vezes.

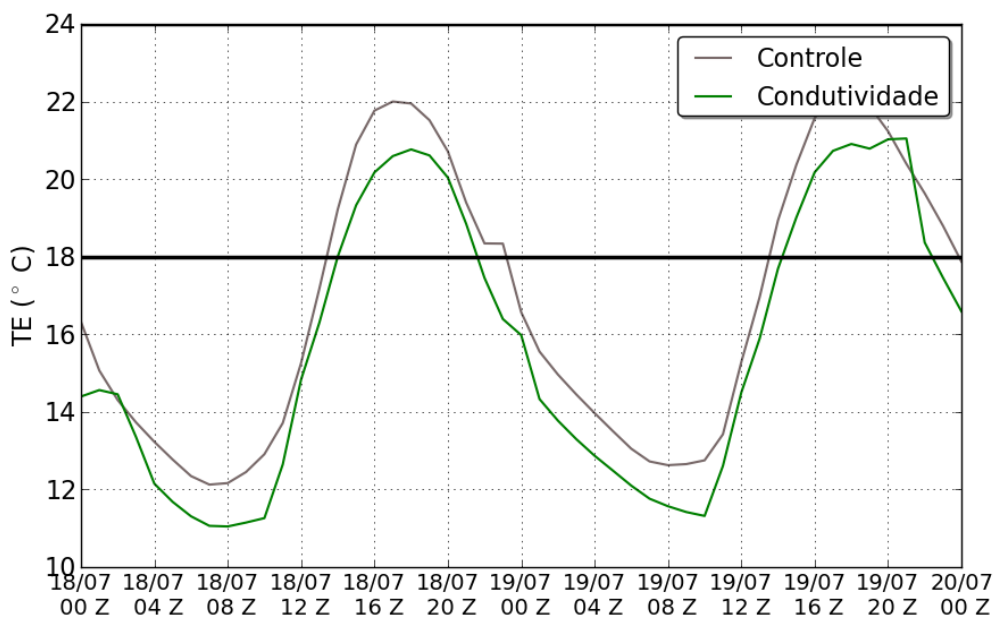


Figura 4.12 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde a simulação com a condutividade térmica das superfícies reduzida 10 vezes. A linha horizontal contínua representa o limite da situação agradável – levemente fresco para levemente quente.

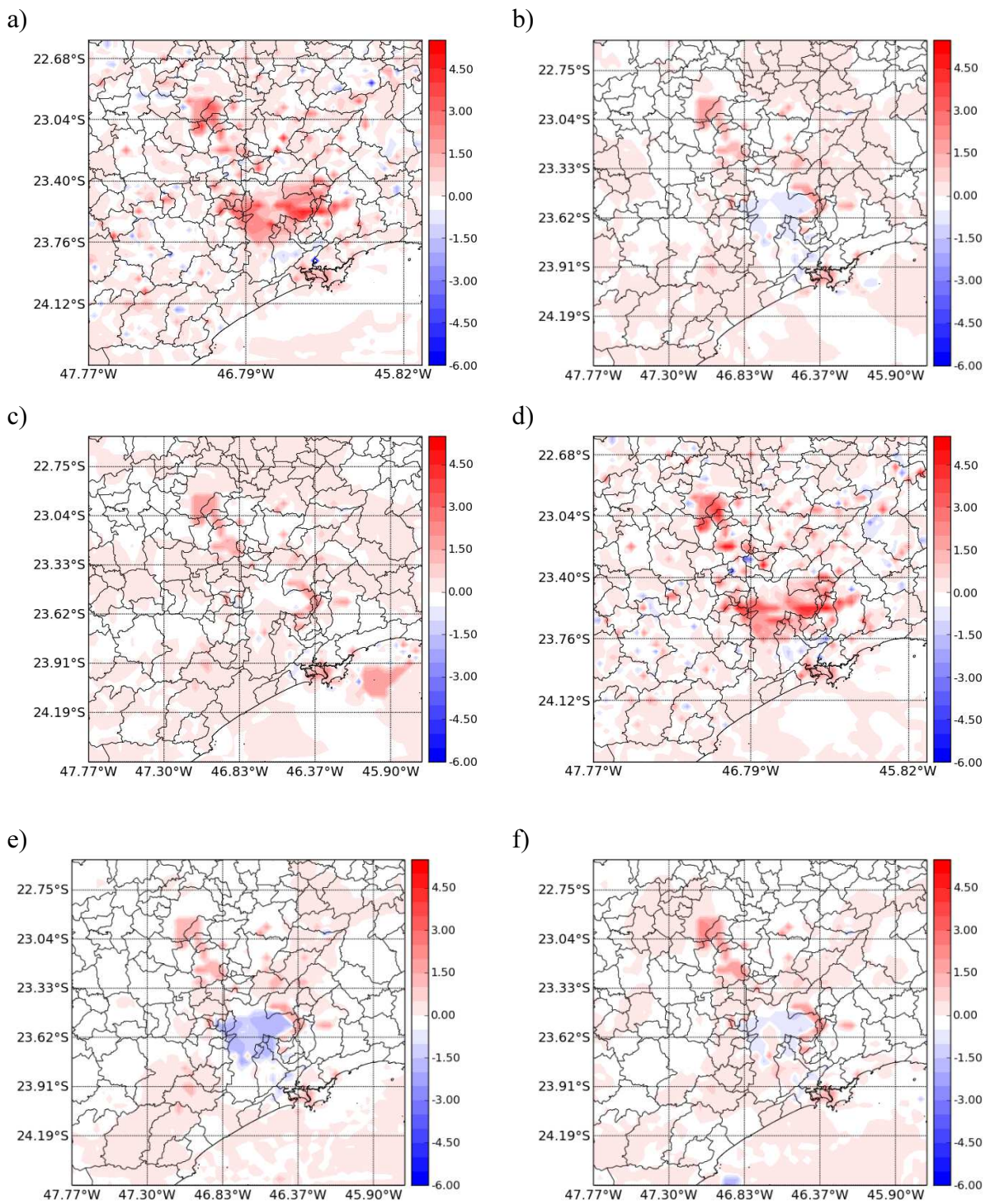


Figura 4.13 – Campos de intensidade da ICU para a simulação com a condutividade térmica reduzida 10 vezes da simulação controle às a) 00 Z, d) 15Z, c) 18Z do dia 18 de julho e d) 00Z, e) 15Z e f) 18Z do dia 19 de julho.

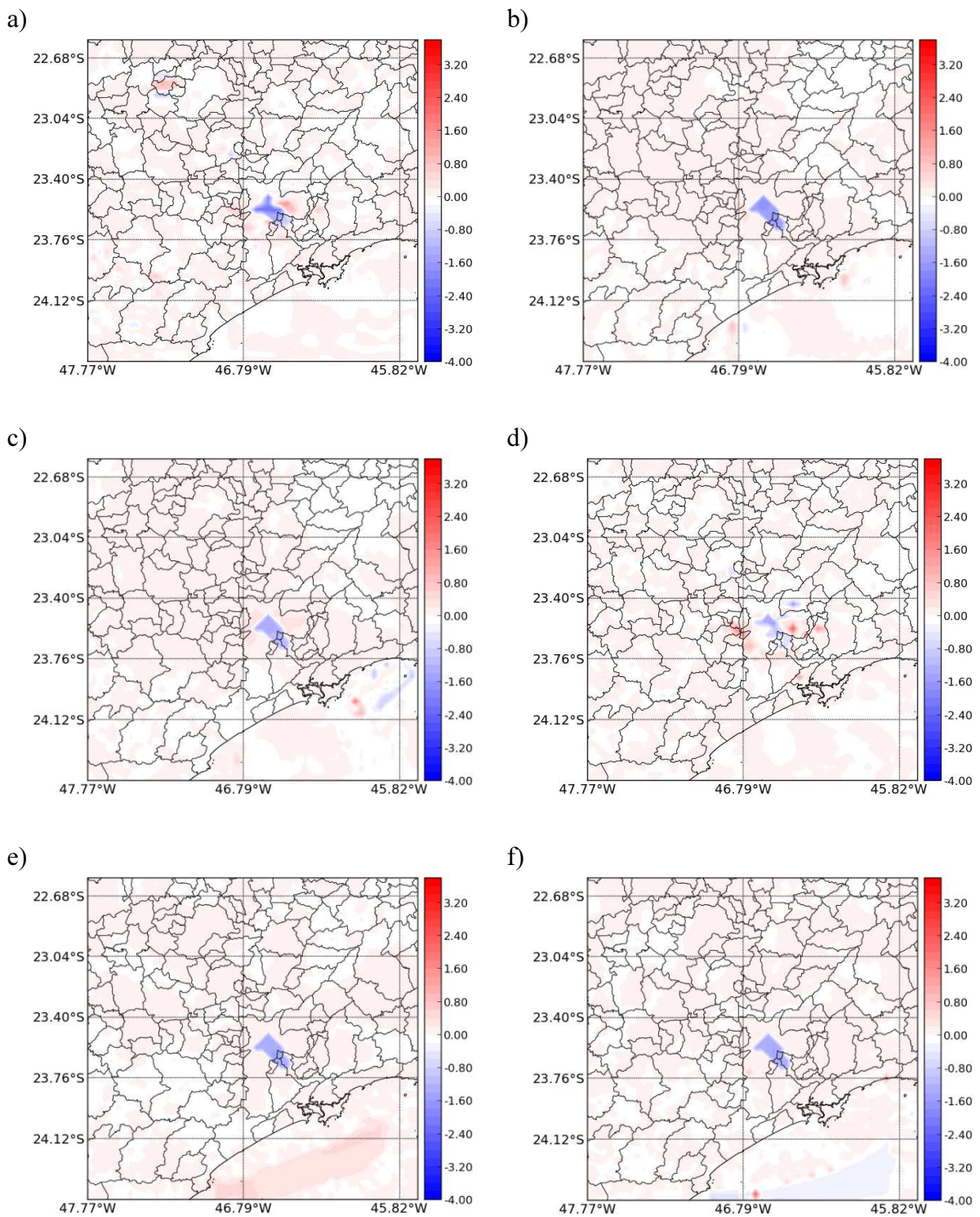


Figura 4.14 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre simulação controle e a simulação com a condutividade térmica reduzida 10 vezes para a) 00 Z, b) 15Z, c) 18Z do dia 18 de julho, e d) 00Z, e) 15Z e f) 18Z do dia 19 de julho.

4.4 Capacidade Térmica

Assim como o caso da condutividade térmica, as mudanças na capacidade de calor de um material terão impacto na temperatura da superfície do material e conseqüentemente na interface superfície/ar. A Figura 4.15 mostra a evolução da intensidade da ICU para as simulações com a capacidade térmica aumentada em 10 vezes e com o seu valor controle (Tabela 4.3), para um ponto central na RMSP. O aumento da capacidade reduz a intensidade da ICU (Figuras 4.16 e 4.17), alcançando o valor aproximado de 0°C no período entre 00Z e 12Z do dia 19 de julho. Muitas vezes este valor é negativo, alcançando até 2,4 °C de diferença com relação à simulação controle, às 15Z do dia 19 de julho (Figura 4.17c). Nota-se que esta diferença sempre acontece por volta das 12Z, horário em que a radiação solar começa a atingir a rua, indicando, assim, um maior efeito desta superfície na transferência de calor.

Tabela 4.3 – Valores da capacidade térmica (em 10^6 J K m^{-3}) da simulação controle para as três camadas que compõem as superfícies dos prédios no TEB (Figura 7). Valores obtidos em Freitas (2003). Para a simulação do teste de sensibilidade, estes valores foram aumentados 10 vezes do seu valor original.

Superfície	Camada 1	Camada 2	Camada 3
Paredes	1,00	1,00	1,00
Rua	1,24	1,28	1,28
Telhado	2,11	0,28	0,29

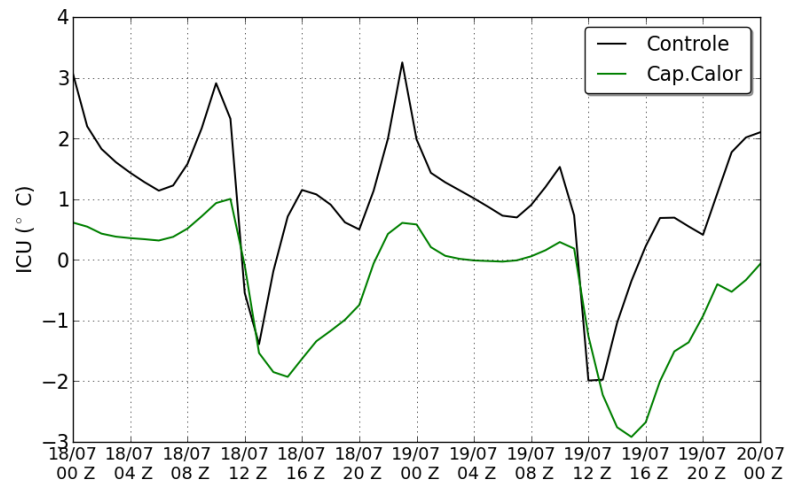


Figura 4.15 – Evolução diária da intensidade da ICU para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde à simulação com a capacidade de calor das superfícies aumentada em 10 vezes.

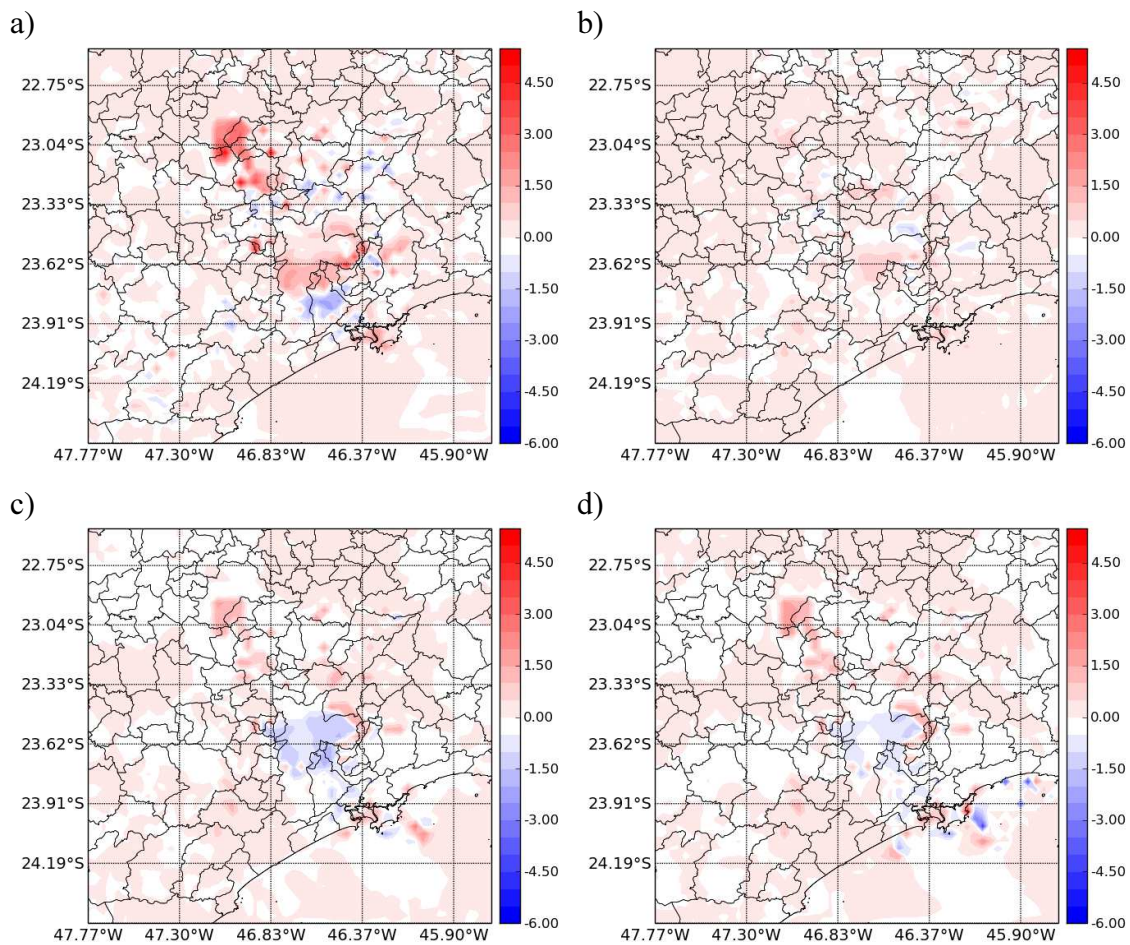


Figura 4.16 – Campos de intensidade da ICU para a simulação com a capacidade térmica aumentada 10 vezes obtidos da simulação controle das a) 00 Z, b) 06 Z, c) 12 Z, d) 15 Z, e) 18 Z do dia 18 de julho.

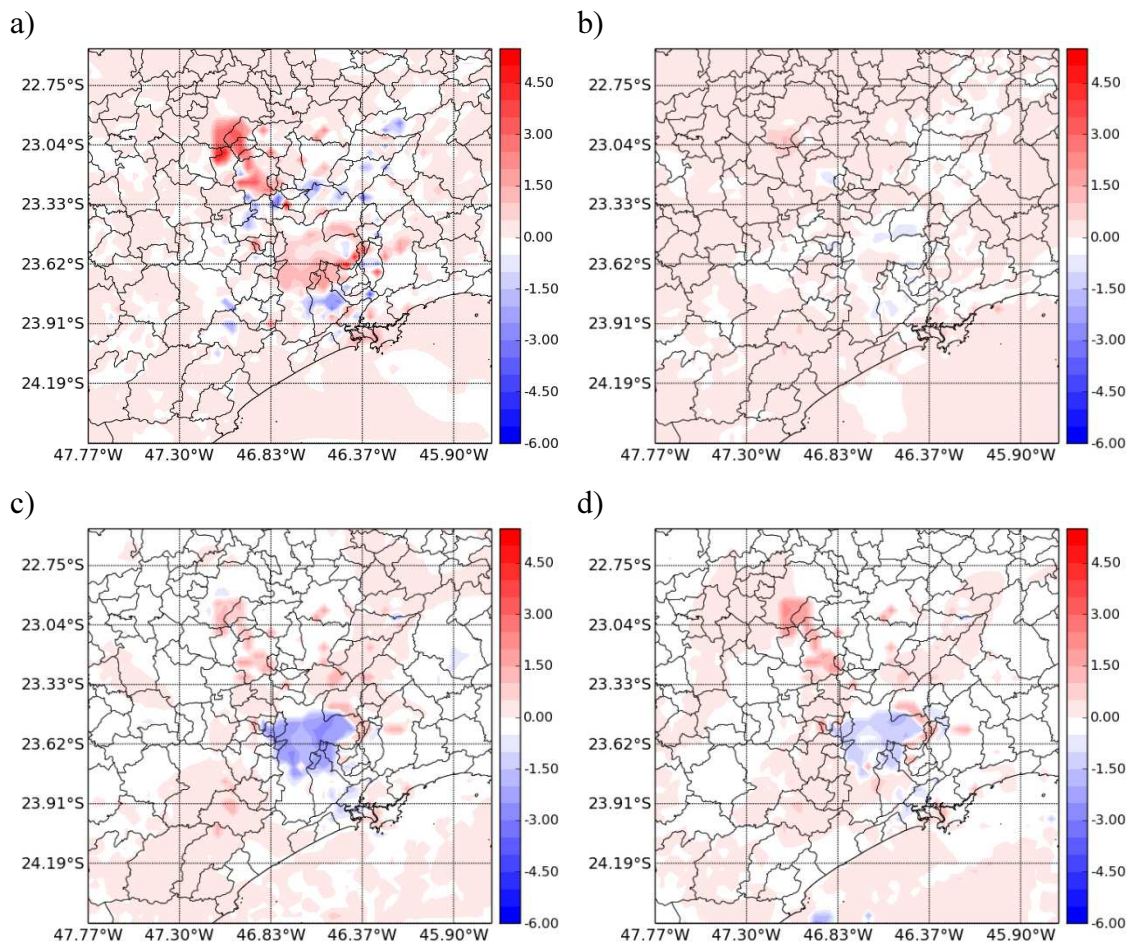


Figura 4.17 – Campos de intensidade da ICU para a simulação com a capacidade térmica aumentada 10 vezes da simulação controle das a) 00 Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 15Z, e) 18Z do dia 19 de julho.

Na Figura 4.18 tem-se a evolução diária da temperatura efetiva para a simulação controle e a simulação com a capacidade térmica das paredes, telhados e ruas aumentada em até 10 vezes. Assim como no caso da condutividade, a temperatura efetiva diminui em até 1,8 °C às 18Z do dia 18 de julho (Figura 4.20a), mas ainda assim permanece entre os níveis de 18 a 24 °C, que representa o índice para o nível levemente quente, segundo Missenard (1937).

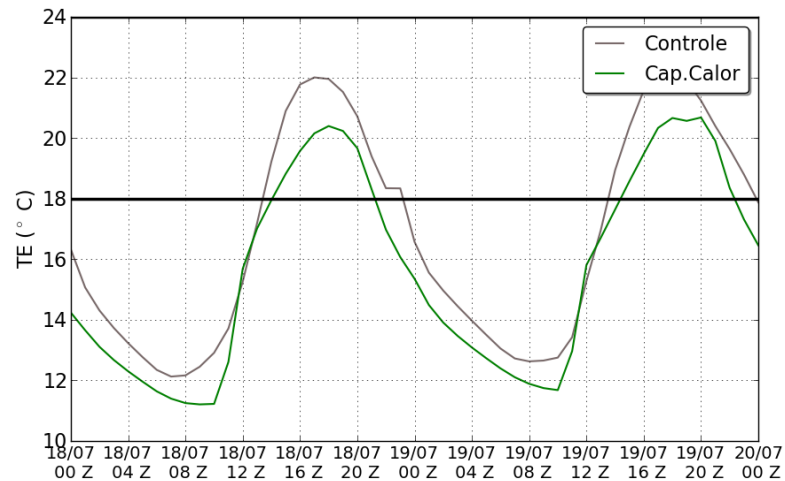


Figura 4.18 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle e a linha verde à simulação com a capacidade de calor das superfícies aumentada 10 vezes. A linha horizontal contínua representa o limite da situação agradável – levemente fresco para levemente quente.

