

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

VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO

O IMPACTO DAS MEGACIDADES SOBRE A QUALIDADE DO AR: OS CASOS DAS
REGIÕES METROPOLITANAS DE SÃO PAULO E DO RIO DE JANEIRO

SÃO PAULO
OUTUBRO DE 2010

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

VANESSA SILVEIRA BARRETO CARVALHO

O IMPACTO DAS MEGACIDADES SOBRE A QUALIDADE DO AR: OS CASOS DAS
REGIÕES METROPOLITANAS DE SÃO PAULO E DO RIO DE JANEIRO

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

Área de Concentração: Meteorologia.
Orientador: Prof. Dr. Edmilson Dias de Freitas
Co-Orientadora: Profa.Dra. Maria de Fatima Andrade

SÃO PAULO
OUTUBRO DE 2010

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Edmilson Dias de Freitas por toda amizade, incentivo, confiança e oportunidades concedidas durante a execução deste projeto.

Aos professores Maria de Fátima Andrade, Adalgiza Fornaro, Márcia Akemi Yamasoe e Pedro Leite da Silva Dias pela colaboração e pelas sugestões dadas em diversas etapas deste trabalho.

À Dr^a. Leila Droprinchinski Martins pelas importantes sugestões e contribuições.

Ao pessoal do Laboratório MASTER pela constante colaboração.

À FAPESP pelo financiamento deste projeto.

Ao INEA e à CETESB por disponibilizar os dados necessários para a realização deste trabalho.

Aos queridos amigos Patricia V. Waldheim, Rafael Moreira M. Araújo, Rodrigo Mello, Osvaldo B. Senoni e, em especial, a Caroline R. Mazzoli por todo apoio, amizade e incentivo durante os últimos anos.

Aos amigos do IAG Taciana Toledo, Karin Koop, Mônica Queiroz, Débora Brum, Diego Fernandes, Ivan Saraiva, Angélica Durigon, Ricardo Hallak, Ana Carolina Nóbile, entre tantos outros, pelo carinho e amizade.

Aos novos colegas e amigos da UNIFEI pelo grande incentivo nos últimos meses.

À minha família, em especial, à minha mãe pelo constante apoio e incentivo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS	xvii
RESUMO.....	xix
ABSTRACT	xxi
1. Introdução.....	23
1.1. O ozônio troposférico: Formação, Consumo e Relação com a Meteorologia.....	27
1.2. A Modelagem de Oxidantes Fotoquímicos.....	35
1.3. Objetivos e enfoque do trabalho	41
2. Caracterização das Áreas de Estudo	43
2.1. Aspectos geoeconômicos	43
2.2. Caracterização Climática	46
2.3. Emissões Atmosféricas.....	49
2.3.1. Fontes Móveis.....	50
2.3.2. Fontes Fixas	52
2.4. O Monitoramento da Qualidade do Ar e o Ozônio Troposférico	53
3. O modelo BRAMS	59
3.1. Aspectos Gerais	59
3.2. Parametrizações Físicas.....	61
3.2.1. Radiação	61
3.2.2. Cumulus e Microfísica	61
3.2.3. Turbulência	62
3.2.4. Superfície vegetada e urbana	63
3.3. O Módulo Fotoquímico Simplificado	64
4. Metodologia	67
4.1. Períodos de Estudo	67
4.1.1. Região Metropolitana de São Paulo.....	67
4.1.2. Região Metropolitana do Rio de Janeiro	70
4.2. Configuração do Modelo.....	72
4.2.1. Módulo de Emissão	74
4.3. Métodos para Verificação e Análise dos Resultados	77
5. Resultados das Simulações realizadas para a RMSP	81
5.1. Testes de Sensibilidade.....	81
5.1.1. Resolução espacial horizontal	81
5.1.2. Parametrização de Radiação.....	88

5.1.3. Parametrização para Superfícies Urbanas (TEB)	93
5.1.4. Parametrização de Turbulência	100
5.1.5. Parametrização de cumulus.....	104
5.1.6. Dados para inicialização do modelo.....	107
5.1.7. Resumo dos resultados obtidos com os testes de sensibilidade	114
5.2. Avaliação dos Episódios de Concentração de Ozônio	116
5.2.1. Entre 24 de fevereiro e 05 de março de 2003	116
5.2.1.1. Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar.....	116
5.2.2.2. Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados medidos pela CETESB	124
5.2.2. Entre 01 e 10 de setembro de 2004.....	135
5.2.2.1. Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar.....	135
5.2.2.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados medidos pela CETESB	141
5.2.3. Entre 16 e 25 de fevereiro de 2005.....	151
5.2.3.1 Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar.....	151
5.2.3.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados medidos pela CETESB	157
5.2.4. Entre 07 e 17 de janeiro de 2006.....	166
5.2.4.1 Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar.....	166
5.2.4.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados medidos pela CETESB	170
6. Resultados das simulações realizadas para a RMRJ	181
6.1. Período entre 30 de outubro e 01 de novembro de 2006.....	181
6.1.1. Impacto de fontes fixas e móveis nas concentrações de poluentes	181
6.1.2. Avaliação dos resultados da simulação considerando todas as fontes inventariadas na RMRJ	185
6.1.2.1 Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar.....	185
6.1.2.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados monitorados na região	188
6.2. Avaliação dos episódios de concentração de ozônio	193
6.2.1. Período entre 01 e 10 de setembro de 2004	193
6.2.1.1. Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar.....	193
6.2.1.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados monitorados na região	201
6.2.2. Período entre 05 e 13 de março de 2007	205
6.2.2.2 Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar.....	205

6.2.1.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados monitorados na região	211
7. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	217
7.1. Sugestões para trabalhos futuros	220
8. Referências Bibliográficas	223

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Esquema dos processos fotoquímicos relacionados com o ozônio na estratosfera e na troposfera. Adaptado a partir de EPA, 2006.....	28
Figura 1-2: Isopletas de ozônio (Fonte: SEINFELD, 1986).	32
Figura 1-3: Esquema de Modelagem da Qualidade do Ar. Adaptado de SEINFELD (1986).	36
Figura 2-1: Visão tridimensional da RMSP, Serra da Mantiqueira, Serra do Mar e parte do litoral Paulista (Fonte: FREITAS, 2003).	44
Figura 2-2: Bacias Aéreas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Fonte: FEEMA, 2004).	45
Figura 2-3: Médias climatológicas de (a) precipitação (mm/mês), (b) temperatura do ar (°C), (c) pressão atmosférica (hPa), (d) umidade relativa (%), (e) duração do brilho solar (horas) e (f) nebulosidade (0-10) para as estações climatológicas do INMET: São Paulo e Rio de Janeiro.	48
Figura 2-4: Distribuição espacial das estações de monitoramento da CETESB na RMSP (Fonte: CETESB, 2008).....	53
Figura 2-5: Distribuição espacial das estações de monitoramento contínuo e intermitente na RMRJ. Fonte: Carvalho, 2006.	54
Figura 2-6: Número de dias com ultrapassagens do PNQA estabelecido para o ozônio, por mês, registrados entre 1999 e 2008, na RMSP (Fonte: CETESB, 2009).	57
Figura 2-7: Número de dias com ultrapassagens do PNQA estabelecido para o ozônio, por mês, registrados entre 2004 e 2008, na RMRJ.	57
Figura 4-1: Distribuição espacial dos tipos urbanos 1 (no centro da região, em rosa) e 2 (em vermelho) na RMSP.	75
Figura 4-2: Distribuição espacial das emissões (a) de SO ₂ emitido por fontes industriais, em 1000 toneladas por ano, e (b) de CO emitido por veículos automotores, em toneladas por ano, considerada pelo modelo SPM-BRAMS na RMRJ.....	76
Figura 4-3: Ciclo diurno médio das concentrações de CO, em ppm, registradas (a) na RMSP (entre 1996 e 2006) e (b) na RMRJ (entre 2000 e 2008).	77
Figura 5-1: Distribuição espacial das concentrações de ozônio, em µg.m ⁻³ , produzidas pelo modelo SPM-BRAMS nas simulações (a) controle (grade com resolução espacial de 5 km); (b) 4 km e (c) 2 km para o dia 30/10/2006 às 18 Z.....	82
Figura 5-2: Distribuição espacial das concentrações de ozônio, em µg.m ⁻³ , produzidas pelo modelo SPM-BRAMS nas simulações (a) controle (grade com resolução espacial de 5 km); (b) 4 km e (c) 2 km para o dia 31/10/2006 às 18 Z.....	83

Figura 5-3: Distribuição espacial das concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas pelo modelo SPM-BRAMS nas simulações (a) controle (grade com resolução espacial de 5 km); (b) 4 km e (c) 2 km para o dia 01/11/2006 às 17 Z (a) e 14 Z (b e c).	84
Figura 5-4: Diferenças entre os resultados de temperatura do ar, em $^{\circ}\text{C}$, gerados pelas simulações controle e MP77 no dia 30/10/2006 às 07 Z.....	88
Figura 5-5: Diferenças entre os resultados de temperatura do ar, em $^{\circ}\text{C}$, gerados pelas simulações controle e H97 no dia 01/11/2006 às 11 Z.....	89
Figura 5-6: Diferenças entre a incidência de radiação de onda curta, em W.m^{-2} , referente às simulações controle e MP77 no dia 30/10/2006 às 11 Z.....	89
Figura 5-7: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, referente às simulações controle e MP77 no dia 31/10/2006 às 15 Z.....	90
Figura 5-8: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e H97 no dia 30/10/2006 às (a) 07 Z e (b) 15 Z.....	91
Figura 5-9: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e H97 no dia 31/10/2006 às 16 Z.....	91
Figura 5-10: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) registradas pela rede de monitoramento da CETESB e as simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para as estações (a) Ibirapuera, (b) Parque Dom Pedro II e (c) Santana.	92
Figura 5-11: Comparação entre os valores de (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e (b) umidade relativa do ar (%) registrados pela rede de monitoramento da CETESB na Estação Ibirapuera e as simuladas pelo modelo SPM-BRAMS.....	93
Figura 5-12: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações considerando a simulação controle e TEB-off no dia 30/10/2006 às 11 Z.	94
Figura 5-13: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações considerando a simulação controle e TEB-off no dia 31/10/2006 às 10 Z.	94
Figura 5-14: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e TEB-off no dia 30/10/2006 às (a) 19 Z e (b) 21 Z.....	95
Figura 5-15: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e TEB-off no dia 31/10/2006 às 17 Z.	95
Figura 5-16: Comparação entre os valores de (a) concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$), (b) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e (c) umidade relativa do ar (%) registrados pela rede de monitoramento da CETESB na Estação Ibirapuera e as simuladas pelo modelo SPM-BRAMS.....	96
Figura 5-17: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e MY82 no dia 31/10/2006 às 17 Z.....	101

Figura 5-18: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e MY82 no dia 01/11/2006 às (a) 12 Z e (b) 16 Z.	101
Figura 5-19: Diferenças entre os resultados de umidade relativa, em %, gerados pelas simulações considerando a simulação controle e MY82 no dia 31/10/2006 às 20 Z. ...	102
Figura 5-20: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e considerando a parametrização baseada em Grell (1993) no dia 01/11/2006 às (a) 17 Z e (b) 21 Z.	105
Figura 5-21: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações controle e considerando a parametrização baseada em Grell (1993) no dia 01/11/2006 às 21 Z.	105
Figura 5-22: Diferenças entre os resultados de fração de céu claro gerados pelas simulações controle e considerando a parametrização baseada em Grell (1993) nos dias (a) 30/10/2006 08 Z, (b) 31/10/2006 09 Z e (c) 01/11/2006 10 Z.	106
Figura 5-23: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações controle e considerando a parametrização baseada em Souza & Da Silva (2003) desativada no dia 30/10/2006 às 11 Z.	107
Figura 5-24: Diferenças entre os resultados de concentração de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, gerados pelas simulações controle e downscaling (a) no dia 30/10/2006 às 05 Z e (b) no dia 31/10/2006 às 03 Z.	108
Figura 5-25: Diferenças entre os resultados de concentração de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, gerados pelas simulações controle e downscaling no dia 30/10/2006 às (a) 12 Z e (b) 17 Z.	109
Figura 5-26: Diferenças entre os resultados de concentração de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, gerados pelas simulações controle e downscaling (a) no dia 31/10/2006 às 14 Z e (b) no dia 01/11/2006 às 12 Z.	109
Figura 5-27: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações controle e downscaling no dia 30/10/2006 às 14 Z.	110
Figura 5-28: Comparação entre os valores de concentração de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, obtidos através das simulações controle e downscaling e registrados pela rede de monitoramento da CETESB.	111
Figura 5-29: Comparação entre os valores de (a) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e (b) umidade relativa do ar (%) registrados pela rede de monitoramento da CETESB na Estação Ibirapuera e as simuladas pelo modelo SPM-BRAMS.	112
Figura 5-30: Fração de cobertura de nuvens (contornos) e precipitação (sombreado), em mm/hora, simuladas pelo modelo BRAMS para os dias (a) 03/03/2003 às 20 Z e (b) 04/03/2003 às 16 Z.	116

Figura 5-31: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 24 de fevereiro (a) 12 Z, (b) 14 Z, (c) 16 Z e (d) 18 Z.	118
Figura 5-32: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 24 de fevereiro (a) 11 Z e (b) 21 Z.....	119
Figura 5-33: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente aos dias (a) 25 de fevereiro às 18 Z e (b) 27 de fevereiro às 14 Z.	119
Figura 5-34: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente aos dias (a) 28 de fevereiro às 17 Z e (b) 01 de março às 17 Z.	120
Figura 5-35: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente aos dias (a) 28 de fevereiro às 10 Z e (b) 01 de março às 10 Z.	120
Figura 5-36: Altura da CLP (m) referente aos dias (a) 28 de fevereiro às 06 Z e (b) 01 de março às 06 Z.....	121
Figura 5-37: Campo de Vento e de razão de mistura (g/kg) referente ao dia 28 de fevereiro às 23 Z.	121
Figura 5-38: Campo de Vento e Concentração de (a) ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) e (b) NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 04 de março as 19 e 20 Z, respectivamente.	122
Figura 5-39: Campo de precipitação (mm/hora) e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 04 de março às (a)16 Z e (b) 20 Z.....	123
Figura 5-40: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	125
Figura 5-41: Comparação entre as concentrações de NO ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	127
Figura 5-42: Comparação entre as concentrações de NO_2 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	128
Figura 5-43: Comparação entre as concentrações de CO (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	130
Figura 5-44: Comparação entre a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.....	132
Figura 5-45: Comparação entre a umidade relativa do ar (%) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.....	133
Figura 5-46: Frequência de entrada de frentes frias no mês de Setembro de 2004. (Fonte: CPTEC, 2004)	135

Figura 5-47: Campos de vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 01 de setembro de 2004 às (a) 11 Z e (b) 14 Z.	136
Figura 5-48: Cobertura de Nuvens e de Radiação incidente de onda curta (Wm^{-2}) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às 12 Z.....	137
Figura 5-49: Campos de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às (a) 20 Z e (b) 23 Z e ao dia 03 de setembro às (c) 02 Z; (d) 05 Z; (e) 08 Z; e (f) 11 Z.....	137
Figura 5-50: Campos de Vento e Concentração de O_3 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia (a) 05 de setembro de 2004 às 18 Z; (b) 06 de setembro às 15 Z; (c) 07 de setembro às 17 Z; (d) 08 de setembro às 16 Z; (e) 09 de setembro às 15 Z; e (f) 10 de setembro às 18 Z...	140
Figura 5-51: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	142
Figura 5-52: Comparação entre as concentrações de NO ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	144
Figura 5-53: Comparação entre as concentrações de NO_2 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	145
Figura 5-54: Comparação entre as concentrações de CO (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	146
Figura 5-55: Comparação entre a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.....	148
Figura 5-56: Comparação entre a umidade relativa do ar (%) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.....	149
Figura 5-57: Frequência de entrada de frentes frias no mês de Fevereiro de 2005. (Fonte: CPTEC, 2005)	152
Figura 5-58: Campos de Vento referente ao dia 16 de fevereiro de 2005 e de (a) Concentração de O_3 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) às 18 Z; (b) Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) às 10 Z.	153
Figura 5-59: Campos de Vento e Concentração de O_3 ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 17 de fevereiro de 2005 às (a) 18 Z e (b) 20 Z.	153
Figura 5-60: Campos de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 17 de fevereiro de 2005 às (a) 09 Z e (b) 10 Z.	154
Figura 5-61: Campos de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 18 de fevereiro de 2005 às (a) 20 Z e (b) 23 Z.	154

Figura 5-62: Campos de Vento e Concentração de O ₃ (µg.m ⁻³) referente ao dia 22 de fevereiro de 2005 às (a) 16 Z e (b) 17 Z.	155
Figura 5-63: (a) Campos de Vento e Concentração de O ₃ (µg.m ⁻³) e (b) Altura da CLP (m) referente ao dia 24 de fevereiro de 2005 às 18 Z.	156
Figura 5-64: (a) Campos de Vento e Concentração de O ₃ (µg.m ⁻³) e (b) Razão NO ₂ /NO referente ao dia 25 de fevereiro de 2005 às 16 Z.	157
Figura 5-65: Comparação entre as concentrações de ozônio (µg.m ⁻³) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	159
Figura 5-66: Comparação entre as concentrações de monóxido de nitrogênio (µg.m ⁻³) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	161
Figura 5-67: Comparação entre as concentrações de dióxido de nitrogênio (µg.m ⁻³) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	161
Figura 5-68: Comparação entre as concentrações de monóxido de carbono (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	162
Figura 5-69: Comparação entre a temperatura do ar (°C) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	164
Figura 5-70: Comparação entre a umidade relativa do ar (%) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	165
Figura 5-71: Campos de Vento e Concentração de Ozônio (µg.m ⁻³) referente aos dias (a) 07 de janeiro de 2006 às 20 Z; (b) 08 de janeiro de 2006 às 14 Z; (c) 09 de janeiro de 2006 às 17 Z; (d) 10 de janeiro de 2006 às 18 Z.	168
Figura 5-72: Campos de Vento e Concentração de NO _x (µg.m ⁻³) referente ao dia 09 de janeiro de 2006 às (a) 10 Z, (b) 14 Z, (c) 18 Z e (d) 22 Z.	168
Figura 5-73: Campos de Vento e Concentração de NO _x (µg.m ⁻³) referente ao dia 10 de janeiro de 2006 às (a) 02 Z, (b) 06 Z e (c) 10 Z.	169
Figura 5-74: Campos de Vento e Concentração de Ozônio (µg.m ⁻³) referente ao dia 11 de janeiro de 2006 às (a) 14 Z e (b) 19 Z.	170
Figura 5-75: Comparação entre as concentrações de ozônio (µg.m ⁻³) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	171
Figura 5-76: Comparação entre as concentrações de monóxido de nitrogênio (µg.m ⁻³) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	173

