

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

**KARIN RAFAELLE KOOP CAVALCANTI**

**EFEITO DOS EUCALIPTOS NAS CIRCULAÇÕES LOCAIS**  
**E NA QUALIDADE DO AR NO VALE DO PARAÍBA**  
**DURANTE UM PERÍODO DE INVERNO**

**São Paulo**

**2010**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.



**KARIN RAFAELLE KOOP CAVALCANTI**

**EFEITO DOS EUCALIPTOS NAS CIRCULAÇÕES LOCAIS  
E NA QUALIDADE DO AR NO VALE DO PARAÍBA  
DURANTE UM PERÍODO DE INVERNO**

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

Área de concentração: Ciências Atmosféricas

Orientador: Prof. Dr. Pedro Leite da Silva Dias

**São Paulo**

**2010**



*Ao Junior, meu marido, com amor, admiração e gratidão,  
por sua compreensão, carinho, presença e incansável apoio  
ao longo do período de elaboração deste trabalho.*



## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor e orientador Pedro Leite da Silva Dias, pela oportunidade, pelas discussões e sugestões e pelo aprendizado durante todo o trabalho.

Ao professor Edmilson Dias de Freitas, pela disponibilidade para discussões e sugestões nos momentos de dúvidas, e pela amizade durante os anos de convivência.

À professora Maria de Fátima Andrade, pela atenção durante o processo de definição do estudo e pelas valiosas sugestões apresentadas no exame de qualificação.

Ao professor Humberto Ribeiro da Rocha,  
pela cessão dos parâmetros relativos à cultura de eucaliptos.

Aos meus pais e familiares, pelo apoio e  
pela compreensão da minha ausência em vários momentos.

A todos os amigos, que estiveram presentes nas horas difíceis e que de alguma forma colaboraram profissional ou pessoalmente para a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas,  
pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo,  
pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para  
a realização desta pesquisa (Processo nº. 06/59216-9).



*“Ouça conselhos e aceite instruções, e acabará sendo sábio.”*

*Provérbios 19:20*



## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo central explorar o impacto da mudança do uso do solo na região do Vale do Paraíba (VP) no Estado de São Paulo, sob o ponto de vista das circulações locais e da concentração de alguns poluentes durante um período de inverno. O cenário explorado é baseado na hipótese de uma ampla expansão da área coberta por eucaliptos. Plantações de eucaliptos alteram substancialmente o balanço energético na superfície ao mudar o albedo, interferindo também no ciclo hidrológico, pois parte da energia recebida na forma de onda curta é convertida em evapotranspiração. A influência da mudança da cobertura vegetal nas circulações locais foi explorada com o modelo de mesoescala *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS). O efeito na formação do ozônio ( $O_3$ ) também foi explorado, tendo em vista que eucaliptos emitem compostos orgânicos voláteis (COVs), precursores do ozônio troposférico, que reagem com óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ) na presença de luz solar. Estes últimos atingem concentrações significativas na região do Vale do Paraíba devido à frota de veículos que circula pela Rodovia Presidente Dutra (BR-116) e região urbanizada vizinha, somada à frota própria dos municípios e às indústrias situadas ao longo do VP. Utilizou-se o método de separação de fatores proposto por Stein e Alpert (1993) para a análise dos efeitos isolados e combinados da presença e ausência dos reflorestamentos de eucaliptos e da Rodovia Presidente Dutra sobre os fluxos de superfície, circulações locais e concentração de poluentes. O efeito isolado dos eucaliptos no período de inverno considerado gerou predominantemente reduções no fluxo de calor sensível sobre o VP, enquanto que o efeito isolado da rodovia gerou alterações variadas neste mesmo fluxo, o que também foi observado como resultado da atuação dos efeitos combinados sobre este fluxo. Sobre o fluxo de calor latente, os efeitos isolados dos dois fatores geraram incrementos deste sobre o VP, enquanto que seus efeitos combinados reduziram este fluxo. Considerando os valores absolutos destes fluxos observou-se que o efeito do calor latente se sobrepôs ao do calor sensível, o que resultou em menores temperaturas e uma área de maior densidade do ar em relação aos arredores, retardando o escoamento do ar do oceano em direção ao interior do continente. Este padrão causou aceleração da ordem de  $0,0016 \text{ m s}^{-2}$  quando estavam presentes os eucaliptos contra uma aceleração da ordem de  $0,0022 \text{ m s}^{-2}$  quando estes estavam ausentes. Para o período de inverno avaliado e considerando as estimativas feitas, o efeito isolado da Dutra sobre a concentração de  $O_3$  no VP indicou reduções durante a noite e manhã e incrementos durante a tarde. O efeito isolado dos eucaliptos gerou incrementos nas concentrações de  $O_3$  no vale a partir das 12Z, que devido ao escoamento de sudeste associado à brisa marítima foram deslocados para noroeste e oeste do VP, encontrando-se a noite com as alterações

positivas observadas durante a tarde sobre a Região Metropolitana de São Paulo, também deslocadas para norte e noroeste pelo mesmo escoamento. Os efeitos combinados dos fatores incrementaram as concentrações deste poluente no vale durante a noite e manhã e reduziram-nas durante a tarde.

Palavras-chave: eucaliptos, fluxos de superfície, poluição atmosférica, BRAMS.

**ABSTRACT**

This work aims to explore the impact of land use change in the Paraíba Valley in São Paulo state in Brazil, from the point of view of the effects on the local circulations and the concentration of some pollutants in view of the expansion of the eucalyptus plantations during a winter period. The scenario used is based on the assumption of a broad expansion of the area covered by eucalyptus trees. Plantations of eucalyptus substantially alter the energy balance at the surface by changing the albedo, interfering also in the hydrological cycle, because the available shortwave energy is converted to evapotranspiration. The influence of change in vegetation cover in the local circulations was explored with the mesoscale meteorological model Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS). The effect in the formation of ozone was also explored, since eucalyptus emit volatile organic compounds (VOCs), precursors of tropospheric ozone, and react with nitrogen oxides in the presence of sunlight. Significant concentrations of these gases are expected in the Paraíba Valley due to the vehicles fleet circulating the President Dutra Highway (BR-116) and urbanized neighborhood, beyond the local fleet and industries along the valley. The factor separation method proposed by Stein and Alpert (1993) was used for the analysis of pure and combined effects of the presence and absence of planted forests of eucalyptus and the President Dutra Highway on the surface fluxes, local circulations and pollutants concentrations. The isolated effect of the eucalyptus during the winter period generated predominantly reductions in sensible heat flux over the valley, while the isolated effect of the highway caused increases and reductions of this flow, which was also observed as a result of the combined effects of this flow. At the latent heat flux, the pure effects of both factors led to increases over the valley, while their combined effects have reduced this flow. Considering the absolute values of these fluxes, it was observed that the increase of the latent heat surmounted the sensible heat, resulting in lower temperatures and in an area of higher air density in relation to its surroundings, slowing the intensity of the sea breeze. This pattern caused acceleration of the order of  $0.0016 \text{ m s}^{-2}$  when the eucalyptus were present against an acceleration of the order of  $0,0022 \text{ m s}^{-2}$  when they were absent. Considering the winter period of study and all estimates done, the isolated effect of Dutra on the ozone concentrations indicated reductions during the night and morning and increments during the afternoon. Due to the isolated effect of the eucalyptus increases in the concentrations of  $\text{O}_3$  were observed in the valley from 12Z, which due to the southeast flow associated with the sea breeze were displaced in the northwestern and western VP, reaching at night the increases observed in the afternoon on the São Paulo Metropolitan Area, which also were displaced to north and northwest by the same flow. The combined effects were responsible

for increases in the concentrations of this pollutant in the valley during the night and morning and decreases during the afternoon.

Keywords: eucalyptus, surface flows, air pollution, BRAMS.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1. Representações das circulações de brisas (a) marítima e (b) terrestre. ....	4
Figura 1.2. Representação das circulações de brisas (a) de vale e (b) de montanha. ....	5
Figura 1.3. Representação da circulação de brisa de vale (a) considerando apenas a circulação ao longo do eixo do vale, (b) considerando a circulação perpendicular ao eixo do vale e (c) considerando a junção das duas circulações anteriores.....	6
Figura 1.4. Ciclo hidrológico dos plantios de eucaliptos.....	11
Figura 1.5. Áreas reflorestadas com gêneros de <i>Eucalyptus</i> e <i>Pinus</i> na Região Administrativa do Vale do Paraíba nos períodos de 1978, 1991-1992 e 1999-2000. 15	15
Figura 1.6. Áreas reflorestadas na Região Administrativa do Vale do Paraíba (dados de 1999-2000). ....	15
Figura 1.7. Isopletas de ozônio.....	18
Figura 2.1. Área atualmente reflorestada por eucaliptos no Vale do Paraíba. ....	21
Figura 2.2. Áreas urbanas na região do Vale do Paraíba e imediações. ....	21
Figura 2.3. Hipótese de expansão de área reflorestada por eucaliptos no Vale do Paraíba. 21	21
Figura 2.4. Comparação entre médias gerais das emissões foliares de COVs de <i>Eucalyptus</i> sp. em diferentes estações ( $\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$ de folha seca). ....	26
Figura 2.5. Variação diária na emissão de isopreno para <i>Eucalyptus</i> sp. em diferentes estações ( $\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$ de folha seca). ....	27
Figura 2.6. Variações de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade (%) e PAR ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e emissão de COVs ( $\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$ de folha seca) por árvores de eucalipto (a) jovens e (b) adultas. ....	28
Figura 2.7. Traçado da Rodovia Presidente Dutra (BR-116).....	33
Figura 3.1. Topografia da região (m). ....	43
Figura 3.2. Perfil inicial do grau de saturação de água no solo (%). ....	44
Figura 3.3. Representação esquemática do funcionamento do modelo BRAMS. ....	49

---

Figura 3.4. Cenários criados para avaliação dos impactos decorrentes da alteração da cobertura do solo: (a) sem_dut_sem_euc, (b) com_dut_sem_euc, (c) sem_dut_com_euc e (d) com_dut_com_euc. As cores vermelha, verde, amarela e roxa correspondem a áreas urbanas, eucaliptos, pastagem e rodovia, respectivamente.....	54
Figura 3.5. Imagens de satélite Goes-12 IR de (a) 30/07/2005 e (b) 30/07/2006, às 14:45Z. ....	58
Figura 3.6. Localização da estação de monitoramento em plantação de eucaliptos, em relação ao Município de São José dos Campos.....	60
Figura 3.7. Perfis de umidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ ) durante o período de 28/07 a 08/08/2006, (a) e (b) na área urbana de São José dos Campos, (c) e (d) sobre a Rodovia Presidente Dutra, e (e) e (f) sobre a área reflorestada por eucaliptos, considerando respectivamente as profundidades de 0 a 5 m e de 0 a 0,75 m nos pontos avaliados. ....	61
Figura 3.8. Fluxo médio horário de calor sensível ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 para os horários (a) 00Z, (b) 06Z, (c) 12Z, (d) 15Z e (e) 18Z.....	64
Figura 3.9. Fluxo médio horário de calor latente ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 para os horários (a) 00Z, (b) 06Z, (c) 12Z, (d) 15Z e (e) 18Z.....	65
Figura 3.10. Fluxo médio horário de razão de Bowen para o período de 30/07 a 08/08/2006 para os horários (a) 00Z, (b) 06Z, (c) 12Z, (d) 15Z e (e) 18Z.....	66
Figura 3.11. Razão de Bowen média entre 30/07 e 08/08/2006. ....	67
Figura 3.12. Localização dos pontos avaliados inseridos em diferentes usos do solo. ....	68
Figura 3.13. Médias horárias do calor sensível ( $H$ ), calor latente ( $LE$ ), balanço de onda curta ( $BOC$ ) e balanço de onda longa ( $BOL$ ) ( $W m^{-2}$ ) durante o período de 30/07 a 08/08/2006 para um ponto (a) na área urbana de São José dos Campos, (b) na área urbana de São Paulo, (c) na Rodovia Presidente Dutra, (d) no interior do Estado, onde há pastagem/agricultura e (e) sobre a área reflorestada por eucaliptos. ....	69

---

Figura 3.14. Dados de calor sensível ( $W m^{-2}$ ) observados em plantação de eucaliptos e simulados para o período de 30/07 a 08/08/2006. ....	70
Figura 3.15. Dados de calor latente ( $W m^{-2}$ ) observados em plantação de eucaliptos e simulados para o período de 30/07 a 08/08/2006. ....	70
Figura 3.16. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu g m^{-3}$ ) de $O_3$ na estação de São José dos Campos.....	73
Figura 3.17. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu g m^{-3}$ ) de (a) $O_3$ , (b) $NO_2$ e (c) $NO$ na estação de Pinheiros.....	75
Figura 3.18. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu g m^{-3}$ ) de (a) $O_3$ , (b) $NO_2$ e (c) $NO$ na estação de Mauá. ....	76
Figura 3.19. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu g m^{-3}$ ) de (a) $NO_2$ e (b) $NO$ na estação de Taboão da Serra.....	77
Figura 3.20. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu g m^{-3}$ ) de $O_3$ na estação de São Caetano do Sul. ....	78
Figura 4.1. Topografia da área de estudo (m). ....	82
Figura 4.2. Temperatura potencial ( $^{\circ}C$ ), vento ( $m s^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $g kg^{-1}$ ) às 12Z de 15/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta. ....	85
Figura 4.3. Temperatura potencial ( $^{\circ}C$ ), vento ( $m s^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $g kg^{-1}$ ) às 15Z de 15/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta. ....	86
Figura 4.4. Temperatura potencial ( $^{\circ}C$ ), vento ( $m s^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $g kg^{-1}$ ) às 21Z de 15/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta. ....	87
Figura 4.5. Temperatura potencial ( $^{\circ}C$ ), vento ( $m s^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $g kg^{-1}$ ) às 00Z de 16/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta. ....	88

---

Figura 4.6. Componente Zonal do Vento ( $m s^{-1}$ ) entre as 06Z do dia 15 e 06Z do dia 16/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.....	89
Figura 4.7. Componente Meridional do Vento ( $m s^{-1}$ ), entre as 06Z do dia 15 e 06Z do dia 16/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.....	90
Figura 4.8. Temperatura potencial ( $^{\circ}C$ ), vento ( $m s^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $g kg^{-1}$ ) às 12Z de 15/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta. ....	91
Figura 4.9. Temperatura potencial ( $^{\circ}C$ ), vento ( $m s^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $g kg^{-1}$ ) às 21Z de 15/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta. ....	92
Figura 4.10. Temperatura potencial ( $^{\circ}C$ ), vento ( $m s^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $g kg^{-1}$ ) às 00Z de 16/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta. ....	93
Figura 4.11. Componente Zonal do Vento ( $m s^{-1}$ ), entre as 06Z do dia 15 e 06Z do dia 16/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.....	94
Figura 4.12. Componente Meridional do Vento ( $m s^{-1}$ ), entre as 06Z do dia 15 e 06Z do dia 16/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.....	95
Figura 4.13. Topografia (m), (a) da área total e (b) de um corte longitudinal em $45,3^{\circ}W$ . ....	96
Figura 4.14. Vento ( $m s^{-1}$ ) em 1500 m para simulação com grau de saturação inicial do solo de (a) 0,40 e (b) 0,80 em 01/01/2004, às 18Z. ....	98
Figura 4.15. Vento ( $m s^{-1}$ ) em 1500 m para simulação com grau de saturação inicial do solo de (a) 0,40 e (b) 0,80 em 03/01/2004, às 18Z. ....	98
Figura 4.16. Temperatura ( $^{\circ}C$ ) próxima à superfície nas duas situações de grau de saturação inicial do solo. ....	99

- Figura 4.17. Vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) em 1500 m para simulação com grau de saturação inicial do solo de (a) 0,40 e (b) 0,80 em 05/01/2004, às 18Z. .... 100
- Figura 4.18. Componente meridional do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 10 m de altura em relação à superfície, para simulação com grau de saturação inicial do solo de (a) 0,40 e (b) 0,80, entre 01 e 06/01/2004. .... 100
- Figura 4.19. Topografia (m), (a) na grade 1 e (b) na grade 2 para os experimentos com inicialização heterogênea. .... 103
- Figura 4.20. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre o fluxo médio horário de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .... 106
- Figura 4.21. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o fluxo médio horário de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .... 107
- Figura 4.22. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e do reflorestamento de eucaliptos sobre o fluxo médio horário de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .... 108
- Figura 4.23. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre o fluxo médio horário de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .... 110
- Figura 4.24. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o fluxo médio horário de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .... 111

- Figura 4.25. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o fluxo médio horário de calor latente ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). .....112
- Figura 4.26. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre o balanço global de energia ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). .....114
- Figura 4.27. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o balanço global de energia ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). .....115
- Figura 4.28. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o balanço global de energia ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). .....116
- Figura 4.29. Efeito da presença (I) da Rodovia Presidente Dutra, (II) dos reflorestamentos de eucaliptos e (III) o efeito combinado destes parâmetros sobre o balanço médio horário de ondas curtas ( $W m^{-2}$ ) para o período às (a) 15Z e (b) 18Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). .....117
- Figura 4.30. Efeito da presença (I) da Rodovia Presidente Dutra, (II) dos reflorestamentos de eucaliptos e (III) o efeito combinado destes parâmetros sobre o balanço médio horário de ondas longas ( $W m^{-2}$ ) para o período às (a) 15Z e (b) 18Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). .....118
- Figura 4.31. Localização dos pontos avaliados inseridos em diferentes usos do solo. ....119

- Figura 4.32. Efeitos sobre os fluxos médios horários de  $H$  e  $LE$  e sobre os  $BOC$  e  $BOL$  médios horários ( $W m^{-2}$ ) em (a) São José dos Campos, (b) São Paulo, (c) Rodovia Presidente Dutra, (d) área de pasto e (e) área de reflorestamento de eucaliptos, considerando os cenários (I) sem\_dut\_sem\_euc, (II) com\_dut\_sem\_euc, (III) sem\_dut\_com\_euc e (IV) com\_dut\_com\_euc para o período de 30/07 a 08/08/2006. ....121
- Figura 4.33. Superfícies de pressão (hPa) e vetores de aceleração horizontal devido à força do gradiente de pressão ( $10^{-3} m s^{-2}$ ), considerando (linha I) a ausência e (linha II) a presença de eucaliptos às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z de 05/08/2006. ....127
- Figura 4.34. Diferenças de temperatura ( $^{\circ}C$ ) (linha I) e diferenças de razão de mistura de vapor ( $g kg^{-1}$ ) (linha II) entre os cenários com e sem eucaliptos às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z de 05/08/2006. ....129
- Figura 4.35. Diferenças de fluxo de calor sensível (a) e de calor latente (b) em  $W m^{-2}$  entre os cenários com e sem eucaliptos às 18Z de 05/08/2006. ....129
- Figura 4.36. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu g m^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). ....132
- Figura 4.37. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu g m^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). ....133
- Figura 4.38. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu g m^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ). ....134

- Figura 4.39. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....135
- Figura 4.40. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 16Z e (d) 19Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....136
- Figura 4.41. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....137
- Figura 4.42. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .....139
- Figura 4.43. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .....140
- Figura 4.44. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....141
- Figura 4.45. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....142

- Figura 4.46. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....143
- Figura 4.47. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....144
- Figura 4.48. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....146
- Figura 4.49. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....147
- Figura 4.50. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .....148
- Figura 4.51. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). .....149
- Figura 4.52. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....150

- Figura 4.53. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....151
- Figura 4.54. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....153
- Figura 4.55. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....154
- Figura 4.56. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....155
- Figura 4.57. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....156
- Figura 4.58. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....157
- Figura 4.59. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).....158

- Figura 4.60. Vento médio horário ( $\text{m s}^{-1}$ ) em superfície às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z e (e) 00Z do período de 28/07 a 06/08/2005. As cores representam a magnitude do vento.....160
- Figura 4.61. Razão  $\text{COVs/NO}_x$  (ppm/ppm) para São José dos Campos entre 28/07 e 06/08/2005.....161
- Figura 4.62. Concentrações ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) originais de  $\text{O}_3$  e resultantes de (a) aumento de 10% e (b) redução de 50% das concentrações iniciais de COVs e  $\text{NO}_x$  em São José dos Campos entre os dias 29 e 30/07/2005.....162
- Figura 4.63. Concentrações ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de ozônio (a) original, resultantes de aumento de 10% na concentração inicial de (b) COVs e (c)  $\text{NO}_x$  e resultantes de redução de 50% na concentração inicial de (d) COVs e (e)  $\text{NO}_x$ , às 15Z do dia 29/07/2005.....163
- Figura 4.64. Concentrações ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de ozônio (a) original, resultantes de aumento de 10% na concentração inicial de (b) COVs e (c)  $\text{NO}_x$  e resultantes de redução de 50% na concentração inicial de (d) COVs e (e)  $\text{NO}_x$ , às 15Z do dia 30/07/2005.....164



**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1.1 - Consumo de água por diferentes culturas ( $\text{mm ano}^{-1}$ ). .....	13
Tabela 1.2 - Eficiência no uso da água ( $\text{l kg}^{-1}$ ) por diversas culturas. ....	13
Tabela 1.3 - Espécies de eucaliptos e suas respectivas áreas na Região Administrativa do Vale do Paraíba (ha). .....	16
Tabela 1.4 - Detentores das áreas de reflorestamento na Região Administrativa do Vale do Paraíba. ....	16
Tabela 2.1 - Parâmetros para cobertura vegetal de pastagem e eucaliptos. ....	22
Tabela 2.2 - Emissão foliar de COVs por <i>Eucalyptus</i> sp. em diferentes estações ( $\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$ de folha seca). ....	25
Tabela 2.3 - Estimativa da emissão de COVs biogênicos para o Vale do Paraíba. ....	29
Tabela 2.4 - Frota de veículos na Região Administrativa do Vale do Paraíba, 2007. ....	30
Tabela 2.5 - Estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar no Município de São José dos Campos em 2007 <sup>(1)</sup> ( $1.000 \text{ t ano}^{-1}$ ). ....	30
Tabela 2.6 - Estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar na Região Administrativa do Vale do Paraíba ( $\text{kg dia}^{-1} \text{m}^{-2}$ ). ....	31
Tabela 2.7 - Veículos pedagiados por categoria na Rodovia Presidente Dutra - 2006. ....	32
Tabela 2.8 - Estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar na Rodovia Presidente Dutra ( $\text{kg dia}^{-1} \text{m}^{-2}$ ). ....	32
Tabela 2.9 - Estimativa de emissão da queima de combustíveis das fontes estacionárias de poluição do ar em São José dos Campos ( $\text{t ano}^{-1}$ ). ....	33
Tabela 2.10 - Estimativa de emissão da queima de combustíveis das fontes estacionárias de poluição do ar no Vale do Paraíba ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ). ....	34
Tabela 3.1. Principais parâmetros para as três classes de uso do solo consideradas no esquema TEB. ....	43
Tabela 3.2 - Configurações dos ensaios para avaliação dos efeitos sobre as circulações locais e a qualidade do ar regional. ....	53

---

Tabela 3.3 - Principais configurações empregadas nas simulações de validação. ....	59
Tabela 3.4 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados dos fluxos de superfície em plantação de eucalipto. ....	71
Tabela 3.5 - Concentrações inicialmente estimadas e posteriormente ajustadas de acordo com as observações da rede de monitoramento da CETESB para todas as fontes consideradas no Vale do Paraíba. ....	73
Tabela 3.6 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de O <sub>3</sub> em São José dos Campos. ....	74
Tabela 3.7 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> e NO em Pinheiros. ....	75
Tabela 3.8 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de O <sub>3</sub> , NO <sub>2</sub> e NO em Mauá. ....	77
Tabela 3.9 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de NO <sub>2</sub> e NO em Taboão da Serra. ....	78
Tabela 3.10 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de O <sub>3</sub> em São Caetano do Sul. ....	78
Tabela 4.1 - Principais configurações empregadas nas simulações homogêneas. ....	83
Tabela 4.2 - Valores de grau de saturação inicial do solo (%) utilizados nas simulações homogêneas. ....	83
Tabela 4.3 - Principais configurações empregadas nos experimentos com inicialização heterogênea. ....	102

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

BATS	<i>Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme</i>
BRAMS	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modeling System</i>
CARMA	<i>Community Aerosol &amp; Radiation Model for Atmospheres</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, ou, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CIT	<i>Caltech Institute of Technology</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DCA	Departamento de Ciências Atmosféricas
EROS	<i>Earth Resources Observation System</i>
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
PAR	<i>photosynthetically active radiation</i> (radiação fotossinteticamente ativa)
GEF	<i>Global Ecosystems Framework</i>
GLAI	<i>green leaf area index</i> (índice de área de folhas verdes)
<i>H</i>	fluxo de calor sensível
IAF	índice de área foliar
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISAN	<i>ISentropic ANalysis package</i>
<i>LE</i>	fluxo de calor latente

LEAF	<i>Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model</i>
MASTER	Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NDVI	<i>normalized difference vegetation index</i> (índice de vegetação normalizado)
RAMS	<i>Regional Atmospheric Modeling System</i>
RMSP	região metropolitana de São Paulo
SAPRC	<i>Statewide Air Pollution Research Center</i>
TAI	<i>total area index</i> (índice de área total)
TEB	<i>Town Energy Budget</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USP	Universidade de São Paulo
VP	Vale do Paraíba
$Z_0$	comprimento de rugosidade

**SUMÁRIO**

Resumo .....	i
Abstract.....	iii
Lista de Figuras .....	v
Lista de Tabelas.....	xvii
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xix
Sumário .....	xxi
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 As Circulações de Brisa .....	3
1.4 Os Fluxos de Superfície .....	6
1.5 A Cultura do Eucalipto.....	9
1.5.1 O Eucalipto no Vale do Paraíba.....	14
1.6 Qualidade do Ar .....	17
2 Caracterização da Área de Estudo.....	19
2.1 Caracterização Biofísica do Eucalipto .....	20
2.2 Emissões Biogênicas .....	23
2.3 Emissões Urbanas .....	29
2.3.1 Fontes de Emissões Veiculares dos Municípios do Vale do Paraíba .....	29
2.3.2 Fontes de Emissões Veiculares da Rodovia Presidente Dutra .....	31
2.3.3 Fontes de Emissões Industriais.....	33
3 Descrição da Modelagem.....	35
3.1 O Modelo Numérico.....	36
3.2 Parametrização de Radiação .....	38
3.3 O Modelo de Solo/Vegetação.....	39
3.4 Esquema para Representação do Efeito Urbano.....	41

---

3.5	A Topografia e a Umidade Inicial do Solo.....	43
3.6	O Modelo Fotoquímico Simplificado .....	44
3.7	Representação Esquemática do BRAMS .....	48
3.8	Método da Separação de Fatores .....	50
3.9	Descrição dos Cenários Utilizados .....	52
3.10	Parâmetros Estatísticos.....	54
3.11	Validação do Modelo .....	57
3.11.1	Configuração das Simulações para Validação.....	58
3.11.2	Comparação entre Simulações e Dados Observados: Avaliação dos Fluxos de Superfície.....	60
3.11.3	Comparação entre Simulações e Dados Observados: Avaliação das Concentrações de Poluentes.....	71
4	Simulações .....	81
4.1	Experimentos com Inicialização Homogênea .....	82
4.1.1	Configuração do Conjunto de Experimentos 1.....	82
4.1.2	Resultados do Conjunto de Experimentos 1 .....	84
4.1.3	Configuração do Conjunto de Experimentos 2.....	95
4.1.4	Resultados do Conjunto de Experimentos 2.....	97
4.2	Experimentos com Inicialização Heterogênea .....	101
4.2.1	Configuração dos Experimentos.....	101
4.2.2	Resultados dos Experimentos para Avaliação do Impacto nos Fluxos de Superfície.....	103
4.2.3	Resultados dos Experimentos para Avaliação do Impacto nas Circulações Locais.....	124
4.2.4	Resultados dos Experimentos para Avaliação do Impacto nas Concentrações de Poluentes.....	131
4.2.5	A Razão COVs/NO <sub>x</sub> .....	161
5	Conclusões .....	165

---

5.1	Conclusões dos Experimentos com Inicialização Homogênea .....	165
5.2	Conclusões dos Experimentos com Inicialização Heterogênea .....	166
5.3	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	170
	Referências.....	173



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

O Vale do Paraíba (VP) constitui uma região com diversas características interessantes, que sobrepostas podem gerar efeitos sobre o clima e a qualidade do ar, perceptíveis localmente e a maiores distâncias. Sob o ponto de vista de sua ocupação, o VP vem passando nas últimas décadas por transformações devido à crescente demanda da indústria do papel por sua principal matéria-prima: o eucalipto. Até o ano de 2001, 66.663 ha desta região já eram ocupados por esta cultura, representando 4,65% da área total do vale (KRONKA et al., 2002).

Por outro lado, esta é uma região bastante industrializada, contendo 2.913 indústrias, inclusive refinarias e indústrias de papel (MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, 2006). De acordo com a projeção da Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados, a população residente na Região Administrativa de São José dos Campos em 2007 era de 2.222.278 habitantes que possuíam, aproximadamente, 762.964 veículos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO, 2008). Essas características sinalizam para uma representativa emissão de poluentes atmosféricos.

Somadas a estas fontes locais, deve ser considerada a emissão proveniente dos veículos de passagem que circulam pela Rodovia Presidente Dutra (BR-116). Esta rodovia caracteriza um eixo de ligação entre as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. É considerada a mais importante rodovia do Brasil, não apenas por ligar as duas metrópoles nacionais, mas por ser a principal ligação entre as regiões nordeste e sul do Brasil. De acordo com dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (2007), durante o ano de 2006 houve um tráfego de 57.409.209 de veículos por esta rodovia.

Além das características de ocupação da região, deve ser considerada sua posição geográfica. Por ser um vale, possui grandes variações de altitudes em pequenas distâncias horizontais. Isto gera circulações locais, denominadas circulações de vale-montanha.

Somado a este fato está a proximidade do Vale do Paraíba à costa, responsável pela formação de outro tipo de circulação, a circulação de brisa terrestre e marítima.

Todos estes aspectos contribuem para a concepção de um cenário bastante complexo, em que a formação de poluentes atmosféricos é intrínseca e a sua dispersão pode ser dificultada devido às características geográficas. Com base neste contexto, o presente estudo foi motivado pela busca de informações úteis ao aprimoramento dos modelos de previsão de tempo e das concentrações de poluentes. Os resultados da proposta devem fornecer informações relevantes para o aprimoramento das previsões de qualidade do ar e de tempo em alta resolução espacial e temporal, já conduzidas na rotina de operação do Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais (MASTER) e no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A fim de esclarecer alguns itens básicos para a compreensão deste estudo são detalhados tópicos relativos ao contexto apresentado, após a apresentação dos objetivos deste trabalho.

## **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo principal deste estudo é avaliar os impactos nas circulações locais e na qualidade do ar no Vale do Paraíba devidos à alteração na cobertura vegetal desta região, amplamente substituída por plantações de eucaliptos nos últimos anos e com previsão para contínua expansão desta cultura. Os efeitos da alteração na cobertura do solo são avaliados em conjunto com as circulações locais, bastante complexas no VP em decorrência da atuação conjunta das circulações de vale-montanha e brisas marítimas. A existência da Rodovia Presidente Dutra e das cidades com intensas emissões de poluentes por indústrias e veículos, somadas à circulação de vale-montanha, freqüentemente tornam o ambiente desfavorável à dispersão de poluentes.

Desta forma, considerando a hipótese de que a cobertura vegetal por plantações de eucaliptos sofra significativo aumento de área no Vale do Paraíba, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar as prováveis alterações nos fluxos de superfície e nas circulações locais devido às alterações no balanço energético de superfície;
- Avaliar as prováveis alterações nas concentrações de poluentes decorrentes das alterações nas circulações locais;
- Avaliar as prováveis alterações nas concentrações de ozônio devido às emissões de COVs pelas plantações de eucaliptos e às emissões de NO<sub>x</sub> pela frota de veículos que transitam pela Rodovia Presidente Dutra e municípios locais.

### **1.3 AS CIRCULAÇÕES DE BRISA**

As brisas pertencem ao grupo de circulações locais, que são movimentos atmosféricos caracterizados pela sua curta escala de tempo e espaço, ou seja, têm duração máxima de um dia e ocorrem em algumas centenas de quilômetros. São basicamente geradas pela diferença de capacidade térmica entre a terra e a água. A capacidade térmica da água, isto é, a quantidade de calor necessária para elevar a sua temperatura, é maior do que a da terra. Desta forma, ao receber a mesma intensidade de radiação solar, a terra aquece mais rapidamente do que a água e, por conseguinte, aquece o ambiente ao seu redor e a atmosfera adjacente, diminuindo a densidade do ar quando comparada à densidade do ar sobre a água. Forma-se então um gradiente de pressão horizontal entre o ar sobre a terra e a água, com pressões mais baixas sobre a terra. Conseqüentemente, o ar mais frio e mais denso sobre a água desloca-se no sentido da terra, e por continuidade, surge um deslocamento de ar sobre a terra em direção à água, em níveis mais altos, com ar ascendente sobre a terra e ar descendente sobre a água. Se esta porção de água corresponder a lagos, denomina-se este tipo de circulação de brisa lacustre; sendo relativa ao oceano, esta circulação é conhecida por brisa marítima (FREITAS, 2003).

Encerrada a fonte de radiação solar, ou seja, durante a noite, cessa a brisa marítima ou lacustre e tem início o processo de formação da brisa terrestre, caracterizado pela direção inversa das brisas diurnas. Mais uma vez, devido à capacidade térmica maior da água, esta se resfria mais lentamente do que a terra. Desta forma, o ar adjacente a terra também é resfriado e sua densidade torna-se maior em relação ao ar próximo à água. Logo, surge um deslocamento de ar sobre a terra em direção à água, sendo compensado por um deslocamento de ar da água em direção a terra em níveis mais elevados, com ar ascendente sobre a superfície de água e descendente sobre a terra. Ilustrações destes tipos de circulações locais são apresentadas na Figura 1.1.

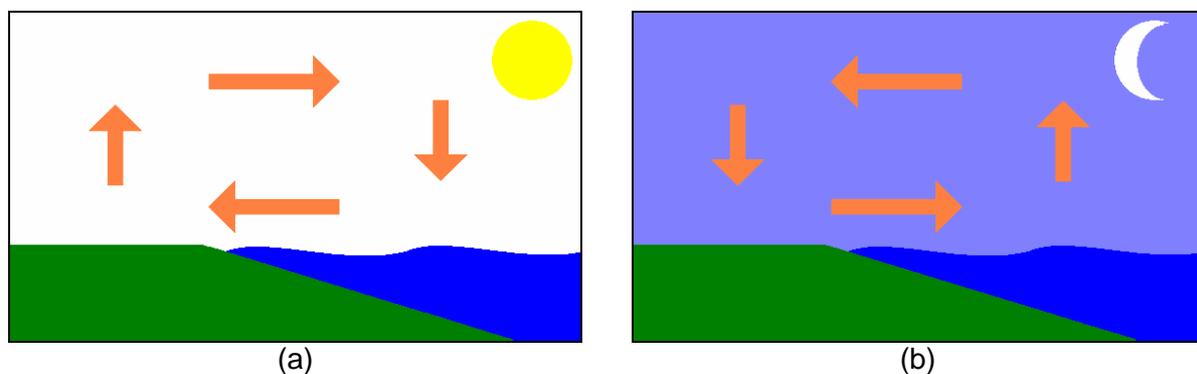


Figura 1.1. Representações das circulações de brisas (a) marítima e (b) terrestre.

Brisas marítimas são sistemas rasos, geralmente confinados nas primeiras camadas da troposfera ( $\ll 10$  km) (FREITAS, 2003). Tipicamente, a brisa tem seu início próximo à linha da costa, várias horas após o nascer do sol, expandindo-se gradualmente sobre a terra e sobre a água e atingindo sua máxima extensão no meio da tarde. Sobre o continente, pode ter alcances de poucas centenas de metros a centenas de quilômetros em casos extremos.

Além das circulações de brisas marítima e terrestre, outra forma de circulação que exerce bastante influência na área de estudo é a circulação de vale-montanha. Considerando que a terra possui uma capacidade térmica mais baixa do que a água, tem-se que as montanhas sofrem uma grande variação de temperatura, sendo que durante o dia

tornam-se uma fonte de calor, enquanto que à noite passam a ser um sumidouro de calor. Com o aquecimento da superfície da montanha durante o dia, o ar próximo torna-se mais quente do que uma parcela à mesma altura sobre o vale e distante da montanha, dando origem a um gradiente horizontal de pressão atmosférica, com pressões mais altas sobre o vale. Conseqüentemente, o ar quente próximo à montanha desloca-se ao longo desta em sentido ascendente, e por continuidade, surge um deslocamento de ar sobre o vale em direção ao fundo do mesmo, gerando a chamada brisa de vale.

Durante a noite, o ar próximo à montanha se torna mais frio e mais denso do que o ar distante da superfície da montanha, dando origem a um movimento descendente de ar próximo à montanha e ascendente sobre o vale, a chamada brisa de montanha. Uma representação destes dois tipos de circulação é apresentada na Figura 1.2.

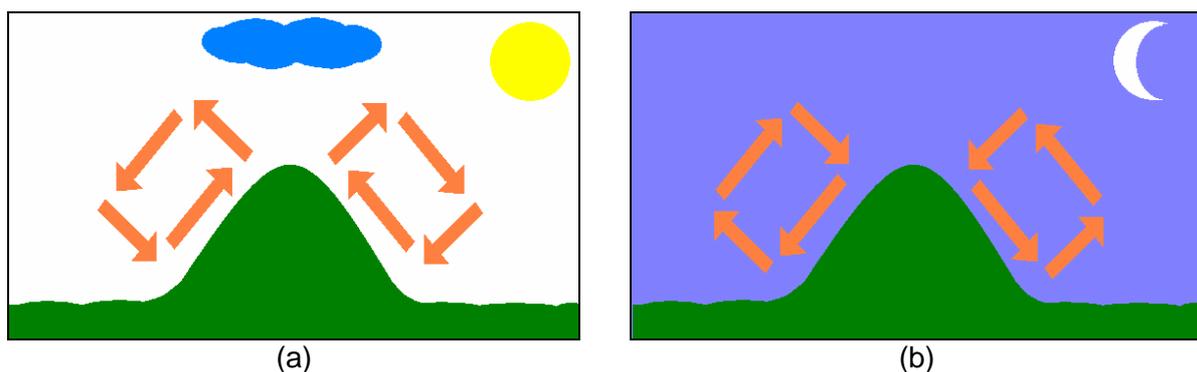


Figura 1.2. Representação das circulações de brisas (a) de vale e (b) de montanha.

As ilustrações acima representam de forma simplificada as circulações de vale e de montanha. Entretanto, sendo as montanhas mais estruturadas, com múltiplos vales laterais e topografia acidentada, as circulações tendem a ser muito mais complexas, cujos ventos resultantes apresentarão direções e sentidos variados. Além dos movimentos ascendentes e descendentes ao longo da montanha, ocorrem circulações perpendiculares ao eixo da montanha, como pode ser observado a seguir (Figura 1.3).

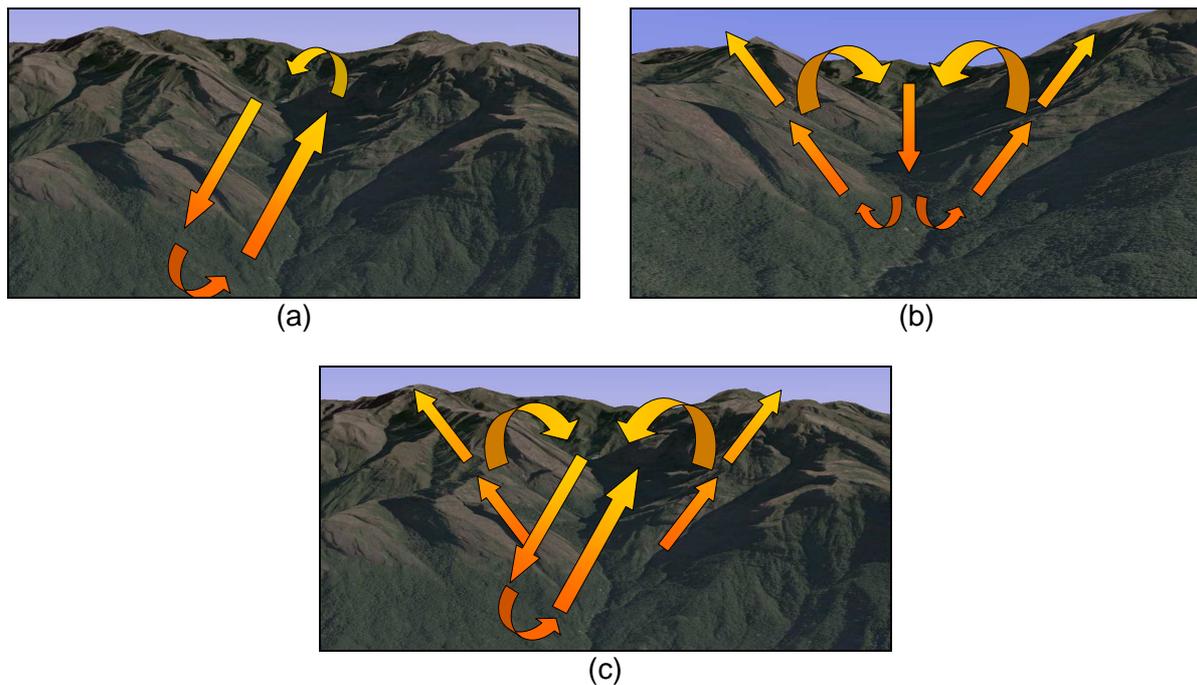


Figura 1.3. Representação da circulação de brisa de vale (a) considerando apenas a circulação ao longo do eixo do vale, (b) considerando a circulação perpendicular ao eixo do vale e (c) considerando a junção das duas circulações anteriores.

#### 1.4 OS FLUXOS DE SUPERFÍCIE

Devido à variabilidade de parâmetros como vegetação, relevo, textura do solo, umidade, nebulosidade e áreas urbanas, a superfície terrestre apresenta grande heterogeneidade, o que leva ao aquecimento diferencial das diversas superfícies, gerando circulações que podem ser bastante intensas (AVISSAR; LIU, 1996; AVISSAR; SCHMIDT, 1998; SILVA DIAS; REGNIER, 1996; WANG; BRAS; ELTAHIR, 1996, 1998). Estas circulações afetam a estrutura da camada limite planetária, os fluxos de calor e de umidade (LI; AVISSAR, 1994; LYNN; RIND; AVISSAR, 1995; DALU; PIELKE; BALDI, 1996; CHEN; AVISSAR, 1994a) e a formação de nuvens e precipitação (CHEN; AVISSAR, 1994b; WETZEL; ARGENTINI; BOONE, 1996; WANG; BRAS; ELTAHIR, 2000; SILVA DIAS et al., 2002). Quando um dos citados parâmetros sofre alterações, toda a dinâmica da atmosfera é afetada em maior ou menor escala. Substituindo-se a cobertura do solo da região do Vale do Paraíba, modificações devem ser observadas na circulação local, decorrentes de alterações nos fluxos de superfície. Segundo Zhang, Henderson-Sellers e McGuffie (1996),

as mudanças nos fluxos dentro de uma coluna atmosférica podem influenciar a circulação regional e, potencialmente, a circulação atmosférica de grande escala, pois estão relacionados à estrutura dinâmica nos baixos níveis da atmosfera, incluindo: a velocidade horizontal do vento, a estabilidade atmosférica e a eficiência da transferência aerodinâmica entre a superfície e a atmosfera logo acima.

Os fluxos de superfície definem as entradas e saídas de água e energia na baixa atmosfera e dependem, principalmente, da oferta de radiação solar, da umidade do solo, da evapotranspiração<sup>1</sup>, da cobertura vegetal e da nebulosidade, além das propriedades dinâmicas e termodinâmicas da camada limite planetária. O balanço de radiação pode ser definido como a partição do saldo de radiação (ondas curtas e longas) em, entre outros, o fluxo de calor sensível ( $H$ ), o fluxo de calor latente ( $LE$ ), o fluxo de calor para o solo e o calor armazenado pelas plantas, sendo o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente os fluxos de energia de interesse neste estudo. O saldo de radiação nada mais é do que a diferença entre a radiação incidente na superfície terrestre e a radiação emitida pela superfície (ondas curtas e longas).

O fluxo de calor sensível é o calor associado ao aquecimento ou resfriamento do ar atmosférico e varia com a diferença de temperatura entre a superfície e o ar acima dela. O fluxo de calor latente é o calor resultante da evaporação, evapotranspiração ou condensação na superfície, sendo responsável pelo umedecimento ou secagem entre a atmosfera e a superfície (vegetação e solo). O fluxo de calor no solo resulta da diferença de temperatura entre a superfície e o solo abaixo dela, sendo dependente da radiação solar global e da condutividade térmica do solo.

Durante o dia, o saldo de radiação é positivo e, portanto a superfície atua como fonte de energia, fornecendo calor sensível para as camadas mais próximas e aquecendo o ar, e fornecendo calor latente pelo processo da evapotranspiração, além de prover calor para o

---

<sup>1</sup> Evapotranspiração consiste na soma da evaporação do solo e das folhas com a transpiração das folhas. É uma medida da quantidade de água 'utilizada' e depois devolvida à atmosfera. A evapotranspiração depende do clima, do solo, da disponibilidade de água e da espécie plantada.

solo. Desse modo ocorre, de maneira geral, diminuição da temperatura e umidade com o aumento da altitude sobre uma superfície vegetada.

Durante a noite, o saldo de radiação torna-se negativo e a superfície passa a atuar como dreno de energia, resfriando o ar adjacente ao solo e alterando o comportamento dos perfis de temperatura e umidade em relação ao dia. Dessa maneira, pode-se dizer que o balanço de energia e, por conseguinte, os fluxos de energia, condicionam o microclima próximo a uma superfície.

Estudos têm relatado que a partição do saldo de radiação nos fluxos de calor sensível e latente depende das condições de suprimento hídrico da vegetação. Dessa maneira, superfícies bem supridas de água apresentam forte relação entre o saldo de radiação e o fluxo de calor latente. Por outro lado, em superfícies que apresentam deficiência hídrica, parte significativa do saldo de radiação pode ser convertida em calor sensível, favorecendo o aquecimento da superfície (VILLA NOVA, 1973).

Um dos principais métodos micrometeorológicos para determinação dos fluxos de calor sensível e latente em cultivos é o método da Razão de Bowen (BOWEN, 1926). Bowen foi o pioneiro nos estudos do balanço de energia sobre uma superfície natural, determinando a razão entre os fluxos de calor latente e sensível emitidos por uma superfície de água durante o processo de evaporação, em função dos gradientes da pressão do vapor e da temperatura observados sobre a superfície, denominada Razão de Bowen. Grande esforço de pesquisas tem sido concentrado na quantificação dos componentes do balanço de energia através da Razão de Bowen, já considerado padrão para mensurar os fluxos convectivos de calor latente e sensível (VILLA NOVA, 1973; ALFONSI et al., 1986; FONTANA; BERLATO; BERGAMASCHI, 1991; CUNHA; BERGAMASCHI, 1994; CUNHA et al., 1996; ALVES; AZEVEDO; SILVA, 1998; ÁVIAL NETO et al., 1999; CUNHA, 2001).

A Razão de Bowen ( $\beta = H/LE$ ), quando apresenta valores maiores que a unidade, indica que a maior parte da energia foi consumida nos processos de aquecimento ou resfriamento do ar (calor sensível). Quando esta razão é menor do que a unidade, conclui-se que grande parte da energia disponível foi utilizada nos processos de evapotranspiração

ou condensação do vapor d'água. Para os casos em que esta razão é igual à unidade, tem-se que quantidades idênticas de energia foram utilizadas nos processos de aquecimento/resfriamento do ar e evaporação/condensação do vapor d'água.

## 1.5 A CULTURA DO EUCALIPTO

Eucalipto é a designação vulgar das várias espécies vegetais do gênero *Eucalyptus*, pertencente à família das mirtáceas, que compreende outros 130 gêneros. Através de características fenológicas, como tipo de inflorescências, botão floral e frutos, já foram catalogadas mais de 700 espécies de eucaliptos.

Os eucaliptos são conhecidos como árvores de origem australiana. A maior parte das espécies e subespécies é endêmica do continente australiano e ilhas adjacentes. Algumas espécies ocorrem ainda em Papua Nova Guiné ao norte da Austrália, na parte oeste do arquipélago da Indonésia e nas Filipinas.

O plantio sistemático de eucalipto foi iniciado nas três primeiras décadas do século XIX e disseminou-se como a espécie florestal mais plantada do mundo, ao longo do século seguinte. No Brasil, sua cultura teve início nos primeiros anos do século XX, apesar de sua introdução inicial datar do século anterior, quando a planta era utilizada como quebra-ventos, para fins ornamentais e na extração de óleo vegetal. No fim da década de 1930, o eucalipto já era plantado em escala comercial, sendo utilizado como dormentes para construção (de casas e estradas de ferro) e combustível (para siderurgia e fornos domésticos). Atualmente, as espécies mais cultivadas no país são: *Eucalyptus saligna*, *E. grandis* e *E. urophylla*. Conforme dados da Sociedade Brasileira de Silvicultura (2001), no ano de 2000 foram plantados 2.965.880 ha de *Eucalyptus* em todo território brasileiro.

Embora o eucalipto seja uma essência florestal exótica, a zona ecológica de sua cultura torna-se muito extensa, conseqüência do grande número de espécies. Desta maneira, a sua cultura tornou-se perfeitamente exequível em todo o Brasil do ponto de vista econômico. Sob o aspecto fisiológico, a profundidade do solo é determinante para o êxito da

cultura florestal, sendo que solos profundos, com adequadas propriedades físicas e químicas, oferecem condições ideais para o desenvolvimento deste gênero. Entretanto, são também encontradas plantações com desenvolvimento igualmente satisfatório em solos fracos de arenitos, bastante ácidos (com índices de pH baixos).

A cultura do eucalipto recebe diversas críticas devido aos possíveis impactos causados à água, ao solo, à biodiversidade e ao ar. De acordo com Vital (2007), os impactos ambientais das florestas de eucalipto dependem, essencialmente, das condições prévias ao plantio, ou seja, dependem do bioma em que os eucaliptos estão sendo inseridos, da densidade pluviométrica, do tipo e declividade dos solos, da distância das bacias hidrográficas e das técnicas agrícolas empregadas.

Para a realização de suas atividades metabólicas, o eucalipto capta oxigênio ( $O_2$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) do ar para realizar, respectivamente, a respiração e a fotossíntese, sendo que a fotossíntese necessita ainda de água. Nos vegetais, a água apresenta três funções principais: participar na reação da fotossíntese, ser transpirada pelas aberturas dos estômatos<sup>2</sup> no processo de respiração e ser veículo para transporte (como seiva). Como os estômatos precisam ficar abertos para que a planta possa captar  $O_2$  e  $CO_2$  da atmosfera, ocorre perda de água através deles.

Em conjunto, as atividades metabólicas alimentam um ciclo completo da água, que em uma floresta é bastante complexo (Figura 1.4). Após precipitar-se sobre o solo, certa quantidade de água cai diretamente no solo, enquanto outra parte é interceptada pela copa da árvore. Dessa parte, uma fração evapora, retornando à atmosfera, enquanto outra fração atinge o solo após escorrer pelo tronco. Da parcela que chega ao solo, parte escorre pelo solo, enquanto outra parte é infiltrada, podendo permanecer a alguns metros da superfície ou alcançar o lençol freático. A água mais próxima da superfície do solo pode ser sugada

---

<sup>2</sup> Estômatos são organelas presentes na epiderme inferior das folhas, responsáveis pela troca de gases entre a planta e a atmosfera.

pelas raízes das árvores, sendo evaporada pelas folhas no processo de transpiração florestal após ser utilizada pela planta, retornando à atmosfera (POORE; FRIES, 1985).

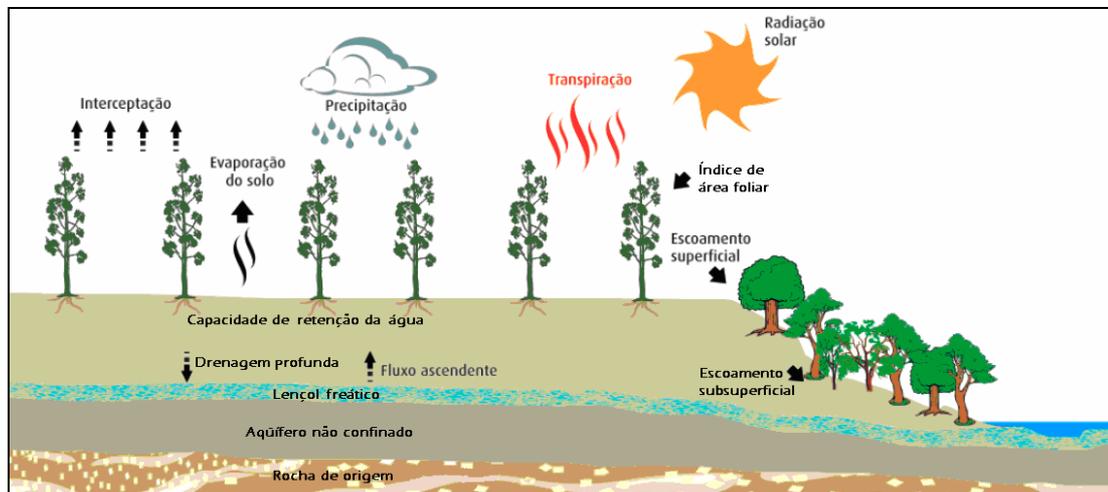


Figura 1.4. Ciclo hidrológico dos plantios de eucaliptos.  
Fonte: ARACRUZ, 2008.

Poore e Fries (1985) afirmam que quanto mais rápido é o crescimento de uma árvore, maior é o seu consumo de água. Estima-se que a faixa de evapotranspiração de uma plantação de eucalipto seja equivalente a precipitações pluviométricas em torno de 800 a 1.200 mm/ano (FOELKEL, 2005). Lima et al. (1990) apresentam resultados experimentais semelhantes a esse (perda de água do solo em plantações de *Eucalyptus globulus* ao redor de 750 mm/ano). Desta forma, deve haver intensificação do ciclo hidrológico local, particularmente através do aumento da evapotranspiração (ROCHA; SILVA DIAS, 1994). Devido à redução no albedo, em relação ao albedo de pastagem e outras culturas que antecederam as plantações de eucaliptos em muitas áreas atualmente reflorestadas, existe ainda maior absorção de energia, que em parte é convertida em evapotranspiração.

O consumo de água, entretanto, não implica necessariamente no ressecamento do solo da região onde se insere a cultura de eucaliptos ou, tampouco, impacta negativamente os lençóis freáticos, devendo ser considerada ainda a precipitação pluviométrica da região de cultivo. Davidson (1993) aponta que, somente em áreas de precipitação pluviométrica inferior a 400 mm/ano, o eucalipto pode acarretar ressecamento do solo, podendo nesse

caso, prejudicar também o crescimento de outras espécies. No Estado de São Paulo, a média histórica anual da precipitação varia entre 1.200 e 2.100 mm, conforme dados de normais climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (1961-1990).

Silva et al. (2004) avaliaram os índices de consumo e a eficiência do uso da água em mudas de *Eucalyptus citriodora* e *E. grandis*, cultivadas em solo com três teores distintos de água. O estudo mostrou que o eucalipto tem diversos mecanismos biológicos que acumulam água, tais como a presença de tecido foliar coriáceo, alinhamento vertical das folhas, fechamento rápido dos estômatos, baixas taxas de transpiração e elevada razão raiz/parte aérea.

Almeida e Soares (2003) realizaram um estudo comparativo do uso da água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil, especificamente em uma microbacia experimental da Aracruz Celulose S.A., no Município de Aracruz-ES. O estudo foi realizado para vários anos hidrológicos, considerando as plantações em diversos estágios de crescimento. Os autores concluíram que as plantações de eucalipto exercem controle estomático eficiente em condições de baixa disponibilidade de água no solo. As medidas de campo, bem como as estimativas realizadas a partir de modelos, revelaram que as plantações de eucalipto se comparam à Mata Atlântica quanto à evapotranspiração e ao uso de água no solo. Considerando o ciclo de crescimento como um todo (cerca de sete anos), o eucalipto pode consumir menos água que a mata nativa na região estudada. Em anos de precipitação em torno dos valores médios das normais climatológicas ocorreu equilíbrio entre precipitação e evapotranspiração para os dois ecossistemas.

Conforme Vital (2007), o Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais apresenta dados acerca do consumo de água por diferentes plantas, cujos resultados são mostrados na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Consumo de água por diferentes culturas (mm ano<sup>-1</sup>).

Cultura	Consumo de água (mm ano <sup>-1</sup> )
Cana-de-açúcar	100-2.000
Café	800-1.200
Citrus	600-1.200
Milho	400-800
Feijão	300-600
Eucalipto	800-1.200

Fonte: INSTITUTO DE PESQUISAS FLORESTAIS (2003<sup>3</sup> apud VITAL, 2007).

Se, por um lado, o consumo absoluto de água pelo eucalipto encontra-se entre os mais altos, o consumo relativo dessa água para a formação de 1 kg de biomassa figura entre os menores, mostrando que a espécie é bastante eficiente na produção de biomassa (Tabela 1.2). Essa eficiência na produção de biomassa faz com que o eucalipto cresça rapidamente, conferindo avançado grau de competitividade para a indústria nacional de celulose e papel.

Tabela 1.2 - Eficiência no uso da água (l kg<sup>-1</sup>) por diversas culturas.

Cultura	Eficiência no uso da água (l kg <sup>-1</sup> )
Batata	2.000
Cana-de-açúcar	500
Cerrado	2.500
Milho	1.000
Eucalipto	350

Fonte: INSTITUTO DE PESQUISAS FLORESTAIS (2003<sup>4</sup> apud VITAL, 2007).

Poore e Fries (1985) concluem que os efeitos do eucalipto sobre o clima não diferem substancialmente dos efeitos de qualquer outro tipo de cobertura florestal. Em tese, se o eucalipto é plantado onde anteriormente havia solo descoberto, ele irá alterar a velocidade do vento, ocasionando aumento da umidade e queda de temperatura. Nesse sentido, pode-se dizer que a plantação de eucalipto teria algum impacto sobre o clima. Os autores afirmam, entretanto, que não existem evidências empíricas nem conclusões evidentes sobre

<sup>3</sup> INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS. Fibra. **Jornal da Cenibra**, n. 217, nov. 2003.

<sup>4</sup> Idem ao anterior.

o efeito do eucalipto sobre o clima onde se inserem as plantações. Entretanto, com relação ao microclima, os autores afirmam que este efeito é mais perceptível. De modo geral, as florestas de eucalipto geram um microclima composto por elevada umidade, pouca luz solar, temperaturas mais baixas e moderação dos picos de temperatura.

#### 1.5.1 O EUCALIPTO NO VALE DO PARAÍBA

Os principais usos agrícolas do Vale do Paraíba após o ciclo do café foram a cultura do arroz e a pecuária, principalmente de leite, e mais recentemente de corte. A proximidade dos centros consumidores de papel e produtos derivados da madeira, somados ao fato do solo relativamente pobre, geraram o acréscimo das atividades madeireiras, particularmente com a ampliação da área plantada com eucaliptos, cultura muito bem adaptada ao clima e solo da região. De acordo com o Inventário Florestal das Áreas Reflorestadas realizado pelo Instituto Florestal do Estado de São Paulo em 2002 (dados de 1999 e 2000), o Estado de São Paulo apresenta uma área total de reflorestamento de 770.010 ha, equivalente a 3,1% de sua superfície (KRONKA et al., 2002). A Região Administrativa do Vale do Paraíba apresenta o 4º índice de reflorestamento mais expressivo do Estado, com 75.425 ha, predominando o eucalipto (66.663 ha), que corresponde a 4,65% da área total do vale.

Entre o período de 1978 e 1991-92 houve um incremento da área plantada de 28.678 ha (54,1%), resultante, principalmente, de plantios com gêneros de eucaliptos (Figura 1.5). Entretanto, de 1991-92 a 1999-2000, houve uma pequena redução da área plantada (6.267 ha ou 7,7%).

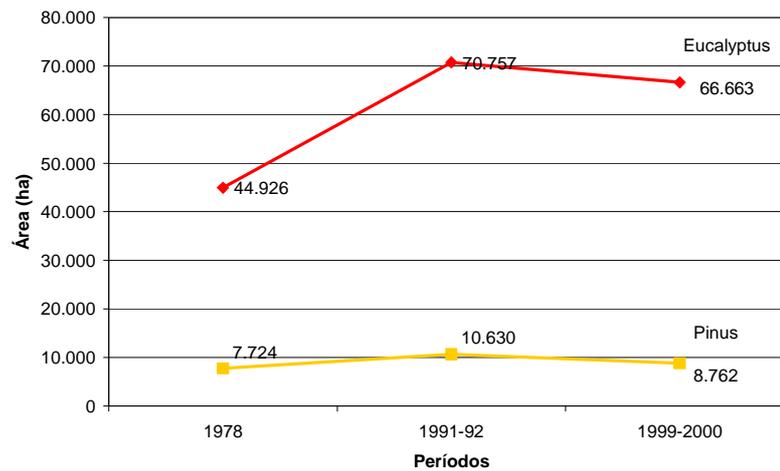


Figura 1.5. Áreas reforestadas com gêneros de *Eucalyptus* e *Pinus* na Região Administrativa do Vale do Paraíba nos períodos de 1978, 1991-1992 e 1999-2000. Fonte: KRONKA et al., 2002.

Na Figura 1.6 constam todas as áreas reforestadas na Região Administrativa do Vale do Paraíba por eucaliptos e pinus até 1999-2000, além das áreas urbanas.

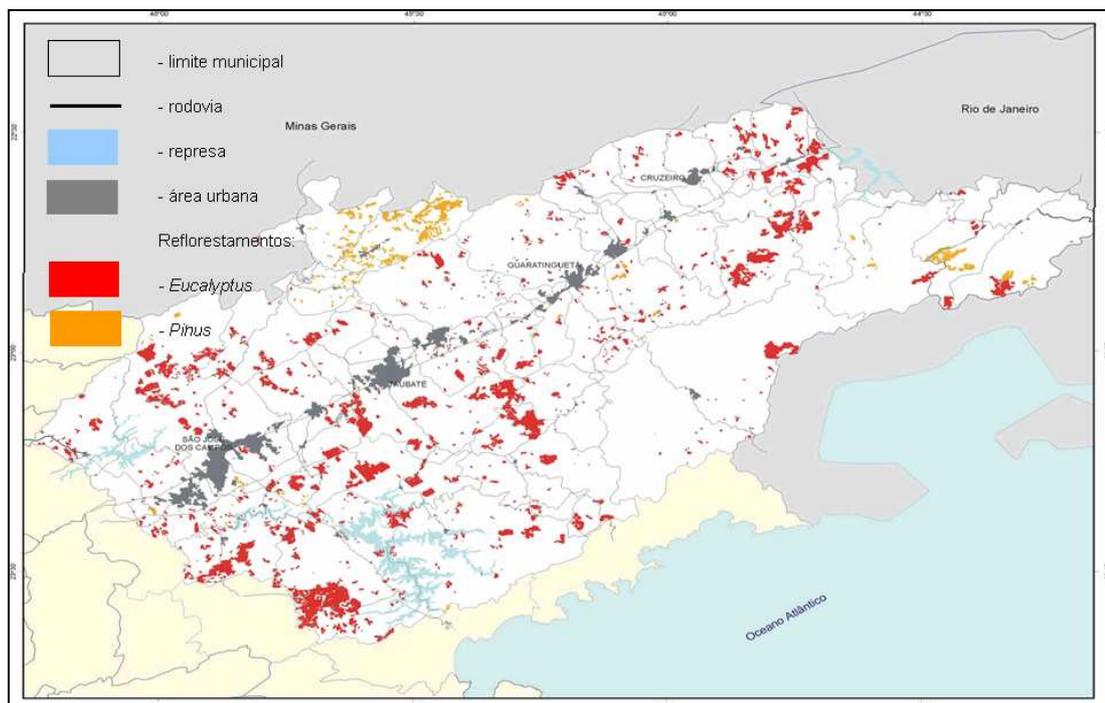


Figura 1.6. Áreas reforestadas na Região Administrativa do Vale do Paraíba (dados de 1999-2000). Fonte: KRONKA et al., 2002.

Da área total reflorestada por eucaliptos no Vale do Paraíba, tem-se que a espécie predominante, dentre as espécies de eucaliptos cultivadas e identificadas, é *E. grandis* (38,9%), sendo que as espécies da categoria *Eucalyptus* sp. precisam ser identificadas, conforme Tabela 1.3.

Tabela 1.3 - Espécies de eucaliptos e suas respectivas áreas na Região Administrativa do Vale do Paraíba (ha).

Espécie	Área reflorestada (ha)
<i>E.citriodora</i>	144
<i>E.grandis</i>	25.956
<i>E.saligna</i>	10.128
<i>E.urophylla</i>	42
<i>E.sp</i>	28.693
Outras	1.696
<b>Total</b>	<b>66.663</b>

Fonte: KRONKA et al., 2002.

Os detentores das áreas reflorestadas na Região Administrativa do Vale do Paraíba estão indicados na Tabela 1.4. Observa-se que grande parte dos detentores das áreas com reflorestamento não foi identificada (49,8%).

Tabela 1.4 - Detentores das áreas de reflorestamento na Região Administrativa do Vale do Paraíba.