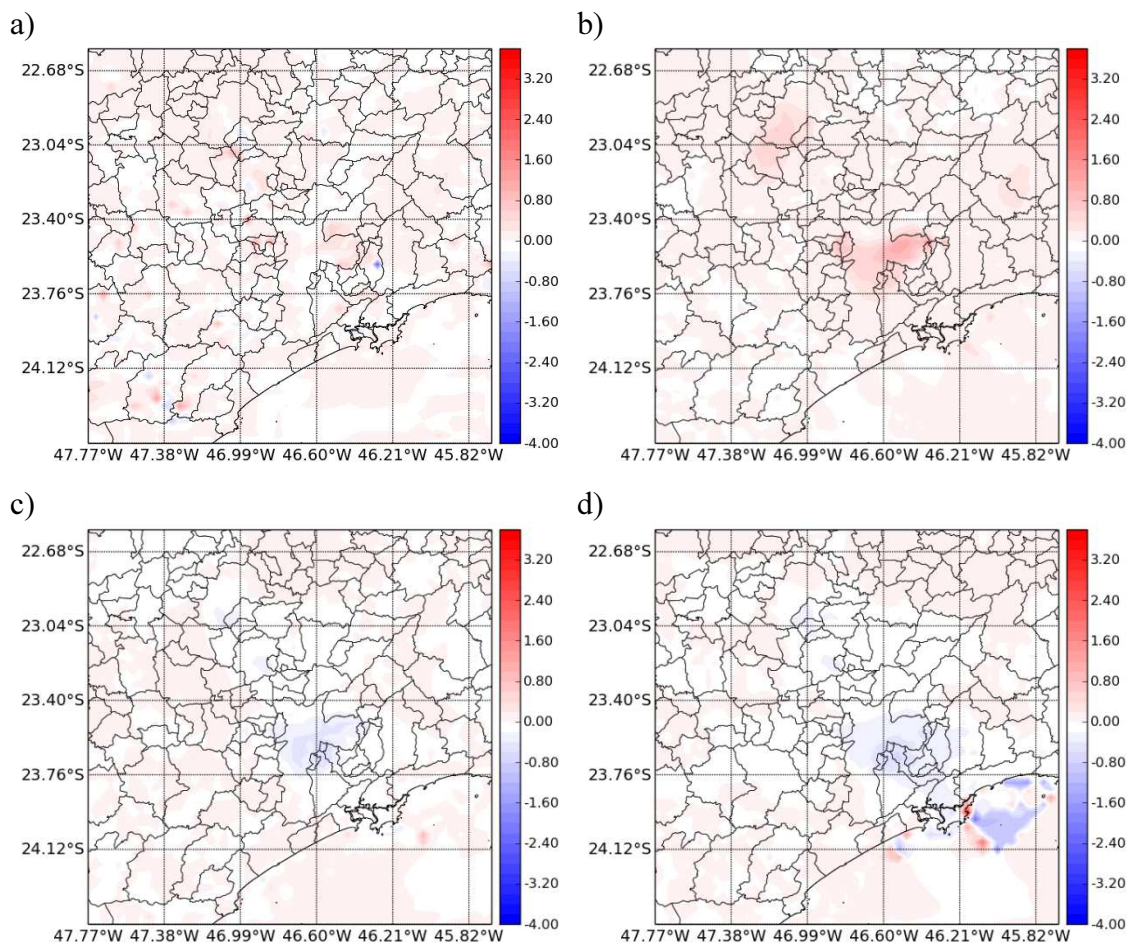


Figura 4.19 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e a simulação com a capacidade térmica aumentada em 10 vezes para a) 00 Z, b) 06Z, c) 12Z, d) 15Z do dia 18 de julho.

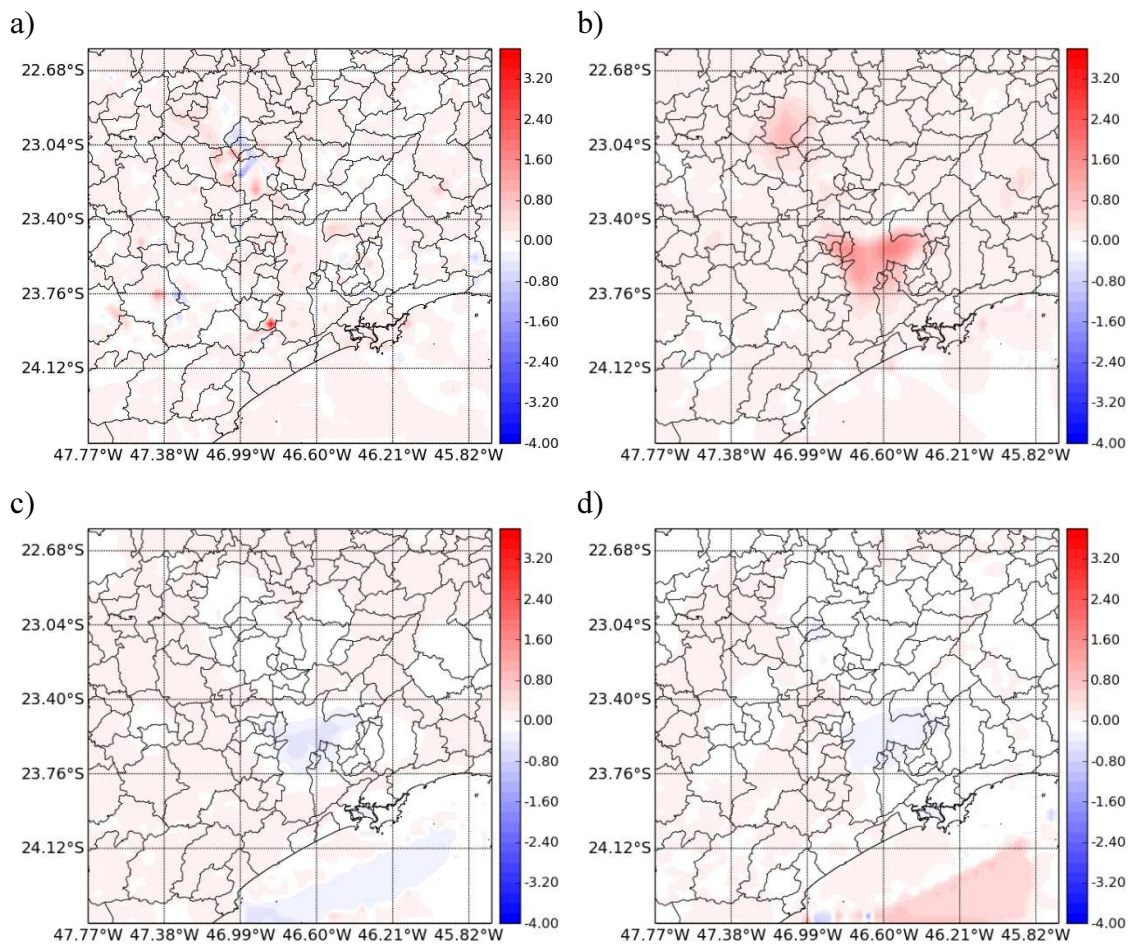


Figura 4.20 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e a simulação com a capacidade térmica aumentada em 10 vezes para a) 18Z do dia 18 de julho, b) 00Z, c) 15Z e d) 18Z do dia 19 de julho.

4.5 Razão Geométrica

Nesta seção iremos tratar o comportamento do microclima de uma região variando a estrutura urbana, neste caso, através da variação da razão geométrica. Este parâmetro afeta diretamente o balanço de energia, devido às mudanças no fator de visão do céu (MORAIS, 2010; MARCIOTTO, 2010). Quanto maior a razão geométrica do cânion (construções bastante elevadas ou ruas estreitas), menor a troca de energia entre as superfícies do cânion e o ambiente e vice-versa.

Para avaliar este impacto, duas simulações foram realizadas para comparar com simulação controle: na primeira, a razão geométrica apresentada na Tabela 3.2 do capítulo anterior foi reduzida pela metade do seu valor controle, e a segunda, o seu valor original foi dobrado.

A Figura 4.21 mostra a evolução diária da intensidade da ICU para ambas as simulações e a controle. O aumento da razão geométrica implica numa diminuição da largura da rua. Neste caso, a área do telhado aumenta, e devido ao albedo desta superfície maior radiação solar é refletida, implicando menos energia armazenada no interior do dossel e reduzindo a temperatura da cidade (Figura 4.22a e 4.22c). Além disso, existe o efeito de sombreamento. No caso da redução da razão geométrica, com a manutenção da altura das construções, aumenta-se a largura do cânion. Apesar de a rua possuir um albedo relativamente menor, o efeito de reflexão múltipla da radiação solar e onda longa são pouco efetivos, liberando mais calor para a atmosfera. Assim, a temperatura no dossel urbano também diminui (Figuras 4.22b e 4.22d).

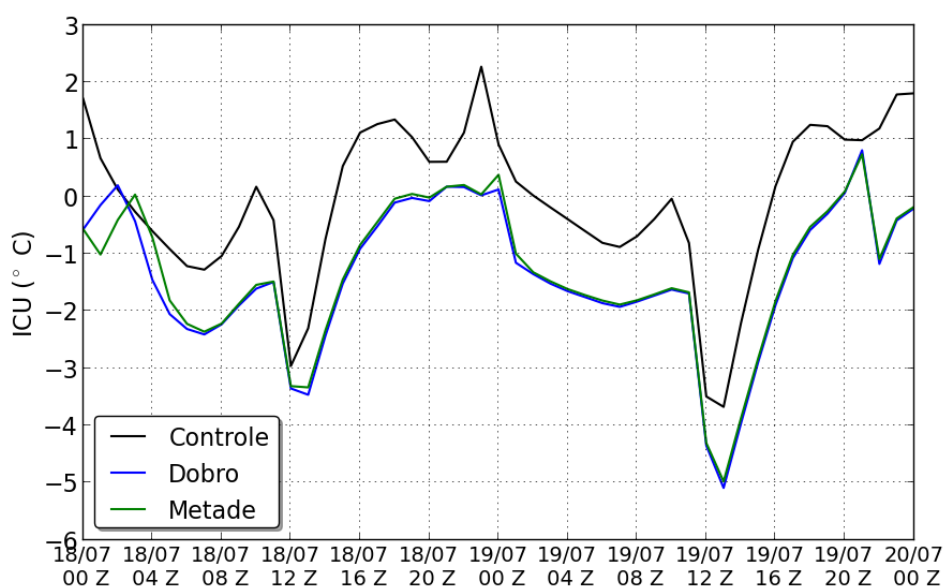


Figura 4.21 – Evolução diária da intensidade da ICU para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha azul representa a simulação com o valor da razão geométrica de todo o uso de solo urbano multiplicada por dois e a linha verde, com a razão geométrica reduzida pela metade do seu valor original.

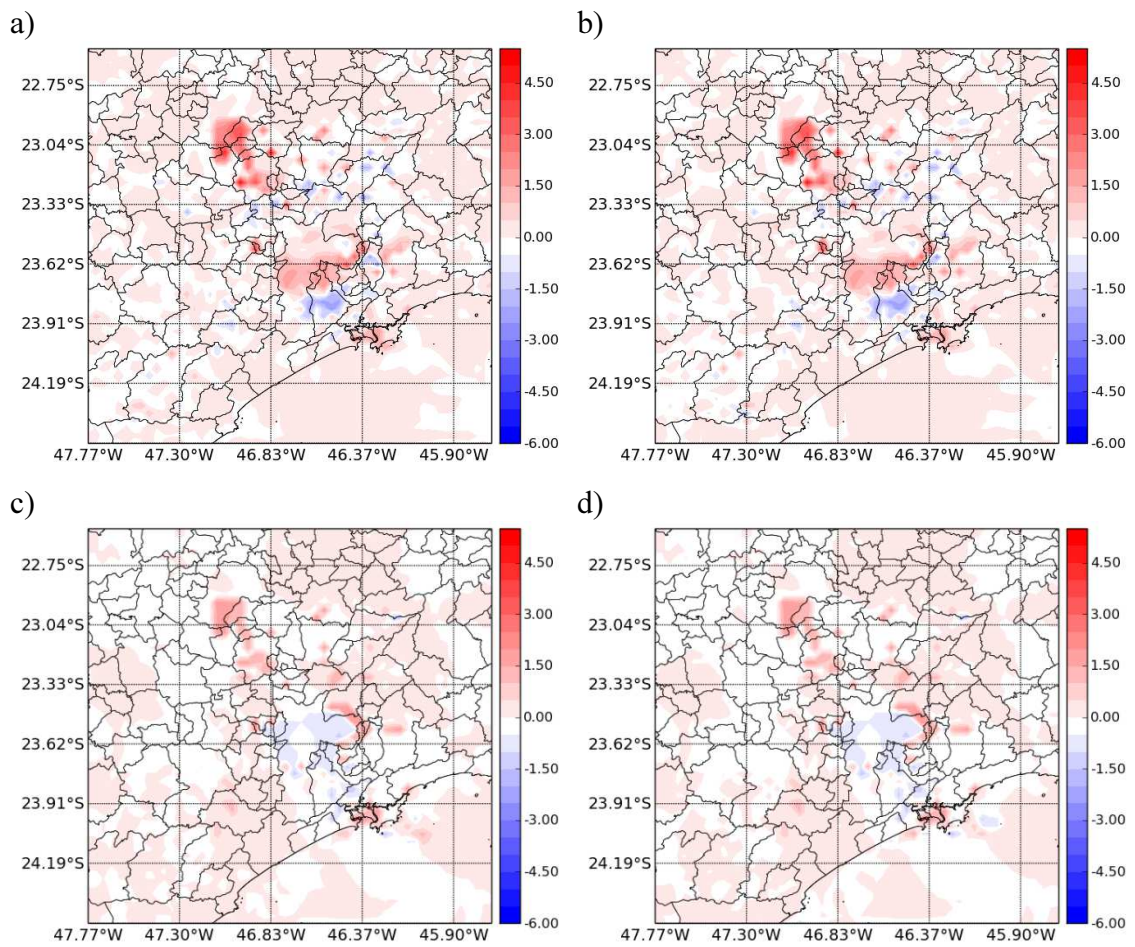


Figura 4.22 – Campos de intensidade da ICU. A coluna da esquerda é relativa à simulação com razão geométrica reduzida pela metade e a da direita relativa à simulação com o dobro do seu valor original. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 18 de julho.

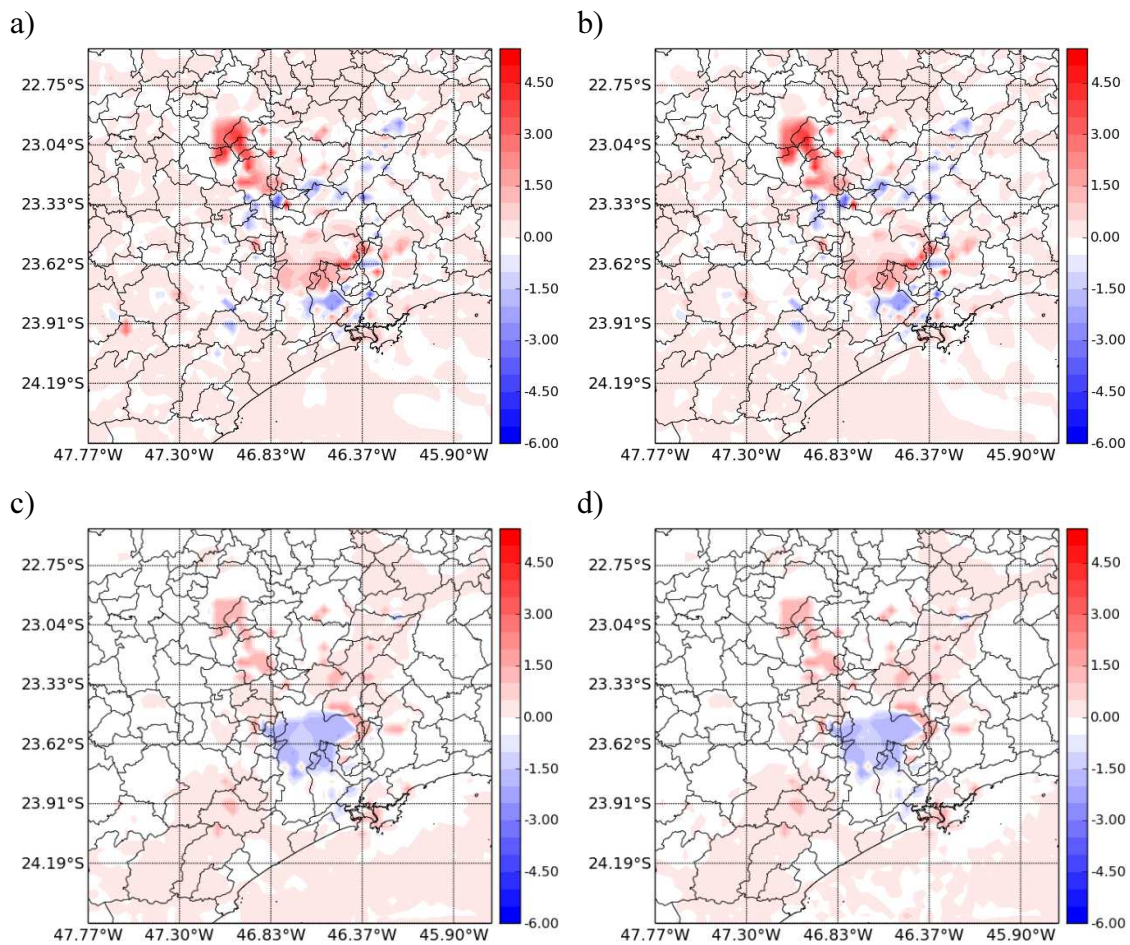


Figura 4.23 – Campos de intensidade da ICU. A coluna da esquerda é relativa à simulação com razão geométrica reduzida pela metade e a da direita relativa à simulação com o dobro do seu valor original. a) e b) 00Z, c) e d) 15Z do dia 19 de julho.

A mesma tendência descrita para a ICU acontece para a TE (Figura 4.24). Neste caso, durante o fim da noite e início da manhã, as mudanças na razão geométrica implicam numa maior redução de temperatura efetiva, sendo que, até por volta das 08Z do dia 19 de julho, a intensidade ultrapassa o limite “Fresco” proposto por Hentschel (1986). Por volta das 18 Z (Figura 4.25d), as simulações com alterações na razão geométrica chegam a ser 0,1 °C mais elevadas.

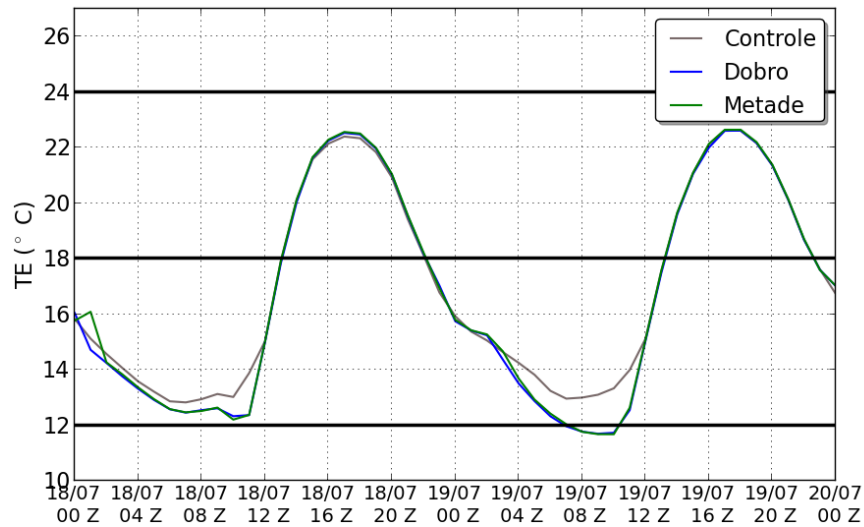


Figura 4.24 – Evolução diária da TE para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha azul representa a simulação com o valor da razão geométrica de todo o uso de solo urbano multiplicada por dois e a linha verde a simulação com a razão geométrica reduzida pela metade do seu valor original. As linhas horizontais representam os limites de conforto térmico descritos na Tabela 4.1.

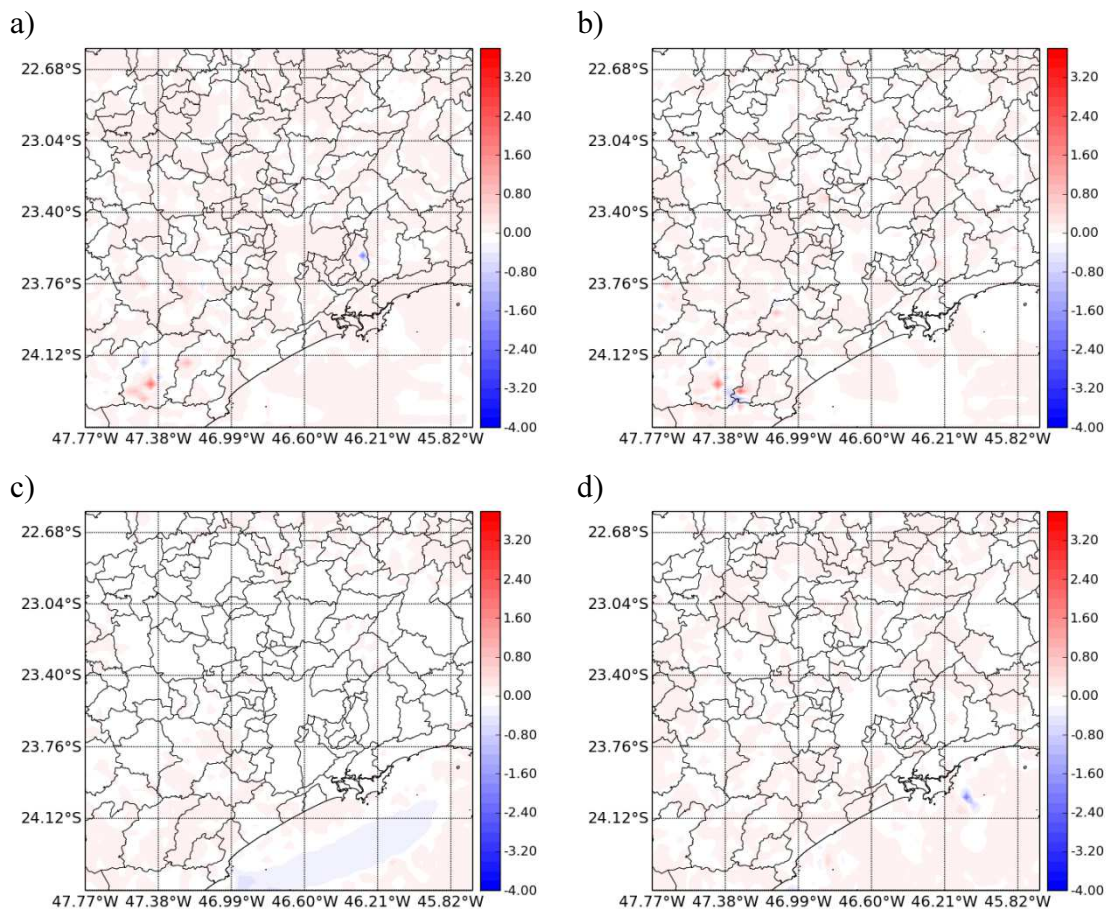


Figura 4.25 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e as simulações com razão geométrica pela metade (coluna da esquerda) e com razão geométrica multiplicada por dois (coluna da direita), para a) e b) 15 Z e c) e d) 18 Z do dia 18 de julho.