Figura 5-77: Comparação entre as concentrações de dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.....	174
Figura 5-78: Comparação entre as concentrações de monóxido de carbono (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.	175
Figura 5-79: Comparação entre a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.....	177
Figura 5-80: Comparação entre a umidade relativa do ar ($^{\circ}\text{C}$) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.....	178
Figura 6-1: Concentrações de Monóxido de Carbono (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para o dia 31 de outubro de 2006 (a) às 08 Z (considerando apenas emissões industriais) e (b) às 19 Z (considerando apenas emissões veiculares).	182
Figura 6-2: Concentrações de Monóxido de Nitrogênio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para o dia 30 de outubro de 2006 (a) às 10 Z (considerando apenas emissões industriais) e (b) às 21 Z (considerando apenas emissões veiculares).	183
Figura 6-3: Concentrações (a) de Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para o dia 31 de outubro de 2006 às 10 Z e (b) de Material Particulado fino ($\mu\text{g.m}^{-3}$) para o dia 01 de novembro de 2006 às 05 Z (ambas considerando apenas emissões industriais).	184
Figura 6-4: Concentrações de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para o dia 30 de outubro de 2006 (a) às 14 Z (considerando apenas emissões industriais) e (b) às 16 Z (considerando apenas emissões veiculares).....	185
Figura 6-5: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 30 de outubro de 2006 às 10 Z.....	186
Figura 6-6: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 30 de outubro de 2006 às (a) 14 Z; e (b) 18 Z.	187
Figura 6-7: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 31 de outubro de 2006 às (a) 17 Z; e (b) 20 Z.	187
Figura 6-8: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 01 de novembro de 2006 às 15 Z.	188
Figura 6-9: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações realizadas pela rede de monitoramento do INEA na RMRJ.	189
Figura 6-10: Comparação entre os valores de temperatura do ar simulados pelo modelo BRAMS e observações realizadas na RMRJ.	191

Figura 6-11: Comparação entre os valores de umidade relativa do ar simulada pelo modelo BRAMS e obtidos das observações realizadas na RMRJ.....	192
Figura 6-12: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 01 de setembro de 2004 às (a) 18 Z; (b) 20 Z; (c) 22 Z.....	194
Figura 6-13: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às (a) 00 Z e (b) 02 Z.....	194
Figura 6-14: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 01 de setembro de 2004 às (a) 14 Z; (b) 16 Z; (c) 18 Z e (d) 20 Z.....	195
Figura 6-15: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às (a) 10 Z e (b) 11 Z.....	196
Figura 6-16: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às (a) 20 Z e (b) 22 Z.....	196
Figura 6-17: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 03 de setembro de 2004 às (a) 00 Z; (b) 02 Z; (c) 04 Z e (d) 06 Z.....	197
Figura 6-18: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às 18 Z.....	197
Figura 6-19: (a) Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) e (b) Razão NO_2/NO referente ao dia 03 de setembro de 2004 às 15 Z.....	198
Figura 6-20: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 04 de setembro de 2004 às 14 Z.....	198
Figura 6-21: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 05 de setembro de 2004 às (a) 14 Z; (b) 16 Z; (c) 18 Z e (d) 20 Z.....	199
Figura 6-22: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 06 de setembro de 2004 às 16 Z.....	199
Figura 6-23: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia (a) 07 de setembro de 2004 às 15 Z e (b) 08 de setembro de 2004 às 15 Z.....	200
Figura 6-24: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 10 de setembro de 2004 às 17 Z.....	200
Figura 6-25: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações realizadas pela rede de monitoramento do INEA na RMRJ.....	201
Figura 6-26: Comparação entre os valores de temperatura do ar simulados pelo modelo BRAMS e observações realizadas na RMRJ.....	203
Figura 6-27: Comparação entre os valores de umidade relativa do ar simulados pelo modelo BRAMS e observações realizadas na RMRJ.....	204
Figura 6-28: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 05 de março de 2007 às (a) 15 Z; e (b) 17 Z.....	206

Figura 6-29: Razão entre as concentrações de NO ₂ e de NO calculadas para o dia 05 de março de 2007 às (a) 12 Z; e (b) 15 Z.	207
Figura 6-30: Campo de Vento e Concentração de Ozônio (µg.m ⁻³) referente ao dia 06 de março de 2007 às (a) 13 Z; (b) 15 Z; (c)17 Z; (d) 19 Z; e (e) 21 Z.....	207
Figura 6-31: (a) Campo de Vento e Concentração de Ozônio (µg.m ⁻³) e (b) razão NO ₂ /NO referente ao dia 08 de março de 2007 às 14 Z.	208
Figura 6-32: Razão das concentrações de NO ₂ e de NO referente ao dia 09 de março de 2007 (a) 13 Z e (b) 15 Z.....	209
Figura 6-33: Campo de Vento e Concentração de Ozônio (µg.m ⁻³) referente ao dia 10 de março de 2007 às (a) 14 Z; (b) 16 Z; (c)18 Z; e (d) 20 Z.....	210
Figura 6-34: Razão das concentrações de NO ₂ e de NO referente ao dia 10 de março de 2007 23 Z.	210
Figura 6-35: Campo de Vento e Concentração de Ozônio (µg.m ⁻³) referente ao dia 13 de março de 2007 às 17 Z.....	211
Figura 6-36: Campo de Vento e Concentração de NO _x (µg.m ⁻³) referente ao dia 13 de março de 2007 às (a) 10 Z e (b) 23 Z.	211
Figura 6-37: Comparação entre as concentrações de ozônio (µg.m ⁻³) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações realizadas pela rede de monitoramento do INEA na RMRJ.	213
Figura 6-38: Comparação entre os valores de temperatura do ar, temperatura da rua e temperatura do canyon simulados pelo modelo BRAMS e observações realizadas na RMRJ.	215

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1: Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (PNQA) estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90.....	24
Tabela 1-2: Valores propostos pela OMS como referência para os padrões de qualidade do ar.....	25
Tabela 2-1: Contribuição percentual da emissão veicular de CO, HC, NO _x , SO _x e MP na RMSP e na RMRJ.	50
Tabela 2-2: Taxas de emissão veicular (x 1000 ton/ano) de CO, HC, NO _x , SO _x e MP na RMSP e RMRJ.	51
Tabela 2-3: Composição da frota veicular de acordo com o tipo de combustível utilizado na RMSP e na RMRJ.	51
Tabela 2-4: Contribuição percentual da emissão industrial de CO, HC, NO _x , SO _x e MP na RMSP e na RMRJ.	52
Tabela 2-5: Taxas de emissão industrial (x 1000 ton/ano) de CO, HC, NO _x , SO _x e MP na RMSP e RMRJ.	52
Tabela 2-6: Número de dias com concentrações de ozônio superiores ao determinado pelo PNQA registrados no período entre 1999 e 2008 na RMSP.	55
Tabela 2-7: Número de dias com concentrações de ozônio superiores ao determinado pelo PNQA registrados no período entre 2004 e 2008 na RMRJ.....	56
Tabela 3-1: Reações utilizadas no modelo SPM-BRAMS.....	65
Tabela 4-1: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMSP para o período entre 24 de fevereiro e 05 de março de 2003.	68
Tabela 4-2: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMSP para o período entre 01 e 10 de setembro de 2004.	68
Tabela 4-3: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMSP para o período entre 16 e 25 de fevereiro de 2005.....	69
Tabela 4-4: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMSP para o período entre 07 e 17 de janeiro de 2006.	69
Tabela 4-5: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMRJ para o período entre 01 e 10 de setembro de 2004.	72

Tabela 4-6: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMRJ para o período entre 05 e 13 de março de 2007.	72
Tabela 5-1: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle, 4 km e 2 km no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	86
Tabela 5-2: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle, 4 km e 2 km no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	87
Tabela 5-3: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa do ar (%) disponíveis e com os resultados das simulações Controle, 4 km e 2 km no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	87
Tabela 5-4: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e TEB-Off no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	99
Tabela 5-5: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e TEB-Off no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	99
Tabela 5-6: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa (%) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e TEB-Off no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	100
Tabela 5-7: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e MY82 no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	103
Tabela 5-8: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e MY82 no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	103
Tabela 5-9: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa (%) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e MY82 no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	104
Tabela 5-10: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e Downscaling no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	113
Tabela 5-11: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e Downscaling no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.	113

Tabela 5-12: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa (%) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e Downscaling no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.....	114
Tabela 5-13: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis no período de 24 de fevereiro a 05 de março de 2003.....	131
Tabela 5-14: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis no período de 24 de fevereiro a 05 de março de 2003.	134
Tabela 5-15: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa do ar (%) disponíveis no período de 24 de fevereiro a 05 de março de 2003.	134
Tabela 5-16: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis no período de 01 a 10 de setembro de 2004.	147
Tabela 5-17: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis no período de 01 a 10 de setembro de 2004. .	150
Tabela 5-18: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa do ar ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis no período de 01 a 10 de setembro de 2004.	150
Tabela 5-19: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis no período de 16 a 25 de fevereiro de 2005.	163
Tabela 5-20: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis no período de 16 a 25 de fevereiro de 2005. ...	166
Tabela 5-21: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa do ar ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis no período de 16 a 25 de fevereiro de 2005.	166
Tabela 5-22: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados disponíveis no período de 07 a 17 de janeiro de 2006.....	176
Tabela 5-23: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados disponíveis no período de 07 a 18 de janeiro de 2006.....	179
Tabela 5-24: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados disponíveis no período de 07 a 18 de janeiro de 2006.....	179
Tabela 6-1: Índices estatísticos calculados para todas as estações do INEA com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.....	190

Tabela 6-2: Índices estatísticos calculados com dados de temperatura do ar (°C) observados na RMRJ no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.....	193
Tabela 6-3: Índices estatísticos calculados com dados de umidade relativa do ar (°C) observados na RMRJ no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.....	193
Tabela 6-4: Índices estatísticos calculados para todas as estações do INEA com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis no período de 01 a 10 de setembro de 2004.	203
Tabela 6-5: Índices estatísticos calculados com dados de temperatura do ar (°C) observados na RMRJ no período de 01 a 10 de setembro de 2004.....	205
Tabela 6-6: Índices estatísticos calculados com dados de umidade relativa do ar (%) observados na RMRJ no período de 01 a 10 de setembro de 2004.	205
Tabela 6-7: Índices estatísticos calculados para todas as estações do INEA com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis no período de 05 a 13 de março de 2007.	214
Tabela 6-8: Índices estatísticos calculados com dados de temperatura do ar (°C) observados na RMRJ e os dados de temperatura, temperatura da rua (TR) e temperatura do canyon (TC) simulados pelo modelo BRAMS para o período de 05 a 13 de março de 2007.	216

LISTA DE ABREVIATURAS

BRAMS	<i>Brazilian Regional Atmospheric Modeling System.</i>
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego.
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
CIT	<i>California Institute of Technology.</i>
CLP	Camada Limite Planetária.
CO	Monóxido de Carbono.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
COV	Compostos Orgânicos Voláteis.
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos.
CSU	<i>Colorado State University.</i>
EUA	Estados Unidos da América.
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente.
GFS	<i>Global Forecast System.</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System.</i>
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas.
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
IGBP	<i>International Geosphere Biosphere Programme.</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
ISAN	<i>ISentropic ANalysis package.</i>
LEAF-2	<i>Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model – 2.</i>
MASTER	Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais
METAR	<i>METEorological Aerodrome Report</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction.</i>
NO	Monóxido de Nitrogênio.
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio.
NO _x	Óxidos de Nitrogênio.
O ₃	Ozônio.
OMS	Organização Mundial de Saúde.
PM ₁₀	Material Particulado Inalável.
PNQA	Padrões Nacionais de Qualidade do Ar.
PRONAR	Programa Nacional de Qualidade do Ar.
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores.
PTS	Partículas Totais em Suspensão.
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro.
RMSE	<i>Root Mean Squared Error.</i>

RMSP	Região Metropolitana de São Paulo.
SAPRC	<i>Statewide Air Pollution Research Center.</i>
SO ₂	Dióxido de Enxofre.
SPM	<i>Simple Photochemical Module.</i>
TEB	<i>Town Energy Budget.</i>
USP	Universidade de São Paulo.

RESUMO

CARVALHO, V. S. B. **O impacto das megacidades sobre a qualidade do ar: os casos das regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro.** 234 f. Tese de Doutorado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

O objetivo principal deste projeto foi avaliar a distribuição das concentrações de ozônio troposférico e o impacto das mesmas sobre a qualidade do ar em duas das maiores áreas urbanas do país: a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). O estudo utilizou um modelo numérico de mesoescala, o *Brazilian Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS), acoplado a um módulo fotoquímico simplificado (SPM). O impacto das diferentes características da topografia, das circulações atmosféricas locais e das emissões sobre o processo de dispersão de poluentes foi avaliado. Para a correta representação das emissões veiculares, foram construídos arquivos de emissões para toda a América do Sul baseados na identificação de áreas urbanas e nas emissões totais disponíveis para São Paulo. A introdução de fontes fixas, baseada em informações dos órgãos ambientais das duas regiões metropolitanas, também foi incluída no modelo. No caso da área referente à RMRJ, estas informações foram substituídas pelos dados provenientes do inventário de emissões. Os resultados obtidos mostraram que esse aspecto trouxe melhorias significativas para as simulações com o modelo numérico. Foram realizados testes de sensibilidade com o modelo, para a RMSP, com o intuito de avaliar o impacto de diferentes parametrizações na formação de ozônio e sobre algumas variáveis meteorológicas. As diferenças mais significativas verificadas na distribuição espacial das concentrações de O_3 simuladas pelo modelo foram identificadas quando consideradas variações no espaçamento horizontal das células de grade, a utilização de condições iniciais e de fronteira com maior resolução espacial para inicialização do modelo, além de alterações na parametrização de radiação. Os resultados obtidos em simulações considerando diferentes opções nas parametrizações de turbulência, áreas urbanas e cumulus produziram impactos mais significativos nas variáveis meteorológicas. Para avaliar os fatores que levam à ocorrência de violações ao padrão de qualidade do ar estabelecido para o ozônio pela legislação em vigor no Brasil, foram selecionados alguns períodos através da avaliação de dados de monitoramento registrados em ambas as regiões consideradas. Em geral, durante esses períodos, foram verificadas predominância de condições de céu-claro, altos valores de temperatura do ar e a ocorrência de ventos fracos durante a madrugada e parte da manhã. Em ambas as regiões metropolitanas, mas principalmente para a RMSP, ficou nítida a forte influência da brisa marítima no transporte de precursores e do próprio ozônio. No caso da RMRJ, a topografia também exerce forte

influência sobre os processos de dispersão na região. Em ambas as regiões, as emissões veiculares mostraram-se mais significativas para a ocorrência de altos valores de concentração de ozônio. A comparação dos valores de concentração de ozônio simulados pelo modelo SPM-BRAMS e os observados pela rede de monitoramento da CETESB apresentou resultados satisfatórios na maioria dos períodos simulados, principalmente, sobre a RMSP. Vale ressaltar que a pequena quantidade de estações de monitoramento da qualidade do ar em operação na RMRJ dificultou a avaliação dos resultados para a região.

Palavras-Chave: Poluição Atmosférica, RMSP, RMRJ, BRAMS

ABSTRACT

CARVALHO, V. S. B. **The impact of megacities on air quality: The cases of São Paulo and Rio de Janeiro Metropolitan Areas.** 234 f. PhD Thesis – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2010.

The main goal of this project was to evaluate the distribution of tropospheric ozone concentrations and their impact on air quality in two of the largest urban areas of the country: the Metropolitan Area of *São Paulo* (MASP) and the Metropolitan Area of *Rio de Janeiro* (MARJ). The study used a mesoscale numerical model, the Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS), coupled to a simple photochemical module (SPM). The impact of different terrain, local atmospheric circulations and emissions characteristics over pollutants dispersion process were evaluated. For the correct representation of vehicular emissions, files based on the identification of urban areas and in total emissions available to Sao Paulo were constructed for the whole South America. Stationary sources, based on information provided by local environmental agencies of the two metropolitan areas, was also included in the model. For the MARJ, this information has been replaced by data from the emissions inventory. The results showed that this feature has brought significant improvements to the simulations with the numerical model. Sensitivity tests were performed with the model for the MASP in order to assess the impact of different parameterizations on ozone formation and some meteorological variables. The most significant differences observed in ozone spatial distribution were identified when considering variations in the horizontal resolution, using of boundary and initial conditions with higher spatial resolution for model initialization, and changing the radiation parameterization. The results obtained with simulations considering the different options of turbulence, urban surfaces, and cumulus parameterization produced the most significant impacts to the meteorological variables. To evaluate the conditions that lead to an air quality violation for ozone, considering the Brazilian regulations, some periods were selected by evaluation of registered monitoring data of both regions. Generally, during these periods, a predominance of clear sky condition, high temperatures and weak winds during the late night and early morning were verified. At both metropolitan regions, but mainly at MASP, the influence of sea breezes on the transport of precursors and ozone itself was clear. In the case of MARJ, the terrain also has strong influence over the dispersion process in the region. In both regions the vehicles emissions show themselves more significant to the high values of ozone concentrations. The comparison of ozone concentration simulated by the SPM-BRAMS model and the values observed by *CETESB's* monitoring network presented satisfactory results during most of the analyzed periods, mainly over MASP. It's important to point out that due to a small quantity of

air quality monitoring stations at MARJ an evaluation of the results for the region was compromised.