Categorias	Área por gênero (ha)		
	Eucaliptos	Pinus	Total
Empresas <sup>(1)</sup>	30.798	-	30.798
Reflorestadoras <sup>(2)</sup>	4.474	1.350	5.824
Governamentais <sup>(3)</sup>	10	1.226	1.236
Não identificadas	31.381	6.186	37.567
<b>Total</b>	<b>66.663</b>	<b>8.762</b>	<b>75.425</b>

Fonte: KRONKA et al., 2002.

<sup>(1)</sup> Empresas do setor celulósico-papeleiro, chapas e matéria-prima para energia.

<sup>(2)</sup> Reflorestadoras e pequenos reflorestadores produtores de matéria-prima para processamento mecânico, material energético, celulose, chapas, construções rurais e energia.

<sup>(3)</sup> Entidades governamentais (Instituto Florestal e IBAMA).

## 1.6 QUALIDADE DO AR

Além das características biológicas do eucalipto, outra particularidade das culturas de eucaliptos são as emissões intensas de compostos orgânicos voláteis (COVs), através do uso da madeira (VELÁZQUEZ, 2000) ou através das emissões biogênicas (FUENTES; WANG, 1999). Os COVs, por sua vez, exercem um papel decisivo no processo de formação do ozônio, um importante poluente atmosférico que freqüentemente atinge valores altos, eventualmente ultrapassando os limites da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) na região do VP ( $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em 1 hora). O ozônio ( $\text{O}_3$ ) e outros poluentes conhecidos como oxidantes fotoquímicos, são produzidos como resultado de reações fotoquímicas entre COVs e óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), sob a ação da luz solar, não sendo poluentes de origem primária, mas sim resultado de reações na atmosfera após sua emissão principalmente devido à queima de combustíveis. Os COVs possuem diferentes potenciais de formação de ozônio (CARTER, 1994). A poluição do ar por oxidantes fotoquímicos é conhecida como “smog” e consiste numa mistura de espécies como ozônio ( $\text{O}_3$ ), dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), peroxiacetilnitrato (PAN -  $\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_5\text{N}$ ) e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ).

Além das emissões biogênicas, gases precursores do ozônio também provêm das emissões veiculares. Atuam na formação do ozônio, além dos COVs, os óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e hidrocarbonetos totais (HC). De acordo com as estimativas do Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo de 2007 (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2008), a frota veicular é responsável por 97% das emissões de hidrocarbonetos e 96% das emissões de óxidos de nitrogênio, além de contribuir com 97% das emissões de monóxido de carbono (CO), 40% das emissões de material particulado (MP) e 32% das emissões de óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ). Localizado entre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e o Rio de Janeiro, o Vale do Paraíba encontra-se amplamente industrializado e com grande frota veicular, tanto de passagem pela Rodovia Presidente Dutra, quanto própria dos municípios do vale.

A relação de emissões COVs/NO<sub>x</sub> para a formação do ozônio não é linear. De acordo com Seinfeld (1986), para um determinado nível de COVs, existe uma concentração de NO<sub>x</sub> em que é produzida uma quantidade máxima de ozônio (razão COVs/NO<sub>x</sub> ideal). As isopletas de ozônio representam esta dependência da produção de ozônio da razão COVs/NO<sub>x</sub> (Figura 1.7). Analisando as isopletas verifica-se que quando as concentrações dos óxidos de nitrogênio são relativamente maiores do que as dos compostos orgânicos voláteis (razão COVs/NO<sub>x</sub> baixa), as concentrações de ozônio se tornam mais sensíveis a alterações nas emissões de COVs (atmosfera COVs-limitante). Por outro lado, quando as concentrações dos compostos orgânicos voláteis são superiores aos óxidos de nitrogênio (razão COVs/NO<sub>x</sub> alta), as concentrações de ozônio se tornam mais sensíveis a alterações nas emissões de NO<sub>x</sub> (atmosfera NO<sub>x</sub>-limitante).

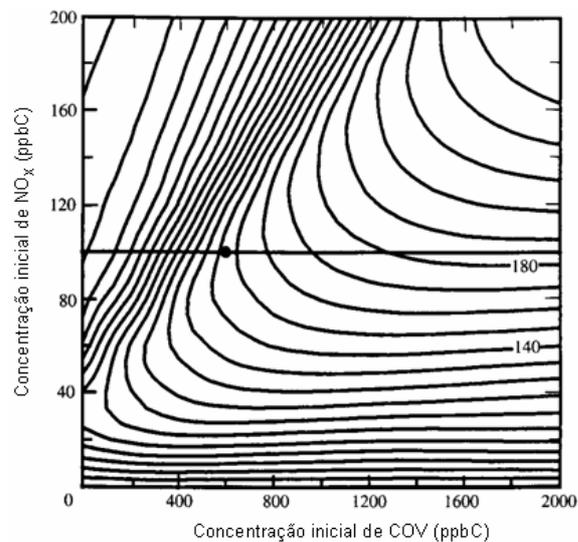


Figura 1.7. Isopletas de ozônio.  
Fonte: SEINFELD, 1986.

De maneira geral, sistemas COVs-limitantes são aqueles em que a razão COVs/NO<sub>x</sub> é menor que 8 (EPA, 2004), sendo este valor um pouco variável de acordo com o autor. Razões de 8 a 15 caracterizam locais intermediários onde tanto o controle de COVs quanto de NO<sub>x</sub> são efetivos na diminuição do O<sub>3</sub>. Locais com razões acima de 15 são considerados NO<sub>x</sub>-limitantes.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Situado entre a região leste do Estado de São Paulo e sul do Estado do Rio de Janeiro, o Vale do Paraíba compõe a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Abrange diversos municípios, além da rodovia Presidente Dutra (BR-116). A parte central do vale, com altitudes da ordem de 500 a 600 m, está situada entre a Serra do Mar (entre 1.000 e 1.500 m) e a Serra da Mantiqueira (entre 1.500 e 2.500 m). A proximidade da costa (cerca de 100 km) e o efeito da circulação local do tipo brisa de vale-montanha tornam as circulações locais mais complexas, pois o efeito da brisa marítima é sensível em grande parte dos dias. A existência de grandes cidades, com intensas emissões de poluentes por indústrias (inclusive refinarias e indústrias de papel) e veículos, somadas à circulação de vale, freqüentemente tornam o ambiente desfavorável à dispersão de poluentes. Em particular, há grande interesse na concentração de ozônio, poluente que comumente causa problemas à saúde pública na região (FREITAS; PEREIRA; SALDIVA, 2002).

O clima de São José dos Campos, principal município da região, é classificado como tropical de altitude, apresentando temperatura média anual de 20°C, temperatura média das máximas no verão em torno de 30°C e a média das mínimas no inverno de 12°C. Cerca de 70% de sua precipitação anual ocorre no período de novembro a março. Os ventos predominantes são de nordeste a sudeste (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2008).

Para a realização dos estudos propostos, realizou-se um levantamento de diversas informações a serem inseridas no modelo de mesoescala empregado, para adequá-lo às condições locais existentes na área de interesse. Atualizou-se o seu arquivo de uso do solo, visto que algumas áreas urbanas do VP não eram identificadas, bem como a área de reflorestamento expandido de eucaliptos.

Com a introdução das áreas reflorestadas, foi preciso inserir parâmetros biofísicos adequados às características do eucalipto, o que foi realizado com base em dados de

Rocha (2008) (informação verbal)<sup>5</sup>. Quanto às emissões biogênicas, foram atribuídas a estas as taxas de emissão de compostos orgânicos voláteis, resultantes da soma de alguns dos principais compostos emitidos por eucaliptos inventariados até o momento.

Dentre as principais fontes urbanas de emissões de poluentes encontram-se as indústrias e a frota veicular. No caso específico do Vale do Paraíba, há ainda a contribuição da Rodovia Presidente Dutra e vizinhança urbanizada. Somadas a essas emissões, consideraram-se as emissões biogênicas advindas dos reflorestamentos de eucaliptos. Os dados levantados destas fontes estão dispostos a seguir.

## **2.1 CARACTERIZAÇÃO BIOFÍSICA DO EUCALIPTO**

A partir do Inventário Florestal das Áreas Reflorestadas do Estado de São Paulo (KRONKA et al., 2002), foi inserida no modelo de mesoescala empregado a área atualmente reflorestada por eucaliptos na região do Vale do Paraíba (Figura 2.1), assim como as áreas urbanas do Vale do Paraíba (Figura 2.2), de acordo com mapa do Instituto Geográfico e Cartográfico (2007).

Para avaliar os impactos nas circulações locais e concentração de poluentes resultantes da expansão da área coberta por eucaliptos, inseriu-se no modelo uma suposta área cuja cobertura do solo teria sido extensamente substituída por culturas de eucalipto. Como o eucalipto pode ser plantado inclusive em encostas íngremes, supôs-se que praticamente toda a região do Vale do Paraíba seria ocupada por plantações de eucaliptos, preservando-se as exigências legais de áreas de proteção permanente (Resolução CONAMA nº. 303/2002). Desta forma, obteve-se a área ilustrada na Figura 2.3 ocupada por reflorestamentos no VP.

---

<sup>5</sup> Informação fornecida por Rocha, coordenador do Projeto Temático FAPESP nº. 02/09289-9 – “Interação Biosfera-Atmosfera Fase 2: Cerrados e Mudanças de Uso da Terra”, em 2008.

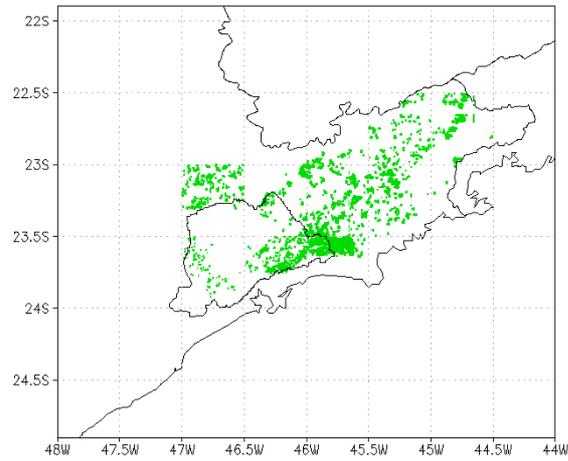


Figura 2.1. Área atualmente reforestada por eucaliptos no Vale do Paraíba.  
Fonte: adaptado de KRONKA et al., 2002.

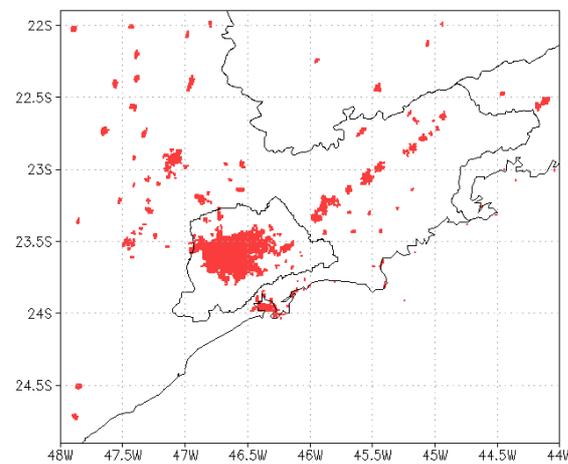


Figura 2.2. Áreas urbanas na região do Vale do Paraíba e imediações.  
Fonte: adaptado de INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO, 2007.

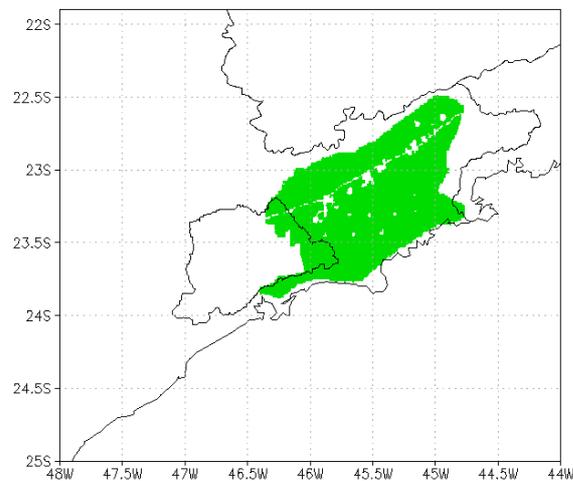


Figura 2.3. Hipótese de expansão de área reforestada por eucaliptos no Vale do Paraíba.

Após a identificação das áreas urbanas e reflorestadas por eucaliptos, alteraram-se os parâmetros biofísicos que caracterizam a vegetação. Primeiramente, a área coberta por eucaliptos foi identificada com os mesmos parâmetros atribuídos à pastagem, visto que este era um dos principais usos do solo do vale antes da inserção da cultura de eucaliptos, como visto anteriormente. Os parâmetros de identificação da pastagem empregados foram aqueles já contidos no código do modelo numérico, no sub-modelo de solo/vegetação, a ser apresentado posteriormente.

Com base em dados fornecidos por Rocha (2008), foram prescritos valores médios representativos dos parâmetros fisiológicos para o bioma eucaliptos (informação verbal)<sup>6</sup>. Os parâmetros pertinentes à pastagem e aos eucaliptos estão contidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Parâmetros para cobertura vegetal de pastagem e eucaliptos.

Parâmetros	Valores para pastagem	Valores para eucaliptos
Albedo verde (%)	22,0	15,0
Albedo marrom (%)	40,0	20,0
Índice de área foliar ( $m^2 m^{-2}$ )	0,5	4,0
Fração vegetal (%)	85,0	90,0
Altura do dossel (m)	0,3	32,0
Profundidade de raízes (m)	0,35	5,0
Resistência estomática mín. ( $s m^{-1}$ )	500,0	90,0

A fração da radiação incidente que é refletida por uma superfície é o seu albedo. No modelo são considerados dois valores distintos de albedo, diferenciando-se a porção correspondente à folhagem (albedo verde) daquela ocupada por caules, galhos e troncos (albedo marrom). No caso dos eucaliptos a porção “marrom” é menos significativa, visto que permanece praticamente coberta pelas folhas.

O índice de área foliar (IAF) foi definido por Watson (1947) como sendo a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo ( $m^2$  de folha  $m^{-2}$  de solo). O IAF é computado ao considerar-se a superfície de apenas uma das faces das folhas. Está

<sup>6</sup> Idem ao anterior.

diretamente relacionado à produtividade e à evapotranspiração de ecossistemas florestais (LANG; McMURTRIE, 1992). De acordo com Foelkel (2005), o IAF dos eucaliptos varia de 2 a 4,5.

A fração vegetal representa a fração de terreno coberta por vegetação, e por esta razão possui um valor alto tanto para pastagem quanto para plantações de eucaliptos. A altura da vegetação considerada para eucaliptos reflete características de árvores maduras, assim como a profundidade das raízes, que pode ser variável em decorrência da disponibilidade de água no solo.

Para a realização da fotossíntese, as plantas abrem seus estômatos para captar dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) do ar. Inevitavelmente ocorrem perdas de água pelas folhas neste processo. Por esta razão, os estômatos apresentam mecanismos para controlar o seu grau de abertura, e este controle é atribuído à condutância estomática foliar, que por definição é o inverso da resistência estomática. Quanto melhor a condição hídrica de uma região, menor será a resistência estomática das plantas. Uma resistência estomática mais alta indica maior controle dos estômatos sobre a perda de água da planta.

## **2.2 EMISSÕES BIOGÊNICAS**

Quanto à emissão de COVs biogênicos, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, confirmando o importante papel exercido pelos hidrocarbonetos biogênicos reativos na formação de poluentes atmosféricos secundários (CHAMEIDES et al., 1988, 1992). Para estabelecer estratégias de controle de poluição do ar estes compostos devem ser considerados, pois, sob altas concentrações de  $\text{NO}_x$  e condições específicas de tempo, os COVs biogênicos contribuem com a formação de poluentes secundários reativos e prejudiciais à saúde na troposfera, como ozônio, aldeídos e peroxiacetilnitratos. Entretanto, as estimativas de emissões de COVs pela vegetação permanecem muito aproximadas.

A modelagem de processos fotoquímicos, que descreve a relação entre emissões de compostos primários e sua concentração na atmosfera, permite estimar as concentrações de poluentes secundários e, por consequência, a qualidade do ar. Entretanto, a confiabilidade dos modelos atmosféricos depende da qualidade dos dados de entrada.

Muitos esforços vêm sendo feitos, principalmente na Europa, no sentido de inventariar os COVs antropogênicos. Entretanto, os inventários para COVs biogênicos ainda são mais escassos. Além disso, entre os dados disponíveis há grande variação de valores. Simpson et al. (1995) considerou, no inventário de emissões biogênicas europeu, que os valores estimados para emissões de isopreno podem variar por um fator maior que 5. Simon, Luchetta e Torres (2001) relataram conclusões similares para o inventário francês: suas estimativas podem variar por um fator entre 4 e 7 para alguns COVs biogênicos. Isto causa um grande impacto nas incertezas de todo processo de modelagem e na confiabilidade das simulações.

Alguns estudos em que foram feitas medidas de COVs biogênicos são citados a seguir, com base nos quais determinou-se a taxa de emissão a ser atribuída às plantações de eucaliptos do Vale do Paraíba no presente estudo.

Fulton et al. (1998) encontraram uma taxa de emissão de COVs para jovens árvores “*black spruce*” (3 anos de idade) de  $9 \pm 4 \mu\text{g C h}^{-1}$  (g de folhas secas)<sup>-1</sup>, em condições padrão de temperatura (30°C) e radiação fotossinteticamente ativa (PAR:  $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Este valor concorda com Guenther et al. (1993), que encontraram  $11 \pm 4 \mu\text{g C h}^{-1}$  (g de folhas secas)<sup>-1</sup>, valor este calculado a partir da soma das taxas de emissão de isopreno e monoterpeno, dois dos principais compostos orgânicos voláteis emitidos por fontes biogênicas.

Janson (1993) examinou as taxas de emissão de monoterpenos de *Norwegian spruce* maduros e encontrou uma taxa de emissão de monoterpeno de  $0,5 \pm 0,7 \mu\text{g C h}^{-1}$  (g de folhas secas)<sup>-1</sup>.

Guenther et al. (1995) observaram os resultados de estudos prévios e sugeriram uma taxa de emissão de isopreno de  $8 \mu\text{g C h}^{-1}$  (g de folhas secas)<sup>-1</sup> e uma taxa de emissão

de monoterpeno de  $2,4 \mu\text{g C h}^{-1}$  (g de folhas secas) $^{-1}$  para um ecossistema de coníferas boreal.

Padhy e Varshney (2005a) realizaram medidas das emissões foliares de COVs de espécies de plantas comuns da Índia. Dentre as 51 espécies de plantas examinadas constatou-se que 36 espécies emitem COVs, sendo quatro altamente emissoras, 28 medianamente emissoras e quatro pouco emissoras, enquanto que nas 15 espécies remanescentes não foi detectada emissão de COVs ou os níveis estiveram abaixo do limite de detecção. A variação das emissões de COVs de espécie para espécie foi observada. Também foi notada uma variação sazonal e diurna nas emissões de COVs. Entre as nove espécies de árvores selecionadas para um estudo detalhado, a maior média horária de emissão foi observada em *Eucalyptus species* –  $9,69 \pm 8,39 \mu\text{g h}^{-1}$  (g de folha seca) $^{-1}$  – e o mínimo em *Syzygium jambolanum* –  $1,89 \pm 2,48 \mu\text{g h}^{-1}$  (g de folha seca) $^{-1}$ . As emissões foliares de COVs por *Eucalyptus species* podem ser observadas na Tabela 2.2. São apresentadas médias das emissões diurnas, noturnas e as médias gerais (emissões diurnas somadas às noturnas) por estações.

Tabela 2.2 - Emissão foliar de COVs por *Eucalyptus sp.* em diferentes estações ( $\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$  de folha seca).

<i>E. sp.</i>	Médias diárias <sup>(1)</sup>					Médias noturnas <sup>(2)</sup>					Média	Desvio Padrão
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E		
isopreno	9,3	4,4	11,4	17,5	7,5	-	-	-	-	-		
$\alpha$ -pinene	0,1	-	7,6	5,5	0,1	2,1	-	11,6	7,5	-		
Outros COVs	0,5	0,3	-	-	-	1,9	0,4	9,2	-	-		
COVs totais	9,9	4,7	19,0	23,0	7,6	4,0	0,4	20,8	7,5	0,0	9,69	8,39
Médias gerais	6,95	2,55	19,9	15,3	3,8							

Fonte: PADHY; VARSHNEY, 2005a.

Notas: Estações: A - verão; B - estação chuvosa; C - outono; D - inverno; E - primavera.

<sup>(1)</sup> Intensidade da radiação solar durante as 5 estações, variando de 3 a  $2.077 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (média de  $925 \mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), temperatura variando de 11,8 a 39,5°C (média de 27°C) durante o dia.

<sup>(2)</sup> Temperatura noturna variando de 12 a 37,9°C (média de 24°C).

As médias gerais das emissões foliares de *Eucalyptus sp.* por estação são ainda apresentadas na Figura 2.4.

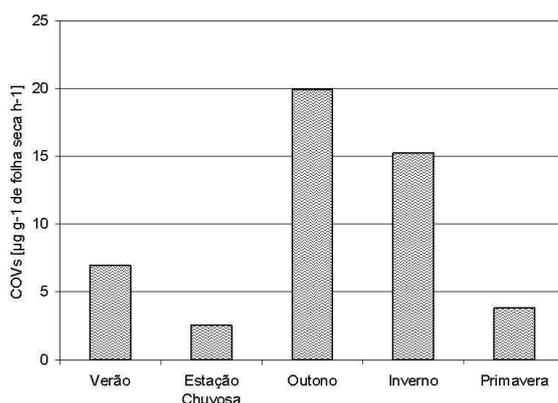


Figura 2.4. Comparação entre médias gerais das emissões foliares de COVs de *Eucalyptus* sp. em diferentes estações ( $\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$  de folha seca).

Fonte: PADHY; VARSHNEY, 2005a.

Outro estudo foi realizado por Padhy e Varshney (2005b), em que foram feitas medições de emissões foliares de isopreno em nove espécies de árvores em fase de crescimento em Delhi, Índia. Os autores observaram uma emissão de isopreno média de  $9,9 \pm 4,8 \mu\text{g h}^{-1} (\text{g de folha seca})^{-1}$  por *Eucalyptus* sp., sendo esta uma emissora moderada em relação às outras espécies medidas. Também verificaram variação na emissão de isopreno durante o período de 24 horas nas diferentes estações (Figura 2.5). A emissão foliar do isopreno tem início pela manhã, aumenta gradualmente com o aumento da radiação solar e temperatura e atinge seu pico durante a tarde (13h) no inverno, e às 16h no outono. Nas demais estações não ocorreram picos durante o dia. Como a emissão de isopreno depende da radiação solar, não ocorrem emissões durante a noite.

Durante a hora de pico do inverno (13h) a porcentagem da emissão de isopreno foi de 44% da emissão total. O coeficiente de correlação entre a emissão de isopreno (não normalizada) e a radiação solar para eucalipto foi de 0,8284, sendo este um alto grau de correlação.

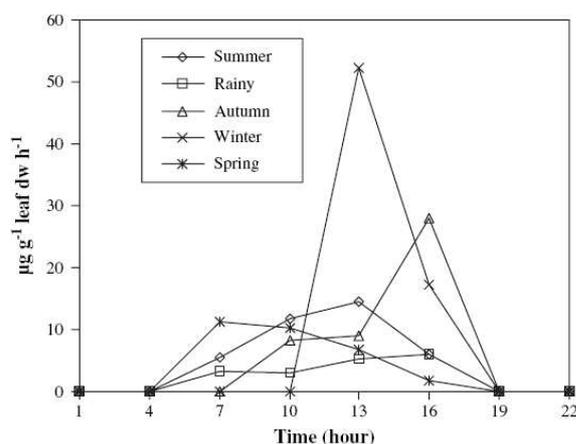


Figura 2.5. Variação diária na emissão de isopreno para *Eucalyptus* sp. em diferentes estações ( $\mu\text{g h}^{-1} \text{g}^{-1}$  de folha seca).

Fonte: PADHY; VARSHNEY, 2005b.

Um estudo desenvolvido por Nunes e Pio (2001) visou especificamente emissões por eucaliptos. Os autores estudaram as emissões de COVs por árvores jovens de *Eucalyptus globulus* em laboratório e árvores adultas em campo. Foi observado que a taxa de emissão de isopreno segue um modelo adaptado de Guenther et al. (1995), considerando um fator de emissão básico de  $32 \pm 10 \mu\text{g h}^{-1} (\text{g de folha seca})^{-1}$  para árvores adultas e um fator de  $48 \pm 11 \mu\text{g h}^{-1} (\text{g de folha seca})^{-1}$  para árvores jovens. O modelo empírico desenvolvido por Guenther et al. (1995) apresentou um bom desempenho na simulação da variação na taxa de emissão de isopreno. A concentração de isopreno na atmosfera de uma floresta de eucaliptos, logo acima do dossel, é influenciada principalmente pela taxa de emissão de isopreno. A concentração de isopreno no ambiente a 16 m de altura mostrou um padrão diurno muito similar às taxas de emissão calculadas a partir do algoritmo de Guenther et al. (1995).

Os autores observaram que compostos orgânicos voláteis  $\text{C}_{10}$  (monoterpenos), ou seja,  $\alpha$ -pinene, limonene e 1,8-cineol, são também emitidos pelos eucaliptos, mas em menores taxas. Folhas de árvores mais jovens emitem maiores fluxos de isopreno e monoterpenos do que folhas de árvores adultas. As emissões de monoterpenos em espécies adultas são, em geral, apenas vestigiais ou não puderam ser quantificadas.

De acordo com os resultados obtidos pelo algoritmo de Guenther et al. (1995), Nunes e Pio (2001) encontraram que durante o dia, a emissão de isopreno representa mais de 80% do total de COVs, enquanto que durante a noite as emissões de isopreno decrescem até níveis de não detecção. A Figura 2.6 mostra um ciclo diurno típico de emissão para uma árvore adulta de *E. globulus*. Em árvores jovens, as taxas de emissão de isopreno apresentam um máximo por volta das 14h e permanecem altas durante a tarde, sendo que as taxas de emissão de monoterpenos têm valores aproximadamente constantes durante todo o dia. Em árvores adultas, as taxas de emissão de isopreno são máximas durante a tarde, quando a radiação solar e a temperatura são mais altas, e decrescem a valores não detectáveis no início da noite. As taxas de emissão de monoterpenos também têm um máximo durante a tarde quando a temperatura é mais alta, e permanecem com taxas razoáveis durante a noite.

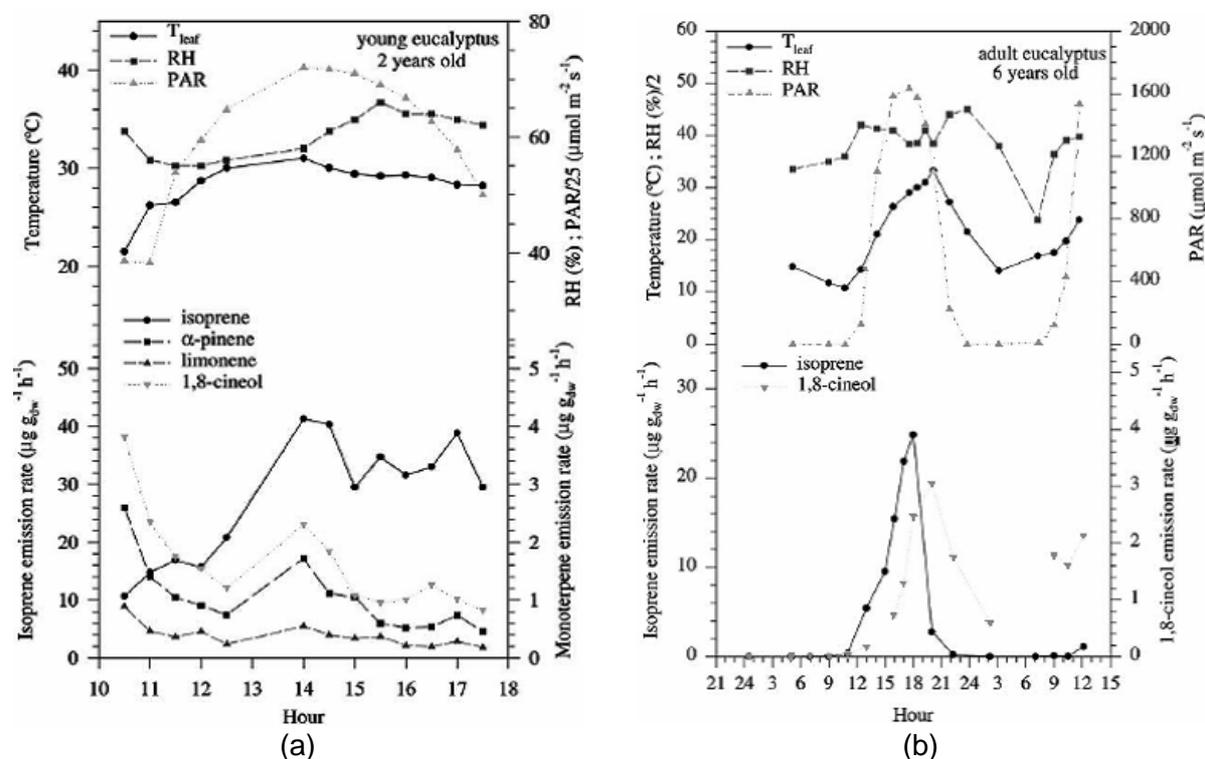


Figura 2.6. Variações de temperatura (°C), umidade (%) e PAR (μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) e emissão de COVs (μg h<sup>-1</sup> g<sup>-1</sup> de folha seca) por árvores de eucalipto (a) jovens e (b) adultas. Fonte: NUNES; PIO, 2001.

Com base em todas as informações apresentadas, adota-se para o Vale do Paraíba a emissão de COVs por eucaliptos proposta por Padhy e Varshney (2005a) para *Eucalyptus species*,  $9,69 \pm 8,39 \mu\text{g h}^{-1}$  (g de folha seca)<sup>-1</sup>. Nas unidades utilizadas no modelo de mesoescala, têm-se as seguintes emissões de COVs por eucaliptos (Tabela 2.3):

Tabela 2.3 - Estimativa da emissão de COVs biogênicos para o Vale do Paraíba.

Unidades das emissões	COVs
$\mu\text{g h}^{-1}$ (g de folha seca) <sup>-1</sup>	9,69
$\text{kg dia}^{-1} \text{m}^{-2}$	$6,97680 \times 10^{-5}$

Fonte: PADHY; VARSHNEY, 2005a.

As estimativas foram feitas considerando-se uma densidade de biomassa de folhas de eucalipto de  $300 \text{ g m}^{-2}$ , estimada a partir da distribuição de idade das florestas de eucaliptos portuguesas, considerando-se a dependência da densidade de biomassa em relação a três idades, proposta por Nunes (1996).

## 2.3 EMISSÕES URBANAS

Dentre as principais fontes de emissões urbanas do Vale do Paraíba estão os veículos que circulam nos municípios do vale e os veículos de passagem da Rodovia Presidente Dutra, além das indústrias inseridas no vale.

### 2.3.1 FONTES DE EMISSÕES VEICULARES DOS MUNICÍPIOS DO VALE DO PARAÍBA

A Região Administrativa do Vale do Paraíba Paulista é uma das quinze mesorregiões do Estado de São Paulo, sendo formada por 39 municípios. Informações específicas da frota automotiva do Estado de São Paulo são disponibilizadas pela Fundação Sistema Estadual de Análises de Dados. A quantidade de veículos por tipo para o Município de São José dos Campos e total para o VP é apresentada na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Frota de veículos na Região Administrativa do Vale do Paraíba, 2007.

Frotas	São José dos Campos	Vale do Paraíba
Automóveis	177.774	504.026
Caminhões	5.974	21.984
Microônibus e camionetas	23.584	70.357
Motocicletas e similares	36.001	152.068
Ônibus	1.109	3.735
Reboques	3.377	10.339
Outro tipo	144	455
<b>Total de veículos</b>	<b>247.963</b>	<b>762.964</b>

Fonte: FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS, 2007.

Dentre os municípios do Vale do Paraíba, existe uma estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar dos veículos do Município de São José dos Campos, contida no Relatório da Qualidade do Ar do Estado de São Paulo – 2007 (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2008) e apresentada na Tabela 2.5, por tipo de fonte.

Tabela 2.5 - Estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar no Município de São José dos Campos em 2007 <sup>(1)</sup> (1.000 t ano<sup>-1</sup>).

Fonte de emissão	Emissão (1.000 t ano <sup>-1</sup> )					
	CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	MP	
Tubo de escapamento de veículos	Gasolina C <sup>(2)</sup>	18,77	1,93	1,26	0,11	0,14
	Álcool + Flex	6,21	0,70	0,43	-	-
	Diesel <sup>(3)</sup>	10,32	1,61	7,47	0,10	0,38
	Táxi	nd	nd	nd	nd	nd
	Motocicleta e similares	10,03	1,34	0,10	0,01	0,04
Cárter e evaporativa	Gasolina C <sup>(2)</sup>	-	3,38	-	-	-
	Álcool	-	0,54	-	-	-
	Motocicleta e similares	-	1,10	-	-	-
Pneus <sup>(4)</sup>	Todos os tipos	-	-	-	-	0,29
Operações de transferência de combustível	Gasolina C <sup>(2)</sup>	-	nd	-	-	-
	Álcool	-	nd	-	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>45,33</b>	<b>10,60</b>	<b>9,26</b>	<b>0,22</b>	<b>0,85</b>

Fonte: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2008.

<sup>(1)</sup> Utiliza-se o mesmo perfil de idade da frota da RMSP.

<sup>(2)</sup> Gasolina C: gasolina contendo 22% de álcool anidro e 350 ppm de enxofre (massa).

<sup>(3)</sup> Diesel com 350 ppm de enxofre (massa).

<sup>(4)</sup> Emissão composta para o ar (partículas) e para o solo (impregnação).

nd: não disponível.

A frota de veículos do Município de São José dos Campos soma 32,5% da frota total de veículos do Vale do Paraíba. O perfil de idade da frota considerado pela CETESB para a determinação da emissão dos veículos do Município de São José dos Campos é o mesmo utilizado para a frota da RMSP. Portanto, assume-se que este mesmo perfil seja válido para todo o Vale do Paraíba e, mantendo a proporção, tem-se que a emissão por veículos dos municípios do vale totalizam aproximadamente o triplo das emissões do Município de São José dos Campos.

Distribuindo-se estas emissões para toda a área do Vale do Paraíba (16.179,95 km<sup>2</sup>) e convertendo-se as unidades em kg dia<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, adequadas ao modelo empregado, tem-se os seguintes valores de emissões da frota veicular para a região do vale (Tabela 2.6):

Tabela 2.6 - Estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar na Região Administrativa do Vale do Paraíba (kg dia<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>).

CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	MP
2,30270x 10 <sup>-5</sup>	5,38465 x 10 <sup>-6</sup>	4,70394 x 10 <sup>-6</sup>	1,11757 x 10 <sup>-7</sup>	4,31788 x 10 <sup>-7</sup>

### 2.3.2 FONTES DE EMISSÕES VEICULARES DA RODOVIA PRESIDENTE DUTRA

Inserida na Região do Vale do Paraíba está a Rodovia Presidente Dutra, que liga os dois maiores centros produtores e consumidores do país: a Região Metropolitana de São Paulo e a do Rio de Janeiro, além de ser a principal via de acesso entre as regiões nordeste e sul do Brasil. Devido à sua importância econômica, é uma rodovia que apresenta alto tráfego de passagem durante o ano todo. De acordo com dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (2007), houve um tráfego de 57.409.209 de veículos pela Rodovia Presidente Dutra durante o ano de 2006, distribuídos entre 11 categorias especificadas na Tabela 2.7. Portanto, diariamente trafegaram em média 157.285,5 veículos pela Rodovia Presidente Dutra em 2006, cuja distribuição percentual também é apresentada a seguir. Estes dados são obtidos a partir de estatísticas de veículos pedagiados e por este motivo ficam excluídos os veículos isentos e as motocicletas.

Tabela 2.7 - Veículos pedagiados por categoria na Rodovia Presidente Dutra - 2006.

Categoria	Classe de Veículos	Quantidade	%
1	Automóvel, caminhoneta, furgão e triciclo (2 eixos, rodagem simples)	33.648.450	58,6
2	Caminhão leve, ônibus, caminhão trator e furgão (2 eixos, rodagem dupla)	5.389.027	9,4
3	Automóvel com semi-reboque e caminhonete com semi-reboque (3 eixos, rodagem simples)	53.044	0,1
4	Caminhão, caminhão-tractor, caminhão-tractor com semi-reboque e ônibus (3 eixos, rodagem dupla)	8.298.008	14,5
5	Automóvel com reboque e caminhonete com reboque (4 eixos, rodagem simples)	7.270	0,0
6	Caminhão com reboque e caminhão-tractor com semi-reboque (4 eixos, rodagem dupla)	1.848.128	3,2
7	Caminhão com reboque e caminhão-tractor com semi-reboque (5 eixos, rodagem dupla)	6.094.164	10,6
8	Caminhão com reboque e caminhão-tractor com semi-reboque (6 eixos, rodagem dupla)	1.508.794	2,6
Cat. esp.	Outros Veículos (Acima de 6 eixos)	562.324	1,0
Motos	Motocicletas, motonetas e bicicletas a motor (2 eixos, rodagem simples)	0	0,0
Isentos	Veículos Isentos	0	0,0
Quantidade Total		57.409.209	100,0

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES, 2007.

Adotando-se esta distribuição percentual e considerando-se os fatores de emissão da frota veicular da RMS (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2008), tem-se que a emissão de CO, HC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e MP pelo tráfego da Rodovia Presidente Dutra, ao longo dos 231 km de sua extensão inseridos no Estado de São Paulo é (Tabela 2.8):

Tabela 2.8 - Estimativa de emissão das fontes móveis de poluição do ar na Rodovia Presidente Dutra (kg dia<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>).

CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	MP
3,29500 x 10 <sup>-4</sup>	6,89670 x 10 <sup>-5</sup>	1,24915 x 10 <sup>-4</sup>	2,35608 x 10 <sup>-6</sup>	6,66311 x 10 <sup>-6</sup>

As emissões provenientes do tráfego da rodovia são distribuídas por todo seu traçado dentro do Estado de São Paulo, conforme Figura 2.7.

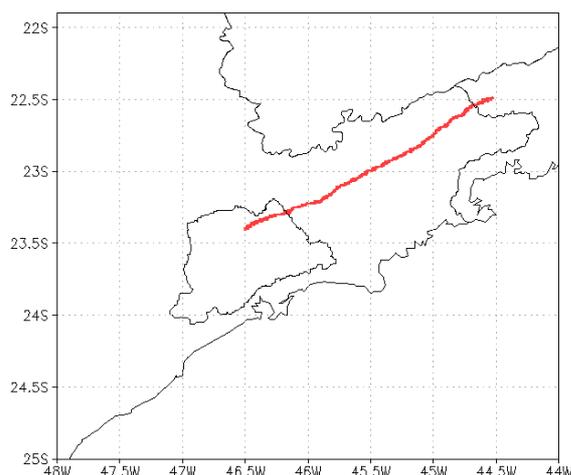


Figura 2.7. Traçado da Rodovia Presidente Dutra (BR-116).

Fonte: adaptado de DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM, 2004.

### 2.3.3 FONTES DE EMISSÕES INDUSTRIAIS

De acordo com dados do Ministério do Trabalho e Emprego havia no ano de 2006 um total de 2.913 indústrias na Região do Vale do Paraíba. Entretanto, estão disponíveis apenas informações das emissões de algumas indústrias situadas no VP, especificamente no Município de São José dos Campos, consideradas empresas prioritárias para controle das emissões de poluentes atmosféricos. Estes dados estão inseridos no Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo (2007) da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2008) e são apresentados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 - Estimativa de emissão da queima de combustíveis das fontes estacionárias de poluição do ar em São José dos Campos ( $t \text{ ano}^{-1}$ ).

Empresa	Emissão dos poluentes ( $t \text{ ano}^{-1}$ )				
	CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	MP
Petróleo Brasileiro S.A. – REVAP	741,90	3.382,9	5.884,27	11.527,11	953,35
Petrobrás Distribuidora S.A. – TEVAP	-	350,4	-	-	-
General Motors do Brasil	2,70	1.149,74	44,71	0,28	39,68
Radicifibras Ind. e Com. Ltda.	-	-	9,50	-	0,80
Monsanto do Brasil Ltda.	-	0,12	56,23	2,10	2,16
Embraer	1,95	7,98	2,93	0,25	1,30
Total (1.000 $t \text{ ano}^{-1}$ )	0,75	4,9	6,0	11,5	1,0

Fonte: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2008.

A emissão proveniente destas indústrias representa mais de 90% do total das emissões do Município de São José dos Campos (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2008), sendo, portanto, significativa. Desta forma, para representar as emissões industriais do Vale do Paraíba, serão consideradas as emissões destas indústrias, que nas unidades adequadas ao modelo empregado, são apresentadas na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 - Estimativa de emissão da queima de combustíveis das fontes estacionárias de poluição do ar no Vale do Paraíba ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).

CO	HC	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	MP
$1,46987 \times 10^{-12}$	$9,60312 \times 10^{-12}$	$1,17589 \times 10^{-11}$	$2,25379 \times 10^{-11}$	$1,95982 \times 10^{-12}$

### 3 DESCRIÇÃO DA MODELAGEM

Neste capítulo é apresentada uma descrição concisa do modelo numérico BRAMS e dos modelos a ele acoplados, o modelo de solo/vegetação, o modelo para representação do efeito urbano e o modelo Fotoquímico Simplificado, destacando-se algumas parametrizações disponíveis no código e relevantes para este estudo. A partir das informações e dados levantados apresentados no capítulo anterior, foram criados cenários para a avaliação dos impactos causados pela mudança do uso do solo. Estes cenários são aqui apresentados, bem como o resultado das simulações utilizadas para validação do modelo.

Dentro da infra-estrutura do Laboratório de Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais (MASTER)<sup>7</sup> do Departamento de Ciências Atmosféricas (DCA) do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP) encontram-se disponíveis as análises globais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP), e o modelo BRAMS, este último rotineiramente utilizado no Laboratório MASTER para atividades de previsão do tempo.

A realização do presente trabalho utilizou a modelagem numérica, fundamentada numa versão do modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System* – PIELKE et al., 1992), recentemente implementada por Freitas et al. (2005). Esta contém os procedimentos básicos relacionados com o processo de formação de ozônio na versão brasileira denominada BRAMS<sup>8</sup>. O BRAMS permite o tratamento de fenômenos em várias escalas de tempo e espaço através do aninhamento entre grades para prover o refinamento da malha numérica, em que os sistemas de diferentes escalas simulados em cada grade interagem uns com os outros. Outra vantagem na utilização desse modelo é a inclusão de uma

---

<sup>7</sup> <http://www.master.iag.usp.br/>

<sup>8</sup> Disponível em <http://brams.cptec.inpe.br/>

parametrização de superfície fisicamente adequada ao tratamento de áreas urbanas e também um modelo de fontes para poluentes de origem veicular e industrial (FREITAS et al., 2006). Ainda, acoplado ao modelo, existe um modelo de física de aerossóis, o modelo CARMA (*Community Aerosol & Radiation Model for Atmospheres*), que permite o estudo do impacto de gases e material particulado sobre o balanço radiativo.

### 3.1 O MODELO NUMÉRICO

O BRAMS é um modelo numérico de múltipla finalidade, designado para simular circulações atmosféricas que vão desde a micro até a grande escala, sendo sua aplicação mais freqüente na simulação de fenômenos atmosféricos de mesoescala (com escalas horizontais da ordem de 2 a 2.000 km), com o objetivo de fornecer tanto informações de previsão de tempo operacional quanto de suporte à pesquisa.

O BRAMS baseia-se no conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico baseadas nas leis de movimento de Newton e na termodinâmica de um fluido, incluindo parametrizações dos diversos processos físicos presentes nestas equações. É um modelo bastante versátil, uma vez que é possível ativar e desativar diversas opções e parametrizações contidas em seu código. Possui um esquema de aninhamento múltiplo de grades, cujo posicionamento, domínio e resolução podem ser definidos da forma que o usuário desejar. Este esquema permite que as equações do modelo sejam resolvidas simultaneamente sob qualquer número de grades computacionais com diferentes resoluções espaciais. Grades de maior resolução são utilizadas para modelar detalhes dos sistemas atmosféricos de menor escala. Já as de menor resolução (maiores) são utilizadas para modelar o ambiente destes sistemas menores e os sistemas atmosféricos de larga escala, os quais interagem com os sistemas de mesoescala resolvidos nas grades mais finas, fornecendo as condições de fronteira para as grades mais finas.

Além da geração de dados pelo próprio modelo BRAMS numa grade maior, a assimilação de dados em pontos de grade produzidos por modelos globais e dados observacionais de superfície e de ar superior para serem utilizados como condições iniciais e de contorno é possível por meio de um modelo de análise isentrópica denominado ISAN (*ISentropic ANalysis package*), inserido no BRAMS. Para a assimilação de dados de estações de superfície e sondagens, o BRAMS utiliza um método de análise objetiva, descrito por Barnes (1964). Para a assimilação de dados de superfície é definida uma altura de influência para estes dados. Até esta altura a análise é feita de forma que um peso maior é atribuído aos dados de superfície em relação aos dados da grade maior. A partir desta altura, os dados de superfície perdem a influência na análise.

A configuração de cada simulação com o BRAMS é feita através de um arquivo do tipo lista de variáveis, chamado RAMSIN, dividido em cinco partes. Na primeira parte são definidos o número de grades, o tamanho de cada grade e sua localização, o número de pontos de grade e seu espaçamento horizontal, o número de níveis verticais, de camadas de solo, o espaçamento vertical e tempo de simulação. Na segunda parte são definidos o tipo de condição inicial, homogênea (através do uso de uma sondagem) ou heterogênea (através do uso de análises, como as fornecidas pelo CPTEC ou NCEP), parâmetros relacionados com o *nudging* vertical e horizontal, frequência de geração de arquivos de saída, os arquivos de topografia, ocupação do solo e temperatura da superfície do mar. Na terceira parte são definidas as opções físicas e numéricas do modelo, tais como o tipo de condição de fronteira lateral, os parâmetros de radiação, convecção, difusão turbulenta e modelo de solo e microfísica. A quarta parte é destinada à inclusão de sondagens no caso de condição inicial homogênea. A quinta parte está relacionada com a impressão de resultados para verificação durante a simulação.

### 3.2 PARAMETRIZAÇÃO DE RADIAÇÃO

O BRAMS possui três esquemas radiativos: o esquema descrito por Chen e Cotton (1983), o esquema baseado em Mahrer e Pielke (1977) e o descrito por Harrington (1997).

O esquema de Mahrer e Pielke (1977) para a radiação de onda curta é um esquema simples, que considera o espalhamento por oxigênio, ozônio e dióxido de carbono de maneira empírica e trata a absorção por vapor d'água, além de considerar os efeitos da topografia. Para a radiação de onda longa este esquema avalia a emissão e absorção infravermelha do CO<sub>2</sub> e do vapor d'água, mas não trata nuvens ou material condensado, o que o torna indicado quando não há a presença de nuvens, sendo bastante eficiente para a execução e com baixo custo computacional.

O esquema de Chen e Cotton (1983) apresenta uma solução completa da equação de transferência radiativa para a radiação de onda curta. Para a radiação de onda longa, Chen e Cotton consideram um esquema de três bandas que parametriza os efeitos das nuvens, assim como ocorre no esquema de onda curta.

O esquema de Harrington (1997) é o mais completo, e por isso apresenta maior custo computacional. Neste esquema são ponderadas as diferentes fases da nuvem (diferenciando o efeito se houver somente água líquida ou presença de gelo), além de um perfil de ozônio que terá efeito na absorção da radiação solar.

Uma alternativa a estes esquemas radiativos é a utilização do modelo CARMA (TOON; TURCO; WESTPHAL, 1988; WESTPHAL; TOON; CARLSON, 1988; WESTPHAL; TOON, 1991), desenvolvido pelo Grupo de Modelagem de Aerossóis da Agência Espacial Americana (*NASA-Ames Research Center stratospheric aerosol model*). Este modelo destina-se à simulação dos processos de microfísica dos aerossóis atmosféricos, dentre os quais estão inclusos coagulação, crescimento, evaporação, nucleação, sedimentação, deposição seca, transporte vertical e horizontal, termodinâmica e transferência radiativa. A microestrutura das partículas é numericamente descrita através da divisão dos aerossóis em várias categorias de tamanho e tipo de partículas.

O CARMA resolve as equações de continuidade da concentração do número e volume de partículas de aerossóis e da concentração de água, a conservação de energia, de momento e a equação de transferência radiativa numa coluna atmosférica. A transferência radiativa é resolvida seguindo a aproximação descrita por Toon et al. (1989). As eficiências de espalhamento e absorção da radiação solar pelas partículas de aerossol são calculadas através de um código Mie para esferas estratificadas (TOON; ACKERMAN, 1981).

Dentre os esquemas radiativos apresentados, utilizou-se o de Chen e Cotton, por apresentar menor custo computacional relativo e fazer as considerações e aproximações suficientes para as necessidades do estudo em questão.

### **3.3 O MODELO DE SOLO/VEGETAÇÃO**

O modelo de interação solo-vegetação-atmosfera utilizado pelo BRAMS para a condição de fronteira inferior é o LEAF (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model* – WALKO et al., 2000), sendo alguns aspectos apresentados a seguir. Maiores informações podem ser encontradas em Walko et al. (2000), Freitas (2003) e Walko e Tremback (2005).

O modelo LEAF é um sub-modelo do BRAMS que avalia as trocas de energia e água na superfície da Terra e suas interações com a atmosfera. Este modelo representa aspectos da superfície, incluindo vegetação, solo, lagos e oceanos e suas influências uns sobre os outros e sobre a atmosfera. Inclui equações prognósticas para temperatura do solo e umidade em múltiplas camadas, temperatura da vegetação e água na superfície, abrangendo orvalho e precipitação interceptada e energia termal para múltiplas camadas, temperatura e razão de mistura do vapor d'água do ar do dossel. Os termos de troca nestas equações prognósticas incluem trocas turbulentas, condução de calor, difusão de água e percolação nas camadas do solo, transferências radiativas de onda curta e onda longa, transpiração e precipitação (WALKO; TREMBACK, 2005).

O LEAF possui a capacidade de representar variações em escala de subgrade das características de superfície, tais como tipo de vegetação, inclinação do terreno, tipos e umidade do solo e corpos d'água, que podem variar significativamente em curtas distâncias horizontais. Esta representação é feita subdividindo-se cada célula de grade da superfície em múltiplos *patches* ou superfícies de subgrade, em que cada *patch* apresenta suas próprias camadas de solo, vegetação e ar do dossel (exceto para corpos d'água), sendo as variáveis prognósticas evoluídas para todos estes componentes pelo *patch*. Nesta aproximação, todos os *patches* interagem com a mesma coluna de ar, cada um de acordo com a sua cobertura fracional, em vez de considerar um tipo predominante em cada célula de grade. Esta representação detalhada é importante, pois cada tipo de superfície responde às influências da atmosfera adjacente de uma maneira própria. Outro benefício é a habilidade de tratar unicamente para cada *patch* a precipitação simulada atingindo o solo.

O solo pode ser subdividido em vários níveis verticais, sendo que as várias camadas podem totalizar mais de 1 m de profundidade, dependendo do tipo de cobertura vegetal, possibilitando a representação da variabilidade vertical. Para cada camada de solo são prognosticados a energia interna e o conteúdo de umidade.

Atualmente, a versão utilizada no BRAMS é o LEAF 3, sendo o seu principal diferencial a inclusão do índice de vegetação normalizado (NDVI) para a definição dos parâmetros da vegetação, que permite uma variação sazonal das propriedades da vegetação. Nesta versão, o NDVI é utilizado para o cálculo de alguns parâmetros relacionados à vegetação, tais como, fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), índice de área de folhas verdes (GLAI), índice de área total (TAI) e comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ).

No LEAF 3, o conjunto de classes existentes foi reduzido para formar 21 classes de uso do solo, combinando classes aparentemente repetidas ou similares. Os documentos do GEF (*Global Ecosystems Framework* – OLSON, 1994), com suas referências cruzadas entre as tabelas de Olson, BATS (*Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* – DICKINSON et al., 1986) e SiB2 (SELLERS et al., 1996), foram utilizados para a combinação das classes de

uso do solo. Estas classes podem ser vistas em Walko e Tremback (2005) ou no próprio arquivo do tipo lista de variáveis do BRAMS, o RAMSIN.

No sub-modelo LEAF 3 ocorre a representação da superfície, incluindo-se uma descrição realista da biosfera sob os aspectos físicos e biológicos. Para cada ponto de grade devem ser prescritos os parâmetros biofísicos da superfície, admitidos como uma representação média do bioma e solo na área associada à grade. O ajuste dos parâmetros do tipo de bioma utilizados neste sub-modelo é importante para a reprodução adequada do ciclo diurno e sazonal da temperatura, umidade e vento em superfície, e dos fluxos de momentum, água e energia.

Conforme apresentado no capítulo anterior, a área atualmente reflorestada por eucaliptos no Vale do Paraíba foi inserida no modelo, bem como uma área hipotética de expansão do reflorestamento. Parâmetros biofísicos adequados às características do eucalipto também foram prescritos, conforme Rocha (2008) (informação verbal)<sup>9</sup>.

### 3.4 ESQUEMA PARA REPRESENTAÇÃO DO EFEITO URBANO

Ao contrário do que ocorre no sub-modelo LEAF em que se modificam os parâmetros da vegetação para a representação de áreas urbanas e suburbanas, no esquema *Town Energy Budget* (TEB) proposto por Masson (2000) utiliza-se uma geometria de *canyon* local, permitindo o refinamento dos balanços radiativos, momento, calor turbulento e fluxos de superfície através de um tratamento fisicamente mais apropriado. Este esquema foi detalhadamente apresentado por Freitas (2003), que também realizou o seu acoplamento com o modelo RAMS. A seguir são apresentadas algumas características do esquema TEB e as configurações utilizadas no presente estudo.

---

<sup>9</sup> Informação fornecida por Rocha, coordenador do Projeto Temático FAPESP nº. 02/09289-9 – “Interação Biosfera-Atmosfera Fase 2: Cerrados e Mudanças de Uso da Terra”, em 2008.

Conforme verificado por Rozoff et al. (2003), o esquema TEB apresenta desempenho superior ao LEAF para representação dos efeitos de ilha de calor urbana. Além disso, no TEB podem ser identificadas as contribuições veiculares e industriais nos fluxos de calor sensível e latente. Na RMSP a contribuição industrial é praticamente constante ao longo do tempo, conforme observações da CETESB (FREITAS et al., 2007), enquanto que as contribuições veiculares são variáveis visto que a quantidade de veículos em circulação na cidade não é constante durante o dia e a noite.

Khan e Silva (2001) desenvolveram um detalhado levantamento das fontes de calor antropogênicas da cidade de Brisbane, Austrália, incorporando as estimativas do consumo de gasolina e óleo diesel, utilização de eletricidade e dados populacionais. Desta forma, caracterizaram o ciclo diurno da cidade, composto por dois horários de pico. Uma abordagem semelhante foi utilizada por Freitas et al. (2007), que a fim de obter uma ilha de calor urbana mais realista, dividiram a RMSP em duas diferentes classes de uso do solo: tipo urbano 1, que contém predominantemente edifícios e abrange 400 km<sup>2</sup>; e tipo urbano 2, que compreende principalmente as regiões residenciais e industriais e abrange 1.097 km<sup>2</sup>. Os valores dos parâmetros atribuídos por estes autores foram corrigidos neste estudo, por se tratar de outro período do ano. Em estudo realizado por Sailor e Lu (2004), em que o perfil de aquecimento por fontes antropogênicas de diversas cidades norte-americanas foi realizado, observou-se que em Chicago, cuja densidade demográfica é similar à RMSP, o aquecimento por fontes antropogênicas atinge cerca de 75 W m<sup>-2</sup> no inverno, durante o pico da manhã. Considerando este valor, além dos estudos realizados por Freitas et al. (2007) relativos ao esquema TEB, inseriu-se no presente estudo uma terceira classe correspondente a todo o traçado da Rodovia Presidente Dutra. A Tabela 3.1 resume os principais parâmetros do esquema TEB para estas três classes de uso do solo. As demais áreas no domínio do modelo são parametrizadas pelo sub-modelo LEAF.

Tabela 3.1. Principais parâmetros para as três classes de uso do solo consideradas no esquema TEB.

Parâmetros	Urbano 1	Urbano 2	Dutra
Altura das construções (m)	50,0	5,0	0,1
Razão vertical/horizontal das construções	4,4	2,4	1,0
Comprimento de rugosidade - $Z_0$ (m)	3,0	0,5	0,01
Fonte veicular de calor sensível ( $W m^{-2}$ )	70,0	50,0	50,0
Fonte veicular de calor latente ( $W m^{-2}$ )	10,0	5,0	5,0
Fonte industrial de calor sensível ( $W m^{-2}$ )	20,0	30,0	-
Fonte industrial de calor latente ( $W m^{-2}$ )	30,0	50,0	-

### 3.5 A TOPOGRAFIA E A UMIDADE INICIAL DO SOLO

A topografia do modelo foi definida pelos dados globais disponibilizados pela *United States Geological Survey (USGS) – Earth Resources Observation System (EROS)*. A topografia para a região de estudo é apresentada na Figura 3.1.

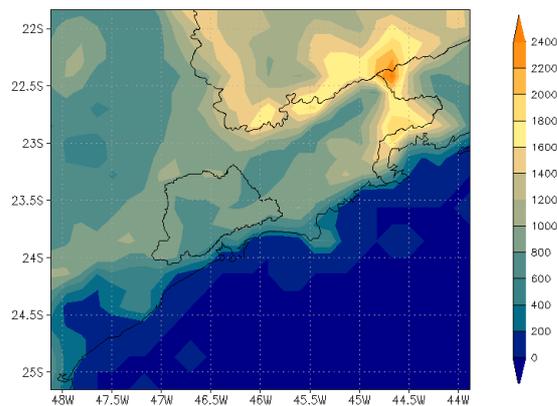


Figura 3.1. Topografia da região (m).

Com relação à umidade inicial do solo, foram definidas sete camadas de solo, estando a mais profunda a 5 m da superfície (Figura 3.2). Os valores iniciais de grau de saturação do solo são distribuídos horizontalmente de forma homogênea no modelo BRAMS, forçados sob uma condição de equilíbrio vertical do potencial total de água no solo (H) no instante inicial, ou seja,  $[(\partial H / \partial z)_{t=0} = 0]$ , conforme descrito em Rocha (1998). Um

equilíbrio do potencial total de água no solo no instante inicial é forçado, o que teoricamente anula os gradientes verticais.

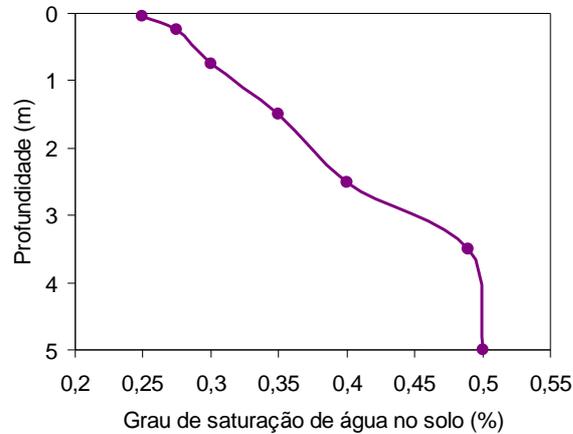


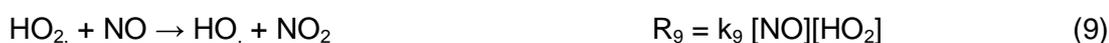
Figura 3.2. Perfil inicial do grau de saturação de água no solo (%).

Este parâmetro indica a razão entre o conteúdo de umidade do solo e o estado em que todos os espaços entre as partículas sólidas do solo estão preenchidos com água (solo totalmente saturado). Os valores iniciais de grau de saturação do solo foram adotados considerando-se a presença do reflorestamento de eucaliptos e a profundidade média de suas raízes, gerando maior ressecamento do solo nas camadas superficiais.

### 3.6 O MODELO FOTOQUÍMICO SIMPLIFICADO

O módulo fotoquímico do RAMS foi introduzido como parte do trabalho realizado no Projeto Temático FAPESP nº. 96/1403-4 – “Meteorologia e Poluição Atmosférica em São Paulo”. O primeiro passo no desenvolvimento de um módulo químico simplificado foi selecionar as principais reações de formação e degradação de ozônio na troposfera. Estas reações foram selecionadas com base no mecanismo químico SAPRC-99 (*Statewide Air Pollution Research Center*), desenvolvido por Carter (2000) e utilizado no modelo fotoquímico CIT (*Caltech Institute of Technology*), e são apresentadas a seguir (Equações 1-15).

## A) Reações Inorgânicas



## B) Reações Orgânicas



O símbolo RH representa todos os compostos orgânicos voláteis, menos CO e CO<sub>2</sub>; R<sub>1</sub> – R<sub>15</sub> são as velocidades de reação para cada reação química; [O<sub>2</sub>]<sub>0</sub> e [M]<sub>0</sub> significam as concentrações de oxigênio e do ar constantes e/ou igual à concentração inicial; os *k*'s são as constantes de velocidade e os *j*'s as constantes de fotólise.

Após a determinação das velocidades das reações, o passo seguinte é obter equações que descrevem a variação da concentração para cada espécie no tempo,  $d[A]/dt$ . Para algumas espécies foi aplicado o conceito de estado estacionário, ou seja, considerou-se que a concentração para as espécies O(<sup>3</sup>P), HO<sub>2</sub>·, O(<sup>1</sup>D) e RO<sub>2</sub>· não varia no tempo. De forma genérica:

$$\frac{d[A]}{dt} = 0 \quad (16)$$

Esta aproximação permite a determinação das seguintes equações diagnósticas

(Equações 17-23):

$$\begin{aligned} \frac{d[O_3]}{dt} = & +R_3 - R_4 - R_5 - R_6 - R_{10} - R_{18} = +k_3[O(^3P)][O_2]_0[M]_0 - \\ & k_4[O_3][NO] - k_5[O_3][NO_2] - j_6[O_3] - k_{10}[HO_2][O_3] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[NO]}{dt} = & -R_1 + R_2 - R_4 - R_9 - R_{12} = -k_1[NO][O_2]^{1/2} + \\ & j_2[NO_2] - k_4[O_3][NO] - k_9[HO_2][NO] - k_{12}[RO_2][NO] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[NO_2]}{dt} = & +R_1 - R_2 + R_4 - R_5 + R_9 + R_{12} = +k_1[NO][O_2]^{1/2} - j_2[NO_2] + \\ & k_4[O_3][NO] - k_5[O_3][NO_2] + k_9[HO_2][NO] + k_{12}[RO_2][NO] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{d[RH]}{dt} = -R_{11} = -k_{11}[RH][HO] \quad (20)$$

$$\frac{d[CO]}{dt} = -R_8 = -k_8[HO][CO] \quad (21)$$

$$\frac{d[RCHO]}{dt} = +R_{12} - R_{13} = +k_{12}[RO_2][NO] - k_{13}[RCHO][HO] \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{d[HO_2]}{dt} = & +R_8 - R_9 - R_{10} + R_{12} - 2R_{14} - R_{15} \\ = & +k_8[HO][CO] - k_9[HO_2][NO] - k_{10}[HO_2][O_3] + \\ & k_{12}[RO_2][NO] - 2k_{14}[HO_2][HO_2] - k_{15}[HO_2][RO_2] \end{aligned} \quad (23)$$

As Equações 17-23 representam a taxa de formação e consumo para as espécies  $O_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $RH$ ,  $CO$ ,  $RCHO$  e  $HO_2$ . As Equações 24-27 são as equações prognósticas para as demais espécies:

$$[O(^3P)] = \frac{j_2[NO_2]}{k_3[M]_0[O_2]_0} \quad (24)$$

$$[O(^1D)] = \frac{j_6[O_3]}{k_7[H_2O]} \quad (25)$$

$$[HO_2] = \frac{2k_7[H_2O][O(^1D)] + k_9[NO][HO_2] + k_{10}[HO_2][O_3]}{k_8[CO] + k_{11}[RH] + k_{13}[RCHO]} \quad (26)$$

$$[RO_2] = \frac{k_{11}[RH][HO_2]}{k_{12}[NO] + k_{15}[HO_2]} \quad (27)$$

As constantes de velocidade  $k$  foram calculadas e são corrigidas em função da temperatura, utilizando a equação de Arrhenius (Equação 28):

$$k(T) = Aa \left( \frac{T}{300} \right)^B e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (28)$$

sendo  $k$  a constante de velocidade,  $A$  a taxa com que as colisões ocorrem e que podem levar à reação,  $T$  a temperatura,  $B$  um fator de correção,  $E_a$  a energia de ativação e  $R$  a constante universal dos gases, igual a  $0,0019872 \text{ kcal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . Para algumas reações a correção de  $k$  deve ser feita também em função da pressão, pois esta dependência não pode ser desprezada.

A formação do ozônio está diretamente ligada à radiação solar. Portanto, é preciso considerar a variação da irradiância solar em cada ponto de grade e a conseqüente variação das constantes de fotólise ( $j$ ). As constantes de fotólise nas Equações 2 e 6 foram obtidas com base em Jacobson (1999). Os valores utilizados para  $j_2$  e  $j_6$  foram  $42,92 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$  e  $2,03 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ , respectivamente.