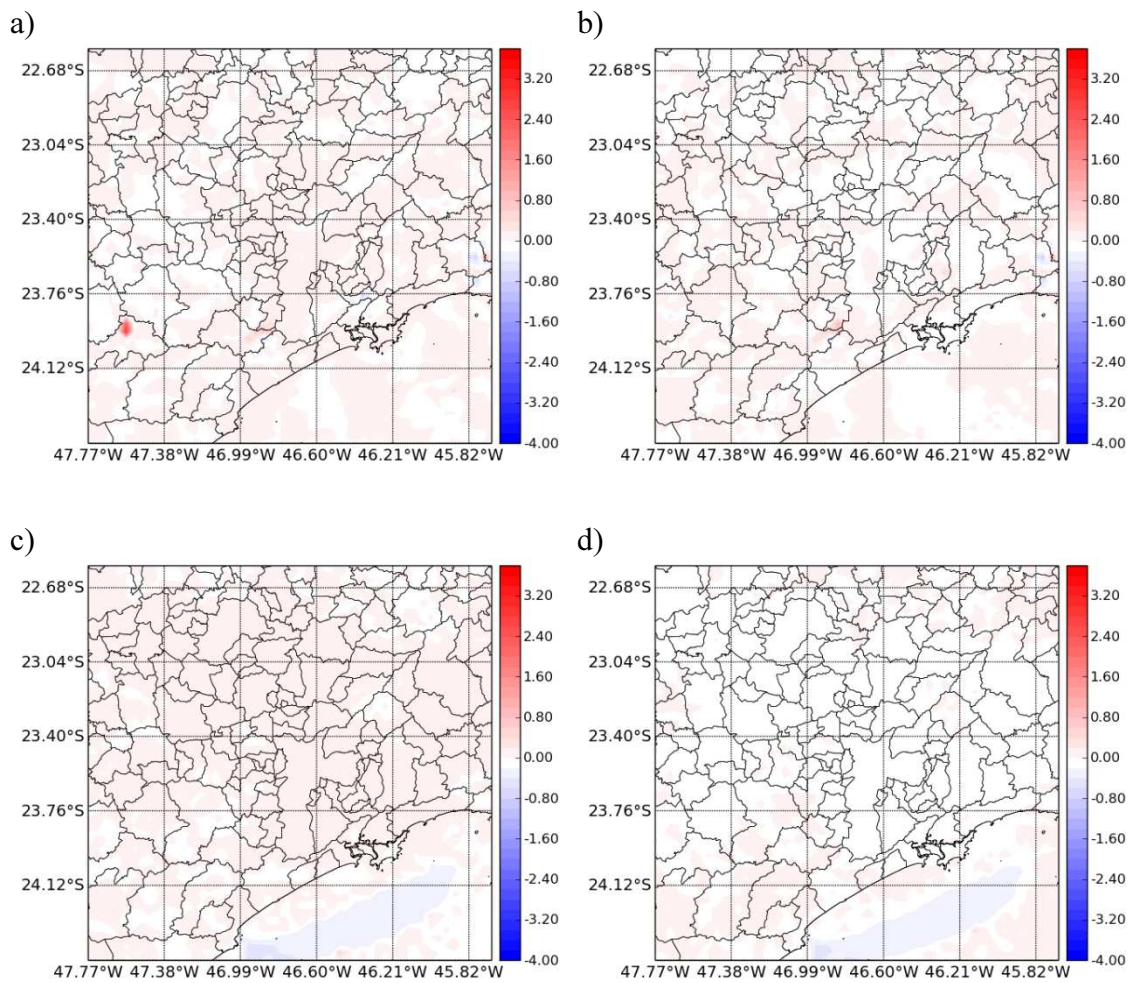


Figura 4.26 – Campos de diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e assimulações com razão geométrica pela metade (coluna da esquerda) e com razão geométrica multiplicada por dois (coluna da direita), para a) e b) 15 Z e c) e d) 18 Z do dia 19 de julho.

4.6 NDVI

Alterando a intensidade do NDVI, alteramos a fração de vegetação e o Índice de Área Foliar (IAF). Além disso, esta alteração influencia diretamente o efeito da radiação solar incidente nas folhas. Para avaliar o impacto da variação do NDVI na vegetação urbana, duas simulações foram realizadas: na primeira, o valor do NDVI para toda a RMSP foi reduzido em 20% do seu valor controle, e na segunda, o NDVI foi aumentado pela mesma porcentagem. Ambas as simulações foram comparadas com a simulação VTEB, descrita no capítulo anterior, considerada simulação controle.

A Figura 4.27 mostra a evolução da intensidade da ICU com base no ponto central da RMSP para todas as simulações. Nota-se que a redução do NDVI implica num aumento da ICU em cerca de 0,9 °C, às 06 Z do dia 18 de julho. Este aumento com relação à simulação controle é percebido em todo o período da simulação. No caso da rodada com o aumento do NDVI, nota-se que no período noturno, a intensidade da ICU é menor que na simulação controle. Já no período diurno, o seu valor é positivo, alcançando até 0,9 °C de diferença às 17 Z do dia 19 de julho. Isto se deve ao fato do tipo de vegetação neste ponto (na região central foi determinada que fosse do tipo grama baixa), que dadas às características, permite maior incidência de radiação solar.

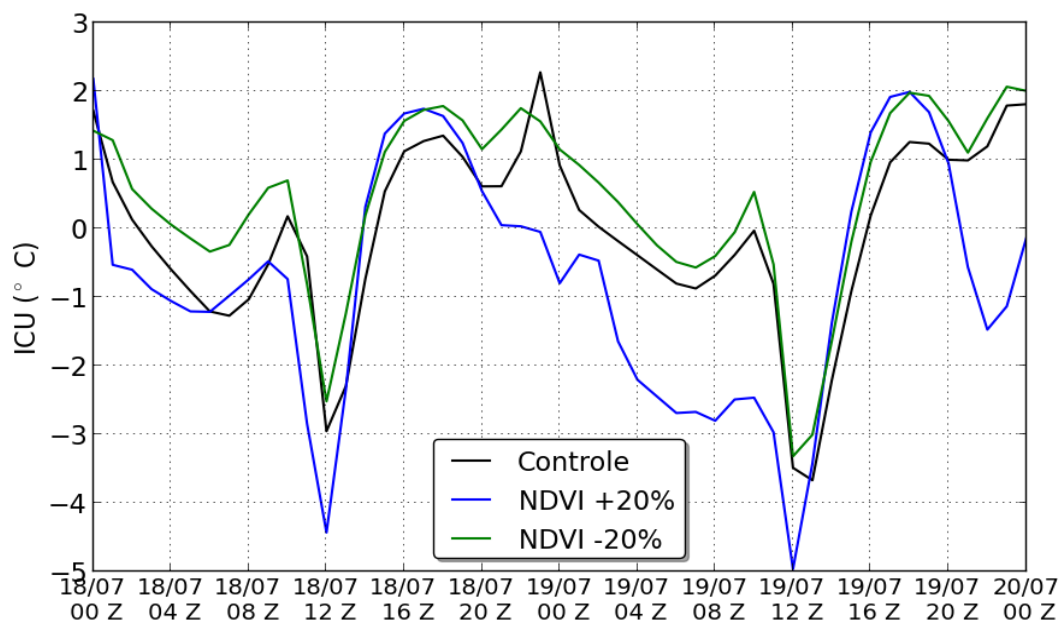


Figura 4.27 – Evolução da intensidade da ICU para o ponto central da RMSP. A linha preta é relativa à simulação controle, a linha azul é relativa à simulação com NDVI aumentado em 20% e a linha verde é relativa à simulação com redução em 20% do NDVI.

Analisando o campo de intensidade da ICU (Figura 4.28), percebe-se uma situação semelhante ao que acontece na Figura 4.27. A presença de uma maior quantidade de vegetação mostra um maior impacto na região com construções menos altas no início da manhã (Figura 4.28a), reduzindo a temperatura em até 1°C. Comparando as Figuras 4.28a e

4.28b, nota-se que este fato contribui para uma diminuição da temperatura na região central neste horário. As 18 Z, analisando as Figuras 4.28c e 4.28d, percebe-se que o padrão de temperatura não muda nas regiões adjacentes, apenas com uma pequena redução de 0,1°C na intensidade da ICU para a região central, também identificado na Figura 4.27.

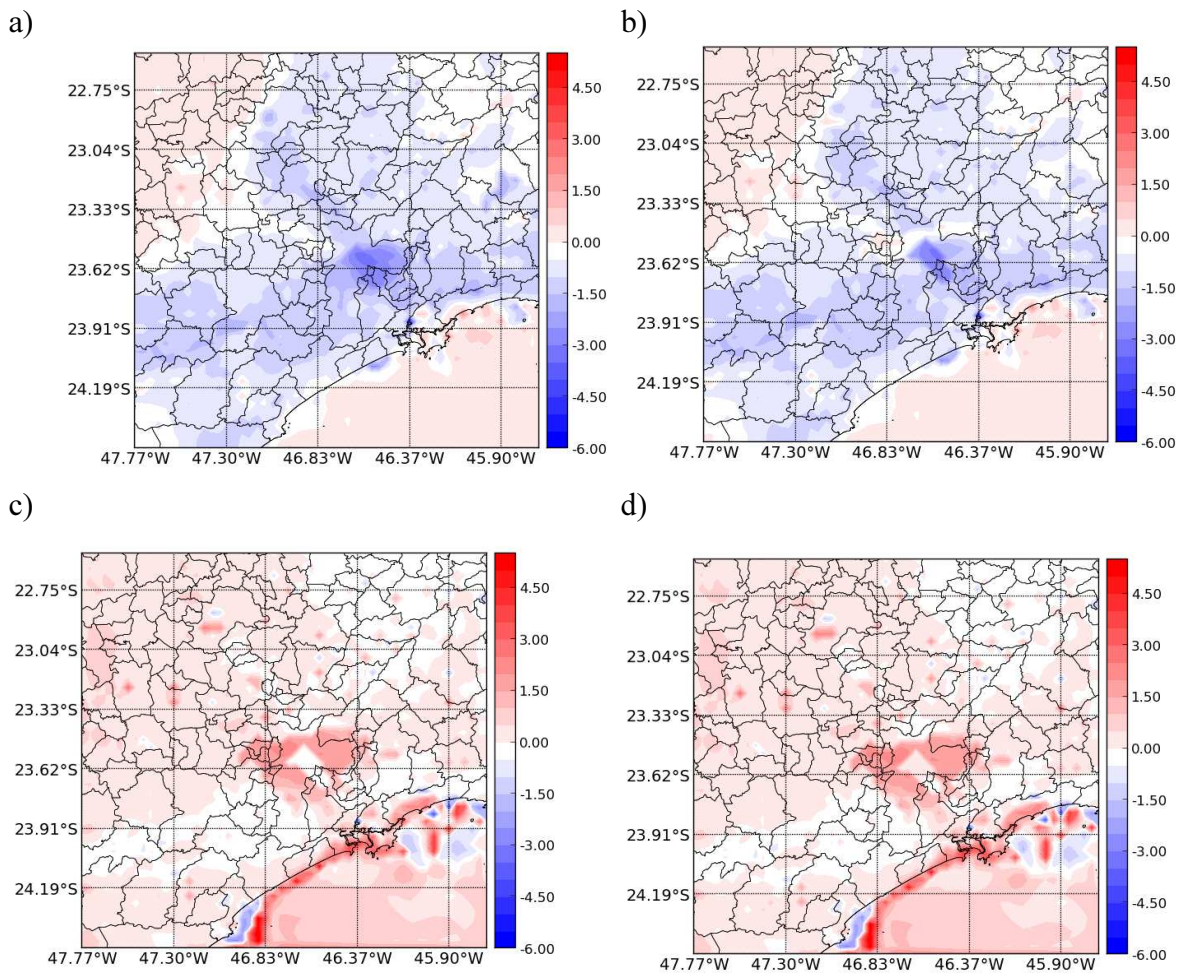


Figura 4.28 – Campos de intensidade da ICU para a simulação com o NDVI com aumento de 20% do seu valor original para a) as 10Z e c) 18Z do dia 18 de julho.

A Figura 4.29 mostra a evolução de TE comparando as saídas da simulação controle com as variações de NDVI, assim como feita para a intensidade da ICU na Figura 4.27, para o ponto central da RMSP. A redução do NDVI implica numa redução da intensidade da umidade relativa e aumento de temperatura. Isto é demonstrado com o aumento da TE durante todo o

dia. A diferença é mais evidenciada no período noturno, chegando a alcançar $0,5^{\circ}\text{C}$ às 22 Z do dia 19 de julho.

O efeito contrário acontece com o aumento do NDVI. Com uma maior fração de vegetação, a temperatura efetiva diminui, chegando a ficar no limite “Fresco” (entre 0 e 12°C) às 08 Z do dia 19 de julho. A diferença de TE neste caso chega a ser de 1°C .

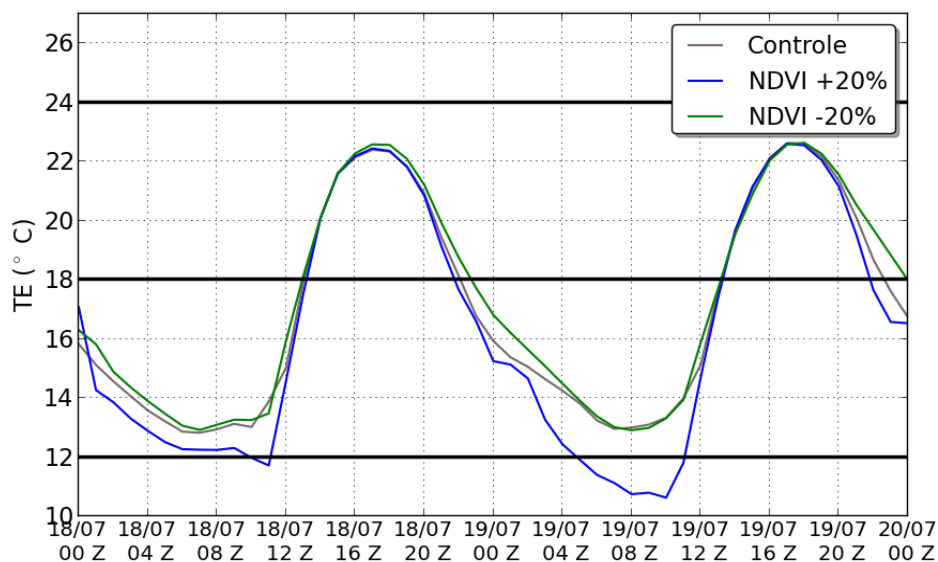


Figura 4.29 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP. A linha preta representa a simulação controle, a linha verde a simulação com NDVI aumentado em 20% e a linha azul simulação com redução de 20% do seu valor original. A linha horizontal contínua representa o limite da situação agradável – levemente fresco para levemente quente.

O campo de diferença de TE (Figura 4.30) entre a simulação com alterações no NDVI e a simulação VTEB (controle) mostra que o efeito da redução do índice é quase nulo apenas na região central da RMSP (Figura 4.30b), às 8Z do dia 19 de julho. Na região circunvizinha, devido às características das outras vegetações nos outros tipos urbanos, a redução implica num aumento de TE em até $2,1^{\circ}\text{C}$ (na região norte da RMSP). No caso do aumento em 20% do NDVI (Figura 4.30a), o padrão de redução da TE é notado em todos os tipos de vegetação na região urbana.

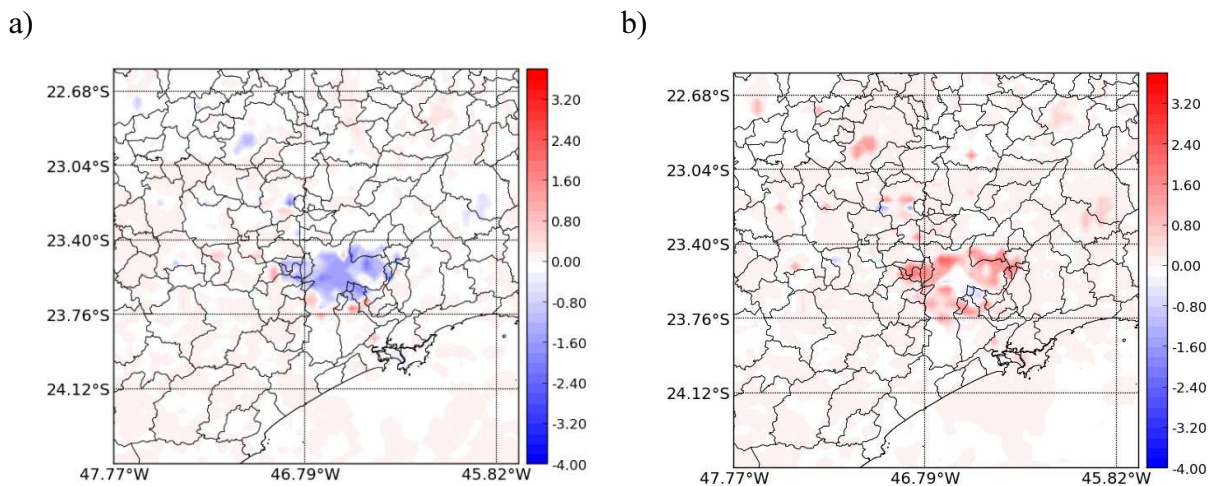


Figura 4.30 – Diferença de temperatura efetiva entre as simulações com a) NDVI com aumento de 20%, b) NDVI com redução de 20% e a simulação controle para as 08 Z do dia 19 de julho.

4.7 Tipo de Vegetação

Nesta seção, o tipo de vegetação presente na região urbana será avaliado. Neste caso, duas simulações foram realizadas. Na primeira, a vegetação de todos os tipos urbanos foi substituída por uma vegetação do tipo alta (floresta mista); na segunda, pelo tipo baixa (grama baixa). Ambas foram comparadas e avaliadas com relação ao caso controle. Vale lembrar que as características restantes são idênticas em todas as rodadas.

A Figura 4.31 mostra a evolução da intensidade da ICU para o ponto central, semelhante à Figura 4.27. A presença de vegetação mais alta induz uma redução da intensidade da ICU, alcançando valores de até 3,1 °C na diferença entre as simulações com vegetação alta e controle, às 23Z do dia 18 de julho. Neste caso, nota-se um padrão diferente do obtido na simulação controle, com uma intensidade negativa de ICU durante todo o período. Analisando o campo de intensidade de ICU (Figura 4.32), percebe-se que o mesmo acontece em toda a região urbana, mesmo para o período de maior incidência de radiação solar (15 Z; Figura

4.32a). Este resfriamento é devido ao tipo de vegetação, que tem folhas mais largas e, conseqüentemente, maior lançamento de fluxo de calor latente (JONES E HOTENBERG, 2001; Figura 4.33a) e, indiretamente, o efeito de sombreamento (SHINZATO, 2009; Figura 4.33b).

No caso da vegetação baixa, nota-se um leve aumento nos períodos diurnos, alcançando uma diferença de temperatura de até 0,6 °C entre a simulação com vegetação baixa e controle, às 17 Z do dia 19 de julho (Figura 4.31), e um resfriamento no período noturno 2,1 °C às 23 Z do dia 18 de julho. Esta diferença se deve à alteração do tipo de vegetação na região circunvizinha da área central urbana. Na Figura 4.32b, percebe-se que toda a área urbana se mantém com uma intensidade da ICU mais elevada em até 1,1 °C. O fato de a vegetação ser grama baixa contribui para uma redução do calor latente nestas áreas (comparado à simulação controle e a vegetação alta), aumentando a temperatura e reduzindo a umidade. Além disso, a baixa estatura desta vegetação contribui para uma maior emissão de onda longa para a atmosfera durante a noite, diminuindo a temperatura do ar próximo à superfície.

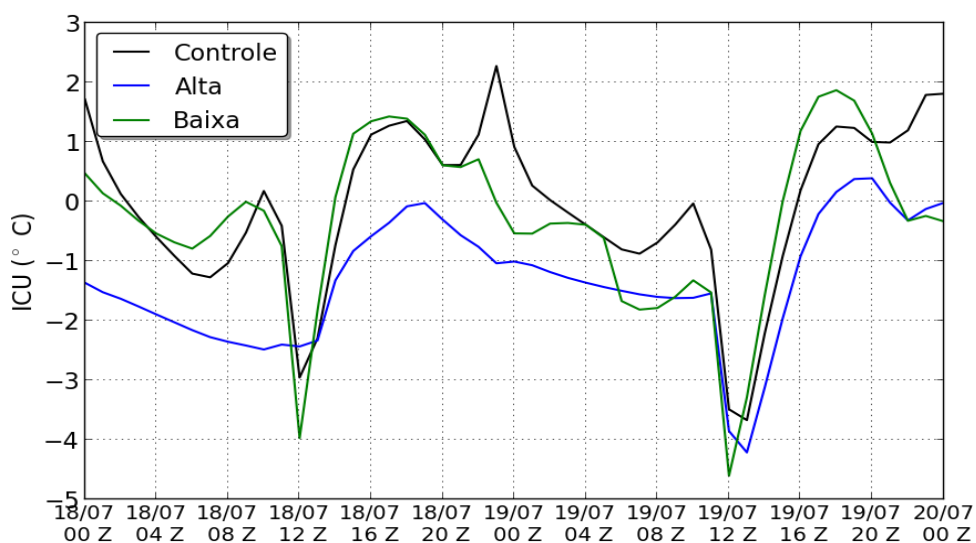


Figura 4.31 – Evolução da intensidade da ICU para o ponto central da RMSP. A linha preta é relativa à simulação controle, a azul é relativa à simulação com vegetação urbana do tipo floresta mista (alta) e a linha verde é relativa à simulação com vegetação do tipo grama baixa.

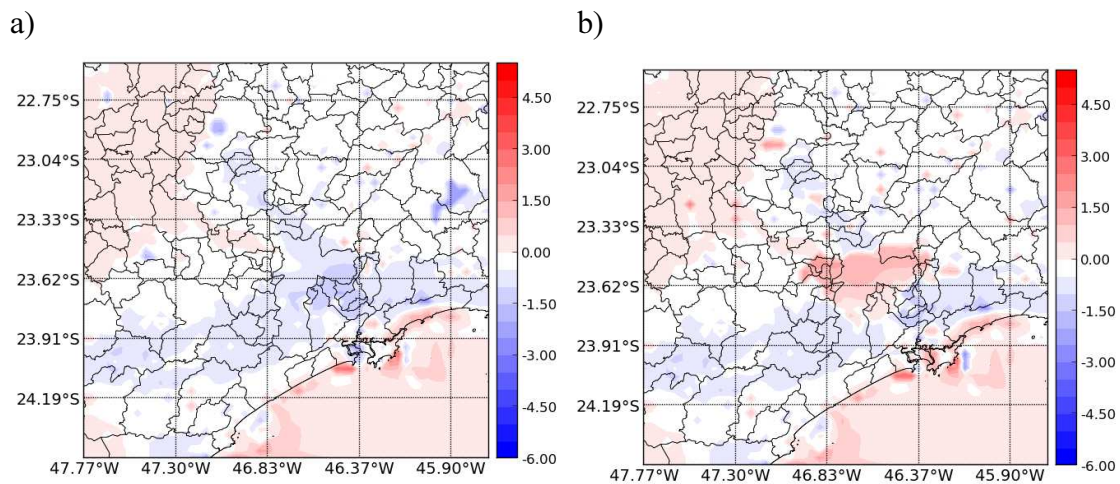


Figura 4.32 – Campo de intensidade da ICU para a simulação com o a) vegetação alta e b) vegetação baixa para as 15 Z do dia 18 de julho.

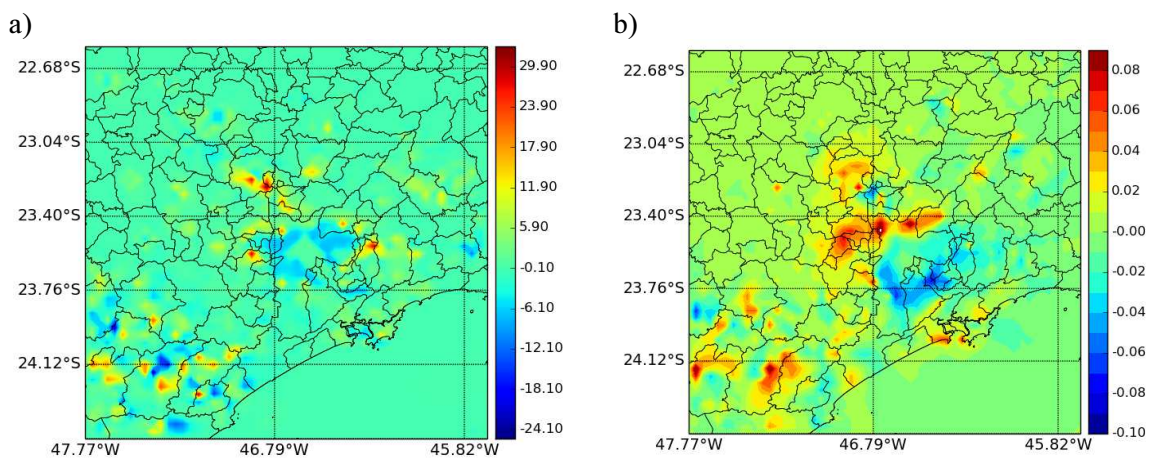


Figura 4.33 – Diferença de a) fluxo de calor latente e b) radiação solar incidente na superfície entre as simulações com vegetação alta e a simulação controle para as 15 Z do dia 18 de julho.