Keywords: Atmospheric Pollution, RMSP, RMRJ, BRAMS.

1. Introdução

Nos dias de hoje, a poluição do ar constitui um problema ambiental em diversos lugares do mundo, nos quais a natureza e a extensão da degradação da qualidade do ar, impulsionada pelo desenvolvimento urbano e industrial, estão relacionadas diretamente com as características topográficas, a tipologia das fontes de poluentes atmosféricos, a quantidade de emissão que afeta a região e as condições meteorológicas. Na verdade, o crescimento desenfreado dos grandes centros urbanos teve como um dos principais impactos a degradação da qualidade do ar e, por conseguinte, o impacto na saúde da população e no meio ambiente em geral.

No Brasil, os elevados índices de industrialização e urbanização verificados a partir da década de 70, acabaram por concentrar inúmeras fontes de emissão de poluentes atmosféricos, especialmente sobre a região Sudeste, onde se encontram a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Nesse contexto, diversos problemas relacionados à poluição do ar passaram a ser verificados o que levou os órgãos governamentais a implantar medidas de controle da qualidade do ar. Por meio de várias ações conjuntas entre governos federal e estaduais, essas medidas foram orientadas para o controle das emissões provenientes das indústrias (fontes fixas) e dos veículos automotores (fontes móveis) por meio do Programa Nacional de Qualidade do Ar – PRONAR e do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE (CAVALCANTI, 2003).

O objetivo principal do PRONAR foi limitar as emissões atmosféricas para determinados poluentes considerados prioritários. Dentre os instrumentos de ação complementar de controle propostos pelo PRONAR, destaca-se a adoção dos Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (PNQA) que foram estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90. A referida Resolução determinou limites máximos de concentração para os seguintes poluentes: material particulado total e inalável, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio, dióxido de nitrogênio e fumaça. Tais limites podem ser observados na Tabela 1-1. Para estes poluentes foram estabelecidos padrões primários e secundários. É importante destacar que os padrões primários estabelecem valores de concentrações que, quando atingidos, podem ser prejudiciais à saúde da população e os padrões secundários são os que delimitam uma concentração que além das quais poderá haver um incômodo ao bem estar da população, assim como prejuízos à fauna, flora e meio ambiente como um todo. Na

verdade, os padrões secundários têm como objetivo definir uma base que auxilie na política de prevenção à degradação da qualidade do ar, devendo ser aplicados em áreas de preservação como, por exemplo, estâncias turísticas e parques nacionais (CETESB, 2004).

Tabela 1-1: Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (PNQA) estabelecidos pela Resolução CONAMA 03/90.

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário	Padrão Secundário
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 Horas ¹	240 $\mu\text{g m}^{-3}$	150 $\mu\text{g m}^{-3}$
	MGA ²	80 $\mu\text{g m}^{-3}$	60 $\mu\text{g m}^{-3}$
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	24 Horas ¹	365 $\mu\text{g m}^{-3}$	100 $\mu\text{g m}^{-3}$
	MAA ³	80 $\mu\text{g m}^{-3}$	40 $\mu\text{g m}^{-3}$
Monóxido de Carbono (CO)	1 Hora ¹	35 ppm	35 ppm
	8 Horas ¹	9 ppm	9 ppm
Ozônio (O ₃)	1 Hora ¹	160 $\mu\text{g m}^{-3}$	160 $\mu\text{g m}^{-3}$
Fumaça	MAA ³	60 $\mu\text{g m}^{-3}$	40 $\mu\text{g m}^{-3}$
Material particulado inalável (PM ₁₀)	24 Horas ¹	150 $\mu\text{g m}^{-3}$	150 $\mu\text{g m}^{-3}$
	MAA ³	50 $\mu\text{g m}^{-3}$	50 $\mu\text{g m}^{-3}$
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	1 Hora ¹	320 $\mu\text{g m}^{-3}$	190 $\mu\text{g m}^{-3}$
	MAA ³	100 $\mu\text{g m}^{-3}$	100 $\mu\text{g m}^{-3}$

Fonte: CETESB, 2009.

Observações: ¹Esses padrões não devem ser violados mais de uma vez por ano.

²MGA – Média Geométrica Anual

³MAA – Média Aritmética Anual

Atualmente, muito se têm discutido sobre a necessidade de revisão destes padrões de qualidade do ar. Diversos estudos indicam a ocorrência de problemas respiratórios e cardiovasculares em concentrações bem abaixo do considerado como referência pela legislação em vigência no Brasil (PIRES-NETO et al., 2007; SALDIVA, 2008; SANTOS et al., 2008). Em 2006, a Organização Mundial de Saúde (OMS) apresentou uma atualização dos padrões de qualidade do ar, propondo limites mais restritivos no que se refere às concentrações de material particulado, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre como pode ser observado na Tabela 1-2 (OMS, 2006). Também foram

propostos novos limites para as concentrações de ozônio. Contudo, a alteração do período de amostragem de 1 hora para média de 8 horas tenderia, mesmo com a redução do valor máximo permitido, a suavizar o número de violações aos PNQA. A adoção destes padrões no Brasil teria grandes impactos, principalmente no que se refere às concentrações de material particulado em grandes centros urbanos e até mesmo em áreas rurais. Segundo a FEEMA (FEEMA, 2008) e a CETESB (CETESB, 2009), os resultados da amostragem de material particulado em todas as estações de monitoramento em operação nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e de São Paulo, respectivamente, apresentam valores de concentração superiores aos limites propostos pela OMS.

Tabela 1-2: Valores propostos pela OMS como referência para os padrões de qualidade do ar.

Poluente	Tempo de Amostragem	Limites Propostos
Material Particulado Inalável (PM ₁₀)	24 Horas	50 µg m ⁻³
	MAA ¹	20 µg m ⁻³
Material Particulado Fino (PM _{2.5})	24 Horas	25 µg m ⁻³
	MAA ¹	10 µg m ⁻³
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	1 Hora	200 µg m ⁻³
	MAA ¹	40 µg m ⁻³
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	10 minutos	500 µg m ⁻³
	MAA ¹	20 µg m ⁻³
Ozônio (O ₃)	8 Horas	100 µg m ⁻³

Fonte: OMS, 2006.

Observações: ¹MAA – Média Aritmética Anual

As principais metas do PROCONVE, cujo principal objetivo é a redução dos níveis de emissão de poluentes atmosféricos por veículos leves e pesados, incluem: (i) promover o desenvolvimento tecnológico nacional no que se refere à engenharia automobilística e ao desenvolvimento de métodos e equipamentos para ensaios e medições das emissões; (ii) a melhoria da qualidade dos combustíveis; e (iii) a criação de programas de inspeção e manutenção para veículos em uso (CONAMA, 2009). No Brasil, o Estado do Rio de Janeiro, em 1998, implantou de forma pioneira, o Programa

de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso (Programa de I/M) através do convênio de cooperação técnica entre o DETRAN-RJ e a FEEMA. A obrigatoriedade da vistoria de gases de escapamento de veículos automotores foi adotada inicialmente com caráter educativo, porém, a partir de março de 2002, a vistoria passou a ter caráter punitivo. Os resultados obtidos por meio do Programa de I/M no Estado do Rio de Janeiro indicaram que 46% dos veículos reprovados correspondem à frota veicular mais antiga, com veículos cujo ano-modelo é inferior a 1991 (MMA, FEEMA, LIMA/COPPE, 2002). Dentre as atribuições do PROCONVE, também descritas na resolução 18/86, destacam-se o estabelecimento de limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para veículos motomotores e automotores. Desde a sua implantação, o PROCONVE foi responsável por uma queda de 90% no limite de emissões por veículos leves e de 80% por veículos pesados (SANCHEZ-CCYOLLO et al., 2007). O programa é indicado como principal fator para a redução das concentrações médias de diversos poluentes primários registrados na RMSP ao longo da última década (MARTINS et al., 2004).

Nos dias de hoje, dentre os poluentes que representam a maior preocupação em termos de qualidade do ar, tanto na RMSP como na RMRJ, pode-se destacar o ozônio troposférico (O_3). Violações ao PNQA estabelecido para o ozônio também são comumente registradas nessas regiões e em outras áreas de ambos os estados. Em 2007, de acordo com a CETESB (CETESB, 2009), pôde-se destacar o número de ultrapassagens ao padrão registradas nos municípios de Paulínia (22) e São José dos Campos (14). No Estado do Rio de Janeiro, a região norte e o Vale do Paraíba também registram violações ao PNQA estabelecido para o ozônio (CARVALHO & CAVALCANTI, 2004; FEEMA, 2008).

Contudo, é importante ressaltar que o alto custo envolvido na implantação e operação de estações de monitoramento contínuo é um entrave à expansão da rede existente, o que dificulta um real diagnóstico da qualidade do ar em ambas as regiões, principalmente, no que tange a avaliação da distribuição espacial das concentrações de ozônio e de seus precursores.

Nesse contexto, a utilização de modelos de qualidade do ar se apresenta como uma importante ferramenta permitindo avaliar: (1) as emissões de poluentes provenientes de fontes de diferentes tipologias que podem ser analisadas de acordo com o impacto das concentrações geradas por essas na superfície; (2) as concentrações em torno de uma grande região; e (3) diferentes cenários de emissão de poluentes, possibilitando a

avaliação de eficiência de diferentes estratégias de controle de emissão e o impacto da implantação de novas fontes em uma determinada área (SEINFELD, 1986; PETERS, 1995). Além disso, a ferramenta pode prover embasamento aos critérios de eventuais necessidades de redimensionamento da rede de monitoramento existente por parte dos órgãos ambientais responsáveis. Outro aspecto importante refere-se à utilização de modelos de qualidade do ar de forma operacional e possibilidade de previsão da concentração de diversos poluentes.

Em determinadas condições meteorológicas, principalmente vinculadas à forte incidência de radiação solar, a formação de ozônio ocorre através da fotólise da molécula de NO_2 , que retorna a NO e libera oxigênio atômico no estado excitado (O^*), que então reage com o oxigênio molecular, naturalmente encontrado na atmosfera. Os principais processos envolvidos na formação e no consumo do ozônio na troposfera são discutidos no item 1.1. A complexidade do processo de formação do ozônio troposférico, que envolve um grande número de fatores físicos e químicos variando espacialmente e temporalmente de forma não linear, dificulta a simulação e a previsão das concentrações deste. Uma revisão mais detalhada a respeito dos modelos fotoquímicos e de sua utilização é apresentada no item 1.2.

1.1. O ozônio troposférico: Formação, Consumo e Relação com a Meteorologia

De acordo com a literatura (SEINFELD, 1986; BRONNIMANN e NEU, 1997; JACOB, 1999; VECCHI & VALLI, 1999; PONT & FONTAN, 2001; EPA, 2006), o balanço global das concentrações de ozônio, na troposfera, apresenta ganho através da produção química local e do transporte de ozônio estratosférico, enquanto a perda se dá através do processo de deposição seca na superfície e da destruição através de mecanismos químicos locais. O esquema contendo os processos fotoquímicos envolvidos na formação e consumo das moléculas de ozônio na estratosfera e na troposfera pode ser observado na Figura 1-1.

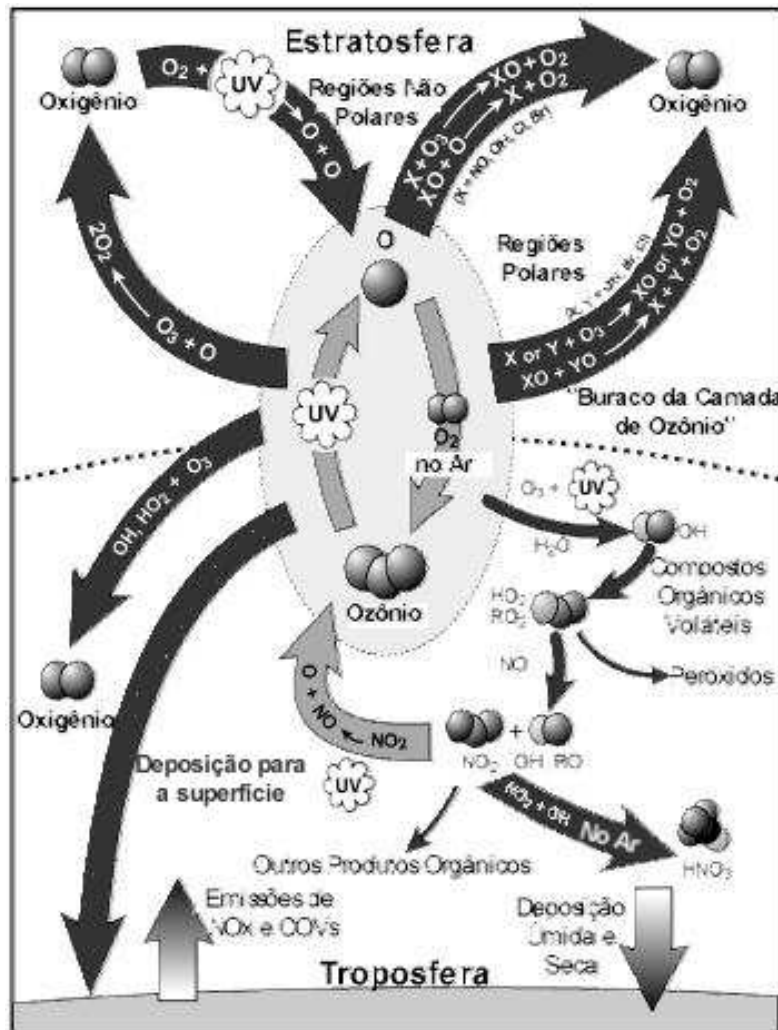


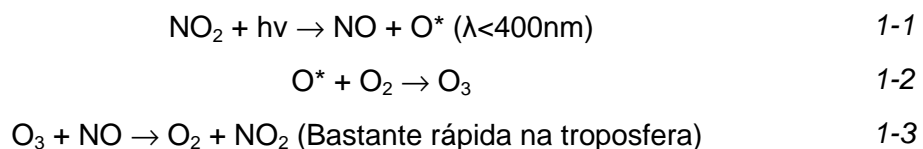
Figura 1-1: Esquema dos processos fotoquímicos relacionados com o ozônio na estratosfera e na troposfera. Adaptado a partir de EPA, 2006.

A produção química do ozônio na troposfera, em regiões poluídas, ocorre a partir de reações envolvendo, principalmente, os compostos orgânicos voláteis (COVs) e os óxidos de nitrogênio (SEINFELD, 1986; EPA, 2006). É importante destacar que os COVs referem-se a todos os compostos gasosos, na atmosfera, que contém carbono excetuando-se o monóxido e o dióxido de carbono (CO e CO_2 , respectivamente). Segundo Martins & Andrade (2008), na RMSP, a formação de ozônio é mais sensível às variações do COVs, principalmente, a variações dos aromáticos, alcenos, alcanos, aldeídos e formaldeídos.

Sendo o ozônio um poluente secundário, o sinergismo com os demais poluentes representa um fator complicador para o problema, dificultando a modelagem e previsão da formação deste. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos - EPA (EPA, 2006), a complexidade da formação do ozônio e de

outros oxidantes responde não linearmente a diversos fatores como: a intensidade e distribuição espectral da luz solar; a mistura e aos processos atmosféricos que ocorrem em nuvens e em partículas de aerossóis; as concentrações dos precursores; e as taxas de velocidade das reações químicas dos precursores. É importante ressaltar também que existem aspectos ainda não muito claros no que se refere às reações químicas envolvendo os óxidos de nitrogênio (MARTINS, 2006).

Em geral, segundo Martins (2006), a formação das moléculas de ozônio ocorre numa cadeia de reações que têm o radical hidroxila (OH·) como principal condutor durante o dia e o radical nitrato (NO₃) durante a noite. As reações 1-1, 1-2 e 1-3 mostram, de forma resumida, as principais etapas que levam à formação do ozônio (SEINFELD, 1986; FINLAYSON-PITTS & PITTS, 2000).



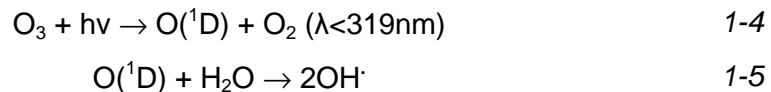
O átomo de oxigênio atômico também pode ser fornecido através da fotólise do ozônio na troposfera ($\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$). O ozônio absorve radiação com comprimento de onda inferior a 400 nm. É este comprimento de onda, que corresponde à faixa do espectro da radiação ultravioleta, que determinará se o átomo de oxigênio produzido estará no estado fundamental ou no estado excitado (SEINFELD, 1986).

Como pode ser observado nas equações apresentadas, os óxidos de nitrogênio são fundamentais para a química do ozônio troposférico. A formação do NO ocorre quando oxigênio ou o ar, a altas temperaturas, são utilizados nos processos de combustão ($\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{NO}$). As emissões de NO_x proveniente do tráfego de veículos, por exemplo, consistem, em grande parte, em monóxido de nitrogênio (BRONNIMANN e NEU, 1997). O NO gerado poderá ser, então, oxidado à NO₂ através das reações 3.3. Segundo a CETESB (CETESB, 2002), o processo de formação do ozônio depende da velocidade de fotólise do dióxido de nitrogênio e da razão entre as concentrações de NO₂ e de NO (NO₂/NO).

Vale ressaltar que os mecanismos cinéticos descritos anteriormente não incluem a formação do smog fotoquímico na presença dos COVs. Os COVs são emitidos por fontes biogênicas e antropogênicas, sendo estas, principalmente, devido à produção,

transporte, armazenamento e consumo de combustíveis fósseis. O ciclo formado por estas reações (1-1, 1-2 e 1-3) atinge um estado foto estacionário quando há equilíbrio entre as moléculas de NO, NO₂ e O₃. Dessa forma, há pequena formação de ozônio quando há ausência dos compostos orgânicos voláteis (SEINFELD, 1986).