O conjunto de equações apresentado engloba os principais compostos envolvidos na formação do ozônio, o que é válido e pertinente para a situação do presente estudo, em que a inserção do reflorestamento de eucaliptos na região do Vale do Paraíba gera emissões de compostos orgânicos voláteis biogênicos, que acrescidos das emissões veiculares da

Rodovia Presidente Dutra e das emissões industriais e veiculares dos municípios do Vale do Paraíba, podem formar ozônio nesta região e em áreas próximas. Todas as considerações apresentadas no capítulo anterior referentes às emissões de eucaliptos, fontes móveis e fontes fixas urbanas foram inseridas no modelo fotoquímico, de forma a representar adequadamente as características do Vale do Paraíba.

### **3.7 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO BRAMS**

A figura seguinte resume algumas das opções numéricas e físicas do modelo BRAMS descritas até o momento. Dentre as definições da condição inicial, estão os dados de entrada, provenientes de reanálises, indicados na figura por setas direcionadas às grades. A sobreposição de grades representa o esquema de aninhamento múltiplo de grades, que permite a resolução simultânea de equações nas grades de diferentes resoluções, indicada pelas setas de duplo sentido entre as grades.

Entre as opções físicas do modelo está o esquema de microfísica de nuvens e o esquema de transferência radiativa. Na Figura 3.3 observa-se a interação entre radiação e nuvens.

É possível observar ainda algumas características do modelo de solo-vegetação, o LEAF 3, como a presença de diversas coberturas de solo em apenas uma célula de grade e as múltiplas camadas de solo.

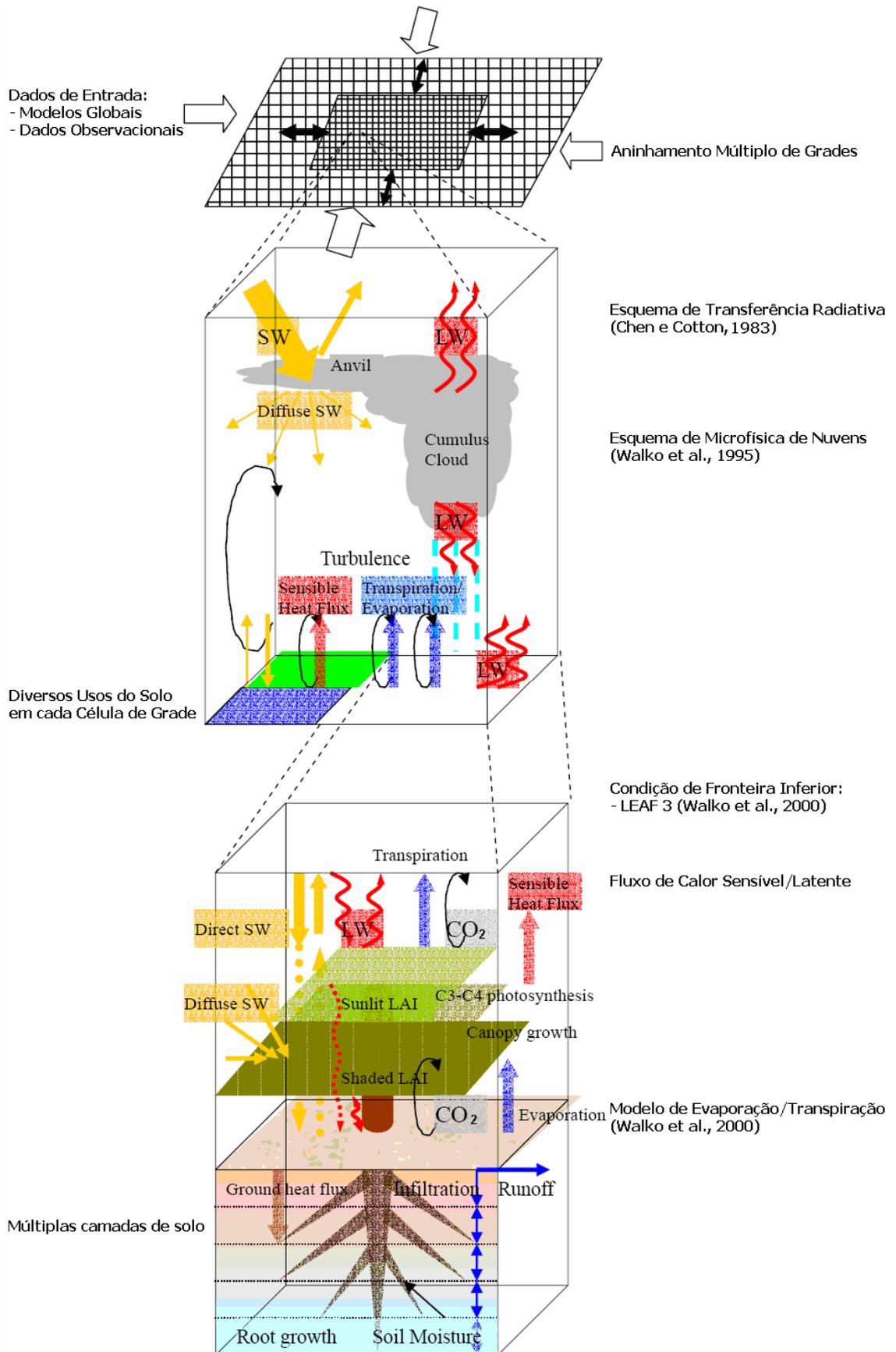


Figura 3.3. Representação esquemática do funcionamento do modelo BRAMS. Fonte: MATSUI; BELTRAN, 2003.

### 3.8 MÉTODO DA SEPARAÇÃO DE FATORES

A fim de avaliar a interação entre fatores, utilizou-se a separação de fatores, proposta por Stein e Alpert (1993). Este é um método simples utilizado para avaliar a interação entre vários fatores que influenciam a circulação atmosférica, também conhecido por planejamento fatorial (BARROS NETO; SCARMINO; BRUNS, 1995). Este método apresenta uma aproximação consistente e simples para isolar os campos resultantes devidos aos fatores envolvidos isolados e à interação entre os mesmos, por meio da combinação linear do número de simulações.

O valor de um campo previsto  $f$  depende das condições iniciais, de fronteira e dos processos físicos que favorecem sua evolução. Se uma variação contínua é feita em algum fator  $\psi$ , afetando a evolução do campo  $f$ , este campo resultante deverá, de forma geral, variar de uma maneira contínua. Ou seja, dado um campo  $f$  dependente de  $n$  fatores  $\psi_i$ , onde  $i = 1, 2, \dots, n$ . Cada fator é multiplicado por um coeficiente de mudança  $c_i$ , tal que  $f = f(c_1, c_2, c_3, \dots, c_n)$ .

A função  $f$  pode ser expandida em série de Taylor, conforme Equação 29:

$$f(c_1, c_2, \dots, c_n) = \hat{f}_0 + \sum_{i=1}^n \hat{f}_i(c_i) + \sum_{i,j=1,2}^{n-1,n} \hat{f}_{ij}(c_i, c_j) + \sum_{i,j,k=1,2,3}^{n-2,n-1,n} \hat{f}_{ijk}(c_i, c_j, c_k) + \dots + \hat{f}_{123\dots n}(c_1, c_2, c_3, \dots, c_n) \quad (29)$$

Aqui,  $\sum_{i,j=1,2}^{n-1,n}$  é a soma de todos os pares ordenados possíveis,  $\sum_{i,j,k=1,2,3}^{n-2,n-1,n}$  é a soma de todos os trios ordenados possíveis, e assim sucessivamente. Cada função  $\hat{f}_{ijk\dots}(c_i, c_j, c_k, \dots)$  torna-se zero se qualquer uma de suas variáveis  $c_i$  for nula. Usando uma notação em que  $f_{ij}$  é o valor de  $f$  em uma simulação onde  $c_i = c_j = 1$ , com o restante dos

coeficientes nulos, e atribuindo  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) tanto para 1 ou 0 na Equação 29, pode-se escrever o conjunto de Equações 30-34:

$$f_0 \equiv f(0, 0, 0, \dots, 0) = \hat{f}_0 \quad (30)$$

$$f_i = \hat{f}_i + \hat{f}_0 \quad (31)$$

$$f_{ij} = \hat{f}_{ij} + \hat{f}_i + \hat{f}_j + \hat{f}_0 \quad (32)$$

$$f_{ijk} = \hat{f}_{ijk} + \hat{f}_{ij} + \hat{f}_{jk} + \hat{f}_{ik} + \hat{f}_i + \hat{f}_j + \hat{f}_k + \hat{f}_0 \quad (33)$$

$$f_{123\dots n} = \hat{f}_{123\dots n} + \dots + \sum_{i,j,k=1,2,3}^{n-2,n-1,n} \hat{f}_{ijk} + \sum_{i,j=1,2}^{n-1,n} \hat{f}_{ij} + \sum_{i=1}^n \hat{f}_i + \hat{f}_0 \quad (34)$$

O sistema de Equações (30-34) contém  $\binom{n}{0}, \binom{n}{1}, \binom{n}{2}, \dots, \binom{n}{n}$  equações, respectivamente, e  $\hat{f}_{ij}$  é uma abreviação para  $\hat{f}_{ij}(1,1)$ , aplicando-se a todos os outros termos. Este sistema de equações consiste de  $2^n$  equações para  $2^n$  incógnitas  $\hat{f}_0, \hat{f}_1, \dots, \hat{f}_n, \hat{f}_{12}, \dots, \hat{f}_{n-1,n}, \dots, \hat{f}_{123\dots n}$ . Este sistema de equações é resolvido pela eliminação recursiva de  $\hat{f}_i$  da Equação (31), seguido da eliminação de  $\hat{f}_{ij}$  da Equação 32, e assim sucessivamente. A solução geral é apresentada na Equação 35:

$$\hat{f}_{i_1, i_2, i_3, \dots, i_l} = \sum_{m=0}^l (-1)^{l-m} \left( \sum_{\substack{j_1, j_2, \dots, j_m = i_1, i_2, \dots, i_m \\ i_{l-m+1}, i_{l-m+2}, \dots, i_l}} f_{j_1, j_2, j_3, \dots, j_m} \right) \quad (35)$$

onde a soma  $\sum_{\substack{j_1, j_2, \dots, j_m = i_1, i_2, \dots, i_m \\ i_{l-m+1}, i_{l-m+2}, \dots, i_l}}$ , engloba todos os grupos de  $m$  índices  $j_1, j_2, j_3, \dots, j_m$ , escolhidos de  $l$  índices  $i_1, i_2, i_3, \dots, i_l$ , onde  $0 \leq l \leq n$ . Por exemplo, no caso de três fatores, a Equação 35 produz oito  $\binom{2^n}{2}$  equações (Equações 36-43):

$$\hat{f}_0 = f_0 \quad (36)$$

$$\hat{f}_1 = f_1 - f_0 \quad (37)$$

$$\hat{f}_2 = f_2 - f_0 \quad (38)$$

$$\hat{f}_3 = f_3 - f_0 \quad (39)$$

$$\hat{f}_{12} = f_{12} - (f_1 + f_2) + f_0 \quad (40)$$

$$\hat{f}_{13} = f_{13} - (f_1 + f_3) + f_0 \quad (41)$$

$$\hat{f}_{23} = f_{23} - (f_2 + f_3) + f_0 \quad (42)$$

$$\hat{f}_{123} = f_{123} - (f_{12} + f_{13} + f_{23}) + (f_1 + f_2 + f_3) - f_0 \quad (43)$$

Para este exemplo com três fatores são necessárias oito simulações para completar a solução. Os resultados não teriam apenas os fatores de separação para  $\hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{f}_3$ , mas também todas as possíveis combinações destes fatores, ou seja,  $\hat{f}_{12}, \hat{f}_{13}, \hat{f}_{23}, \hat{f}_{123}$ . O fator  $\hat{f}_{123}$ , por exemplo, é a contribuição devido à interação tripla isolada entre os três fatores que estão sendo avaliados.

### 3.9 DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS UTILIZADOS

A fim de avaliar os efeitos da expansão do reflorestamento por eucaliptos no Vale do Paraíba foram explorados seus efeitos sobre as circulações locais, fluxos de superfície e a qualidade do ar regional. Para tanto, avaliaram-se o impacto do tráfego da Rodovia Presidente Dutra e das emissões biogênicas, por meio de uma extensa expansão das áreas reflorestadas por eucaliptos. Entende-se por “Dutra” o efeito da zona urbanizada ao longo da Rodovia Presidente Dutra. As áreas urbanas, e desta forma, as emissões provenientes do tráfego urbano e indústrias, estiveram presentes em todas as simulações.

Para a análise desses efeitos utilizou-se a metodologia de separação de fatores proposta por Stein e Alpert (1993). Conforme apresentado anteriormente, para  $n$  fatores envolvidos são necessários  $2^n$  ensaios, podendo ser avaliada a contribuição de cada fator, a interação entre os dois fatores e a ausência de ambos os fatores. Considerando os dois fatores apresentados (Dutra e eucaliptos), foram, portanto necessários quatro ensaios (Tabela 3.2):

Tabela 3.2 - Configurações dos ensaios para avaliação dos efeitos sobre as circulações locais e a qualidade do ar regional.

Ensaio	Presença da rodovia	Presença do reflorestamento
1	Sem rodovia	Sem reflorestamento
2	Com rodovia	Sem reflorestamento
3	Sem rodovia	Com reflorestamento
4	Com rodovia	Com reflorestamento

Para cada um dos ensaios criou-se um arquivo de uso do solo específico, sendo que no primeiro foi excluída a área ocupada pela Dutra e a área ocupada por eucaliptos, sendo ambas substituídas por pastagens. Este ensaio foi denominado `sem_dut_sem_euc` e pode ser considerada a simulação controle, a partir da qual foram feitas alterações. No segundo ensaio foram inseridas as emissões da Dutra, e manteve-se a cobertura de pastagem nas áreas reflorestadas por eucaliptos. Este ensaio foi denominado `com_dut_sem_euc`. No terceiro ensaio substituíram-se as áreas da Dutra por pastagem e inseriram-se as áreas reflorestadas por eucaliptos, considerando a sua expansão. Este ensaio foi denominado `sem_dut_com_euc`. Por fim, no quarto ensaio foram inseridas a Dutra e as áreas reflorestadas por eucaliptos, e este ensaio foi denominado `com_dut_com_euc`. Os quatro cenários apresentados são ilustrados na Figura 3.4.

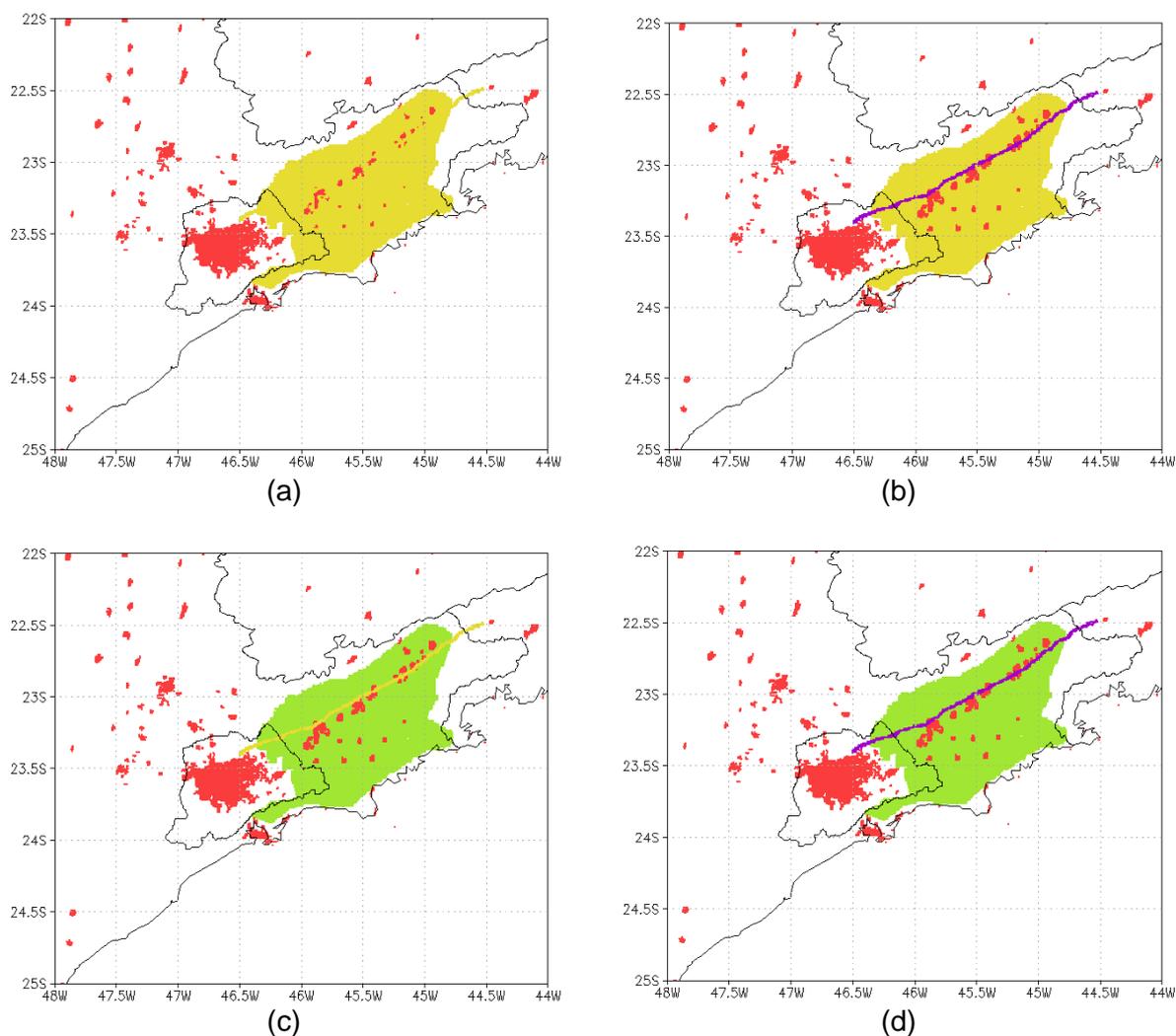


Figura 3.4. Cenários criados para avaliação dos impactos decorrentes da alteração da cobertura do solo: (a) sem\_dut\_sem\_euc, (b) com\_dut\_sem\_euc, (c) sem\_dut\_com\_euc e (d) com\_dut\_com\_euc. As cores vermelha, verde, amarela e roxa correspondem a áreas urbanas, eucaliptos, pastagem e rodovia, respectivamente.

### 3.10 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Para discutir a significância estatística dos impactos da alteração na cobertura do solo e avaliá-los quantitativamente foram utilizados alguns parâmetros estatísticos, que serão apresentados juntamente com as análises das validações do modelo. As definições destes parâmetros são expostas neste item.

Para o cálculo dos parâmetros estatísticos são usados dados simulados e observados. Nos horários em que não houve observações ( $X_{obs} < 0$ ), também não são

considerados os valores simulados correspondentes. Desta forma, o número de observações ( $N_{obs}$ ) se iguala ao de simulações ( $N_{sim}$ ).

A dispersão ou variação é o grau em que os dados numéricos tendem a dispersar-se em torno de um valor médio. Dispõe-se de várias medidas de dispersão, dentre as quais está o desvio padrão. O desvio padrão de um conjunto de  $N$  números  $X_1, X_2, \dots, X_N$  é representado por  $\sigma$  e definido na Equação 44:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{(N - 1)}} \quad (44)$$

em que  $(X - \bar{X})$  representa o desvio de cada um dos números  $X_j$  em relação à média  $\bar{X}$ .

Então,  $\sigma$  é o desvio da raiz média quadrática. Especificamente para os dados observados ( $\sigma_{obs}$ ) e simulados ( $\sigma_{sim}$ ), tem-se (Equações 45 e 46):

$$\sigma_{obs} = \sqrt{\frac{1}{(N_{obs} - 1)} \sum (X_{obs} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (45)$$

$$\sigma_{sim} = \sqrt{\frac{1}{(N_{sim} - 1)} \sum (X_{sim} - \bar{X}_{sim})^2} \quad (46)$$

A covariância de um conjunto de dados (Equação 47) é definida como o quadrado do desvio padrão e representa quão longe os seus valores se encontram do valor esperado.

$$\sigma^2 = \sum (X_{sim} - \bar{X}_{sim})(X_{obs} - \bar{X}_{obs}) \quad (47)$$

O coeficiente de correlação (Equação 48) é um método útil para o cálculo do grau da correlação entre duas variáveis, como por exemplo, variáveis simuladas e observadas, por meio da razão entre a covariância das duas variáveis e os produtos de seus desvios padrões. Assume valores entre  $-1$  e  $+1$ . Quando é igual a  $+1$  indica uma correlação

positiva perfeita entre as duas variáveis; quando igual a  $-1$  indica uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, ou seja, se uma aumenta, a outra diminui. Se o coeficiente é igual a zero, as duas variáveis não são linearmente dependentes entre si, podendo existir uma dependência não-linear.

$$Coef\_cor = \frac{\sum (X_{sim} - \overline{X_{sim}})(X_{obs} - \overline{X_{obs}})}{N_{obs} - 1} \quad (48)$$

$$\sqrt{\frac{1}{(N_{obs} - 1)} \sum (X_{obs} - \overline{X_{obs}})^2} \sqrt{\frac{1}{(N_{sim} - 1)} \sum (X_{sim} - \overline{X_{sim}})^2}$$

Outra opção para avaliar a concordância entre dados observados e simulados é o índice de concordância utilizado por Elbir (2003) (Equação 49), que em seu estudo comparou dados de qualidade do ar e simulações na Turquia e é definido por:

$$\acute{I}nd\_conc = 1 - \frac{\sum (X_{sim} - X_{obs})^2}{\sum (|X_{sim} - \overline{X_{obs}}| + |X_{obs} - \overline{X_{obs}}|)^2} \quad (49)$$

Embora coeficientes de correlação avaliem a relação linear entre variáveis simuladas e observadas, tal análise não indica tendências. Um método complementar útil é o erro médio ( $ME$ ), dado pela Equação 50:

$$ME = \frac{1}{N_{obs}} \sum (X_{sim} - X_{obs}) \quad (50)$$

Esta é uma expressão que indica a tendência da simulação. Para avaliar a exatidão de uma simulação, pode-se empregar o erro quadrático médio ( $MSE$ ) (Equação 51):

$$MSE = \frac{1}{N_{obs}} \sum (X_{sim} - X_{obs})^2 \quad (51)$$

Neste caso, altos valores indicam elevado nível de discrepância entre as simulações e observações. A raiz quadrada do  $MSE$  ( $RMSE$ ) representa a magnitude típica do erro de simulação e tem a mesma dimensão da variável original.

Pielke (2002) apresenta outro parâmetro, o  $RMSE_{UB}$ , para avaliar o “*skill*” de uma simulação, que pode ser traduzido por ‘habilidade’ ou ‘destreza’ e é definido na Equação 52:

$$RMSE_{UB} = \left\{ \frac{1}{N_{obs}} \sum [(X_{sim} - \overline{X_{sim}}) - (X_{obs} - \overline{X_{obs}})]^2 \right\}^{1/2} \quad (52)$$

Os parâmetros estatísticos apresentados são utilizados para avaliar a destreza das simulações. De acordo com Pielke (2002), uma simulação possui alto índice de destreza se forem satisfeitas as seguintes condições: 1.  $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$ ; 2.  $RMSE < \sigma_{obs}$ ; 3.  $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$ . Estas condições serão observadas na validação do modelo.

### 3.11 VALIDAÇÃO DO MODELO

Apresentam-se nesta seção os resultados de simulações realizadas com o propósito de validação e avaliação do modelo. Para validar o modelo em relação aos fluxos de superfície, utilizaram-se dados provenientes de uma estação de monitoramento instalada em uma plantação de eucaliptos, observados por Cabral et al. (2007)<sup>10</sup>. Os dados empregados foram dados de fluxos de calor latente ( $LE$ ), sensível ( $H$ ), radiação de onda curta ( $OC$ ) e onda longa ( $OL$ ). Já para a validação do modelo em relação às emissões de poluentes, foram empregados dados observados nas estações automáticas da CETESB localizadas em São José dos Campos e na Região Metropolitana de São Paulo (CETESB, 2008 e 2009a).

---

<sup>10</sup> Os autores disponibilizaram os dados referentes ao período estudado.

O período considerado para as simulações de validação dos fluxos de superfície foi entre 28 de julho e 08 de agosto de 2006 e para as simulações de validação das emissões de poluentes foi entre 28 de julho e 06 de agosto de 2005. O período do ano de 2006 foi escolhido devido à disponibilidade dos dados para validação dos fluxos de superfície; entretanto, não é um período livre da atuação de sistemas frontais sobre o Estado de São Paulo, o que prejudicaria o estudo das emissões de poluentes. Desta forma, utilizou-se o mesmo período do ano de 2005 para este estudo. Este período apresentou condições de tempo favoráveis para as análises pretendidas, visto que na maioria dos dias o Estado de São Paulo não recebia a influência de sistemas frontais, conforme pode ser observado na Figura 3.5.

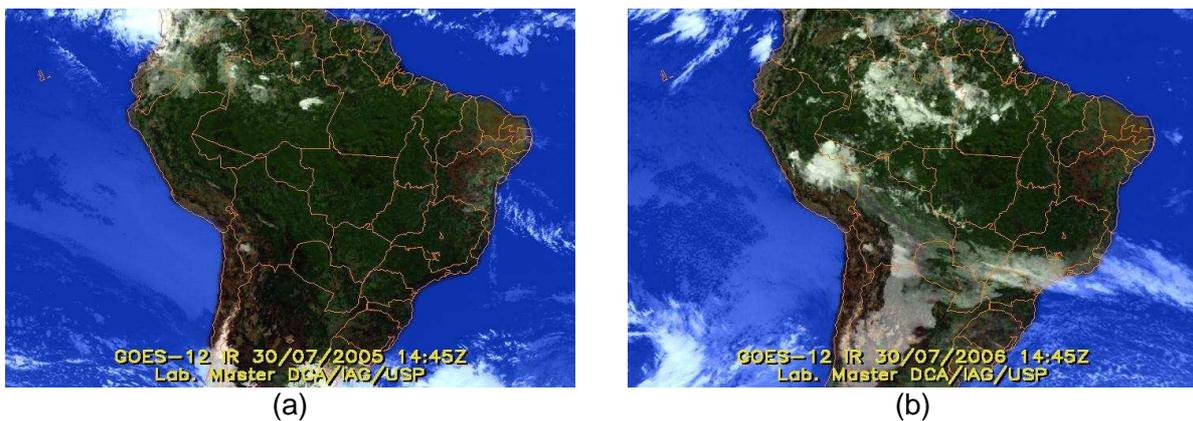


Figura 3.5. Imagens de satélite Goes-12 IR de (a) 30/07/2005 e (b) 30/07/2006, às 14:45Z.

Fonte: LABORATÓRIO DE METEOROLOGIA APLICADA A SISTEMAS DE TEMPO REGIONAIS, 2009.

### 3.11.1 CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES PARA VALIDAÇÃO

Ambas as simulações foram configuradas com duas grades aninhadas, sendo a grade 1 com resolução de 16 km e a grade 2 com resolução de 4 km. A grade 1 foi centrada em  $23,5^{\circ}$  S –  $46,0^{\circ}$  W e possuía 28 pontos na direção E-W e 24 pontos na direção N-S; a grade 2 foi centrada em  $23,6^{\circ}$  S –  $46,25^{\circ}$  W e continha 78 pontos na direção E-W e 70 na direção N-S. A grade 1 é pequena e tem o objetivo principal de capturar as características

principais do escoamento sinótico e transferir as informações para a grade 2, de alta resolução.

Para as condições iniciais e de fronteira foram utilizados campos meteorológicos obtidos das análises do NCEP, com 1º de resolução espacial e 6 h de resolução temporal. O passo de tempo do forçamento correspondeu aos horários sinóticos (00, 06, 12 e 18Z), enquanto que a frequência de saída de resultados da simulação foi horária, a partir das 00Z. Informações específicas das simulações estão resumidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Principais configurações empregadas nas simulações de validação.

Parâmetros	Configurações das simulações	
	Validação_poluentes	Validação_fluxos
Simulações	Validação_poluentes	Validação_fluxos
Início da integração	28/07/2005	28/07/2006
Duração da integração (dias)	10	12
Cenário	com_dut_com_euc	
Número de grades	2	
Pontos das grades em E-W	28 (78)	
Pontos das grades em N-S	24 (70)	
Resolução (km)	16 (4)	
Inicialização do grau de saturação do solo	Homogêneo	
Parametrização de radiação	Chen e Cotton	
Nível de microfísica	3	
Modelo fotoquímico	ativado	Desativado
Condição inicial	heterogênea (reanálises do NCEP)	

A simulação realizada para validação das concentrações de poluentes apresentou o modelo fotoquímico ativado. Para evitar que a simulação iniciasse com a atmosfera limpa, o dia anterior foi previamente simulado e utilizado como condição inicial para as concentrações de poluentes, tal como em Freitas et al. (2005). Para a consideração das emissões de poluentes provenientes do VP partiu-se dos dados apresentados anteriormente. Entretanto, foi preciso ajustá-los, uma vez que em estudos preliminares observou-se uma tendência a subestimar as concentrações dos poluentes efetivamente medidos pela CETESB.

O arquivo de uso do solo utilizado é aquele que contempla a presença da Rodovia Presidente Dutra e vizinhanças urbanizadas e a área de expansão dos reflorestamentos de

eucaliptos (o cenário “com\_dut\_com\_euc”). Como os dados disponíveis das áreas efetivamente ocupadas por eucaliptos estão desatualizados, preferiu-se considerar a área amplamente reflorestada para a validação do modelo, estimando-se que grande parte do Vale do Paraíba venha a ser realmente ocupada por eucaliptos.

### 3.11.2 COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES E DADOS OBSERVADOS: AVALIAÇÃO DOS FLUXOS DE SUPERFÍCIE

Como não há medidas dos fluxos de superfície dentro da região do Vale do Paraíba para avaliação do modelo numérico, utilizaram-se os dados de uma estação que monitora plantações de eucaliptos, localizada em 21°35'S e 47°36'W, a cerca de 250 km a noroeste do Município de São José dos Campos (Figura 3.6). Compararam-se então os dados observados a aqueles resultantes de simulações sobre o Vale do Paraíba, considerando certas similaridades, como a densidade de árvores plantadas em ambas as regiões.



Figura 3.6. Localização da estação de monitoramento em plantação de eucaliptos, em relação ao Município de São José dos Campos.

Fonte: GOOGLE EARTH, 2009.

No início da simulação ocorrem alguns ajustes, principalmente da umidade do solo. Os perfis de umidade do solo em São José dos Campos, sobre a Rodovia Presidente Dutra e sobre a área de reflorestamento de eucaliptos, considerando o período completo de 12 dias, são apresentados a seguir (Figura 3.7).

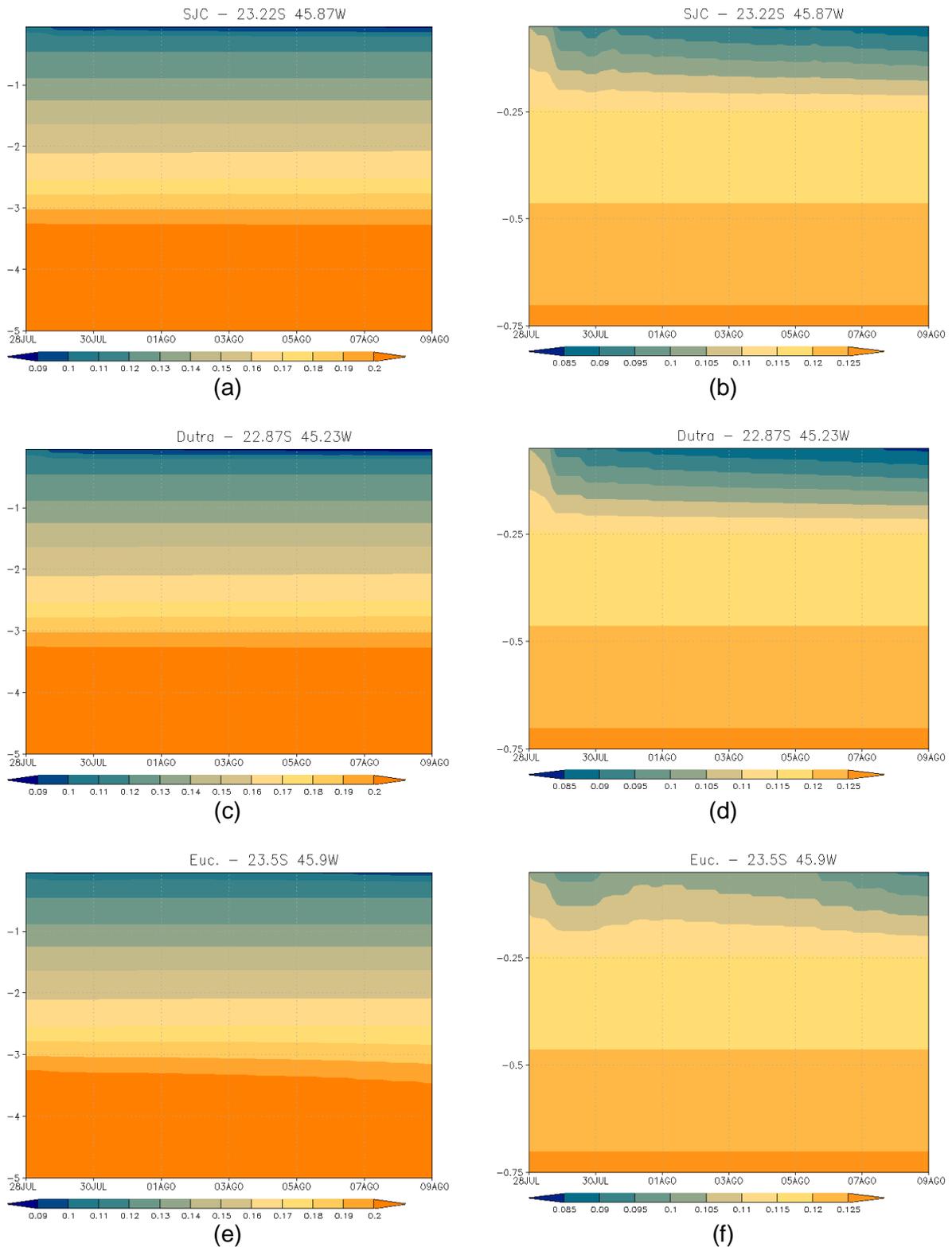


Figura 3.7. Perfis de umidade do solo ( $m^3 m^{-3}$ ) durante o período de 28/07 a 08/08/2006, (a) e (b) na área urbana de São José dos Campos, (c) e (d) sobre a Rodovia Presidente Dutra, e (e) e (f) sobre a área reforestada por eucaliptos, considerando respectivamente as profundidades de 0 a 5 m e de 0 a 0,75 m nos pontos avaliados.

Na área urbana e rodovia as alterações ocorrem nos primeiros 50 cm de profundidade durante todo o período. Somente na área de reflorestamento ocorrem alterações próximo à superfície e também entre 2,5 e 3,5 m de profundidade, devido à extração de água pelas raízes. Observando-se os perfis próximos à superfície, nota-se que no primeiro dia ocorrem ajustes, sendo razoável desconsiderar os dois primeiros dias para a análise das simulações. Desta forma, realizou-se o cálculo das médias horárias dos fluxos de superfície para os dez dias subseqüentes (30/07 – 08/08/06), apresentados nas figuras seguintes, em que constam os fluxos médios horários de calor sensível (Figura 3.8), latente (Figura 3.9) e razão de Bowen (Figura 3.10) durante o referido período. Não foi definida uma escala comum às figuras, para que todas as alterações pudessem ser melhor observadas.

Nota-se que durante a noite o calor sensível mantém-se entre  $-20$  e  $10 \text{ W m}^{-2}$  no VP, com exceção das áreas urbanas; os valores negativos indicam que calor está sendo perdido pela atmosfera devido ao resfriamento. Nas áreas urbanas do Vale do Paraíba e também na RMSP observam-se valores de calor sensível entre  $20$  e  $40 \text{ W m}^{-2}$ , maiores do que em seus arredores, o que está de acordo com o fato de as cidades serem fontes de calor durante a noite, resultantes da concentração de edificações e escassez de corpos d'água e vegetação. Às 12Z a região do Vale do Paraíba passa a apresentar fluxo de calor sensível entre  $60$  e  $180 \text{ W m}^{-2}$  (Figura 3.8-c). Às 15Z atingem-se os valores máximos de calor sensível sobre áreas reflorestadas do VP (entre  $200$  e  $350 \text{ W m}^{-2}$ ), inclusive nas áreas urbanas. É importante ressaltar que o baixo albedo das áreas reflorestadas aumenta significativamente a quantidade de energia solar absorvida. A partir deste instante, o fluxo de calor sensível sobre os eucaliptos passa a diminuir, atingindo os mesmos valores anteriormente observados para o período noturno. Observa-se que a diminuição do calor sensível ocorre em função do aumento do calor latente. As áreas urbanas ainda mantêm valores mais elevados por algumas horas devido ao efeito associado às fontes antropogênicas de calor.

Durante a noite, o fluxo de calor latente permanece entre  $-10$  e  $10 \text{ W m}^{-2}$  sobre o Vale do Paraíba e demais regiões do interior do estado (Figura 3.9-a-b), com exceção das áreas urbanas. Devido à consideração de constante operação de indústrias em áreas

urbanas assumida pelo modelo, nota-se que estas áreas apresentam fluxo de calor latente maior do que as áreas adjacentes ou de reflorestamento durante a noite, atingindo valores entre 40 e 70 W m<sup>-2</sup>. A partir das 12Z observa-se que sobre o Vale do Paraíba e RMSP concentram-se valores de fluxo de calor latente relativamente maiores do que em seus arredores, o que se mantém durante a tarde. O interior do Estado, onde a principal cobertura vegetal é o pasto e a agricultura, perde menos umidade para a atmosfera, gerando menores valores de  $LE$  (inferiores a 30 W m<sup>-2</sup>). Já a cobertura vegetal mais úmida da área de reflorestamento gera maiores taxas de evaporação e, portanto, existe ali um fluxo de calor latente maior, variável entre 120 e 320 W m<sup>-2</sup>, com exceção das áreas urbanas. Nas áreas urbanas o modelo considera que toda a água precipitada é desviada para tubulações subterrâneas e, portanto, não evapora e não afeta o fluxo de calor latente, que permanece abaixo de 90 W m<sup>-2</sup>, exatamente como durante o período noturno, quando o modelo assume constante operação de indústrias em áreas urbanas. Também para a Rodovia Presidente Dutra é feita esta consideração de operação constante pelo modelo, em função da alta urbanização ao redor da rodovia, gerando um fluxo de calor latente aproximadamente constante durante dia e noite. Durante a noite, este fluxo é similar aos arredores da rodovia, mas durante o dia passa a ser inferior.

Quanto à razão de Bowen, durante a noite (horários das 00Z e 06Z), seus valores sobre as áreas reflorestadas são bastante variados, por resultarem de uma razão entre dois fatores que apresentam valores bastante baixos neste período ( $H$  e  $LE$ ). Já durante o dia (horários das 12Z, 15Z e 18Z), a razão de Bowen torna-se positiva sobre o Vale do Paraíba. Entretanto, apresenta valores variáveis em torno da unidade, sendo menores do que 1 na porção norte do vale, às 18Z. Neste instante a maior parte da energia disponível na região norte do VP é utilizada nos processos de evapotranspiração do ar, ou seja, em  $LE$ , sendo que entre 12Z e 15Z grande parte da energia disponível em praticamente todo o VP é utilizada no aquecimento e resfriamento do ar, ou seja, em  $H$ . Sobre a Dutra observam-se valores superiores a 5 de razão de Bowen entre as 15Z e 18Z, o que coincide com valores muito baixos de calor latente e maiores de calor sensível nestes horários (Figura 3.10-d-e).

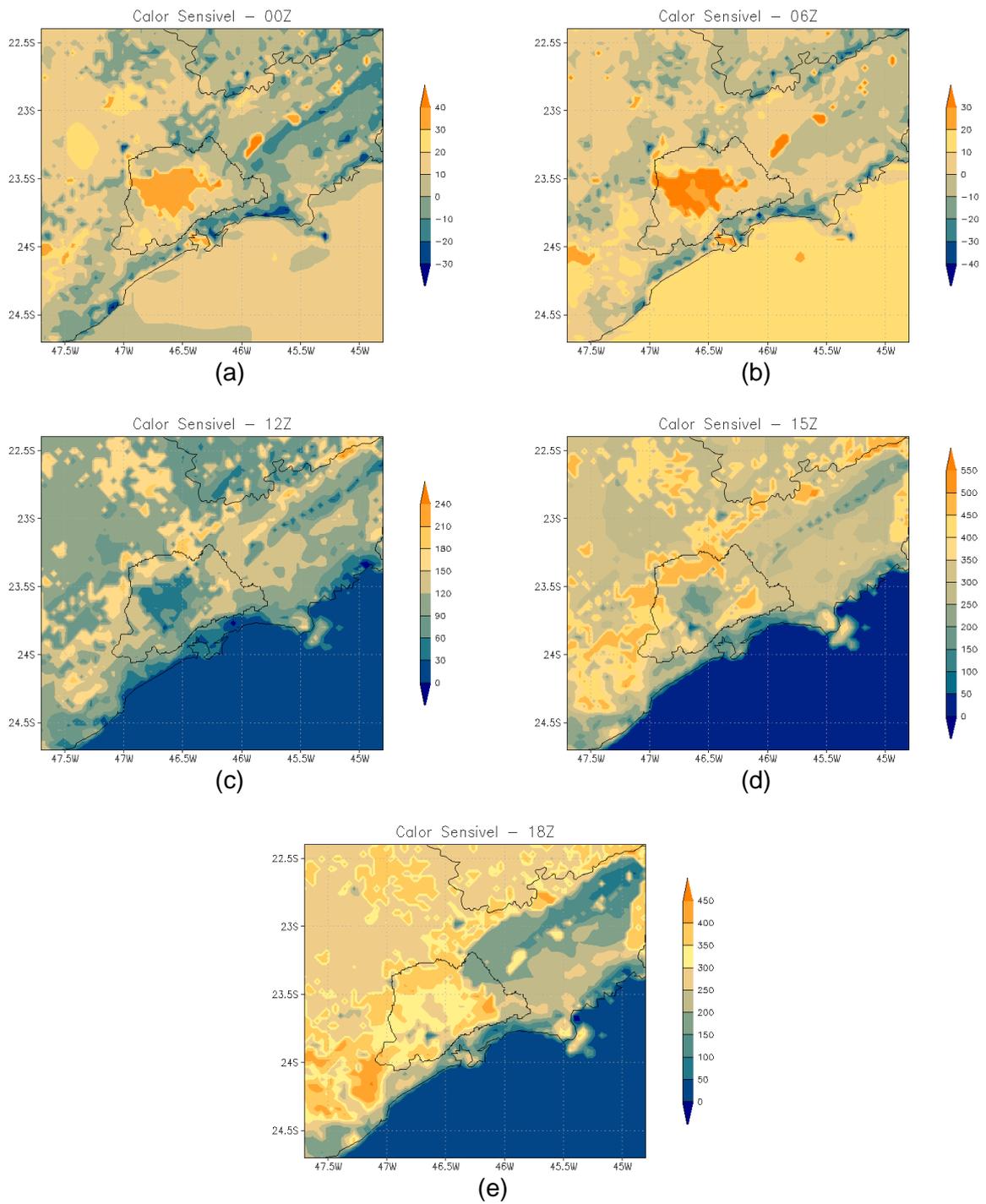


Figura 3.8. Fluxo médio horário de calor sensível ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 para os horários (a) 00Z, (b) 06Z, (c) 12Z, (d) 15Z e (e) 18Z.

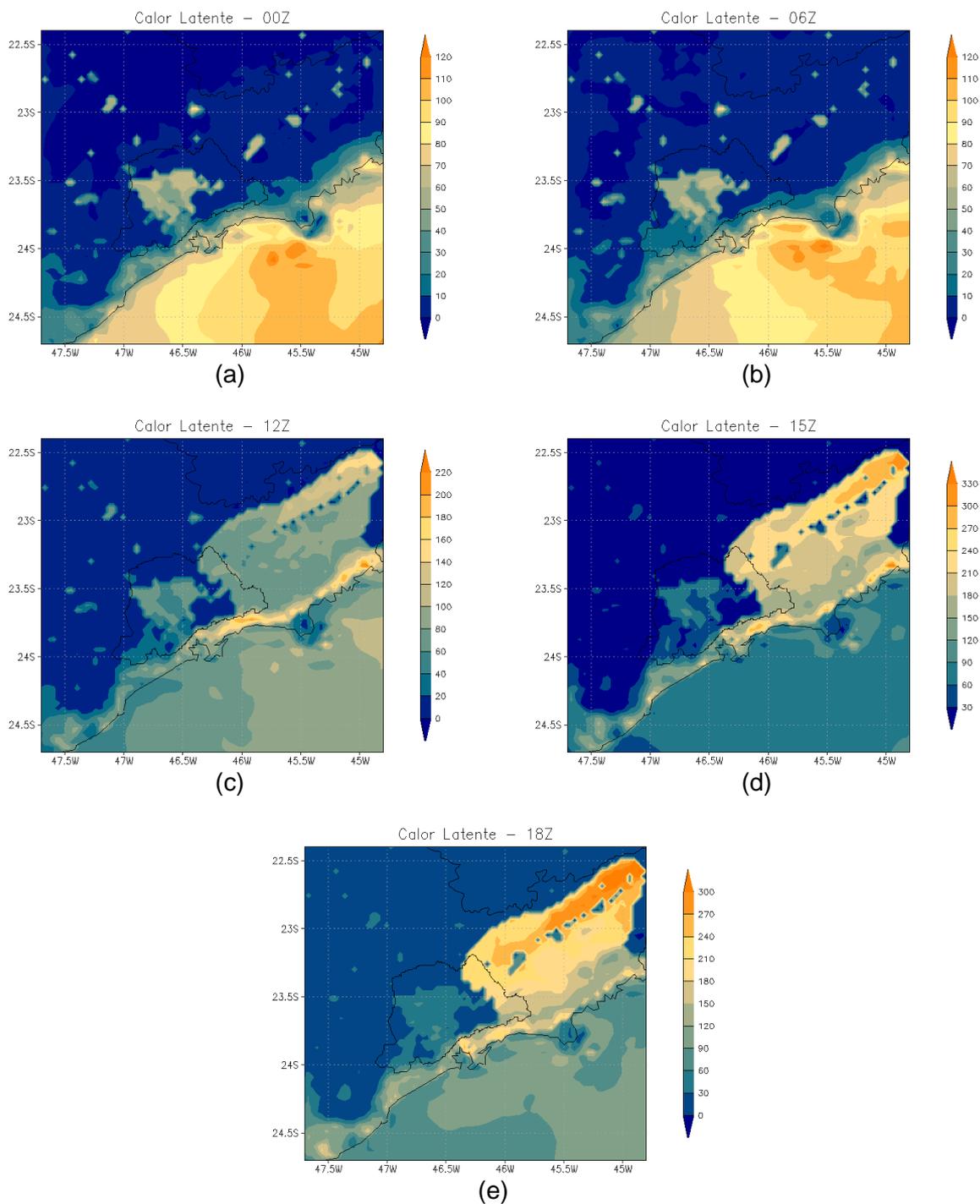


Figura 3.9. Fluxo médio horário de calor latente ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 para os horários (a) 00Z, (b) 06Z, (c) 12Z, (d) 15Z e (e) 18Z.

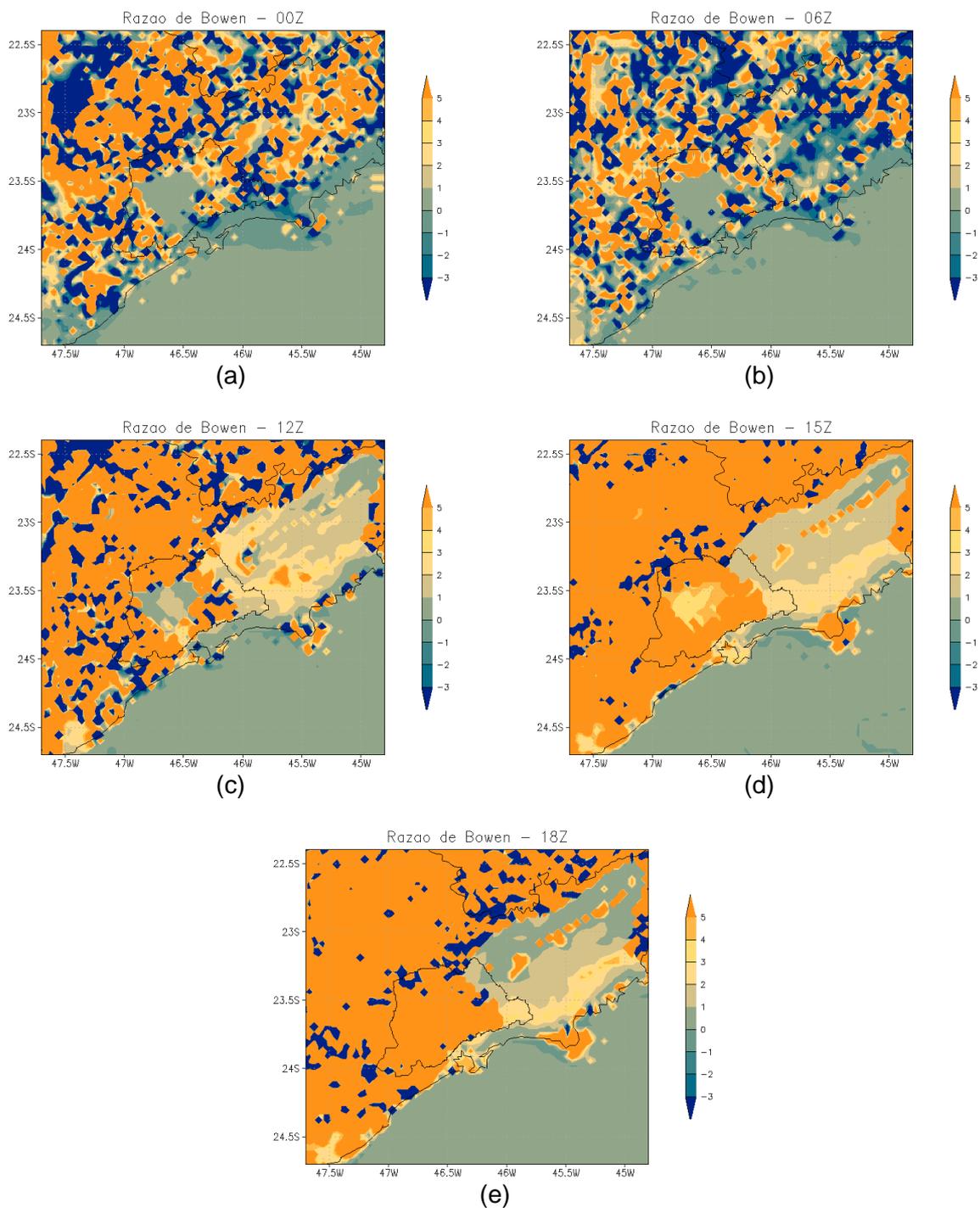


Figura 3.10. Fluxo médio horário de razão de Bowen para o período de 30/07 a 08/08/2006 para os horários (a) 00Z, (b) 06Z, (c) 12Z, (d) 15Z e (e) 18Z.

Considerando a média da razão de Bowen para o período simulado observam-se novamente valores menores do que a unidade na porção norte do vale e maiores do que a unidade na porção central e sul, sugerindo que parte da energia disponível é utilizada principalmente nos processos de evapotranspiração do ar e parte nos processos de aquecimento e resfriamento do ar, respectivamente (Figura 3.11). Sobre a Rodovia Presidente Dutra e vizinhanças observam-se valores de Razão de Bowen superiores a 5, enquanto que nas áreas urbanas os valores estão entre 2,5 e 3,5, indicando que também nestas regiões a energia disponível é principalmente empregada no calor sensível. A média da Razão de Bowen observada para o período na estação de monitoramento por Cabral et al. (2007) foi igual a 2,73. Este valor concorda com a Razão de Bowen média simulada na porção sul e central do vale, entre 1 e 2; entretanto, discorda da razão encontrada na porção norte do vale, entre 0 e 1.

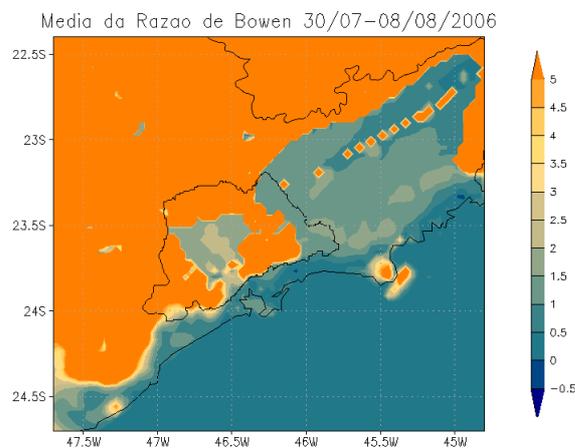


Figura 3.11. Razão de Bowen média entre 30/07 e 08/08/2006.

A seguir apresentam-se gráficos de cinco pontos distintos localizados na região do Vale do Paraíba e RMSP, contendo valores médios horários de calor sensível, latente e balanços de onda curta (*BOC*) e onda longa (*BOL*) (Figura 3.13). Os cinco pontos possuem as seguintes localizações: 1. área urbana de São José dos Campos; 2. área urbana de São Paulo; 3. Rodovia Presidente Dutra; 4. área de pastagem e/ou agricultura no interior do estado; e, 5. área de reflorestamento de eucaliptos, ilustrados na Figura 3.12.

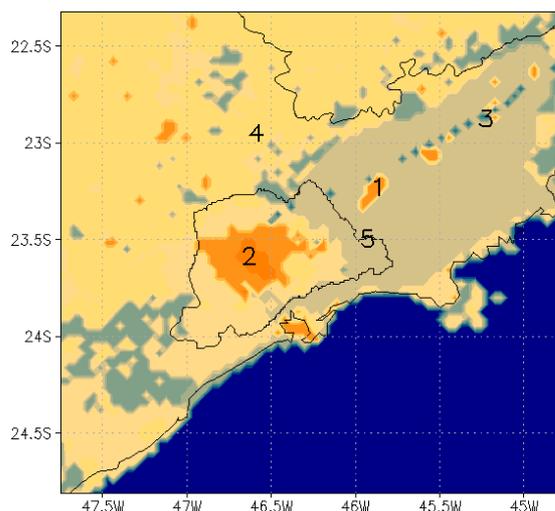


Figura 3.12. Localização dos pontos avaliados inseridos em diferentes usos do solo.

Nota-se na Figura 3.13 que o balanço de onda longa (*BOL*) é negativo durante todo o período, mas apresenta valores menores durante o dia, o que indica a emissão de radiação pela superfície. Nos pontos 4 e 5, em que o uso do solo é algum tipo de vegetação, a variação do *BOL* é menor entre o dia e a noite.

Quanto aos fluxos de energia, nas áreas urbanas observa-se que o calor sensível possui dois picos diurnos, melhor visíveis na cidade de São Paulo, resultantes dos horários de maior trânsito, e valores menores durante a noite, não nulos. A área reflorestada e a área de pastagem apresentam os maiores valores de *H*, seguidas das áreas urbanas e da Rodovia Presidente Dutra.

O calor latente apresenta valores praticamente constantes nas áreas urbanas e rodovia, resultantes das constantes emissões consideradas pelo modelo para estes meios. Durante o dia existe o acréscimo do tráfego de veículos, mas que na escala apresentada não é evidente. Na área reflorestada e na área de pastagem o calor latente é próximo a zero durante a noite e positivo durante o dia. Entretanto, a variação diurna sobre a área de pastagem é muito sutil, enquanto que na área reflorestada atinge  $200 \text{ W m}^{-2}$ .

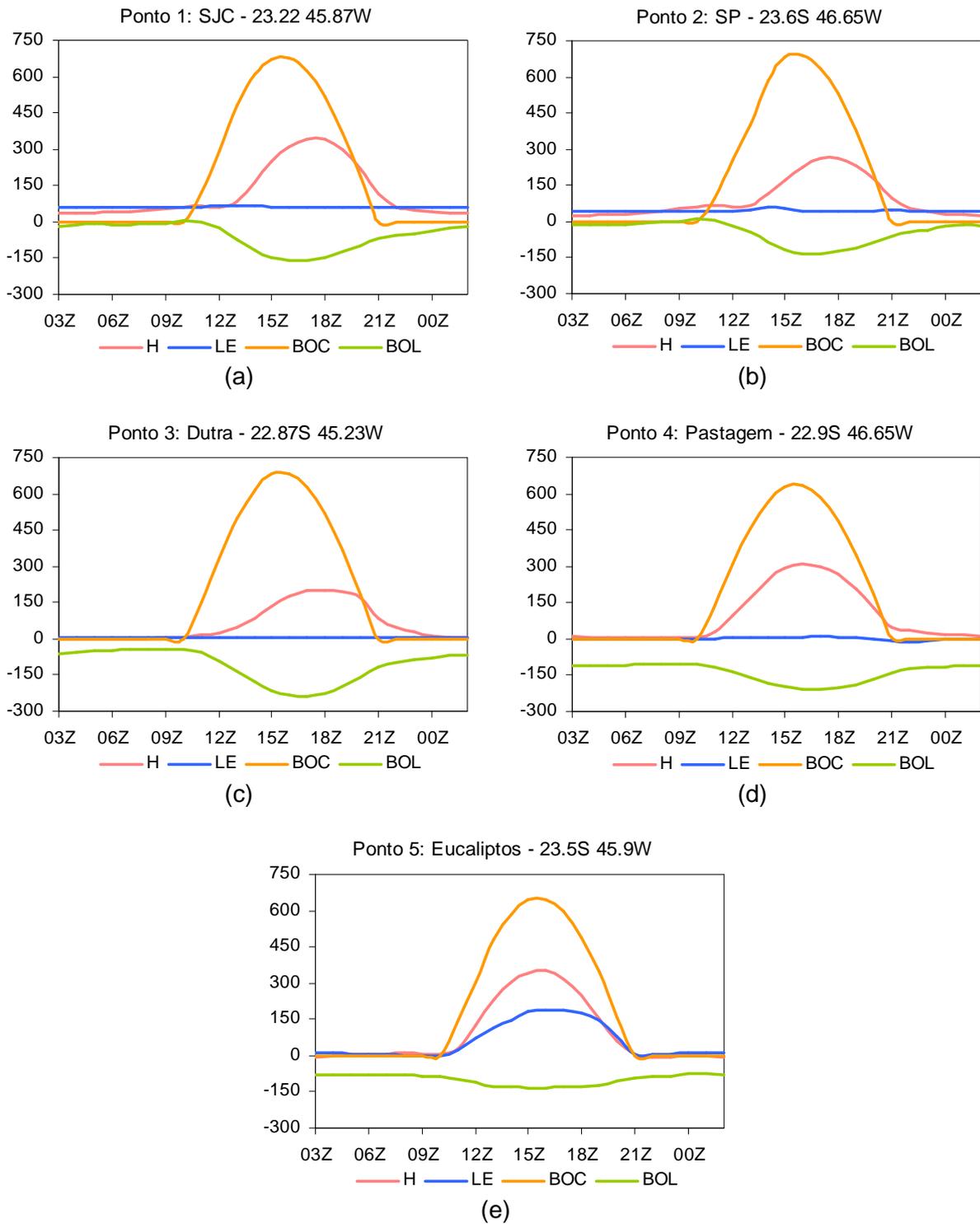


Figura 3.13. Médias horárias do calor sensível ( $H$ ), calor latente ( $LE$ ), balanço de onda curta ( $BOC$ ) e balanço de onda longa ( $BOL$ ) ( $W m^{-2}$ ) durante o período de 30/07 a 08/08/2006 para um ponto (a) na área urbana de São José dos Campos, (b) na área urbana de São Paulo, (c) na Rodovia Presidente Dutra, (d) no interior do Estado, onde há pastagem/agricultura e (e) sobre a área reflorestada por eucaliptos.

Analisando-se os fluxos de calor latente e sensível observados na estação de monitoramento (Cabral et al., 2007), e comparando-se aos dados simulados encontrados sobre a área de reflorestamento no Vale do Paraíba, observam-se padrões muito próximos para o calor sensível (Figura 3.14). Já para o calor latente (Figura 3.15), a simulação não acompanha com tanta eficiência os dados observados em campo. Este fato fica comprovado ao analisarem-se os parâmetros estatísticos obtidos a partir da comparação entre os dois conjuntos de dados para todo o período simulado (Tabela 3.4).

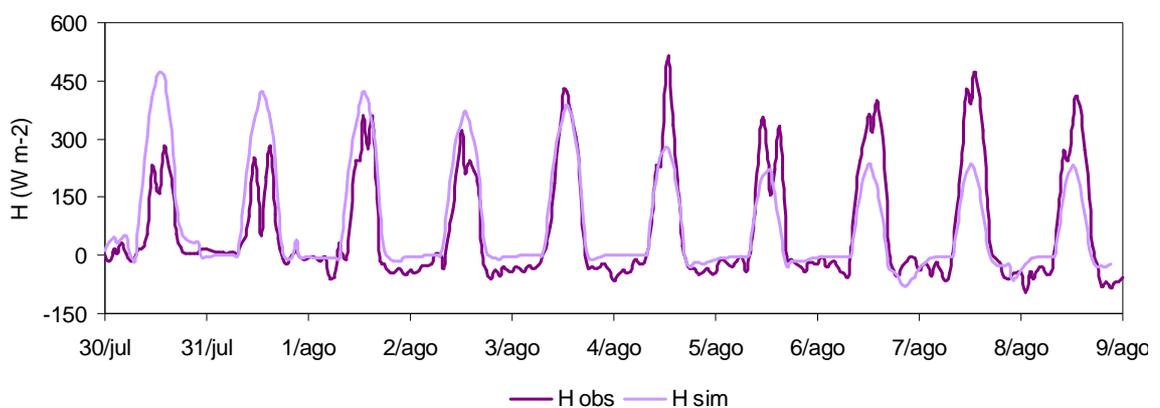


Figura 3.14. Dados de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ) observados em plantação de eucaliptos e simulados para o período de 30/07 a 08/08/2006.  
Fonte dos dados observados: Cabral et al., 2007.

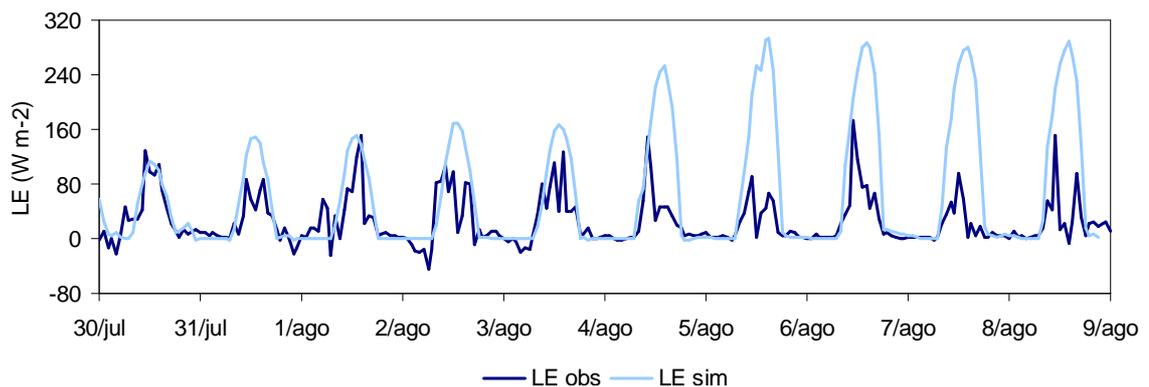


Figura 3.15. Dados de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ ) observados em plantação de eucaliptos e simulados para o período de 30/07 a 08/08/2006.  
Fonte dos dados observados: Cabral et al., 2007.

Tabela 3.4 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados dos fluxos de superfície em plantação de eucalipto.

Fluxos	$\sigma_{sim}$	$\sigma_{obs}$	$RMSE$	$RMSE_{UB}$	$\acute{I}nd\_Conc$	$Coef\_Corr$
$H$	132,9163	142,1471	88,7819	87,7067	0,8853	0,7978
$LE$	87,5771	36,1133	80,6713	71,7107	0,5584	0,6023

De acordo com as condições sugeridas por Pielke (2002) apresentadas no item 3.10 (1.  $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$ ; 2.  $RMSE < \sigma_{obs}$ ; 3.  $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$ ) e observando os parâmetros estatísticos obtidos entre os dados observados por Cabral et al. (2007) em uma plantação de eucaliptos e os dados simulados para a região do Vale do Paraíba (Tabela 3.4), nota-se que os desvios padrões observado e simulado para o calor sensível são próximos. Os erros quadráticos médios ( $RMSE$  e  $RMSE_{UB}$ ) atendem à condição de serem menores do que o desvio padrão observado para os dados de calor sensível. Como consequência, o índice de concordância e o coeficiente de correlação apresentam resultados muito bons para esta variável.

Por outro lado, os dados de calor latente não atendem às condições sugeridas por Pielke (2002). Os desvios padrões simulado e observado não são próximos e os erros quadráticos médios não são inferiores ao desvio padrão observado. Este fato reflete-se em um índice de concordância e coeficiente de correlação medianos, mas ainda assim indicam ajuste aceitável entre os resultados do modelo e as observações.