Com relação ao conforto térmico, a presença de uma vegetação mais alta contribuiu para uma redução de até 2°C na TE às 10 Z, ultrapassando o limite “Fresco” (linha preta em 12 °C na Figura 4.34, do dia 18 julho). Novamente, isto está ligado ao fato de que o tipo floresta mista aumenta o efeito de sombreamento na região urbana. O campo de diferença de temperatura

efetiva entre a simulação com vegetação alta e a simulação controle mostra que a redução acontece em toda a área urbana, tanto para o período diurno (Figura 4.35a) quanto noturno (Figura 4.35c). Para o caso da vegetação baixa, a diferença de TE não é tão grande quanto o caso da vegetação alta. Pouca diferença é notada na região urbana, tanto no período diurno (Figura 4.35b) quanto noturno (Figura 4.35d).

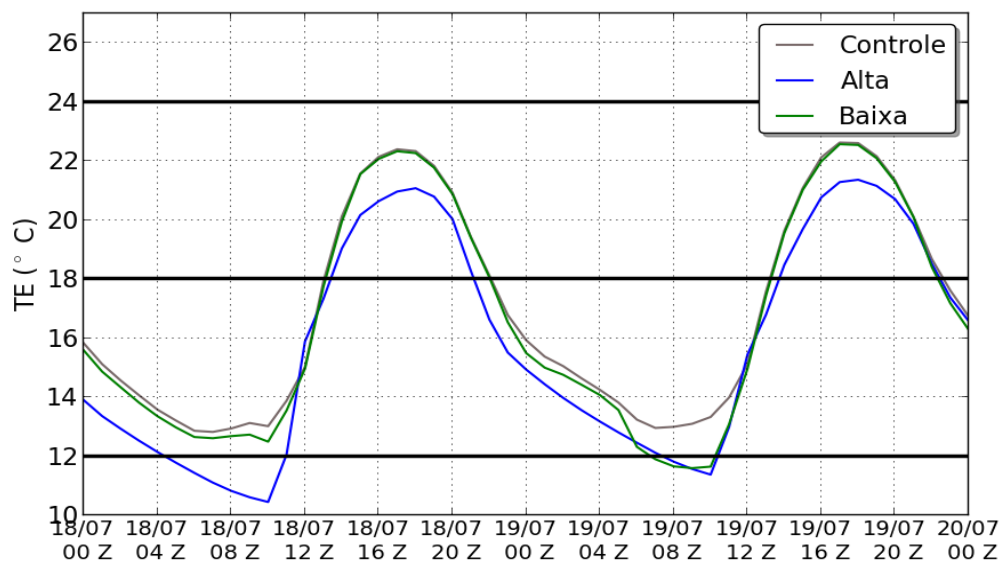


Figura 4.34 – Evolução diária da temperatura efetiva para o ponto central na RMSP, para as simulações controle (linha preta), com vegetação alta (linha azul) e com vegetação baixa (linha verde).

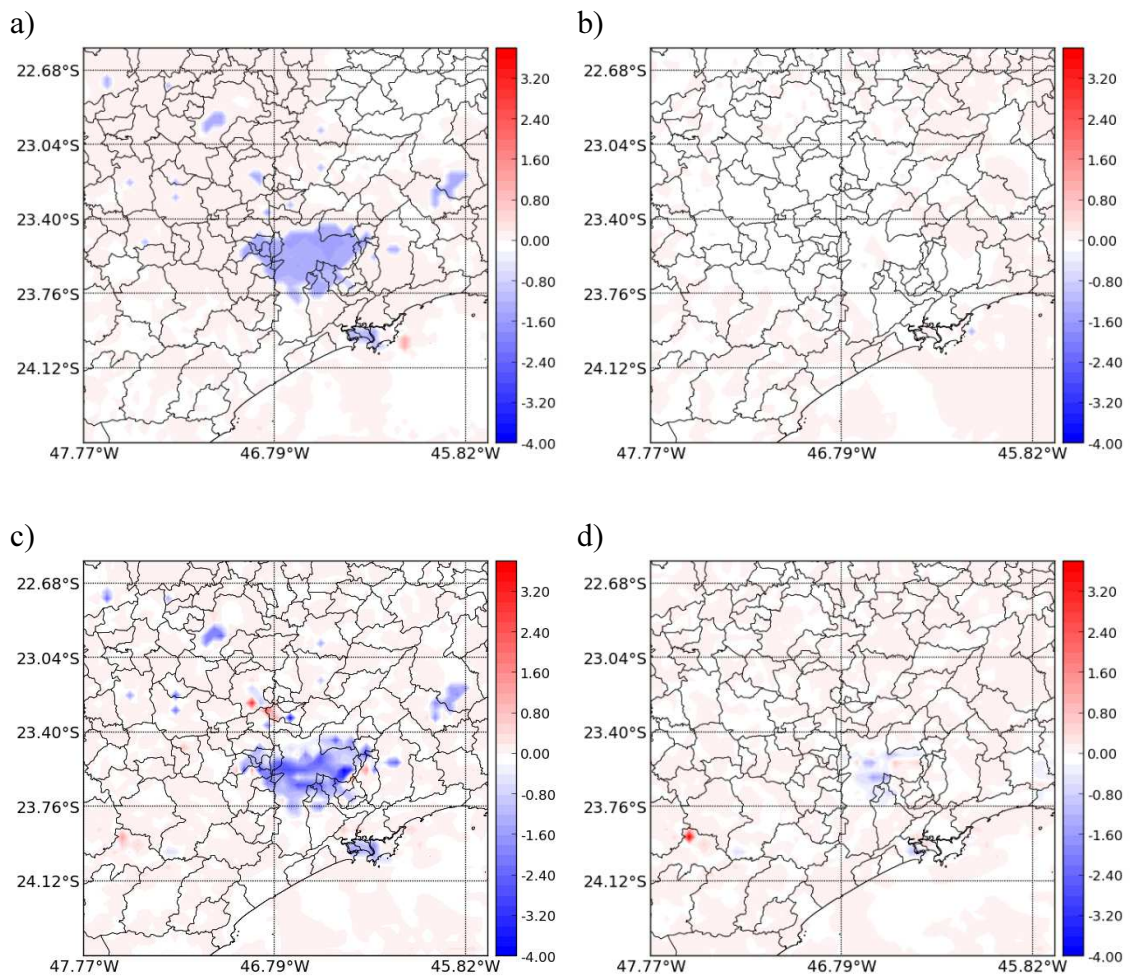


Figura 4.35 – Diferença de temperatura efetiva entre a simulação controle e as simulações com vegetação alta para a) 15 Z do dia 18 de julho e c) 00 Z do dia 19 de julho e vegetação baixa para b) 15 Z do dia 18 de julho e d) 00 Z do dia 19 de julho.

5 FATOR DE VISÃO DO CÉU

O Fator de Visão do Céu (FVC) pode ser considerado uma medida de fração visível do céu a partir de um ponto em meio às estruturas urbanas. Fisicamente, o FVC pode ser definido como a razão entre o ângulo sólido pelo qual um dado ponto da rua ou da parede “vê” a superfície irradiadora (céu) e o ângulo sólido subtendido pelo céu (Figura 5.2). Como descrito em Souza *et al.* (2010):

“em termos geométricos, qualquer edificação, elemento ou equipamento urbano pertencente ao plano do observador posicionado na camada intraurbana representa uma obstrução à abóbada celeste. A projeção dessa edificação na abóbada celeste é a fração do céu por ela obstruída para o observador (ou ainda, representa a parte obstruída do fluxo de radiação, que deixa o observador em direção ao céu). Seu valor numérico é sempre menor que a unidade, pois dificilmente se encontra regiões urbanas que não apresentem nenhuma obstrução do horizonte (situação para a qual seu valor seria a unidade)”.

A Figura 5.1 apresenta esta situação descrita.

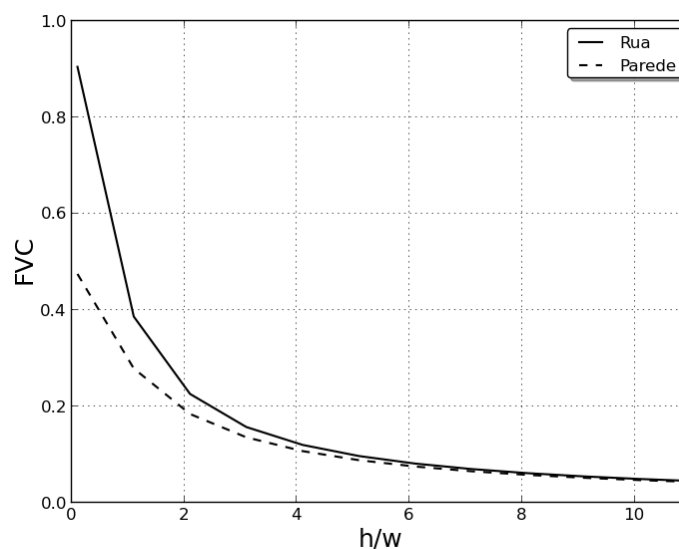


Figura 5.1 – Fator de visão do céu em função da razão geométrica. Baseado em Morais (2010).

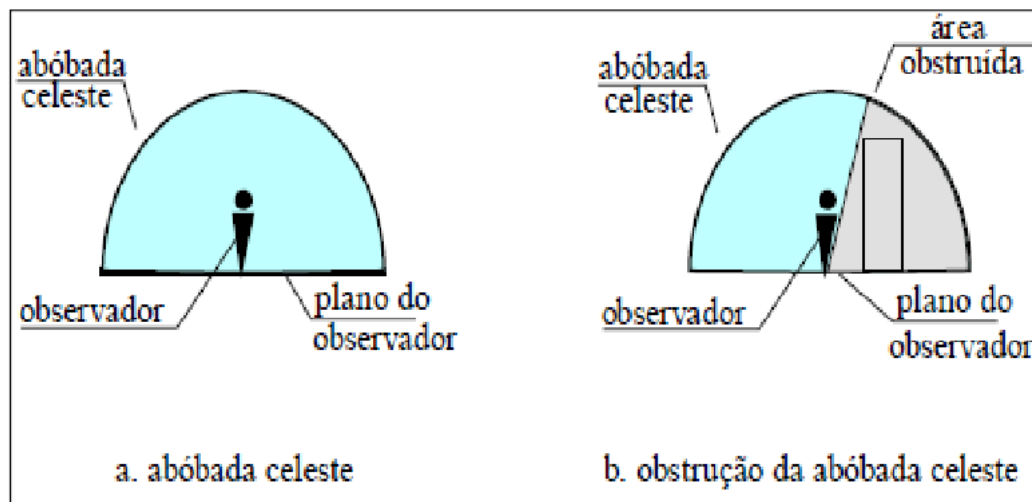


Figura 5.2 – Obstrução causada pela edificação. Retirado de Ribeiro (2009).

Esta variável é amplamente usada nos estudos da meteorologia urbana, como tentativa de identificar sua relação com as mudanças de temperatura local (UNGER, 2009). Raydan e Stemeers (2006) apontam que os trabalhos de Oke (1981, 1982) foram pioneiros na relação entre a forma urbana e o desempenho ambiental. Estes trabalhos tentam correlacionar o FVC e a intensidade da ICU. Souza *et al* (2010) fez um estudo na cidade de Bauru, interior de São Paulo, corrigindo esta relação para esta região. Também em Bauru, Souza (2010) estudou a relação entre o FVC e o consumo de energia elétrica. Entre 40 pontos da área de estudo, a configuração de maior consumo foi verificada para vias implantadas sobre o eixo NE-SO com valores de FVC entre 0,70 e 0,75. Ribeiro *et al.* (2008) conseguiram mapear a temperatura do ar dos bairros de Tambaú e Cabo Branco, em João Pessoa na Paraíba, através de um banco de dados de FVC e de um SIG. Hwanget *al.* (2011) conseguiram analisar o ambiente térmico nas ruas de Taiwan, utilizando como dados de entrada do modelo RayMan (MATZARAKIS *et al.*, 2007) o FVC, e o efeito sazonal do sombreamento dos prédios no conforto térmico para ambientes externos.

Geometricamente, o FVC pode ser obtido através da álgebra dos fatores de ângulo (SPARROW e CESS, 1970). Entre muitas aproximações, o cânion urbano pode ser

considerado infinito, ou seja, de comprimento muito maior que sua altura e largura (Figura 5.3).

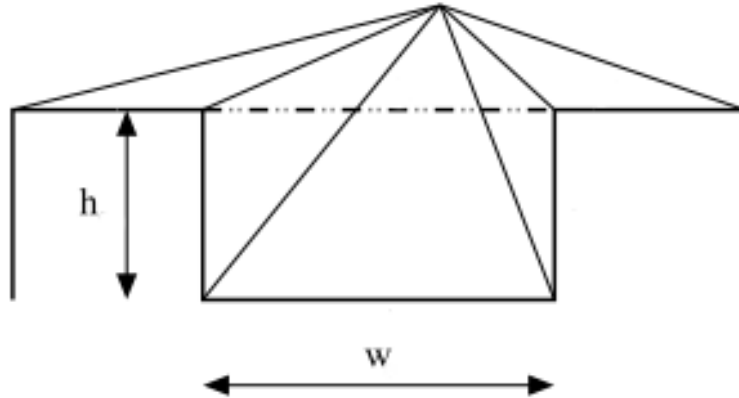


Figura 5.3 – Perspectiva de um cânion com comprimento infinito, onde h é altura das construções e w a largura do cânion. Adaptado de Harman (2003).

Neste caso, considerando h , a altura das construções e w a largura dos prédios, a relação entre a razão geométrica (h/w) e o FVC é

$$- \quad - \quad (5.1)$$

A relação 5.1, representa o FVC de um ponto central na rua e é usada no TEB nas relações de retenção de radiação de onda curta e onda longa no interior dos cânions.

Existem muitas maneiras de se obter o FVC empiricamente. Desde o uso de um SIG (BROWN *et al.*, 2001) até GPS (através da regressão da intensidade do sinal e do número de satélites visíveis; CHAPMAN *et al.*, 2002) têm sido comumente usados para determinar o FVC. Grimmond *et al.* (2001) destaca o método utilizando uma câmera digital fotográfica e uma lente do tipo olho-de-peixe (Figura 5.4). O uso deste equipamento é muito comum na

obtenção destes valores na comunidade científica (CHAPMAN e THORNES, 2004; LEUNG e STEEMERS, 2008; RZEPA, 2009; SHAKER e DREZNER, 2010).



Figura 5.4 – Modelos de câmera fotográfica digital e lente olho-de-peixe utilizados neste trabalho.

Este capítulo mostra uma metodologia de obtenção de valores de FVC empiricamente para a RMSP, através de uma lente olho-de-peixe e do mapeamento do uso de solo através do SIG, para serem utilizados como parâmetros de entrada no modelo numérico de mesoescala. Com isto, teremos uma melhor representação da estrutura urbana no modelo, podendo, assim, comparar não só as saídas geradas, mas também os dados de FVC obtidos empiricamente e a partir da álgebra do FVC (Equação 5.1).

5.1 Metodologia

Existem diversos métodos para calcular o FVC a partir de uma fotografia com lente olho-de-peixe (GRIMMOND *et al*, 2001; HAMMERLE *et al*, 2011a; HAMMERLE *et al*, 2011b; IBRAHIM *et al*, 2011). Neste trabalho foi escolhido o método proposto por Santos *et al*. (2003), que é um método simples e de fácil visualização, pois utiliza softwares do estilo CAD

e um SIG para mapeamento do céu visível e, para o cálculo do FVC, uma base de dados já previamente obtida para uma lente com projeção equidistante (Figura 5.5).

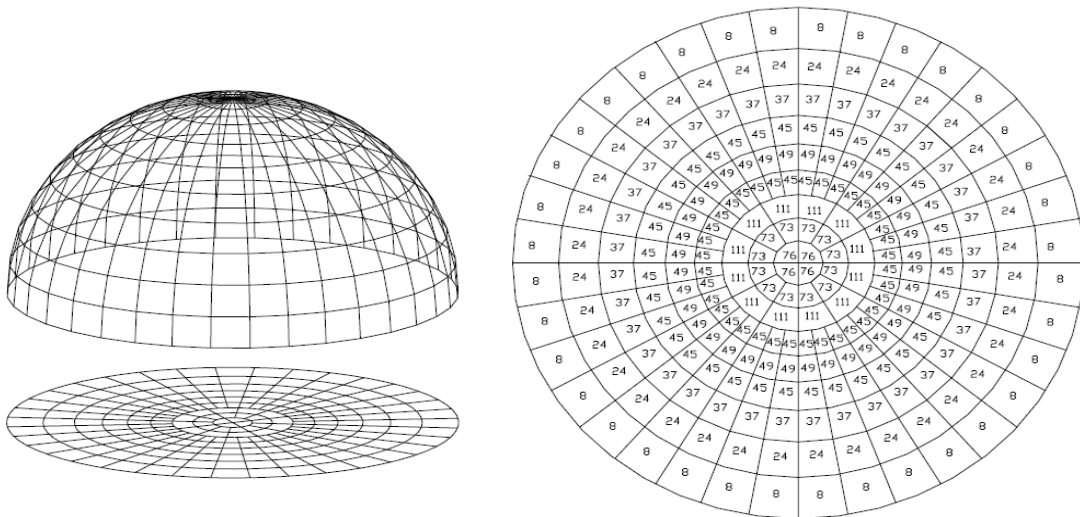


Figura 5.5 – Diagrama desenvolvido para projeção equidistante. Os valores do fator de forma são calculados a partir da projeção da abóbada celeste no plano horizontal (SANTOS et al, 2003).

Obter o FVC para diversos pontos em uma região do tamanho da RMSP torna um trabalho árduo, sendo praticamente impossível. Desta forma, utilizou-se a classificação da imagem de satélite (Figura 3.1) reproduzida no Capítulo 3 como base para obtenção dos valores. A partir desta imagem, e de alguns pontos obtidos, fez-se a média dos valores de FVC, obtendo um valor único para cada uso de solo urbano.

Foram obtidos vários valores de FVC focando principalmente a cidade de São Paulo, onde existe maior concentração de áreas urbanizadas. A escolha destes pontos deu-se principalmente pela facilidade e segurança de se instalar os instrumentos. A Figura 5.6 mostra os pontos escolhidos onde se obteve os FVC na RMSP. No total foram escolhidos 37 pontos, mostrados no Anexo A, onde são apresentadas detalhadamente a localidade, a fotografia e os

valores de cada ponto mostrado na Figura 5.6. Na Figura 5.7 tem-se o campo de FVC obtido através da análise objetiva de Cressman (CRESSMAN, 1959) para todos os pontos.

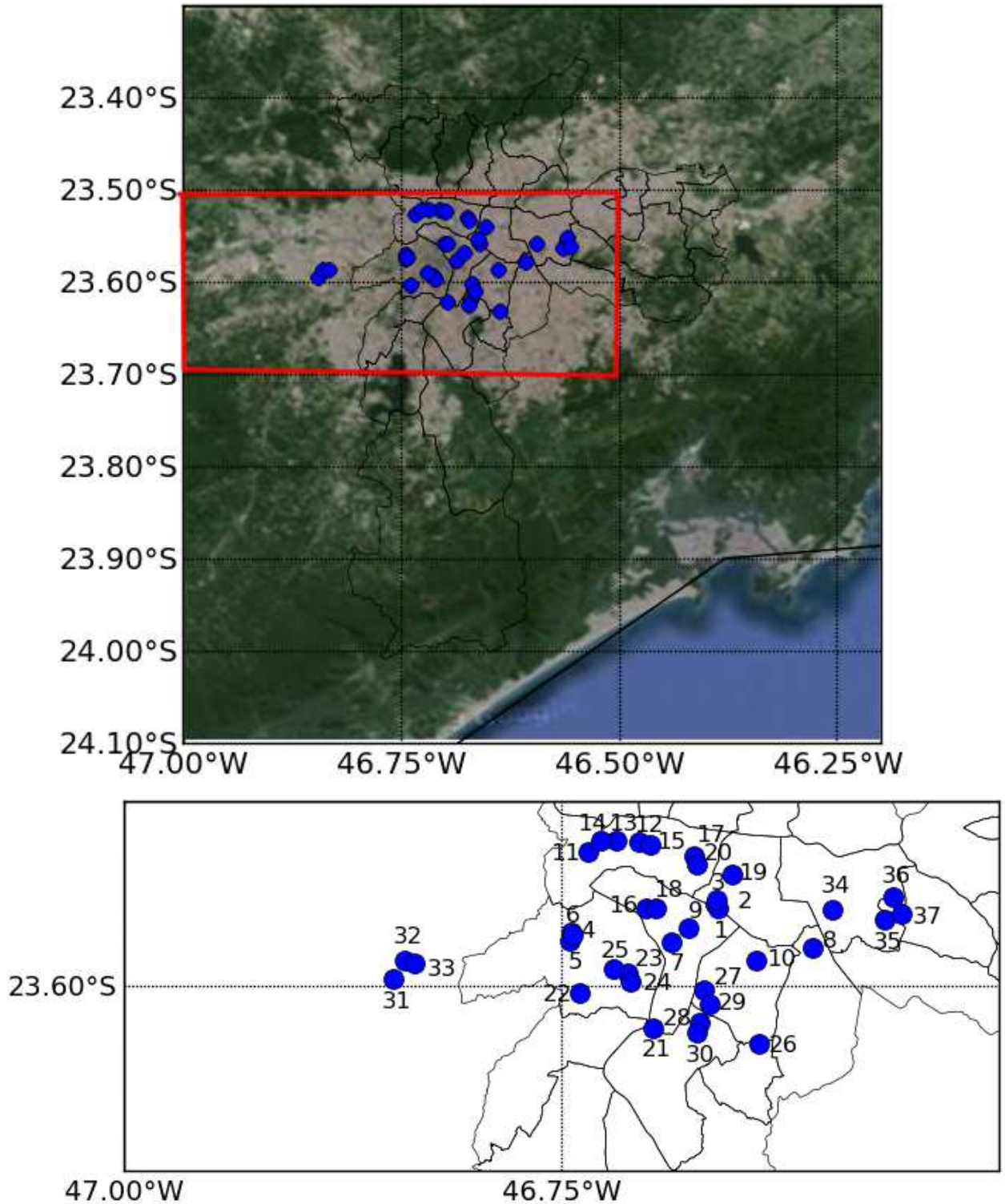


Figura 5.6 – Localidades onde se obteve os valores empíricos de FVC (pontos azuis). A figura de baixo amplifica o local, marcado no retângulo em vermelho no mapa da RMSP. Os números indicam a localidade da tabela A1 no anexo A.

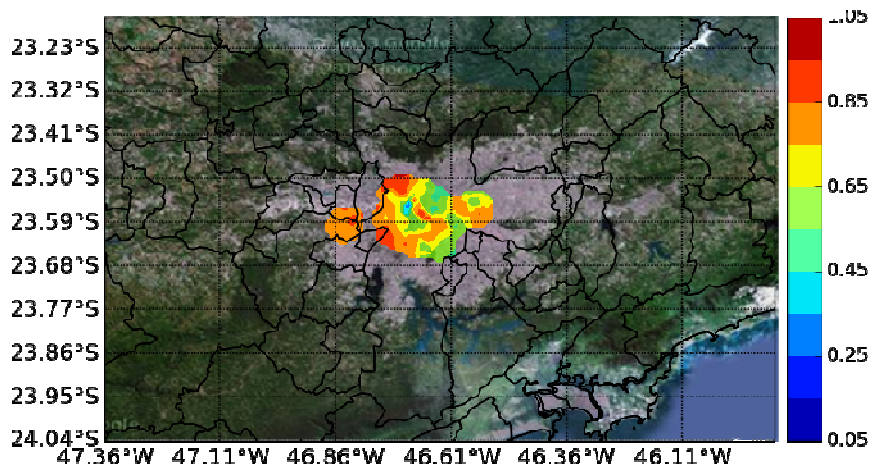


Figura 5.7 – FVC interpolado para a cidade de São Paulo.