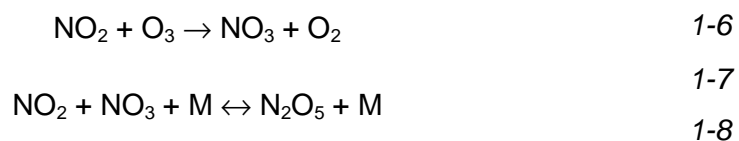
O radical hidroxila é uma espécie chave para o entendimento da química da formação do smog fotoquímico e, conseqüentemente, do poluente ozônio. As três rotas de produção do radical OH[·] na troposfera incluem (a) a fotólise do ozônio e a reação com o vapor d'água, (b) a fotólise do ácido nitroso (HONO) e (c) a reação do radical hidroperoxila com o monóxido de nitrogênio (SEINFELD, 1986). Segundo Jacob (1999), a principal via de formação deste radical envolve a fotólise do ozônio e a subsequente reação com o vapor d'água (reações 1-4 e 1-5).



Existe uma competição entre os COVs e o NO_x pelo radical hidroxila. Para altas razões de concentração de COVs / NO_x o radical hidroxila reagirá principalmente com os COVs, para baixas razões a reação com o NO_x pode ser predominante (SEINFELD, 1986).

A reação dos COVs com o radical hidroxila promove a formação de radicais peroxialquila (RO₂[·]), acila (RCO[·]) e peroxiacila (RC(O)O₂[·]). Os radicais peroxi reagem rapidamente com o NO para formar NO₂ e outros radicais livres, que são oxidados a radicais hidroperoxila que podem reagir com NO para regenerar radicais hidroxila e NO₂ (SEINFELD, 1986).

À noite, sem a incidência de radiação solar, não há formação de ozônio. Contudo, outros poluentes secundários são formados e a oxidação dos COVs se dá primordialmente com o radical NO₃ (MARTINS, 2006). O radical nitrato é formado via reação com o dióxido de nitrogênio (reações 1-6 e 1-8).



É importante destacar que o equilíbrio com o peróxido de dinitrogênio (N_2O_5) é um importante aspecto da química do NO_3 (SEINFELD, 1986; FINLAYSON-PITTS & PITTS, 2000). Durante o dia, o radical nitrato é rapidamente fotolisado seguindo duas rotas (reações 1-9 e 1-10) podendo também reagir com o monóxido de nitrogênio (reação 1-11). A reação com o NO é tão rápida que, segundo Seinfeld (1986), o NO e o radical NO_3 não podem coexistir em razões de mistura iguais ou superiores a ordem de partes por trilhão (ppt).



Predominantemente, a remoção do radical nitrato durante a noite se dá através da conversão a ácido nítrico (HNO_3) por reação com a água. O NO_3 também pode reagir com os COVs podendo gerar diversos produtos (MARTINS, 2006).

Assim, os radicais livres provenientes dos compostos orgânicos voláteis (COVs), são responsáveis por uma grande parcela da oxidação do NO a NO_2 e, por conseguinte, pelo aumento da eficiência do processo de formação do ozônio.

Dessa forma, uma redução nas emissões de NOX nem sempre resulta em uma significativa diminuição das concentrações de ozônio (PONT & FONTAN, 2001), mas a diminuição das emissões de COVs produz, em geral, uma menor formação deste poluente (SEINFELD, 1986; BRÖNNIMANN & NEU, 1997). Logo, a taxa de formação das moléculas de ozônio não é apenas proporcional a quantidade de NOX presente na atmosfera. De acordo com Seinfeld (1986), para um determinado nível de COVs, existe uma concentração de NOX na qual uma quantidade máxima de ozônio é produzida (razão COVs/NOX ideal). Para razões menores do que este valor, o aumento das concentrações dos óxidos de nitrogênio leva a uma diminuição do ozônio. A dependência da produção de ozônio da razão NOX/COVs é representada através das isopletras de ozônio (Figura 1-2). Analisando as isopletras, verifica-se que quando a razão COVs/NOX é baixa, ou seja, quando as concentrações dos óxidos de nitrogênio são bem superiores as dos compostos orgânicos voláteis, as concentrações de ozônio serão mais sensíveis a reduções nas emissões de COVs (atmosfera COVs-limitante). Em uma atmosfera NOX-limitante, a redução das emissões de NOX será mais efetiva no controle da produção de ozônio. Nesse caso, essa redução pode

ocorrer até certo limiar para que não haja aumento das concentrações de ozônio (SEINFELD, 1986; SILLMAN, 1999; MARTINS, 2006).

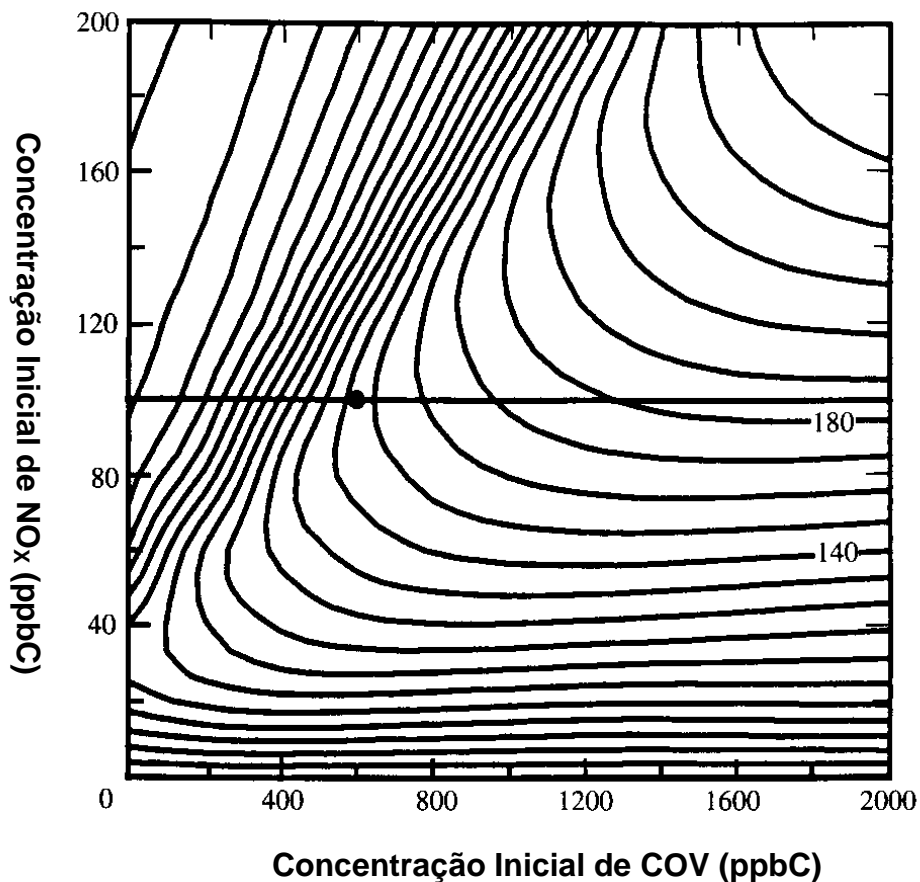


Figura 1-2: Isopletas de ozônio (Fonte: SEINFELD, 1986).

Para razões COVs/NO_x altas (superiores a 15), a atmosfera pode ser classificada como NO_x limitante e controles na emissão de COVs se mostram pouco efetivos. Valores entre 8 e 15 são considerados intermediários caracterizando locais em que reduções nas emissões de ambos podem ser efetivas no controle dos níveis de ozônio e razões inferiores a 8 caracterizam uma atmosfera COVs-limitante. Vale ressaltar que há divergência em relação aos valores definidos como máximos para que a atmosfera seja considerada COVs-limitante.

Vanderstraeten et al. (1996) concluíram que estratégias de redução do tráfego de veículos no verão na Bélgica, levados a níveis comparáveis ao fluxo veicular atingido durante os finais de semana, resultariam em um aumento das concentrações de ozônio por quase todo o país. Brönnimann & Neu (1997), entretanto, revelaram, através da análise de dados de emissão, de qualidade do ar e de parâmetros

meteorológicos, que, na Suíça, no caso de condições atmosféricas favoráveis a formação do poluente ozônio, a redução de 20 a 50% das emissões dos precursores, via redução do fluxo veicular, resultou em diminuições das concentrações de O₃ de apenas 10 a 15%.

Além dos processos químicos discutidos anteriormente, as condições meteorológicas também possuem, diretamente (através da radiação solar necessária a reação fotoquímica) e indiretamente (através dos processos de transporte, da temperatura do ar, da presença de vapor d'água, entre outros), um papel importante para a formação do ozônio. Em geral, as concentrações de O₃ aumentarão quando o fluxo de raios ultravioleta for máximo, com poucas nuvens, e o volume de ar em que os precursores são misturados e transportados é limitado (RYAN et al., 1999).

A relação entre as concentrações de ozônio e aspectos sinóticos foi investigada extensivamente em diversas regiões do mundo. A atuação de sistemas de alta pressão, geralmente, associados a condições de céu-claro, altas temperaturas e ventos fracos, foi relatada por diversos estudos como favorável a ocorrência de altos índices de ozônio na superfície (COMRIE & YARNAL, 1992; COMRIE, 1996; SILLMAN, 1999; VUKOVICH et al., 1999; DIEM & COMRIE, 2001; JENKIN et al., 2002; GALVEZ, 2007).

Ding et al. (2004) avaliou, através da utilização do modelo de mesoescala MM5, o papel da brisa marítima durante um episódio prolongado de poluição por ozônio em Hong Kong revelando que a contribuição de vento sinótico vindo da costa atrasou a propagação da brisa e diminuiu sua penetração durante a tarde, o que contribuiu para os altos índices de ozônio verificados sobre a costa. Kalthoff et al. (2005) revelou que ventos sinóticos moderados favoreceram a evolução da brisa marítima e para a subsequente advecção de ar poluído da região metropolitana de Marseille-França o que levou ao aumento dos níveis de ozônio em camadas da atmosfera acima da camada limite convectiva (CLC). O papel das circulações de mesoescala no transporte de ozônio também foi avaliado por Rosenthal et al. (2003).

Os efeitos do campo de vento local nas concentrações de ozônio e de seus precursores também foram avaliados em vários estudos (VUKOVICH & GUINNUP, 1998; CETESB, 2003; ELMINIR, 2005; CARVALHO, 2006; SÁNCHEZ-CCOYLLO et al., 2006; SHAN et al., 2006). O transporte vertical da estratosfera ("downstream") de moléculas de O₃ não se apresentou como fundamental em situações em que altas

concentrações do poluente foram verificadas (RYAN & DICKERSON, 2000; VUKOVICH & SHERWELL, 2003).

Vukovich & Sherwell (2003) identificaram para a região de Washington, Baltimore, Maryland e Virginia uma correlação positiva entre o comportamento sazonal das concentrações de ozônio e o de temperatura do ar (também verificado para a RMSP por Massambani & Andrade, 1992) e uma correlação negativa quando a cobertura de nuvens foi considerada. Além do fato de maiores temperaturas, em geral, estarem associadas com condições de alta pressão (verificadas em muitos episódios de concentrações de O_3), as emissões de hidrocarbonetos biogênicos e as emissões evaporativas de COVs também aumentam com a temperatura (SEINFELD, 1986). Diversos estudos também verificaram correlações positivas entre as concentrações de ozônio e a temperatura do ar (SILLMAN, 1999; DIEM & COMRIE, 2001; CETESB, 2003; WISE & COMRIE, 2005; ELMINIR, 2005; CARVALHO, 2006; SÁNCHEZ-CCOYLO et al., 2006; SHAN et al., 2006). Em relação à cobertura de nuvens, verifica-se que esta acaba controlando a quantidade de radiação solar que alcançará a superfície, ou seja, como a radiação solar é fundamental para a produção da molécula de O_3 já é esperado que a nebulosidade diminua conforme o ozônio aumente. Segundo Seinfeld (1986), as nuvens também possuem um papel importante no transporte de poluentes da CLP para a baixa, média e alta troposfera. O estudo de um caso simples de transporte vertical e profundo associado com a aproximação de um sistema frontal revelou um dos principais mecanismos responsáveis pela transferência de emissões provenientes da queima de biomassa da CLP para a alta troposfera (FREITAS et al., 2000). Em outro estudo, Freitas et al. (2009) discutiram, através de resultados de simulações numéricas, a presença de corredores de formação e deposição de ozônio e de aerossóis de queimadas destacando o papel destes últimos na termodinâmica e precipitação.

Alguns estudos também revelaram índices de correlação positiva entre a altura da camada de mistura e as concentrações de ozônio na troposfera (FREITAS et al., 2000; RAO et al., 2003; WISE & COMRIE, 2005). Freitas et al. (2000) atribuiu a correlação positiva ao fato de que ambos as variáveis são altamente dependentes da incidência de radiação. Esses resultados contrastam com os obtidos por Sánchez-Ccoyllo et al. (2006) que, através do modelo CIT, verificou uma diminuição nos níveis de ozônio quando a altura da camada de mistura foi aumentada. Neste último caso é importante destacar que a definição da camada de mistura, ou altura da CLP, no modelo CIT define também o topo rígido do modelo e que não existem no modelo processos de

troca ou condições de estabilidade que permitam a evolução desta camada e, portanto, não permite uma avaliação precisa da relação entre a altura da CLP e as concentrações de ozônio.

Índices de umidade relativa do ar variando entre 30 e 70% foram associados a episódios de poluição por ozônio na RMSP (CETESB, 2003). Uma correlação negativa destas variáveis também foi encontrada por Elminir (2005), Carvalho (2006) e Shan et al. (2006) para diferentes localidades. Contudo, Vukovich & Sherwell (2003) concluíram que grandes concentrações de vapor d'água seriam necessárias para a ocorrência de altos níveis de poluição por ozônio, na região leste dos EUA.

1.2. A Modelagem de Oxidantes Fotoquímicos

A temática da qualidade do ar é motivo de preocupação em muitos países. Seja para a implantação de novas fontes em uma determinada região ou para a utilização de novas tecnologias que reduzam as emissões são necessários estudos que quantifiquem estes impactos de forma realística. A resolução destes problemas geralmente requer a utilização de modelos matemáticos que simulem as possíveis mudanças no ambiente causada pela introdução de novas fontes ou o que uma ligeira mudança de tecnologia poderá acarretar a curto, médio ou longo prazo.

Nesse sentido, os modelos de qualidade do ar devem fornecer um meio de relacionar a emissão atmosférica aos níveis de concentração destes presentes na atmosfera (SEINFELD, 1986). Para isso, fazem-se necessárias considerações a respeito de padrões de emissão, parâmetros meteorológicos, processos físico-químicos e de remoção da atmosfera. A interação entre estes processos pode ser observada na Figura 1-3.

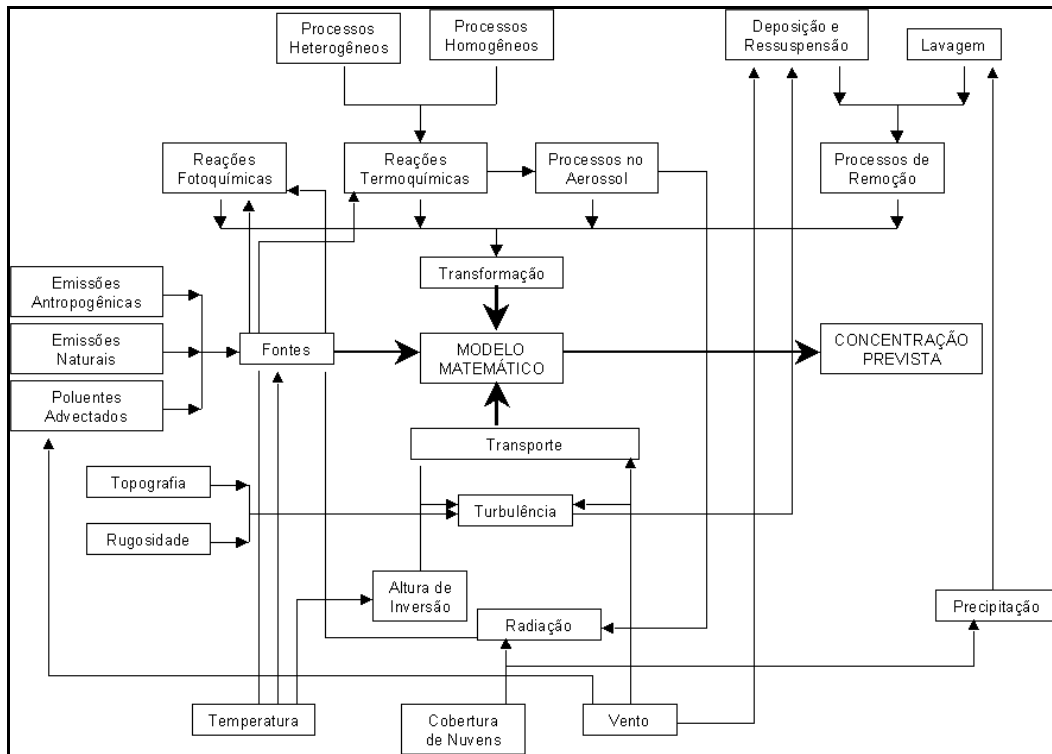


Figura 1-3: Esquema de Modelagem da Qualidade do Ar. Adaptado de SEINFELD (1986).

Um dos maiores desafios para os modelos de qualidade do ar refere-se à simulação e previsão do comportamento dos poluentes secundários na atmosfera (JACOBSON, 1999). Por exemplo, a complexidade do processo de formação do ozônio troposférico que envolve um grande número de fatores físicos e químicos variando espacialmente e temporalmente de forma não linear, ainda não é totalmente conhecida. Outro fator complicador está na escala temporal da formação e remoção do poluente que, geralmente, é da ordem de poucas horas.

A não linearidade no processo de formação de ozônio levou a Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (*Environmental Protection Agency - EPA*) a adotar algumas medidas que auxiliassem o controle da qualidade do ar. Sendo assim, o *Clean Air Act Amendments* de 1990 exigiu que todos os estados com cidades que violassem o padrão de qualidade do ar estabelecido para o poluente ozônio fizessem o uso de modelos matemáticos da qualidade do ar que permitissem a demonstração de que as medidas de controle a serem adotadas seriam eficazes na prevenção das ocorrências de ultrapassagem ao padrão (EPA, 2005).