### 3.11.3 COMPARAÇÃO ENTRE SIMULAÇÕES E DADOS OBSERVADOS: AVALIAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES

Conforme apresentado nos itens 2.2 e 2.3, foram avaliadas todas as fontes de poluentes atmosféricos no Vale do Paraíba, dentre eles: indústrias instaladas nas áreas urbanas, veículos pertencentes aos habitantes dos municípios do vale e também aqueles que trafegam na Rodovia Presidente Dutra, além das emissões biogênicas de COVs provenientes das áreas reflorestadas por eucaliptos. Para avaliar os dados gerados pelas simulações é preciso compará-los a dados observados. A CETESB mantém uma única

estação automática de monitoramento na região do Vale do Paraíba, localizada em São José dos Campos onde é feito o monitoramento de  $MP_{10}$ ,  $SO_2$  e  $O_3$ . Como esta estação não monitora os óxidos de nitrogênio, precursores importantes na formação do ozônio, foram utilizados dados de outras estações da RMSP para a avaliação das simulações realizadas (CETESB, 2009b). Não há monitoramento de COVs pela rede da CETESB. Desta forma reforça-se que este trabalho de modelagem tem um caráter exploratório, visando o entendimento da sensibilidade dos resultados às hipóteses de emissões. Percebe-se uma grande incerteza com relação à estimativa das fontes de gases precursores do ozônio. Entretanto, a modelagem da formação do ozônio permite explorar as sensibilidades e, através dos resultados das simulações numéricas, identificar os gases e suas respectivas localizações em que medições devem ser feitas para reduzir as incertezas do processo de modelagem e, eventualmente, da previsão das concentrações de poluentes.

Utilizando-se os dados de emissões considerados para o Vale do Paraíba, notou-se que estes eram subestimados em relação às observações. Isto ocorre pelo fato de não haver registros de todas as fontes emissoras de poluentes existentes no VP, além das aproximações e considerações que são assumidas nesses cálculos. Adequações foram conduzidas para que estes dados se tornassem mais próximos à realidade. Assim, têm-se estimativas do valor necessário para que o modelo represente as concentrações observadas de maneira adequada; porém, não é possível apontar a real contribuição de cada fonte. Na Tabela 3.5 estão presentes os valores inicialmente inventariados para os poluentes que são utilizados como dados de entrada do modelo e aqueles corrigidos de acordo com as observações.

Tabela 3.5 - Concentrações inicialmente estimadas e posteriormente ajustadas de acordo com as observações da rede de monitoramento da CETESB para todas as fontes consideradas no Vale do Paraíba.

Poluentes		Veicular (kg dia <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	Dutra (kg dia <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	Industrial (kg s <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	Eucaliptos (kg dia <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )
CO	conc. inicial	$2,30270 \times 10^{-5}$	$3,29500 \times 10^{-4}$	$1,46987 \times 10^{-12}$	-
	conc. ajustada	$2,30270 \times 10^{-3}$	$3,29500 \times 10^{-2}$	$1,46987 \times 10^{-10}$	-
HC	conc. inicial	$5,38465 \times 10^{-6}$	$6,89670 \times 10^{-5}$	$9,60312 \times 10^{-12}$	$6,97680 \times 10^{-5}$
	conc. ajustada	$8,07698 \times 10^{-4}$	$1,03451 \times 10^{-2}$	$1,44047 \times 10^{-9}$	$1,04652 \times 10^{-2}$
NO <sub>x</sub>	conc. inicial	$4,70394 \times 10^{-6}$	$1,24915 \times 10^{-4}$	$1,17589 \times 10^{-11}$	-
	conc. ajustada	$2,58717 \times 10^{-4}$	$6,87030 \times 10^{-3}$	$6,46739 \times 10^{-10}$	-
SO <sub>x</sub>	conc. inicial	$1,11757 \times 10^{-7}$	$2,35608 \times 10^{-6}$	$2,25379 \times 10^{-11}$	-
	conc. ajustada	$5,58785 \times 10^{-7}$	$1,17804 \times 10^{-5}$	$1,12840 \times 10^{-10}$	-
MP <sub>10</sub>	conc. inicial	$4,31788 \times 10^{-7}$	$6,66311 \times 10^{-6}$	$1,95982 \times 10^{-12}$	-
	conc. ajustada	$2,37483 \times 10^{-5}$	$3,66471 \times 10^{-4}$	$1,07790 \times 10^{-10}$	-

A seguir, são apresentadas as concentrações observadas e simuladas do ozônio para a estação de monitoramento da CETESB instalada em São José dos Campos (Figura 3.16). Em preto estão os dados observados e em amarelo, os dados simulados. Em seguida, são resumidos alguns parâmetros estatísticos referentes aos dados observados e simulados desta estação (Tabela 3.6).

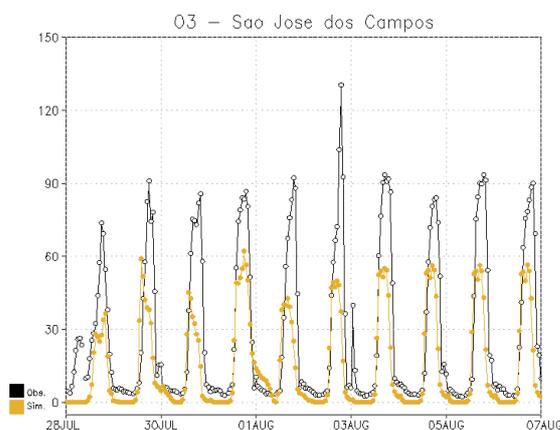


Figura 3.16. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de O<sub>3</sub> na estação de São José dos Campos.

Fonte dos dados observados: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2009b.

Tabela 3.6 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de O<sub>3</sub> em São José dos Campos.

Poluente	$\sigma_{sim}$	$\sigma_{obs}$	$RMSE$	$RMSE_{UB}$	$Coef\_Corr$	$\acute{I}nd\_Conc$
O <sub>3</sub>	20,183	32,893	25,765	21,081	0,785	0,776

De acordo com as condições sugeridas por Pielke (2002), (1.  $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$ ; 2.  $RMSE < \sigma_{obs}$ ; 3.  $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$ ) e observando os parâmetros estatísticos obtidos para São José dos Campos, nota-se que os desvios padrões observado e simulado não estão muito próximos; entretanto, um coeficiente de correlação e um índice de concordância significativos são encontrados para este poluente. A segunda e terceira condições também são atendidas.

Os índices de destreza relativamente altos observados indicam que o modelo simula adequadamente este poluente quando comparado às observações da referida estação em São José dos Campos. Entretanto, tendo em vista que a estação de São José dos Campos não monitora óxidos de nitrogênio, precursores na formação do ozônio, apresentam-se nas figuras seguintes os resultados das estações de Pinheiros, Mauá, Taboão da Serra e São Caetano do Sul, em que o modelo pode ser efetivamente validado.

Na estação de Pinheiros (Figura 3.17), observa-se um índice de concordância mais alto entre os dados observados e simulados de ozônio (0,871); já o índice observado para o monóxido de nitrogênio é um pouco inferior (0,588), e o índice do dióxido de nitrogênio é bastante baixo. Os demais parâmetros estatísticos obtidos entre dados simulados e observados para a estação de Pinheiros estão sintetizados na Tabela 3.7.

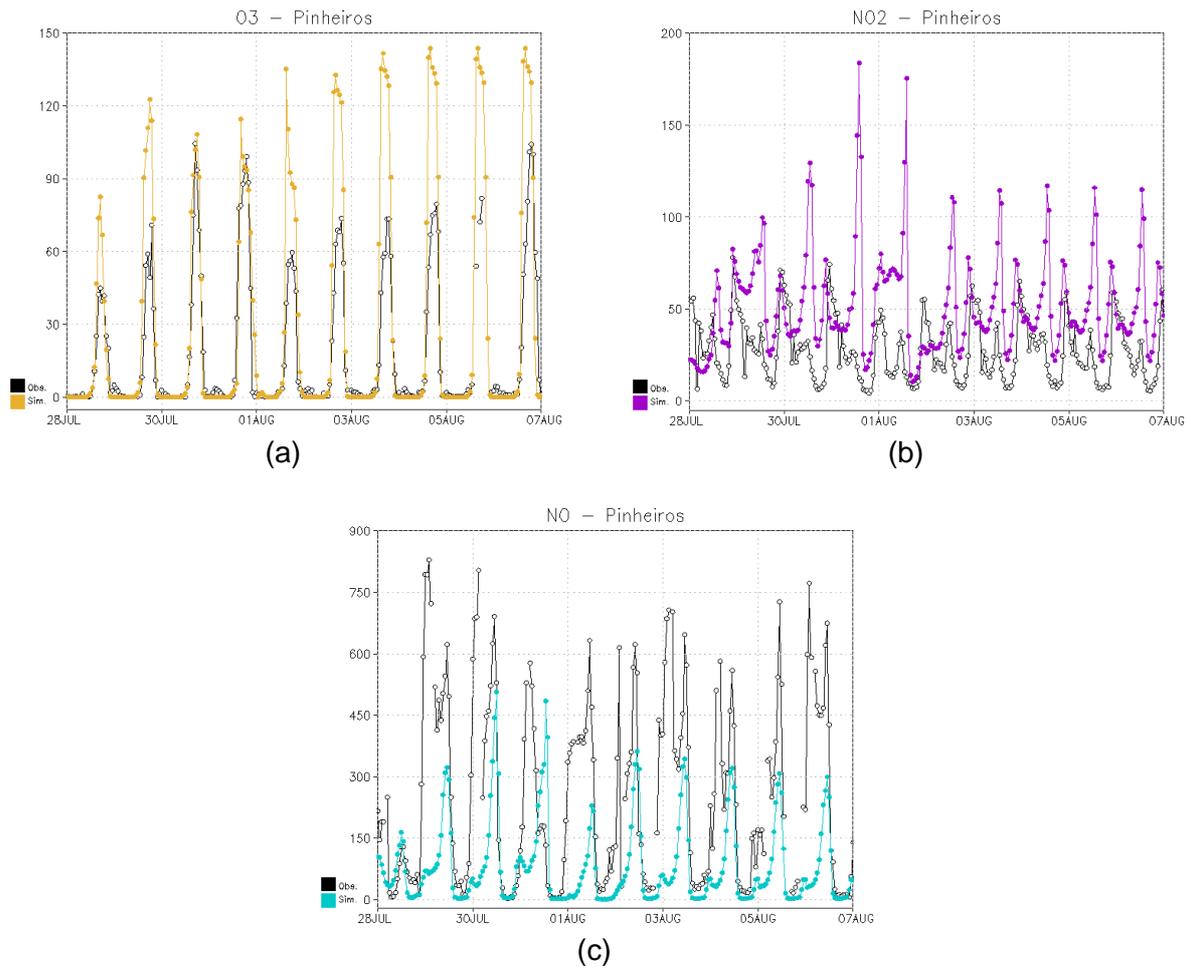


Figura 3.17. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de (a)  $\text{O}_3$ , (b)  $\text{NO}_2$  e (c)  $\text{NO}$  na estação de Pinheiros.

Fonte dos dados observados: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2009b.

Tabela 3.7 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}$  em Pinheiros.

Poluente	$\sigma_{sim}$	$\sigma_{obs}$	$RMSE$	$RMSE_{UB}$	$Coef\_Corr$	$\acute{I}nd\_Conc$
$\text{O}_3$	48,075	29,121	27,427	24,956	0,905	0,871
$\text{NO}_2$	28,148	17,301	39,913	31,537	0,095	0,330
$\text{NO}$	115,093	230,891	270,634	421,415	0,460	0,588

De acordo com as condições sugeridas por Pielke (2002) (1.  $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$ ; 2.  $RMSE < \sigma_{obs}$ ; 3.  $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$ ) e observando os parâmetros estatísticos obtidos para Pinheiros, nota-se que os desvios padrões observado e simulado dos dados de  $\text{O}_3$  não são muito próximos para  $\text{O}_3$ ; entretanto os erros quadráticos  $RMSE$  e  $RMSE_{UB}$  são inferiores ao

desvio padrão observado, resultando em um coeficiente de correlação e índice de concordância altos. Estas mesmas condições não são atendidas pelos dados de  $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}$ , resultando em um coeficiente de correlação e um índice de concordância bastante baixos para o dióxido de nitrogênio, mas índices razoáveis para o monóxido de nitrogênio.

Na estação de Mauá (Figura 3.18) observa-se um índice de concordância muito bom para o ozônio, um índice razoável para o monóxido de nitrogênio e um pouco inferior para o dióxido de nitrogênio. Os demais parâmetros estatísticos obtidos entre dados simulados e observados para a estação de Mauá estão sintetizados na Tabela 3.8.

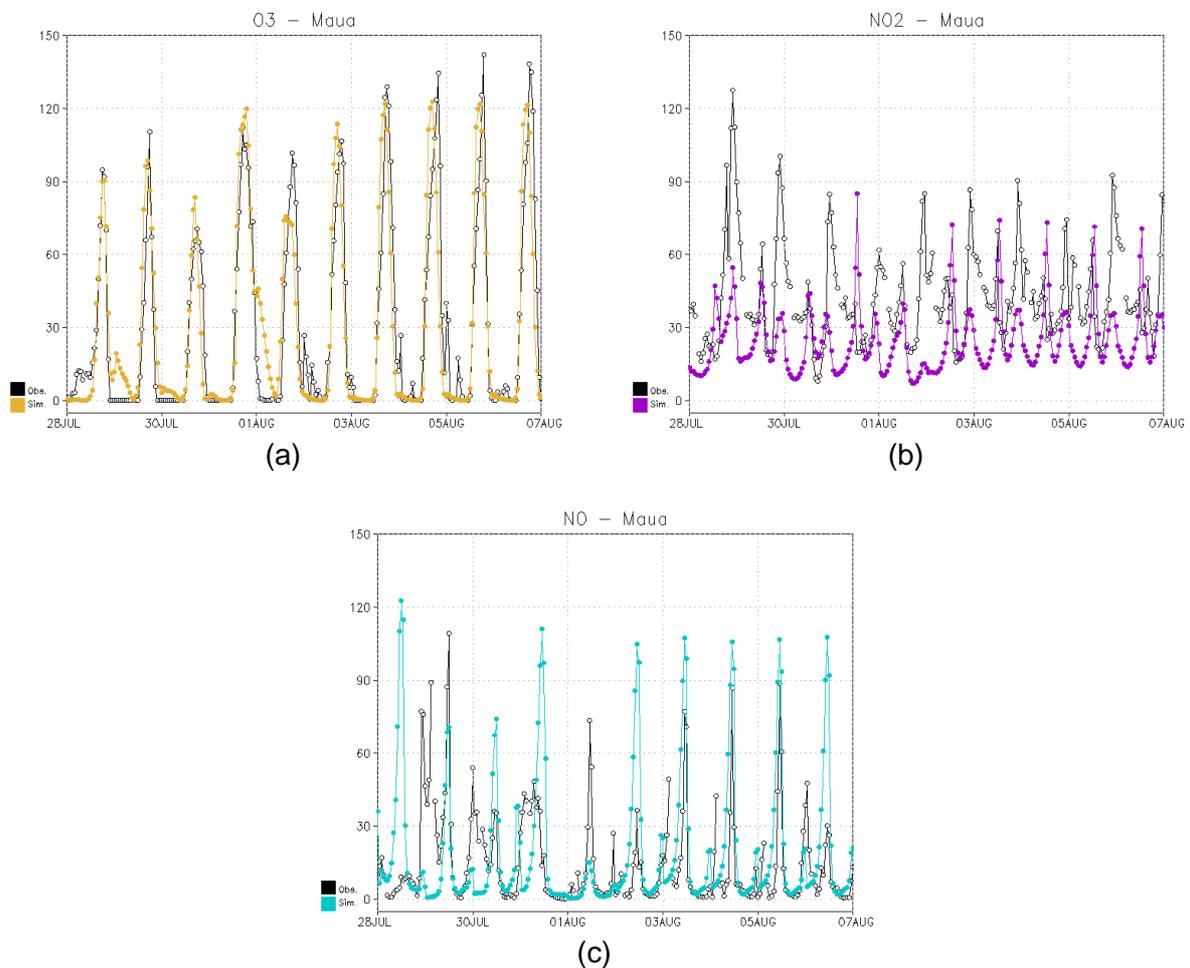


Figura 3.18. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de (a)  $\text{O}_3$ , (b)  $\text{NO}_2$  e (c)  $\text{NO}$  na estação de Mauá.

Fonte dos dados observados: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2009b.

Tabela 3.8 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e NO em Mauá.

Poluente	$\sigma_{sim}$	$\sigma_{obs}$	RMSE	RMSE <sub>UB</sub>	Coef_Corr	Índ_Conc
O <sub>3</sub>	40,397	40,440	20,127	20,120	0,875	0,934
NO <sub>2</sub>	14,009	20,813	28,760	22,755	0,188	0,454
NO	28,262	21,282	25,643	55,838	0,500	0,683

Observando os parâmetros estatísticos obtidos para Mauá e comparando-os às condições sugeridas por Pielke (2002) (1.  $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$ ; 2.  $RMSE < \sigma_{obs}$ ; 3.  $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$ ), nota-se que os desvios padrões observados e simulados do ozônio são muito próximos, e que a segunda e terceira condições também são atendidas para este poluente, resultando em altos índices de destreza. As concentrações dos óxidos de nitrogênio não atendem as três condições, levando a índices medianos na avaliação de destreza do modelo.

Na estação de Taboão da Serra (Figura 3.19) observam-se índices de concordância medianos entre os dados observados e simulados dos óxidos de nitrogênio. Os demais parâmetros estatísticos obtidos estão presentes na Tabela 3.9.

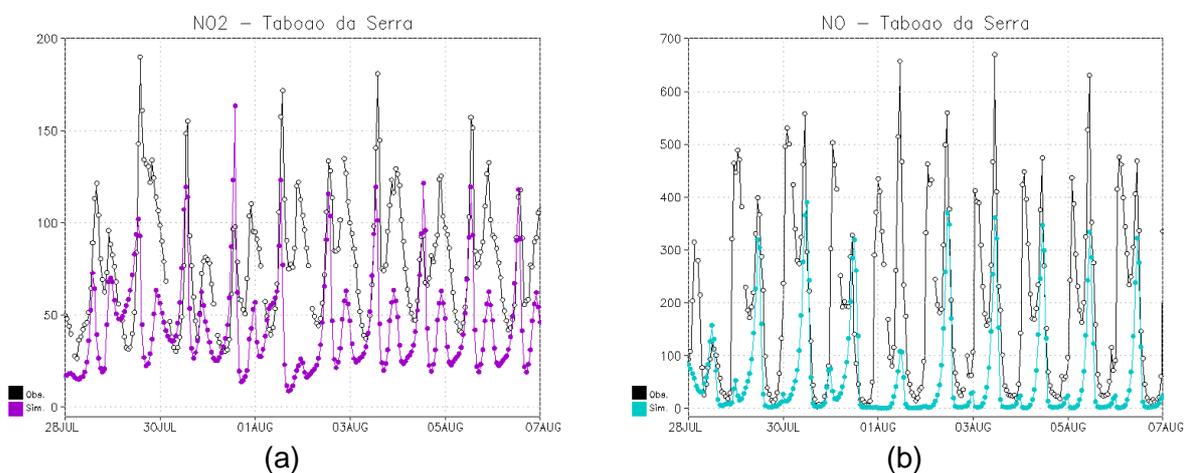


Figura 3.19. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de (a) NO<sub>2</sub> e (b) NO na estação de Taboão da Serra.

Fonte dos dados observados: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2009b.

Tabela 3.9 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de NO<sub>2</sub> e NO em Taboão da Serra.

Poluente	$\sigma_{sim}$	$\sigma_{obs}$	$RMSE$	$RMSE_{UB}$	$Coef\_Corr$	$\acute{I}nd\_Conc$
NO <sub>2</sub>	27,192	33,455	47,082	32,498	0,439	0,561
NO	98,579	170,122	208,220	310,905	0,483	0,603

De acordo com as condições sugeridas por Pielke (2002) (1.  $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$ ; 2.  $RMSE < \sigma_{obs}$ ; 3.  $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$ ) e observando os parâmetros estatísticos obtidos para Taboão da Serra, nota-se que os desvios padrões observado e simulado do NO<sub>2</sub> estão próximos, sendo que também a terceira condição é atendida. Entretanto, o índice de concordância e o coeficiente de correlação não são melhores do que aqueles encontrados para o NO, que não atende nenhuma das condições.

Por fim, apresentam-se ainda os dados simulados e observados de O<sub>3</sub> para a estação de São Caetano do Sul (Figura 3.20 e Tabela 3.10).

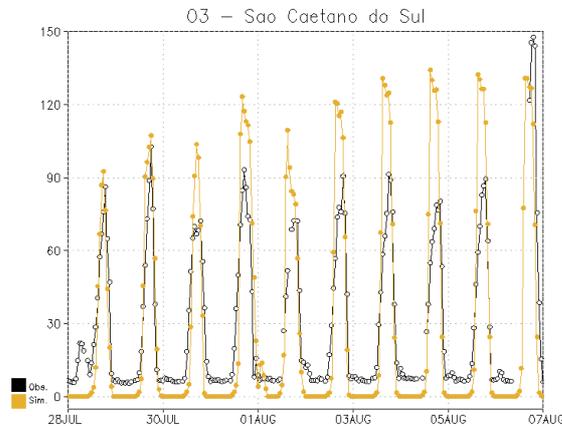


Figura 3.20. Concentrações simuladas e observadas ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de O<sub>3</sub> na estação de São Caetano do Sul.

Fonte dos dados observados: COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 2009b.

Tabela 3.10 - Parâmetros estatísticos obtidos para dados simulados e observados de O<sub>3</sub> em São Caetano do Sul.

Poluente	$\sigma_{sim}$	$\sigma_{obs}$	$RMSE$	$RMSE_{UB}$	$Coef\_Corr$	$\acute{I}nd\_Conc$
O <sub>3</sub>	46,060	32,200	23,034	23,025	0,885	0,908

Observando as condições sugeridas por Pielke (2002) (1.  $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$ ; 2.  $RMSE < \sigma_{obs}$ ; 3.  $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$ ) e os parâmetros estatísticos obtidos para São Caetano do Sul, nota-se que apesar de os desvios padrões não serem muito próximos, as duas condições seguintes são atendidas pelos dados de ozônio, o que resulta em um alto índice de destreza.

Resumindo, observou-se que em todas as estações avaliadas os dados de ozônio simulados e aqueles registrados pela CETESB estiveram bem correlacionados, atendendo às condições sugeridas por Pielke (2002) para que uma simulação tenha destreza. Este resultado demonstra que o modelo está apto a representar de forma bastante satisfatória as concentrações de ozônio. Pouco menos satisfatórios, mas ainda suficientes, foram os resultados para os dados de óxidos de nitrogênio, cujos índices de concordância variaram entre 0,33 e 0,68.



## 4 SIMULAÇÕES

A estratégia de modelagem baseou-se em duas etapas, a saber:

1. Experimentos com inicialização homogênea para a região do Vale do Paraíba, partindo do repouso e com estrutura termodinâmica vertical típica da região, baseada em medidas de radiossondagem de estação próxima. O objetivo destes experimentos foi explorar os efeitos de mudanças das características da superfície na circulação local na ausência de um campo sinótico de grande escala. Também foi explorada a sensibilidade das circulações locais às mudanças na umidade do solo, representando a alteração da cobertura do solo. Foram considerados perfis verticais de temperatura e umidade típicos de períodos de verão e inverno nesta etapa.

2. Experimentos com inicialização heterogênea, a partir de dados de reanálise do NCEP. Considerando diferentes arquivos de cobertura do solo, em que se propôs uma ampla expansão do reflorestamento de eucaliptos na região do Vale do Paraíba, buscou-se avaliar os efeitos desta alteração interagindo com a presença das áreas urbanas locais e da Rodovia Presidente Dutra e vizinhança urbanizada. Foram realizados experimentos para a avaliação dos efeitos da alteração do uso do solo sobre duas situações distintas: a. em relação aos fluxos de superfície e às circulações locais, especificamente a estrutura e velocidade de propagação da brisa marítima, terrestre e de vale-montanha; b. em relação às concentrações de poluentes, especialmente do ozônio, devido à intensificação das emissões de COVs pelos eucaliptos e considerando a presença de áreas urbanas e da Rodovia Presidente Dutra como contribuintes de  $\text{NO}_x$ , outros precursores dos COVs. Somente um período de inverno foi considerado nesta etapa do trabalho em função das limitações de tempo para execução das tarefas.

Detalhes dos experimentos realizados nestas duas etapas, bem como os resultados encontrados, são apresentados a seguir.

## 4.1 EXPERIMENTOS COM INICIALIZAÇÃO HOMOGÊNEA

### 4.1.1 CONFIGURAÇÃO DO CONJUNTO DE EXPERIMENTOS 1

Um grupo de experimentos com inicialização homogênea foi conduzido para que fosse observado o efeito da alteração no grau de saturação inicial do solo e da época do ano sobre a propagação da brisa marítima continente adentro. As diferentes condições de umidade do solo tiveram como objetivo avaliar os possíveis efeitos decorrentes da inserção de eucaliptos na região do VP, sendo esta cultura conhecida por interferir no ciclo hidrológico. Desta forma, foram realizadas simulações para dois períodos distintos do ano, no verão e no inverno, sendo o grau de saturação inicial do solo alterado entre três níveis, totalizando seis experimentos.

A área deste estudo compreende uma seção bidimensional ao longo da longitude de 45°S, entre as latitudes 21,8° e 23,8°S, abrangendo parte do oceano, a Serra do Mar, a calha do Rio Paraíba do Sul, a Rodovia Presidente Dutra e um trecho de topografia do interior do Estado de São Paulo (Figura 4.1). Em 23,4°S aproximadamente observa-se o encontro da costa com a serra do mar e próximo a 22,6°S está a região mais baixa do Vale do Paraíba (a calha do rio Paraíba do Sul). O eixo y foi rotacionado, tornando-se aproximadamente perpendicular à costa na região do Vale do Paraíba. A rotação da grade no BRAMS é feita através da alteração da localização do pólo na grade do modelo.

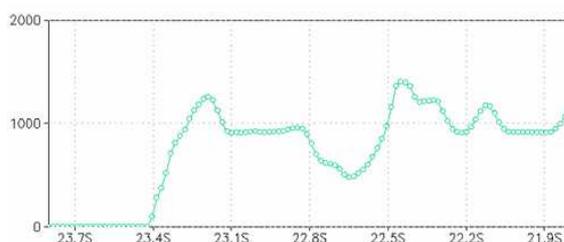


Figura 4.1. Topografia da área de estudo (m).

Além de inicialização homogênea, os experimentos partiram do repouso e apresentaram estrutura termodinâmica vertical típica da região, baseada em medidas de radiossondagem do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão. Dados climatológicos foram empregados para a temperatura da superfície do mar. Para as simulações realizadas foram utilizadas as configurações da Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Principais configurações empregadas nas simulações homogêneas.

Parâmetros	Configurações das simulações	
	verão	inverno
Simulações		
Início da integração	15/01/2007 – 06Z	15/01/2007 – 06Z
Duração da integração (horas)		24
Número de grades		1
Pontos da grade em E-W		4
Pontos da grade em N-S		150
Níveis verticais		40
Resolução (km)		2
Níveis no solo		9
Inicialização do grau de saturação do solo		homogêneo
Condição inicial		homogênea

Considerando que a presença de eucaliptos pode alterar a umidade do solo, modificou-se o grau de saturação inicial do solo para a observação da influência da umidade do solo nas circulações locais. Os valores deste parâmetro empregados nas simulações foram constantes em todos os nove níveis de solo definidos, conforme Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Valores de grau de saturação inicial do solo (%) utilizados nas simulações homogêneas.

Níveis do Solo (m)	Umidade Baixa (%)	Umidade Média (%)	Umidade Alta (%)
-0,10			
-0,25			
-0,50			
-0,75			
-1,00	0,10	0,35	0,65
-1,25			
-1,50			
-1,75			
-2,00			

#### 4.1.2 RESULTADOS DO CONJUNTO DE EXPERIMENTOS 1

O conjunto de simulações denominado “verão” foi gerado partindo das 06Z do dia 15/01/2007, sendo o grau de saturação inicial do solo alterado nas três simulações. Por meio de figuras que apresentam temperatura potencial, vento e razão de mistura de vapor observam-se a evolução da circulação e da camada de mistura durante o dia, bem como a penetração da brisa marítima no continente e seu alcance sobre o mesmo. Durante a manhã não são notadas diferenças significativas entre as simulações com umidades variadas, devido à inicialização do modelo com vento nulo para todos os casos. À medida que a radiação solar se intensifica, os ventos sobre o continente são intensificados, e às 12Z observa-se que no Vale do Paraíba as temperaturas potenciais são inferiores no caso em que a umidade é alta, o que é esperado, visto que solos mais secos proporcionam ambientes mais secos e, portanto a razão de Bowen deve ser mais alta, favorecendo a troca de energia entre a superfície e atmosfera na forma de calor sensível. Observa-se também que neste momento a brisa marítima atinge o topo da Serra do Mar e têm início as circulações locais no Vale do Paraíba do tipo vale-montanha (Figura 4.2).

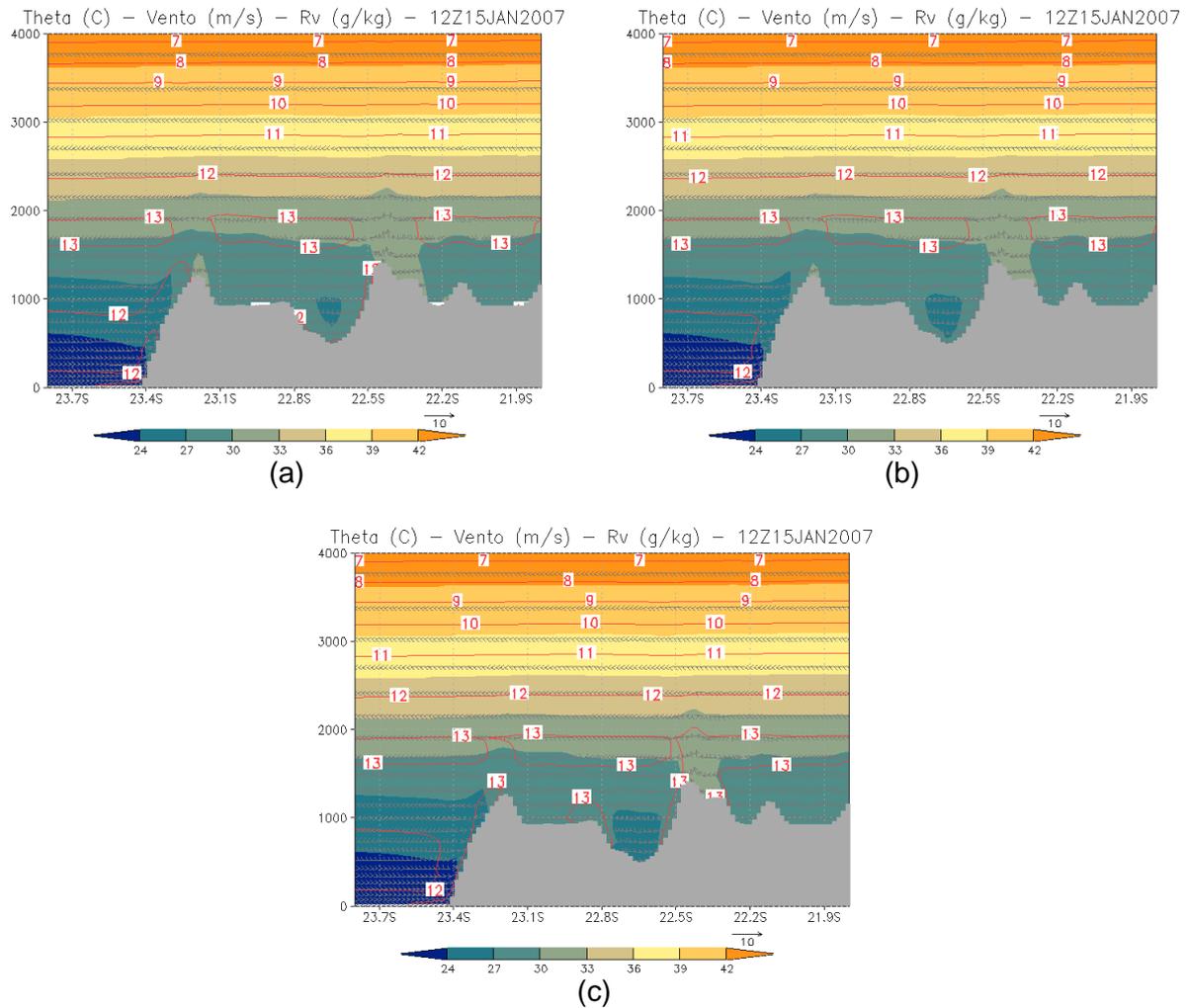


Figura 4.2. Temperatura potencial ( $^{\circ}\text{C}$ ), vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $\text{g kg}^{-1}$ ) às 12Z de 15/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

No decorrer da tarde, a circulação vale-montanha é intensificada e às 15Z chega a atingir 3.500 m de altitude no caso em que a umidade é mais baixa (Figura 4.3). A brisa marítima atinge a Serra do Mar e avança em direção ao interior do continente. Em superfície, as diferenças de temperatura potencial entre o caso mais úmido e o mais seco chegam a  $6^{\circ}\text{C}$  e as diferenças entre a razão de mistura de vapor atingem  $3 \text{ g kg}^{-1}$  entre os mesmos casos. Observa-se também que as isolinhas de razão de mistura de vapor sobre o continente, inicialmente mais próximas da superfície, tendem a se distanciar, devido ao aquecimento maior do continente em relação ao oceano que intensifica o processo de mistura na vertical através da turbulência. Na simulação em que a umidade do solo é mais alta, a isolinha de razão de mistura de vapor de  $15 \text{ g kg}^{-1}$  atinge 2.500 m de altura, enquanto

que nas simulações com solo mais seco esta mesma isolinha é inexistente, sendo a primeira isolinha de 12 ou 13  $\text{g kg}^{-1}$ .

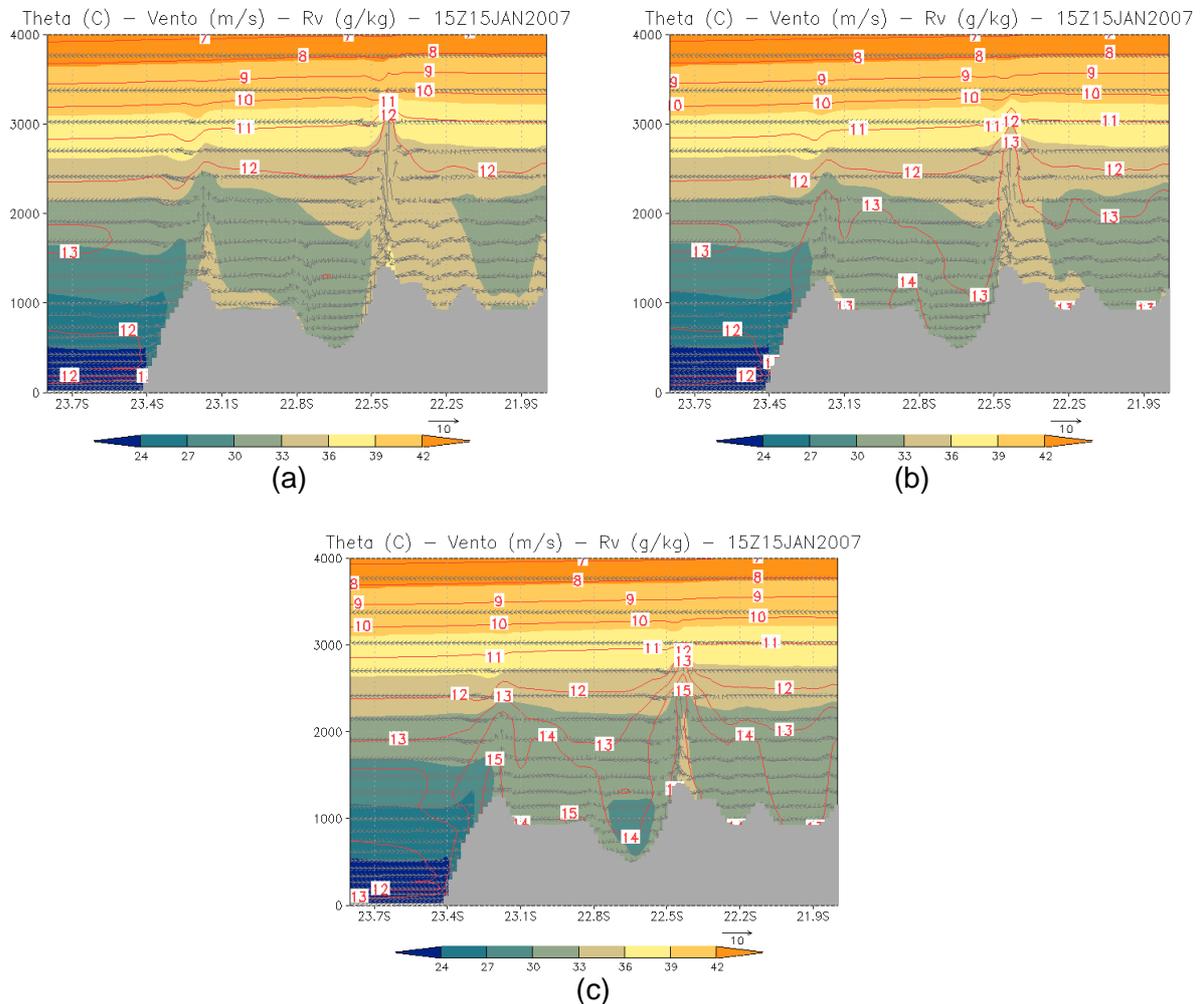


Figura 4.3. Temperatura potencial ( $^{\circ}\text{C}$ ), vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $\text{g kg}^{-1}$ ) às 15Z de 15/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

Em torno de 19Z a brisa marítima já penetrou o continente nas três simulações, trazendo temperaturas mais baixas e umidade. Às 21Z a brisa marítima é somada à circulação de vale-montanha, no caso de umidade baixa, e intensificada à beira do Vale do Paraíba, trazendo temperaturas mais baixas para o interior do continente. No caso de umidade alta ainda é possível observar distintamente a brisa marítima e a circulação de vale-montanha (Figura 4.4). Também é possível notar claramente as diferenças de temperatura potencial nos três casos, sendo a diferença da razão de mistura de vapor entre

a simulação com umidade baixa e a com umidade média de  $2 \text{ g kg}^{-1}$  e entre a simulação com umidade média e a com umidade alta também de  $2 \text{ g kg}^{-1}$ , sempre considerando a superfície.

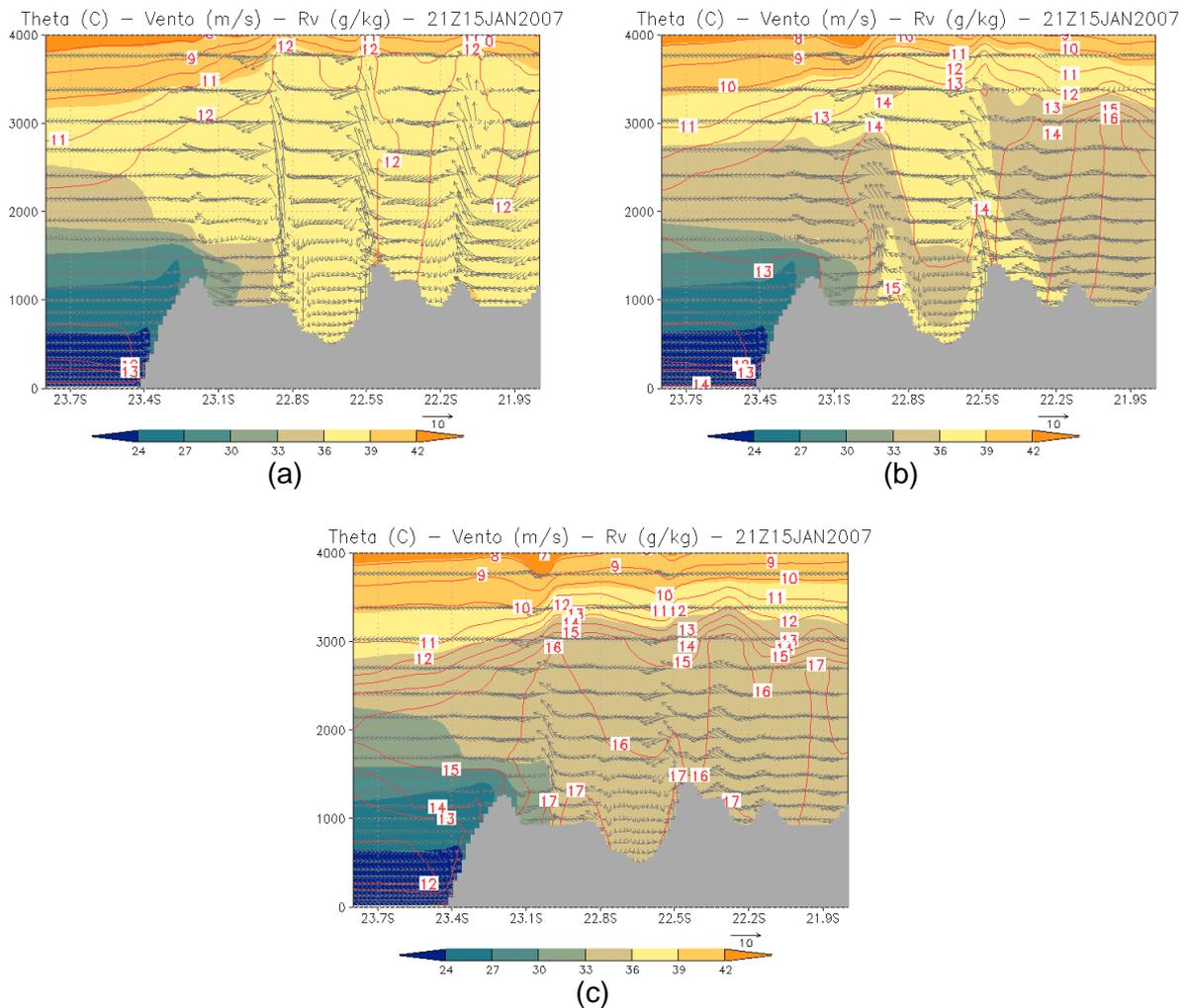


Figura 4.4. Temperatura potencial ( $^{\circ}\text{C}$ ), vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $\text{g kg}^{-1}$ ) às 21Z de 15/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

Às 00Z de 16/01 (Figura 4.5) a brisa marítima já atingiu o centro do Vale do Paraíba, no caso em que a umidade é baixa. No caso com umidade média, a brisa encontra-se à beira do Vale do Paraíba, e é somada à circulação de vale-montanha. Já no caso em que a umidade é alta, a brisa marítima encontra-se mais distante do Vale do Paraíba. A partir deste instante, a brisa marítima pouco avança nas três situações e é enfraquecida até o fim da noite.

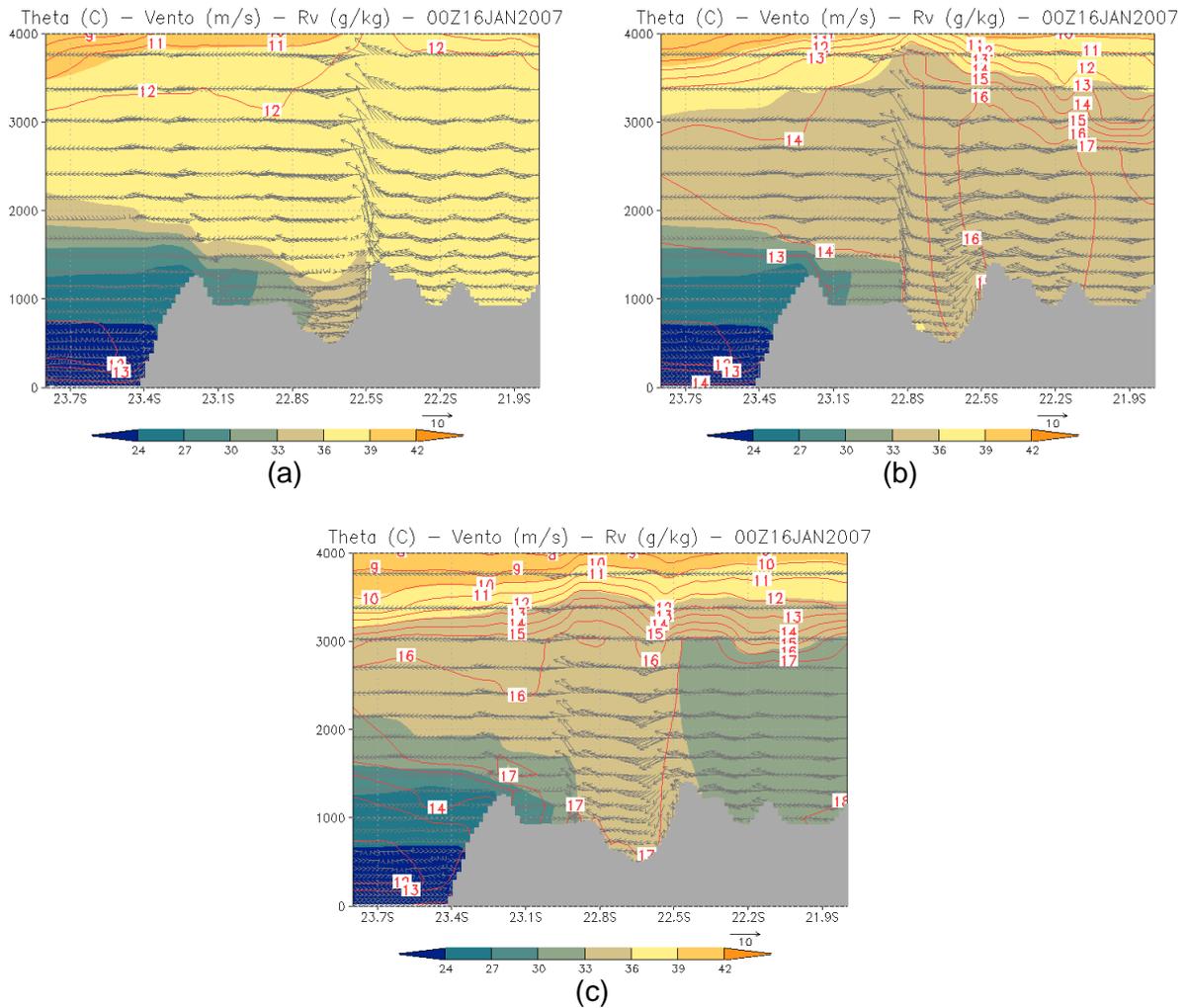


Figura 4.5. Temperatura potencial ( $^{\circ}\text{C}$ ), vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $\text{g kg}^{-1}$ ) às 00Z de 16/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

Em seguida são apresentadas figuras das componentes do vento, resultantes de cortes temporais longitudinais em superfície, ainda referentes à simulação “verão”. Devido ao corte bidimensional e ao fato deste ser praticamente perpendicular à costa, os valores da componente zonal do vento (paralela à costa, após a rotação da grade) mantêm-se próximos a zero (Figura 4.6), pois a aceleração de Coriolis na direção leste-oeste é proporcional à intensidade do vento meridional que, inicialmente, é muito pequeno.

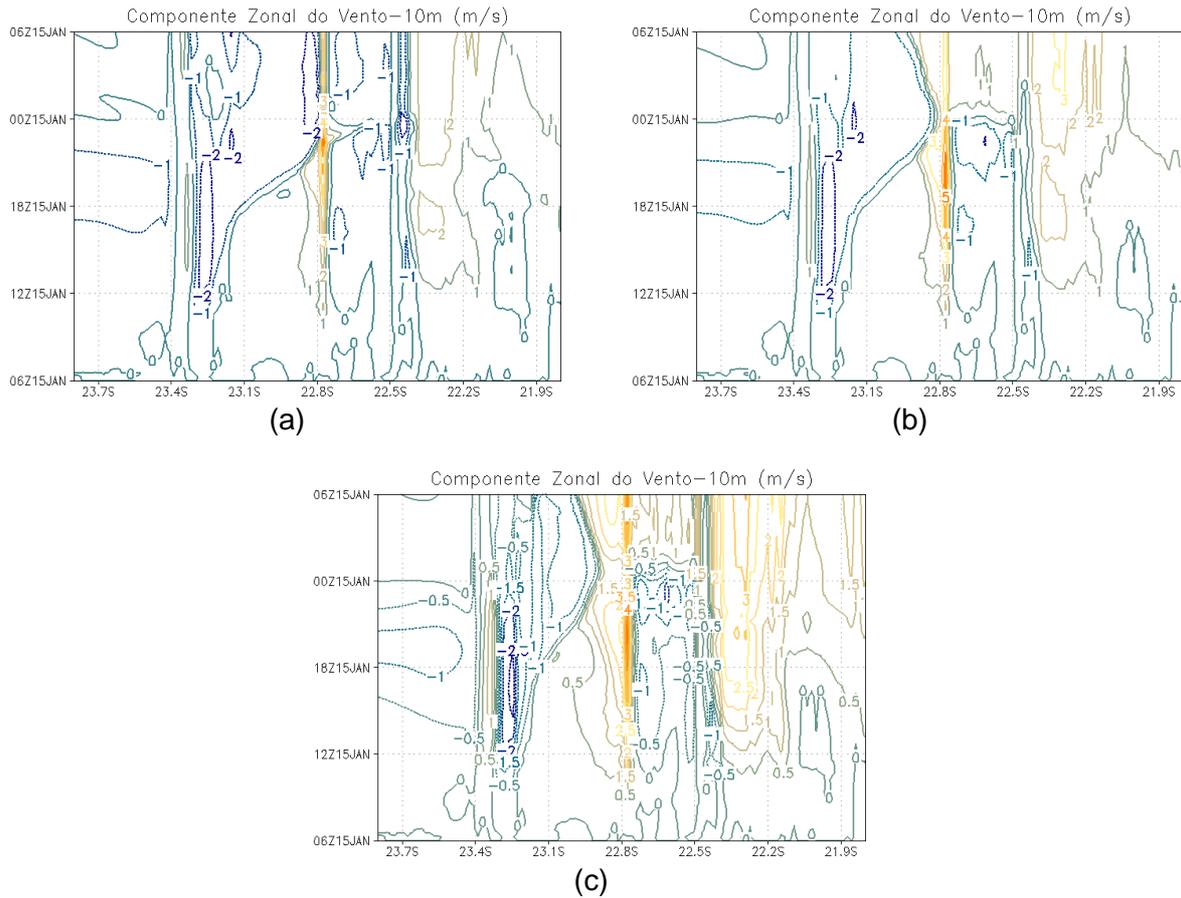


Figura 4.6. Componente Zonal do Vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) entre as 06Z do dia 15 e 06Z do dia 16/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

Pela componente meridional do vento, que acompanha o eixo em que foi feito o corte analisado (perpendicular à costa, aproximadamente na direção norte-sul), observa-se a entrada da brisa nas três simulações, com valores de até  $6 \text{ m s}^{-1}$  no caso cuja umidade é baixa. Observa-se também que a brisa atinge o Vale do Paraíba e se une à circulação de vale-montanha no caso da umidade baixa. Nas outras duas situações, as circulações permanecem separadas, como citado anteriormente (Figura 4.7).

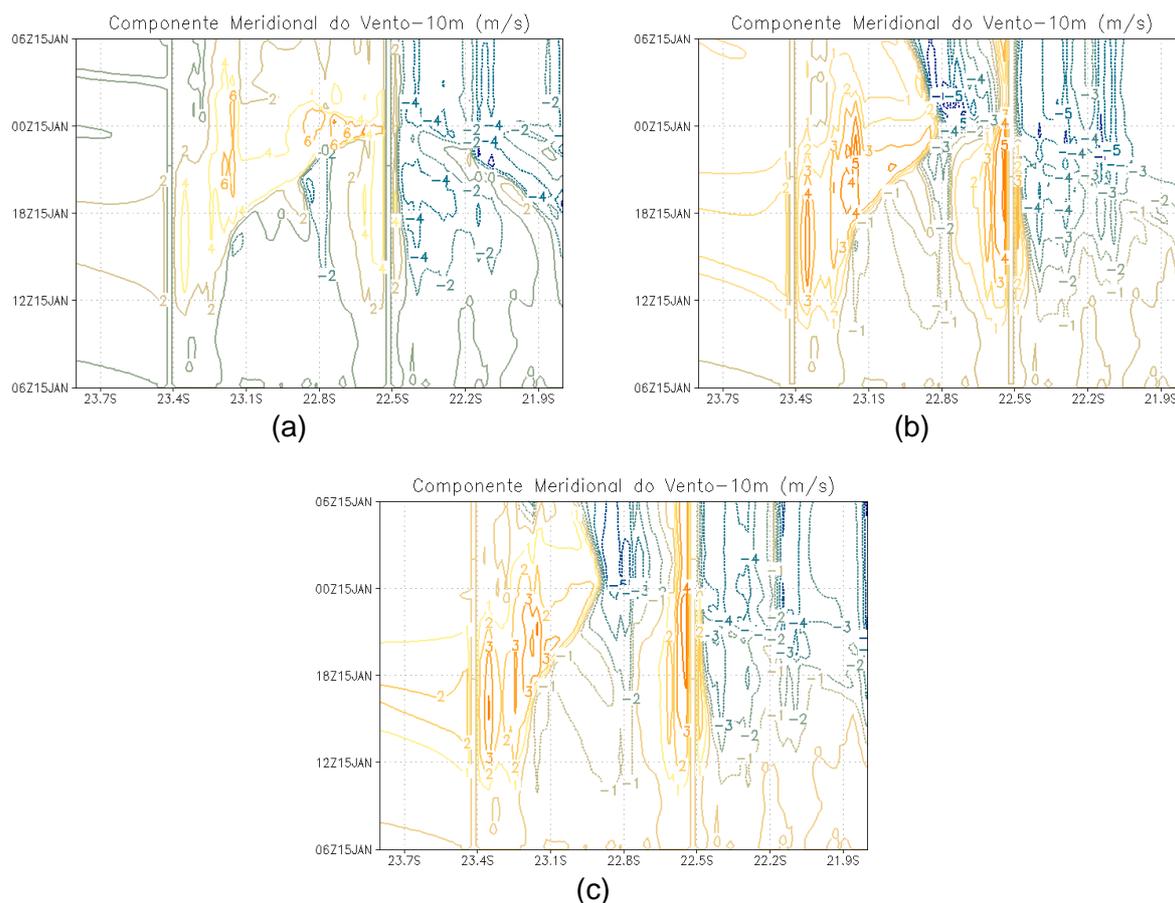


Figura 4.7. Componente Meridional do Vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), entre as 06Z do dia 15 e 06Z do dia 16/01/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

O segundo conjunto de simulações, denominado “inverno”, foi gerado partindo das 06Z do dia 15/07/2007, sendo a umidade do solo alterada três vezes. Da mesma forma que para as simulações de verão, nas simulações de inverno também só são notadas alterações na circulação, razão de mistura de vapor e temperatura potencial próximo às 12Z, quando a radiação solar já é mais intensa e o gradiente de pressão entre o ar sobre o continente e o ar sobre o oceano é mais intenso. Neste momento a brisa marítima é percebida no topo da Serra do Mar e a razão de mistura de vapor no caso cuja umidade é alta apresenta valor mais alto próximo à superfície do que nos outros casos (Figura 4.8).

Em comparação com as simulações de verão, cujas condições iniciais de umidade do solo para cada caso foram idênticas às simulações de inverno, neste último a razão de mistura de vapor é menor em todas as simulações. Devido às temperaturas mais baixas,

também a circulação de vale-montanha é menos intensa às 12Z, se comparada às simulações de verão.

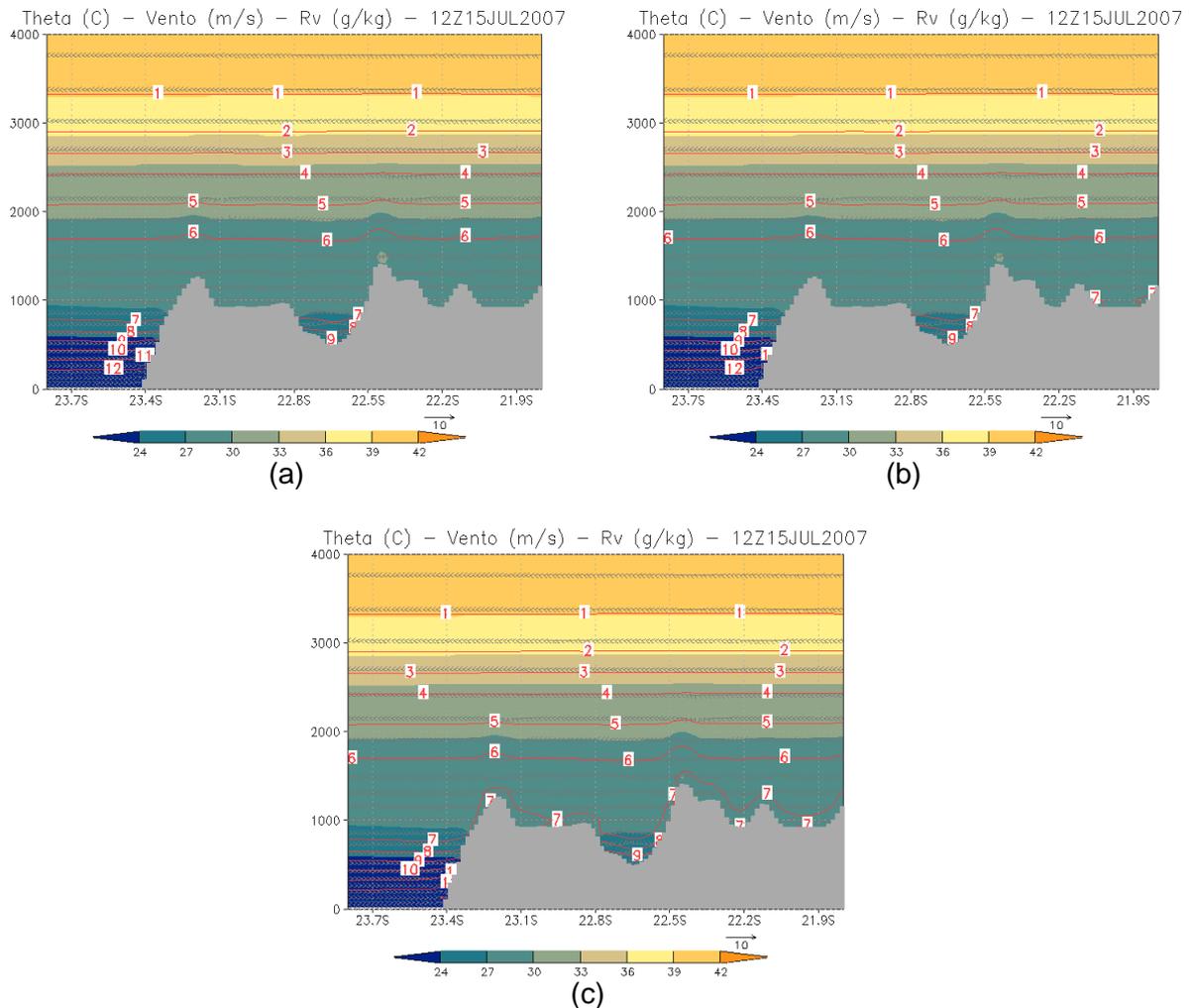


Figura 4.8. Temperatura potencial ( $^{\circ}\text{C}$ ), vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $\text{g kg}^{-1}$ ) às 12Z de 15/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

Às 15Z a brisa marítima atinge 2.500 m sobre a Serra do Mar nos três casos. A temperatura potencial é mais alta em superfície para o caso em que a umidade é baixa e as isolinhas de razão de mistura de vapor apresentam valores mais altos próximo à superfície para a situação cuja umidade é alta. A circulação de vale-montanha é menos intensa do que nas simulações para o verão, atingindo altitudes menores para o mesmo horário (2.500 m contra 3.000 m).

Durante a tarde não ocorrem alterações significativas no avanço da brisa marítima e nas temperaturas potenciais. Isso decorre das menores temperaturas atmosféricas e de superfície do mar no inverno, resultando em um gradiente de temperatura menos intenso entre a atmosfera sobre o continente e sobre o oceano, o que resulta em ventos e circulações menos intensos. Às 21Z observa-se o avanço da brisa marítima em direção ao Vale do Paraíba no caso de umidade baixa (Figura 4.9-a).

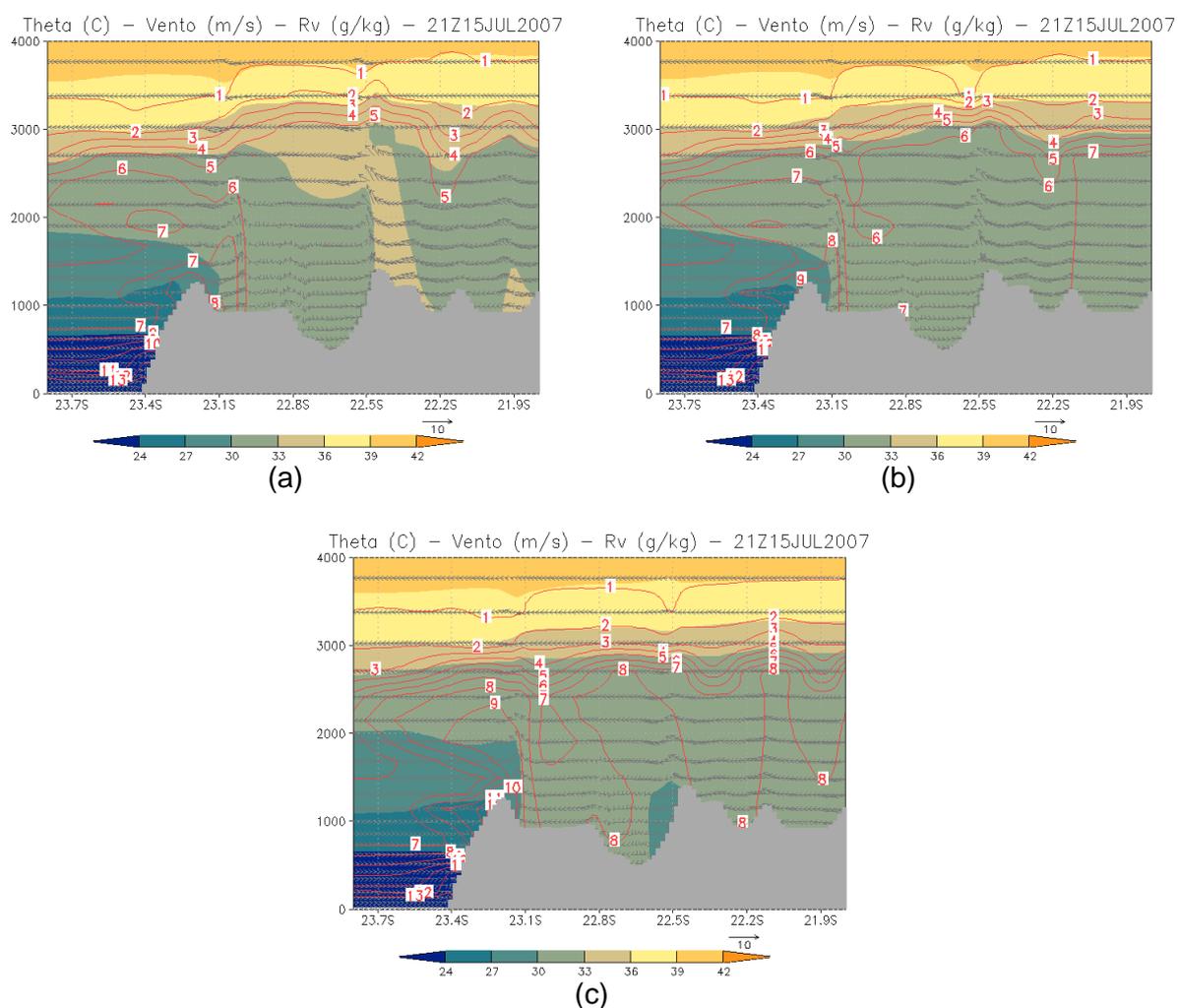


Figura 4.9. Temperatura potencial ( $^{\circ}\text{C}$ ), vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $\text{g kg}^{-1}$ ) às 21Z de 15/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

A brisa atinge a circulação de vale-montanha à beira do Vale do Paraíba às 00Z (Figura 4.10). Nas outras duas situações não ocorrem avanços significativos da brisa e, por

não serem reforçadas com a interação da circulação de vale-montanha, logo enfraquecem e dispersam.