A partir destes dados, fez-se uma média dos valores de FVC obtidos. A Tabela 5.1 abaixo mostra os resultados comparados àqueles obtidos com a Equação 5.1. Os valores de FVC resultantes da álgebra dos fatores de forma chegam a ser menores que 10% do valor observado para o tipo urbano 1.

Tabela 5.1 – Valores de FVC obtidos pela câmera digital com lente olho-de-peixe e com a álgebra do fator de forma (Equação 5.1).

Tipo Urbano	Empírico	Álgebra
Urbano 1	0,62	0,05
Urbano 2	0,68	0,24
Urbano 3	0,79	0,35
Suburbano	0,83	0,57

Os dados empíricos apresentados na Tabela 5.1 foram inseridos no modelo para melhor representar a estruturas de cada tipo urbano. Na seção a seguir, será feita uma avaliação da inclusão do FVC empírico no modelo BRAMS.

5.2 Simulações

Foram realizadas simulações com a inserção dos valores empíricos apresentados na Tabela 5.1 para comparação com os resultados obtidos com modelo *VTEB*. Assim como no Capítulo

4, por simplicidade, apenas as grades 1 e 2 da Figura 3.3 foram executadas durante as integrações. As características das simulações são as mesmas descritas no Capítulo 3, incluindo dados de entrada e condições de contorno, diferenciando apenas por uma integração em que os valores de FVC não são calculados, sendo apenas inseridos como dado de entrada. Nesta seção, chamaremos esta simulação de *SVF*. Uma comparação das saídas relativas à grade 2 é realizada comparando as simulações *VTEB* e *SVF* para as estações da Tabela 3.3.

5.2.1 Avaliação

Novamente as primeiras 24 horas foram ignoradas para evitar o efeito de spin-up. Os mesmos índices utilizados na análise qualitativa do Capítulo 3.1 foram usados nesta seção. A Figura 5.8 mostra a evolução da temperatura do ar a 2 m. Os índices de avaliação são mostrados na Tabela 5.2. Em geral, apesar do índice de Pielke apresentar valores relativamente superiores para a simulação *SVF*, o BIAS indica que esta simulação representa melhor os valores observados que a simulação *VTEB*. Regiões com construções bastante densas tiveram uma melhora considerável com a inserção dos FVC empíricos, como é o caso das regiões do aeroporto de Congonhas, Mirante do Santana e São Caetano. Isto demonstra a importância de uma boa representação da região urbana nos modelos de mesoescala. O modelo tem dificuldade em representar a temperatura em regiões com baixa densidade de construções, como é o caso da região do aeroporto de Guarulhos, mesmo sendo uma área urbana. Isto mostra a importância de uma boa base de dados de FVC para todas as regiões.

Também foi avaliada a umidade específica (Figura 5.9). Os valores observados são os mesmos demonstrados no Capítulo 3. Novamente, sua intensidade não é tão bem representada

pelas simulações. Assim como para o caso da temperatura, o modelo *SVF* apresenta valores menores de BIAS com relação à simulação *VTEB*, exceto para as estações do aeroporto de Guarulhos e do IAG. A justificativa desta razão é a semelhante ao caso da temperatura, no qual o modelo tem dificuldades em representar locais com construções de baixa densidade. O índice de Pielke, mesmo sendo muito superior à condição de destreza do modelo, apresenta pequena melhora em todas as estações com a inclusão do FVC empírico.

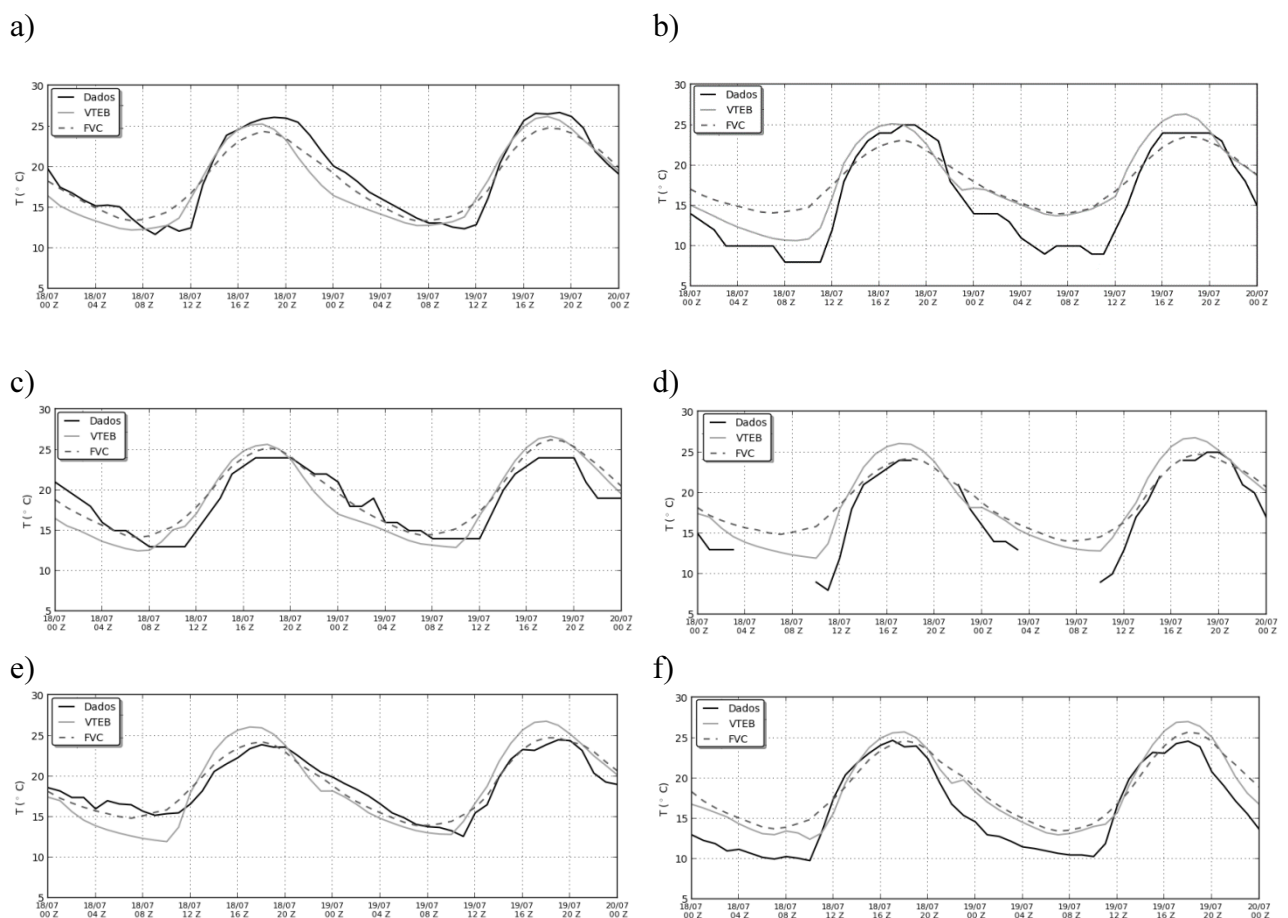


Figura 5.8 – Evolução diária da Temperatura do ar a 2 metros, em Celsius, em que a linha cinza contínua representa a simulação *VTEB*, a linha preta tracejada representa a simulação *SVF* e a linha preta contínua as observações. Os painéis representam os valores obtidos em a) São Caetano, b) Guarulhos, c) Congonhas, d) Campo de Marte, e) Mirante de Santana e f) IAG.

Tabela 5.2 – Índices estatísticos para temperatura do ar a 2 m, para avaliação das simulações com dados das estações da Tabela 3.3. BIAS corresponde ao viés da simulação, RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio, PC é a porcentagem correta, SS é o skill score da simulação e MAPE é o erro percentual médio absoluto. Definições dos índices podem ser encontradas em Wilks (2006). D_{Pielke} é o índice de Pielke (2002) proposto por Hallak e Pereira Filho (2011).

Estação	VTEB					SVF				
	BIAS	RMSE	SS	MAPE	D_{Pielke}	BIAS	RMSE	SS	MAPE	D_{Pielke}
Congonhas	-0,63	2,30	89,0	11,1	1,46	0,80	1,78	92,1	8,27	0,93
Mirante	-0,09	2,18	89,5	10,7	1,72	0,13	1,15	95,0	5,31	0,73
Guarulhos	2,22	2,86	84,3	20,6	0,95	2,43	3,78	79,4	29,0	1,58
São Caetano	-0,92	2,03	91,7	8,95	0,81	-0,45	1,66	92,6	7,89	0,86
IAG	2,28	2,74	84,7	18,3	0,91	2,55	3,31	82,0	22,3	1,28
Campo de Marte	2,37	2,81	86,2	17,5	1,06	2,25	3,29	86,3	19,9	1,31

De maneira geral, a inclusão dos valores empíricos de FVC implica numa redução do viés sistemático do modelo. Em alguns casos, a diferença de valores se inverte, apresentando uma subestimativa do modelo, como na estação do Mirante do Santana, IAG e aeroporto de Guarulhos. A umidade específica às 00Z do dia 19 na Figura 5.9c ilustra bem este acontecimento.

A tendência da introdução do valor observado de FVC pode ser bem demonstrada avaliando os campos de diferença de temperatura entre as simulações *SVF* e *VTEB*. A Figura 5.10 mostra esta diferença. Nos quatro horários mostrados, vemos que a temperatura a 2m da simulação *SVF* apresenta valores menos intensos na área urbana que os casos com o *VTEB*. A diferença de temperatura chega a até 1,85 °C às 15Z do dia 18 de julho (Figura 5.10a). Esta diferença está ligada com o fato de que houve um aumento expressivo dos valores originais de FVC. O aumento do FVC indica um aumento da fração visível do céu, indicando maior superfície para recebimento de calor.

No caso da Figura 5.10c (15Z do dia 19 de julho), a temperatura na região central demora a ser reduzida com o passar do dia. O FVC da região central é o de menor valor, indicando ser uma área com maior cobertura de edifícios. Assim, maior calor é retido nesta região.

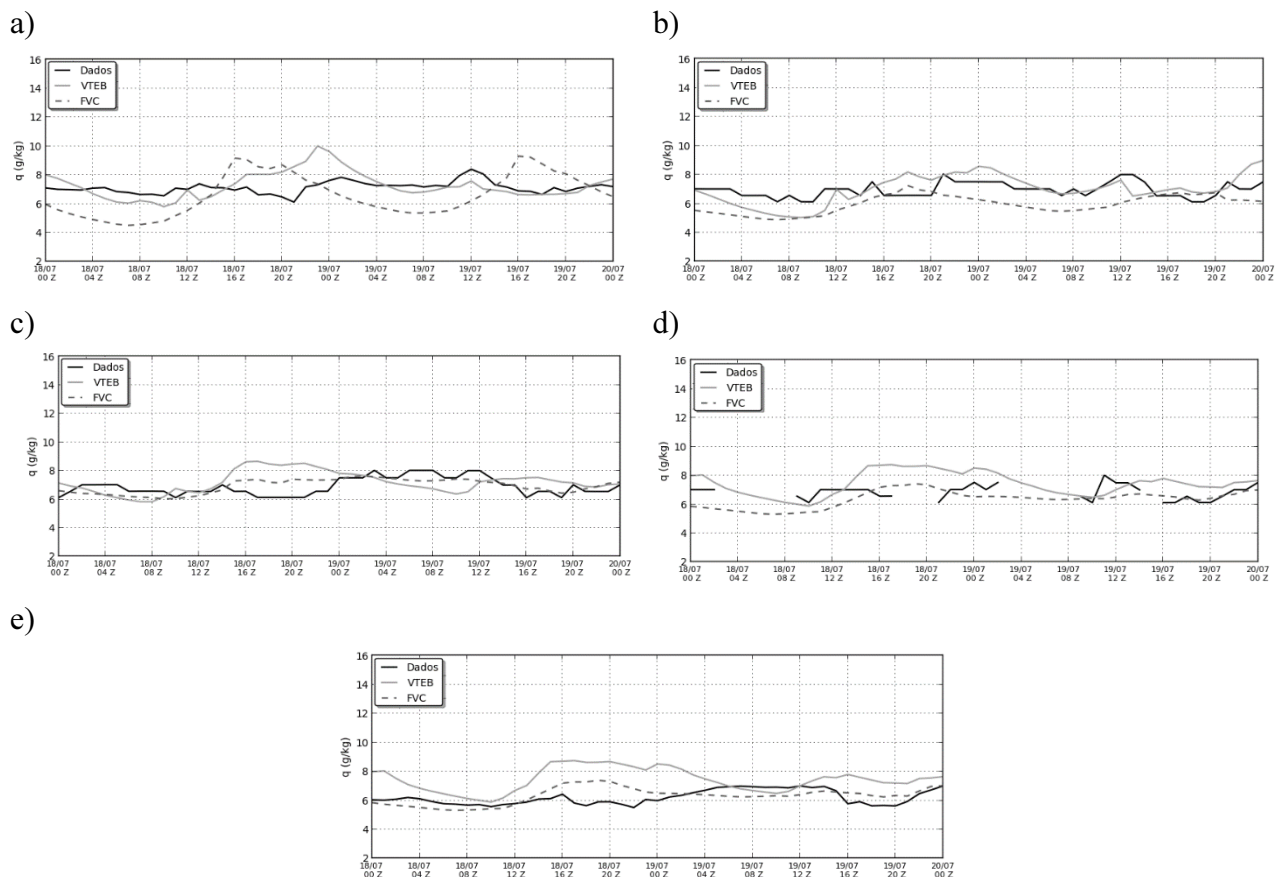
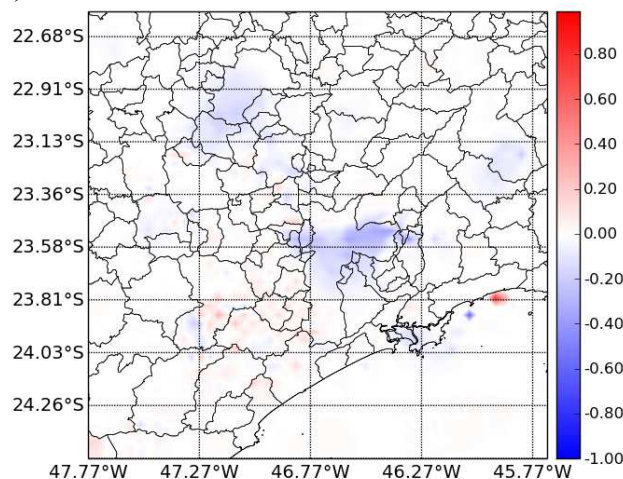


Figura 5.9 – Evolução diária da umidade específica do ar a 2 metros, em g/kg, em que a linha cinza contínua representa a simulação VTEB, a linha preta tracejada representa a simulação SVF e a linha preta contínua, as observações. a) IAG, b) Guarulhos, c) Congonhas, d) Campo de Marte e e) Mirante de Santana.

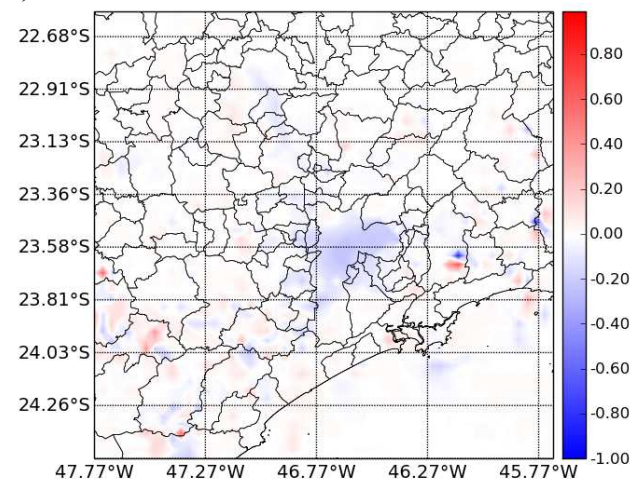
Tabela 5.3 – Índices estatísticos para umidade específica do ar a 2 m, calculados para avaliação das simulações com dados das estações da Tabela 3.3. Os índices são os mesmos da Tabela 5.2. A estação de São Caetano não foi avaliada por indisponibilidade de dados observados.

Estação	VTEB					SVF				
	BIAS	RMSE	SS	MAPE	D _{Pielke}	BIAS	RMSE	SS	MAPE	D _{Pielke}
Congonhas	0,29	1,11	87,4	13,0	3,84	0,02	0,58	93,1	7,04	2,11
Mirante	1,23	1,56	79,3	21,4	5,83	0,11	0,67	91,2	9,00	2,90
Guarulhos	0,04	0,85	89,7	10,4	4,36	-0,97	1,22	84,1	15,7	4,14
IAG	0,13	0,92	90,2	9,82	5,78	-0,54	1,65	78,8	21,4	10,5
Campo de Marte	0,71	1,14	86,2	14,1	5,12	-0,39	0,80	90,2	9,62	3,49

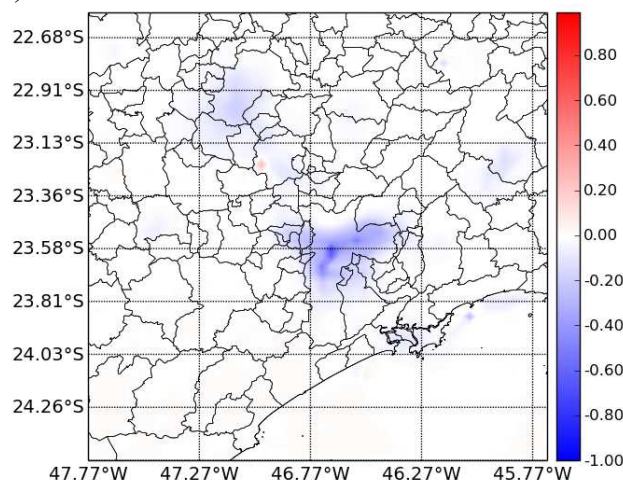
a) 15Z 18/07



b) 18Z 18/07



c) 15Z 19/07



d) 18Z 19/07

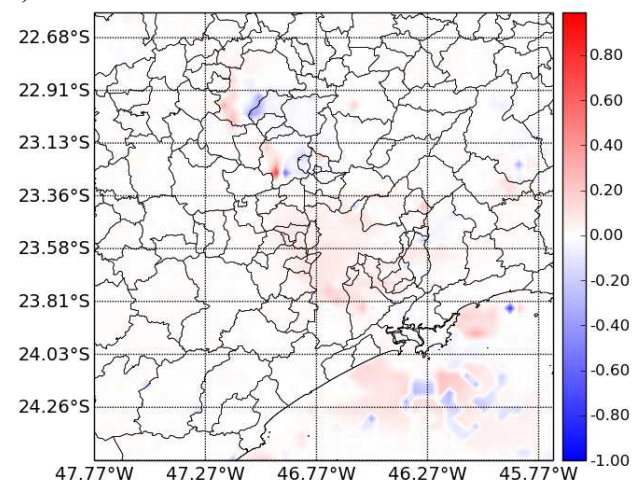


Figura 5.10 – Diferença de temperatura entre a simulação SVF e VTEB para a RMSP das 15Z e 18Z. Os campos apresentados em a) e b) são referentes ao dia 18/07 e os apresentados em c) e d) ao dia 19/07.

5.2.2 Testes de Sensibilidade

Para verificar o impacto da mudança do FVC, conforme demonstrado na Tabela 5.1, uma simulação alterando apenas a razão geométrica para que o valor do FVC seja o mesmo que o empírico foi realizada. Através de uma “manobra matemática” simples, a Equação 5.1 pode ser descrita de tal forma a isolar apenas a razão geométrica de tal forma que:

$$\frac{h}{w} = \frac{1-FVC^2}{2 FVC} \quad (5.2)$$

Assim, a razão geométrica para os FVC empírico descrito na Tabela 5.1 é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Valores de FVC obtidos pela câmera digital com lente olho-de-peixe e sua razão geométrica obtida com a álgebra do fator de forma (Equação 5.2).

Tipo Urbano	Empírico	Razão Geométrica (h/w)
Urbano 1	0.62	0.496451613
Urbano 2	0.68	0.395294118
Urbano 3	0.79	0.237911392
Suburbano	0.83	0.187409639

Estes valores foram inseridos no namelist do modelo *VTEB* e foram comparados com a saída original do *SVF*. Comparando os valores razão geométrica da Tabela 5.2 com aqueles originalmente utilizados, na Tabela 3.2, nota-se que há uma redução brusca do valor, em até duas ordens de grandeza. Esta redução implica que o cânion têm construções bem mais baixas ou ruas relativamente bem largas. No esquema *TEB*, a relação de vento horizontal no interior do cânion (Figura 5.11) é dado por

$$U_{can} = \frac{2}{\pi} \exp\left(-\frac{1}{4} \frac{h}{w}\right) \frac{\ln[(h/3)/z_{0town}]}{\ln[(\Delta z+h/3)/z_{0town}]} |\overline{U_a}| \quad (5.3)$$

em que U_{can} refere-se à intensidade do vento no interior do cânion, Δz é a altura do primeiro nível do modelo atmosférico acima do telhado, z_{0town} é o comprimento de rugosidade da cidade (assumido como $\sim h/10$) e U_a é a intensidade do vento no primeiro nível atmosférico.

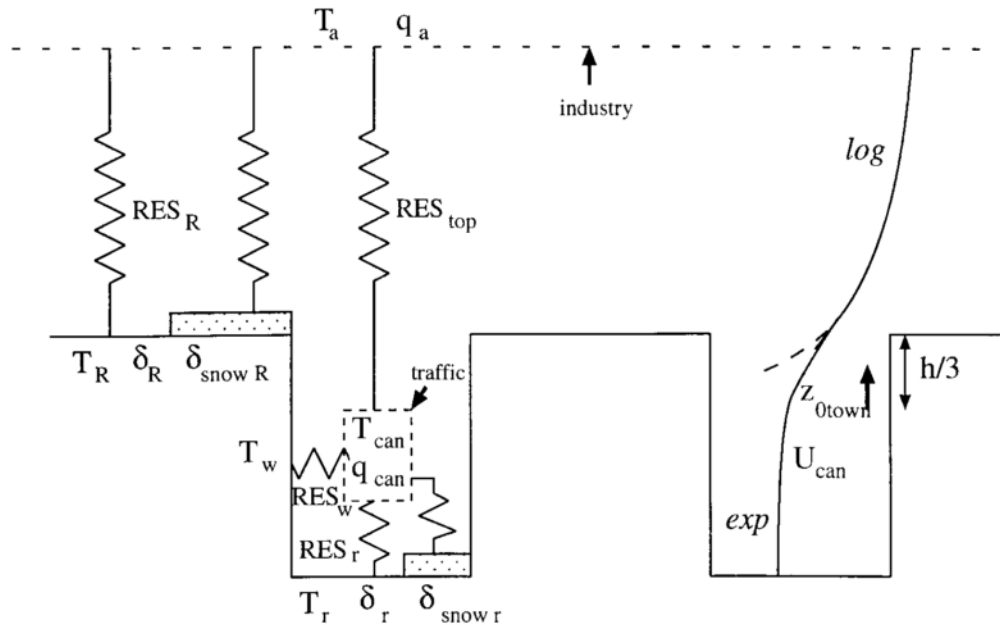


Figura 5.11– Esquema de resistências e perfil do vento no interior do cânion. Retirado de Masson (2000).