Para simular as origens do O_3 produzido nos grandes centros urbanos, além de uma acurada descrição das emissões dos precursores que envolve a construção de

inventários de emissão, também se faz necessária uma precisa descrição dos mecanismos de transporte advectivo/convectivo, difusão turbulenta e dos processos de formação e remoção do poluente na atmosfera (SEINFELD, 1986).

O desafio dos modelos matemáticos na simulação dos poluentes fotoquímicos em escalas urbanas e regionais também está relacionado ao custo computacional envolvido neste processo. De acordo com Jeffries (1999), nos modelos atuais, a solução das transformações químicas ocupa de 80 a 90% do tempo computacional e dessa forma são aplicadas simplificações às formulações que representam a solução dos fenômenos químicos. Por conta do grande número de espécies e reações envolvidas na oxidação de hidrocarbonetos antropogênicos e biogênicos, por exemplo, mecanismos químicos condensados são utilizados em modelos de qualidade do ar (EPA, 2006). Apesar de mais de 200 espécies de hidrocarbonetos terem sido identificadas na composição atmosférica de centros urbanos, apenas um número pequeno é considerado nos módulos computacionais referentes à cinética das reações químicas disponíveis nos modelos (PETERS et al., 1995). Contudo, segundo a EPA (EPA, 2006), os mecanismos químicos existentes negligenciam muitos processos importantes, tais como a formação e subseqüentes reações de carbonilas de longa vida e de compostos intermediários, assim como as reações heterogêneas envolvendo a formação de gotas de nuvens e partículas de aerossol.

Peters et al. (1995) classificaram a evolução dos modelos de qualidade do ar em três distintas fases que abrangem a 1ª, 2ª e 3ª Geração de Modelos de Qualidade do Ar. A 1ª Geração de Modelos de Qualidade do Ar foi desenvolvida durante a década de 70 e tem como característica principal a construção de modelos onde, no máximo, eram considerados mecanismos químicos de 1ª ordem. Nestes modelos ainda não eram considerados processos de deposição e a obtenção dos campos meteorológicos era feita através de análise objetiva de dados observados. São exemplos de modelos da 1ª Geração o STEM-I (*Sulphur Transport Eulerian Model – CARMICHAEL et al., 1986*) e o ROM (*Regional Oxidant Model – LAMB, 1983*). Durante a década de 80, a 2ª Geração de Modelos de Qualidade do Ar surgiu com a (a) inclusão dos processos de deposição seca e de deposição úmida, (b) expansão dos mecanismos químicos e (c) utilização de melhores esquemas numéricos. Nesta geração de modelos, os dados meteorológicos passaram a ser providos por modelos meteorológicos de circulação geral ou de mesoescala. Entre os mais conhecidos modelos desta geração encontram-se o UAM (*Urban Airshed Model – MORRIS & MYERS, 1990*) e o RADM (*Regional Acid Deposition Model – CHANG et al., 1987*). Já a 3ª Geração de Modelos de

Qualidade do Ar começou a ser desenvolvida ainda durante os anos 90 e tem como objetivo principal considerar as interações entre os processos químicos e meteorológicos. Através destes modelos também é possível analisar o impacto regional e global dos poluentes atmosféricos e os ciclos biogeoquímicos. Exemplos destes modelos são o WRF-CHEM (GRELL et al. 2005) e SPM-BRAMS (FREITAS et al., 2005), entre outros.

Diferentes abordagens para a representação dos poluentes fotoquímicos têm sido desenvolvidas ao longo do tempo. Uma classificação atual dos modelos de qualidade do ar define os modelos *off-line* e os modelos *on-line*. Os modelos da 1 e 2ª geração são do tipo *off-line* e os modelos da 3ª geração são considerados *on-line*.

Os modelos *off-line* utilizam campos meteorológicos resolvidos previamente ou utilizam dados meteorológicos observados, ou seja, a química e a dinâmica da atmosfera estão efetivamente desacopladas (PETERS et al., 1995; BAKLANOV & KORSHOLM, 2007). Modelos fotoquímicos como o CIT (MCRAE et al., 1992) e CMAQ (EPA, 1999) são exemplos deste tipo de modelo. É importante ressaltar que todos os modelos regulatórios são *off-line*. O baixo custo computacional e uma maior flexibilidade na construção de cenários de emissão e de gerenciamento da qualidade do ar são vantagens dos modelos *off-line* (BAKLANOV & KORSHOLM, 2007).

Já os modelos *on-line* são aqueles que resolvem simultaneamente as equações relacionadas aos processos meteorológicos e aquelas relacionadas à química da atmosfera (PETERS et al., 1995; BAKLANOV & KORSHOLM, 2007). São exemplos desta categoria o WRF/Chem (GRELL et al., 2005) e o SPM-BRAMS (FREITAS et al. 2005). Dentre as principais vantagens dos modelos *on-line* estão: (a) possuir a mesma grade, não necessitando de interpolação no tempo e espaço; (b) possuir as mesmas parametrizações físicas, sem inconsistências; (c) todas as variáveis tridimensionais estão disponíveis a cada passo de tempo, sem restrição na utilização de campos meteorológicos; (d) a possibilidade de consideração dos gases e aerossóis como forçante dos processos atmosféricos, além de outros mecanismos de *feedback* (BAKLANOV & KORSHOLM, 2007).

No Brasil, apenas no final da década de 90, os modelos fotoquímicos passaram a ser utilizados, principalmente, para a avaliação da produção e do transporte de ozônio troposférico na RMSP. Dentre os modelos de qualidade do ar utilizados para a

simulação da formação do ozônio e de outros oxidantes fotoquímicos destacam-se os modelos *off-line* CIT e UAM e os modelos *on-line* SPM-BRAMS e WRF/Chem.

O modelo fotoquímico CIT foi utilizado em Cardoso (1998) para a avaliação do impacto da inclusão das fontes de poluentes na região de Cubatão na formação e no transporte da poluição fotoquímica na RMSP. A influência da Serra do Mar no transporte dos precursores também foi avaliada neste estudo. Ynoue (1999) avaliou o impacto da utilização de campos meteorológicos prognósticos extraídos do modelo de mesoscala RAMS como *input* meteorológico do modelo CIT. O impacto nas concentrações de ozônio da introdução de um método para cálculo da difusividade vertical no modelo CIT foi avaliado por Ulke & Andrade (2001). O impacto dos COVs emitidos por fontes biogênicas na RMSP na formação de ozônio na camada limite planetária (CLP) foi quantificado por Martins (2002). Através da realização de simulações com o CIT foi possível verificar um aumento médio de 15,3% nas concentrações de ozônio sobre a região. Andrade et al. (2004) avaliaram os efeitos da utilização do inventário de emissões oficial da CETESB em simulações com o modelo CIT. Através destas, foram verificados valores de concentração de ozônio bem abaixo dos registrados pela rede de monitoramento da CETESB, indicando que os perfis de emissão de NO_x estariam superestimados por um fator de aproximadamente 2. O impacto dos precursores de ozônio e de variáveis meteorológicas como altura da camada de mistura, velocidade do vento e temperatura na formação do ozônio também foi avaliado através do CIT por Sánchez-Ccoyllo et al. (2006). Martins (2006) avaliou, por meio de simulações com o modelo CIT, a sensibilidade da formação de ozônio na troposfera as emissões veiculares de COVs e de NO_x na RMSP. Carbone (2008) modificou o inventário de emissões e o módulo químico SAPRC99 utilizados pelo modelo CIT com o intuito de melhorar a representação dos processos de formação e consumo do ozônio na RMSP uma vez que variações na composição dos combustíveis, como a utilização de etanol, por exemplo, confere características bem específicas a poluição urbana no Brasil.

Zacharias (2007) avaliou o impacto do transporte de ozônio e de seus precursores na qualidade do ar registrada na região de Sorocaba através da utilização do modelo UAM-V, recomendado pelo EPA para estudos envolvendo a formação de ozônio em escala urbana. Em algumas ocasiões, foi possível identificar uma evidente contribuição da RMSP para a formação do ozônio troposférico em Sorocaba. Contudo, os resultados revelaram que a região de Sorocaba também possui, por si só, potencial para a formação de ozônio.

O módulo fotoquímico simplificado acoplado à versão brasileira do modelo meteorológico de mesoescala *Regional Atmospheric Modeling System* (SPM-BRAMS), que também será utilizado por este estudo, foi descrito e validado para a RMSP por Freitas et al. (2005). Balbino & Freitas (2006) analisaram os máximos na concentração de ozônio em superfície durante o período noturno, sobre a RMSP focando a avaliação das condições sinóticas através de simulações com o SPM-BRAMS. Os resultados revelaram que o pico noturno foi ocasionado por transporte horizontal e, principalmente, por transporte vertical. Vendrasco et al. (2006) avaliaram, através de simulações com o SPM-BRAMS, os variados impactos de alterações nas emissões de NO_x e COVs nas concentrações de ozônio. Carvalho et al. (2007) compararam os resultados das concentrações de ozônio simuladas pelo modelo SPM-BRAMS a dados provenientes de estações de monitoramento da qualidade do ar dispostas pela RMSP. Apesar de não detectar a ocorrência de violações ao padrão de qualidade do ar em vigência no Brasil (PNQA), o modelo apresentou resultados bem próximos aos registrados pela rede de monitoramento da CETESB, principalmente, para as estações de Pinheiros e Diadema.

Martins et al. (2007) apresentou resultados preliminares obtidos através do modelo WRF/Chem aplicado à megacidade de São Paulo. Foram analisadas as concentrações de ozônio simuladas pelo modelo em superfície e o perfil destas em altitude. A correlação entre os valores observados em superfície pela rede de monitoramento da CETESB e os resultados do modelo variou entre 0,67 e 0,75. A análise do perfil vertical de ozônio simulado foi semelhante ao perfil observado sendo capaz de representar razoavelmente a máxima de ozônio no topo da camada limite planetária.

Os resultados das concentrações de ozônio simuladas pelos modelos CIT, WRF/Chem e SPM-BRAMS durante um período de cinco dias quando foram registradas pela rede de monitoramento da CETESB diversas ultrapassagens ao PNQA na RMSP foram avaliados de forma qualitativa e quantitativa. Carvalho et al. (2008) verificaram grandes diferenças nos resultados gerados pelos modelos CIT, SPM-BRAMS e WRF/Chem. Em geral, o modelo SPM-BRAMS representou de forma mais coerente os perfis registrados nas estações de monitoramento e apresentou melhores resultados nos dias em que as concentrações de O_3 estiveram abaixo do PNQA. No período em que foram registradas concentrações acima de $160 \mu\text{g.m}^{-3}$, os modelos CIT e WRF obtiveram melhores desempenhos. Através da utilização de métodos estatísticos,

Mazzoli et al. (2008) apontaram o modelo SPM-BRAMS como o de melhor desempenho para todas as estações consideradas. Através do cálculo do erro médio (*ME*) foi possível observar que, em geral, os modelos CIT e WRF/Chem, para todas as estações, superestimaram as concentrações de ozônio.

Alonso et al. (2008) utilizaram o sistema de modelagem CCATT-BRAMS (Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model on the Brazilian Regional Atmospheric Modeling System), aprimorando o banco de dados de emissões antrópicas, no intuito de avaliar o desempenho do modelo quanto à simulação das concentrações de ozônio na RMSP tanto na escala urbana quanto regional. Os resultados apresentados no referido artigo revelaram boa concordância com os dados observados e coerência na representação da variabilidade temporal do ozônio.

1.3. Objetivos e enfoque do trabalho

O objetivo central deste projeto de pesquisa foi avaliar o impacto de mega-cidades na qualidade do ar no que se refere à poluição fotoquímica. Como áreas de estudo foram consideradas as regiões metropolitanas de São Paulo (RMSP) e do Rio de Janeiro (RMRJ). Tanto a RMSP quanto a RMRJ são consideradas mega-cidades uma vez que essas metrópoles possuem mais de 10 milhões de habitantes.

Para isso, foi utilizado o módulo fotoquímico simplificado acoplado ao modelo BRAMS (FREITAS et al., 2005). Diversas simulações foram realizadas com o intuito de avaliar a distribuição espacial das concentrações de ozônio troposférico e a influência de diversos fatores na formação e no transporte deste poluente. A comparação da influência destes fatores nas duas regiões também constituiu um importante alvo deste estudo. Foram objetivos secundários deste projeto de pesquisa os seguintes aspectos:

- Validação dos resultados obtidos por meio da comparação destes com dados provenientes do monitoramento da qualidade do ar distribuídas nas regiões;
- Verificação Influência da topografia e da presença de corpos hídricos no processo de dispersão por meio das avaliações deste em duas áreas com características distintas;
- Avaliação da circulação atmosférica em ambas as regiões e o impacto desta na dispersão das concentrações de ozônio e de seus principais precursores;

- Identificação do impacto de determinadas tipologias de fontes de emissão de poluentes atmosféricos no processo de formação de ozônio.

2. Caracterização das Áreas de Estudo

2.1. Aspectos geoeconômicos

Segundo o estudo de caracterização e tendências da rede urbana do Brasil (OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES, 2009a), as regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro, consideradas as duas maiores do país, constituem metrópoles com inserção na economia em escala global.

A RMSP constitui o maior pólo industrial da América Latina e possui o maior produto interno bruto do país, que representa, aproximadamente, 18% do PIB nacional segundo o IBGE (2008). Com mais de 19 milhões de habitantes, a região é formada por 39 municípios e ocupa uma área de aproximadamente 8000 km². Os índices de densidade demográfica na RMSP atingem valores superiores a 9000 habitantes/km² em municípios como Diadema, Osasco, Carapicuíba e São Caetano do Sul (OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES, 2009b). A RMSP também conta com uma grande quantidade de indústrias com alto potencial poluidor e com uma frota veicular que representa, aproximadamente, 20% da frota nacional.

Situada no Planalto Paulista, a RMSP está inserida na Bacia do Alto Tietê e possui altitudes variando entre 700 e 900 m (MIRANDA, 2001). É circundada por formações topográficas que incluem a Serra do Mar e a Serra da Cantareira e também conta com a presença de grandes represas. A configuração topográfica da região, ilustrada na Figura 2-1, assim como a ocupação dessa área, induz a ocorrência de diversos fenômenos de escala local que atuam na dispersão de poluentes na região, como será discutido adiante.

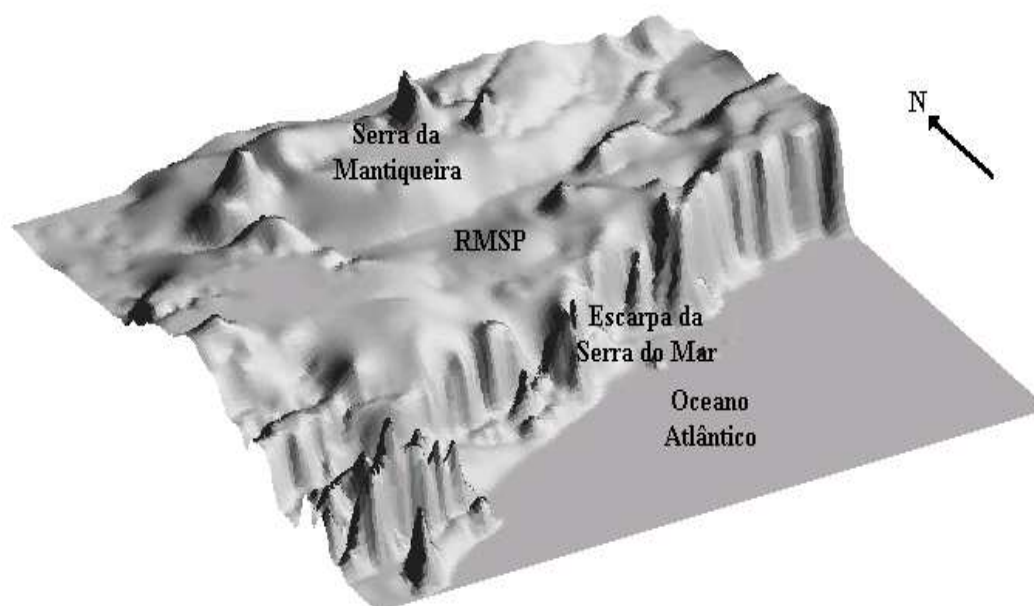


Figura 2-1: Visão tridimensional da RMSP, Serra da Mantiqueira, Serra do Mar e parte do litoral Paulista (Fonte: FREITAS, 2003).

A RMRJ ocupa uma área total equivalente a apenas 11% da área do Estado do Rio de Janeiro. Com cerca de 4830 km², a região engloba 17 municípios com mais de 11 milhões de habitantes o que representa quase 75% da população do Estado (OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES, 2009a). O crescimento desordenado da região torna-se mais nítido a partir da avaliação da densidade demográfica que supera os 5000 habitantes/km² nos municípios do Rio de Janeiro, Belford Roxo, Niterói e São João de Meriti. Vale destacar que o município de São João de Meriti possui o maior índice de densidade demográfica do Brasil com mais 13000 habitantes/km² (FUNDAÇÃO CIDE, 2008). Na RMRJ encontra-se a segunda maior concentração de fontes emissoras do país distribuídas em sete distritos industriais e em diversas vias de tráfego pelas quais circulam mais de 2,8 milhões de veículos (FUNDAÇÃO CIDE, 2008).