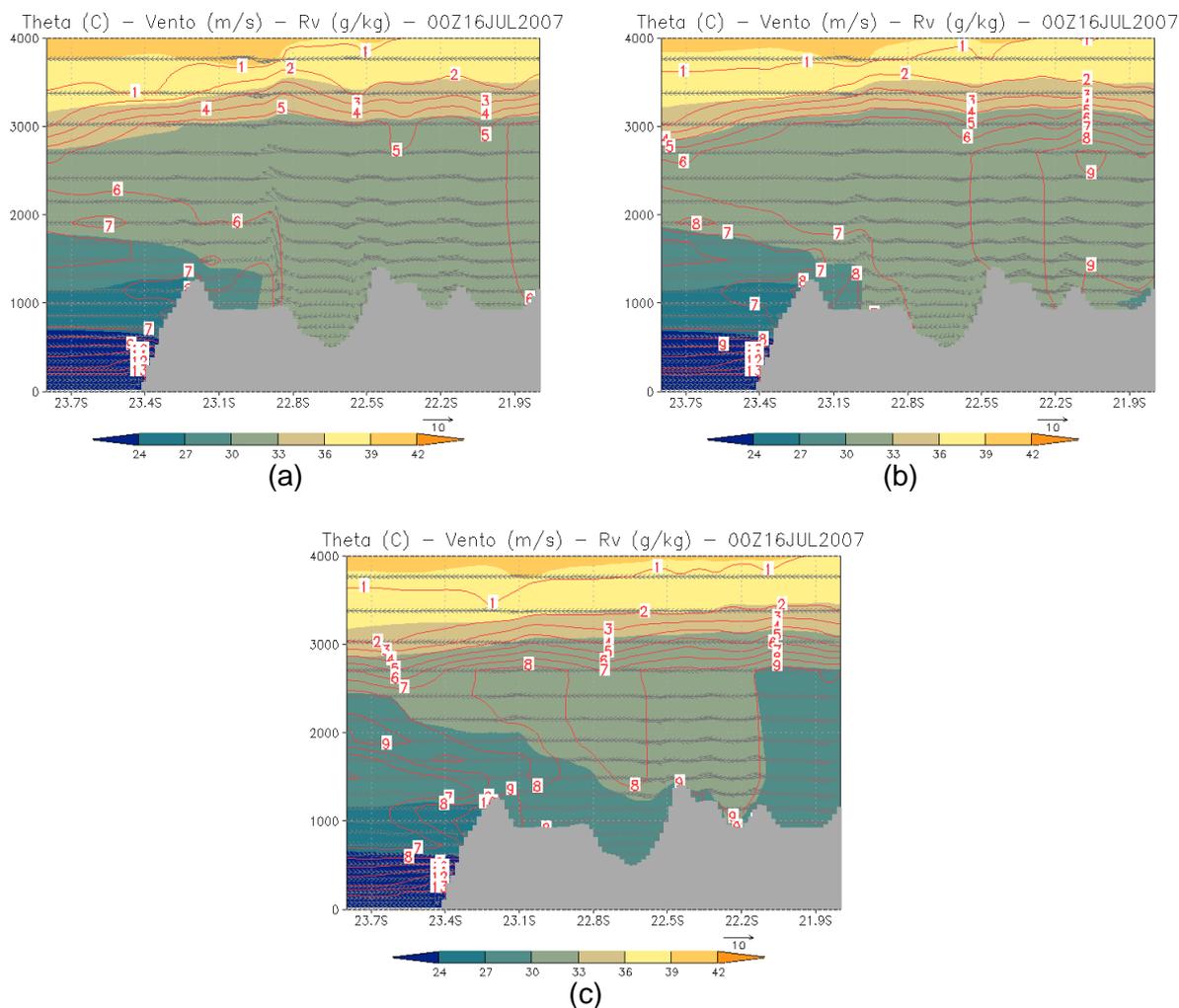


Figura 4.10. Temperatura potencial ( $^{\circ}\text{C}$ ), vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e razão de mistura de vapor ( $\text{g kg}^{-1}$ ) às 00Z de 16/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

Em seguida são apresentadas as figuras de componentes do vento (Figura 4.11 e Figura 4.12) para a simulação “inverno”. Novamente observam-se valores muito baixos para a componente zonal.

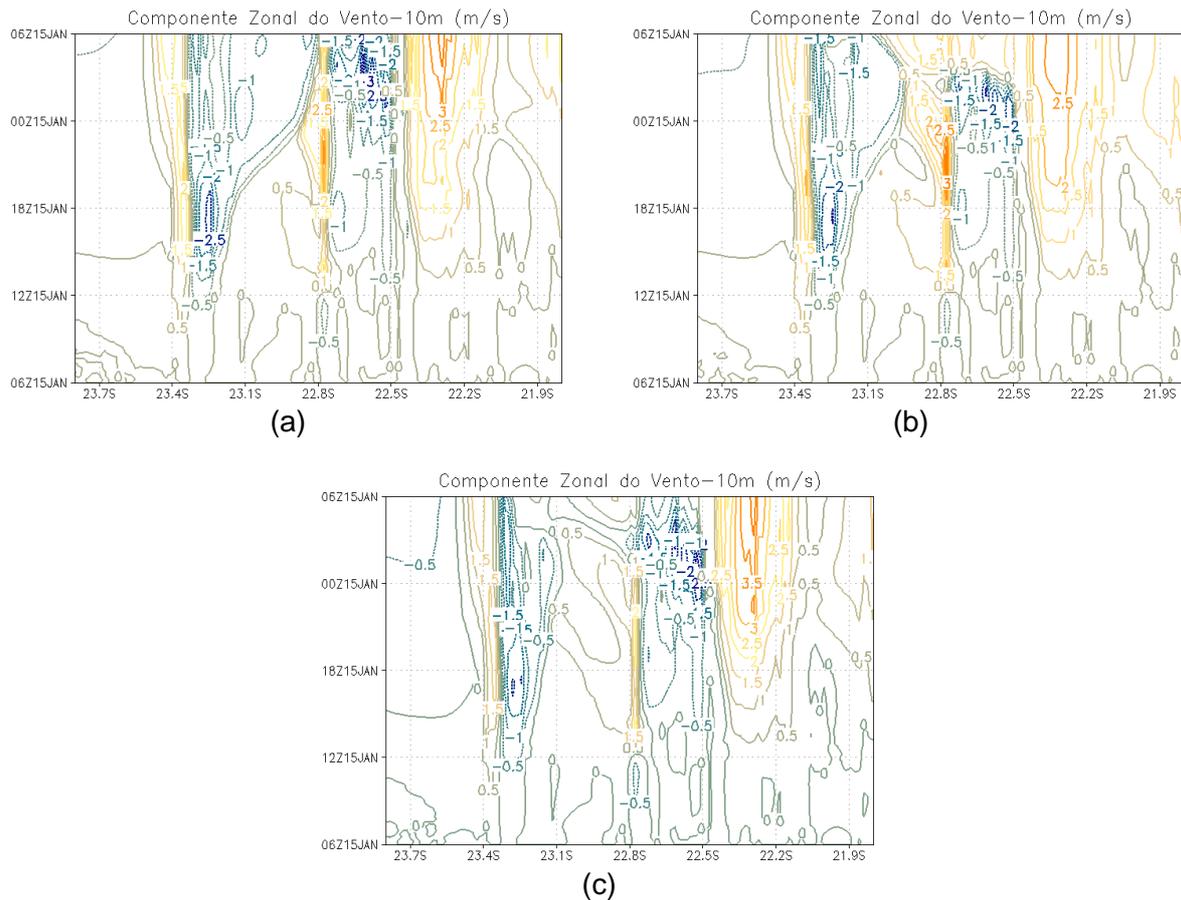


Figura 4.11. Componente Zonal do Vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), entre as 06Z do dia 15 e 06Z do dia 16/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

A componente meridional do vento acompanha o eixo em que foi feito o corte analisado (norte-sul). Como citado anteriormente, a brisa marítima não foi intensa em nenhum dos casos da simulação de inverno. Por este motivo, não são observados valores altos da componente meridional do vento. Ainda assim, pode se observar que a brisa marítima avança mais no caso de umidade baixa, em relação aos outros dois casos, atingindo  $3 \text{ m s}^{-1}$ .

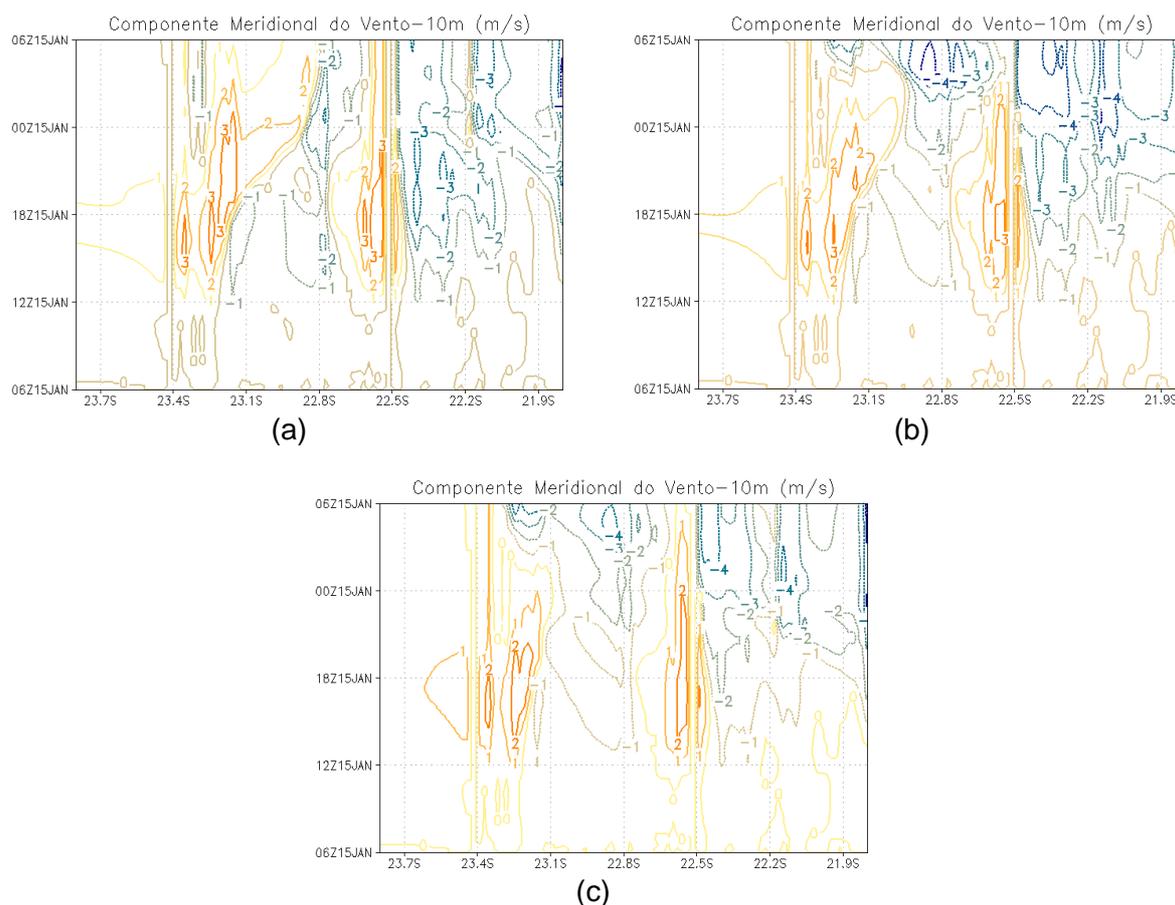


Figura 4.12. Componente Meridional do Vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), entre as 06Z do dia 15 e 06Z do dia 16/07/2007, nas três situações de grau de saturação inicial do solo simuladas, (a) baixa, (b) média e (c) alta.

#### 4.1.3 CONFIGURAÇÃO DO CONJUNTO DE EXPERIMENTOS 2

Após a realização dos estudos bidimensionais apresentados, passou-se à realização de um grupo de experimentos tridimensionais, ainda com inicialização homogênea. Também visavam à observação da interação entre brisa de vale-montanha e brisa marítima e da sensibilidade destas circulações locais em relação a mudanças na umidade do solo. As simulações tiveram início em 01/01/2004, 12Z, e duração de cinco dias, a fim de que fosse possível observar o ciclo diurno claramente, bem como a repetição diária da penetração da brisa marítima continente adentro. Desta forma, devem ser observados com maior clareza os controles exercidos pelos processos associados ao aquecimento diferencial entre montanhas, vales e oceano.

Os experimentos tiveram inicialização homogênea, partindo do repouso e com estrutura termodinâmica vertical típica da região, também baseada em medidas de radiossondagem do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão. Foram realizados em três dimensões, sendo os eixos horizontais rotacionados de forma que o eixo x se encontrasse praticamente paralelo à costa e ao Vale do Paraíba. A área desta simulação, Figura 4.13-a, abrange parte do oceano, a Serra do Mar e a Serra da Bocaina ao sul, a parte paulista do Vale do Rio Paraíba e da rodovia Presidente Dutra, e um trecho da Serra da Mantiqueira ao norte, no Estado de São Paulo. Para a análise de alguns parâmetros, foi realizado um corte longitudinal ao longo de  $45,3^{\circ}\text{W}$ , apresentado na Figura 4.13-b. Neste corte longitudinal observa-se a Ilhabela (entre  $23,9^{\circ}$  e  $23,7^{\circ}$ , aproximadamente), a Serra do Mar (entre  $23,6^{\circ}$  e  $23^{\circ}$ ), o Vale do Paraíba (entre  $23^{\circ}$  e  $22,6^{\circ}$ ) e a Serra da Mantiqueira (entre  $22,6^{\circ}$  e  $22,2^{\circ}$ ).

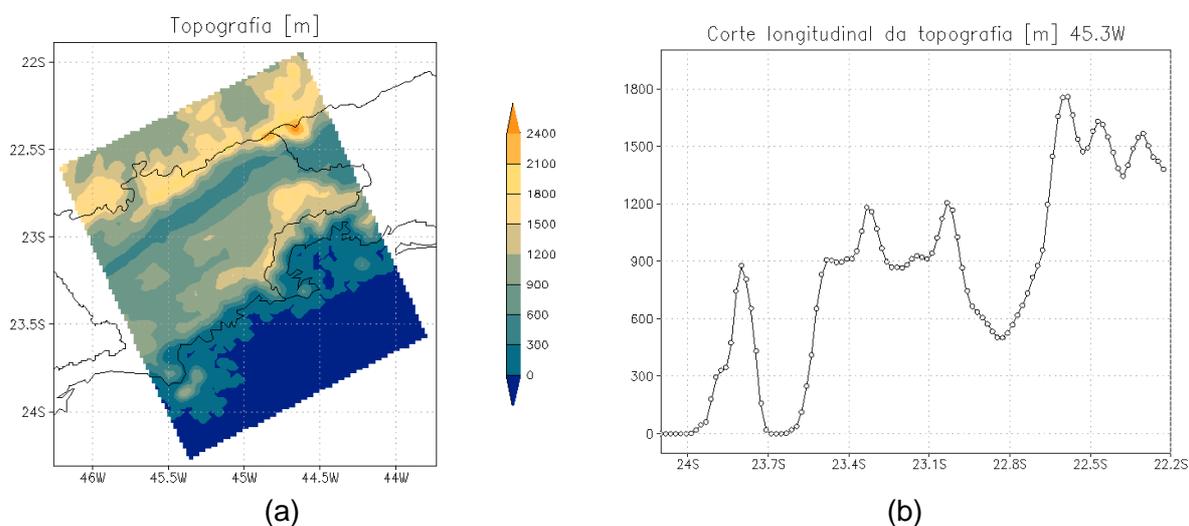


Figura 4.13. Topografia (m), (a) da área total e (b) de um corte longitudinal em  $45,3^{\circ}\text{W}$ .

Considerando que a presença de eucaliptos pode alterar a umidade do solo, modificou-se o parâmetro grau de saturação inicial do solo, para a observação da influência da umidade do solo nas circulações locais. Para tanto, foram simuladas duas situações

distintas, sendo atribuídos dois valores ao grau de saturação inicial do solo: 0,40 e 0,80, que permaneceram constantes para todas as camadas de solo.

#### 4.1.4 RESULTADOS DO CONJUNTO DE EXPERIMENTOS 2

Para a análise da entrada da brisa e sua atuação sobre o Vale do Paraíba, bem como o desenvolvimento da brisa de vale, são apresentadas a seguir figuras referentes aos campos de vento em 1500 m, para as duas simulações realizadas com graus de saturação inicial do solo distintos. Como a brisa marítima se desenvolve a partir da intensificação da radiação solar, esta atinge o seu máximo no meio da tarde e alcança o Vale do Paraíba por volta de 18Z nos dias simulados. Portanto, são apresentadas figuras das 18Z do primeiro, terceiro e quinto dia de integração.

Devido à inicialização homogênea e vento nulo do modelo no início da integração, após apenas 6h de integração, as diferenças entre as circulações das duas simulações realizadas com distintos graus de saturação do solo são mínimas (Figura 4.14). Entretanto, é possível observar que o posicionamento da frente de brisa marítima avançou mais no caso mais seco, com ventos mais intensos. Quanto mais seco o ambiente, maior o seu aquecimento, e conseqüentemente, o gradiente de pressão horizontal. Desta forma, a circulação de brisa marítima tende a ser mais intensa em ambientes mais secos, justificando as velocidades maiores dos ventos da brisa marítima e o seu maior alcance continente adentro, embora estas diferenças ainda sejam mínimas no início da integração.

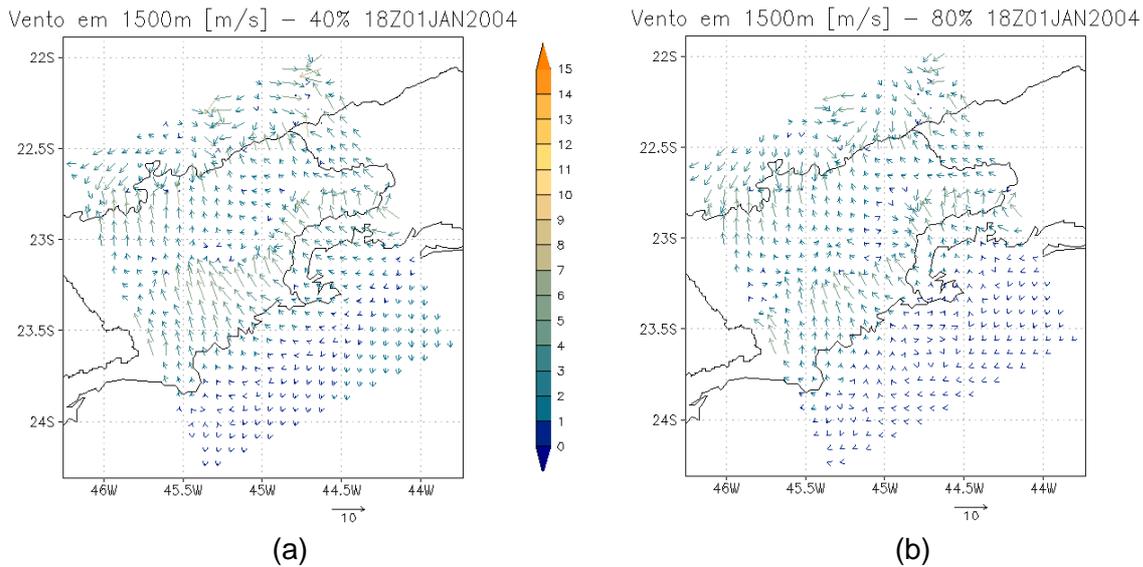


Figura 4.14. Vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) em 1500 m para simulação com grau de saturação inicial do solo de (a) 0,40 e (b) 0,80 em 01/01/2004, às 18Z.

Às 18Z do dia 03/01/2004 as diferenças entre as duas simulações já são mais visíveis. Devido ao ressecamento do ambiente (não há outras fontes de umidade durante a integração, além da umidade do solo), o aquecimento no caso com grau de saturação inicial do solo de 0,40 é maior, e, portanto, as circulações de montanha também são intensificadas (Figura 4.15). No caso mais úmido, as temperaturas tendem a permanecer mais baixas, até que o ambiente se torne mais seco, e assim, as circulações são menos intensas.

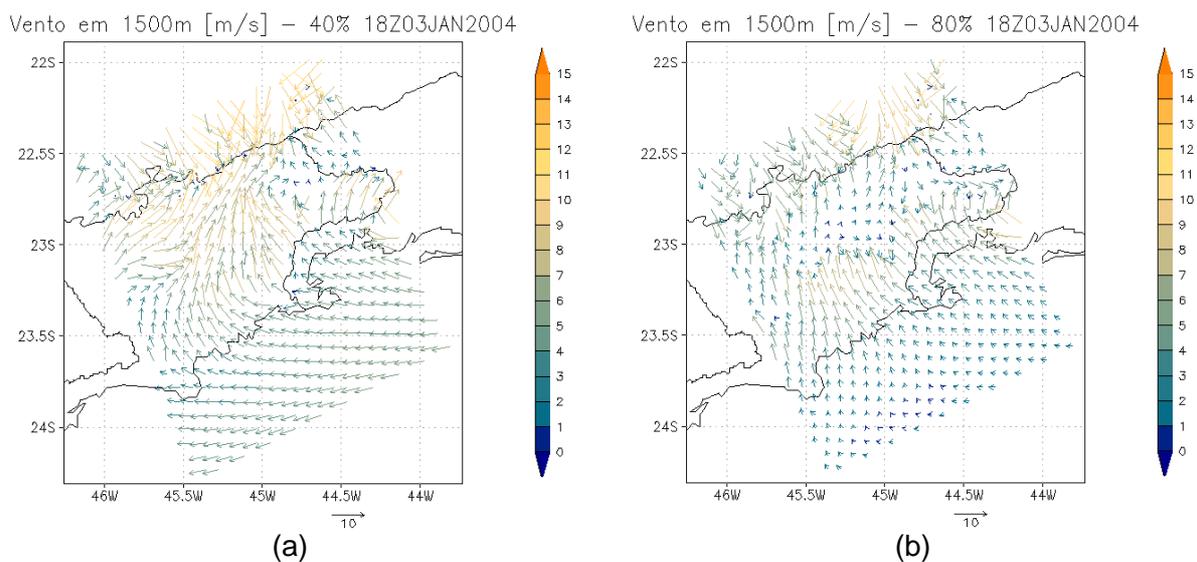


Figura 4.15. Vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) em 1500 m para simulação com grau de saturação inicial do solo de (a) 0,40 e (b) 0,80 em 03/01/2004, às 18Z.

No quinto dia da integração, ambas as simulações apresentaram temperaturas bastante altas (Figura 4.16), resultantes da condição inicial homogênea e ausência de fontes de umidade durante a simulação. À medida que as temperaturas aumentam, o gradiente de pressão horizontal é intensificado e os ventos que compõem a brisa marítima também se tornam mais fortes. O mesmo se aplica à brisa de vale.

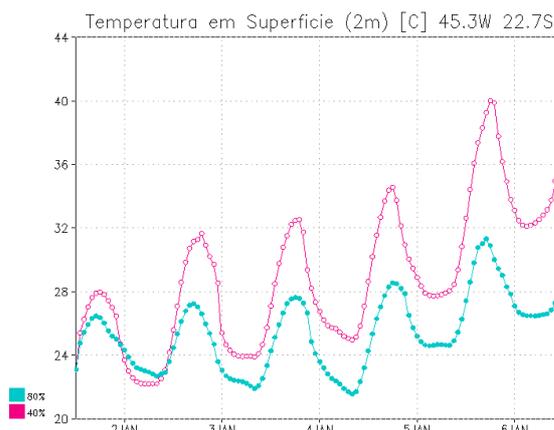


Figura 4.16. Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) próxima à superfície nas duas situações de grau de saturação inicial do solo.

Ambas as simulações sofrem o ressecamento do ambiente; entretanto, na simulação com grau de saturação inicial 0,80, o impacto da redução na umidade se torna mais pronunciado no quinto dia, enquanto que no caso com grau de saturação inicial 0,40, a intensificação da brisa marítima pela baixa umidade do ambiente já havia sido percebida no terceiro dia da integração.

Na simulação em que o grau de saturação inicial era 0,40, os ventos da brisa marítima atingem velocidades de até  $15 \text{ m s}^{-1}$  (Figura 4.17). Na outra simulação, devido à intensificação da brisa de vale, a brisa marítima é impedida de avançar sobre o continente e ambas se encontram próximo ao centro do vale às 18Z.

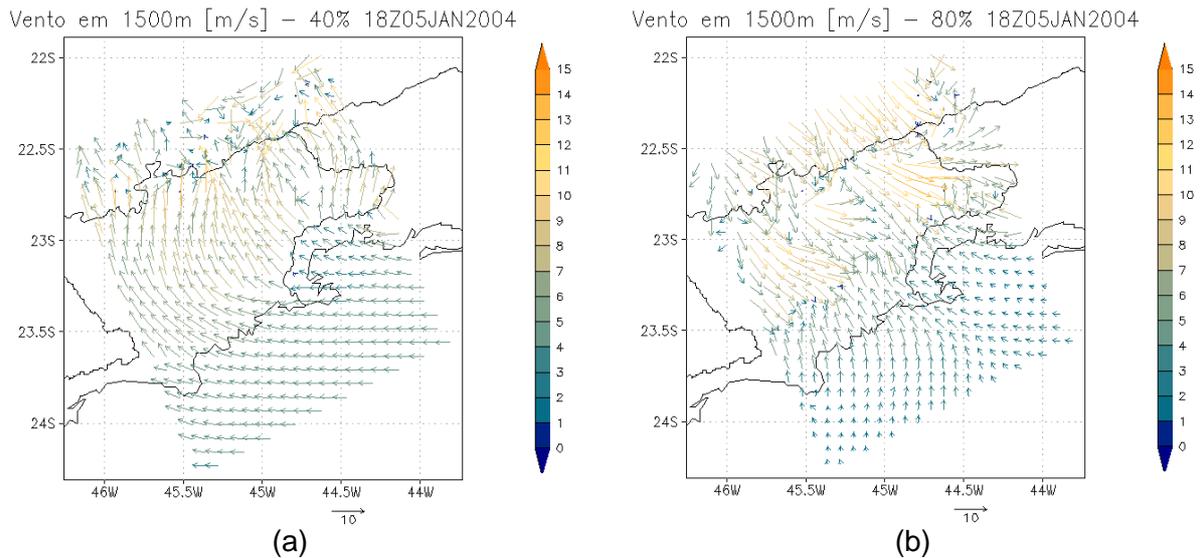


Figura 4.17. Vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) em 1500 m para simulação com grau de saturação inicial do solo de (a) 0,40 e (b) 0,80 em 05/01/2004, às 18Z.

Na Figura 4.18 pode ser observada a componente meridional do vento para todo o período, nas duas simulações realizadas. Esta componente acompanha o eixo em que foi feito o corte longitudinal (norte-sul), e possibilita a observação da entrada da brisa marítima nas duas simulações, com valores de até  $10 \text{ m s}^{-1}$  no caso em que o grau de saturação inicial do solo é mais baixo, enquanto que no caso mais úmido a velocidade da brisa marítima não ultrapassa  $6 \text{ m s}^{-1}$ .

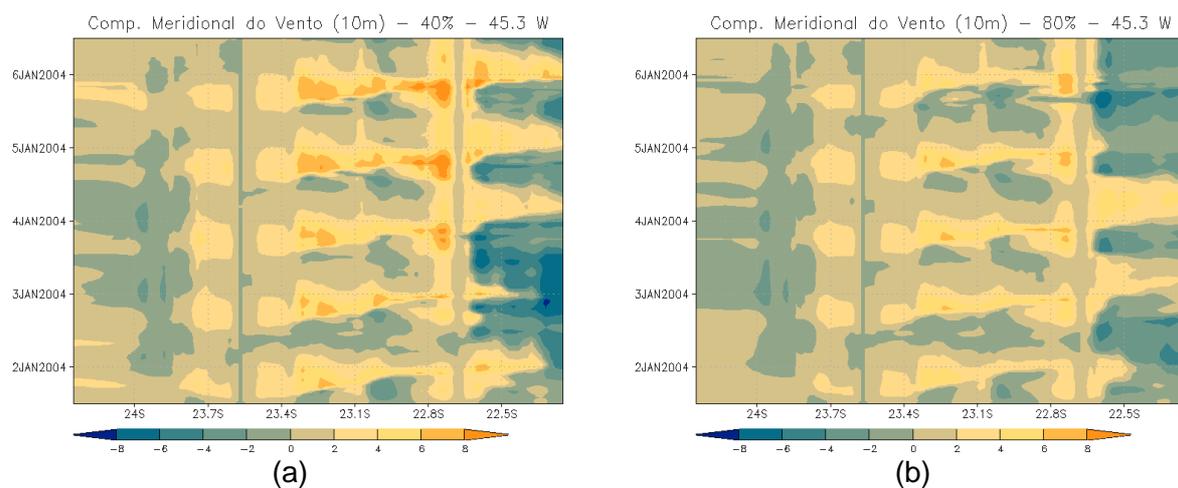


Figura 4.18. Componente meridional do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 10 m de altura em relação à superfície, para simulação com grau de saturação inicial do solo de (a) 0,40 e (b) 0,80, entre 01 e 06/01/2004.

## 4.2 EXPERIMENTOS COM INICIALIZAÇÃO HETEROGÊNEA

Os experimentos com inicialização heterogênea tiveram por objetivo avaliar os efeitos de condições sinóticas do período de inverno sobre os fluxos de superfície, circulações locais e concentrações de poluentes resultantes da presença das alterações do uso do solo na região do Vale do Paraíba (presença da Rodovia Presidente Dutra e vizinhanças urbanizadas e a expansão da área de reflorestamento de eucaliptos no Vale do Paraíba). Os cenários apresentados no item 3.9 foram empregados nesta etapa, assim como o método de separação de fatores proposto por Stein e Alpert (1993). Conforme apresentado no referido item, os quatro cenários variavam em relação à presença ou ausência da rodovia e da área de reflorestamento. Estes ensaios foram avaliados sob duas perspectivas distintas. No primeiro grupo de experimentos, buscou-se avaliar os efeitos das alterações do uso do solo sobre os fluxos de superfície e circulações locais. No segundo grupo de experimentos foram explorados os efeitos das mesmas alterações no uso do solo sobre as concentrações de poluentes.

Apresentam-se nos próximos itens as configurações dos experimentos e os resultados encontrados.

### 4.2.1 CONFIGURAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Tanto o grupo de experimentos para avaliação dos fluxos de superfície e circulações locais, quanto o grupo de experimentos para avaliação das concentrações de poluentes apresentaram as mesmas configurações gerais da grade numérica usada no modelo BRAMS. Os períodos considerados são os mesmos apresentados anteriormente para validação do modelo: para avaliação dos fluxos de superfície e circulações locais foi utilizado o período entre 28 de julho e 08 de agosto de 2006, enquanto que para a avaliação das concentrações de poluentes foi utilizado o período de 28 de julho a 06 de agosto de 2005. Para a análise do período de 2006 foram descartados os primeiros dois dias, sendo

avaliados 10 dias de simulações; para a análise do período de 2005, realizou-se uma simulação prévia do dia anterior, partindo de uma condição em que a atmosfera apresentava concentração nula dos poluentes considerados nas simulações. Este procedimento foi realizado por Freitas et al. (2005) e é requerido em função da ausência de uma rede de observações que permita inicializar o modelo com campos observados dos poluentes. O período de 2005 foi caracterizado pela ausência da atuação de sistemas frontais sobre o Estado de São Paulo. Portanto, os resultados são representativos de um período pouco perturbado, do ponto de vista dos sistemas sinóticos. Por outro lado, o período de 2006 apresentou maior ocorrência de atuação de sistemas frontais, tendo sido escolhido devido à disponibilidade de dados para validação.

De maneira geral, as configurações anteriormente apresentadas para as simulações de validação do modelo (item 3.11) também foram empregadas nestes experimentos e são resumidas na Tabela 4.3. Destaca-se a utilização dos quatro cenários de uso do solo.

Tabela 4.3 - Principais configurações empregadas nos experimentos com inicialização heterogênea.

Parâmetros	Configurações das simulações			
	Ensaio1	Ensaio2	Ensaio3	Ensaio4
Simulações				
Início das integrações	28/07/2005 <sup>(1)</sup> e 28/07/2006 <sup>(2)</sup>			
Duração da integração (dias)	10 e 12			
Cenários	SemDut_ SemEuc	ComDut_ SemEuc	SemDut_ ComEuc	ComDut_ ComEuc
Número de grades	2			
Pontos das grades em E-W	28 (78)			
Pontos das grades em N-S	24 (70)			
Resolução (km)	16 (4)			
Inicialização do grau de saturação do solo	Homogêneo			
Parametrização de radiação	Chen e Cotton			
Nível de microfísica	3			
Modelo fotoquímico	ativado <sup>(1)</sup> e desativado <sup>(2)</sup>			
Condição inicial	heterogênea (reanálises do NCEP)			

<sup>(1)</sup> experimentos para avaliação das concentrações de poluentes.

<sup>(2)</sup> experimentos para avaliação dos fluxos de superfície e circulações locais.

As áreas abrangidas pelas grades utilizadas são ilustradas na Figura 4.19 e compreendem a porção paulista do Vale do Paraíba, a RMSP, parte do oceano, parte do

interior do Estado de São Paulo e do sul de Minas Gerais. As análises a serem apresentadas consideraram os resultados encontrados na grade 2.

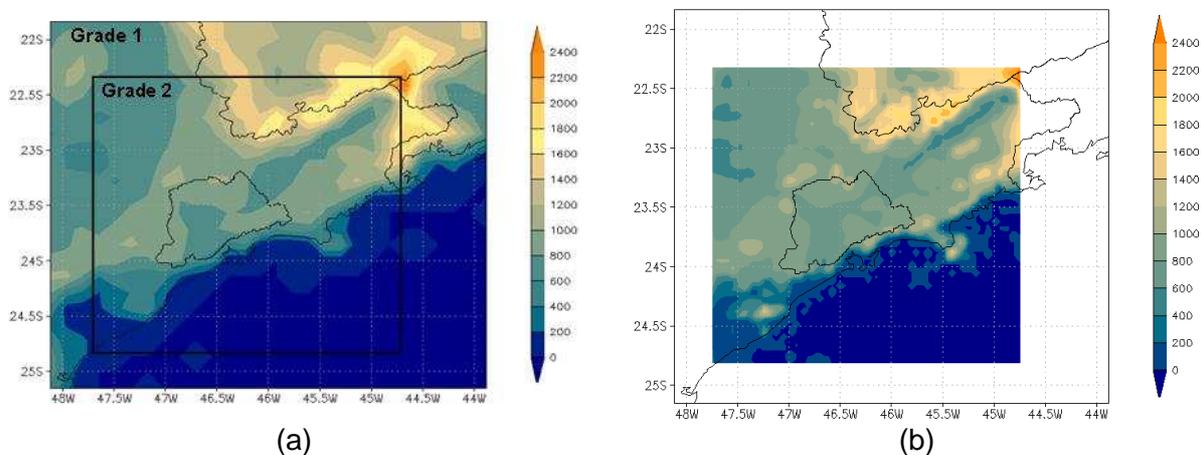


Figura 4.19. Topografia (m), (a) na grade 1 e (b) na grade 2 para os experimentos com inicialização heterogênea.

Além da topografia, o grau de saturação inicial do solo apresentado no item 3.5 foram mantidos nestes experimentos e, portanto, variaram entre 0,25 (próximo à superfície) e 0,5 (profundidade de 5 m), sendo horizontalmente homogêneos.

Adicionalmente, foram conduzidos dois experimentos em que a topografia foi anulada, e cujos cenários empregados foram `com_dut_sem_euc` e `com_dut_com_euc` (Tabela 3.2). Estas simulações foram realizadas para avaliar os efeitos das alterações no uso do solo sobre as circulações locais.

#### 4.2.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO NOS FLUXOS DE SUPERFÍCIE

A análise dos experimentos com inicialização homogênea confirmou que em um ambiente mais quente e seco o gradiente de pressão entre a atmosfera sobre o vale e sobre o oceano seria maior e o avanço da brisa marítima seria beneficiado, sendo o oposto válido para ambientes mais frios e úmidos. Se por um lado a presença de eucaliptos reduziria a

umidade do solo, devido à sua maior eficiência no uso da água em relação a outras culturas, aumentando a umidade atmosférica e diminuindo o fluxo de calor sensível (e, portanto, o aquecimento), por outro lado, a redução no albedo em relação à pastagem, por exemplo, aumentaria a absorção de energia solar, elevando as temperaturas do ambiente. A realização dos experimentos heterogêneos, com maior detalhamento do impacto das alterações impostas pela mudança de cobertura vegetal associada às plantações de eucaliptos tornou-se então necessária, a fim de esclarecer qual seria o efeito dominante da presença de eucaliptos sobre as circulações locais em situações sinóticas reais.

O método proposto por Stein e Alpert (1993), descrito no item 3.8, foi aplicado na definição de quatro ensaios distintos para que fosse possível avaliar os efeitos da presença e ausência de dois fatores: a Rodovia Presidente Dutra e vizinhanças urbanizadas e a área de expansão de reflorestamento de eucaliptos. Por meio deste método foi possível avaliar os campos resultantes devidos aos fatores isolados e à interação entre os mesmos. A seguir apresentam-se os resultados médios horários obtidos para o período simulado.

Nas figuras a seguir observa-se separadamente o efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra (Figura 4.20), o efeito isolado da presença da área de expansão de reflorestamento de eucaliptos (Figura 4.21) e o efeito combinado destes dois fatores (Figura 4.22) sobre o fluxo de calor sensível, sendo estes efeitos resultantes dos valores médios horários observados para o período estudado. Ressalta-se que não foi definida uma escala comum a todas as figuras, para que todas as alterações pudessem ser melhor observadas. Também está sobreposto em todas as figuras o campo de vento médio horário do período proveniente da simulação em que os dois fatores foram considerados.

Observando os efeitos sobre o fluxo de calor sensível,  $H$ , considerando apenas a presença da Dutra (entenda-se por “Dutra” o efeito da zona urbanizada ao longo da Rodovia Presidente Dutra), nota-se que durante o dia e a noite as alterações se restringem à rodovia, sendo positivas durante a noite e negativas durante o dia. Às 21Z a presença da Dutra gera aumentos no fluxo de calor sensível de até  $55 \text{ W m}^{-2}$  e às 15Z a presença da rodovia gera

reduções deste fluxo sobre a sua própria localização, que atingem valores médios inferiores a  $-140 \text{ W m}^{-2}$ .

O efeito sobre o fluxo de calor sensível considerando a ausência da rodovia e a presença do reflorestamento de eucaliptos gera reduções de até  $210 \text{ W m}^{-2}$  às 18Z sobre a própria área de reflorestamento. Em consequência do ambiente mais úmido, as temperaturas na área reflorestada tendem a ser inferiores aos arredores, reduzindo o fluxo de calor sensível durante o dia. Durante a noite este efeito é reduzido, sendo praticamente imperceptível no início da manhã.

Quando combinados os efeitos destes dois fatores nota-se que praticamente todo o domínio apresenta alterações que variam em torno de zero. Sobre as áreas urbanas do VP surgem pequenas áreas com valores negativos durante a noite e positivos durante o dia (entre 12Z e 15Z apenas), indicando que a interação entre os dois fatores reduz o fluxo de calor sensível à noite e o aumenta durante o dia. Também a sudeste da RMSP observam-se alterações no fluxo de calor sensível de sinais variados, sendo que às 15Z estas alterações variam entre  $-120$  e  $100 \text{ W m}^{-2}$ . Ainda, a atuação do vento não exerce influências perceptíveis sobre a localização das alterações no fluxo de calor sensível nas três situações analisadas.

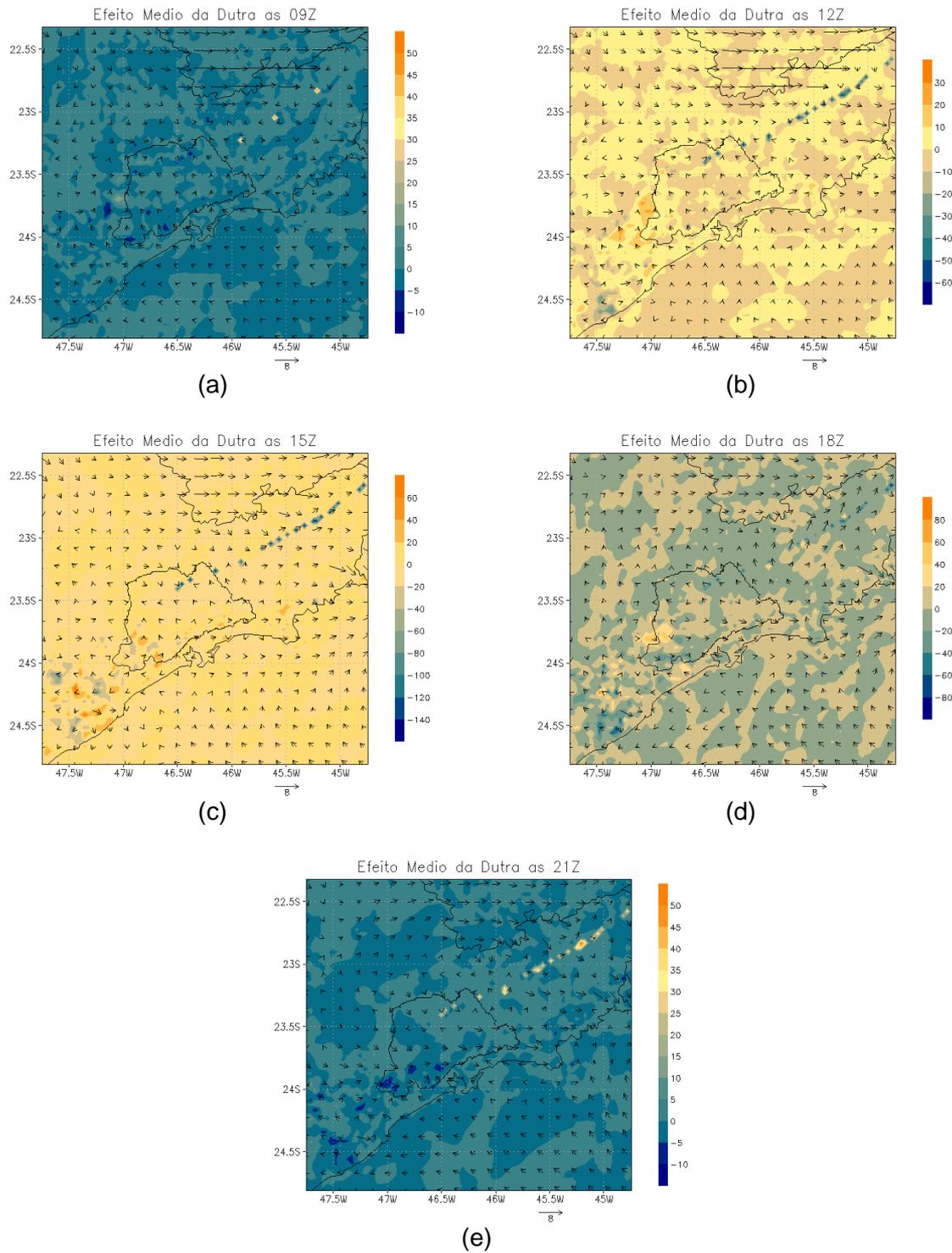


Figura 4.20. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre o fluxo médio horário de calor sensível ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

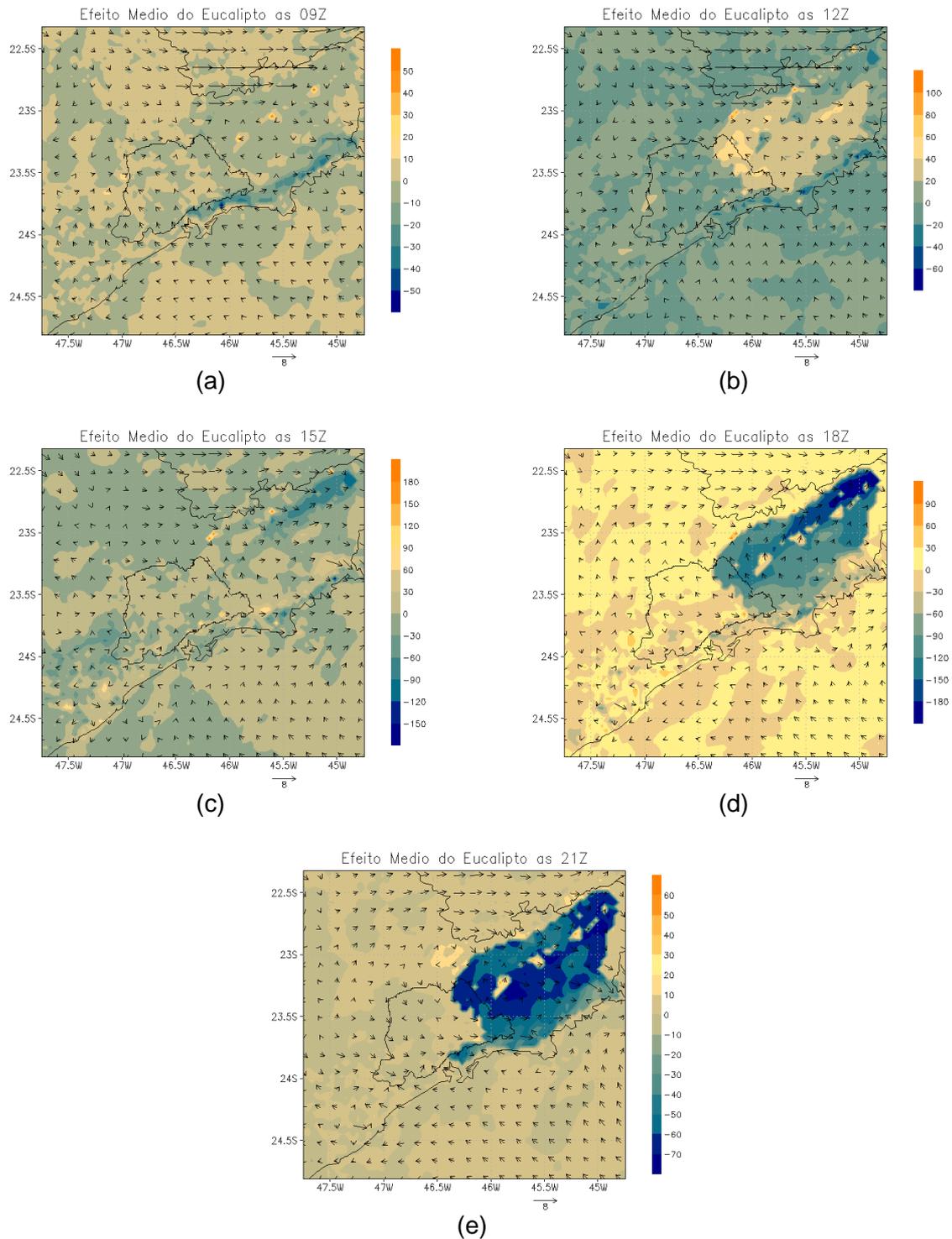


Figura 4.21. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o fluxo médio horário de calor sensível ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

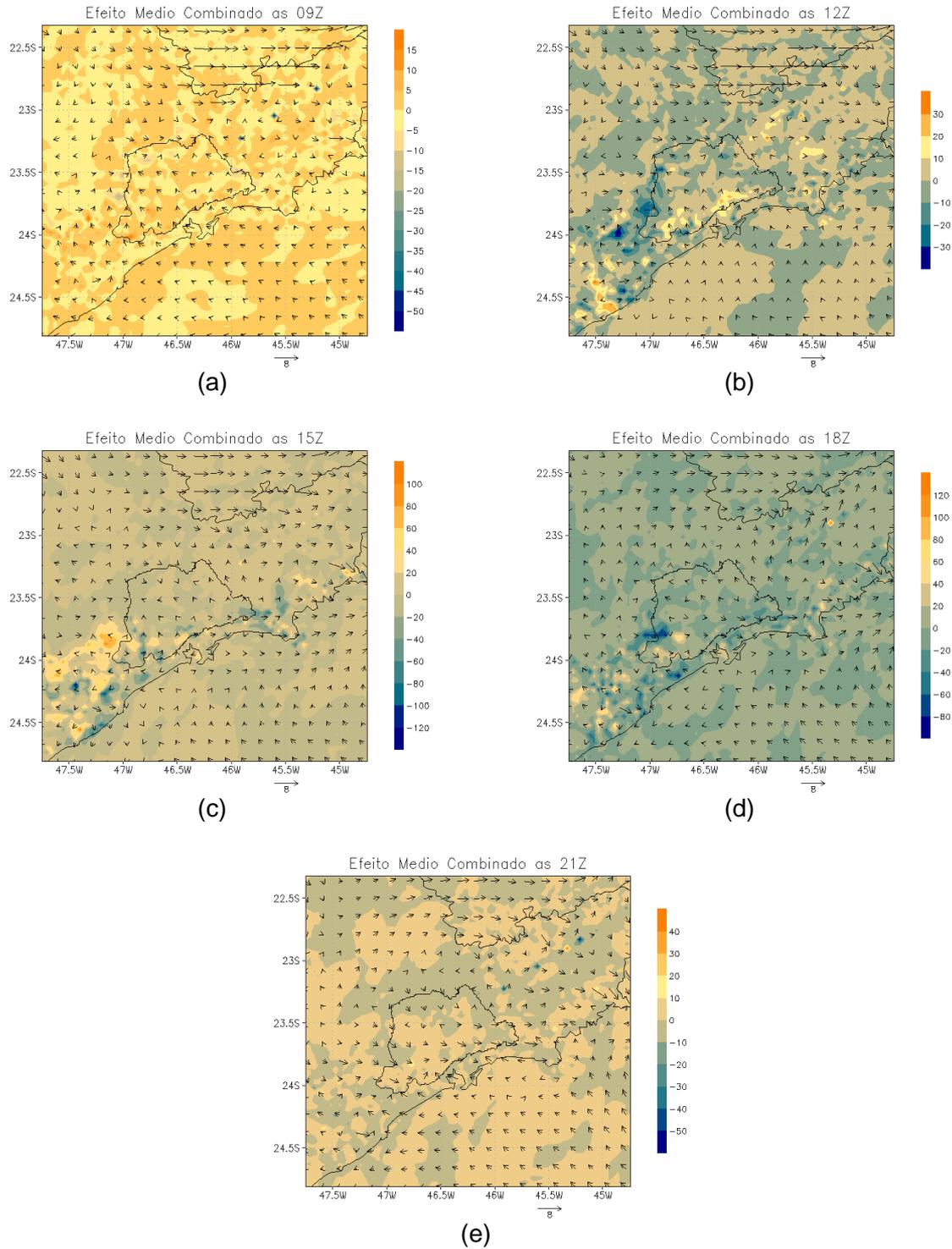


Figura 4.22. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e do reflorestamento de eucaliptos sobre o fluxo médio horário de calor sensível ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

Em seguida, são apresentados da mesma forma os efeitos isolados (Figura 4.23 e Figura 4.24) e combinados (Figura 4.25) dos dois fatores sobre o fluxo de calor latente,  $LE$ , com a sobreposição do campo médio de vento da simulação em que os dois fatores foram considerados. Nenhuma escala comum a todas as figuras foi definida, para que todas as alterações pudessem ser melhor observadas. Quando apenas o efeito da Rodovia Presidente Dutra é avaliado observam-se incrementos em  $LE$  durante o dia e a noite sobre a rodovia, aumentando este fluxo em até  $75 \text{ W m}^{-2}$ . As demais áreas apresentam valores variáveis em torno de zero.

Quanto ao efeito sobre o calor latente devido à presença dos eucaliptos, são observados valores positivos durante o dia, gerando incrementos entre  $60$  e  $350 \text{ W m}^{-2}$  sobre este fluxo na área de reflorestamento. Este fato está associado à maior capacidade de extração de água do solo através das raízes e transporte para as folhas, onde ocorre a evapotranspiração. O resultado deste processo é o aumento da umidade atmosférica deste ambiente e, evidentemente, o maior uso da energia solar disponível no processo da evapotranspiração em detrimento do uso da energia solar para aquecer a superfície.

Novamente observa-se que todo o domínio apresenta alterações em torno de zero, decorrentes do efeito combinado da Dutra e dos eucaliptos, com exceção de alguns pontos sobre as áreas urbanas do VP. Observam-se valores negativos durante o dia e a noite sobre estas áreas, gerando reduções de até  $270 \text{ W m}^{-2}$  sobre o fluxo de calor latente entre as 15 e 18Z. Mais uma vez, a atuação do vento não interfere na localização das alterações sobre  $LE$ .

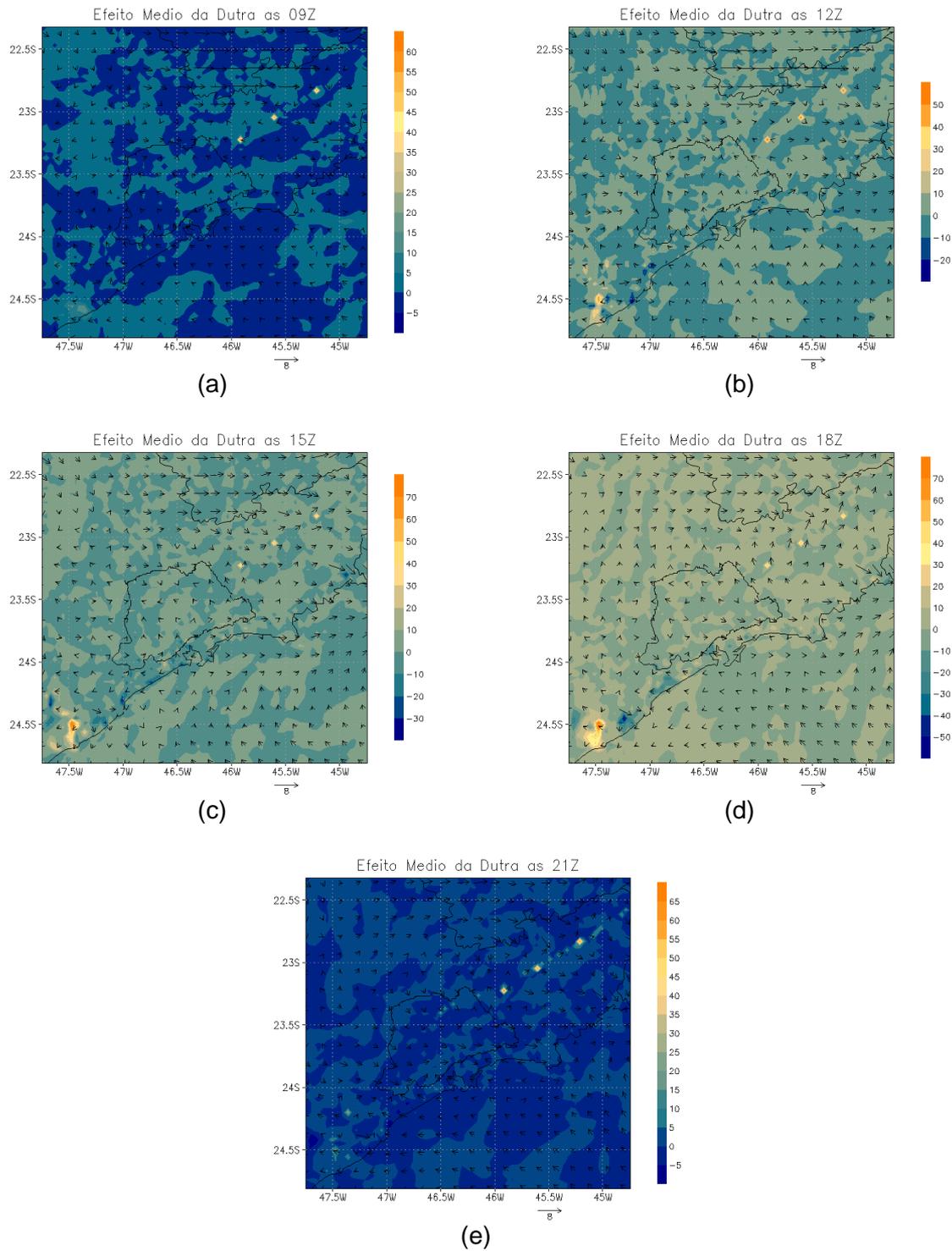


Figura 4.23. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre o fluxo médio horário de calor latente ( $\text{W m}^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

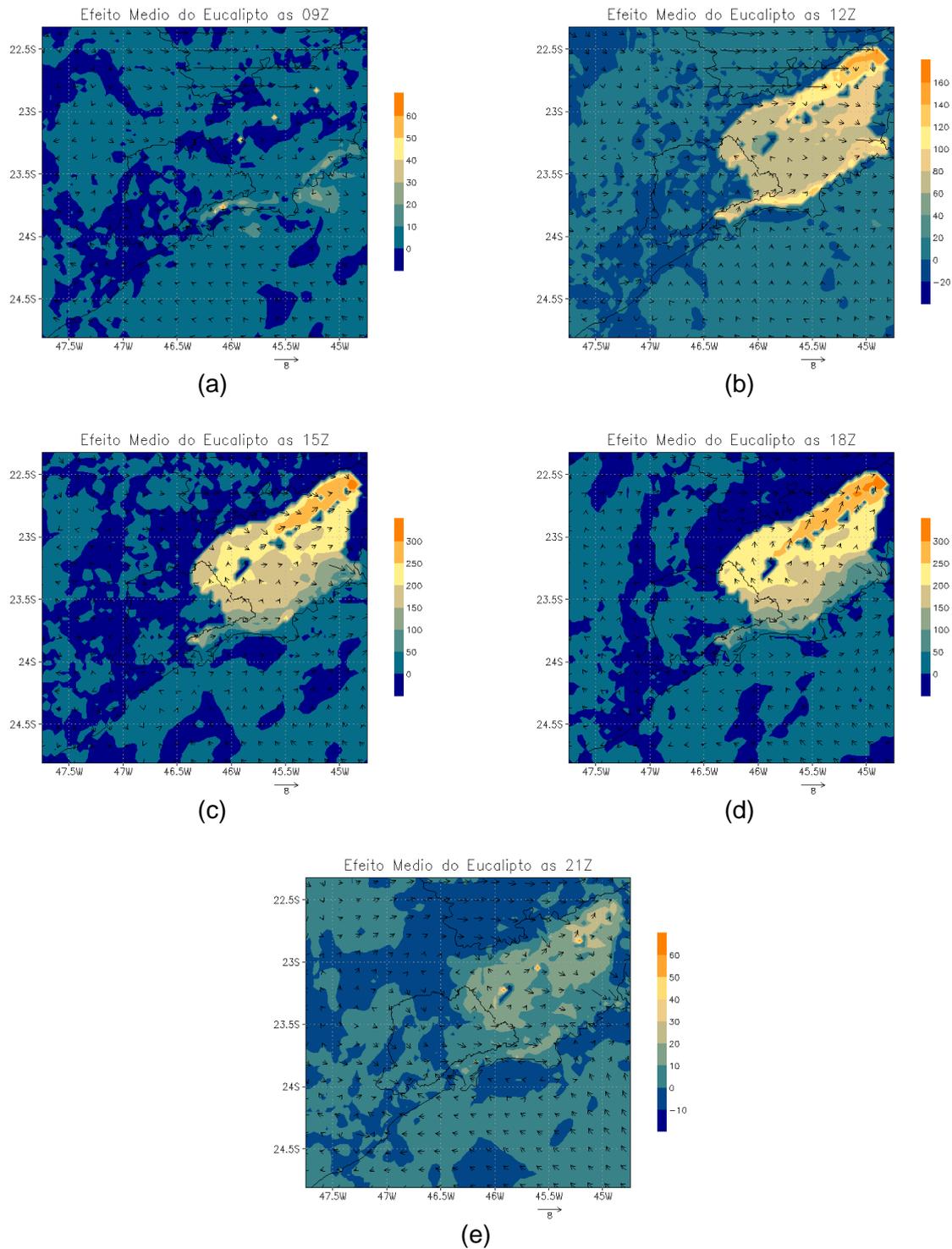


Figura 4.24. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o fluxo médio horário de calor latente ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

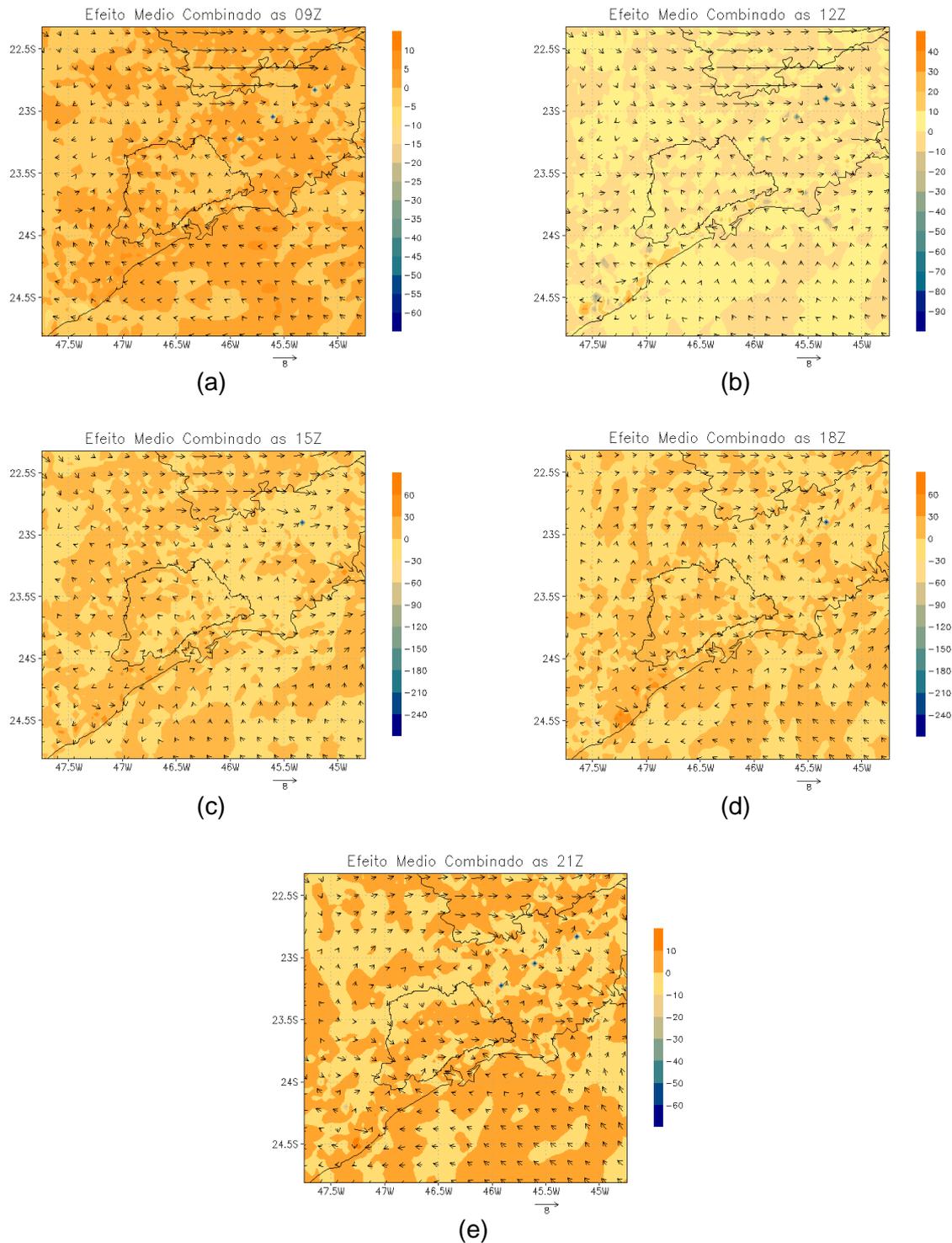


Figura 4.25. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o fluxo médio horário de calor latente ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

A mesma análise de efeitos isolados (Figura 4.26 e Figura 4.27) e combinados (Figura 4.28) é apresentada ainda em relação ao balanço global de radiação (*BGR*). Ao analisar os efeitos isolados da presença da zona urbanizada ao longo da Rodovia Presidente Dutra sobre o *BGR*, nota-se que sobre a Dutra são observados aumentos no balanço global de radiação durante o dia e a noite, atingindo incrementos de  $120 \text{ W m}^{-2}$  às 15Z. Considerando apenas a presença do reflorestamento de eucaliptos, também são observados aumentos no *BGR* sobre a referida área, gerando um incremento de até  $120 \text{ W m}^{-2}$  às 18Z.

As alterações no balanço global de radiação originam-se de alterações nos balanços de ondas curtas e longas. Considerando o efeito isolado da Dutra sobre o *BOC* (Figura 4.29-I) tem-se que este balanço sofre incremento sobre a própria Dutra durante o dia (até  $90 \text{ W m}^{-2}$ ). Quando se observa a presença dos eucaliptos (Figura 4.29-II), incrementos menos intensos em todo o VP apresentam valores entre 0 e  $30 \text{ W m}^{-2}$ . Já o *BOL* (Figura 4.30) sofre alterações menos intensas pela presença isolada da Dutra (inferiores a  $50 \text{ W m}^{-2}$ ), mas mais intensas pela presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos (entre 40 e  $70 \text{ W m}^{-2}$ ). Desta forma, nota-se que ambos os fatores contribuem de maneira semelhante sobre os balanços de ondas curtas e longas, compondo as alterações observadas no *BGR*.

Quanto ao efeito combinado dos fatores sobre o balanço global de radiação (Figura 4.28), nota-se mais uma vez a não-linearidade da interação entre os fatores. Alguns pequenos pontos podem ser identificados sobre as áreas urbanas do VP, resultando em reduções inferiores a  $100 \text{ W m}^{-2}$  nos valores de *BGR* durante o dia. Novamente, não é observada nenhuma alteração significativa na área reflorestada.