Com isto, pela Figura 5.12, nota-se que o vento horizontal no interior cânion em todos os tipos de solo urbano possui intensidades maiores para a simulação com a redução dos valores da razão geométrica. A diferença entre as duas simulações alcança até 1,3 m/s de intensidade, às 18Z do dia 18/07, no tipo urbano 1, onde a diferença entre as razões geométricas é mais brusca. Isto acontece porque construções mais altas induzem maior atrito devido à presença de uma superfície vertical (parede). No caso da simulação *VTEB*, esta superfície é menor.

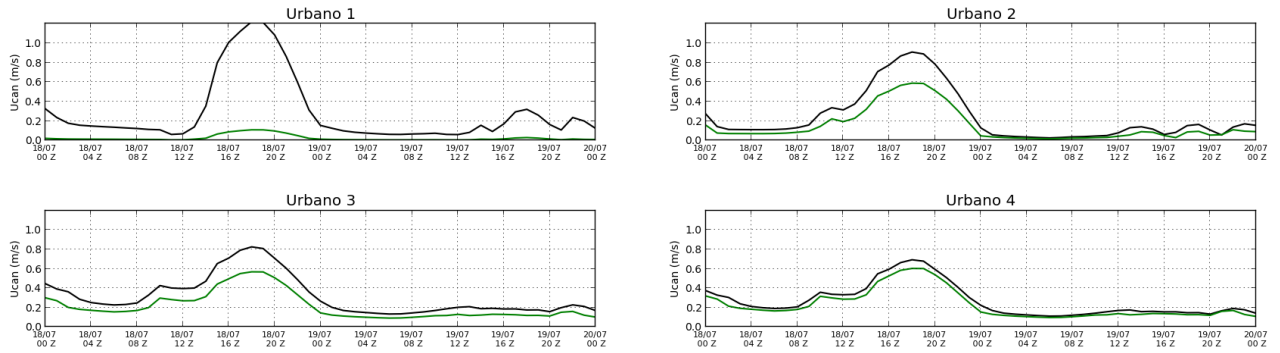


Figura 5.12 – Evolução diária da intensidade da velocidade horizontal do vento no interior do cânion urbano para os 4 tipos de uso de solo da RMSP. A linha verde corresponde à simulação FVC com os valores de fator de visão do céu empíricos, enquanto a linha preta corresponde ao modelo VTEB com os valores de razão geométrica apresentadas na coluna mais a direita da Tabela 5.2.

Conforme mostrado na Figura 5.11, no TEB, a temperatura no interior do cânion é representada por um esquema de resistências, tal que

$$\frac{t_{top} - t_a}{R_{top}} = \frac{t_a - t_w}{R_{w}} = \frac{t_w - t_r}{R_{r}} = \frac{t_r - t_{int}}{R_{int}} \tag{5.4}$$

Sendo T_a temperatura (Kelvin), RES a resistência aerodinâmica, C_{pd} a capacidade de calor do ar seco, ρ_a a densidade do ar no primeiro nível atmosférico e a_{bld} a fração de área da construção. O índice r refere-se ao nível da rua, o índice w à contribuição das paredes, o índice top refere-se ao nível acima do cânion, eo índice a é referente ao nível atmosférico. O sinal \wedge indica um valor da temperatura corrigida usando a função de Exner $\wedge = \frac{P_s}{P_a}$, onde P é a pressão (P_s e P_a são a pressão da superfície e a pressão do primeiro nível do modelo atmosférico, respectivamente), P_0 é uma pressão de referência ($=1000hPa$) e R_d é a constante dos gases para o ar seco.

A Figura 5.13 mostra o campo de diferença de temperatura no interior do cânion entre a simulação $VTEB$ com os valores de razão geométrica apresentados na Tabela 5.2 e a

simulação *SVF*. No período noturno, o campo de temperatura é principalmente devido à emissão de calor pela superfície, enquanto que no período diurno, a retenção de radiação de onda curta implica no aumento da temperatura para regiões com altas construções. Nas Figuras 5.13a e 5.13c, nota-se que a altura da construção na simulação *SVF* é importante na emissão de onda-longa devido à presença de maior superfície (área da parede) que a simulação *VTEB*. A diferença de temperatura no cânion alcança até 1,05 °C às 00Z do dia 19 de julho na região central da RMSP (área com maiores construções e diferença de razão geométrica entre as simulações).

Durante o dia, (Figuras 5.13b e 5.13d), a diferença de temperatura no interior do cânion alcança até 2,88°C nas regiões urbanas com menor diferença de razão geométrica, e 0,96 °C na região central (maior diferença de razão geométrica). Esta diferença positiva acontece devido ao tipo de construção que recebe maior radiação solar incidente da atmosfera. No caso da simulação *VTEB*, a diminuição da razão geométrica, mantendo a altura da construção, implica numa maior área da rua, superfície que têm o menor albedo, absorvendo maior radiação solar. Neste caso, maior calor é armazenado na superfície urbana. Por isso, a região central, que possui construções mais elevadas, possui diferença de temperatura menor entre as duas simulações.

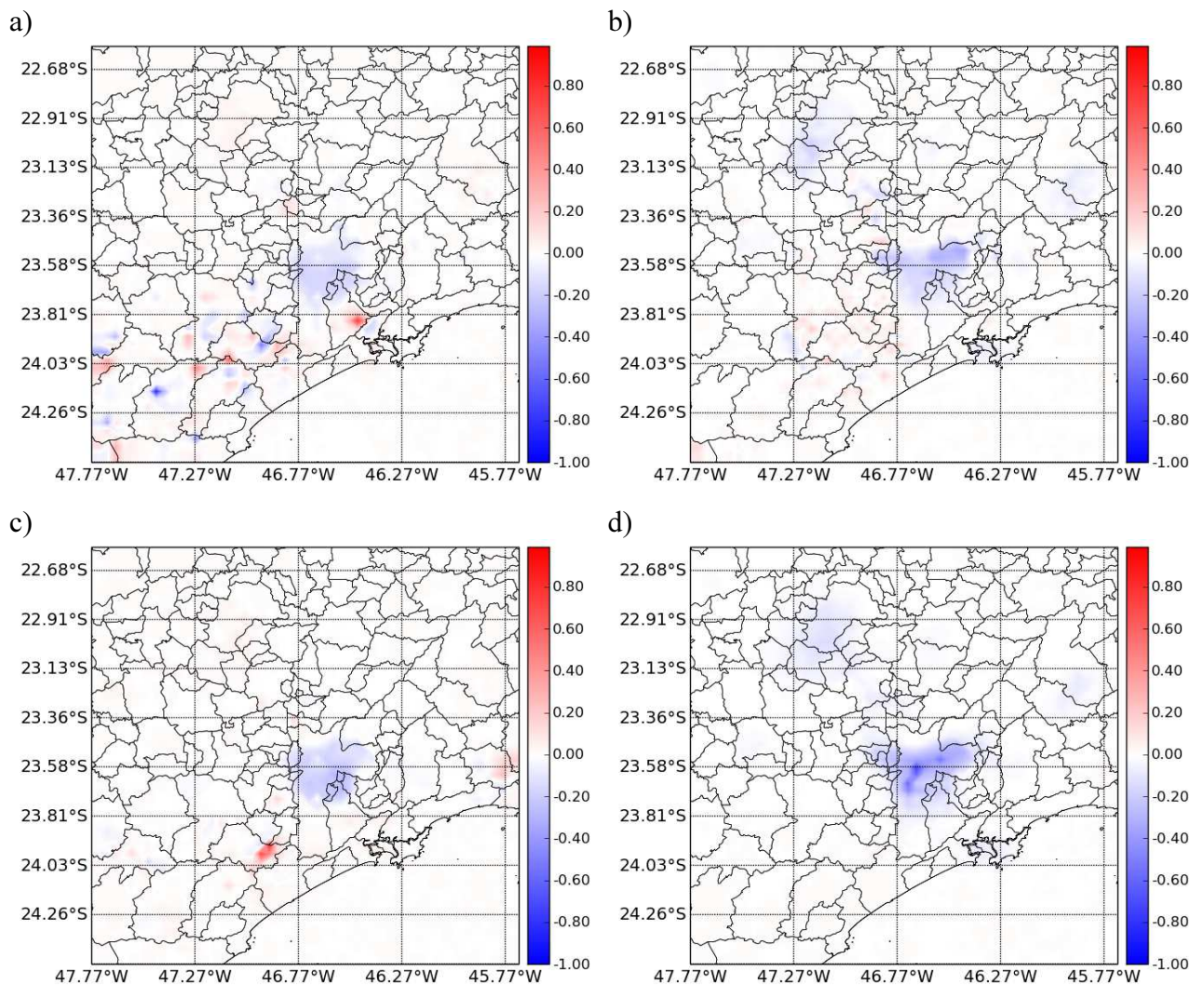


Figura 5.13 – Campos de diferença de temperatura no interior do cânion entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentadas na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 12Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 12Z do dia 19 de julho.

A Figura 5.14 mostra a diferença do campo de fluxo de calor sensível no primeiro nível do modelo entre as duas simulações. A maior diferença entre as simulações acontece no período diurno, com um máximo às 15Z do dia 18 de julho, com 18 W m^{-2} na região urbana. Assim como explicado para o caso de temperatura no cânion, o fluxo de calor sensível é maior para a simulação VTEB justamente pela maior área de absorção de calor ser uma área do tipo asfalto.

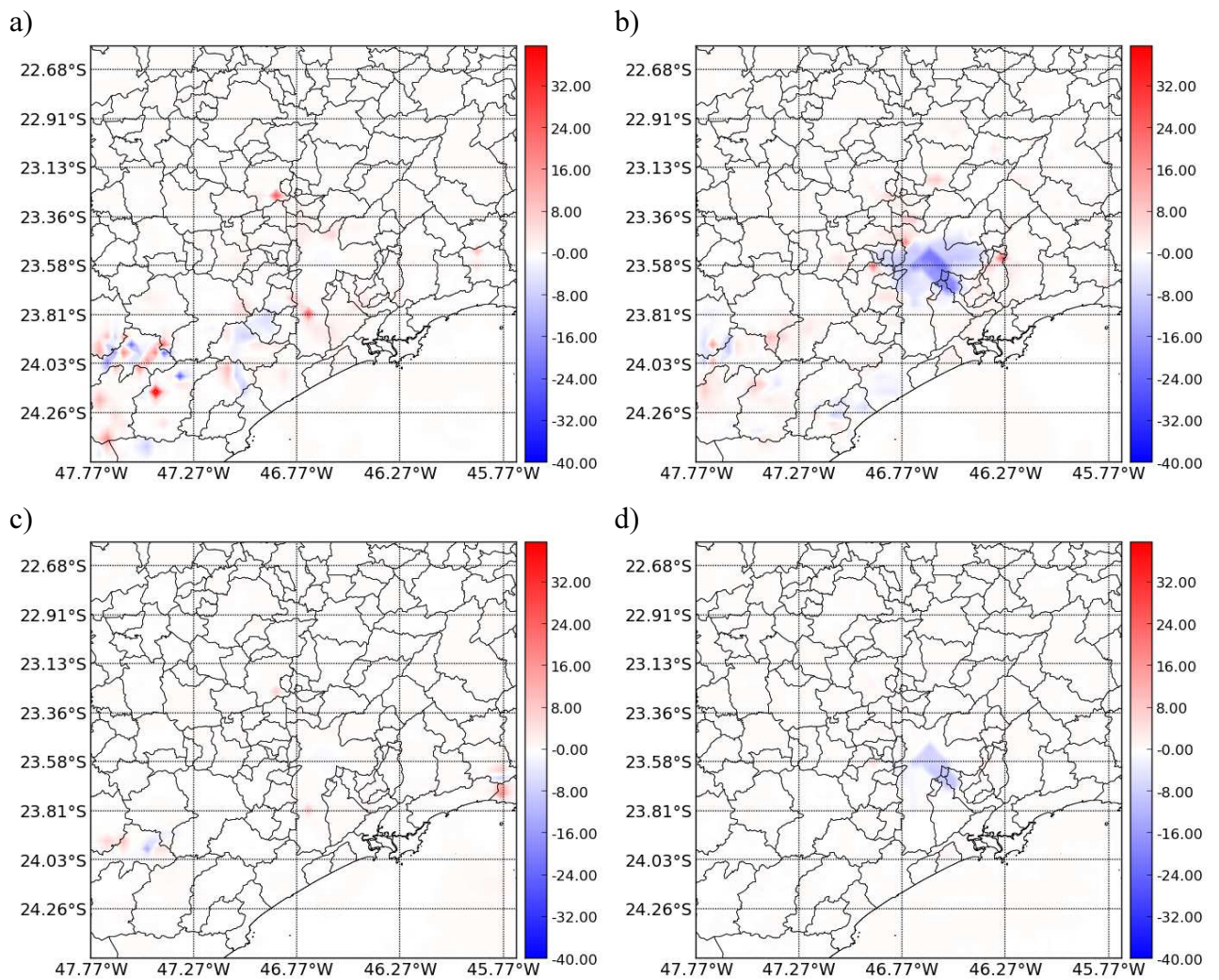


Figura 5.14 – Campos de diferença de fluxo de calor sensível entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentadas na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 15Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 15Z do dia 19 de julho.

Já para o caso de fluxo de calor latente (Figura 5.15), a diferença é pequena em torno da região urbana (cerca de 3 Wm^{-2} às 15Z do dia 19 de julho), justamente pelo tipo e quantidade de vegetação entre as duas simulações serem iguais.

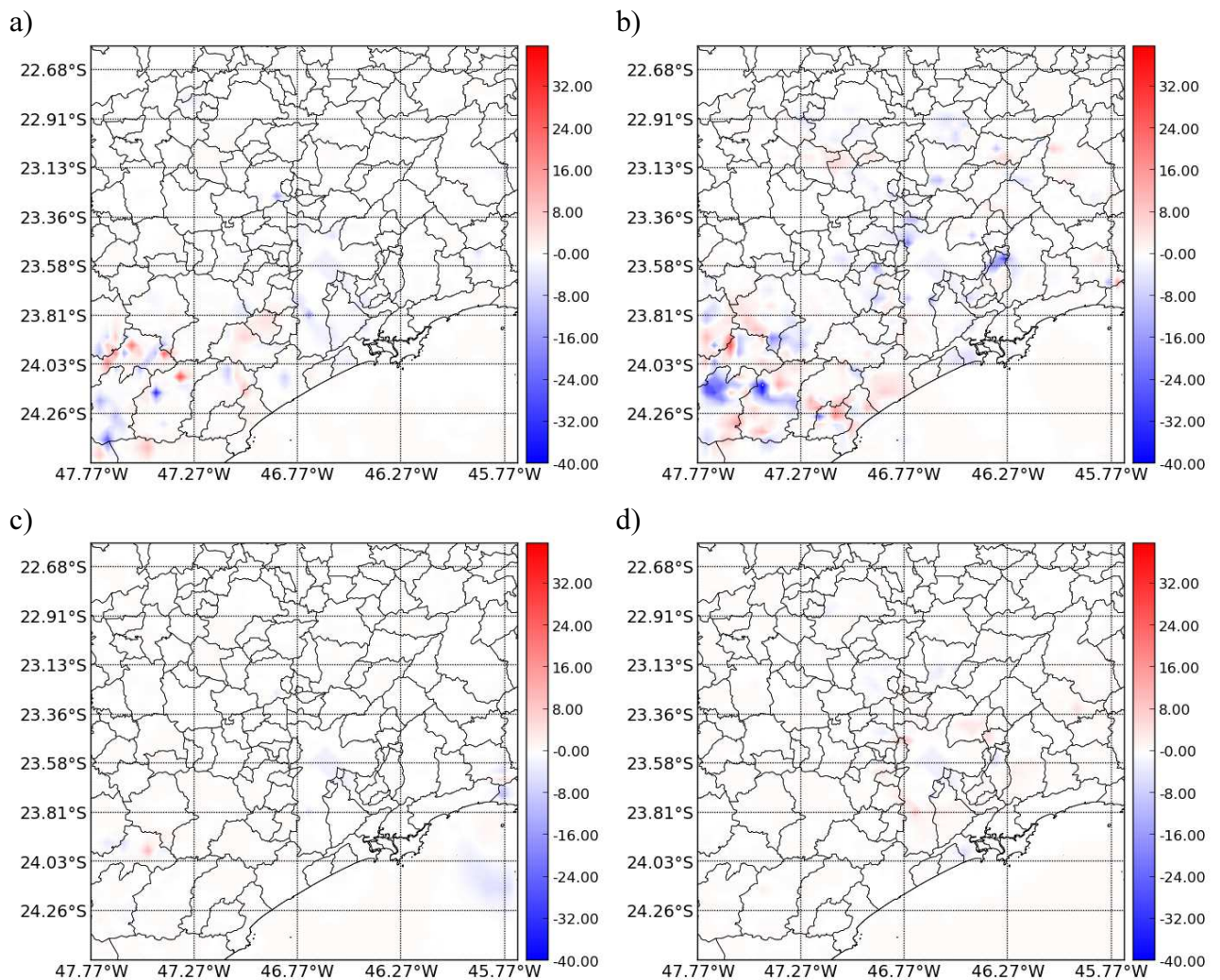


Figura 5.15 – Campos de diferença de fluxo de calor latente entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentadas na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 15Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 15Z do dia 19 de julho.

Considerando o saldo de radiação (Figura 5.16), tanto no período diurno quanto no noturno, o saldo de radiação para a simulação *SVF* é maior que na simulação *VTEB*. Como já explicado no caso da temperatura no interior do cânion (Figura 5.13), isto acontece porque, durante o dia, o balanço é dominado principalmente pela radiação de onda-curta, que em cânions mais estreitos, acaba retendo maior radiação e refletindo menos que no caso de cânions com ruas mais amplas. Já no caso noturno, o balanço de radiação é dominado pela emissão de radiação de onda-longa da soma das três superfícies do cânion (rua, parede e telhado) da simulação

SVF. A diferença entre as simulações é de até 50 W m^{-2} às 15Z do dia 19 de julho (Figura 5.16d).

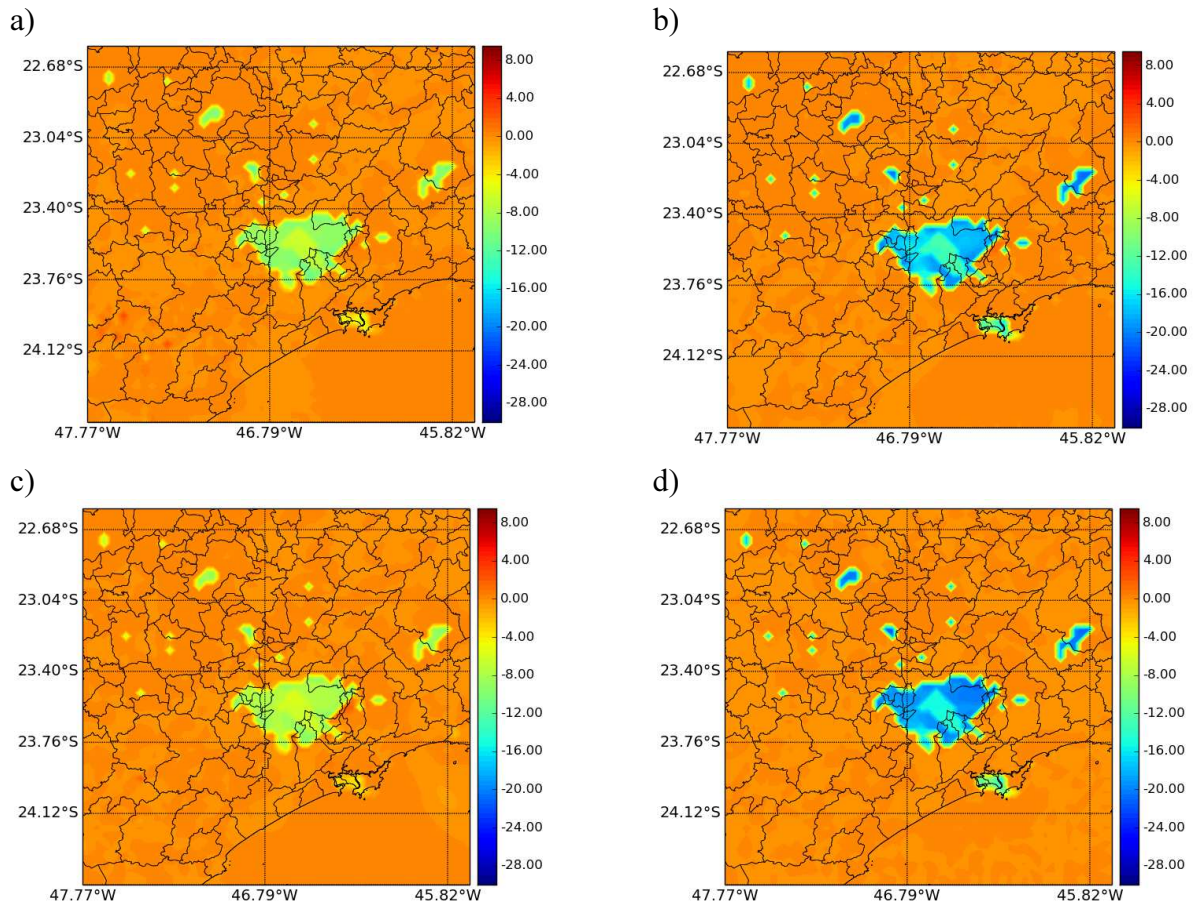


Figura 5.16 – Campo de diferença de saldo de radiação entre as simulações *VTEB* com os valores de razão geométrica apresentados na tabela 5.2 e a simulação *FVC* para as a) 00Z e b) 15Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 15Z do dia 19 de julho.

O último termo do balanço de energia, o fluxo de calor no solo (Equação 1.1) é apresentado na Figura 5.17 como a diferença entre as simulações *VTEB* e *SVF*. Dado que a energia armazenada na superfície é estimada pela relação de histerese, como em Grimmond *et al* (1991), e é função apenas da radiação líquida da superfície, têm-se que o fluxo de calor armazenado no solo segue a tendência e explicação física igual a do saldo de radiação explicado na Figura 5.16. Neste caso, a diferença de energia alcança valores de até 33 W m^{-2} às 15Z do dia 19 de julho.