Além dos problemas associados ao grande número de fontes de emissão de poluentes atmosféricos, a qualidade do ar na RMRJ ainda sofre complicações por conta de diversos fatores como a topografia acidentada da região, a ocupação desordenada do solo, a presença de grandes corpos d'água e condições atmosféricas que dificultam o processo de dispersão dos poluentes. A partir destas considerações, foram definidas áreas homogêneas na RMRJ em termos dos mecanismos responsáveis pela dispersão atmosférica dos poluentes. Essas áreas são conhecidas como Bacias

Aéreas (FEEMA/GTZ, 1995). Para a RMRJ foram determinadas quatro bacias aéreas cuja distribuição espacial pode ser visualizada na Figura 2-2:

- Bacia Aérea I: localizada na Zona Oeste da região possui cerca de 730 km² de área. Está inserida na Bacia Hidrográfica da Baía de Sepetiba. Engloba a região administrativa de Santa Cruz e Campo Grande (ambas localizadas no Município do Rio de Janeiro), além dos municípios de Itaguaí, Seropédica, Paracambi, Queimados, Japeri e Nova Iguaçu.
- Bacia Aérea II: compreende parte do Município do Rio de Janeiro englobando os bairros de Jacarepaguá e da Barra de Tijuca. Ocupa área de aproximadamente 140 km².
- Bacia Aérea III: abrange a Zona Norte do Município do Rio de Janeiro e parte dos Municípios da Baixada Fluminense (Belford Roxo, Duque de Caxias, Japerí, Magé, Mesquita, Nilópolis, Nova Iguaçu, Queimados e São João de Meriti). Possui em torno de 700 km².
- Bacia Aérea IV: localizada a leste da Baía de Guanabara, ocupa uma área em torno de 830 km². Compreende os municípios de Niterói, São Gonçalo e Maricá.

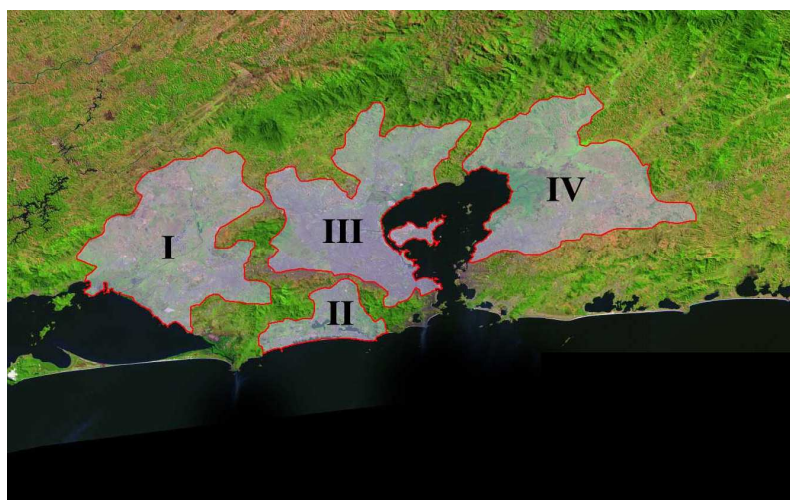


Figura 2-2: Bacias Aéreas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Fonte: FEEMA, 2004).

2.2. Caracterização Climática

Para identificação dos aspectos climatológicos gerais em ambas as regiões de interesse os resultados das normais climatológicas produzidos entre 1961 e 1990 por duas estações meteorológicas pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 1992) foram analisados. Para caracterização da RMSP e da RMRJ foram consideradas as respectivas estações: São Paulo (latitude: 23,30° S e longitude: 46,37° W) e Rio de Janeiro (latitude: 22,55° S e longitude: 43,10° W). As médias climatológicas referentes à precipitação acumulada, temperatura do ar, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, duração do brilho solar e nebulosidade para ambas as estações consideradas podem ser observadas na Figura 2-3. Todos os parâmetros considerados, em geral, apresentaram um comportamento similar refletindo a influência da circulação de grande-escala.

De acordo com as normais climatológicas, durante o verão e a primavera, os maiores índices pluviométricos são registrados na estação São Paulo. As maiores diferenças correspondem, principalmente, aos meses de janeiro e fevereiro. Entre os meses de maio e setembro, os valores médios referentes a ambas as estações são mais baixos e bastante similares sendo ligeiramente superiores na estação Rio de Janeiro. Vale ressaltar que a região Sudeste do Brasil, da qual ambas as regiões de interesse fazem parte, é caracterizada por uma estação seca bem definida, durante o inverno, e uma estação chuvosa, no verão, associada à ocorrência de chuvas convectivas. Fenômenos de escala sinótica como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as frentes frias, a posição do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e o Vórtice Ciclônico de Ar Superior atuam no regime de precipitação da região (MINUZZI et al., 2007). A precipitação também é regida por aspectos relacionados às características geográficas da região.

Em relação à temperatura média do ar, são observados maiores valores durante o ano todo na estação Rio de Janeiro. Em média, a diferença média ficou em torno de 4,5°C. As diferenças na média das temperaturas máximas e mínimas (não mostrado na figura) revela valores de 2,3 °C e 5,5 °C. Os meses de maio, junho e julho foram os que registraram as maiores diferenças na temperatura do ar. Segundo Carvalho (2006), a temperatura do ar possui uma significativa importância nos estudos referentes à qualidade do ar, uma vez que esta reflete o balanço das trocas energéticas entre a superfície e a atmosfera, assim como os resultados da advecção

(transporte horizontal) de ar frio ou quente impostos por circulações atmosféricas de micro, meso ou de escala sinótica.

O comportamento médio mensal da pressão atmosférica foi bastante similar revelando, conforme o esperado, maiores valores durante o inverno por conta da posição do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, mais próximo do continente, e menores valores durante o verão.

Em ambas as localidades, a umidade relativa do ar apresentou pouca variação nos valores médios mensais, provavelmente, por conta da proximidade com o oceano. Mesmo na RMSP, localizada a aproximadamente 70 km da linha de costa, o transporte de umidade proveniente do oceano é bastante significativo (FREITAS, 2003). A maior diferença registrada foi de apenas 3% na estação Rio de Janeiro e 6% na estação São Paulo.

Durante todo o ano, maiores valores referentes à duração média do brilho solar são verificados na estação Rio de Janeiro. O contrário pode ser observado em relação à cobertura de nuvens que registrou índices inferiores. Nesta estação, maiores valores da duração do brilho solar, em horas, correspondem aos meses de janeiro e fevereiro. Nesses meses, a diferença encontrada entre as estações é oposta à verificada quando os índices de precipitação foram analisados. Na estação São Paulo, as diferenças encontradas foram inferiores as registradas na estação Rio de Janeiro. No caso de São Paulo, maiores valores foram verificados nos meses de julho e agosto. Nesse período, a cobertura de nuvens apresentou valores mais baixos.

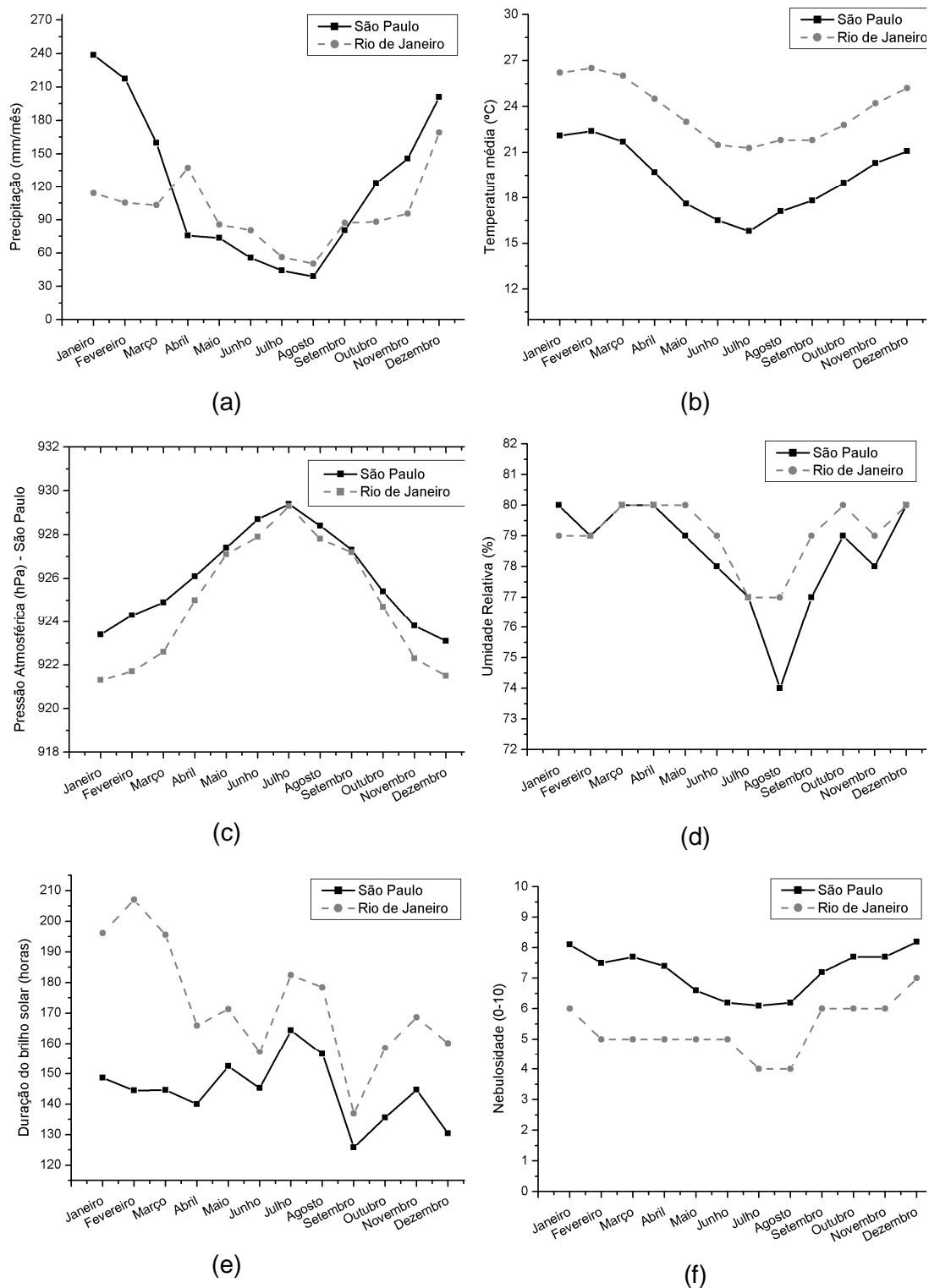


Figura 2-3: Médias climatológicas de (a) precipitação (mm/mês), (b) temperatura do ar (°C), (c) pressão atmosférica (hPa), (d) umidade relativa (%), (e) duração do brilho solar (horas) e (f) nebulosidade (0-10) para as estações climatológicas do INMET: São Paulo e Rio de Janeiro.

2.3. Emissões Atmosféricas

Tanto a CETESB (CETESB, 2009) quanto a FEEMA (FEEMA, 2004) disponibilizam informações referentes à emissão de determinados poluentes atmosféricos para a RMSP e a RMRJ, respectivamente. As emissões estimadas nestes consideram, em geral: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos totais (HCT), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado inalável (PM₁₀). Contudo, a forma de divulgação e a metodologia considerada para o cálculo do inventário é diferente em cada uma destas regiões metropolitanas.

A priori, é importante ressaltar que um inventário de emissões atmosféricas constitui um importante instrumento de planejamento, uma vez que qualifica e quantifica as atividades poluidoras do ar fornecendo informações sobre as características das fontes, principalmente, no que diz respeito à localização, magnitude, frequência, duração e contribuição relativa das emissões (FEEMA, 2004; LOUREIRO, 2005).

Na RMSP, a única informação oficial a respeito das emissões de poluentes atmosféricos é disponibilizada pela CETESB por meio dos relatórios anuais da qualidade do ar. No caso, apenas um valor de emissão total, em toneladas por ano, para toda a região metropolitana é divulgado para cada um dos compostos considerados, não sendo fornecida a distribuição espacial das fontes. De acordo com a CETESB (CETESB, 2009), para as fontes móveis, os fatores de emissão foram obtidos através do *Compilation of Emission Factors* da EPA (*Environmental Protection Agency*) e de ensaios de emissão das próprias fontes. Foram consideradas as ações benéficas do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT) para a definição dos fatores de emissão dos veículos movidos a diesel e para as motocicletas. A metodologia para a estimativa das emissões por fontes industriais não é divulgada no relatório.

Segundo a FEEMA (FEEMA, 2004), as fontes fixas inventariadas foram selecionadas de acordo com o potencial poluidor de cada atividade industrial. No caso, foram consideradas 425 empresas responsáveis por mais de 90% da emissão de poluentes atmosféricos por fontes industriais. Nestas 425 empresas, foram inventariadas 1641 fontes de emissão de poluentes atmosféricos. Para a determinação das taxas de emissão destas fontes foram utilizadas como base, quando possível, medições de chaminé realizadas rotineiramente pelas empresas e registradas pelo órgão ambiental.

No caso destas não estarem disponíveis, as estimativas foram realizadas por meio de fatores de emissão e outros métodos recomendados pela EPA. Para quantificar as emissões veiculares, foram selecionadas 187 vias estruturais e arteriais consideradas como as mais significativas no que tange a circulação de veículos. A taxa de emissão considerada para um determinado poluente foi calculada multiplicando-se o número de veículos pela distância percorrida no trecho da via e pelo fator de emissão específico referente ao tipo de veículo (carro, ônibus ou caminhão).

Considerando os resultados gerais dos inventários de emissão realizados na RMSP e na RMRJ é possível identificar muitas peculiaridades. Nos itens 2.3.1 e 2.3.2 serão discutidos os resultados obtidos considerando as fontes móveis e fixas, respectivamente.

2.3.1. Fontes Móveis

O número estimado de veículos em circulação é de aproximadamente 9.200.000 na RMSP (CETESB, 2009) e de 2.880.000 na RMRJ (FUNDAÇÃO CIDE, 2008), ou seja, a frota em circulação na RMRJ representa apenas 40% do total de veículos em uso na RMSP. A contribuição percentual dos veículos na emissão de CO, HC, NO_x, SO_x e MP em cada uma das regiões metropolitanas pode ser observada na Tabela 2-1. Através desta, torna-se nítida que a contribuição de emissão veicular é bem menor na RMRJ.

Tabela 2-1: Contribuição percentual da emissão veicular de CO, HC, NO_x, SO_x e MP na RMSP e na RMRJ.

Poluente	RMSP*	RMRJ**
CO	97%	98%
HC	97%	67%
NO _x	96%	66%
SO _x	32%	12%
MP ¹	48%	32%

Fonte: *CETESB (2008); **FEEMA (2004).

¹ A contribuição percentual relativa ao material particulado foi calculada utilizando apenas as emissões provenientes de fontes fixas e móveis, desconsiderando emissões provenientes de ressuspensão, uma vez que estes dados não estão disponíveis para a RMRJ.

Diferenças ainda mais significativas são obtidas quando são comparados os valores brutos de emissão veicular, em toneladas por ano, para cada um dos compostos considerados em ambos os inventários (Tabela 2-2). Conforme o esperado, a taxa de emissão de todos os compostos foi superior na RMSP. A proporção das taxas de emissão de monóxido de carbono, dos hidrocarbonetos, dos óxidos de nitrogênio e do material particulado, na RMRJ, em relação à RMSP, é de 21%, 30%, 18% e 26%, respectivamente. No caso dos óxidos de enxofre, essa proporção é bem maior superando os 92%. As proporções verificadas, bem diferentes da proporção de veículos, podem indicar tanto problemas referentes a diferenças na metodologia de cálculo destes inventários quanto a diferenças no que tange a composição da frota veicular. A composição da frota veicular nas duas regiões metropolitanas, de acordo com o combustível utilizado, pode ser observada na Tabela 2-3. Na RMSP pode-se destacar a contribuição dos veículos movidos a álcool (bem maior do que no caso da RMRJ). Já a RMRJ destaca-se pela proporção da frota que circula com veículos movidos a gás natural.

Tabela 2-2: Taxas de emissão veicular (x 1000 ton/ano) de CO, HC, NO_x, SO_x e MP na RMSP e RMRJ.

Poluente	RMSP*	RMRJ**
CO	1478,8	314,4
HC	182,4	53,4
NO _x	330,9	60,2
SO _x	8,1	7,5
MP	29,5	7,8

Fonte: *CETESB (2008); **FEEMA (2004).

Tabela 2-3: Composição da frota veicular de acordo com o tipo de combustível utilizado na RMSP e na RMRJ.

Combustível	RMSP*	RMRJ**
Álcool	12,3%	4,5%
Gasolina	65%	75%
Diesel	5,6%	6,2%
Gás Natural	-	14,2%
Outros	17,1%	-

Fonte: *CETESB (2008); **LIMA/COPPE/UFRJ & FEEMA (2006).

2.3.2. Fontes Fixas

Conforme o exposto anteriormente, a emissão industrial na RMRJ é mais significativa do que na RMSP, principalmente no que tange as emissões de HC, NO_x e SO_x (Tabela 2-4). De acordo com a FEEMA (FEEMA, 2004), as emissões industriais são provenientes, principalmente, de indústrias petroquímicas e de geração de energia. As indústrias petroquímicas são responsáveis por 50% das emissões industriais de SO_x, 38% de NO_x, 33% de CO, 20% de MP e de mais de 90% das emissões de HC na RMRJ. Já as indústrias de geração de energia contribuem com 36% do total de emissões de SO_x, 46% de NO_x e 51% de MP.

Tabela 2-4: Contribuição percentual da emissão industrial de CO, HC, NO_x, SO_x e MP na RMSP e na RMRJ.

Poluente	RMSP*	RMRJ**
CO	3%	2%
HC	3%	33%
NO _x	4%	34%
SO _x	68%	88%
MP ¹	52%	58%

Fonte: *CETESB (2008); **FEEMA (2004).

Na RMRJ são observadas maiores taxas de emissão industrial de HC, NO_x e SO_x como pode ser visto na Tabela 2-5. No caso, a emissão de HC e de NO_x foi aproximadamente duas vezes maior na RMRJ e a de SO_x foi 3 vezes superior. As emissões industriais na RMSP apresentam maiores valores para o CO e para o MP. A proporção foi de 6 para 1 no caso de CO e de 3 para 1 para o MP.

Tabela 2-5: Taxas de emissão industrial (x 1000 ton/ano) de CO, HC, NO_x, SO_x e MP na RMSP e RMRJ.