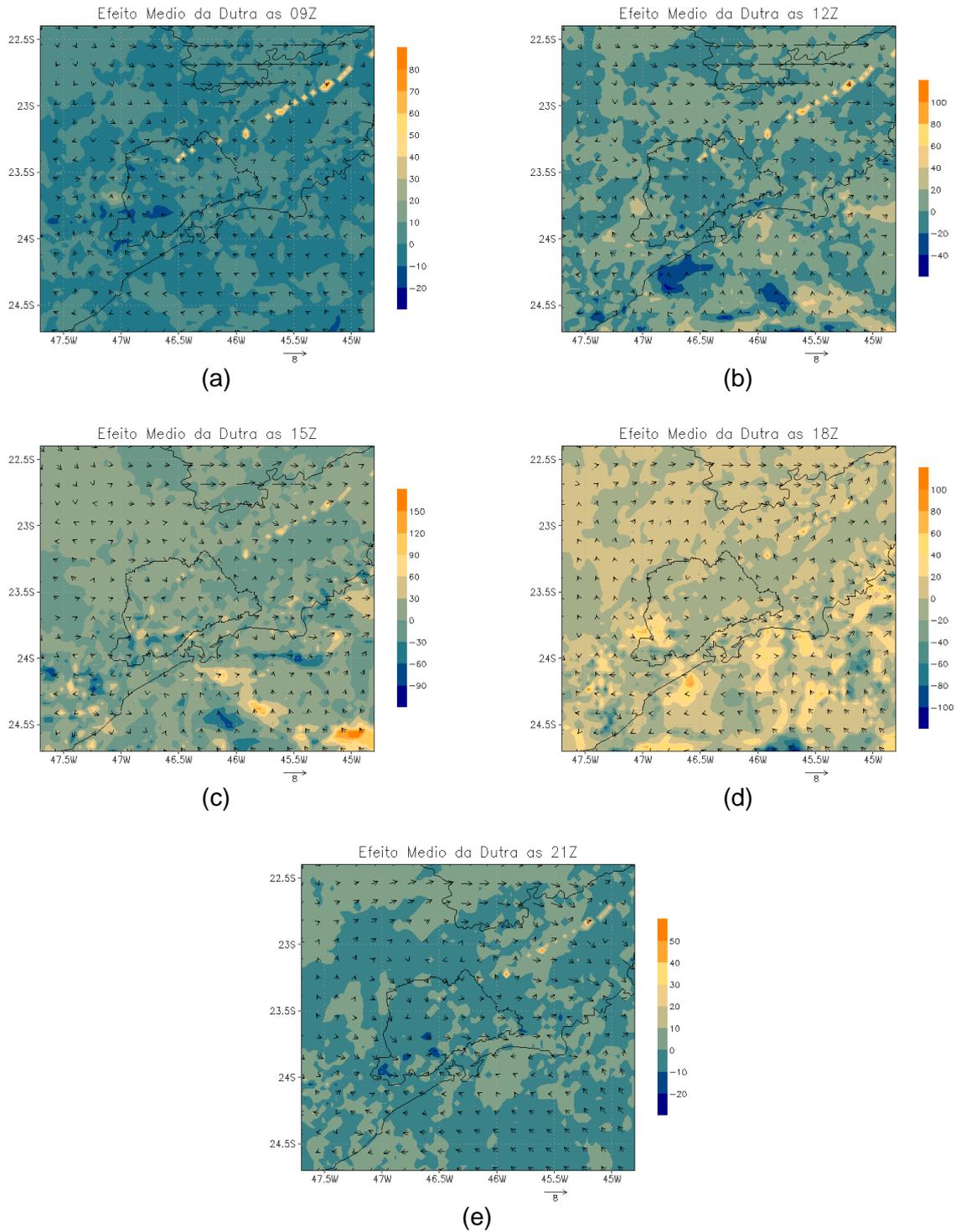


Figura 4.26. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre o balanço global de energia ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

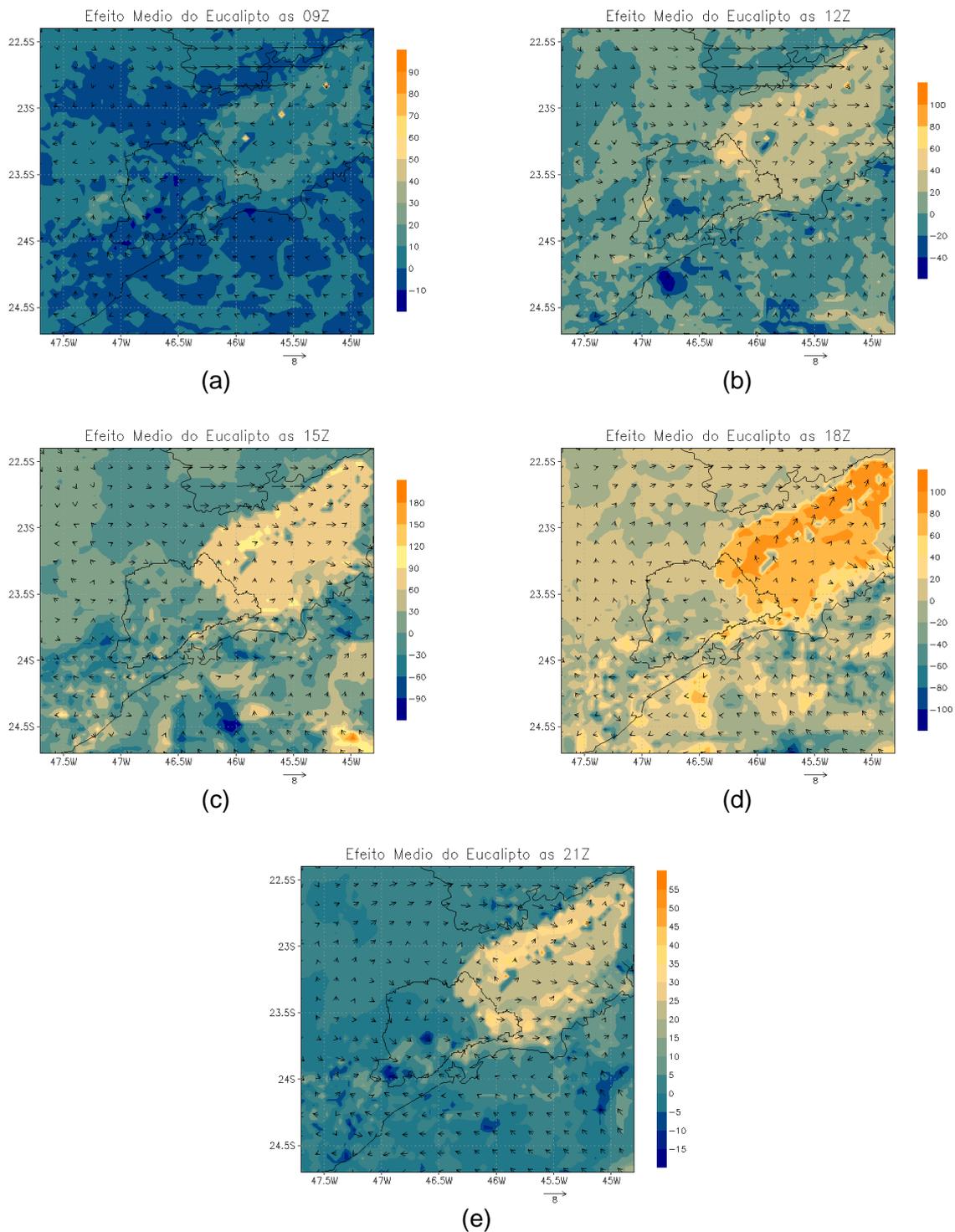


Figura 4.27. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o balanço global de energia ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

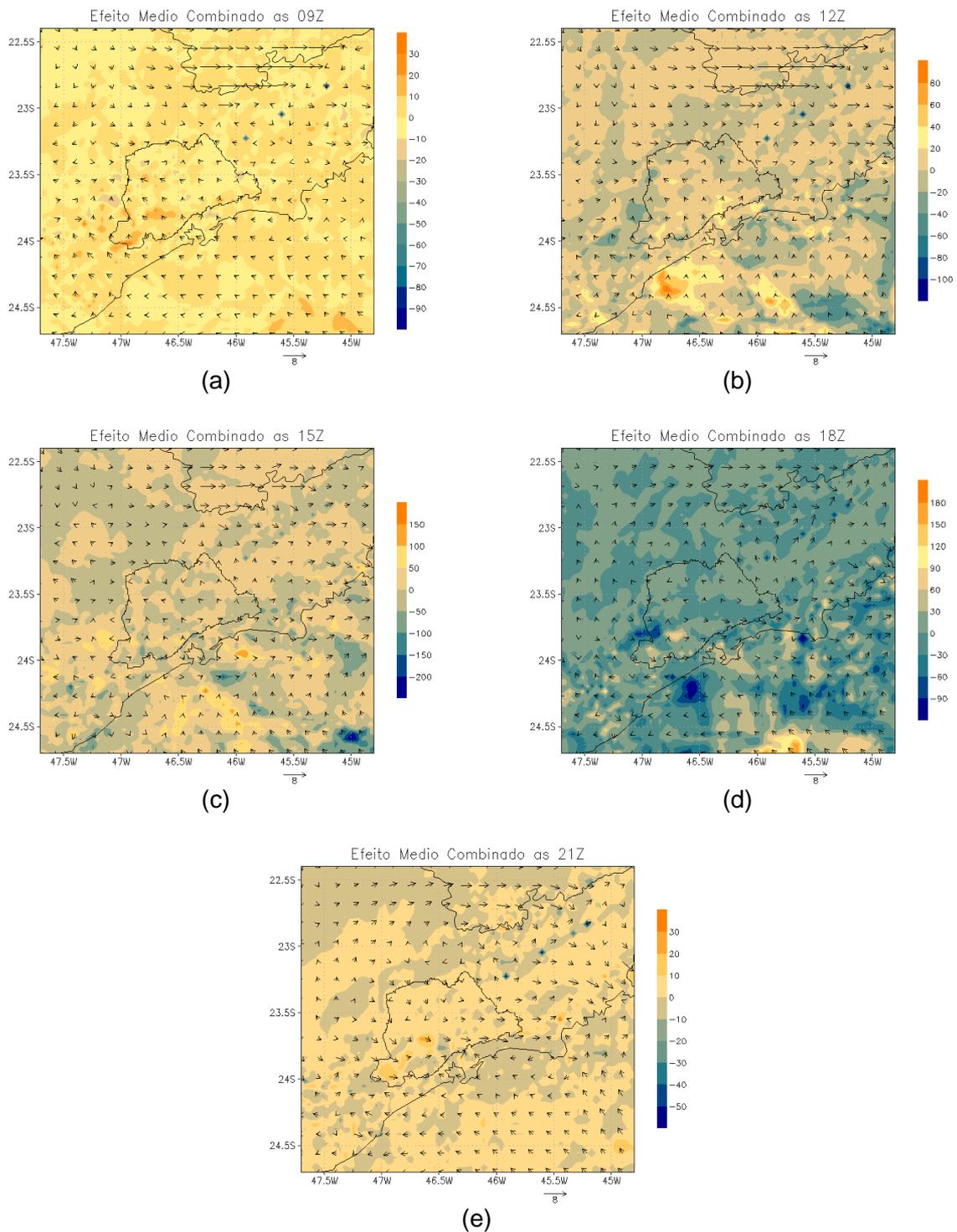


Figura 4.28. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre o balanço global de energia ( $W m^{-2}$ ) para o período de 30/07 a 08/08/2006 às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

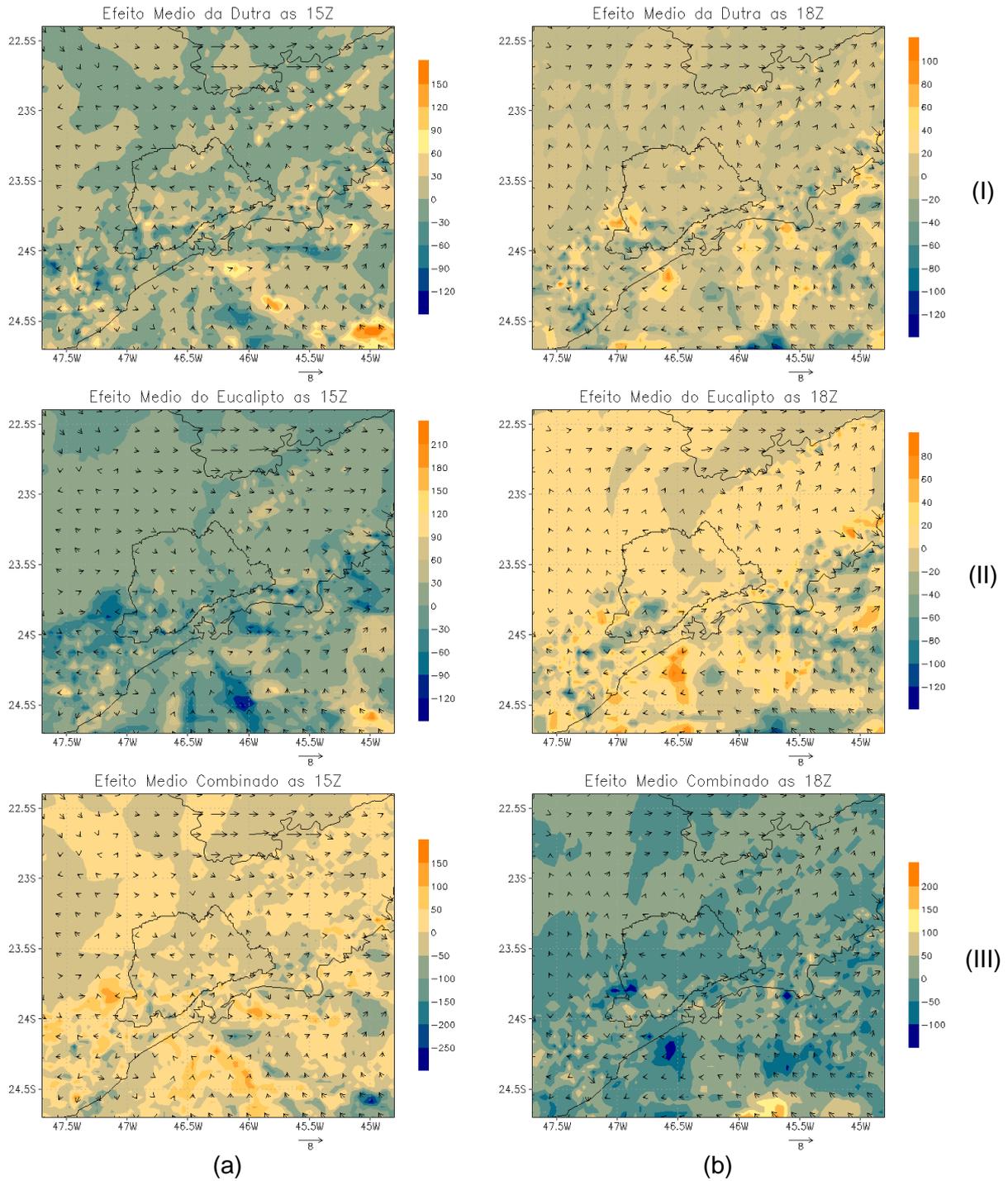


Figura 4.29. Efeito da presença (I) da Rodovia Presidente Dutra, (II) dos reflorestamentos de eucaliptos e (III) o efeito combinado destes parâmetros sobre o balanço médio horário de ondas curtas ( $W m^{-2}$ ) para o período às (a) 15Z e (b) 18Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

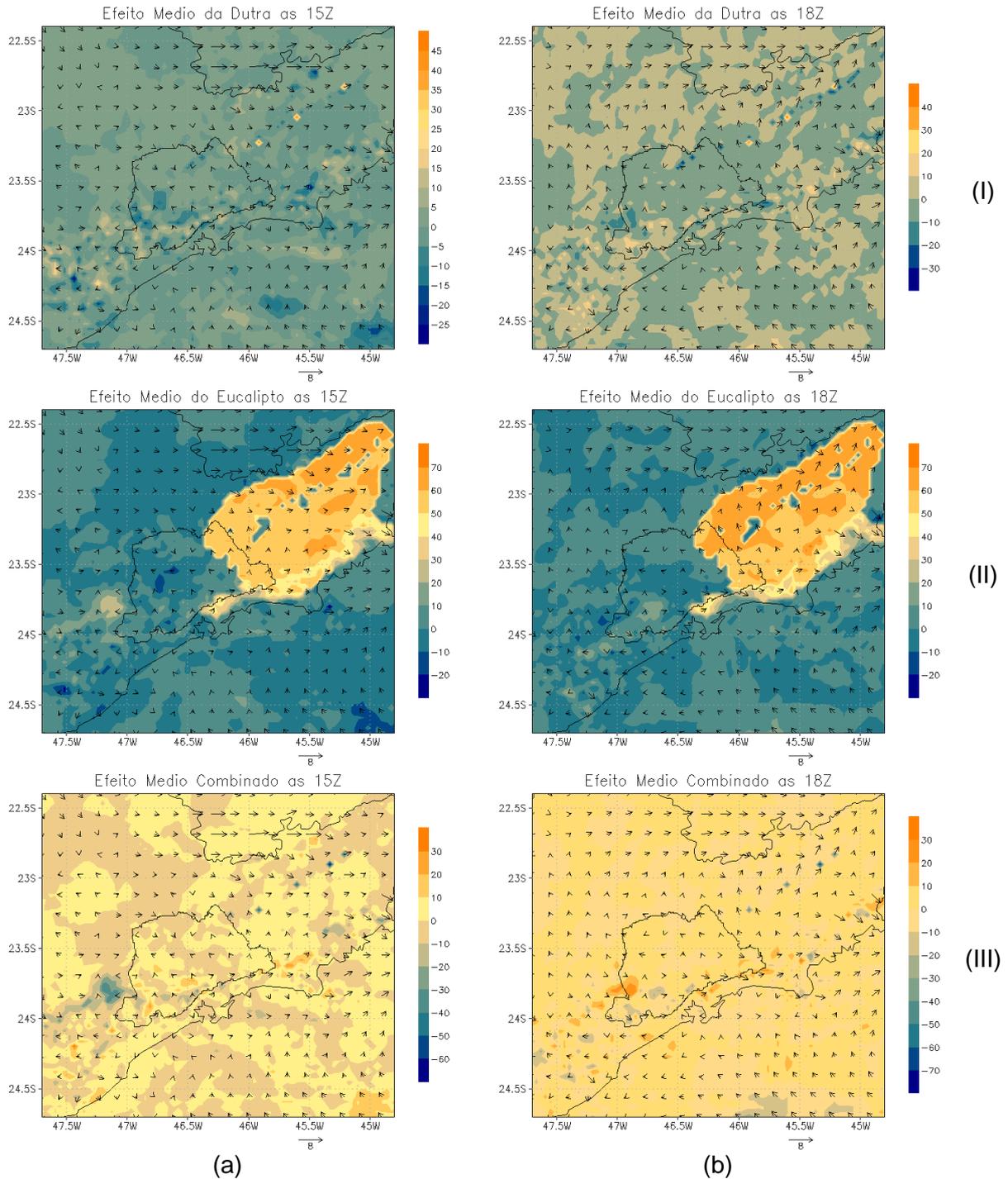


Figura 4.30. Efeito da presença (I) da Rodovia Presidente Dutra, (II) dos reflorestamentos de eucaliptos e (III) o efeito combinado destes parâmetros sobre o balanço médio horário de ondas longas ( $W m^{-2}$ ) para o período às (a) 15Z e (b) 18Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $m s^{-1}$ ).

A fim de aprofundar esta análise são apresentados os fluxos de calor sensível, latente, balanço de ondas curtas e longas para cinco pontos distintos da área simulada durante um dos dias simulados, considerando os quatro cenários criados, conforme item

3.9. Os cinco pontos são aqueles já apresentados no item 3.11, e possuem as seguintes localizações: 1. área urbana de São José dos Campos; 2. área urbana de São Paulo; 3. Rodovia Presidente Dutra; 4. área de pastagem e/ou agricultura no interior do estado; 5. área de reflorestamento de eucaliptos. Para facilitar a visualização, a localização dos pontos é rerepresentada na Figura 4.31.

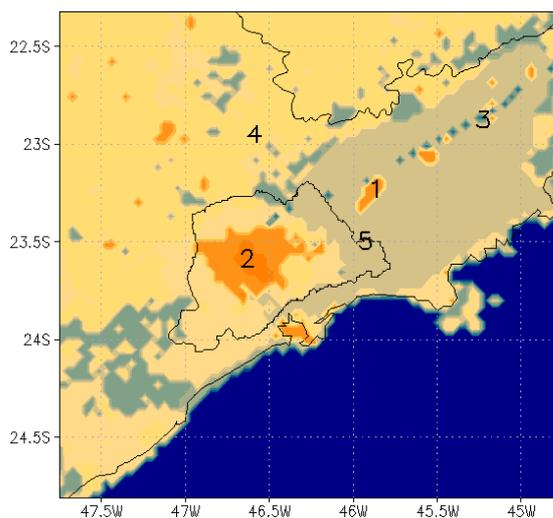


Figura 4.31. Localização dos pontos avaliados inseridos em diferentes usos do solo.

Na Figura 4.32 são observados os fluxos médios horários de calor sensível e latente e os balanços médios horários de ondas curtas e longas para o período simulado, considerando os quatro diferentes cenários (linhas I-IV) para os cinco pontos avaliados (colunas a-e).

Observando primeiramente as alterações decorrentes dos diferentes usos do solo para cada ponto, nota-se que São José dos Campos (Figura 4.32-a), apesar de próximo à Rodovia Presidente Dutra e à região de reflorestamento, não sofre o impacto da inserção desta rodovia (Figura 4.32-a-II e a-IV), sendo apenas o efeito dos eucaliptos ligeiramente presente (Figura 4.32-a-III e a-IV). Pequenas reduções nos fluxos de calor latente entre 12Z e 15Z e alterações no balanço de ondas longas são perceptíveis. Sobre o ponto localizado em São Paulo são observadas pequenas alterações nos fluxos e balanço de ondas apenas

em virtude da inserção da área de reflorestamentos, sendo que a presença da rodovia praticamente não é notada neste ponto (Figura 4.32-b).

Considerando um ponto localizado sobre a Rodovia Presidente Dutra (Figura 4.32-c), são observadas alterações significativas entre os cenários. Com a inserção da Dutra ocorre redução no fluxo de calor latente (Figura 4.32-c-II e c-IV), que passa a ser constante durante todo o dia e noite. Isto se deve à consideração do modelo de que a rodovia, assim como as áreas urbanas, apresenta emissões constantes deste tipo de energia. O fluxo de calor sensível passa a ter um pico próximo às 18Z e outro durante a manhã, menos evidente, com a inserção da rodovia (Figura 4.32-c-II e c-IV). Outra alteração visivelmente resultante da presença da rodovia é o impacto sobre o balanço de energia, que durante o dia passa a ter valores maiores no caso das ondas curtas e mais negativos no caso das ondas longas quando a Dutra está presente. Este ponto também sofre uma pequena alteração no fluxo de calor latente com a inserção dos eucaliptos (Figura 4.32-c-III). Quando ambos os fatores estão presentes, prevalecem os efeitos da rodovia.

O ponto localizado no interior do Estado de São Paulo sobre área de pasto/agricultura (Figura 4.32-d) também não é significativamente afetado pelas alterações no uso do solo na região do Vale do Paraíba, ocorrendo apenas sutis reduções nos fluxos de superfície com a inserção dos eucaliptos.

Por fim, avaliam-se as alterações em um ponto sobre área de reflorestamento de eucaliptos, inserido no Vale do Paraíba (Figura 4.32-e). A inserção da Dutra novamente não gera alterações significativas nos fluxos (Figura 4.32-e-II e e-IV). Por outro lado, a presença dos eucaliptos é claramente observada pelo aumento no fluxo de calor latente e alteração no fluxo de calor sensível, que passa a ter seu pico mais cedo (Figura 4.32-e-III e e-IV). Aumentos menos intensos são notados no balanço de ondas curtas e também no balanço de ondas longas com a inserção dos eucaliptos, o que concorda com as maiores quantidades de energia absorvidas pela vegetação. Já o incremento do  $LE$  está associado às maiores quantidades de água retiradas do solo pelos eucaliptos.

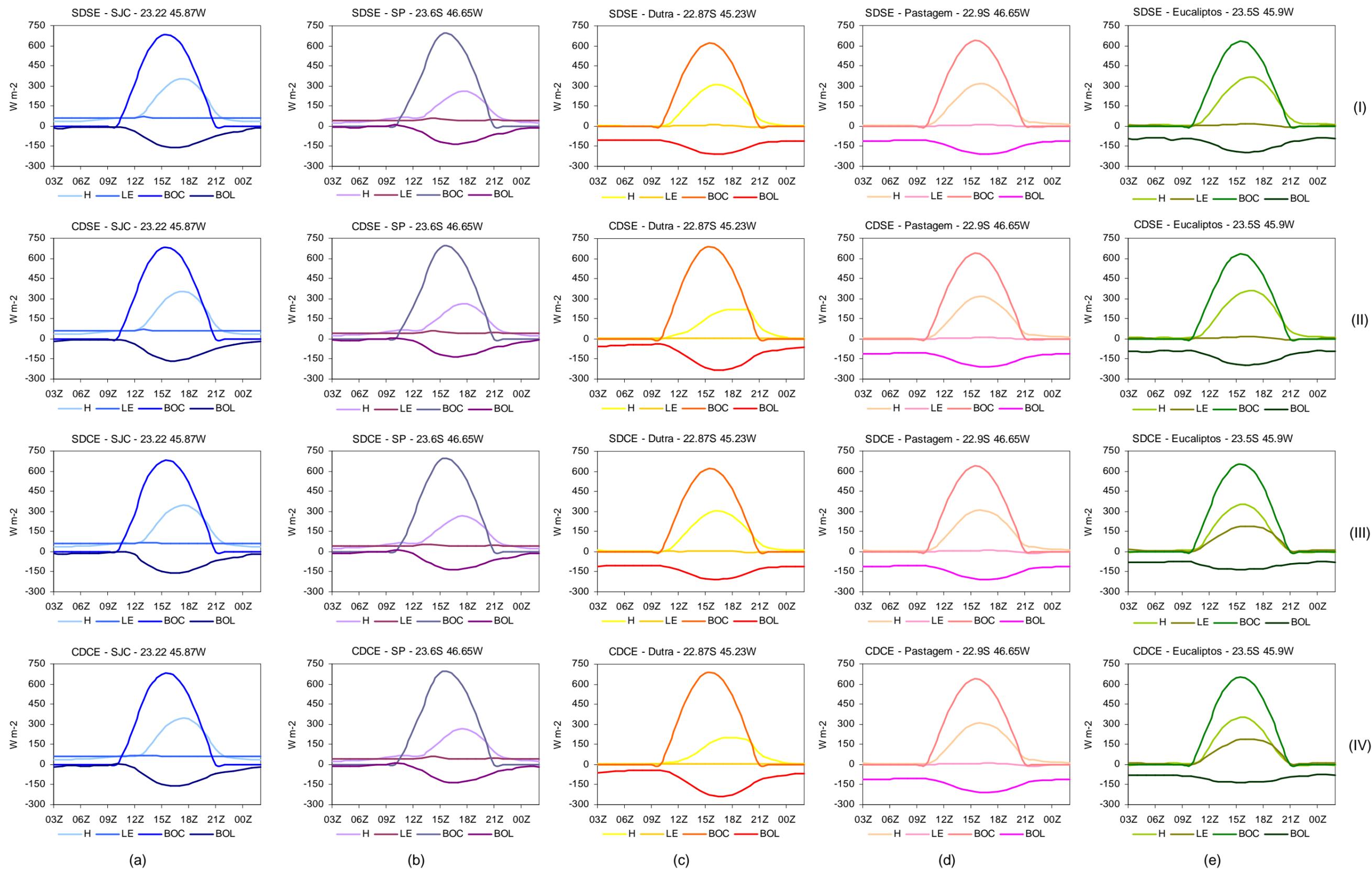


Figura 4.32. Efeitos sobre os fluxos médios horários de  $H$  e  $LE$  e sobre os  $BOC$  e  $BOL$  médios horários ( $W m^{-2}$ ) em (a) São José dos Campos, (b) São Paulo, (c) Rodovia Presidente Dutra, (d) área de pasto e (e) área de reflorestamento de eucaliptos, considerando os cenários (I) *sem\_dut\_sem\_euc*, (II) *com\_dut\_sem\_euc*, (III) *sem\_dut\_com\_euc* e (IV) *com\_dut\_com\_euc* para o período de 30/07 a 08/08/2006.



Analisando a Figura 4.32 por tipo de cenário empregado (por linhas) nota-se que quando ambos os fatores estão ausentes (Figura 4.32-I), o fluxo de calor sensível em todos os pontos é bastante similar, visto que a rodovia e as áreas de reflorestamento estão substituídas por pastagem e que esta cobertura apresenta aquecimento semelhante às áreas urbanas. O fluxo de calor latente apresenta valores praticamente constantes durante o dia e a noite sobre as áreas urbanas (próximo a  $70 \text{ W m}^{-2}$ ) com um pico sutil entre 12Z e 15Z e outro menor no fim da tarde, enquanto que sobre as áreas de pastagem, Dutra e de reflorestamento apresenta valores mais próximos a zero, com um pico próximo às 15Z. Por fim, analisando o balanço de ondas curtas notam-se valores nulos durante a noite e positivos durante o dia, sendo maiores sobre as áreas urbanas. Quanto ao *BOL*, este é negativo durante o dia e a noite onde há cobertura de pasto e próximo a zero durante a noite e negativo durante o dia nas áreas urbanas. Valores próximos a zero durante a noite nas áreas urbanas podem resultar do efeito de ilhas de calor que estes ambientes geram, visto que são ambientes mais quentes do que seus arredores durante o período noturno.

Alterando-se a cobertura do solo para o cenário que considera apenas a presença da Rodovia Presidente Dutra tem-se alterações sobre os fluxos de *H*, *LE*, *BOC* e *BOL* apenas sobre o ponto localizado na rodovia (Figura 4.32-II). Em relação à situação em que estava ausente a rodovia, nota-se alteração no fluxo de *H*, que passa a ter dois picos, e redução de *LE* durante o período diurno, que passa a ser constante. A redução do fluxo de calor latente está relacionada à consideração adotada pelo modelo de que a Rodovia Presidente Dutra, assim como as áreas urbanas, possui tráfego contínuo, e desta forma transforma energia em calor latente continuamente durante o dia e a noite. O balanço de ondas curtas é ligeiramente maior com a presença da Dutra e o balanço de ondas longas apresenta valores mais negativos durante o dia nesta situação.

Com a inclusão das áreas reflorestadas no modelo observam-se alterações não apenas no ponto sobre a própria área com eucaliptos, mas também sobre a rodovia, as áreas urbanas e a área de pastagem (Figura 4.32-III). O impacto numa área mais ampla deve-se ao efeito da mudança de cobertura do solo no regime de ventos. Em São José dos

Campos o fluxo de *LE* sofre redução durante o dia. Também o *BOL* é afetado nas áreas urbanas, sofrendo uma pequena redução durante a noite. O ponto sobre a pastagem sofre pequenas alterações no fluxo de *LE* durante o dia. O fluxo de *LE* sofre uma pequena redução sobre a Rodovia Presidente Dutra, em relação à situação em que estavam ausentes os eucaliptos e aumenta significativamente sobre a área reflorestada. Também o fluxo de *H* sofre alteração sobre a área de reflorestamento, sendo seu valor máximo antecipado. O *BOL* sofre ligeiro incremento sobre as áreas reflorestadas, em relação à situação com pastagens.

Considerando, por fim, a presença da rodovia e dos reflorestamentos (Figura 4.32-IV) não são observadas alterações nos pontos localizados nas áreas urbanas, de pastagem e nas áreas de reflorestamento em relação à presença exclusiva de eucaliptos. Quanto à Rodovia Presidente Dutra, observa-se comportamento similar à simulação em que apenas o efeito da Dutra foi considerado, ocorrendo somente redução nos valores de fluxo de calor sensível durante o dia, reflexo da inserção dos eucaliptos.

#### 4.2.3 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO NAS CIRCULAÇÕES LOCAIS

Além da avaliação dos fluxos de superfície, este grupo de experimentos também visa avaliar os efeitos da inserção dos reflorestamentos de eucaliptos nas circulações locais. Para tanto, foram conduzidas duas simulações adicionais, considerando apenas a ausência e presença da área de reflorestamento de eucaliptos expandida, permanecendo as áreas urbanas e a rodovia (incluindo as áreas urbanizadas vizinhas) presentes. Nestes experimentos foi removida a topografia da região, de forma que fosse possível avaliar isoladamente o efeito dos eucaliptos sobre as circulações locais.

Nas figuras a seguir são apresentadas as superfícies de pressão e os vetores de aceleração horizontal resultantes da força do gradiente de pressão para as simulações sem (linha I) e com eucaliptos (linha II) (Figura 4.33), além das diferenças de temperaturas (linha

l) e de razão de mistura de vapor (linha II) entre os dois cenários empregados para um dos dias simulados (Figura 4.34). Conforme mencionado anteriormente, o Estado de São Paulo sofreu a atuação de sistemas frontais durante parte do período simulado (28/07 a 08/08/2006), sendo que a partir do dia 03/08/2006, estes sistemas deixaram de atuar na região do Vale do Paraíba. Por esta razão, são apresentados resultados referentes à circulação local do dia 05/08/2006.

Durante a noite e início da manhã não ocorrem diferenças significativas nos gradientes de pressão entre os cenários sem e com eucaliptos. Pela Figura 4.34-a-I nota-se que durante a noite e início da manhã, a presença de eucaliptos reduziu as temperaturas sobre o vale, em relação à simulação em que estes estavam ausentes. Este efeito chega a ser anulado às 15Z, mas às 18Z torna-se novamente presente, reduzindo as temperaturas em até 2,1°C às 21Z. Associado a um aumento na razão de mistura de vapor de 1,8 g kg<sup>-1</sup> às 18Z (Figura 4.34-d-II), tem-se o aumento esperado no fluxo de calor latente (de até 300 W m<sup>-2</sup>), ilustrado na Figura 4.35-b, enquanto o fluxo de calor sensível sofre decréscimo em relação à situação em que os eucaliptos estavam ausentes. Este fato está associado à maior capacidade de extração de água do solo através das raízes e transporte para as folhas, onde ocorre a evapotranspiração. O resultado deste processo é o aumento da umidade atmosférica deste ambiente e, evidentemente, o maior uso da energia solar disponível no processo da evapotranspiração em detrimento do uso da energia solar para aquecer a superfície.

Temperaturas inferiores sobre o VP geram uma área de alta pressão sobre o centro do mesmo, que pode ser observada desde as 12Z (Figura 4.33-b-II). Esta área de pressão elevada em relação às vizinhas reduz o gradiente de pressão entre a atmosfera sobre o oceano e o vale, desacelerando o avanço da brisa marítima (Figura 4.33-d). Desta forma, a brisa marítima avança mais cedo e atinge uma distância maior da costa na situação em que os eucaliptos estão ausentes. Este padrão causa aceleração da ordem de 0,0016 m s<sup>-2</sup> (ou seja, 5,8 m s<sup>-1</sup> em uma hora) quando estão presentes os eucaliptos e aceleração da ordem de 0,0022 m s<sup>-2</sup> (ou seja, 7,9 m s<sup>-1</sup> em uma hora) quando estes estão ausentes.



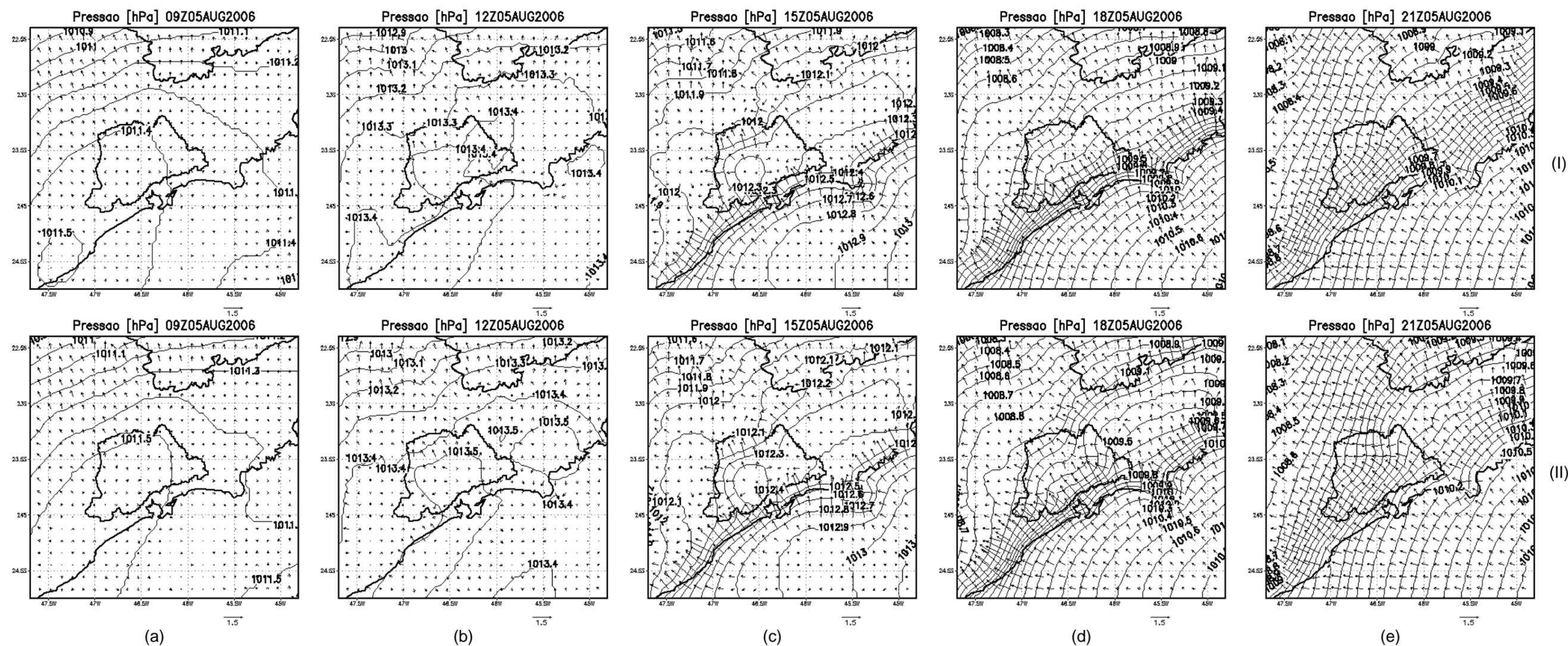


Figura 4.33. Superfícies de pressão (hPa) e vetores de aceleração horizontal devido à força do gradiente de pressão ( $10^{-3} \text{ m s}^{-2}$ ), considerando (linha I) a ausência e (linha II) a presença de eucaliptos às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z de 05/08/2006.



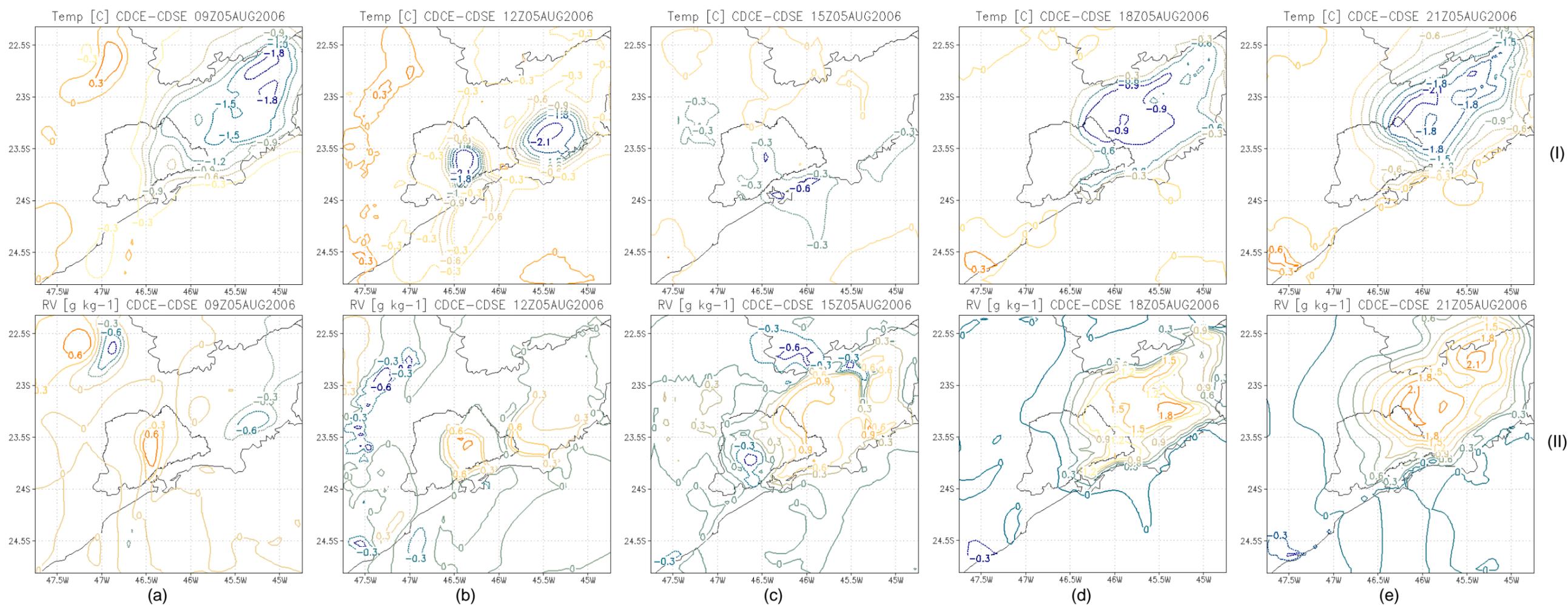


Figura 4.34. Diferenças de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) (linha I) e diferenças de razão de mistura de vapor ( $\text{g kg}^{-1}$ ) (linha II) entre os cenários com e sem eucaliptos às (a) 09Z, (b) 12Z, (c) 15Z, (d) 18Z e (e) 21Z de 05/08/2006.

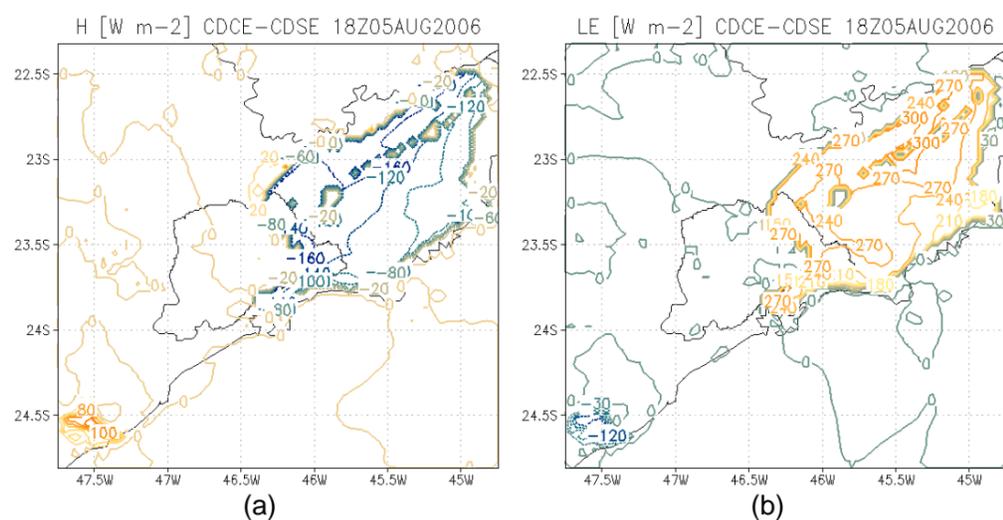


Figura 4.35. Diferenças de fluxo de calor sensível (a) e de calor latente (b) em  $\text{W m}^{-2}$  entre os cenários com e sem eucaliptos às 18Z de 05/08/2006.



#### 4.2.4 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS PARA AVALIAÇÃO DO IMPACTO NAS CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES

Novamente utilizou-se o método proposto por Stein e Alpert (1993), que a partir de quatro ensaios distintos tornou possível avaliar os efeitos da presença e ausência da Rodovia Presidente Dutra, incluindo vizinhanças urbanizadas, e da área de expansão de reflorestamento de eucaliptos sobre a concentração de poluentes. Ressalta-se que as áreas urbanas estavam presentes em todas as simulações.

A seguir apresentam-se os resultados médios horários obtidos para o período de 10 dias simulado. Nas figuras seguintes observam-se separadamente o efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra, o efeito isolado da presença da área de expansão de reflorestamento de eucaliptos e o efeito combinado destes dois fatores sobre as concentrações médias horárias de COVs, NO, NO<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>, durante o referido período. Observa-se que não foram pré-definidas escalas padrão na maioria dos casos, para que todas as alterações fossem visíveis. Os vetores médios horários de vento também estão presentes, e são provenientes da simulação que considera ambos os fatores.

Conforme citado anteriormente, os compostos orgânicos voláteis são precursores importantes na formação do ozônio próximo à superfície. Considerando as condições específicas do período analisado, bem como as estimativas feitas no que diz respeito às concentrações de entrada do modelo, tem-se que no conjunto de figuras a seguir é possível observar a contribuição isolada da Rodovia Presidente Dutra (Figura 4.36 e Figura 4.37) e do reflorestamento de eucaliptos (Figura 4.38 e Figura 4.39) à concentração dos COVs, bem como conjunta (Figura 4.40 e Figura 4.41). Observa-se que a Dutra gera aumento na concentração de COVs durante todo o dia e a noite na região em que está localizada, atingindo 0,06 µg m<sup>-3</sup> às 12Z. O efeito isolado do reflorestamento de eucaliptos sobre a concentração de COVs no Vale do Paraíba também é positivo durante o dia e a noite, embora variável entre 0 e 0,06 µg m<sup>-3</sup>. Sobre a RMSP são observadas alterações negativas nas concentrações de COVs, reduzindo-as em até 0,16 µg m<sup>-3</sup> entre 09 e 12Z, indicando

que quando apenas o efeito dos eucaliptos é considerado há redução na concentração de COVs nessa região. O efeito combinado destes dois fatores gera reduções de até  $0,06 \mu\text{g m}^{-3}$  nas concentrações de COVs, e restringe-se basicamente a pequenas áreas sobre o centro do VP, onde encontram-se as áreas urbanas.

Ressalta-se ainda que a intensidade destas concentrações é bastante reduzida em relação aos demais poluentes, apresentados na seqüência.

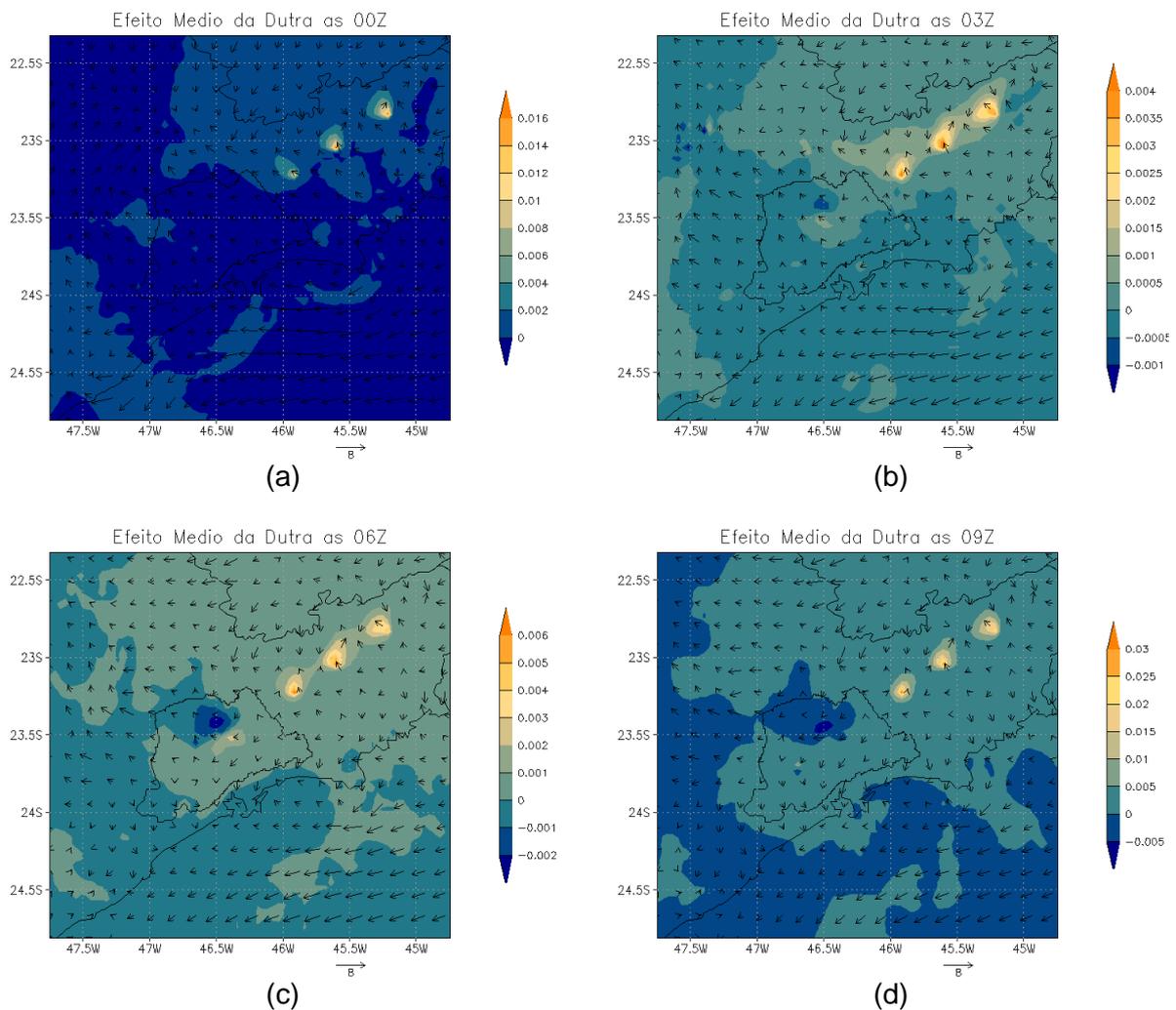


Figura 4.36. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

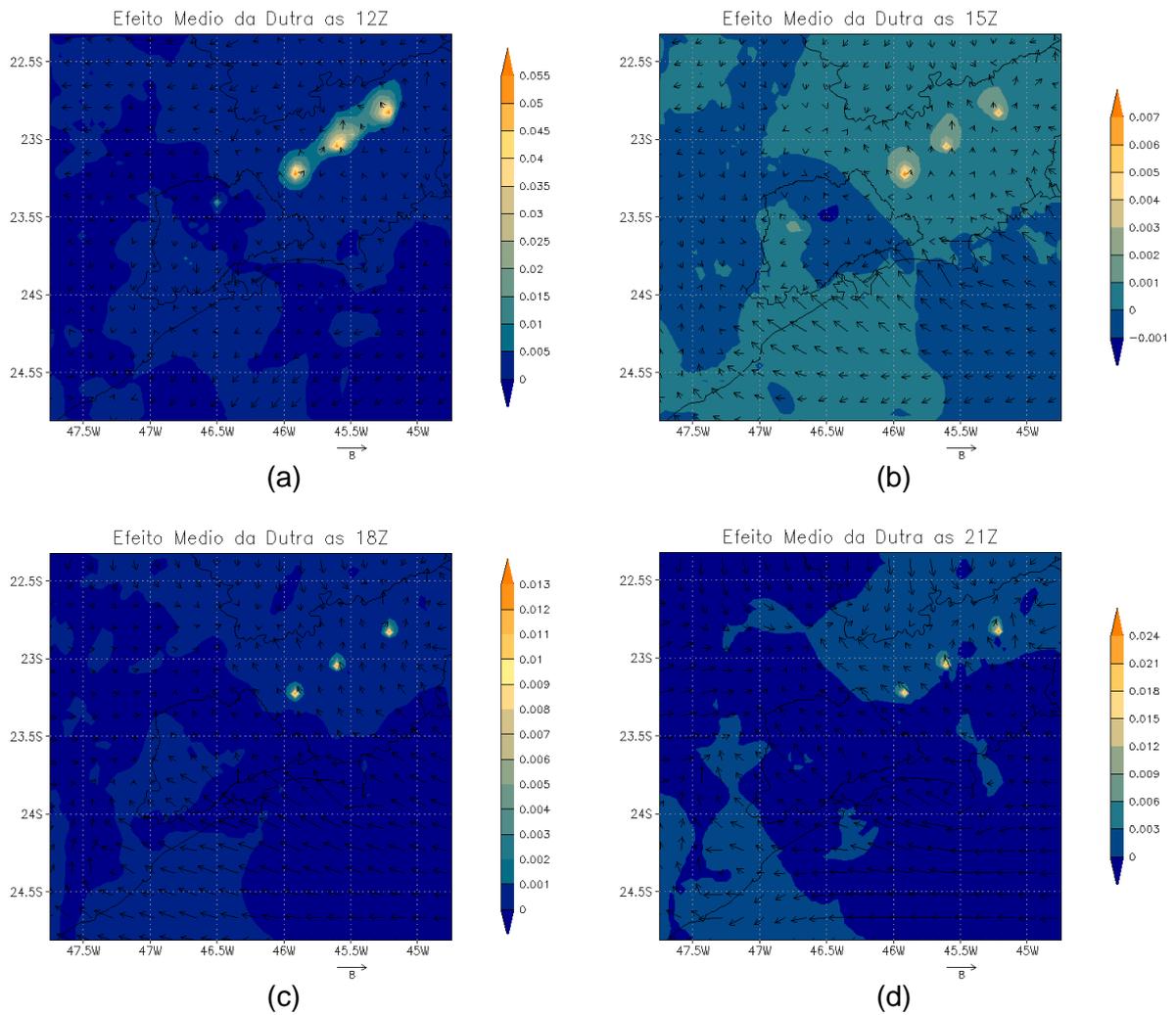


Figura 4.37. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

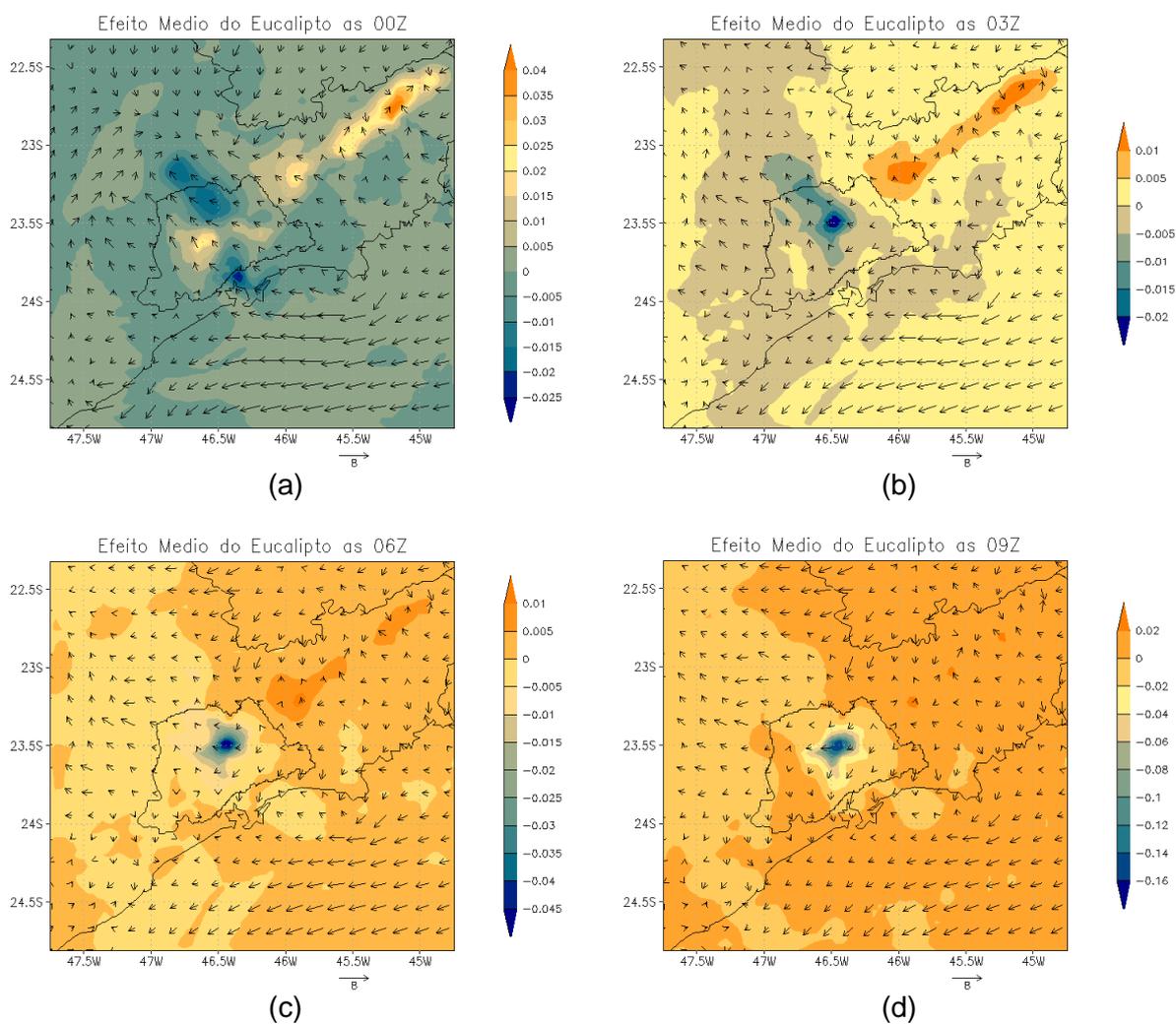


Figura 4.38. Efeito da presença isolada dos reforestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

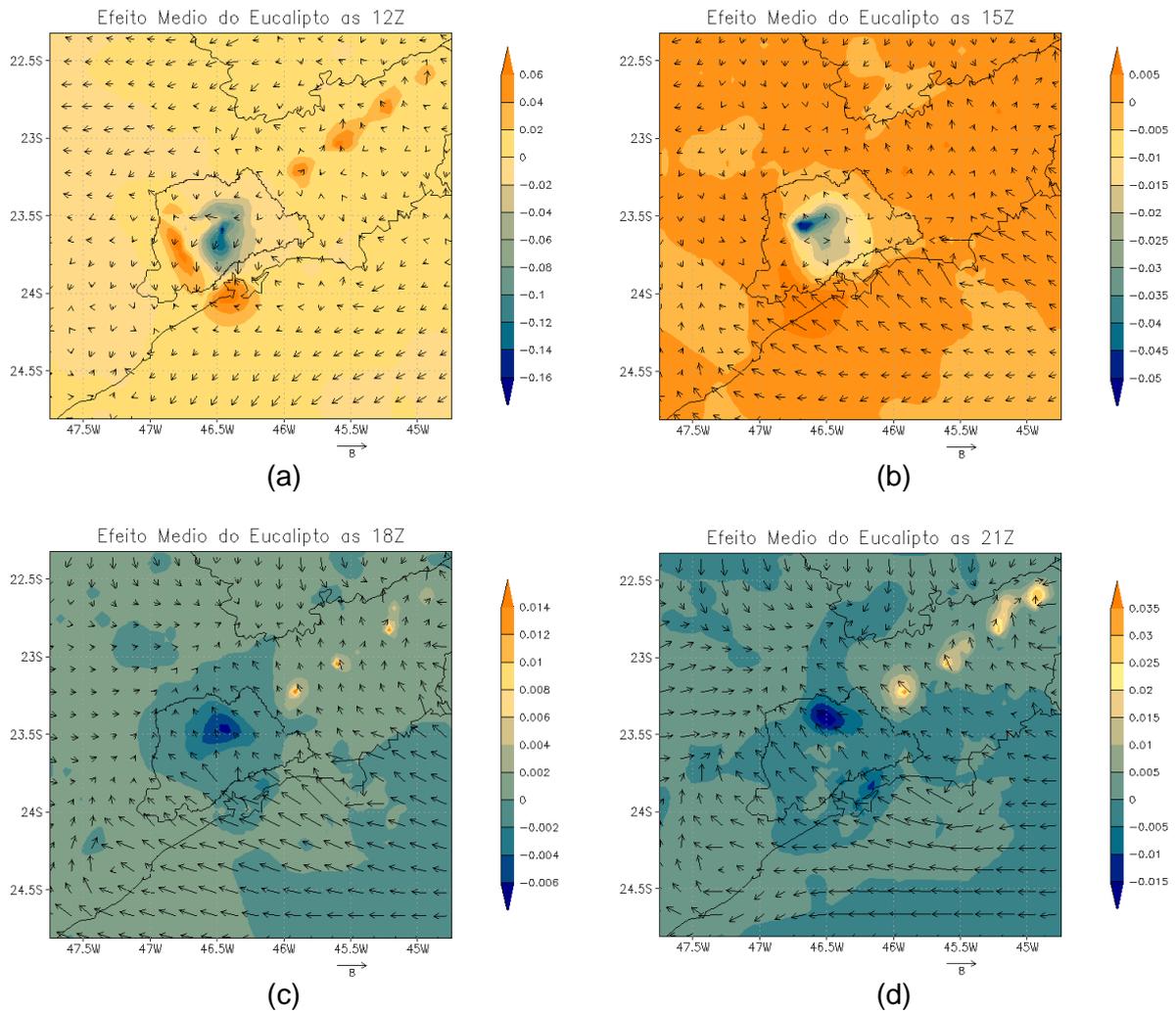


Figura 4.39. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

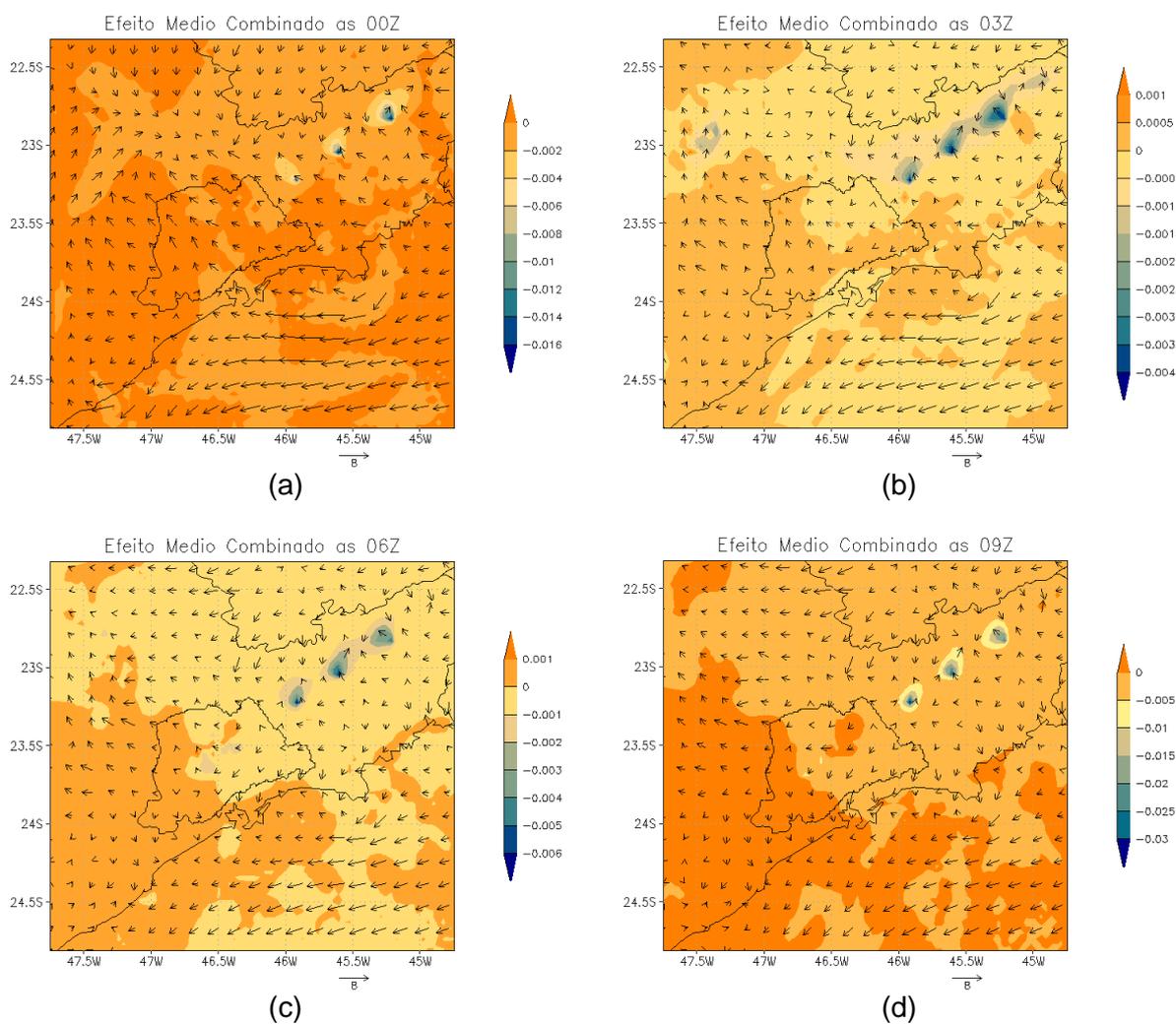


Figura 4.40. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 16Z e (d) 19Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

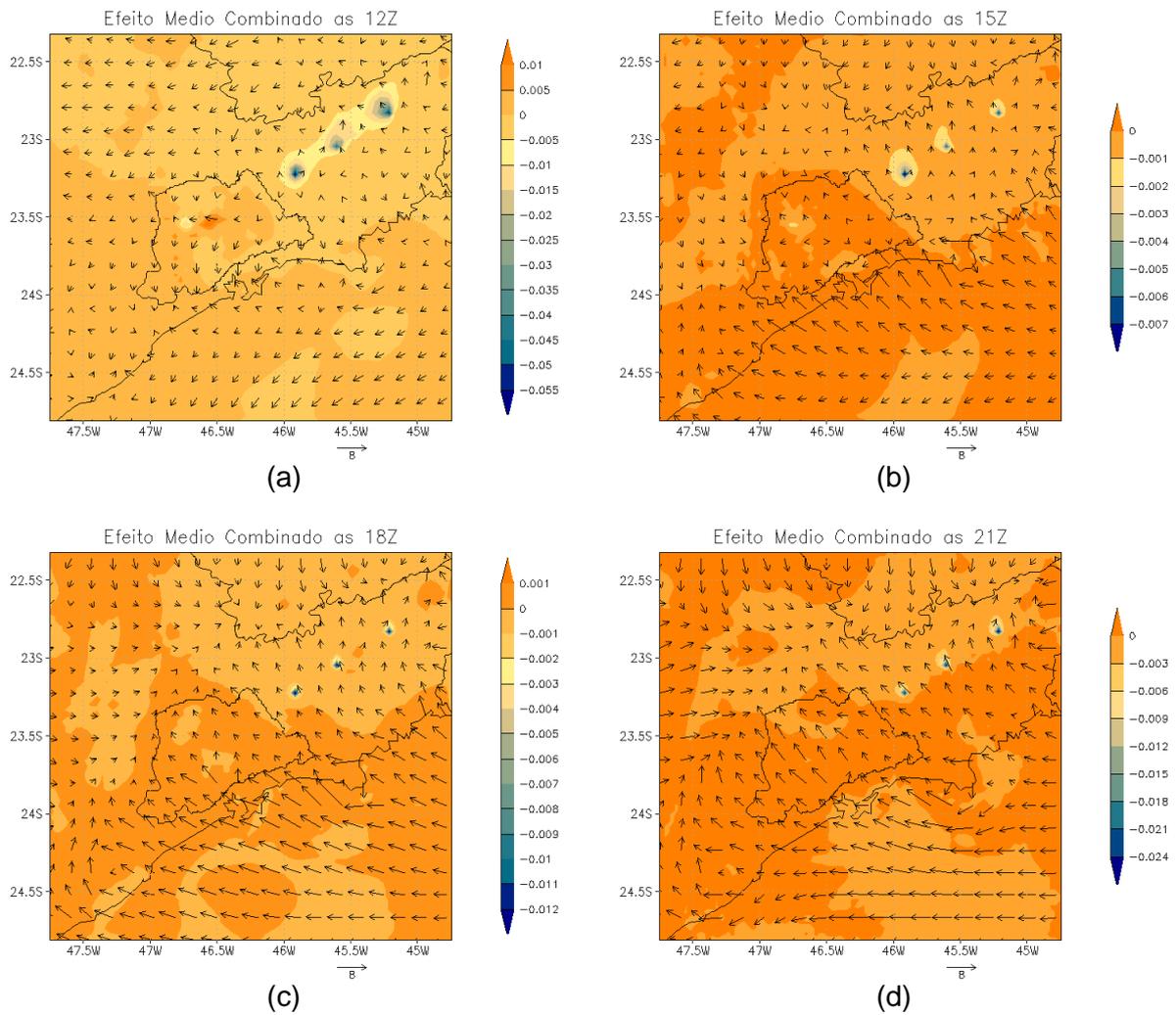


Figura 4.41. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de compostos orgânicos voláteis ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

A análise apresentada para as alterações nas concentrações de NO também deve ser considerada especificamente para o período avaliado e considerando as estimativas das concentrações apresentadas anteriormente. Entre 00Z e 06Z são observadas alterações menos intensos nas concentrações de NO provenientes do efeito isolado da Dutra (até  $4 \mu\text{g m}^{-3}$ ) (Figura 4.42) e dos eucaliptos (até  $8 \mu\text{g m}^{-3}$ ) (Figura 4.44), bem como do efeito combinado destes fatores (até  $-6 \mu\text{g m}^{-3}$ ) na região do Vale do Paraíba (Figura 4.46). Sobre a RMSP observam-se neste mesmo período reduções nas concentrações de NO devido ao efeito da Dutra (até  $-1,5 \mu\text{g m}^{-3}$ ), variações negativas intensas devido ao efeito dos eucaliptos (até  $-16 \mu\text{g m}^{-3}$ ) e variações positivas resultantes do efeito combinado (até  $1 \mu\text{g m}^{-3}$  às 00Z). Às 09Z os efeitos sobre o VP e também sobre a RMSP passam a ser mais intensos devido à atuação dos fatores isolados e combinados, incrementando as concentrações de NO devido à presença da Dutra em  $16 \mu\text{g m}^{-3}$  sobre o centro do VP, entre  $10$  e  $20 \mu\text{g m}^{-3}$  devido aos eucaliptos e reduzindo entre  $12$  e  $16 \mu\text{g m}^{-3}$  devido aos fatores combinados. Considerando a presença dos eucaliptos observa-se neste horário um núcleo negativo sobre a RMSP, reduzindo as concentrações de NO em até  $90 \mu\text{g m}^{-3}$ . Este efeito se mantém às 12Z (Figura 4.43), quando também são observadas alterações positivas de  $20 \mu\text{g m}^{-3}$  sobre o VP devido à presença dos eucaliptos (Figura 4.45). A presença da rodovia gera incrementos de  $24 \mu\text{g m}^{-3}$  sobre as áreas urbanas do VP, enquanto o efeito combinado gera reduções de mesma intensidade também sobre o VP. Durante a tarde, os efeitos observados às 12Z perdem sua intensidade. Entre as 18Z e 21Z as alterações aumentam um pouco sobre o vale, sendo de até  $6,5 \mu\text{g m}^{-3}$  relativos à presença exclusiva da Dutra, de até  $6 \mu\text{g m}^{-3}$  devidos ao reflorestamento e reduzem em até  $6,5 \mu\text{g m}^{-3}$  devido à combinação dos fatores sobre o VP (Figura 4.47).