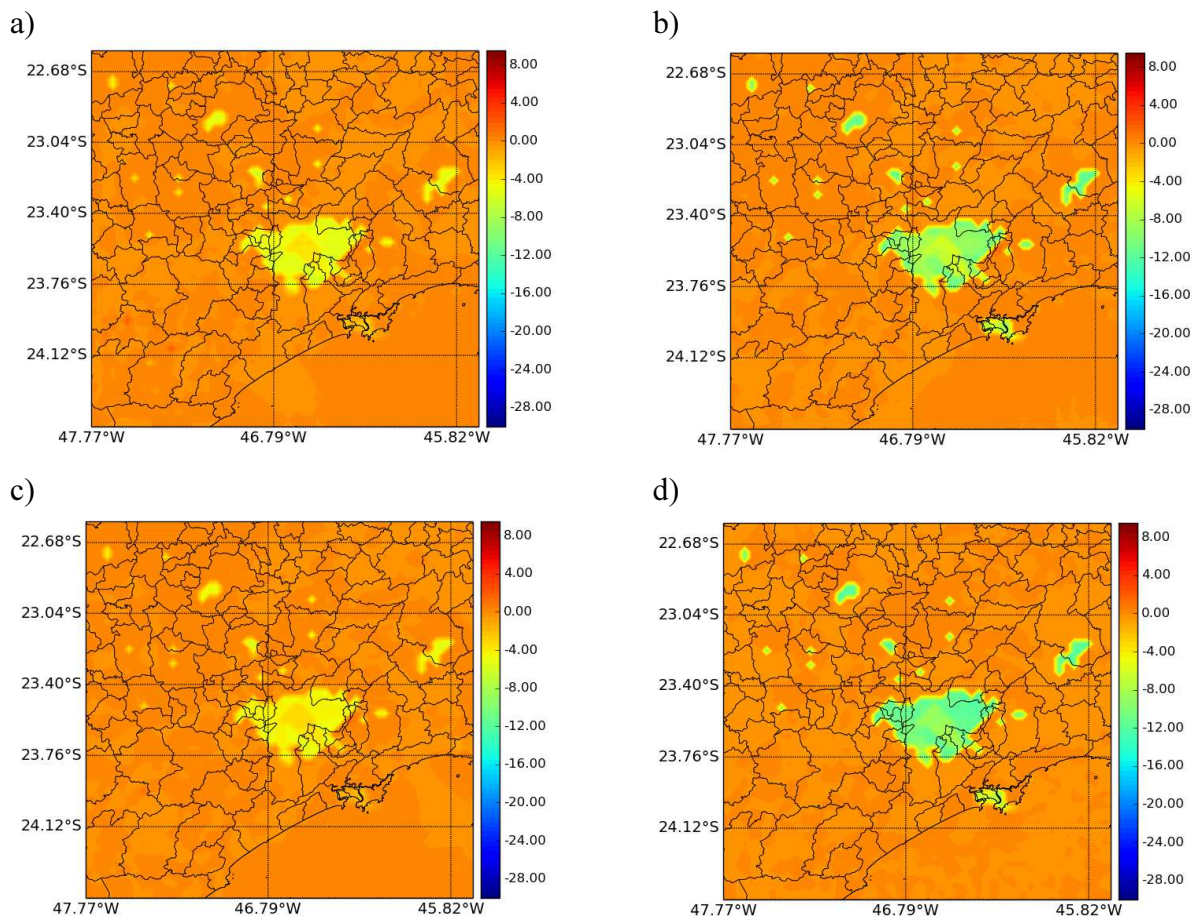


Figura 5.17 – Campo de diferença de fluxo de calor no solo entre as simulações VTEB com os valores de razão geométrica apresentados na tabela 5.2 e a simulação FVC para as a) 00Z e b) 15Z do dia 18 de julho, e c) 00Z e d) 15Z do dia 19 de julho.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da vegetação no balanço de energia em regiões urbana. No nosso caso, a região de estudo foi a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com mais de 20 milhões de habitantes, uma área de aproximadamente 8000 km² e com até 10 % de vegetação nas cidades (GOUVÊA, 2007).

A ferramenta utilizada neste estudo foi o modelo BRAMS com um módulo de interação urbano-atmosfera conhecido como TEB. O TEB é um modelo de superfície urbana de camada simples, que tem se mostrado eficiente na representação das cidades (MASSON, 2000; FREITAS et al., 2007), no qual as principais características são:

- A utilização de cânions urbanos infinitos, com construções de mesma altura e largura;
- Temperatura urbana representativa a partir das temperaturas do telhado, rua e paredes, calculadas através da Lei de Fick de condução de calor e do balanço de energia na superfície de cada estrutura;
- Relações empíricas para consideração do efeito do atrito das paredes e, conseqüentemente, cálculo simples para o efeito da turbulência.

Esta parametrização foi modificada para incluir o efeito da vegetação através da ponderação dos fluxos turbulentos em cada ponto de grade. Neste trabalho, chamamos esta versão de *VTEB*, que foi comparada e avaliada com relação à versão original do TEB. Para o cálculo da fração de vegetação, foram utilizados dados do Índice de Vegetação por Diferença

Normalizada (NDVI), como produto de superfície do satélite MODIS, com 250 m de espaçamento de grade.

Dados de ocupação de solo também foram atualizados considerando quatro tipos urbanos, conforme descrito em Gouvêa (2007). Até então, o código do BRAMS suportava apenas dois tipos de uso do solo urbano. Este dado foi atualizado com imagens de satélite do CBERS-2B, com 20 m de resolução.

A introdução do efeito da vegetação na região urbana mostrou resultados significativos na evolução de temperatura, umidade específica, no perfil vertical e na comparação com o campo de temperatura da superfície, obtida com dados do sensor TERRA/AQUA do satélite MODIS. Os índices estatísticos mostraram melhora na simulação *VTEB*, em comparação com a simulação *TEB*. No caso da temperatura, a melhora foi bastante significativa. Além da evolução horária, comparando com dados de radiossondagem, a inclusão da vegetação mostrou que a estrutura vertical da temperatura tem uma melhora nas regiões mais próximas a superfície. No caso da umidade específica, esta região é subestimada pela observação, mas a camada limite superficial é mais bem representada.

De forma geral, os modelos subestimam a temperatura da superfície vegetada, quando comparados com dados do MODIS. Porém, o comportamento das isolinhas de temperatura do modelo *VTEB* é mais parecido ao que é observado por sensoriamento remoto. Isto demonstra a importância da representação da vegetação nos esquemas de interação superfície urbana – atmosfera.

Além de uma avaliação quantitativa, foi feita uma análise qualitativa entre os dois modelos. A presença da vegetação conseguiu reduzir em até 0,5 °C o efeito da ICU, durante o período

noturno. Outro impacto da vegetação é a redução da velocidade da entrada da brisa marítima na RMS, causado principalmente pelo efeito implícito no fluxo turbulento de momentum.

Diferente da redução do fluxo de calor sensível, conforme descrito na literatura, a presença da vegetação contribui para um aumento do fluxo turbulento de calor latente na evolução temporal do balanço de energia. A análise do campo vertical de umidade demonstra que esta contribuição devida à presença da vegetação ocorre nas camadas mais próximas à superfície. Desta forma, é conveniente analisar a Razão de Bowen, que neste caso, apresenta um comportamento mais definido, com uma redução de até 0,8 às 15 Z do dia 18 de julho.

O saldo de radiação e o calor armazenado na superfície também foram analisados. O primeiro apresentou uma redução de até $4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, causado pela diferença de temperatura da superfície entre as simulações. No caso do fluxo de calor armazenado, o modelo de histerese utilizado neste trabalho, apresentou um resultado similar, com uma diferença de até $4,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ entre as simulações.

Testes de sensibilidade foram realizados para verificar o papel da cidade e da vegetação urbana. Nos testes foram alteradas as características da estrutura urbana, a dinâmica dos prédios e as características da vegetação. As análises foram feitas no campo da ICU juntamente com o impacto no conforto térmico humano para ambientes externos, através da relação de Temperatura Efetiva (TE) proposta por Missenard (1937) com a classificação proposta por Hentschel (1986).

O primeiro teste de sensibilidade proposto foi o de alterar o valor do albedo do telhado, modificando para um valor extremamente baixo, de 0,08, simulando um “telhado de asfalto” e um valor alto de 0,90, recriando a proposta de “telhado branco”. O efeito da reflexão da

radiação solar mostrou uma redução de até 1°C na ICU. Esta redução na temperatura também contribuiu para uma diminuição da TE. O efeito da redução de umidade com a diminuição do albedo também contribuiu para um valor menor de TE com relação ao controle.

Outro teste realizado foi a mudança da emissividade da superfície das paredes, rua e telhado para o valor de 1, considerando as superfícies como corpos negros. Este valor tem impacto na redução da intensidade da ICU, visto que maior radiação térmica é emitida pela superfície. No campo de temperatura efetiva, percebeu-se que este efeito é maior na região central, reduzindo a TE em até 1,6 °C, devido às construções nesta região serem mais altas.

Ainda sobre as características dos materiais das construções, avaliou-se o impacto da mudança da condutividade térmica das paredes, ruas e telhados. O aumento em até 10 vezes com relação à simulação controle gerou uma diminuição de até 3°C na intensidade da ICU e de 1,6 °C na temperatura efetiva. Também a elevação da capacidade térmica na mesma razão gerou uma diminuição da ICU, obtendo valores negativos, indicando que a simulação com vegetação teria a temperatura do ar menor que a simulação com região urbana. Esta mudança também gerou uma redução de até 1,8 °C a TE.

A dinâmica da estrutura foi avaliada alterando a razão geométrica das construções. Uma simulação contou com o seu valor reduzido pela metade, e outra, com o dobro. Apesar das diferenças, o impacto das duas foi semelhante com relação à ICU e a TE, reduzindo o seu valor com relação à simulação controle. No caso de uma maior razão geométrica, a explicação da redução da temperatura se dá pelo efeito de sombreamento causado pelas elevadas construções, em comparação com as ruas estreitas, enquanto que, quando a razão geométrica diminuiu, as ruas ficam mais largas e menos radiação é retida no interior dos cânions.

Sobre o efeito da vegetação nas regiões urbanas e também sobre a avaliação da introdução da ponderação dos fluxos, foram realizados testes de sensibilidades sobre o valor do NDVI e do tipo de vegetação urbana. No primeiro caso, duas simulações foram executadas com o seu valor original da simulação controle reduzido e aumentado em 20%. A alteração deste valor impacta tanto na presença de vegetação ou não, na fração de vegetação e no valor do índice de área foliar. A redução implicou num aumento da ICU e na TE, enquanto que o aumento do NDVI reduziu a ICU e a TE em até 1°C. Isto demonstra a importância da presença da vegetação para o conforto térmico humano.

No segundo caso, duas simulações também foram realizadas, alterando toda a vegetação urbana por um tipo mais alto (Floresta Mista) e por um tipo mais baixo (Grama Baixa). O efeito de sombreamento contribui para a redução da ICU e da TE, no caso da vegetação alta. Neste último, no início das manhãs a TE atinge o limite de “fresco” na classificação de conforto térmico. No caso da vegetação mais baixa, o aumento da temperatura, com relação à vegetação mais alta, gera um aumento da ICU na área central da cidade, comparado com a simulação controle. A TE não muda muito com relação à simulação controle, visto que a vegetação do tipo grama baixa é a que predomina na área urbana da RMSP.

Valores do FVC foram utilizados para melhorar a característica da estrutura urbana no modelo e os seus valores comparados com o obtido através da álgebra dos fatores de forma. 37 pontos ao longo de toda a RMSP foram obtidos com uma câmera digital e lente olho-de-peixe e validados para cada região urbana. Estes valores foram incluídos no modelo como parâmetro de entrada, a partir da média sobre cada tipo urbano. O valor empírico mostrou ser muito mais elevado que o obtido pela relação baseada apenas na razão geométrica. Analisando os índices estatísticos e comparando com os dados observados, inclusão do FVC mostrou uma melhora, principalmente em regiões com alta densidade de construções. O aumento do FVC indica uma

maior fração de céu visível. Desta forma, mais radiação consegue incidir na rua, que possui um baixo albedo, armazenando maior calor nesta superfície.

O impacto deste valor no comportamento do vento no interior dos cânions urbanos foi avaliado e comparado com uma simulação no qual os valores empíricos de FVC foram obtidos através da álgebra do fator de forma, variando a razão geométrica. Neste caso, para cada tipo urbano, a intensidade do vento seria relativamente maior, visto que a largura dos cânions seria grande e em função do menor atrito nas paredes das construções. Mesmo não havendo muita diferença nos termos do balanço de energia na região urbana, a temperatura na região central da cidade seria relativamente mais baixa, devido ao efeito de sombreamento das construções.

Portanto, a introdução e o aprimoramento no tratamento da vegetação no TEB, juntamente com a inclusão dos valores empíricos do FVC, conseguiram reproduzir os efeitos esperados no campo térmico e dinâmico da camada limite urbana para uma grande área urbanizada, como a RMSP. Estas simulações mostraram a importância do tipo e da quantidade de vegetação na região urbana. Além disso, o tipo de material utilizado nas construções tem um papel fundamental na formação da ICU. A representação da estrutura urbana através dos valores de FVC também melhora a representatividade do campo de vento, temperatura e umidade na RMSP. Com isso, tem-se que os modelos propostos podem ser uma importante ferramenta no planejamento urbano, visando o conforto térmico da população da cidade.

6.1 Sugestões e trabalhos futuros

Visto a importância da introdução da vegetação nas parametrizações de interação dossel urbano-atmosfera, sugere-se como aprimoramento do VTEB:

- Melhoria na representação do dossel de vegetação, incluindo efeitos de retenção e reflexão de radiação, tamanho dos vórtices turbulentos e atrito causado pela presença de árvores e/ou plantas de baixo porte explicitamente. Estas modificações podem ser baseadas nos trabalhos de Lemonsu *et al.*(2012), Lee (2011), Lee e Park (2007) e Lee e Baik (2011).
- Modificação do código do TEB para inclusão de uma aproximação para consideração do efeito de arrasto. Atualmente, os cálculos de velocidade no cânion são relações empíricas. Com esta aproximação, o esquema TEB se transformaria num esquema multicamada, semelhante ao de Martilli *et al.*(2002). No BRAMS, o TEB seria um esquema independente do LEAF. Assim, outros esquemas de vegetação, incluindo os dinâmicos como o JULES (MOREIRA *et al.*, 2013), poderiam ser utilizados para representar a vegetação urbana.

Com relação a estudos sobre a vegetação urbana:

- Verificação do impacto de parques e bosques nas regiões urbanas e posicionamento de árvores ao longo das ruas.
- Realizar simulações para um período de verão.
- Verificar a papel da umidade da vegetação urbana na geração de chuva convectiva (BORNSTEIN E LIN, 2000; SHEPHERD *et al.*, 2002; SHEPHERD, 2005).

Sobre o FVC:

- Obtenção de mais imagens e valores pela RMSP, possibilitando a criação de um mapa mais amplo de FVC, melhorando, inclusive, a caracterização do uso de solo urbano.
- Com os dados de FVC obtidos com a câmera digital e lente olho-de-peixe, mais uma base de dados mais ampla de construções (p. ex., visualização 3D de prédios a partir do Google Maps/Earth, ou imagens do tipo RASTER, como em RATTI E RITCHENS, 2004), a utilização de um Modelo Digital de Elevação, como o de Zaksek *et al.* (2011), torna-se uma ferramenta interessante para a elaboração de um mapa mais amplo e detalhado de FVC para uma região.

REFERÊNCIAS

- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H., Numerical Study on the effects of Aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate, **Building and Environment**, 2006, vol. 41, p. 94-108.
- ARNFIELD, A.J., Two decades of Urban Climate Research: A review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. **International Journal of Climatology**, 2003, vol. 23, p. 1-26.
- ATKINSON, B.W., Numerical Modelling of Urban Heat-Island Intensity. **Boundary- Layer Meteorology**, 2003, vol. 109, p. 285-310.
- AVISSAR, R., Potential effects of vegetation on the urban thermal environment. **Atmospheric Environment**, 1996, v. 30, n. 3, p. 437-448.
- BAND, L. E.; PATTERSON, P.; NEMANI, R.; RUNNING, S. W., Forest ecosystem processes at the watershed scale - Incorporating hill slope hydrology. **Agricultural and Forest Meteorology**, 1993, vol. 63, 93-126.
- BÁRBARO, E.W., Patterns of long wave radiation at the surface in the megacity of São Paulo, Brazil – Part II: seasonal evolution and pollution impact. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2008, São Paulo.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A. F., Testing a physically-based flood forecasting-model (TOPMODEL) for 3 UK catchments. **Journal of Hydrology**, 1984, vol. 69, p. 119-143.
- BORNSTEIN, R.; LIN, Q., Urban Heat Islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: Three case studies, **Atmospheric Environment**, 2000, vol. 34, p. 507-516.
- BRAGA, A.L.F.; SALDIVA, P.H.N.; PEREIRA, L.A.A.; MENEZES, J.J.C.; CONCEIÇÃO, G.M.S.; LIN, C.A.; ZANOBETTI, A.; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D.W., Health Effects of Air Pollution Exposure on Children and Adolescents in São Paulo, Brazil, **Pediatric Pulmonology**, 2001, vol. 31, p. 106-113.
- BRETZ, S; AKBARI, H.; ROSENFELD, A., Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat island, **Atmospheric Environment**, 1998, vol. 32, p. 95-101.
- BRITTER, R.; HANNA, S.R., Flow and dispersion in urban areas, **Annual Review of Fluid Mechanics**, 2003, vol. 35, p. 469-496.

- BROWN, M.J.; GRIMMOND, S.; RATTI, C., Computing Sky View Factor in Urban Environments. **Anais do International Society of Environmental Hydraulics Conference**, Tempe, AZ, 2001.
- BROWN, M.J.; WILLIAMS, M.D., An Urban Canopy Parameterization for Mesoscale Meteorological Model. **Anais do AMS 2nd Urban Environment Conference**, Albuquerque, NM, 1998.
- BRUSE, M., *ENVI-met Version 3.1, ENVI-met Model Homepage*. Disponível em: <<http://www.envi-met.com>>
- CARVALHO, V.S.B., **O impacto das megacidades sobre a qualidade do ar: os casos das regiões Metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro**, 2010, 237 f., Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG/USP, São Paulo, SP.
- CERMAK, J.E.; DAVENPORT, A.G.; PLATE, E.J.; VIEGAS, D.X., **Wind Climate in Cities**, Kluwer Academic Publishers, 1995. 772 pp.
- CHAPMAN, L.; THORNES, J.E.; BRADLEY, A.V., Sky-View Factor approximation using GPS receivers, **International Journal of Climatology**, 2002, vol. 22, p. 615-621.
- CHAPMAN, L.; THORNES, J.E., Real-Time Sky-View Factor Calculation and Approximation, **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 2004, vol. 21, p. 730-741.
- CHEN, C.; COTTON, W.R., The physics of the marine stratocumulus-capped mixed layer, **Boundary-Layer Meteorology**, 1983, vol. 25, p. 289-321.
- COTTON, W.R.; PIELKE, 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, **Meteorology and Atmospheric Physics**, 2003, vol. 82, p. 5-29.
- CRESSMAN, G. P., An Operational Objective Analysis System. **Monthly Weather Review**, v. 87, p.367-374. 1959.
- DABBERT, W.F.; CROOK, A.; MUELLER, C.; HALES, J.; ZUBRICK, W.; DORAN, J.C.; KING, C.; KEENER, R.N.; BORNSTEIN, R.; RODENHUIS, D.; KOCIN, P.; ROSSETI, M.A.; SHARROCKS, F.; STANLEY, E.M., Forecast Issues in the Urban Zone: Report of the 10th Prospectus Development Team of the U.S. Weather Research Program, **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2000, vol. 81, p. 2047-2064.

- DALEY, R., **Atmospheric Data Analysis**, New York, Cambridge Press, 1991, 457 pp.
- DAVIES, H. C., Limitations of some common lateral boundary schemes used in regional NWP models, **Monthly Weather Review**, 1983, vol. 111, p. 1002-1012.
- 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 f., 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.
- ELIASSON, I., Urban Nocturnal Temperatures, street geometry and land use, **Atmospheric Environment**, 1996, vol. 30, n. 3, p. 379-392.
- FERREIRA, M. J., **Balanco de energia na superfície da cidade de São Paulo**, 2010, 183 f. Tese de Doutorado – Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- FREITAS, E.D., **Circulações Locais em São Paulo e sua influência na dispersão de poluentes**. 2003. 157 f. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG/USP, São Paulo, SP.
- 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. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 122, n. 1, p. 43-65, 2007.
- FREITAS, E. D., Modelagem Numérica da Atmosfera em regiões urbanas: Aplicações em estudos eprognósticos sobre a qualidade do ar. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, 2008, vol. 32, p. 19-27.
- FREITAS, E.D., Da garoa à tempestade. **Revista FAPESP**, São Paulo, p. 40, edição 194, Maio de 2012. Depoimento concedido à Marcos Pivetta.
- FREITAS, S.R., **Modelagem Numérica do Transporte e das Emissões de Gases Traços e Aerossóis de Queimadas no Cerrado e Floresta Tropical da América do Sul**. 1999. 205 f. Tese de Doutorado. Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

- FREITAS, S.R.; LONGO, K.M.; SILVA DIAS, M.A.F.; CHATFIELD, R.; SILVA DIAS, P.; ARTAXO, P.; ANDREAE, M.O.; GRELL, G.; RODRIGUES, L.F.; FAZENDA, A.; PANETTA, J., The Coupled Aerosol and Tracer Transport Model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation, **Atmospheric Chemistry and Physics**, 2009, vol. 9, p. 2843-2861.
- GEORGI, J.N.; DIMITRIOU, D., The Contribution of Urban Green Spaces to the Improvement of Environment in Cities: Case Study of Chania, Greece. **Building and Environment**, 2010, vol. 45, n. 6, p. 1401-1414.
- GONÇALVES, J.C.S; MULFARTH, R.C.K.; MONTEIRO, L.M.; MOURA, N.C.; PRATA, A.R.; MIANA, A.C., The environmental performance of high-density urban living. **Anais do PLEA 2011: Architecture & Sustainable Development: Conference Proceeding of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture**, 2011, Louvain-la-Neuve, Belgium, p. 375-380.
- GONÇALVES, F.L.T.; JACOB, W.; ALUCCI, M.; BUSSE, A.; DUARTE, D.; MONTEIRO, L.; TREZZA, B.; TRIBESS, A.; BATISTA, R.; AMBRIZZI, T., Urban Biometeorology: analysis of the air pollution and climate change on cognition and physical abilities of geriatric population of São Paulo City. **Anais do EGU General Assembly**. Geophysical Research Abstracts, 2013.
- 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.
- GRIMMOND, C.S.B.; CLEUGH, H.A.; OKE, T.R., An Objective Urban Heat Storage Model and its comparison with other schemes, **Atmospheric Environment**, 1991, vol. 25b, p. 311-326.
- GRIMMOND, C.S.B.; POTTER, S.K.; ZUTTER, H.N.; SOUCH, C., Rapid Methods to estimate Sky-View Factors applied to Urban Areas, **International Journal of Climatology**, 2001, vol. 21, p. 903-913.
- GROLEAU, D.; MESTAYER, P., Urban Morphology Influence on Urban Albedo: A revisit with the SOLENE model, **Boundary-Layer Meteorology**, 2012, vol. 147, n. 2, p. 301-327.
- GURJAR, B.R.; JAIN, A.; SHARMA, A.; AGARWAL, A.; GUPTA, P.; NAGPURE, A.S.; LELIEVELD, J., Human health risks in megacities due to air pollution, **Atmospheric Environment**, 2010, vol. 44, p. 4606-4613.

- HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A.J., Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: Sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados, **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2011, vol. 26, n. 4, p. 591-608.
- HAMDI, R., **Numerical study of the atmospheric boundary layer over urban areas: Validation for the cities of Basel and Marseilles**, 2005, 242 f., Tese de Doutorado, Departement de physique, UniversitéCatholique de Louvain.
- HAMDI, R.; SCHAYES, G., Sensitivity study of the urban heat island intensity to urban characteristics. **International Journal of Climatology**, 2008, vol. 28, p. 973-982.
- HAMMERLE, M.; GÁL, T.; UNGER, J.; MATZARAKIS, A., Introducing a script for calculating the sky view factor used for urban climate investigations, **ActaClimatologica et Chorologica**, 2011a, vol. 44-45, p. 83-92.
- HAMMERLE, M.; GÁL, T.; UNGER, J.; MATZARAKIS, A., Comparison of models calculating the sky view factor used for urban climate investigations, **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 105, n. 3-4, p. 521-527.
- HARMAN, I.N., **The energy Balance of urban areas**. 2003, 157 f. PhD Thesis, University of Reading.
- HARRINGTON, J.Y., **The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season Arctic stratus**, 1997, 289 f., PhD Thesis. Colorado State University, Colorado.
- HENTSCHEL, G., A human biometeorology classification of climate for large and local scales. *World Climate Programme Applications n.1*, World Meteorological Organization, p. 120-138, 1986.
- HILL, G. E., Factors controlling the size and spacing of cumulus clouds as revealed by numerical experiments. **Journalof the Atmospheric Sciences**, 1974, vol. 31, n. 3, p. 646-673.
- HONJO, T., Thermal Comfort in Outdoor Environment, **Global Environmental Research**, 2009, vol. 13, p. 43-47.
- HWANG, R.L.; LIN, T.P.; MATZARAKIS, A., Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort, **Building and Environment**, 2011, vol. 46, p. 863-870.