Poluente	RMSP*	RMRJ**
CO	38,6	6,3
HC	12,0	25,9
NO _x	14,0	30,3
SO _x	17,1	55,8
MP	31,6	10,6

Fonte: *CETESB (2008); **FEEMA (2004).

2.4. O Monitoramento da Qualidade do Ar e o Ozônio Troposférico

Na RMSP, o monitoramento da qualidade do ar teve início na década de 70, através da CETESB, com a instalação da rede manual de monitoramento que realiza medições das concentrações de dióxido de enxofre, fumaça e material particulado. A rede automática de amostragem de gases foi implantada em 1981. Atualmente, de acordo com a CETESB (CETESB, 2008), a rede automática de monitoramento na RMSP é composta por 22 estações fixas e 2 estações móveis que monitoram os seguintes parâmetros: partículas inaláveis, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, ozônio, monóxido de carbono, direção do vento, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura, pressão atmosférica e incidência de radiação solar. A rede de amostragem manual conta com 9 estações que monitoram fumaça, 9 que realizam amostragem de partículas totais em suspensão e 4 que medem partículas inaláveis finas ($PM_{2,5}$). A Figura 2-4 ilustra a distribuição espacial das estações de monitoramento da CETESB na RMSP.

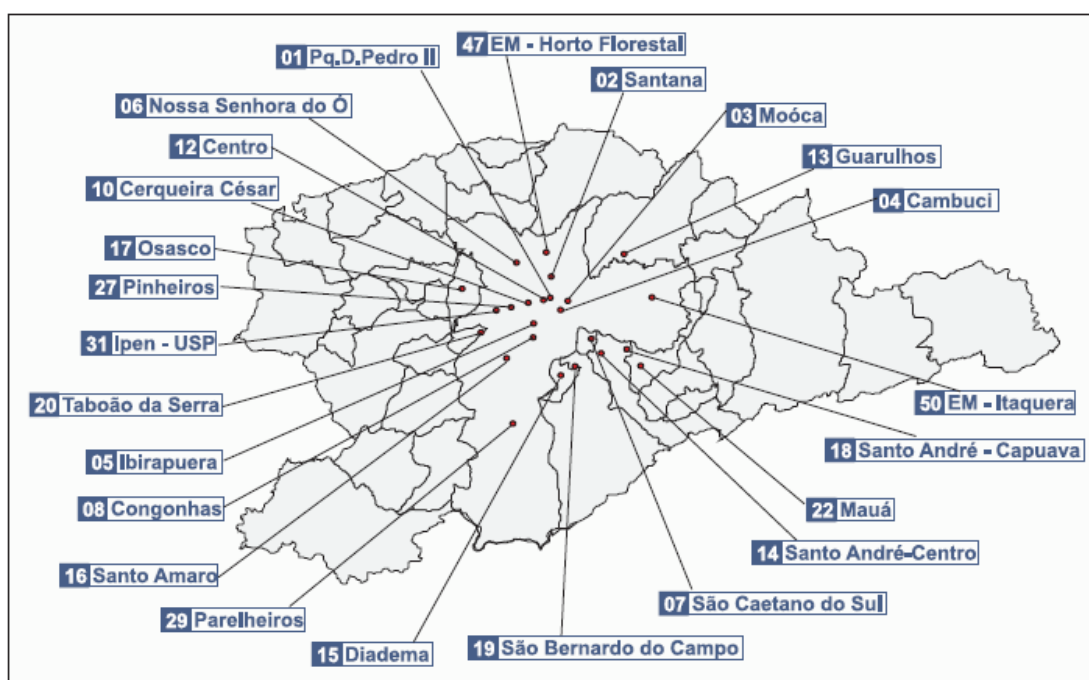


Figura 2-4: Distribuição espacial das estações de monitoramento da CETESB na RMSP (Fonte: CETESB, 2008).

O monitoramento da qualidade do ar, na RMRJ, teve início no final da década de 60, com a implantação de uma rede manual de monitoramento, que ainda está em operação e realiza medições de partículas totais em suspensão (PTS) a cada seis dias. Contudo, com o crescimento e desenvolvimento desta região surgiu à

necessidade da realização de um monitoramento contínuo e mais abrangente no que tange a quantificação de uma maior gama de poluentes. Assim, a partir do final da década de 90, o Governo do Estado do Rio de Janeiro, através da FEEMA, adquiriu cinco estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar, bem como ampliou a rede de amostragem manual através do monitoramento das partículas inaláveis (PI). Desde então, outros órgãos ambientais como as Secretarias Municipais de Meio Ambiente do Município do Rio de Janeiro, a partir do ano 2000, e do Município de Belford Roxo, no ano de 2002, também adquiriram e passaram a operar estações de monitoramento da qualidade do ar e de alguns parâmetros meteorológicos. Nos últimos anos, a iniciativa privada, em cumprimento a exigências ambientais, também passou a realizar o monitoramento da qualidade do ar em algumas localidades da região. A distribuição espacial das estações de monitoramento na RMRJ, de acordo com a tipologia de amostragem, está apresentada na Figura 2-5.

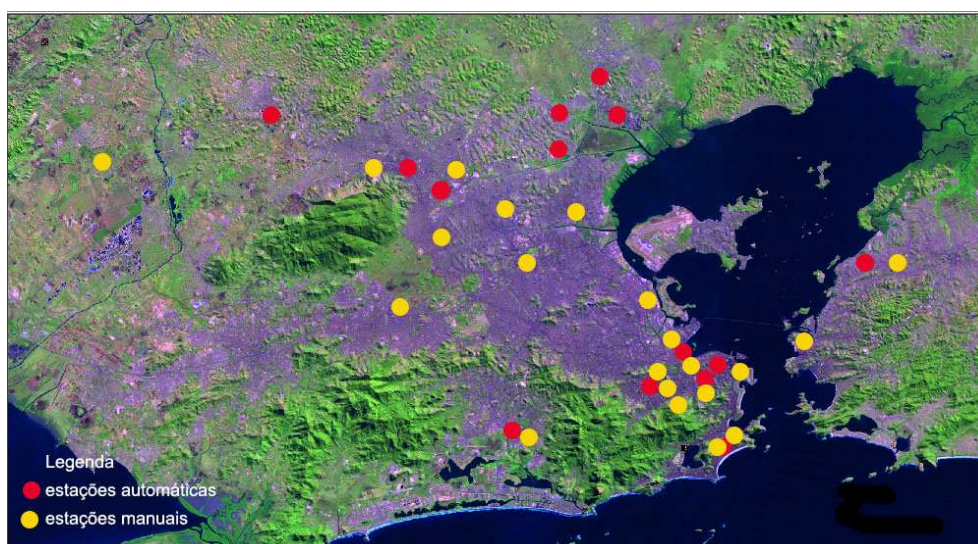


Figura 2-5: Distribuição espacial das estações de monitoramento contínuo e intermitente na RMRJ. Fonte: Carvalho, 2006.

Ambas as redes de monitoramento da qualidade do ar registram problemas no que tange, principalmente, as concentrações de ozônio e de material particulado (CETESB, 2008; FEEMA, 2008). De acordo com os relatórios anuais de qualidade do ar produzidos pela CETESB (CETESB, 2003; CETESB, 2008), o número médio de dias com ultrapassagens ao padrão de 1 hora estabelecido para o ozônio ($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na RMSP é superior a 68 dias por ano. O número de dias com registro de ultrapassagens ao PNQA, considerando dados de concentração de ozônio entre os anos de 1999 e 2007, pode ser observado na Tabela 2-6. Desde 2002, em média, foi registrada pela rede de monitoramento em operação na RMSP uma diminuição no

número de dias quando os dados de concentração de ozônio foram superiores ao PNQA. Apenas no ano de 2007, foi registrado um aumento no número de violações (em relação ao ano anterior) que atingiu o valor mais alto desde 2004. Também é importante destacar que, na RMSP, todas as estações que possuem amostradores de ozônio registram violações. Isto indica que o problema dos elevados índices de concentração de ozônio é regional e não apenas local. Na RMRJ, o grande número de violações ao PNQAR registrados no ano a partir do ano de 2004, referiu-se principalmente, as estações de monitoramento instaladas na área de influência do pólo petroquímico e próximas a duas grandes rodovias: a Washington Luiz e a Rio - Teresópolis (FEEMA, 2008). Como pode ser observado na Tabela 2-7, o número de dias com violações registradas na RMRJ é bem superior aos registrados na RMSP durante o mesmo período. Em 2005, quando o maior número foi verificado, mais de 35% dos dias do ano apresentaram índices de qualidade do ar inadequada na região. Vale ressaltar que a extensão do problema do ozônio troposférico na RMRJ ainda não é totalmente conhecida uma vez que boa parte da região não é coberta pela rede de monitoramento existente.

Tabela 2-6: Número de dias com concentrações de ozônio superiores ao determinado pelo PNQA registrados no período entre 1999 e 2008 na RMSP.

Ano	Nº de dias com violação ao PNQA
1999	90
2000	73
2001	84
2002	89
2003	77
2004	62
2005	51
2006	52
2007	72
2008	49

Fonte: CETESB, 2003; CETESB, 2009.

Tabela 2-7: Número de dias com concentrações de ozônio superiores ao determinado pelo PNQA registrados no período entre 2004 e 2008 na RMRJ.

Ano	Nº de dias com violação ao PNQA
2004*	79
2005	133
2006	109
2007	155
2008*	79

Fonte: Elaboração Própria a partir dos dados cedidos pela FEEMA.

* Anos com dados incompletos (em 2004, dados a partir de março e, em 2008, até o dia 02 de dezembro).

Segundo a CETESB (CETESB, 2009), o comportamento médio mensal das concentrações de ozônio e o número de dias com violação ao PNQA registrados na RMSP indicam a ocorrência de maiores valores durante a primavera e verão, respectivamente. O mesmo foi identificado por Carvalho (2006) para a RMRJ. Nesse estudo, as estações alocadas na região do Pólo Petroquímico de Duque de Caxias não haviam sido incluídas. Contudo, quando incluídas, o mesmo comportamento não é verificado para a RMRJ. O número de dias com ultrapassagens ao PNQA de acordo com o mês pode ser observado nas Figuras 2-6 e 2-7 para as RMSP e RMRJ, respectivamente. Através desta, torna-se claro que o perfil é similar no primeiro trimestre do ano (JAN-FEV-MAR). Entre abril e junho, o número de dias com ultrapassagens ao padrão cai significativamente na RMSP. Somente a partir do mês de agosto, o número começa a aumentar novamente. Esse comportamento não é identificado na RMRJ que apresenta um número elevado de dias com violações durante todo o ano. As diferenças verificadas entre as duas regiões podem ser devidas ao padrão de emissão (principalmente, a maior contribuição de fontes industriais no caso da RMRJ) ou a diferenças nas condições meteorológicas dominantes.

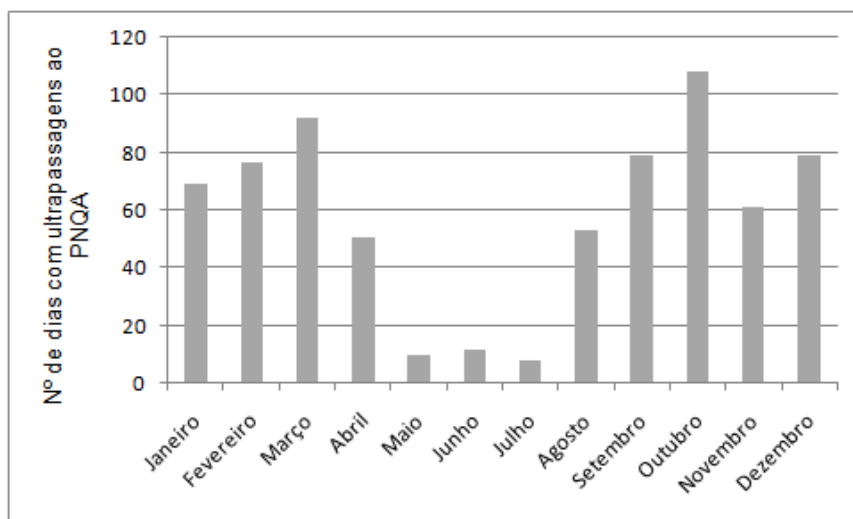


Figura 2-6: Número de dias com ultrapassagens do PNQA estabelecido para o ozônio, por mês, registrados entre 1999 e 2008, na RMSP (Fonte: CETESB, 2009).

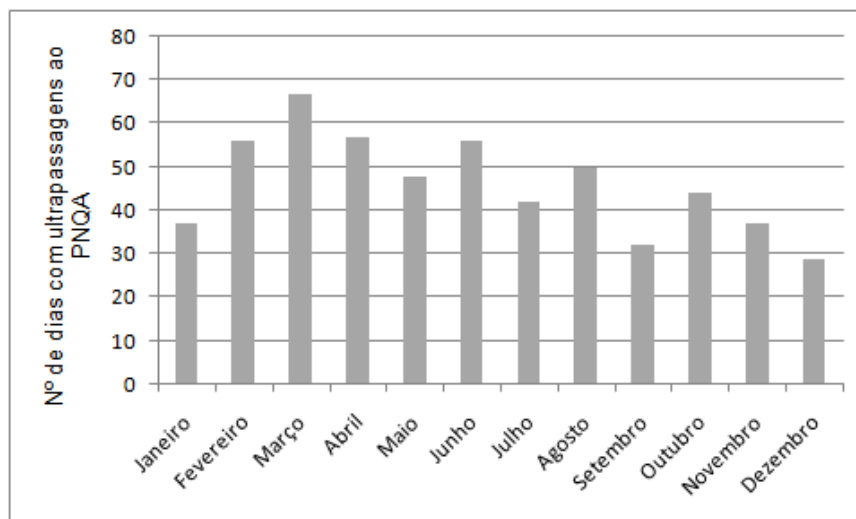


Figura 2-7: Número de dias com ultrapassagens do PNQA estabelecido para o ozônio, por mês, registrados entre 2004 e 2008, na RMRJ.

3. O modelo BRAMS

3.1. Aspectos Gerais

O modelo atmosférico de mesoescala BRAMS (Contribuições Brasileiras ao *Regional Atmospheric Modeling System* - RAMS, PIELKE et al., 1992, COTTON et al., 2003) vem sendo desenvolvido como parte de um projeto de parceria entre instituições nacionais e internacionais com financiamento da FINEP (empresa Financiadora de Estudos e Projetos), vinculada ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT). Fazem parte do projeto a ATMET (*Atmospheric, Meteorological and Environmental Technologies* – EUA), o CPTEC-INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), a UFCG (Universidade Federal de Campina Grande) e o IAG-USP (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo) entre outras instituições. O principal objetivo do projeto BRAMS é desenvolver uma versão do modelo ajustada aos trópicos e que atenda os centros regionais de previsão do tempo no Brasil.

O modelo RAMS, no qual o BRAMS é baseado, foi desenvolvido pela Universidade do Estado do Colorado – EUA e pela MRC/*ASTER, com o intuito de simular as circulações atmosféricas desde a micro até a grande escala, com a modelagem dos fenômenos de mesoescala sendo sua mais frequente aplicação, principalmente no que se refere à previsão de tempo operacional (FREITAS, 2003). Uma das vantagens de utilização do modelo é a possibilidade de modificação do código de acordo com a necessidade do usuário. No caso do projeto BRAMS, diversas implementações foram efetuadas no modelo original. Dentre estas, podem ser destacadas a inclusão de: (a) parametrização de cumulus rasos e de uma nova parametrização de cumulus profundos baseada em um esquema de fluxo de massa com diferentes fechamentos; (b) novos dados de vegetação com 1 km de resolução (derivados do *International Geosphere-Biosphere Programme* – IGBP, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE e do INPE); (c) procedimento para assimilação de dados de umidade do solo heterogêneos; (d) modelo de interação entre a superfície e a atmosfera SIB2 (*Simple Biosphere Model*); (e) inclusão do esquema TEB (*Town Energy Budget*) e do Módulo Fotoquímico Simplificado (SPM); (f) inclusão do esquema CATT (*Coupled Aerosol and Tracer Transport*); (g) melhoria na portabilidade e qualidade do software; (h) reprodutibilidade binária; (i) melhoria no desempenho em simulações em modo serial e paralelo (CPTEC/INPE, 2007).

O modelo em questão consiste em um conjunto completo de equações que governam a evolução do estado atmosférico, baseadas nas leis de movimento de Newton e na termodinâmica de um fluido que incluem parametrizações dos diversos processos físicos presentes nestas equações (como, por exemplo, parametrizações para os processos turbulentos, radiativos e convectivos). O modelo também conta com um esquema de aninhamento múltiplo de grades que permite a resolução das equações do modelo, de forma simultânea, sob qualquer número de grades computacionais com diferentes resoluções espaciais (FREITAS, 2003). No caso, grades menores, com maior resolução (ou menor espaçamento de grade), são utilizadas para simular detalhes dos sistemas atmosféricos de menor escala, como, por exemplo, o escoamento sobre terrenos complexos ou circulações termicamente induzidas pela superfície. Já as grades maiores, com maior espaçamento de grade, são utilizadas para modelar o ambiente destes sistemas menores, fornecendo as condições de fronteira para as grades com maior resolução, e modelando os fenômenos atmosféricos de larga escala que interagem com os sistemas de mesoescala resolvidos nas grades mais finas. Além de representar fisicamente os processos radiativos, transportes convectivos associados às nuvens e à turbulência seca, o modelo revela-se adequado para a avaliação dos efeitos de fatores locais, tais como a topografia, a presença de corpos d'água de grandes dimensões e áreas urbanas, aspectos de interesse do presente estudo.

O BRAMS utiliza grade alternada, do tipo C de Arakawa (MESSINGER & ARAKAWA, 1976). Nesse caso, as variáveis termodinâmicas e de umidade são definidas nos mesmos pontos de grades e as componentes do vento (u , v e w) são intercaladas em pontos de grades correspondentes a $\Delta x/2$, $\Delta y/2$ e $\Delta z/2$, respectivamente.