Como a emissão deste poluente está associada ao tráfego de veículos, os incrementos decorrentes da presença isolada da Dutra observados entre as 09Z e 12Z e entre as 18 e 21Z podem estar relacionados aos picos de tráfego comuns tanto na RMSP quanto no VP.

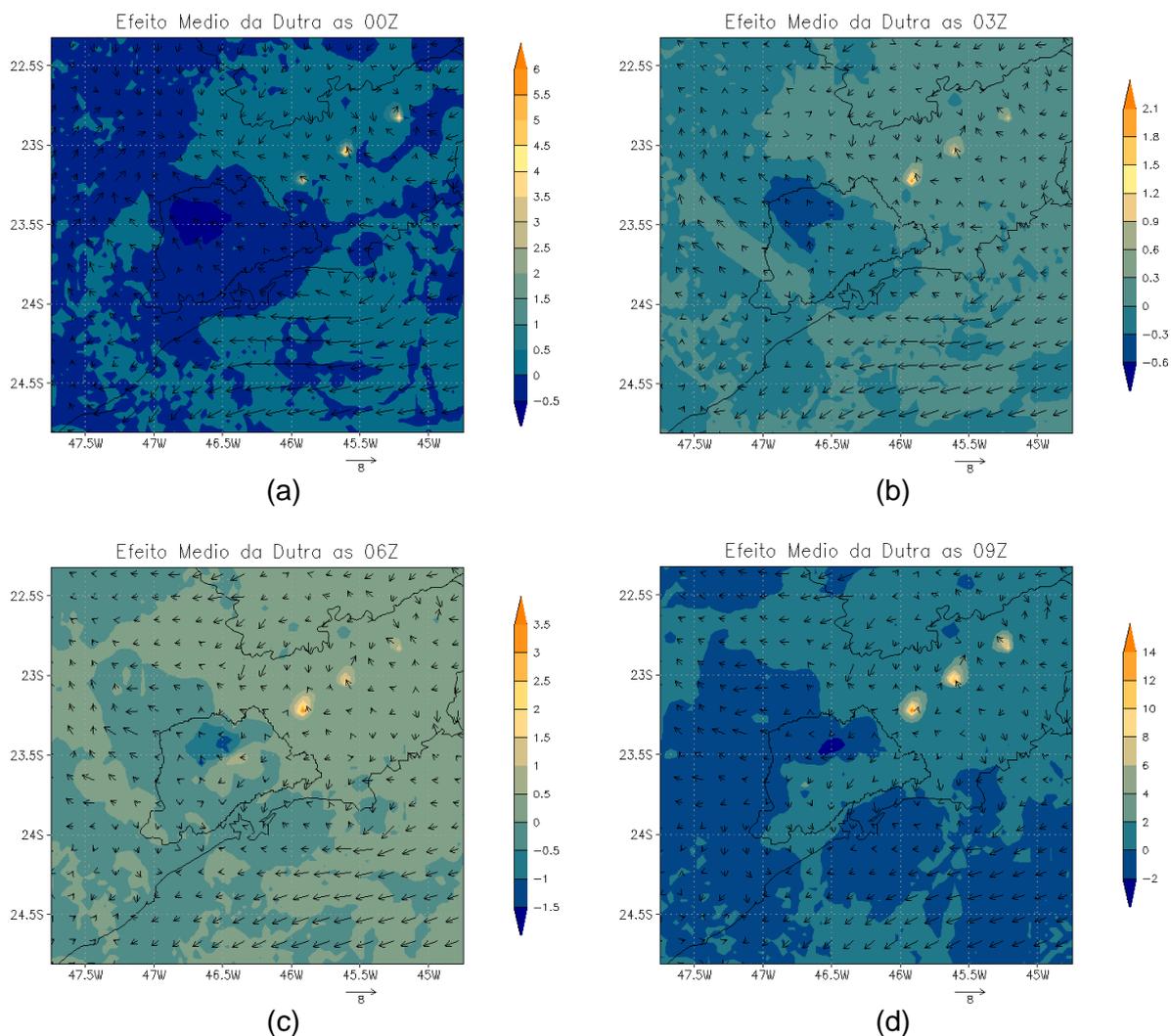


Figura 4.42. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

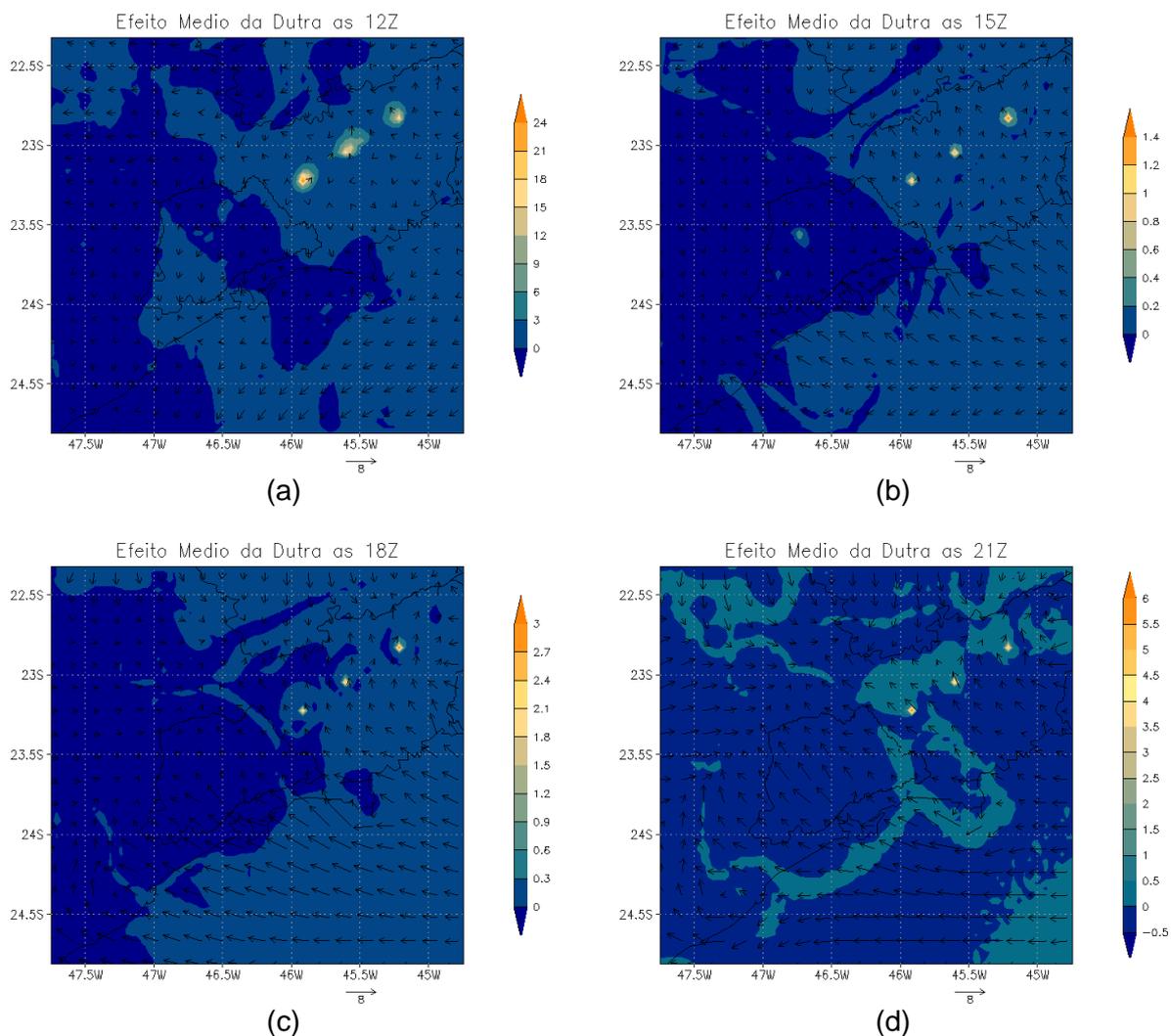


Figura 4.43. Efeito da presença isolada da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

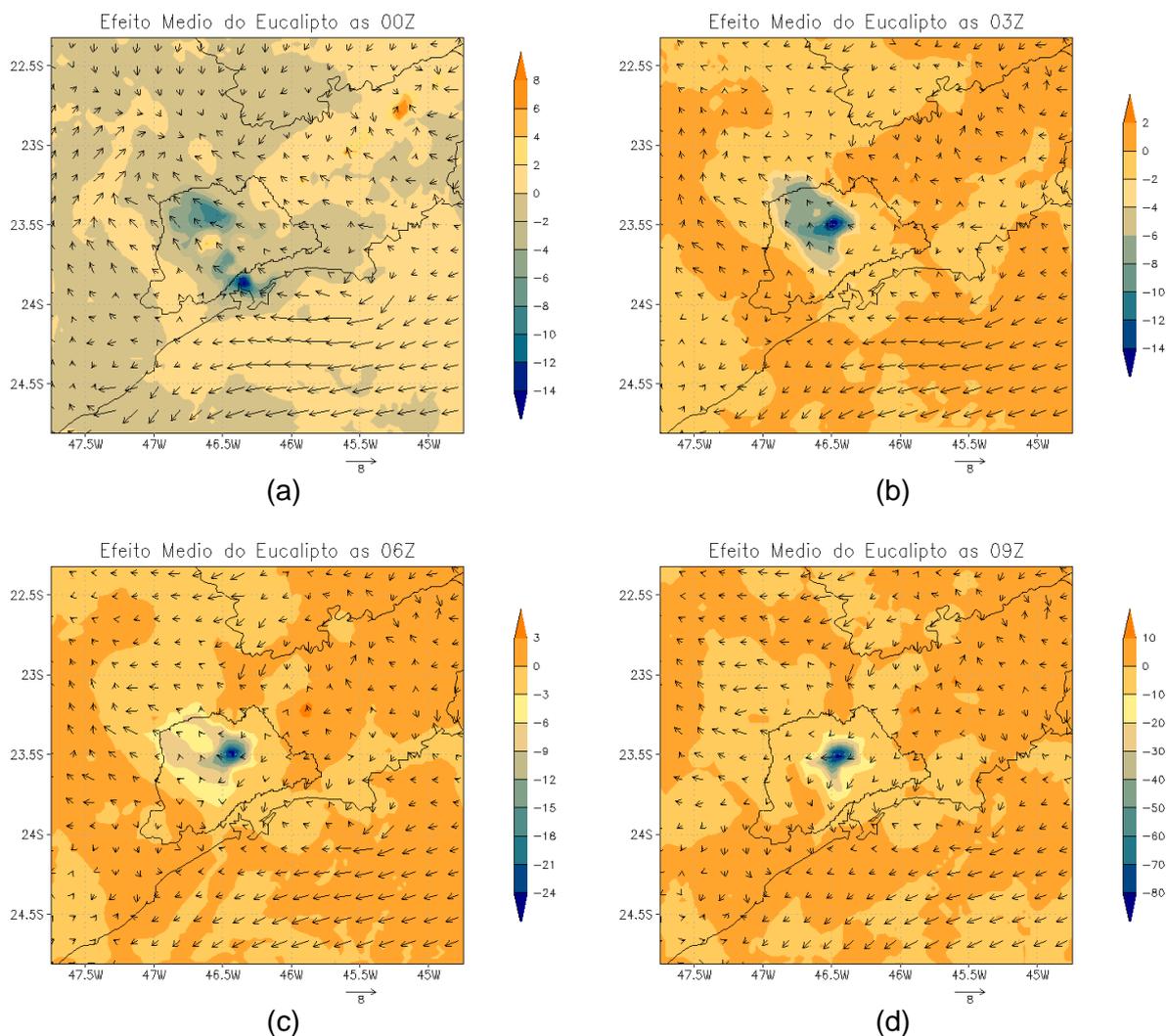


Figura 4.44. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

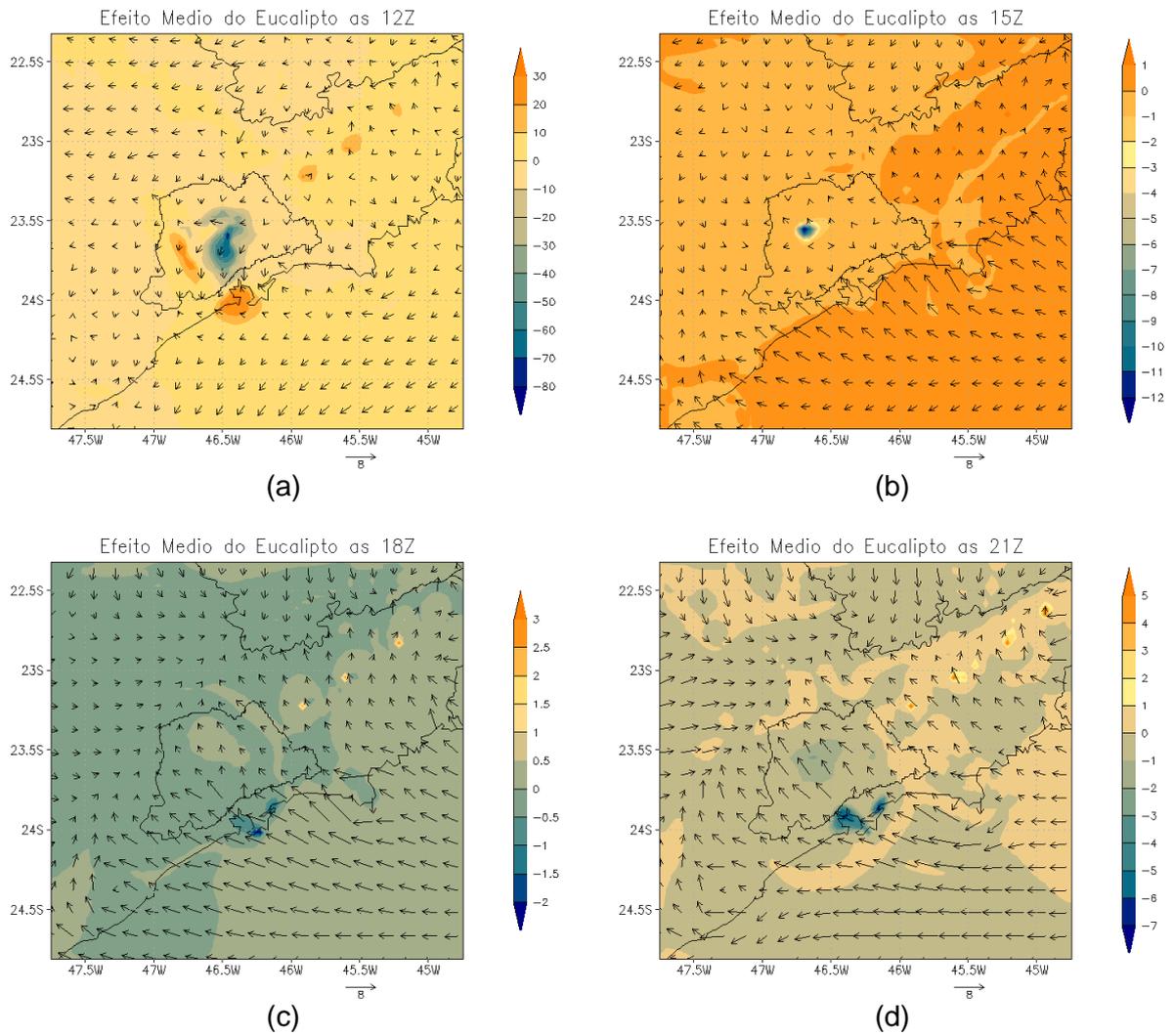


Figura 4.45. Efeito da presença isolada dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

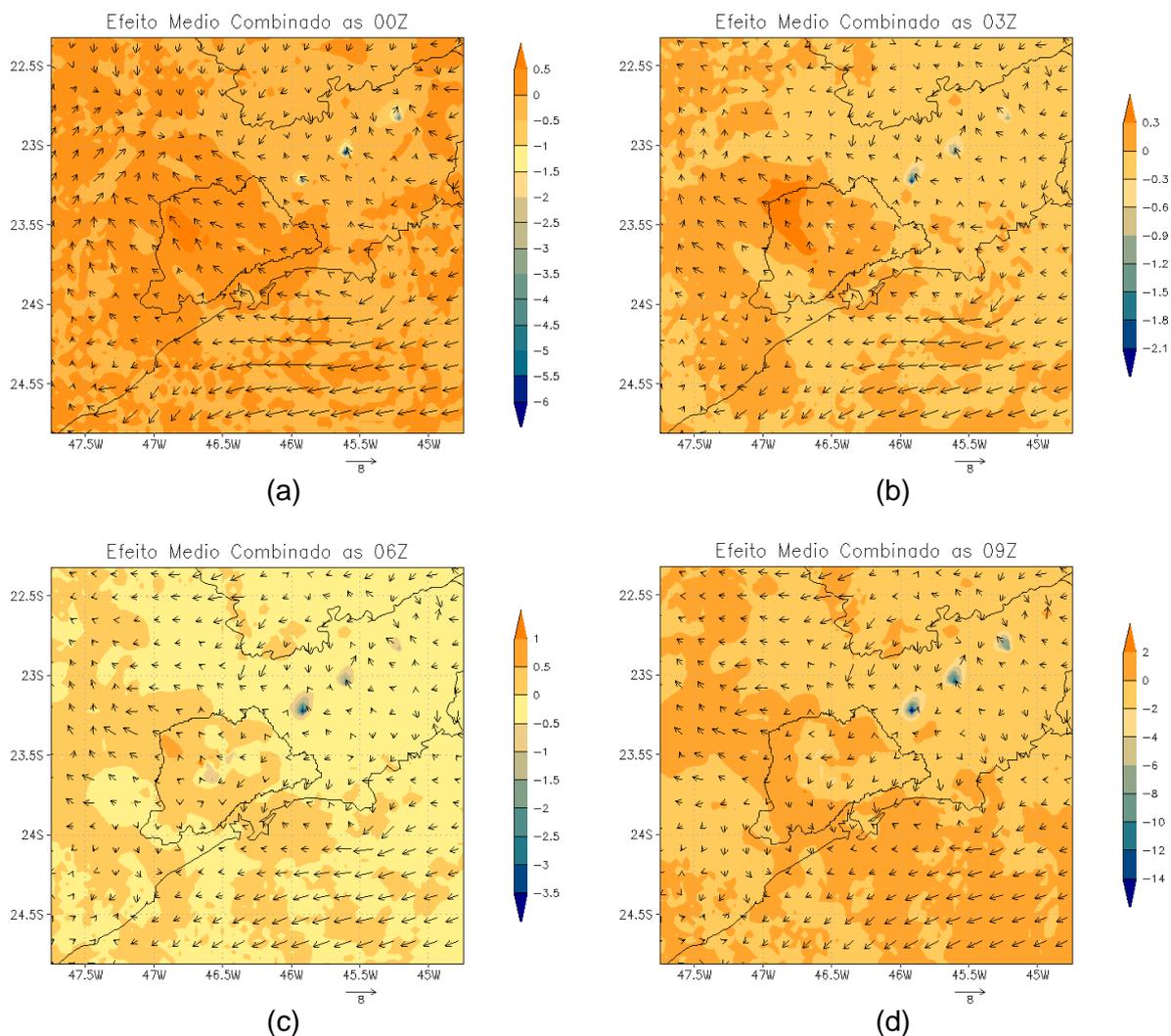


Figura 4.46. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

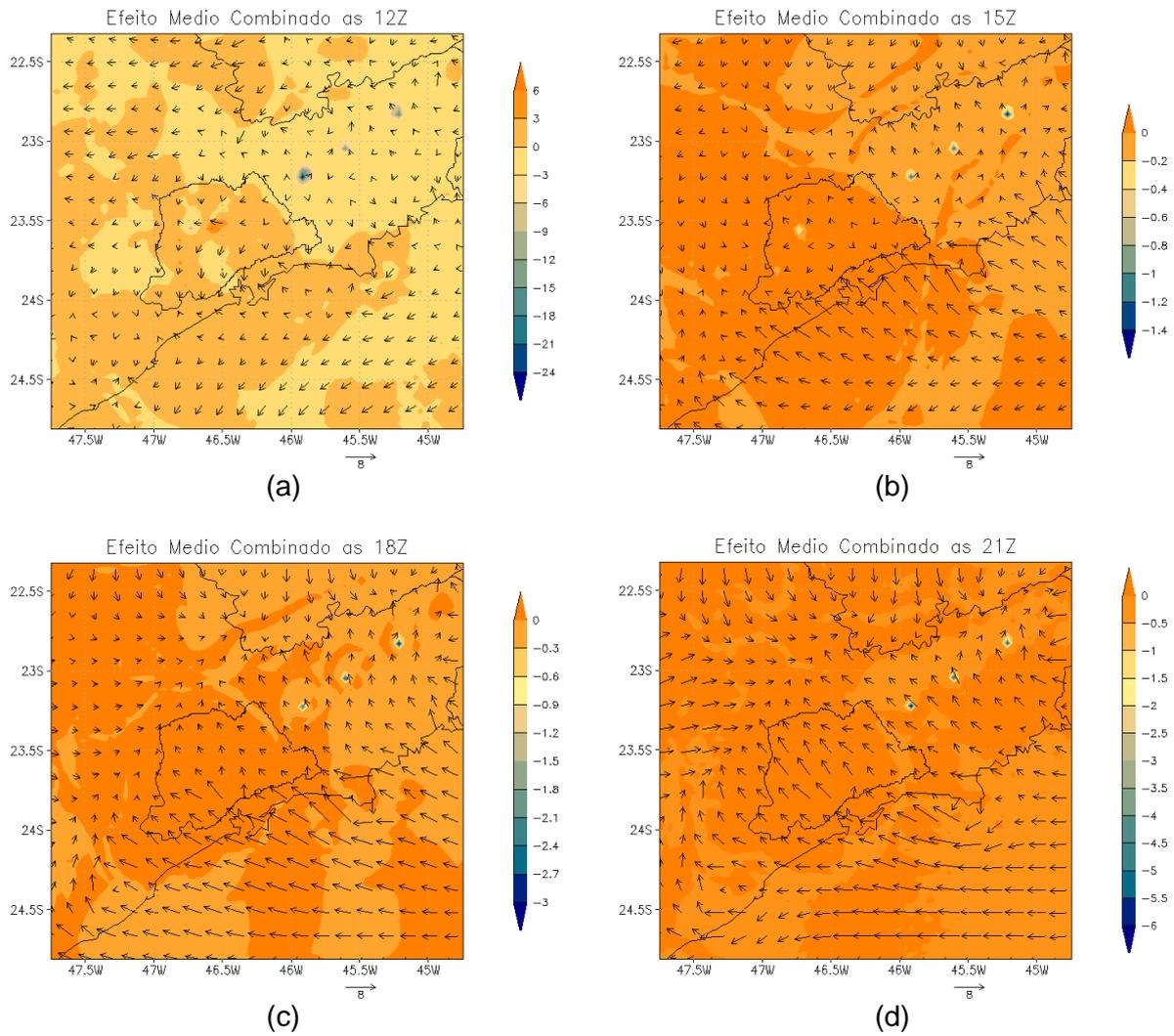


Figura 4.47. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de monóxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

As concentrações de  $\text{NO}_2$  sofrem aumentos em decorrência da presença isolada da Dutra durante todo o dia e a noite, atingindo seu máximo às 12Z ( $12 \mu\text{g m}^{-3}$ ) (Figura 4.48 e Figura 4.49). Novamente, como este poluente está associado ao tráfego de veículos, o pico observado às 12Z e um pico menos intenso existente às 21Z ( $6,5 \mu\text{g m}^{-3}$ ) podem estar relacionados aos picos de tráfego.

O efeito isolado dos eucaliptos mantém-se positivo durante o dia e a noite sobre o Vale do Paraíba, gerando acréscimos de até  $15 \mu\text{g m}^{-3}$  nas concentrações de  $\text{NO}_2$  às 12Z; já na RMSP o efeito é variável, havendo núcleos positivos e negativos sobre esta região, sendo que a redução nas concentrações de  $\text{NO}_2$  chegam a  $14 \mu\text{g m}^{-3}$  às 15Z (Figura 4.50 e Figura 4.51).

A interação entre os dois fatores reduz as concentrações de  $\text{NO}_2$  sobre o Vale do Paraíba durante praticamente todo o período avaliado (Figura 4.52 e Figura 4.53), atingindo  $-9 \mu\text{g m}^{-3}$  às 12Z nesta região. Sobre a RMSP não são observadas alterações resultantes da combinação dos fatores, de forma que a concentração de  $\text{NO}_2$  mantém-se praticamente nula durante todo o dia e a noite.

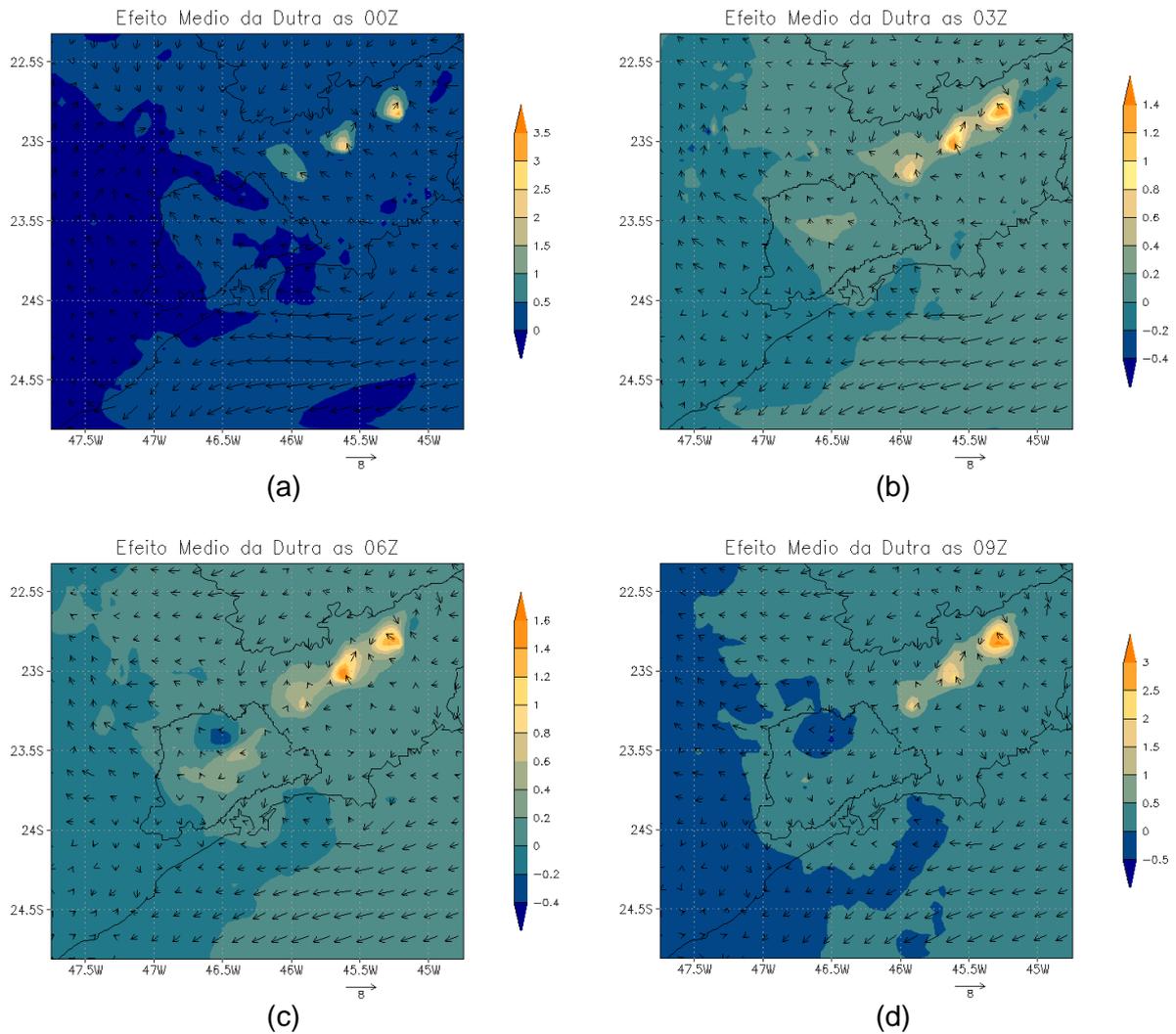


Figura 4.48. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

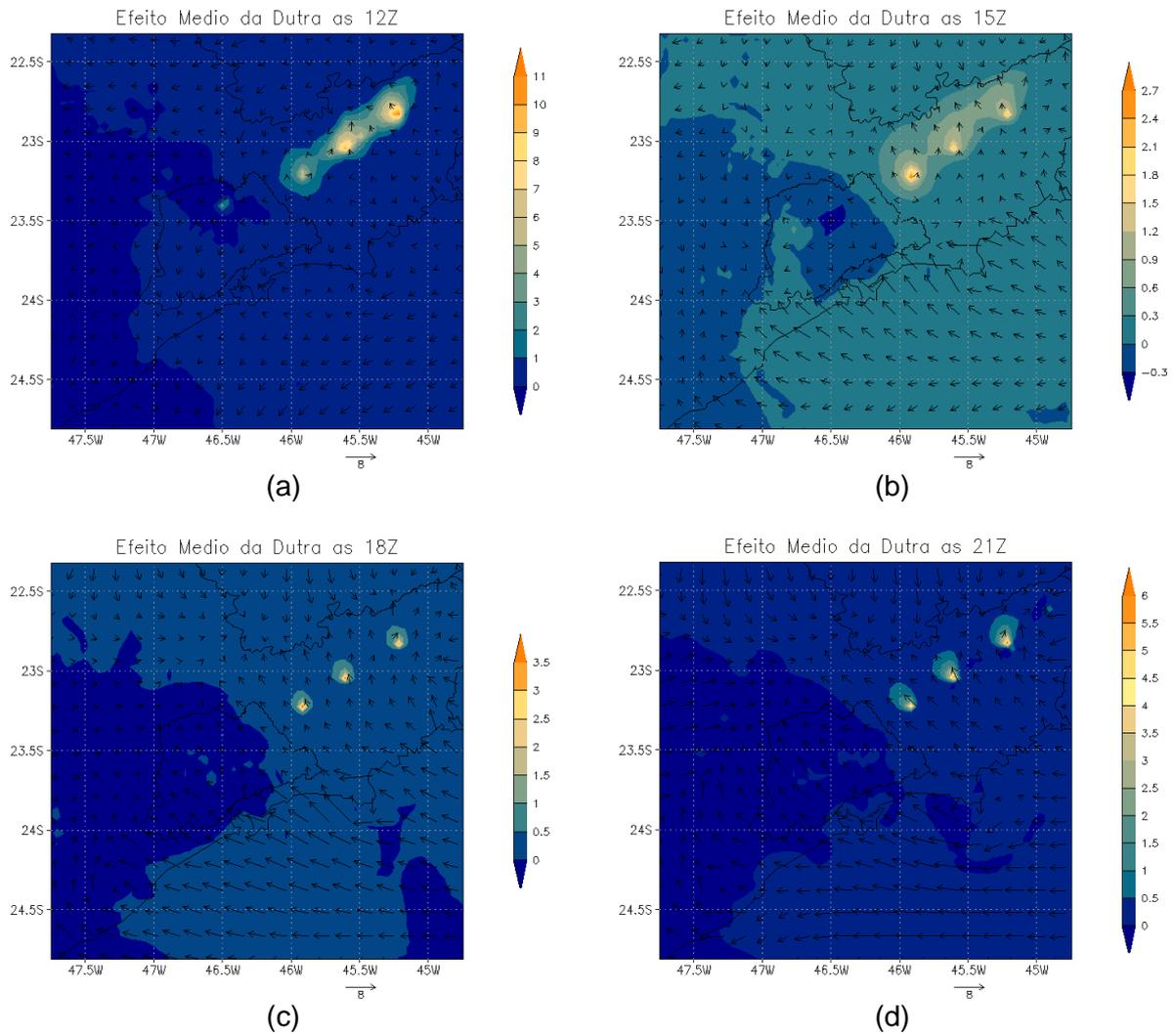


Figura 4.49. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

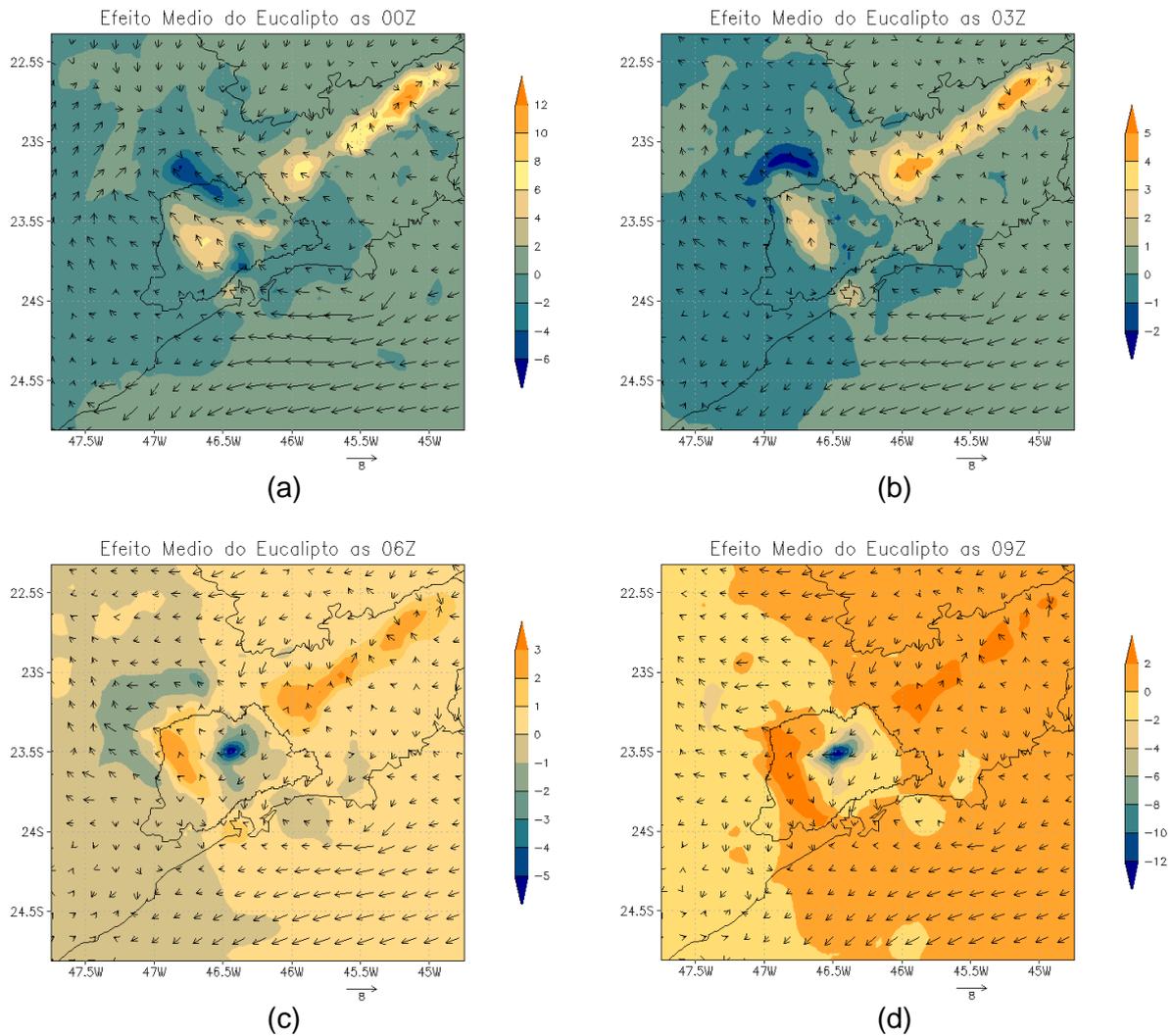


Figura 4.50. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

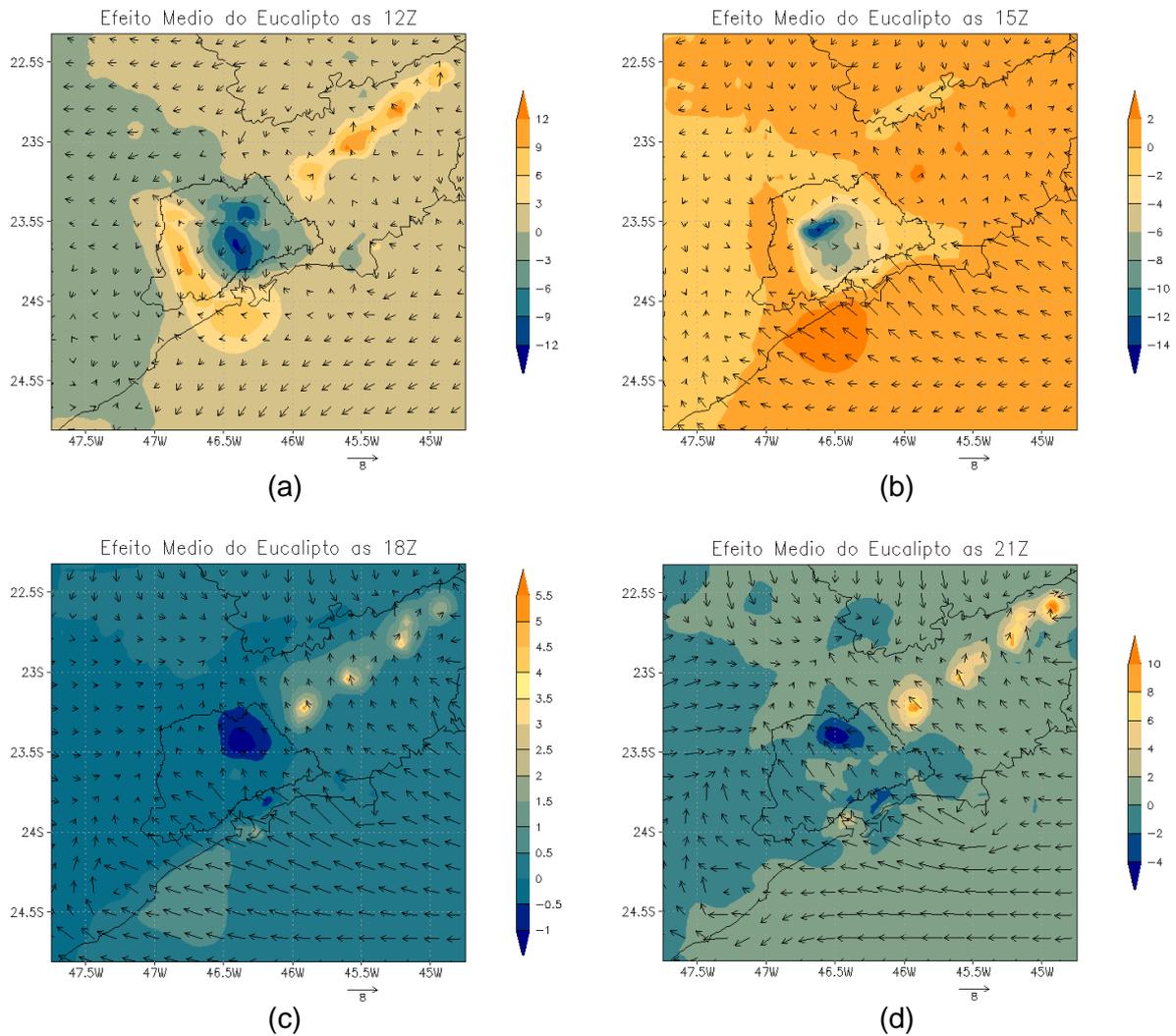


Figura 4.51. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

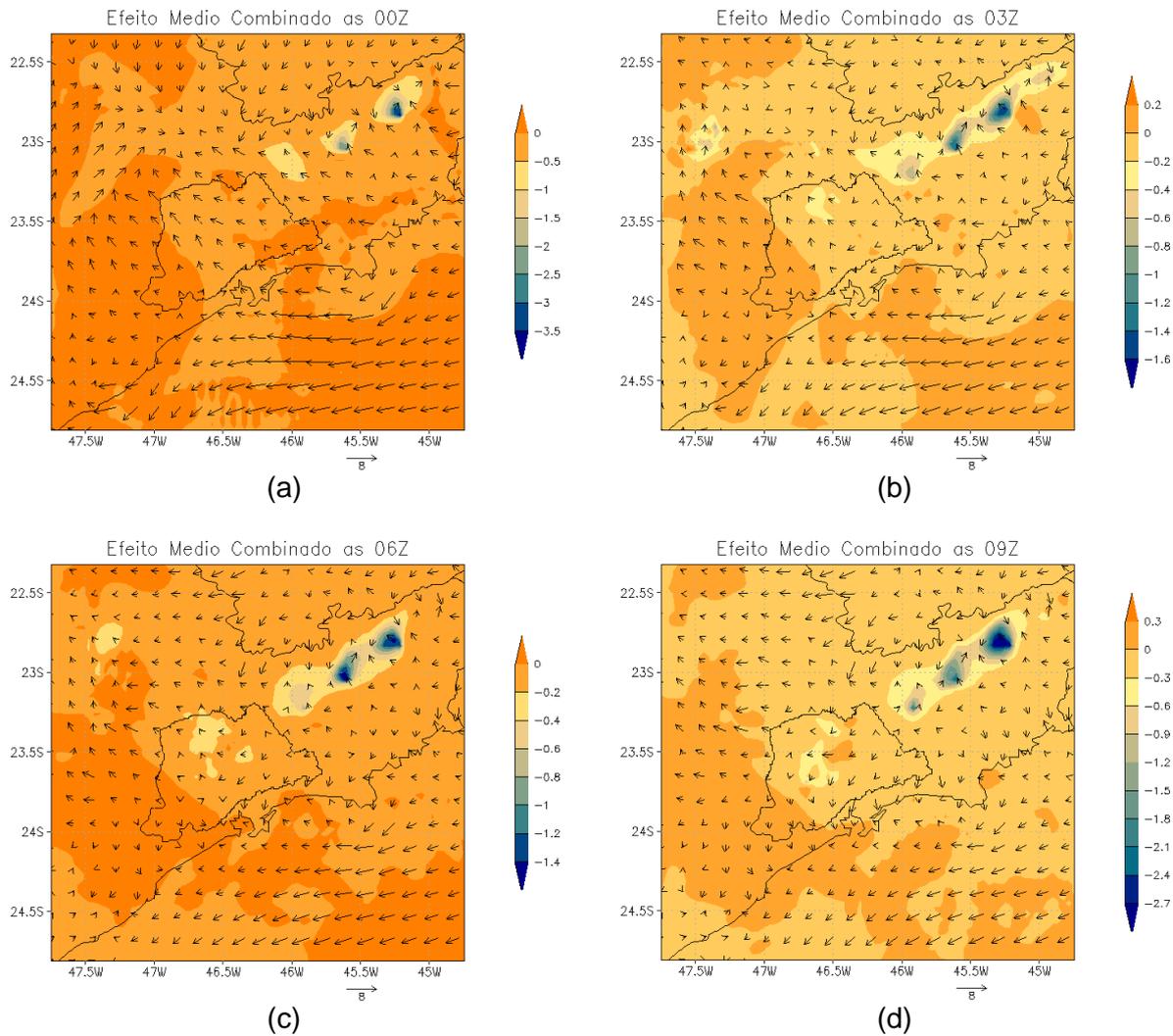


Figura 4.52. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

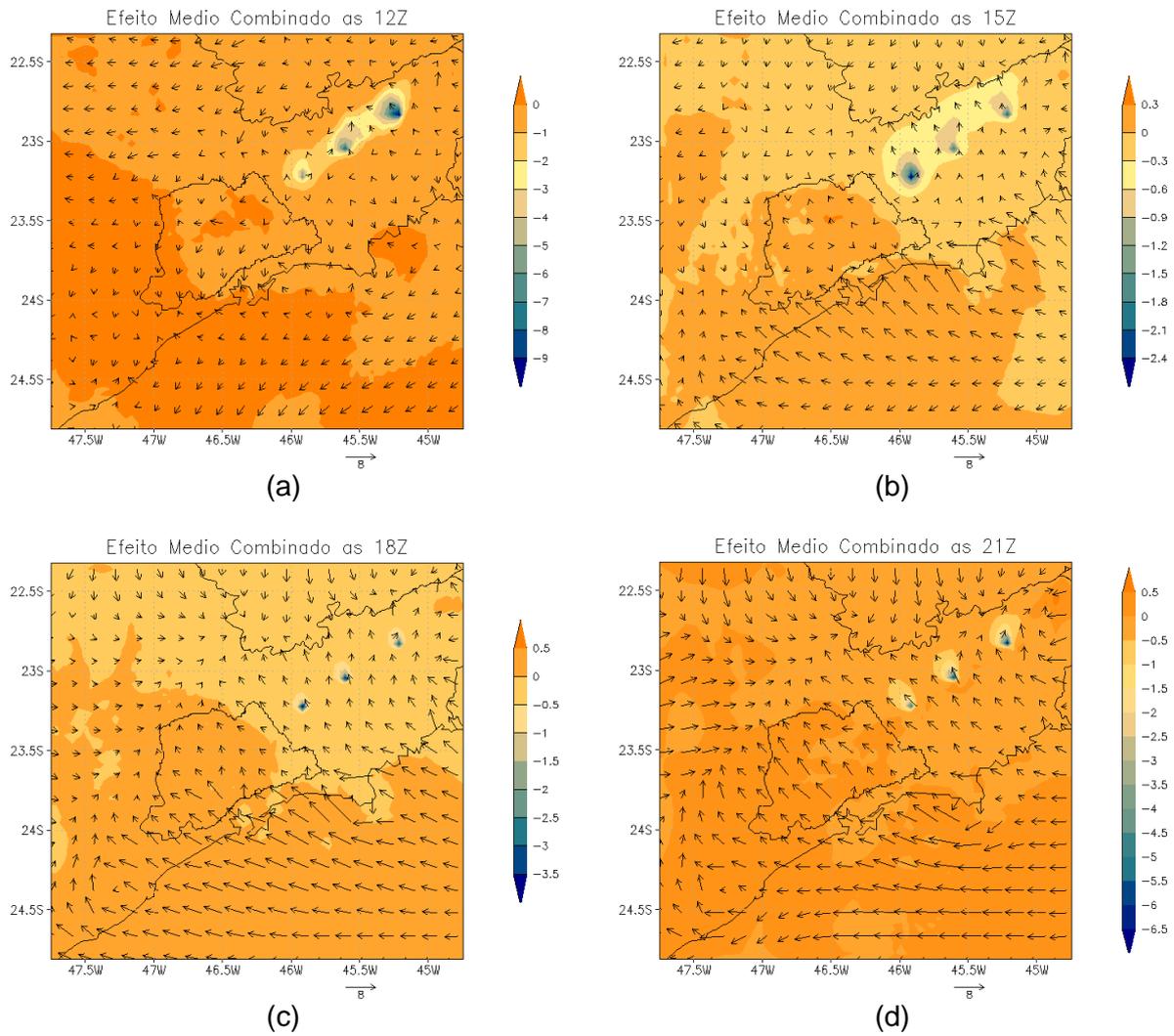


Figura 4.53. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de dióxido de nitrogênio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Por fim, analisando-se o efeito isolado da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração de ozônio (Figura 4.54 e Figura 4.55), considerando as condições específicas do período analisado, bem como as estimativas feitas no que diz respeito às concentrações de entrada do modelo, nota-se que entre 00Z e 12Z há uma contribuição negativa a esta concentração no Vale do Paraíba, atingindo  $-4 \mu\text{g m}^{-3}$  às 12Z. Durante a tarde (entre 15 e 18Z) a presença isolada da Dutra gera aumentos de até  $6 \mu\text{g m}^{-3}$  nas concentrações de  $\text{O}_3$  sobre o vale, um pouco a norte da localização da própria Dutra devido às circulações de SE. Às 21Z, o efeito isolado da Dutra é suavizado (inferior a  $2,5 \mu\text{g m}^{-3}$ ) e sua área de atuação está deslocada para norte do vale.

Considerando o efeito isolado dos reflorestamentos de eucaliptos (Figura 4.56 e Figura 4.57) e o fato de que a formação do ozônio está diretamente relacionada à radiação solar, tem-se que a partir das 12Z são observadas alterações positivas nas concentrações de  $\text{O}_3$  sobre o VP devido à presença deste fator, atingindo  $15 \mu\text{g m}^{-3}$  às 18Z. Observa-se que estas alterações sofrem um deslocamento na direção noroeste, resultante de um escoamento de sudeste associado à brisa marítima que avança no sentido do interior do continente durante a tarde e início da noite. Conseqüentemente, após as 21Z e durante toda a noite, as alterações positivas observadas durante a tarde sobre o VP encontram-se a noroeste e oeste do VP, dando lugar a alterações negativas sobre o VP. De maneira similar, as alterações positivas sobre as concentrações de  $\text{O}_3$  observadas na RMSP às 12Z são deslocadas para sudoeste às 15Z, resultantes de um escoamento associado à brisa terrestre, visível às 12Z na RMSP em direção ao oceano. Devido à maior intensidade do escoamento de sudeste, que tem início às 15Z, estas alterações voltam a ser deslocadas no sentido do continente, mantendo-se a sudoeste da RMSP e encontrando-se durante a noite a norte e noroeste da RMSP com aquelas alterações provenientes do VP.

O efeito combinado dos dois fatores (Figura 4.58 e Figura 4.59) gera incrementos na concentração de  $\text{O}_3$  entre 21Z e 12Z sobre o VP, embora de pequena magnitude (alterações máximas de  $1,8 \mu\text{g m}^{-3}$ ). Durante a tarde são observadas reduções nas concentrações de  $\text{O}_3$  devido à atuação conjunta dos fatores, de até  $5,5 \mu\text{g m}^{-3}$  sobre o VP às 18Z.