- IBGE, 2010: *Dados da cidade de São Paulo*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>
- IBRAHIM, A.A.; NDUKA, I.C.; IGUISI, E.O.; ATI, O.F., An Assessment of the impact of Sky View Factor (SVF) on the Micro-climate of Urban Kano, **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, 2011, vol. 5, n. 7, p. 81-85.
- ITIMURA, M.S., **Condições atmosféricas associadas a concentrações máximas e mínimas de ozônio observadas na Região Metropolitana de São Paulo**, 155 f., Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- JAUREGUI, E., Influence of a Large Urban Park on Temperature and Convective Precipitation in a Tropical City, **Energy and Buildings**, 1990, vol. 15, p. 457-463.
- JOHANSSON, E.; SPANGENBERG, J.; GOUVÊA, M.L.; FREITAS, E.D., Scale-integrated atmospheric simulations to assess thermal comfort in different urban tissues in the warm humid summer of São Paulo, Brazil, **Urban Climate**, 2013, vol. 6, p. 24-43.
- JONES, H.G.; ROTENBERT, E., Energy, Radiation and Temperature Regulation in Plants, 2001, In: eLS. John Wiley & Sons Ltd, Chichester. [doi: 10.1002/9780470015902.a0003199.pub2].
- KALNAY, E.; CAI, M., Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**. 2003, vol. 423, p. 528-531.
- KETZEL, M.; BERKOWICZ, R.; MULLER, W.; LOHMEYER, A., Dependence of street canyon concentrations on above roof wind speed – implications for numerical modelling, **International Journal of Environment and Pollution**, 2002, vol. 17, p. 356-366.
- KLEMP, J.B.; WILHELMSON, R.B., The simulation of three-dimensional convective storm dynamics, **Journal of Atmospheric Science**, 1978, vol. 35, p. 1070-1096.
- KOSOVIC, B., Subgrid Scale Modeling for the large-eddy simulation of high-Reynolds-number boundary layers. **Journal of Fluid Mechanics**, 1997, v. 336, p. 151-182.
- KUSAKA, H.; KONDO, H.; KIKEGAWA, Y.; KIMURA, F., A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models, **Boundary-Layer Meteorology**, 2001, vol. 101, p. 329-258.

- LANDSBERG, H.E., **The Urban Climate**, International Geophysics Series, vol. 28, Academic Press, New York, 1951.
- LEE, T.J., **The impact of vegetation on the atmospheric boundary layer and convective storms**. 1992, 137 f., PhD Thesis, Colorado State University, Fort Collins.
- LEE, S.H.; PARK, S.U., A Vegetated Urban Canopy Model for Meteorological and Environmental Modelling, **Boundary-Layer Meteorology**, 2007, vol. 126, p. 73-102.
- LEE, S.H.; BAIK, J.J., Evaluation of the Vegetated Urban Canopy Model (VUCM) and its impacts on Urban Boundary Layer Simulation, **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Science**, 2011, vol. 47, n. 2, p. 151-165.
- LEE, S.H., Further Development of the Vegetated Urban Canopy Model Including a Grass-Covered Surface parameterization and Photosynthesis Effects, **Boundary-Layer Meteorology**, 2011, vol. 140, p. 315-342.
- LEMONSU, A.; GRIMMOND, C.S.B.; MASSON, V., Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterranean City: Marseille, **Journal of Applied Meteorology**, 2004, vol. 43, p. 312-327.
- LEMONSU, A.; MASSON, V.; SHASHUA-BAR, L.; ERELL, E.; PEARLMUTTER, D., Inclusion of Vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas, **Geoscientific Model Development**, 2012, vol. 5, p. 1377-1393.
- LEUNG, K.S.; STEEMERS, K., Estimating Average Sky-View-Factors of Urban Surfaces with Simple Geometric Parameters, **Anais da 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture**, Dublin, 22 a 24 de outubro, 2008.
- LILLY, D.K., On the numerical simulation of buoyant convection. **TELLUS - XIV**, 1962, vol. 2, p. 148-172.
- MAHRER, Y.; PIELKE, R.A., A numerical study of the airflow over irregular terrain, **Beitrag zur Physik der Atmosphäre**, 1977, vol. 76, p. 1550-1575.
- MARCIOTTO, E.R. **Estudo da Influência de um Dossel Urbano sobre o balanço de energia na superfície e implicações na Estrutura Vertical da Camada Limite Atmosférica**. 2008. 145 f. Tese de doutorado, Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG/USP, São Paulo, SP.

- MARCIOTTO E. R., OLIVEIRA A.P. & HANNA S.R., Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. **Building and Environment**, 2010, vol. 45, p. 2497-2505.
- MARTILLI, A.; CLAPPIER, A.; ROTACH, M.W., An urban surface Exchange parameterization for mesoscale models. **Boundary-Layer Meteorology**, 2002, vol. 104, p. 261-304.
- MARTILLI, A., A two-dimensional numerical study of the impact of a city on atmospheric circulation and pollutant dispersion in a coastal environment, **Boundary-Layer Meteorology**, 2003, v. 41, p. 1247-1266.
- MARTILLI, A., Current Research and future challenges in urban mesoscale modelling, **International Journal of Climatology**, 2007, vol. 27, n. 14, p. 1909-1918.
- MASSON, V., A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, 2000, vol. 94, p. 357-397.
- MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H., Modelling radiation fluxes in simple and complex environments – application of the RayMan model, **International Journal of Biometeorology**, 2007, vol. 51, p. 323-334.
- MELLOR, G.L.; YAMADA, T., Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems. **Reviews of Geophysics**, 1982, vol. 20, n. 4, p. 851-875.
- MEYERS, M.P.; WALKO, R.L.; HARRINGTON, J.Y.; COTTON, W.R., New RAMS cloud Microphysics parameterization. Part II: The two-moment scheme. **Atmospheric Research**, 1997, vol. 45, p. 3-39.
- MINELLA, F.C.O.; ROSSI, F.A.; KRUGER, E.L., Análise do efeito diurno do fator de visão do céu no microclima e nos níveis de conforto térmico em ruas de pedestres em Curitiba, **Ambiente Construído**, 2011, vol. 11, n. 1, p. 123-143.
- MISSERNARD, A., **L’homme et le climat**. Paris, 1937.
- MONTÁLVEZ, J.P.; RODRIGUÉZ, A.; JIMÉNEZ, J.I., A study of the urban heat island of Granada. **International Journal of Climatology**, 2000, v. 20, n. 8, p. 899-911.

- MONTEIRO, L.M.; ALUCCI, M.P., Proposal of an outdoor thermal comfort index: empirical verification in the subtropical climate. **Anais do PLEA 2011: Architecture & Sustainable Development: Conference Proceeding of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture**, 2011, Louvain-la-Neuve, Belgium, p. 433-438.
- MORAIS, M.V.B.; OLIVEIRA, A.P.; FERREIRA, M.J., Estudo Numérico do Balanço de Radiação na superfície: Variação diurna e anual do albedo na cidade de São Paulo. **Anais do VI Workshop de Micrometeorologia**, 2009, Santa Maria – RS, Revista Ciência e Natura, Vol. Especial, p. 297-300.
- MORAIS, M.V.B., **Investigação da Camada Limite Planetária sobre a Região Urbana de São Paulo por meio do Modelo de Mesoescala TVM acoplado ao modelo de dossel urbano de Martilli**, 112 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- MOREIRA, D.S.; FREITAS, S.R.; BONATTI, J.P.; MERCADO, L.M.; ROSÁRIO, N.M.É.; LONGO, K.M.; MILLER, J.B.; GLOOR, M.; GATTI, L.V., Coupling between the JULES land-surface scheme and the CATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO₂ budget in South America, **Geoscientific Model Development Discussions**, 2013, vol. 6, n. 1, p. 453-494.
- MORRIS, C.J.G.; SIMMONDS, I., Associations between varying magnitudes of the urban heat island and the synoptic climatology in Melbourne, Australia. **International Journal of Climatology**, 2000, v. 20, n. 15, p. 1931-1954.
- NUNEZ, M.; OKE, T.R., The Energy Balance of an Urban Canyon, **Journal of Applied Meteorology**, 1977, vol. 16, p. 11-19.
- OKE, T.R., Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: comparison of scale model and field observations, **Journal of Climatology**, 1981, vol. 1, p. 237-254.
- OKE, T.R., The Energetic Basis of the Urban Heat Island, **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1982, vol. 108, p. 1-24.
- OKE, T.R., **Boundary Layer Climates**, 2^a edition. Cambridge, 1988, 435pp.
- OKE, T.R.; JOHNSON, G.T.; STEYN, D.G.; WATSON, I.D., Simulation of surface urban heat islands under ‘ideal’ conditions at night. Part 2: diagnosis of causation, **Boundary-Layer Meteorology**, 1991, vol. 56, p. 339-358.

- OLESON, K.W.; BONAN, G.B.; FEDDEMA, J., Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. **Geophysical Research Letters**, 2010, vol. 37, p. 1-7.
- OLIVEIRA, A.P.; BORNSTEIN, R.D.; SOARES, J. Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo, **Water, Air and Soil Pollution**, 2003, vol. 3, p. 3-15.
- PEREIRA DE SOUSA, O.N., **Investigação do papel da topografia e ocupação do solo na camada limite planetária sobre a cidade de São Paulo**. 2006. 116 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG/USP, São Paulo, SP.
- PICOT, X., Thermal Comfort in Urban Spaces: Impact of Vegetation Growth Case Study: Piazza Della Scienza, Milan, Italy. **Energy and Buildings**, 2004, vol. 36, no. 4, p. 329-334.
- PIELKE SR, R.A., **Mesoscale Meteorological Modeling**, International Geophysics Series. 2ª Edição, Estados Unidos da América, Academic Press, 2002, v. 78,676 pp.
- RATTI, C.; RICHENS, P., Raster Analysis of Urban Form, **Environment and Planning B: Planning and Design**, 2004, vol. 31, p. 297-309.
- RAYDAN, D.; STEEMERS, K., **Environmental Urban Design**. In: SANTAMOURIS, M. Environmental Design of Urban Buildings. London: Earthscan Publications, 2006, p. 1-35.
- REISIN, T.; LEVIN, Z.; TZIVION, S., Rain production in convective clouds as simulated in an axisymmetric model with detailed microphysics. Part I: Description of model, **Journal of Atmospheric Science**, 1996, vol. 53, p. 497-519.
- RIBEIRO, C.; FÍDELIS, C.; CARVALHO, H., Fator de Visão do Céu e Ilhas de Calor: Geoprocessamento Aplicado ao conforto urbano. **Anais do III Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**, Fortaleza, CE, 2008.
- RIBEIRO, C.A.M., **Aplicação de técnicas de geoprocessamento para análises das relações entre o fator de visão do céu e as diferentes orientações da malha urbana**. 2009, 83 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, João Pessoa, PB.
- RIBEIRO, H.; CARDOSO, M.R.A., Air Pollution and Children's health in São Paulo (1986-1998), **Social Science & Medicine**, 2003, vol. 57, p. 2013-2022.

- ROBERTS, S.; OKE, T.; GRIMMOND, C.; VOOGT, J., Comparison of four methods to estimate urban heat storage, **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 2006, vol. 45, p. 1766-1781.
- ROTH, M., Review of atmospheric turbulence over cities. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, 2000, vol. 126, p. 941-990.
- ROULET, Y.; MARTILLI, A.; ROTACH, M.; CLAPPIER, A., Validation of an Urban Surface Exchange Parameterization for Mesoscale Models – 1D Case in a Street Canyon, **Journal of Applied Meteorology**, 2005, vol. 44, n. 9, p 1484-1498.
- RZEPA, M., The Map of Sky View Factor in the center of Lodz, **Anais do The seventh International Conference on Urban Climate**, 29 junho a 3 de julho, Yokohama, Japão, 2009.
- SANTAMOURIS, M., **Energy and Climate in the Urban Built Environment**. James & James Science Publishers Ltd., London, 2001, 402p.
- SANTOS, I. G.; LIMA, H. G.; ASSIS, E. S., A graphical method for the Sky View Factor calculation in the Urban Heat Island Studies. **Anais da 20th Passive and Low Energy Architecture**, Santiago-Chile, 2003.
- SAILOR, D., **Role of Surface Characteristics in urban meteorology and air quality**. 1993, PhD Thesis – University of California, Berkeley.
- SCHAYES, G.; THUNIS, P.; BORNSTEIN, R., Topographic Vorticity-Mode Mesoscale- β (TVM) Model – Part I: Formulation, **Journal of Applied Meteorology**, 1996, vol. 35, p. 1815-1824.
- SELLERS, P.J.; RANDALL, G.J.; COLLATZ, G.J.; BERRY, J.A.; FIELD, C.B.; DAZLICH, D.A.; ZHANG, C.; COLLELO, G.D.; BOUNOUA, L., A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part I: Model Formulation, **Journal of Climate**, 1996, vol. 9, p. 676-705.
- SHAKER, R.; DREZNER, T.D., A New Technique for Predicting the Sky-View Factor for Urban Heat Island Assessment, **The Geographical Bulletin**, 2010, vol. 51, p. 85-96.
- SHEETS, V.; MANZER, C., Affect, Cognition, and urban vegetation: Some effects of adding trees along city streets, **Environment and Behavior**, 1991, vol. 23, n. 3, p. 285-304.










- SHEPHERD, J.M.; PIERCE, H.; NEGRI, A. Rainfall Modification by Major urban Areas: Observations from Spaceborne Rain Radar on the TRMM Satellite, **Journal of Applied Meteorology**, 2002, vol. 41, p. 689-701.
- SHEPHERD, J. M., A Review of Current Investigations of Urban-Induced Rainfall and Recommendations for the Future, **Earth Interactions**, 2005, vol. 9, n. 12, p. 1-27.
- SHINZATO, P., **O impacto da vegetação nos microclimas urbanos**. 2009. 173 f. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. USP, São Paulo, SP.
- SILVA JUNIOR, R.S. **Sensibilidade na estimativa da concentração de poluentes fotoquímicos com a aplicação de diferentes parametrizações da Camada Limite Planetária utilizando o modelo de Qualidade do Ar WRF/Chem**. 2009. 171 f. Tese de doutorado. Departamento de Ciências Atmosféricas. IAG/USP, São Paulo, SP.
- SIVAPALAN, M.; BEVEN, K.; WOOD, E. F., On hydrologic similarity: 2.A scaled model of storm runoff production. **Water Resources Research**, 1987, vol. 23, n. 12, p. 2266-2278.
- SMAGORINSKY, J., General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment. **Monthly Weather Review**, 1963, vol. 91, p. 99-164.
- SOUZA, L.C.L., Relações entre ilhas de calor, geometria urbana e consumo de energia elétrica. **Anais do FORUM PATRIMONIO: Amb. Constr. E patr.**, Belo Horizonte, 2010, vol. 4, n. 1, p. 1-16.
- SOUZA, L.C.L.; TENTE, C.M.; GIUNTA, M.B.; NAKATA, C.M., Fator de Visão do Céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre, **Ambiente Construído**, 2010, vol. 10, n. 4, p. 155-167.
- SPARROW, E. M.; CESS, R.D., **Radiation Heat Transfer**, Thermal Science Series, Brooks/Cole, 1970, 366pp.
- STM – Secretaria dos Transportes Metropolitanos, 2014: *Frota São Paulo*. Disponível em: <<http://www.stm.sp.gov.br/>>
- SUPING, Z.; GUANGLIN, M.; YANWEN, W.; JI, L., Study of the relationship between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distant runners. **International Journal of Biometeorology**, 1992, v. 36, p. 63-68.
- SVMA., *Atlas ambiental de São Paulo, Secretaria do Verde e do Meio Ambiente*, Prefeitura da cidade de São Paulo, São Paulo, 2004.


- TAHA, H., Modeling Impacts of Increased Urban Vegetation on ozone air quality in the south coast air basin, **Atmospheric Environment**, 1996, vol. 30, n. 20, p. 3423-3430.
- TAHA, H., Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the south coast air basin, **Atmospheric Environment**, 1997, vol. 31, p. 1667-1676.
- THUNIS, P.; CLAPPIER, A., Formulation and evaluation of a nonhydrostatic mesoscale vorticity model (TVM), **Monthly Weather Review**, 2000, vol. 128, p. 3236- 3251.
- TOON, O.B.; TURCO, R.P.; WESTPHAL, D.; MALONE R.; LIU, M., A multidimensional model for aerosols: description of computational analogs, **Journal of Atmospheric Science**, 1988, vol. 45, n. 2, p. 2123–2144.
- TREMBACK, C.J., **Numerical Simulation of a mesoscale convective complex: Model development and numerical results**. 1990, 247 f., PhD Thesis. Colorado State University, Colorado.
- TRIPOLI, G.J.; COTTON, W.R., The Colorado State University Three-Dimensional Cloud/Mesoscale Model. Part I: General Theoretical Framework and sensitivity Experiments, **Journal de Recherches Atmosphériques**, 1982, vol. 16, n. 3, p. 185-219.
- TURSILOWATI, L.; SUMANTYO, J.T.S.; KUZE, H.; ADININGSIH, E.S., The integrated WRF/Urban Modeling System and its application to monitoring urban heat island in Jakarta, Indonesia, **Journal of Urban and Environmental Engineering**, 2012, vol. 6, n. 1, p. 01-09.
- TZIVION, S.; FEINGOLD, G.; LEVIN, Z., An efficient numerical solution to the stochastic collection equation. **Journal of Atmospheric Science**, 1987, vol. 44, p. 3139-3149.
- UNGER, J., Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database, **International Journal of Environment and Pollution**, 2009, vol. 36, n. 1/2/3, p. 59-80.
- UN Report, 1969: *Growth of the World's Urban and Rural Population, 1920-2000*. Disponível em: <[http://esa.un.org/unup/Archive/wup-archives/studies/United%20Nations%20\(1969\)%20-%20Growth%20of%20the%20World's%20Urban%20and%20Rural%20Population,%201920-2000.pdf](http://esa.un.org/unup/Archive/wup-archives/studies/United%20Nations%20(1969)%20-%20Growth%20of%20the%20World's%20Urban%20and%20Rural%20Population,%201920-2000.pdf)>
- UN Report, 1993: *Reports on Population Growth and Policies in Mega-Cities – São Paulo*. Disponível em: <http://esa.un.org/unup/Archive/wup-archives/1993_SanPaulo.PDF>










- UN Report, 2012a: *World Urbanization Prospects, the 2011 Revision – Final Report with Annex Tables*. Disponível em: <http://esa.un.org/unup/pdf/FINAL-FINAL_REPORT%20WUP2011_Annextables_01Aug2012_Final.pdf>
- UN Report, 2012b: *World Urbanization Prospects, the 2011 Revision – Press Release*. Disponível em: <http://esa.un.org/unup/pdf/WUP2011_Press-Release.pdf>
- URBINA GUERRERO, V.V., **Características das circulações locais em regiões metropolitanas do Chile Central**, São Paulo, 113 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- WALKO, R.L.; TREMBACK, C.J.; PIELKE, R.A.; COTTON, W.R., An interactive nesting algorithm for stretched grids and variable nesting ratios. **Journal of Applied Meteorology**, 1995, v. 34, p.994-999.
- 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. **Journal of Applied Meteorology**, 2000, vol. 39, n. 6, p. 931-944.
- WALKO, R.L.; TRAMBACK, C.J., *Modifications for the Transition from LEAF-2 to LEAF-3*, 2005. Disponível em: <<http://www.atmet.com/html/docs/rams/RT1-leaf2-3.pdf>>
- WESTPHAL, D. L.; TOON, O. B.; CARLSON, T. N., A case study of mobilization and transport of Saharan Dust. **Journal of Atmospheric Sciences**, 1988, vol. 45, p. 2145-2175.
- WESTPHAL, D.L.; TOON, O.B., Simulations of microphysical, radiative, and dynamical processes in a continental-scale forest fire smoke plume. **Journal of Geophysical Research**, vol. 1991, vol. 96, p. 22379-22400.
- WILKS, D.S., **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. International Geophysics Series, 2nd Edition, Academic Press, 2006, v. 91, 627 pp.
- ZAKSEK, K.; OSTIR, K.; KOKALJ, Z., Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique, **Remote Sensing**, 2011, vol. 3, p. 398-415.








ANEXO A

Tabela A. 1 – ID, rua, localização, foto e valores de FVC obtidos empiricamente, apresentados na Figura 5.6.

ID	Rua	Lat	Lon	FVC	Foto
1	Avenida Paulista	-23.55600	-46.66200	0.6161	
2	Avenida Paulista	-23.55800	-46.66000	0.4286	
3	Rua Consolação	-23.55400	-26.66100	0.6687	
4	Avenida Nossa Senhora Assunção	-23.57100	-46.74400	0.7309	
5	Rua Daniel José Antonio	-23.57600	-46.74500	0.6939	
6	Avenida Nossa Senhora Assunção	-23.57300	-46.74300	0.9204	
7	Avenida Faria Lima	-23.57684	-46.68700	0.5732	
8	Rua Cipriano Barata	-23.57934	-46.60600	0.5613	
9	Rua Groelândia	-23.56886	-46.67700	0.9098	

ID	Rua	Lat	Lon	FVC	Foto
10	Rua Major Maragliano	-23.58684	-46.63800	0.8071	
11	Avenida Imperatriz Leopoldina	-23.52755	-46.73400	0.7355	
12	Rua Alfonso Sardinha	-23.52242	-46.70500	0.7980	
13	Rua Brigadeiro Gavião Peixoto	-23.52188	-46.71800	0.9126	
14	Rua Coronel Botelho	-23.52153	-46.72700	0.8612	
15	Rua Faustolo	-23.52385	-46.69900	0.6889	
16	Rua Almeida Garret	-23.55828	-46.70100	0.1816	
17	Rua Desembargador Guimarães	-23.53036	-46.67400	0.6618	
18	Rua do Tamanás	-23.55834	-46.69600	0.8327	
19	Rua Fortunato	-23.53997	-46.65200	0.5482	

ID	Rua	Lat	Lon	FVC	Foto
20	Rua Homem de Mello	-23.53436	-46.67200	0.5391	
21	Avenida Roque Petroni Júnior	-23.62277	-46.69700	0.8052	
22	Rua Comendador Francisco Pettinati	-23.60439	-46.73900	0.8270	
23	Rua Professor Eduardo Monteiro	-23.59338	-46.71200	0.7886	
24	Rua Professor Eduardo Monteiro	-23.59775	-46.71000	0.5771	
25	Rua Salim Izar	-23.59093	-46.72000	0.7036	
26	Avenida do Café	-23.63169	-46.63680	0.6201	
27	Rua Canário	-23.60241	-46.66860	0.6539	
28	Rua João Álvares Soares	-23.62042	-46.67080	0.8218	
29	Rua Maicuru	-23.61051	-46.66520	0.8077	

ID	Rua	Lat	Lon	FVC	Foto
30	Rua República do Iraque	-23.62553	-46.67230	0.5846	
31	Rua Direita	-23.59620	-46.84560	0.7707	
32	Rua José Felix de Oliveira	-23.58664	-46.83920	0.8394	
33	Rua Nova Amazonas	-23.58794	-46.83330	0.8508	
34	Rua do Oratório	-23.55926	-46.59460	0.7994	
35	Rua Capitão Ferraiuolo	-23.56454	-46.56470	0.7506	
36	Rua Clotilde de Virgínia Sanches	-23.55228	-46.56000	0.6179	
37	Rua Bimbarra	-23.56163	-46.55510	0.8176	