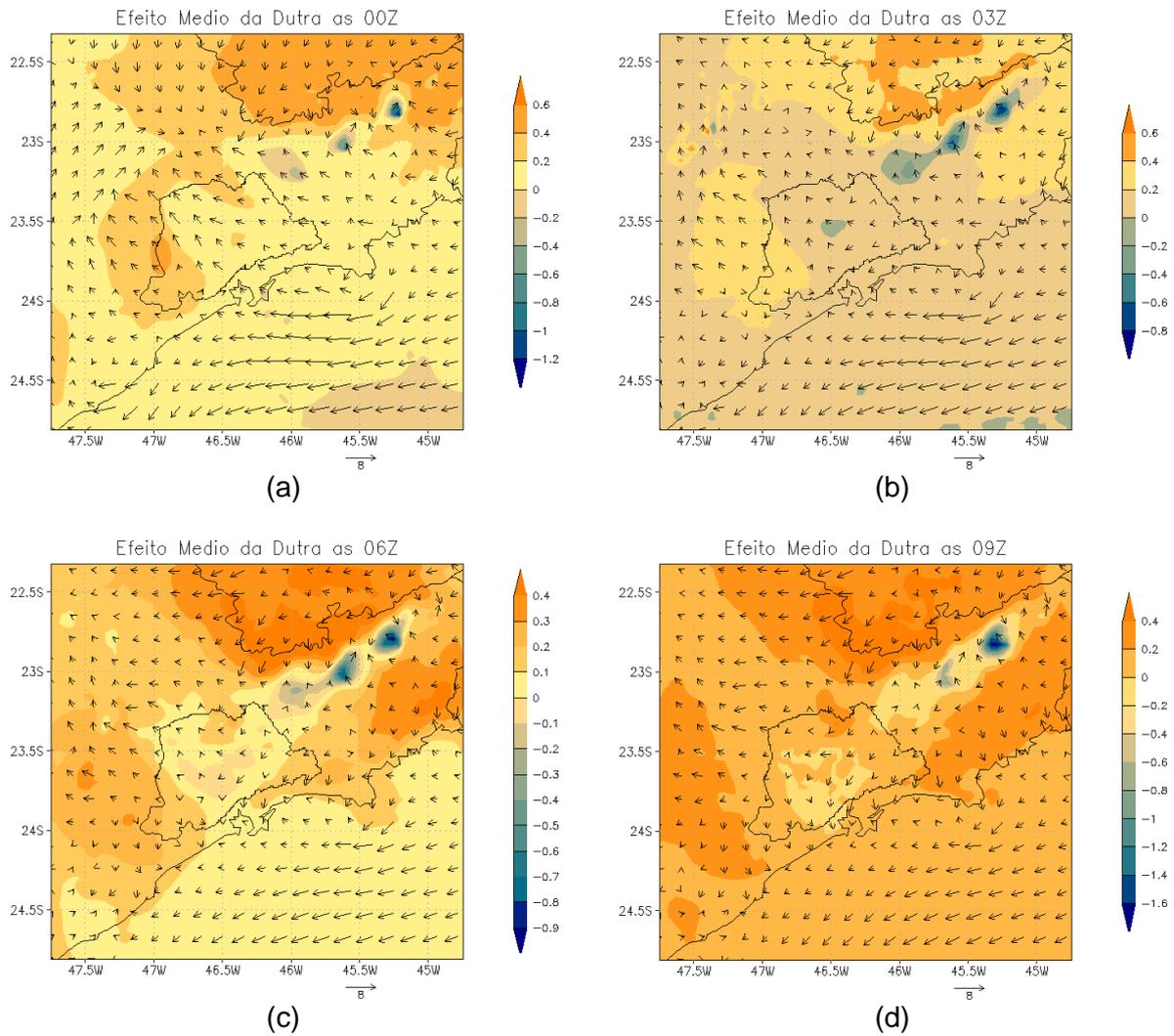


Figura 4.54. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

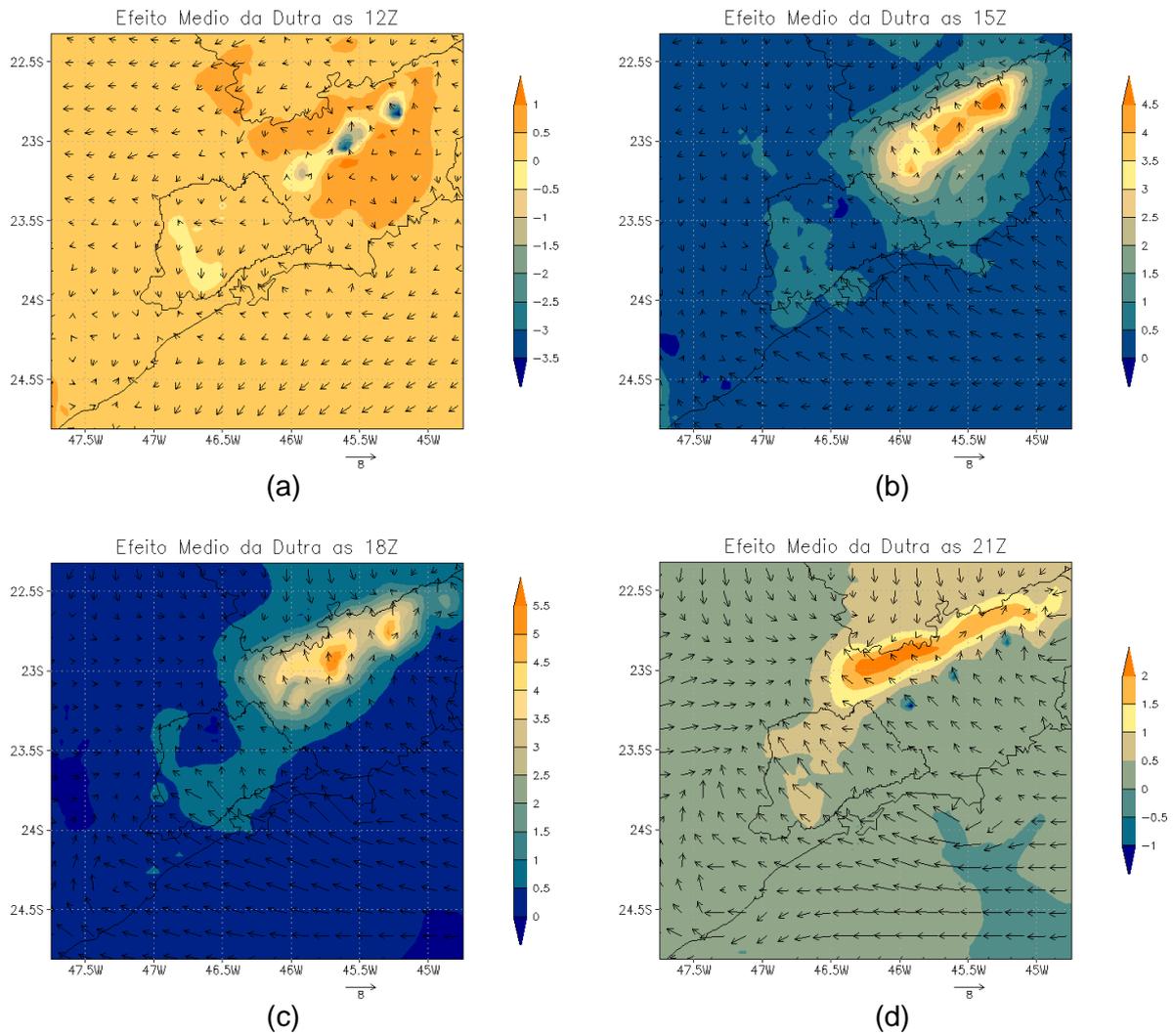


Figura 4.55. Efeito isolado da presença da Rodovia Presidente Dutra sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

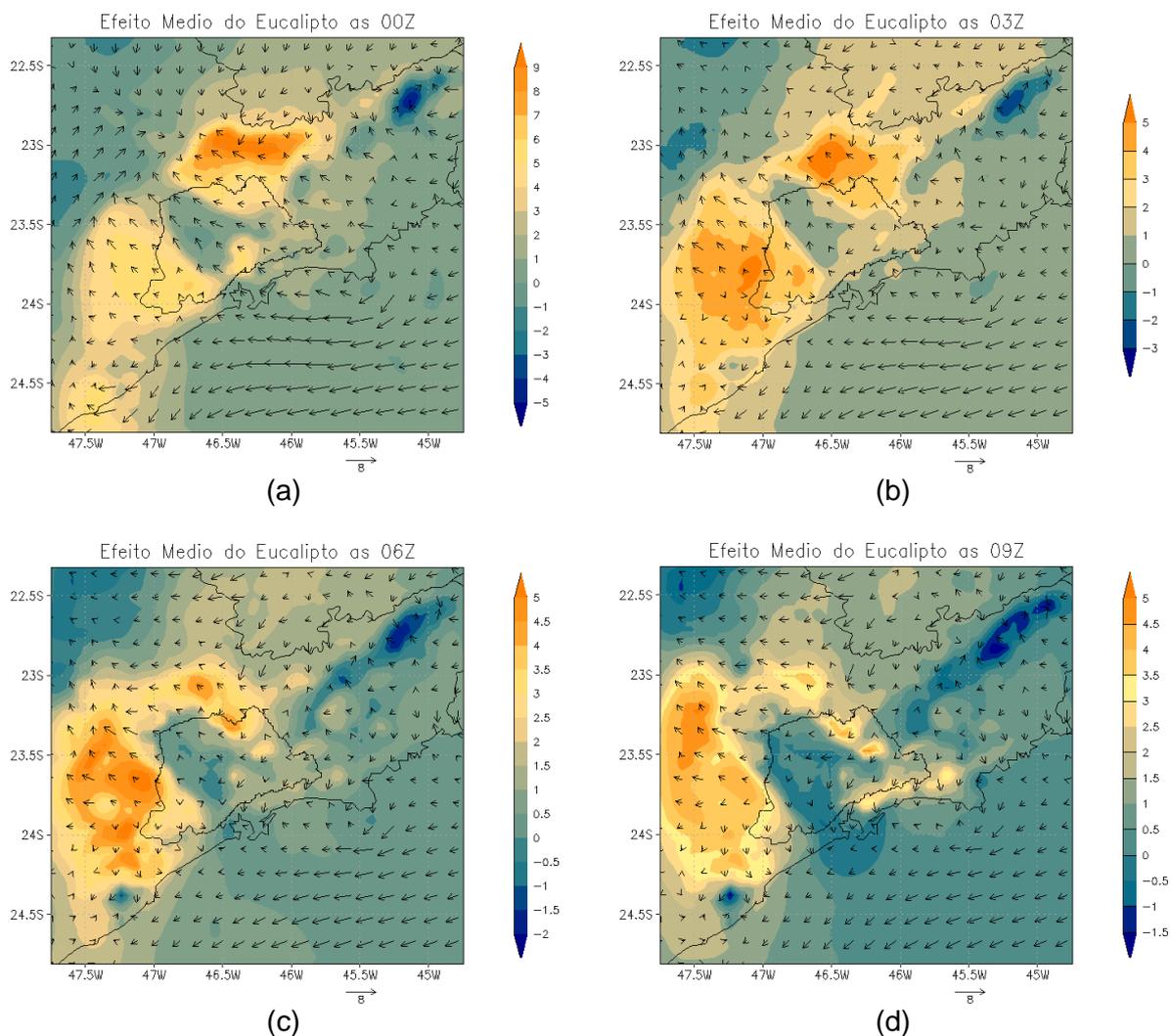


Figura 4.56. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

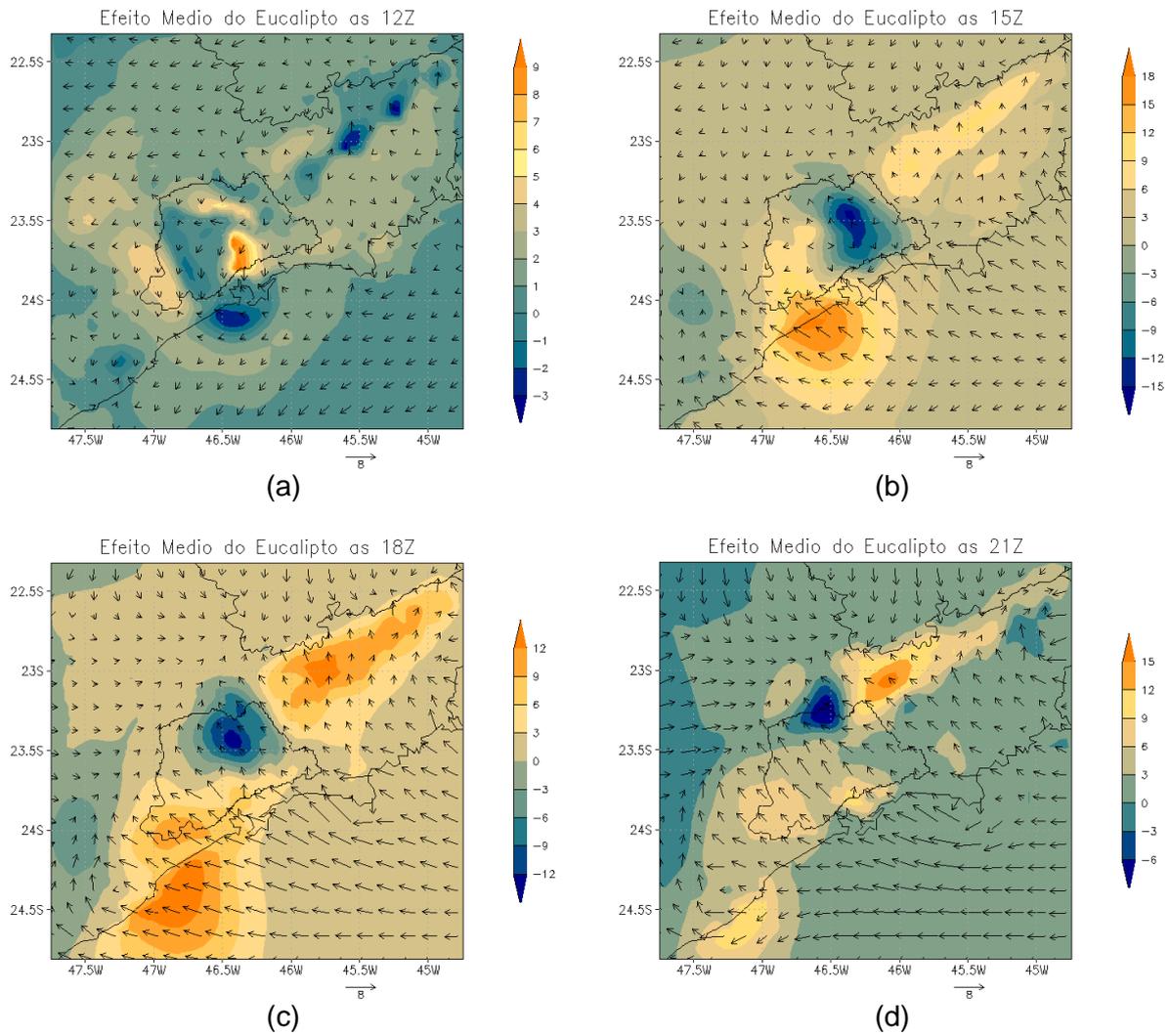


Figura 4.57. Efeito isolado da presença dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

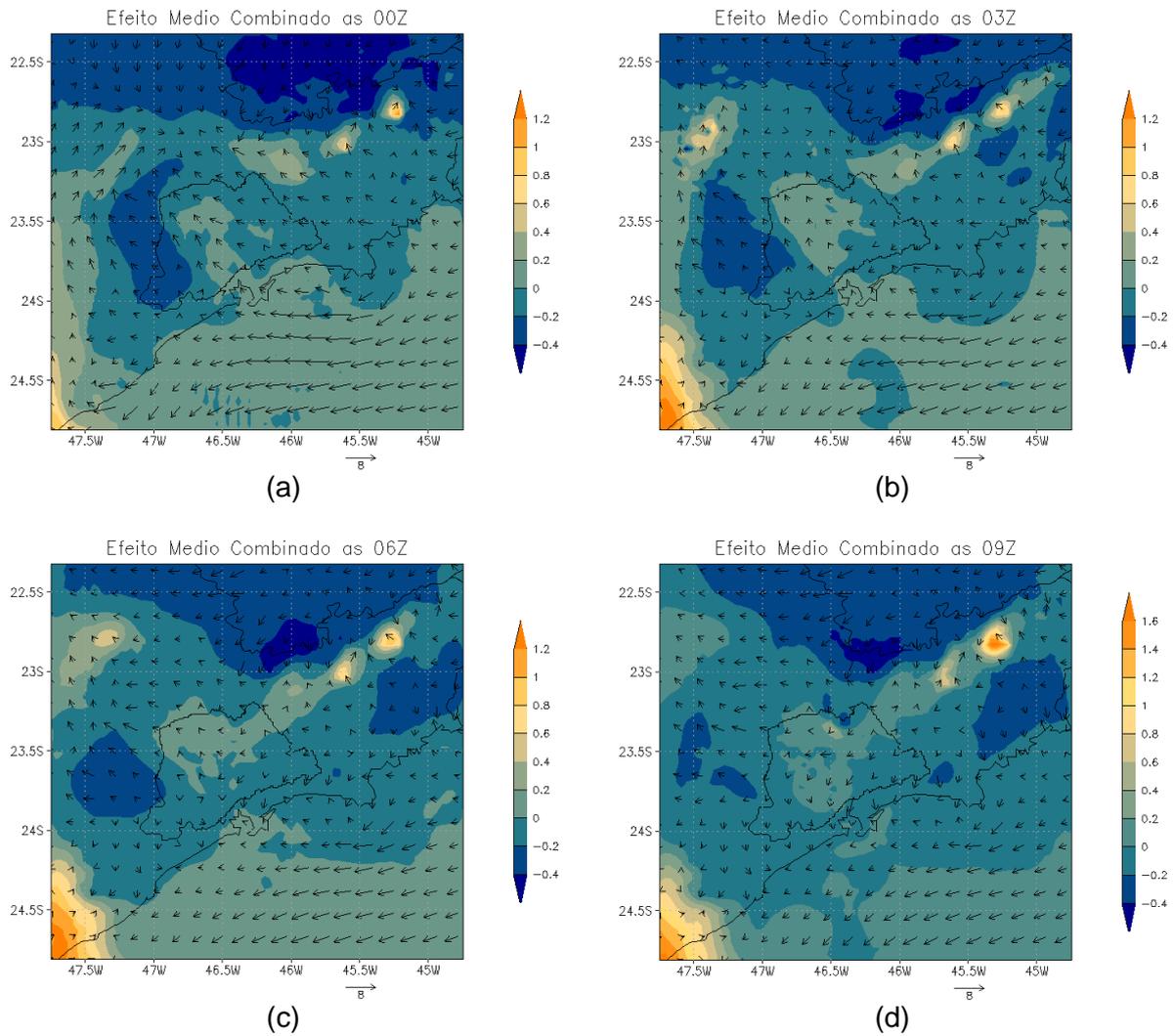


Figura 4.58. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 00Z, (b) 03Z, (c) 06Z e (d) 09Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

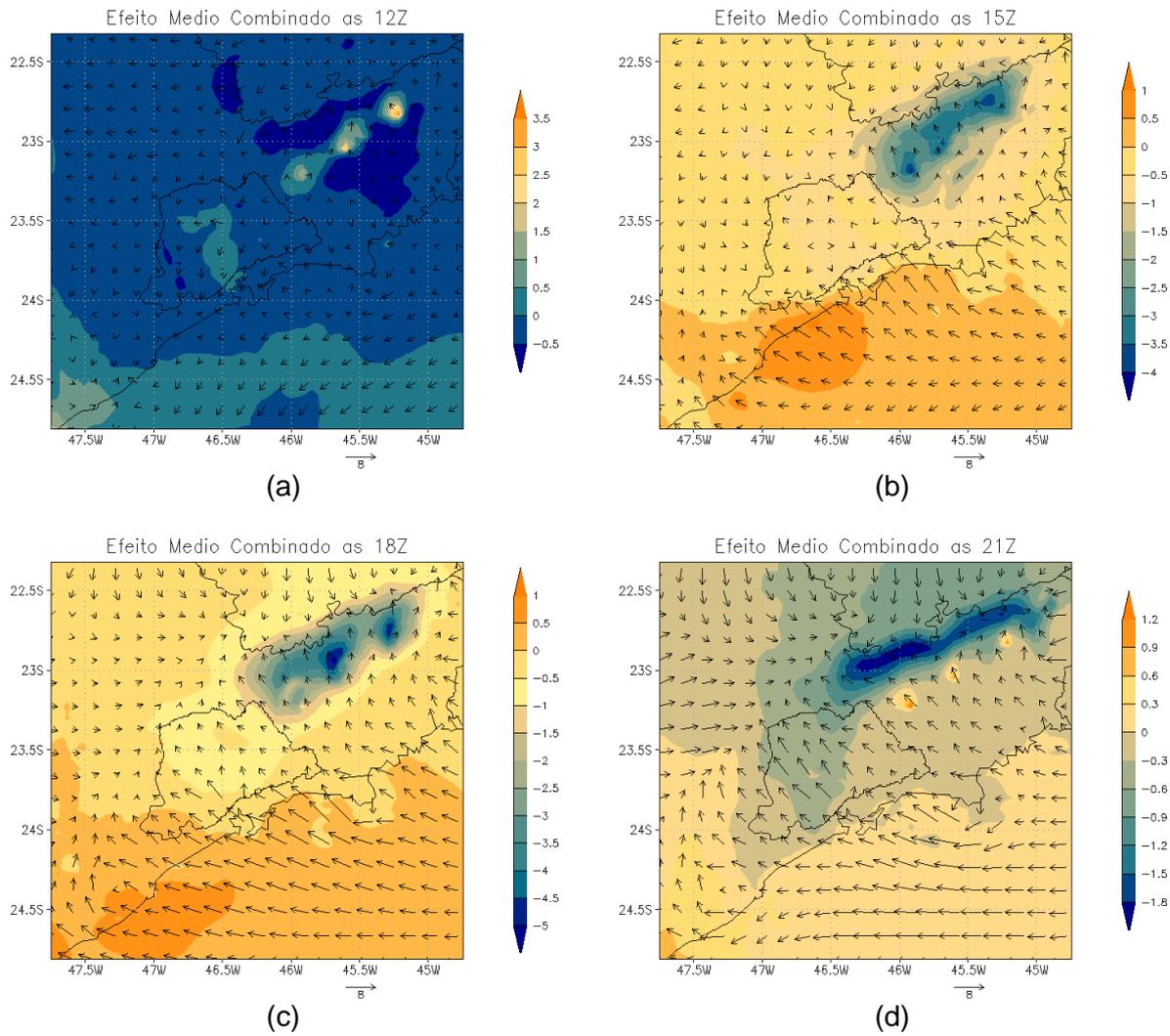


Figura 4.59. Efeito combinado da presença da Rodovia Presidente Dutra e dos reflorestamentos de eucaliptos sobre a concentração média horária de ozônio ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) para o período de 28/07 a 06/08/2005 às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z, com sobreposição do campo médio horário de vento ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Para que fique mais evidente o movimento das circulações locais e sua atuação sobre as concentrações de poluentes, apresenta-se na Figura 4.60 a evolução do vento médio do período em superfície entre as 12Z e 00Z. Às 12Z é possível observar um escoamento associado à brisa terrestre na porção sul da RMSP, com velocidade aproximada de  $2 \text{ m s}^{-1}$ , responsável por deslocar as alterações nas concentrações de  $\text{O}_3$  observadas na RMSP em direção ao oceano. Por volta de 15Z a brisa marítima localiza-se na linha da costa, e avança em direção ao continente com velocidade aproximada de  $5 \text{ m s}^{-1}$ . Atinge o Vale do Paraíba às 18Z, e neste mesmo horário é possível observar uma circulação de norte, um pouco menos intensa que também se dirige ao vale. Às 21Z estas circulações se encontram sobre o Vale do Paraíba, e associadas a uma circulação proveniente de leste, que pode estar relacionada à circulação de montanha, formam uma região de “confinamento” na porção noroeste e oeste do vale, onde foram observadas as alterações nas concentrações de ozônio. Esta formação logo se dissipa, devido ao enfraquecimento da brisa marítima.

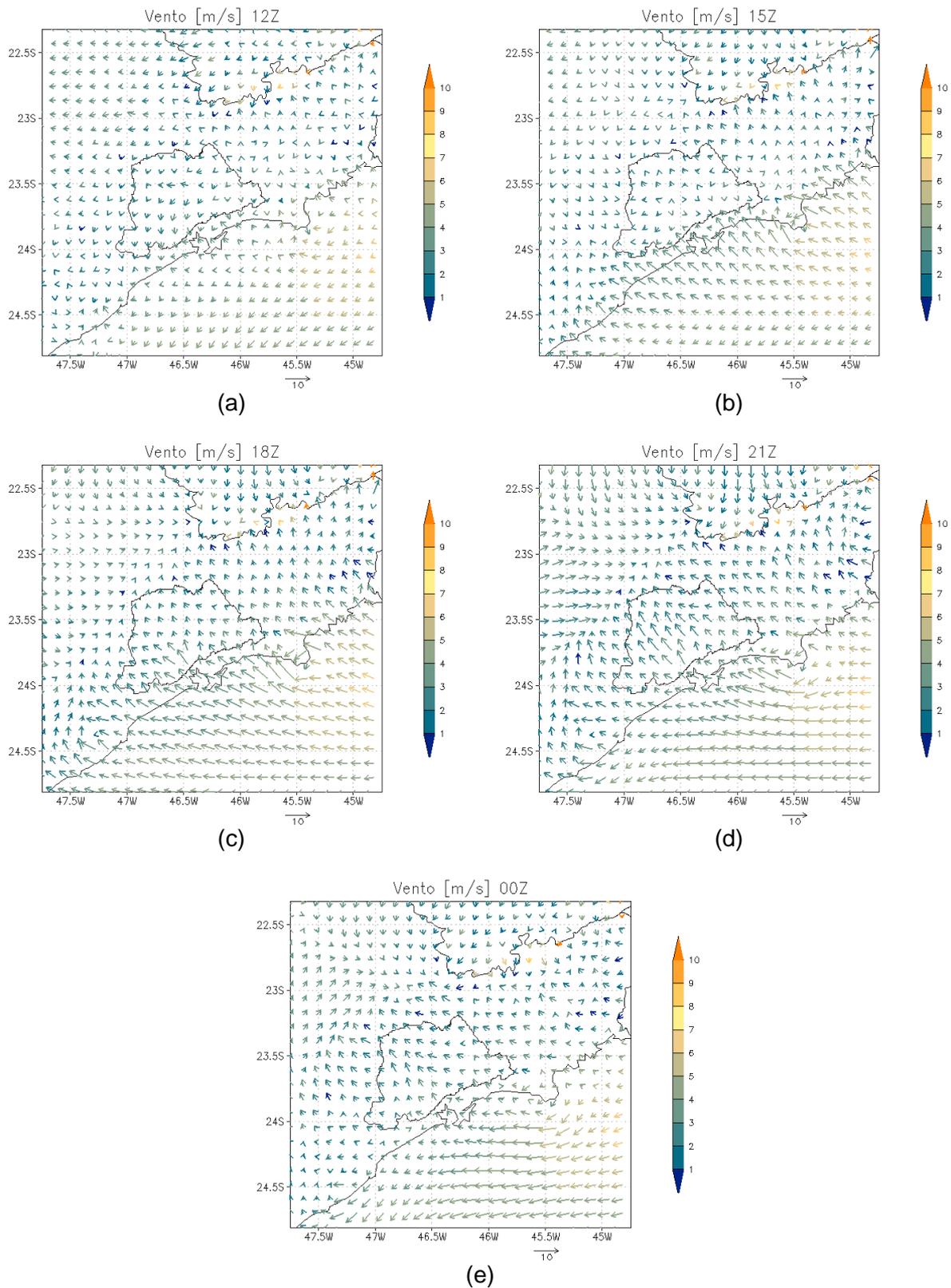


Figura 4.60. Vento médio horário ( $\text{m s}^{-1}$ ) em superfície às (a) 12Z, (b) 15Z, (c) 18Z e (d) 21Z e (e) 00Z do período de 28/07 a 06/08/2005. As cores representam a magnitude do vento.

#### 4.2.5 A RAZÃO COVs/NO<sub>x</sub>

Como observado, tanto os compostos orgânicos voláteis como os óxidos de nitrogênio estão envolvidos na formação do ozônio. Na região do Vale do Paraíba, encontra-se uma atmosfera COVs-limitante, ou seja, as concentrações de ozônio se tornam mais sensíveis a alterações nas emissões de COVs. Isto ocorre porque as concentrações dos óxidos de nitrogênio são relativamente abundantes em relação aos compostos orgânicos voláteis, resultando em uma razão COVs/NO<sub>x</sub> baixa. Este fato pode ser observado na Figura 4.61, em que está presente a razão COVs/NO<sub>x</sub> para São José dos Campos durante os dez dias de simulação.

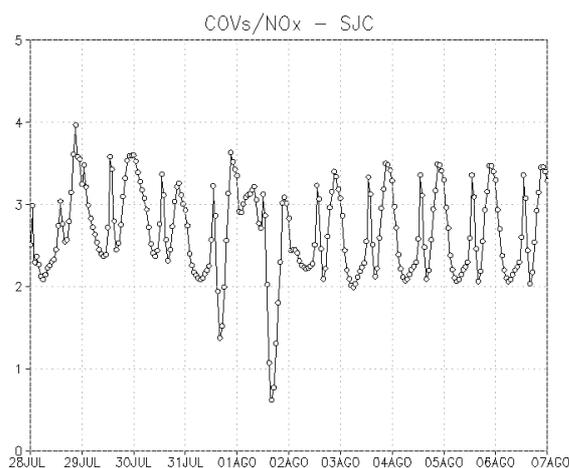


Figura 4.61. Razão COVs/NO<sub>x</sub> (ppm/ppm) para São José dos Campos entre 28/07 e 06/08/2005.

Com base no que foi apresentado no item 1.6, com relação às isopletras de ozônio e às razões COVs/NO<sub>x</sub>, observa-se que sobre o Vale do Paraíba esta razão mantém-se inferior a 8 (média de 2,58), caracterizando de fato uma atmosfera COVs-limitante, de acordo com EPA (2004).

Quando a atmosfera encontra-se nesta situação, tem-se que pequenos incrementos nas concentrações de COVs geram um aumento nas concentrações de O<sub>3</sub> mais significativo do que quando ocorrem incrementos nas concentrações de NO<sub>x</sub>, podendo inclusive ocorrer

reduções nas concentrações de  $O_3$  neste último caso. Isto de fato ocorre em São José dos Campos (Figura 4.62-a) e no Vale do Paraíba (Figura 4.63 e Figura 4.64-b-c), quando as concentrações iniciais de COVs e  $NO_x$  são aumentadas em 10%. Quando, por outro lado, ocorrem reduções de 50% das concentrações iniciais dos precursores, observam-se em São José dos Campos (Figura 4.62-b) e no Vale do Paraíba (Figura 4.63 e Figura 4.64-d-e) reduções nas concentrações de  $O_3$  decorrentes das reduções nas concentrações de COVs e aumentos das concentrações de  $O_3$  devidos às reduções nas concentrações de  $NO_x$ .

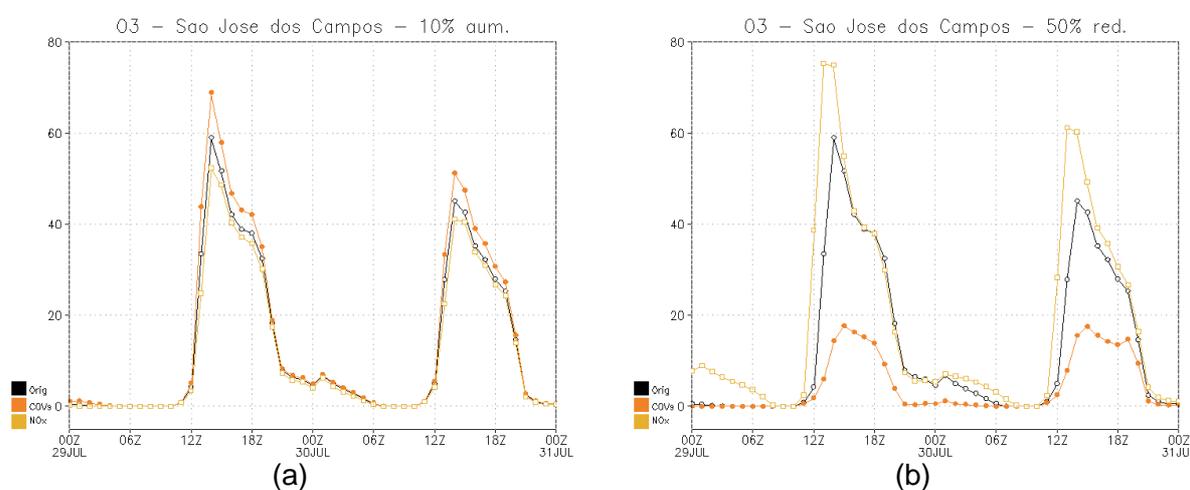


Figura 4.62. Concentrações ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) originais de  $O_3$  e resultantes de (a) aumento de 10% e (b) redução de 50% das concentrações iniciais de COVs e  $NO_x$  em São José dos Campos entre os dias 29 e 30/07/2005.

A inserção dos eucaliptos nos experimentos apresentados no item 4.2.4 gerou aumentos de baixa intensidade nas concentrações de COVs (alterações máximas de  $0,06 \mu\text{g m}^{-3}$ ) e aumentos mais intensos nas concentrações de  $NO$  e  $NO_2$  (alterações máximas de  $20$  e  $15 \mu\text{g m}^{-3}$ , respectivamente), que resultaram em incrementos de até  $15 \mu\text{g m}^{-3}$  nas concentrações de  $O_3$  sobre o Vale do Paraíba durante a tarde. Considerando que a atmosfera do VP é COVs-limitante conclui-se que estas pequenas alterações nas concentrações de COVs são determinantes nas alterações observadas sobre as concentrações de  $O_3$ .

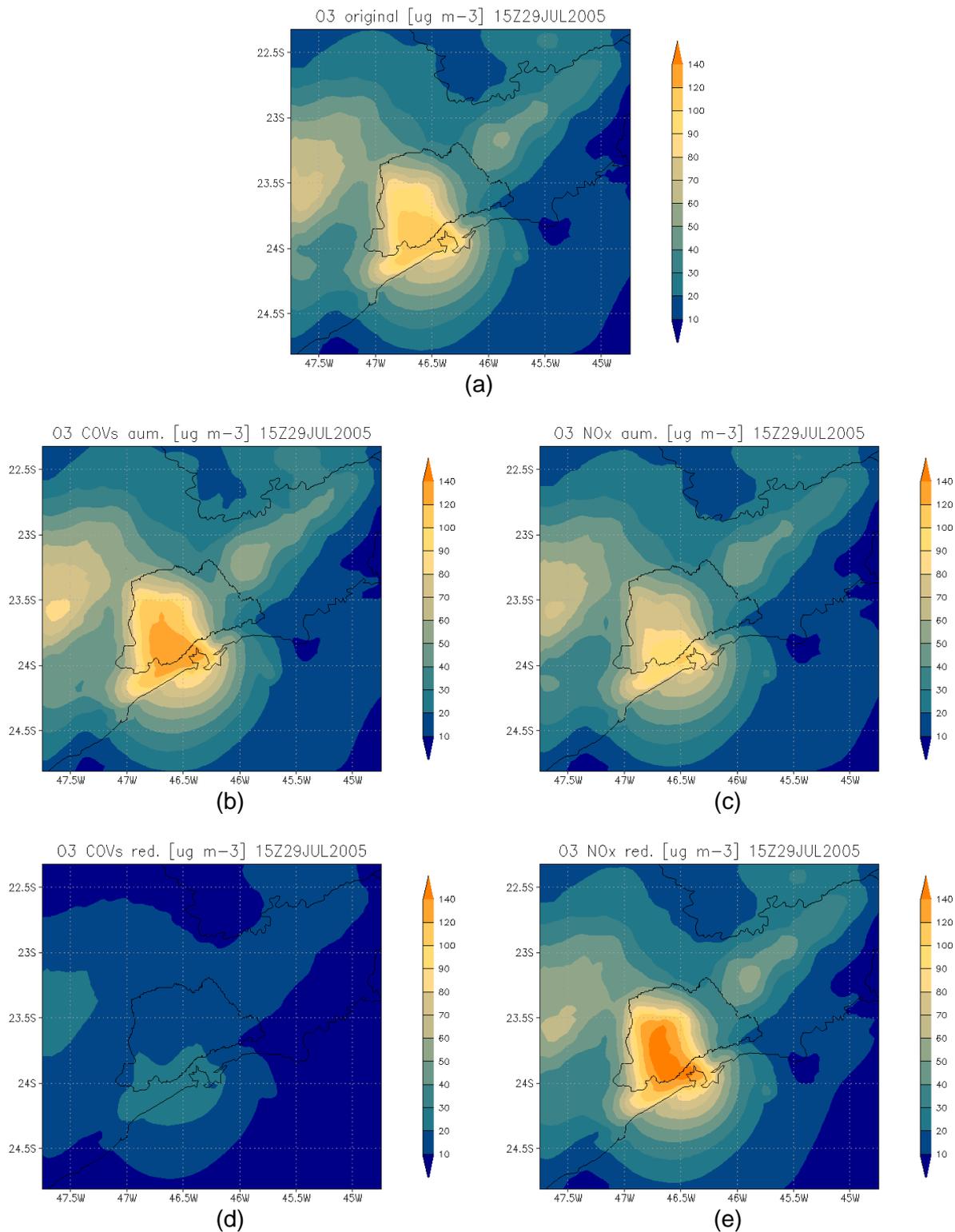


Figura 4.63. Concentrações ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de ozônio (a) original, resultantes de aumento de 10% na concentração inicial de (b) COVs e (c) NO<sub>x</sub> e resultantes de redução de 50% na concentração inicial de (d) COVs e (e) NO<sub>x</sub>, às 15Z do dia 29/07/2005.

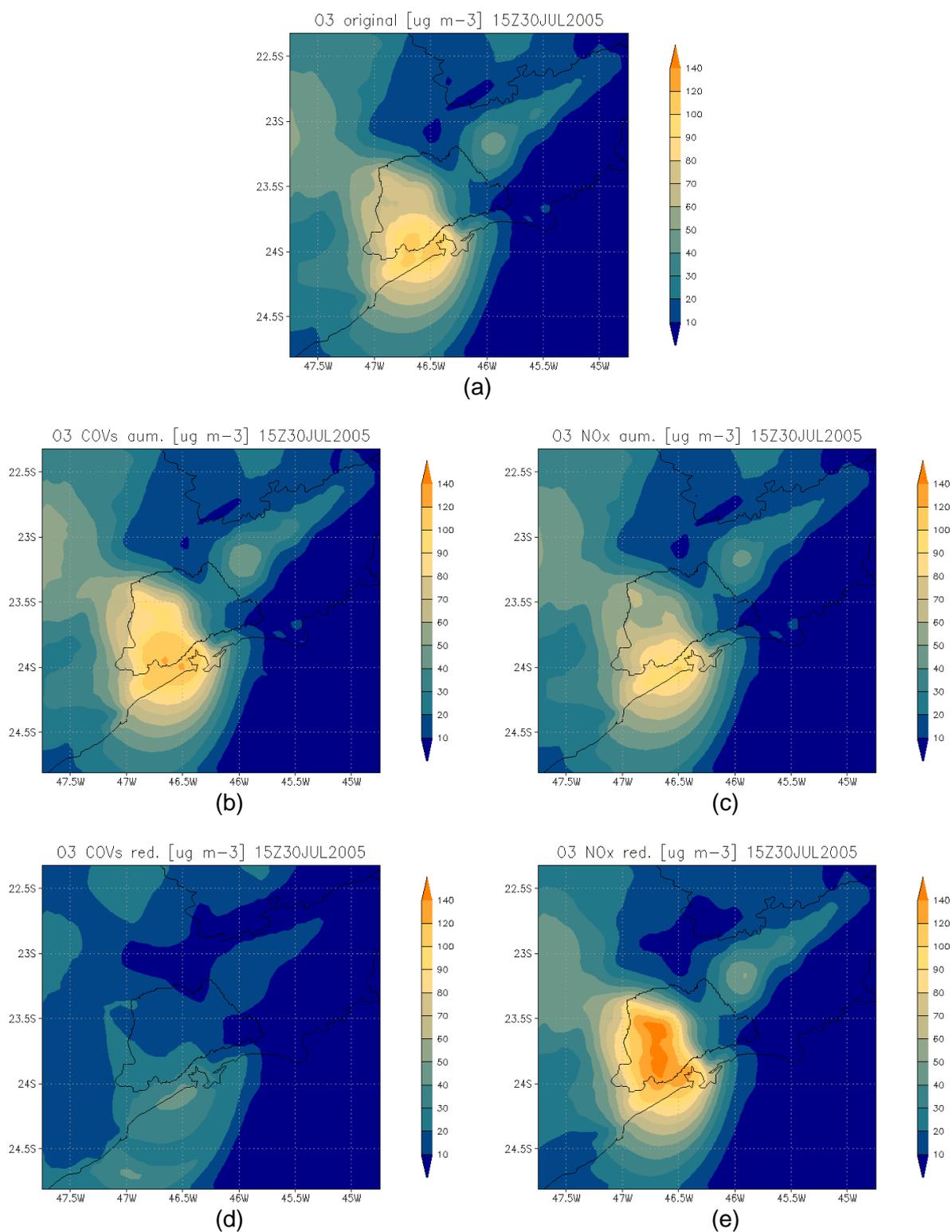


Figura 4.64. Concentrações ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de ozônio (a) original, resultantes de aumento de 10% na concentração inicial de (b) COVs e (c)  $\text{NO}_x$  e resultantes de redução de 50% na concentração inicial de (d) COVs e (e)  $\text{NO}_x$ , às 15Z do dia 30/07/2005.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CONCLUSÕES DOS EXPERIMENTOS COM INICIALIZAÇÃO HOMOGÊNEA

A partir das simulações bidimensionais com inicialização homogênea simplificadas, buscou-se avaliar o efeito da alteração no grau de saturação inicial do solo e da época do ano sobre a propagação da brisa marítima continente adentro. Observou-se que a alteração da umidade do solo impacta as circulações locais no Vale do Paraíba, bem como a penetração da brisa marítima. Quanto mais quente e seco é o ambiente (verão – umidade baixa), maior a intensidade dos ventos que formam a brisa marítima e mais distante é o seu alcance no interior do continente. Neste caso, o ambiente permanece mais seco (valores de razão de mistura de vapor mais baixos) e as temperaturas potenciais são mais altas do que nos demais casos. Ainda nas simulações de verão, a altura atingida pelas circulações locais é superior àquela atingida nas simulações de inverno. Também a intensidade dos ventos é maior no verão, resultante do gradiente de temperatura mais intenso. No inverno, além de menos intensa, a penetração da brisa marítima foi mais acentuada nas situações em que a umidade do solo era menor. Este resultado pode ser interpretado em função da diferença de temperatura entre um ponto sobre o oceano e sobre o continente. Durante o inverno, a diferença torna-se menor do que no verão e, portanto há redução da intensidade da circulação de brisa.

As simulações tridimensionais com inicialização homogênea buscaram evidenciar o efeito da circulação de brisa marítima resultante da proximidade da costa, sua atuação e interação com as circulações de brisa de vale e de montanha, e sua resposta à alteração do grau de saturação inicial do solo. Observou-se que na simulação com grau de saturação inicial do solo menor, a brisa marítima apresentou maiores velocidades de propagação e maior alcance no interior do continente. Portanto, um ambiente mais quente e seco acelerou a entrada da brisa marítima, bem como o desenvolvimento da brisa de vale. Em um

ambiente mais úmido este efeito foi retardado, e foi caracterizado por menores intensidades de vento.

Se por um lado a presença de eucaliptos reduziria a umidade do solo, devido à sua maior eficiência no uso da água em relação a outras culturas, favorecendo a umidade atmosférica e resfriando-a, por outro lado, a redução no albedo em relação à pastagem, por exemplo, aumentaria a absorção de energia solar, elevando as temperaturas do ambiente. Desta forma, a análise dos experimentos com inicialização homogênea confirmou que em um ambiente mais quente e seco o gradiente de pressão entre a atmosfera sobre o vale e sobre o oceano seria maior e o avanço da brisa marítima seria beneficiado, sendo o oposto válido para ambientes mais frios e úmidos. A realização dos experimentos heterogêneos, com maior detalhamento do impacto das alterações impostas pela mudança de cobertura vegetal associada às plantações de eucaliptos tornou-se então necessária, a fim de esclarecer qual seria o efeito dominante da presença de eucaliptos sobre as circulações locais.

## **5.2 CONCLUSÕES DOS EXPERIMENTOS COM INICIALIZAÇÃO HETEROGÊNEA**

A análise das simulações heterogêneas foi realizada por meio do método de separação de fatores proposto por Stein e Alpert (1993). Os resultados devem ser apreciados considerando que são específicos para o período avaliado, bem como para as estimativas de fluxos de superfície e concentrações de poluentes consideradas. Pretende-se, desta forma, observar se os efeitos decorrentes da presença dos fatores são positivos ou negativos sobre determinado fluxo ou concentração de interesse, sendo de menor relevância o valor exato desta alteração.

Com o primeiro grupo de experimentos com inicialização heterogênea observaram-se os efeitos nos fluxos de superfície e circulações locais decorrentes da presença do tráfego da Rodovia Presidente Dutra e da área de reflorestamento de eucaliptos no Vale do Paraíba por meio de médias horárias calculadas para todo o período simulado. O fluxo de

calor sensível, quando exposto à presença exclusiva da Dutra, sofreu incrementos sobre sua própria localização durante a noite e reduções durante o dia. Considerando apenas a presença do reflorestamento, este fluxo teve reduções durante o dia, em consequência do ambiente mais úmido responsável por reduzir as temperaturas em relação aos arredores. Quando combinados os efeitos destes dois fatores notou-se que nas áreas urbanas do VP surgiram pequenas áreas com valores negativos durante a noite e positivos durante o dia, além de alterações variadas a sudeste da RMSP, indicando que a interação entre os dois fatores produz incrementos e reduções sobre o fluxo de calor sensível nestas regiões. A atuação do vento não exerceu influências perceptíveis sobre a localização das alterações no fluxo de calor sensível nas três situações analisadas.

O fluxo de calor latente sofreu incrementos com a presença isolada da Rodovia Presidente Dutra, restritos à região próxima da rodovia. Quando foram considerados apenas os eucaliptos observaram-se valores positivos durante o dia e a noite sobre a área de reflorestamento, resultantes da maior capacidade de extração de água do solo através das raízes e transporte para as folhas, onde ocorre a evapotranspiração. O resultado deste processo é o aumento da umidade atmosférica deste ambiente e, evidentemente, o maior uso da energia solar disponível no processo da evapotranspiração. O efeito combinado dos dois fatores foi caracterizado pelas áreas urbanas do VP, sobre as quais foram observados valores negativos durante o dia e a noite. Mais uma vez a atuação do vento não interferiu na localização das alterações sobre este fluxo.

Quanto ao balanço global de radiação, os efeitos isolados da Rodovia Presidente Dutra e do reflorestamento de eucaliptos apresentaram comportamento similar, gerando incrementos nestes balanços sobre a própria rodovia e sobre a área de reflorestamentos, respectivamente. Observando os efeitos isolados dos fatores sobre o *BOC* e *BOL* concluiu-se que ambos são igualmente determinantes sobre o *BGR*. Mais uma vez o efeito combinado dos fatores concentrou-se sobre as áreas urbanas do VP, resultando em reduções nos valores de *BGR* durante o dia.

Por meio destas análises ficou evidente a não-linearidade da interação entre os fatores avaliados. Mesmo sendo a área de reflorestamento mais representativa no que diz respeito à área ocupada, esta teve seu efeito reduzido quando avaliado em conjunto com o efeito da Rodovia Presidente Dutra.

Os efeitos da inserção dos reflorestamentos de eucaliptos sobre as circulações locais foram analisados considerando a presença das áreas urbanas e da Rodovia Presidente Dutra. Observou-se que durante praticamente todo o período a presença de eucaliptos reduziu as temperaturas e aumentou a razão de mistura de vapor sobre o VP. Com temperaturas mais baixas, uma área de alta pressão desenvolveu-se sobre o vale e desintensificou o gradiente de pressão entre o oceano e o vale. O efeito do calor latente se sobrepôs ao do calor sensível, o que resultou em menores temperaturas e uma área de maior densidade do ar em relação aos arredores, retardando o escoamento do ar do oceano em direção ao interior do continente. Este padrão causou aceleração da ordem de  $0,0016 \text{ m s}^{-2}$  considerando a presença dos eucaliptos, contra  $0,0022 \text{ m s}^{-2}$  quando estes estiveram ausentes.

Com o segundo grupo de experimentos com inicialização heterogênea pretendeu-se avaliar os efeitos nas concentrações de poluentes no Vale do Paraíba decorrentes da presença dos mesmos fatores, a Rodovia Presidente Dutra e vizinhanças urbanizadas e a área de reflorestamento de eucaliptos, por meio de médias horárias calculadas para todo o período simulado. Com relação à concentração de COVs observou-se que a Dutra gerou aumentos na sua concentração durante todo o dia e a noite na região em que está localizada. O efeito isolado do reflorestamento sobre a concentração de COVs no vale também foi positivo durante o dia e a noite. Sobre a RMSP foram observadas reduções nas concentrações de COVs decorrentes da presença de eucaliptos. O efeito combinado destes dois fatores também gerou reduções nas concentrações de COVs restritas a pequenas áreas sobre o centro do VP, onde estão localizadas as áreas urbanas.

Observando as alterações sobre as concentrações de monóxido de nitrogênio, notou-se que durante a noite ocorreram alterações menos intensas provenientes dos efeitos

isolados e conjunto da Dutra e dos eucaliptos, sendo positivas sobre o VP quando estavam presentes os efeitos isolados e negativa quando estes efeitos eram combinados. Sobre a RMSP observaram-se neste mesmo período reduções nas concentrações de NO devido ao efeito isolado da Dutra e dos eucaliptos e incrementos resultantes do efeito combinado. Entre as 09Z e 12Z os efeitos sobre o VP e também sobre a RMSP tornaram-se mais intensos devido à atuação dos fatores isolados e combinados. Durante a tarde, as alterações observadas perderam sua intensidade sobre o VP e também sobre a RMSP. Entre as 18Z e 21Z as alterações tornaram a aumentar, mantendo o mesmo padrão de incrementos devidos aos fatores isolados e reduções devidas à atuação conjunta dos fatores sobre as concentrações de NO no Vale do Paraíba.

As concentrações de NO<sub>2</sub> sofreram aumentos em decorrência da presença isolada da Dutra durante todo o dia e a noite, atingindo seu máximo às 12Z, seguido de um pico menos intenso às 21Z. O efeito isolado dos eucaliptos manteve-se positivo durante o dia e a noite sobre o Vale do Paraíba, enquanto que sobre a RMSP apresentou alterações variáveis entre valores positivos e negativos. A interação entre os dois fatores reduziu as concentrações de NO<sub>2</sub> sobre o VP durante praticamente todo o período avaliado. Sobre a RMSP não foram observadas alterações resultantes da combinação dos fatores.

Como a emissão de NO e NO<sub>2</sub> está associada ao tráfego de veículos, os incrementos observados entre as 09Z e 12Z e entre as 18Z e 21Z podem estar relacionados aos picos de tráfego comuns tanto na RMSP quanto no VP.

Sobre a concentração de ozônio, o efeito isolado da Rodovia Presidente Dutra apresentou contribuições negativas às concentrações entre 00Z e 12Z sobre o Vale do Paraíba. Durante a tarde, este efeito gerou aumentos nas concentrações de O<sub>3</sub> sobre o vale, um pouco a norte da localização da Dutra devido às circulações de SE. Às 21Z, o efeito isolado da Dutra foi suavizado e sua área de atuação deslocou-se para a porção norte do vale. O efeito isolado dos eucaliptos incrementou as concentrações de ozônio a partir das 12Z sobre o VP. Estas alterações sofreram um deslocamento na direção noroeste, resultante de um escoamento de sudeste associado à brisa marítima que avançou na

direção do interior do continente durante a tarde e início da noite. Conseqüentemente, após as 21Z e durante toda a noite, as alterações positivas observadas durante a tarde sobre o VP encontravam-se a noroeste e oeste do VP, dando lugar a alterações negativas sobre o VP. De maneira similar, as alterações positivas sobre as concentrações de  $O_3$  observadas na RMSP às 12Z foram deslocadas para sudoeste da mesma, encontrando-se durante a noite a norte e noroeste da RMSP com aquelas alterações provenientes do VP. Desta forma aponta-se esta região a norte, noroeste e oeste da RMSP como sendo aquela principalmente impactada pelas alterações nas concentrações de ozônio, decorrentes tanto da presença da RMSP quanto do VP. O efeito combinado dos dois fatores contribuiu com aumentos às concentrações de  $O_3$  entre as 21Z e 12Z sobre o VP, enquanto que durante a tarde foi responsável pela redução nas concentrações deste poluente sobre o vale.

Por fim observou-se que os compostos orgânicos voláteis exercem maior controle sobre a formação de ozônio na região do Vale do Paraíba, existindo ali uma atmosfera COVs-limitante. Devido à abundância relativa nas concentrações dos óxidos de nitrogênio, observou-se que pequenos incrementos nas concentrações de COVs geraram aumento mais significativo nas concentrações de  $O_3$  do que devido ao mesmo incremento nas concentrações de  $NO_x$ , ocorrendo inclusive reduções nas concentrações de  $O_3$ . Sendo as florestas de eucaliptos fontes de COVs, conclui-se que o aumento da área reflorestada por esta espécie no VP acarretará no aumento das concentrações de ozônio tanto na região do Vale do Paraíba, quanto a noroeste e oeste deste, onde foi observado incremento nas concentrações deste poluente devido à atuação da brisa marítima.

### **5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A execução deste estudo baseou-se, primeiramente, na validação das simulações com dados observados. Um levantamento de dados secundários de emissões no Vale do Paraíba foi realizado e observou-se a carência de várias informações, como por exemplo, relativas às emissões industriais locais, restritas a apenas seis indústrias do vale. Em

decorrência dos dados incompletos, observaram-se concentrações subestimadas em relação às observações da rede de monitoramento da CETESB. Desta forma, foram necessárias adequações nas concentrações iniciais dos poluentes, que partiram de estimativas. Outra fonte de possível erro foi a comparação das simulações com dados observados de estações na RMSP, uma vez que em São José dos Campos não existem medições de óxidos de nitrogênio. Estas aproximações, embora razoáveis, prejudicam os resultados encontrados.

Quanto aos COVs, estes não são medidos pela rede de monitoramento da CETESB, sendo a escassez não apenas de dados de origem biogênica, mas de origem antropogênica também. Desta forma, este estudo apenas apresentou um caráter exploratório no sentido de avaliar a importância deste precursor na formação do ozônio na região estudada, sendo impossibilitada a validação observacional destes experimentos. Para um estudo mais detalhado seria necessário investir no monitoramento deste poluente na região do Vale do Paraíba.

Ainda com relação à validação do modelo, também para os fluxos de superfície não havia observações no VP, sendo utilizados dados de uma estação localizada a cerca de 250 km de São José dos Campos. Ainda assim, observou-se uma alta correlação entre os dados observados e simulados de fluxo de calor sensível e uma correlação razoável para o fluxo de calor latente.

Com relação aos fatores avaliados nas simulações com inicialização heterogênea, a Rodovia Presidente Dutra e o reflorestamento de eucaliptos, sugere-se que assim como foi considerada uma expansão na área reflorestada também seja adotado um incremento no tráfego da rodovia em questão, representando o aumento natural esperado para o trânsito nesta via nos próximos anos. Outra possibilidade para aprofundar este estudo seria aliar o impacto da Dutra às demais áreas urbanas do Vale do Paraíba, explorando-se a contribuição de todas as áreas urbanas nas concentrações dos poluentes e também nos fluxos de superfície. Outros períodos do ano poderiam ser igualmente considerados, de forma a avaliar este efeito sobre as concentrações de poluentes e fluxos de superfície.



## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Relatório Anual Técnico-Operacional Físico-Financeiro 2006**: Rodovias reguladas pela ANTT –2007. Disponível em: <[http://www.antt.gov.br/relatorios/rodoviario/RelatorioAnual\\_2006.pdf](http://www.antt.gov.br/relatorios/rodoviario/RelatorioAnual_2006.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2008.

ALFONSI, R. R.; SANTOS FILHO, B. G.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; CAMARGO, M. B. P. Balanço de energia em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, n.12, p.1233-1235, 1986.

ALMEIDA, A. C.; SOARES, J. V. Comparação entre uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Sociedade de Investigações Florestais**, v.27, n.2, p.159-170, 2003.

ALVES, A. V.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. “Balanço de energia e refletância de um cultivo de melão”. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.139-146, 1998.

ARACRUZ CELULOSE. **Eucalipto & Meio Ambiente**: em tempos de aquecimento global. 2008. Disponível em <<http://www.aracruz.com.br/eucalipto/pt/index.html>>. Acesso em: 17 jun. 2009.

ÁVILA NETO, J.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SOARES, J. M.; TEIXEIRA, A. H. C. Balanço de energia sobre um cultivo de videira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 11.; REUNIÃO LATINO-AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA, 2., 1999, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, 1999. v.CD-ROM, p.2297-2304.

AVISSAR, R.; LIU, Y. Three-dimensional numerical study of shallow convective clouds and precipitation induced by land-surface forcing. **Journal of Geophysical Research**, New Jersey, v.101(D3), p.7499-7518, 1996.

AVISSAR, R.; SCHMIDT, T. An evaluation of the scale at which ground-surface heat flux patchiness affects the convective boundary layer using large-eddy simulations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.55, p.2666-2689, ago. 1998.

BARNES, S. L. A Technique for Maximizing Details in Numerical Weather Map Analysis". **Journal of Applied Meteorology**, v.3, p.396-409, 1964.

BARROS NETO B.; SCARMINO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2a. Edição. Campinas: Editora da Unicamp, 1995. 299p.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v. 27, p.779-787, jun. 1926.

BRASIL. Resolução CONAMA no 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de áreas de preservação permanente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 mai. 2002.

CABRAL, O.; TATSCH, J.; FREITAS, H.; ROCHA, H.; LIGO, M.; GOMES, E. Fluxos turbulentos em plantação de eucalipto. In: WORKSHOP BRASILEIRO DE MICROMETEOROLOGIA, 5., 2007, Santa Maria, RG. **Anais...** Santa Maria, RG: Universidade Federal de Santa Maria, 2007 (CDROM).

CARTER, W. P. L.; Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds. **Journal of Air and Waste Management Association**, v.44, p.881-899, 1994.

CARTER, W. P. L. **Documentation of the SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment**. Final Report to California Air Resources Board. Contract 92-329 and Contract 95-308. Riverside, California: Air Pollution Research Center and College of Engineering Center for Environmental Research and Technology, University of California. 2000.

CHAMEIDES, W. L.; FEHSENFELD, F.; RODGERS, M. O.; CARDELINO, C., MARTINEZ, J.; PARRISH, D.; LONNEMAN, W.; LAWSON, D. R.; RASMUSSEN, R. A.; ZIMMERMAN, P.; GREENBERG, J.; MIDDLETON, P.; WANG, T. Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v.97(D5), p.6037-6055, 1992.

CHAMEIDES, W. L.; LINDSAY, R. W.; RICHARDSON, J.; KIANG, C. S. The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study. **Science**, v.241, n.4872, p.1473-1475, set. 1988.

CHEN, F.; AVISSAR, R. The impact of land-surface wetness heterogeneity on mesoscale heat fluxes. **Journal of Applied Meteorology**, v.33, p.1323-1340, nov. 1994a.

\_\_\_\_\_. Impact of land-surface moisture variability on local shallow convective cumulus and precipitation in large-scale models. **Journal of Applied Meteorology**, v.33, p.1382-1401, dez. 1994b.

Chen, C.; COTTON, W. R. A one-dimensional simulation of the stratocumulus-capped mixed layer. **Boundary Layer Meteorology**, Fort Collins, v.25, n.3, p.289-3321, mar. 1983.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo**: 2007. São Paulo, Governo do Estado de São Paulo – Secretaria do Meio Ambiente, 2008. 294p.

\_\_\_\_\_. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo**: 2008. São Paulo, Governo do Estado de São Paulo – Secretaria do Meio Ambiente, 2009a. 340p.

\_\_\_\_\_. **Dados históricos**: dados das estações automáticas de monitoramento da CETESB. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar\\_dados\\_historicos.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_dados_historicos.asp)>. Acesso em: 15 set. 2009b.

CUNHA, A. R. **Parâmetros agrometeorológicos de cultura de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em ambientes protegido e campo**. 2001. 128f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.2, p.9-16, 1994.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R. Balanço de energia em cultivo de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n.1, p.1-14, 1996.

DALU, G. A.; PIELKE, R. A.; BALDI, M.; Heat and momentum fluxes induced by thermal inhomogeneities with and without large-scale flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.53, p.3286-3302, nov. 1996.

DAVIDSON, J. Ecological aspects of eucalyptus plantation. **Proceedings Regional Expert Consultation on Eucalyptus**, v.1, p.4-8, out. 1993.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM – Diretoria de Planejamento – Secretaria dos Transportes. **Mapa Rodoviário do Estado de São Paulo: Rodovias Concedidas**, 2004. Disponível em: <<http://www.der.sp.gov.br>>. Acesso em: 29 set. 2008.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. Sistema Nacional de Registro de Veículos. Sistema Nacional de Estatística de Trânsito. Ministério das Cidades. **Frota de Veículos na Região Administrativa do Vale do Paraíba: Informações dos Municípios Paulistas – 2007**. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br/produtos/imp>>. Acesso em: 12 set. 2008.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J.; WILSON, M. F. **Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model**. NCAR Technical Note/TN 275+STR. Boulder: National Center for Atmospheric Research, 1986. 69p.

ELBIR, T. Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey. **Atmospheric Environment**, Turkey, v.37, p.2149-2157, mai. 2003.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Evaluating Ozone Control Programs in the Eastern United States: Focus on the NO<sub>x</sub> Budget Trading Program**, 2004. Disponível em: <[www.epa.gov/airtrends](http://www.epa.gov/airtrends)>. Acesso em 17 nov. 2009.

FOELKEL, C. Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos: aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores. **Eucalyptus Online Book**. 2a. ed., out. 2005.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.3, p.403-410, 1991.

FREITAS, C. U.; PEREIRA, L. A. R. A.; SALDIVA, P. H. N. **Vigilância dos efeitos na saúde decorrentes da poluição atmosférica**: estudo de factibilidade. São Paulo: Secretaria de Estado da Saúde de São Paulo – Departamento de Patologia da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2002, 13p.

FREITAS, E. D. **Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes**. 2003. 156p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

FREITAS, E. D.; MARTINS, L. D.; SILVA DIAS, P. L.; ANDRADE, M. F. A simple photochemical module implemented in RAMS for tropospheric ozone concentration forecast in the metropolitan area of São Paulo, Brazil: Coupling and validation. **Atmospheric Environment**, v.39, n.34, p.6352-6361, nov. 2005.

FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. P.; MARTINS, L. D.; VENDRASCO, E. P.; ITIMURA, M. S.; BRANCO, F.; GOUVÊA, M. L.; CABRAL, F. C. Recent implementations in BRAMS made at University of São Paulo: Some results and validations for an urban area. In: 6th RAMS/BRAMS/OLAM INTERNATIONAL USERS WORKSHOP, 2006, Ubatuba, SP. **Proceedings...** Ubatuba, SP, 2006.

FREITAS, E. D.; ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; SILVA DIAS, P. L. Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil. **Boundary-Layer Meteorology**, v.122, p.43-65, 2007.

FUENTES, J. D.; WANG, D. On the Seasonality of Isoprene Emissions from a Mixed Temperate Forest. **Ecological Applications**, v.9, n.4, p.1118-1131, nov. 1999.

FULTON, D.; GILLESPIE, T.; FUENTES, J.; WANG, D. Volatile organic compound emissions from young black spruce trees. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.90, p.247-255, abr. 1998.

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. **Projeções Populacionais**. Disponível em <[http://www.seade.gov.br/produtos/projpop/index .php](http://www.seade.gov.br/produtos/projpop/index.php)>. Acesso em: 02 set. 2009.

GOOGLE EARTH. Imagem obtida por meio do software Google Earth. **Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO**. 2009.

GUENTHER, A.; HEWITT, C. N.; ERICKSON, D.; FALL, R.; GERON, C.; GRAEDEL, T.; HARLEY, P.; KLINGER, L.; LERDAU, M.; McKAY, W. A.; PIERCE, T.; SCHOLLES, B.; STEINBRECHER, R.; TALLAMRAJU, R.; TAYLOR, J.; ZIMMERMAN, P. "A global model of natural volatile organic compound emissions." **Journal of Geophysical Research**, v.100(D5), p. 8873-8892, 1995.

GUENTHER, A.; ZIMMERMAN, P.; HARLEY, P.; MONSON, R.; FALL, R. Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluation and sensitivity analysis. **Journal of Geophysical Research**, Colorado, v.98(D7), p.12609-12617, 1993.

HARRINGTON, J. Y. The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season arctic stratus. 1997. 239p. Tese (Doutorado) – Colorado State University, Fort Collins, 1997.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO. **Mapa da Região Administrativa de São José dos Campos**. São Paulo: Instituto Geográfico e Cartográfico, 2007. Escala 1:850.000. Disponível em <<http://www.igc.sp.gov.br/>>. Acesso em: 11 set. 2008.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas: 1961-1990**. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 02 jul. 2009.

JACOBSON, M. Z. **Fundamentals of Atmospheric Modeling**. New York: Cambridge University Press, 1999, 656p.

JANSON, R. W. Monoterpene emissions from Scots Pine and Norwegian Spruce. **Journal of Geophysical Research**, Stockholm, v.98(D2), p.2839-2850, 1993.

KHAN, S. M.; SIMPSON, R. W. Effect of a heat island on the meteorology of a complex urban airshed. **Boundary-Layer Meteorology**, v.100, p.487-506, 2001

KRONKA, F. J. N. (Org.). **Inventário Florestal das Áreas Reflorestadas do Estado de São Paulo**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente / Instituto Florestal do Estado de São Paulo, 2002. 184p.

LABORATÓRIO DE METEOROLOGIA APLICADA A SISTEMAS DE TEMPO REGIONAIS (MASTER) – Departamento de Ciências Atmosféricas – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – Universidade de São Paulo. **Imagens de Satélite da América do Sul: Goes-12 IR**. Disponível em: <<http://www.master.iag.usp.br/>>. Acesso em: 27 out. 2009.

LANG, A. R. G.; McMURTRIE, R. E. Total leaf areas of single trees of *Eucalyptus grandis* estimated from transmittances of the sun's beam. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.58, p.79-92, mar. 1992.

LI, B.; AVISSAR, R. The impact of spatial variability of land surface heat fluxes. **Journal of Climate**, New Jersey, v.7, p.527-537, abr. 1994.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B.; LIBARDI, P. L.; SOUZA FILHO, A. P. Comparative evapotranspiration of eucalyptus, pine and natural cerrado vegetation measure by the soil water balance method. **Ipef International**, Piracicaba, v.1, p.5-11, 1990.

LYNN, B.; RIND, D.; AVISSAR, R. The importance of mesoscale circulations generated by subgrid-scale landscape heterogeneities in general circulation models. **Journal of Climate**, New Jersey, v. 8, p.191-205, fev. 1995.

MAHRER, Y.; PIELKE, R. A. A numerical study of the airflow over irregular terrain. **Beiträge zur Physik der Atmosphäre**, v.50, p.98-113, 1977.

MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. **Boundary-Layer Meteorology**, v.94, p.357-397, 2000.

MATSUI, T.; BELTRAN, A. **Image RAMS-GEMTM Coupling**. 2003. 1 ilustração. Disponível em <<http://cires.colorado.edu/science/groups/pielke/gallery/>>. Acesso em: 29 jul. 2009.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **Relação Anual de Informações Sociais: Informações dos Municípios Paulistas – 2006**. Disponível em <<http://www.seade.gov.br/produtos/imp>>. Acesso em: 12 set. 2008.

NUNES, T. V. **Biogenic emissions of non-methane hydrocarbons: Contribution to the evaluation of VOC emission rates by forest ecosystems**. 1996. These (Doutorado) – University of Aveiro, Portugal, 1996.

NUNES, T. V.; PIO, C. A. Emission of volatile organic compounds from Portuguese eucalyptus forests. **Chemosphere – Global Change Science**, v.3, p.239-248, jul. 2001.

OLSON, J. S. **Global ecosystem framework**: definitions. Sioux Falls, SD: USGS EROS Data Center Internal Report, 1994. 37p.

PADHY, P. K.; VARSHNEY, C. K. Emission of volatile organic compounds (VOC) from tropical plant species in India. **Chemosphere**, West Bengal, v.59, p. 1643-1653, jun. 2005a.

\_\_\_\_\_. Isoprene emission from tropical trees species. **Environmental Pollution**, New Delhi, v.135, p.101-109, mai, 2005b.

PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J.; COPELAND, J. H. A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v.49, p.69-91, mar. 1992.

PIELKE, R. A. Sr. **Mesoscale Meteorological Modeling**, 2a. ed. San Diego: Academic Press, 2002 , 676p.

POORE, M. E. D; FRIES, C. The ecological effects of eucalyptus. **F.A.O. Forestry paper**, Rome, v.59, p.87, 1985.

ROCHA, H. R. **Modelagem e observações das relações biosfera - atmosfera na região Sudeste**. 1998. 142p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

ROCHA, H. R.; SILVA DIAS, P. L. The Energy Balance in Central-Northeast Brazil and the Meteorological Systems. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.66, p.101-108, 1994.

ROZOFF, C. M.; COTTON, W. R.; ADEGOKE, J. O. Simulation of St. Louis, Missouri, land use impacts on thunderstorms. **Journal of Applied Meteorology**, v.42, n.6, p.716-738, 2003.

SAILOR, D. J.; LU, L. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. **Atmospheric Environment**, v.38, n.17, p.2737-2748, jan. 2004.

SEINFELD, J. H. **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution**. New York: John Wiley & Sons, 1986, 738p.

SELLERS, P. J.; RANDALL, D. A.; 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**, v.9, p.676-705, 1996.

SILVA, W.; SEDIYAMA, T.; SILVA, A. A.; CARDOSO, A. A. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com braquiária. **Floresta**, Curitiba, v.34, n.3, p.325-335, 2004.

SILVA DIAS, M. A. F.; REGNIER, P. Simulation of mesoscale circulations in a deforested area of Rondônia in dry season. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (Eds). **Amazonian deforestation and climate**, Chichester, England: John Wiley & Sons, p.531-547, 1996.

SILVA DIAS, M. A. F.; RUTLEDGE, S.; KABAT, P.; SILVA DIAS, P. L.; NOBRE, C.; FISCH, G.; DOLMAN, A. J.; ZIPSER, E.; GARSTANG, M; MANZI, A.; FUENTES, J. D.; ROCHA, H.; MARENGO, J.; PLANA-FATTORI, A.; SÁ, L.; ALVALÁ, R.; ANDREAE, M. O.; ARTAXO, P.; GIELOW, R.; GATTI, L. Cloud and rain processes in a biosphere-atmosphere interaction context in the Amazon Region. **Journal of Geophysical Research**, São Paulo, v.107(D20), 8072, doi:10.1029/2001JD000335, set. 2002.

SIMON, V.; LUCHETTA, L.; TORRES, L. Estimating the emission of volatile organic compounds (VOC) from the French forest ecosystem. **Atmospheric Environment**, v.35(S1), p.115-126, 2001.

SIMPSON, D.; GUENTHER, A.; HEWITT, C. N.; STEINBRECHER, R. Biogenic emissions in Europe: 1. Estimates and uncertainties. **Journal of Geophysical Research**, v.100(D11), p.22875-22890, nov. 1995.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. **Área plantada com pinus e eucaliptos no Brasil (ha) em 2000**. 2001. Disponível em <<http://www.sbs.org.br/estatisticas.htm>>. Acesso em: 23 jun. 2009.

STEIN, U.; ALPERT, P. Factor separation in numerical simulations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.50, p.2107-2115, jul. 1993.

TOON, O. B.; ACKERMAN, T. P. Algorithms for the calculation of scattering by stratified spheres. **Applied Optics**, v.20, p.3657-3660, out. 1981.

TOON, O. B.; MCKAY, C. P.; ACKERMAN, T. P.; SANTHANAM, K. Rapid calculation of radiative heating rates and photodissociation rates in inhomogeneous multiple scattering atmospheres. **Journal of Geophysical Research**, California, v.94(D13), p.16287-16301, 1989.

TOON, O. B.; TURCO, R. P.; WESTPHAL, D. A multidimensional model for aerosols: Description of computational analogs. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.45, p.2123-2143, ago. 1988.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **A Cogeração de Energia no Segmento de Papel e Celulose: a Contribuição à Matriz Energética no Brasil**. 2000. 205p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz**. 1973, 78p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1973.

VITAL, M. H. F. Impacto Ambiental de Florestas de Eucalipto. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v.14, n.28, p.235-276, 2007.

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**, v.39, n.6, p.931-944, jun. 2000.

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, P. M.; HARRINGTON, J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme. **Atmospheric Research**, Fort Collins, v.38, p.29-62, set. 1995.

WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J. **ATMET Technical Note**: Modifications for the Transition From LEAF-2 to LEAF-3, Boulder: Atmospheric, Meteorological and Environmental Technologies, 2005. 13p. Disponível em <[www.atmet.com](http://www.atmet.com)>. Acesso em: 11 set. 2009.

WANG, J.; BRAS, R.; ELTAHIR, B. A stochastic linear theory of mesoscale circulation induced by the thermal heterogeneity on the land surface. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 53, p.3349-3366, nov. 1996.

WANG, J.; BRAS, R.; ELTAHIR, A. Numerical simulation of nonlinear mesoscale circulations induced by the thermal heterogeneities of land surface. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.55, p.447-464, fev. 1998.

WANG, J.; BRAS, R.; ELTAHIR, A. The impact of observed deforestation on the mesoscale distribution of rainfall and clouds in Amazonia. **Journal of Hydrometeorology**, Cambridge, v.1, p.267-286, jun. 2000.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v.11, p.41-76, jan. 1947.

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**, California, v.96, p.22379-22400, dez. 1991.

WESTPHAL, D. L.; TOON, O. B.; CARLSON, T. N. A case study of mobilization and transport of Saharan Dust. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.45, p.2145-2175, ago. 1988.

WETZEL, P.; ARGENTINI, S.; BOONE, A. Role of land surface in controlling daytime cloud amount: Two case studies in the GCIP-SW area. **Journal of Geophysical Research**, Maryland, v.101(D3), p.7359-7370, 1996.

ZHANG, H.; HENDERSON-SELLERS, A.; MCGUFFIE, K. Impacts of tropical deforestation. Part I: Process analysis of local climatic change. **Journal of Climate**, Sydney, v.9, p.1497-1517, jul. 1996.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)