Assim como no modelo RAMS, cada simulação no BRAMS é configurada através de um arquivo do tipo lista de variáveis, o RAMSIN. Através deste é possível definir os aspectos relacionados às grades (tamanho, localização, número, número de pontos de grade, espaçamento horizontal, número de níveis verticais e camadas de solo, espaçamento vertical e tempo de simulação), ao tipo de inicialização do modelo (homogênea, quando um valor do dado de entrada para cada nível vertical é considerado, ou heterogênea, quando os dados são interpolados para a grade do modelo também possuindo variação horizontal), às opções físicas e numéricas, etc. (FREITAS, 2003; CPTEC/INPE, 2007).

3.2. Parametrizações Físicas

3.2.1. Radiação

Quatro opções de parametrização dos processos radiativos estão incluídas no modelo BRAMS. A parametrização mais simples, baseada em Mahrer & Pielke (1977), é bastante eficiente computacionalmente, porém, não inclui o efeito das nuvens. Este esquema considera, para a parametrização da radiação de onda curta, o espalhamento por moléculas de oxigênio, ozônio e dióxido de carbono é considerado de forma empírica. Para a radiação de onda longa, a emissão e absorção de radiação infravermelha do dióxido de carbono e do vapor d'água são consideradas. Contudo, a presença de nuvens ou de material condensado não é abordada. O esquema de Chen & Cotton (1983) oferece, para a radiação de onda curta, uma solução completa da equação de transferência radiativa. Para a radiação de onda longa, o esquema possui 3 bandas que, assim como no caso da radiação de onda curta, parametriza o efeito de nuvens. O terceiro esquema, baseado em Harrington (1997), é mais completo uma vez que contempla diferentes fases da nuvem (inclusive considerando os diferentes efeitos quando há água ou presença de gelo) e os efeitos do perfil de ozônio na absorção da radiação solar. Uma opção nas versões mais recentes do modelo BRAMS, o modelo CARMA (*Community Aerosol & Radiation Model for Atmospheres* – TOON et al., 1988, WESTPHAL et al., 1988, WESTPHAL & TOON, 1991) resolve, além da equação de transferência radiativa, as equações de continuidade da concentração do número e volume de partículas de aerossóis e da concentração de água, a conservação de energia e de momento numa coluna atmosférica, entre outras.

3.2.2. Cumulus e Microfísica

Nas grades maiores, ou seja, de menor resolução, o modelo utiliza a parametrização de cumulus ou parametrização convectiva de Kuo (1974) para representar os processos convectivos. Tal parametrização assume que a convecção age no sentido de consumir a instabilidade convectiva fornecida pelas escalas maiores. Outro esquema, que também se encontra disponível, considera as nuvens como duas circulações estacionárias causadas por correntes ascendentes e descendentes (GRELL, 1993). Nas grades maiores, a parametrização convectiva atua na redistribuição vertical de calor e umidade em uma coluna da grade em regiões convectivamente instável e quando a resolução horizontal é muito pequena para o modelo gerar sua própria

circulação convectiva. No caso de grades com menor espaçamento horizontal, a parametrização de microfísica pode ser ativada.

Descrito por Walko et al. (1995), o código microfísico utilizado pelo modelo representa vapor d'água, gotículas de nuvem e gotas de chuva, gelo primário, neve e agregados, graupel e granizo na forma de uma distribuição gama generalizada. Dessa forma, são considerados por este esquema processos de mudança de fase que ocorrem com a água nos estados líquido, sólido e gasoso incluindo também as trocas de calor envolvidas durante as mudanças de fase (BIAZETO, 2007). De acordo com Martins (2006), as gotículas de nuvem, que, assim como as gotas de chuva, podem estar super-resfriadas são consideradas pequenas para a precipitação (o que não acontece com as demais categorias).

O modelo BRAMS, conforme citado anteriormente, também conta com uma parametrização de cumulus rasos. Souza & Da Silva (2003) verificaram, ao longo da integração, o impacto considerável na utilização desta parametrização, principalmente, no que tange os perfis termodinâmicos de temperatura e umidade na atmosfera.

3.2.3. Turbulência

Quatro opções de parametrização para os coeficientes de difusão turbulenta estão disponíveis no modelo. Baseada em Smagorinsky (1963), a primeira opção calcula os coeficientes de difusão horizontal como o produto da taxa de deformação horizontal (gradientes horizontais da velocidade do vento) e do quadrado da escala de comprimento sendo a difusão vertical parametrizada através da energia cinética turbulenta, prognosticada pelo modelo de acordo com o esquema proposto por Mellor & Yamada (1982). A segunda opção só se diferencia da primeira no que se refere aos coeficientes verticais, para os quais é usado o análogo unidimensional do esquema de Smagorinsky. É importante destacar que a escolha da parametrização de turbulência a ser utilizada pelo modelo depende da relação entre as escalas horizontal e vertical consideradas. No caso, as duas primeiras opções apresentadas mostram-se apropriadas quando a escala horizontal é muito maior do que a vertical de forma que os movimentos convectivos dominantes não sejam resolvidos. A terceira opção calcula os coeficientes de difusão na horizontal e na vertical como um produto entre o tensor de Reynolds e o quadrado da escala de comprimento, enquanto a última opção utiliza o esquema de Deardorff (1980). O esquema de Deardorff (1980), que utiliza a energia cinética turbulenta para o cálculo dos coeficientes, é mais apropriado para simulações

de grandes turbilhões (LES- *Large Eddy Simulation*) quando é considerado que os movimentos turbulentos resolvidos pelo modelo realizam a maior parte do transporte (FREITAS, 2003).

3.2.4. Superfície vegetada e urbana

A parametrização para superfície vegetada e urbana no BRAMS é feita, respectivamente, através dos modelos LEAF (*Land Ecosystem-Atmosphere Feedback model* - WALKO et al., 2000) e TEB (*Town Energy Budget* – MASSON, 2000).

Segundo Freitas (2003), o LEAF representa os aspectos da superfície como vegetação, solo, lagos, oceanos, cobertura de neve e a influência entre estes e destes na atmosfera. O modelo conta com equações prognósticas para parâmetros como (a) temperatura e umidade do solo em diversas camadas, (b) temperatura da vegetação e da água na superfície, (d) massa da cobertura de neve e energia termal para múltiplas camadas e (e) temperatura e razão de mistura do vapor d'água do dossel. São consideradas pelas equações prognósticas as trocas turbulentas, condução de calor, difusão de água e percolação nas camadas de solo e neve, transferência radiativa de onda curta e onda longa, transpiração e precipitação. O LEAF possui habilidade em representar variações de escala fina nas características da superfície que variam consideravelmente sobre curtas distâncias. Acoplado ao BRAMS, o modelo permite a existência de múltiplos tipos de superfície, conhecidos como *patches*, numa mesma célula de grade, de forma que cada tipo de superfície ou *patch* ocupe uma fração da grade e seja tratado separadamente. O número de *patches* dentro da célula de grade depende diretamente da resolução do arquivo de ocupação do solo utilizado no modelo e da grade utilizada. Cada *patch* possui sua própria vegetação, camadas de solo, cobertura de neve e ar do dossel de forma que as variáveis prognosticadas são calculadas para todos estes componentes. As versões mais recentes do LEAF utilizadas no BRAMS incluem o índice de vegetação normalizado (NDVI) para a definição dos parâmetros da vegetação, o que permite a variação sazonal destes (CALIXTO, 2008).

Introduzido por Freitas (2003) no modelo RAMS, o esquema TEB é utilizado para simulação dos fluxos turbulentos para a atmosfera, representando a superfície urbana e a subcamada de rugosidade de forma a fornecer, como uma única camada, a condição de fronteira inferior ao modelo. O esquema considera uma geometria de cânion com três superfícies distintas (telhados, paredes e ruas), com temperaturas

distintas, a fim de representar o efeito das construções. No caso, para os fluxos de condução provenientes e/ou para o interior das construções ou ruas, cada tipo de superfície é discretizada em várias camadas e as equações que descrevem a evolução da temperatura das camadas são baseadas em considerações do balanço de energia (MASSON, 2000; FREITAS, 2003, GOUVÊA, 2007). Os fluxos antropogênicos de calor e umidade em decorrência de fontes veiculares e industriais são considerados no TEB podendo influenciar o balanço de ar no cânion e a atmosfera diretamente (FREITAS, 2003, FREITAS et al., 2007).

3.3. O Módulo Fotoquímico Simplificado

O módulo fotoquímico simplificado, denominado SPM-BRAMS (*Simple Photochemical Model*), foi inicialmente introduzido na versão 4.3 do modelo RAMS (FREITAS et al. 2005), durante a execução do Projeto Temático FAPESP nº 96/1403-4 – “Meteorologia e Poluição Atmosférica em São Paulo”. O desenvolvimento deste módulo consistiu primeiramente na seleção das principais reações de formação e de consumo de ozônio na troposfera, com o objetivo de realizar previsões deste gás em caráter operacional. As reações foram selecionadas com base no mecanismo químico SAPRC-99 (*Statewide Air Pollution Research Center*), desenvolvido por Carter (2000). As reações utilizadas pelo SPM-BRAMS são apresentadas na Tabela 3-1. Nesta, o símbolo RH representa todos os compostos orgânicos voláteis, exceto o CO e o CO₂; R1 - R15 são as velocidades de reação para cada reação química; [O₂]₀ e [M]₀ representam as concentrações de oxigênio e do ar, consideradas constantes; os *k*'s são as constantes de velocidade; e os *j*'s as taxas de fotólise.

Tabela 3-1: Reações utilizadas no modelo SPM-BRAMS

A) Reações Inorgânicas		
$\text{NO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{NO}_2$	$\text{R1} = k_1 [\text{NO}][\text{O}_2]_0^{1/2}$	(1)
$\text{NO}_2 + h\nu = \text{NO} + \text{O}({}^3\text{P})$	$\text{R2} = j_2 [\text{NO}_2]$	(2)
$\text{O}({}^3\text{P}) + \text{O}_2 + \text{M} = \text{O}_3 + \text{M}$ $\text{M} = \text{ar}$	$\text{R3} = k_3 [\text{O}_2]_0 [\text{M}]_0 [\text{O}({}^3\text{P})]$	(3)
$\text{O}_3 + \text{NO} = \text{NO}_2 + \text{O}_2$	$\text{R4} = k_4 [\text{NO}][\text{O}_3]$	(4)
$\text{O}_3 + \text{NO}_2 = \text{O}_2 + \text{NO}_3$	$\text{R5} = k_5 [\text{NO}_2][\text{O}_3]$	(5)
$\text{O}_3 + h\nu = \text{O}({}^1\text{D}) + \text{O}_2$	$\text{R6} = j_6 [\text{O}_3]$	(6)
$\text{O}({}^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O} = 2\text{HO}\cdot$	$\text{R7} = k_7 [\text{H}_2\text{O}][\text{O}({}^1\text{D})]$	(7)
$\text{HO}\cdot + \text{CO} = \text{HO}_2\cdot + \text{CO}_2$	$\text{R8} = k_8 [\text{CO}][\text{HO}\cdot]$	(8)
$\text{HO}_2\cdot + \text{NO} = \text{HO}\cdot + \text{NO}_2$	$\text{R9} = k_9 [\text{NO}][\text{HO}_2\cdot]$	(9)
$\text{HO}_2\cdot + \text{O}_3 = \text{HO}\cdot + 2\text{O}_2$	$\text{R10} = k_{10} [\text{HO}_2\cdot][\text{O}_3]$	(10)
B) Reações Orgânicas		
$\text{RH} + \text{HO}\cdot = \text{H}_2\text{O} + \text{RO}_2$	$\text{R11} = k_{11} [\text{RH}][\text{HO}\cdot]$	(11)
$\text{RO}_2\cdot + \text{NO} = \text{NO}_2 + \text{RCHO} + \text{HO}_2$	$\text{R12} = k_{12} [\text{RO}_2\cdot][\text{NO}]$	(12)
$\text{RCHO} + \text{HO}\cdot = \text{RCO-O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$\text{R13} = k_{13} [\text{RCHO}][\text{HO}\cdot]$	(13)
$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	$\text{R14} = k_{14} [\text{HO}_2][\text{HO}_2]$	(14)
$\text{HO}_2 + \text{RO}_2 = \text{ROOH}$	$\text{R15} = k_{15} [\text{HO}_2][\text{RO}_2]$	(15)

Fonte: FREITAS et al., 2005.

É importante destacar que o agrupamento dos compostos orgânicos voláteis, representados pela espécie RH, apresenta uma vantagem no caso da falta de informações detalhadas a respeito da emissão desses compostos. Contudo, existe a necessidade de uma melhor representação destes no código. Segundo Martins & Andrade (2008), considerando a análise das perturbações das emissões antropogênicas de NO e de COVs, foi possível identificar que a formação do ozônio na RMSP é mais sensível às variações dos COVs. No que diz respeito à reatividade dos compostos que possuem o maior potencial para a formação de ozônio foram destacados os aromáticos, alcenos, alcanos, aldeídos e formaldeídos.

Atualmente, as constantes de velocidade de reação (k) e as taxas de fotólise (j) são obtidas com base nos valores utilizados pelo modelo fotoquímico CIT (*Caltech Institute of Technology* - MCRAE, 1982) e em valores obtidos na literatura (MCRAE et. al., 1992; JACOBSON, 1999). As constantes de velocidade k são calculadas e corrigidas em função da temperatura por meio da equação de Arrhenius, expressa por:

$$k(T) = A \cdot (T/300)^B \cdot E^{-E_a/RT} \quad 3-1$$

sendo k a constante de velocidade, A a taxa com que as colisões ocorrem e que podem levar a reação, T a temperatura, B um fator de correção, E_a a energia de ativação e R a constante universal dos gases.

A integração no tempo realiza um *time-splitting* de forma que passos de tempo submúltiplos do passo de tempo do BRAMS sejam utilizados na sub-rotina responsável pelos cálculos das equações de transformação química.

4. Metodologia

4.1. Períodos de Estudo

4.1.1. Região Metropolitana de São Paulo

Foram selecionados para simulação períodos que caracterizassem episódios de poluição do ar no que tange o poluente ozônio. A primeira etapa para a escolha destes períodos deu-se através da análise dos máximos diários de concentração de ozônio registrados na RMSP por conta da maior disponibilidade de dados. Ao todo foram selecionados quatro períodos, entre 2003 e 2006, onde foram identificadas concentrações acima dos $160 \mu\text{g.m}^{-3}$, valor definido como PNQA para o ozônio pela legislação em vigência. Os períodos selecionados destacaram-se por conta do grande número de violações registradas durante diversos dias consecutivos. Em alguns dos períodos selecionados ocorreram dias em que não foram registradas violações ao padrão. A não ocorrência de violações durante parte dos períodos simulados foi importante para a verificação de fatores que contribuem para a diminuição nas concentrações máximas diárias e para a comparação com os fatores que contribuem para as altas concentrações de O_3 na RMSP. Foram considerados para análise do impacto da mega-cidade de São Paulo na qualidade do ar, principalmente, no que tange as concentrações de ozônio, os seguintes períodos:

- 24 de fevereiro a 05 de março de 2003
- 01 a 10 de setembro de 2004
- 16 a 25 de fevereiro de 2005
- 07 a 17 de janeiro de 2006

Nas Tabelas 4-1, 4-2, 4-3 e 4-4 estão listados, para cada período considerado, o número de estações com dados disponíveis de concentração de ozônio para a RMSP e o número de quantas destas registraram violações ao PNQA estabelecido pela Resolução CONAMA 03/90.

Tabela 4-1: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMSP para o período entre 24 de fevereiro e 05 de março de 2003.

Data	RMSP
24/02/2003	09 (11)
25/02/2003	06 (10)
26/02/2003	03 (10)
27/02/2003	04 (11)
28/02/2003	09 (11)
01/03/2003	08 (11)
02/03/2003	05 (11)
03/03/2003	06 (11)
04/03/2003	09 (11)
05/03/2003	02 (11)

Tabela 4-2: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMSP para o período entre 01 e 10 de setembro de 2004.

Data	RMSP
01/09/2004	01 (11)
02/09/2004	00 (11)
03/09/2004	05 (11)
04/09/2004	00 (11)
05/09/2004	07 (10)
06/09/2004	04 (11)
07/09/2004	07 (11)
08/09/2004	09 (11)
09/09/2004	08 (11)
10/09/2004	09 (11)

Tabela 4-3: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMSP para o período entre 16 e 25 de fevereiro de 2005.

Data	RMSP
16/02/2005	04 (10)
17/02/2005	02 (09)
18/02/2005	05 (10)
19/02/2005	04 (10)
20/02/2005	00 (10)
21/02/2005	00 (10)
22/02/2005	05 (10)
23/02/2005	02 (10)
24/02/2005	05 (10)
25/02/2005	02 (10)

Tabela 4-4: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMSP para o período entre 07 e 17 de janeiro de 2006.

Data	RMSP
07/01/2006	04 (10)
08/01/2006	08 (11)
09/01/2006	04 (11)
10/01/2006	00 (11)
11/01/2006	03 (11)
12/01/2006	00 (11)
13/01/2006	06 (11)
14/01/2006	06 (11)
15/01/2006	02 (11)
16/01/2006	08 (11)
17/01/2006	05 (11)

Complementando o estudo, para a RMSP, o período correspondente à segunda campanha de monitoramento de ozônio do ano de 2006 (de 30 de outubro a 01 de novembro) também será avaliado. Essa campanha de monitoramento estava inserida

no Programa de Pesquisas em Políticas Públicas: Modelos de Qualidade do Ar Fotoquímicos - Implementação para simulação e avaliação das concentrações de ozônio troposférico em regiões urbanas, coordenado pela Prof^a. Dra. Maria de Fátima Andrade (FAPESP, 03/06414-0). Durante este período, alguns experimentos como, por exemplo, o lançamento de sondas de ozônio, foram realizados. O objetivo principal de simular esse período foi avaliar a sensibilidade das concentrações de ozônio e de alguns parâmetros meteorológicos a diferentes parametrizações do modelo, a utilização de condições iniciais e de fronteira com maior resolução espacial e temporal e também a utilização de grade com menor espaçamento horizontal. Com os resultados produzidos pelos testes de sensibilidade foi possível mensurar o impacto nas variáveis meteorológicas e nas concentrações de ozônio. Dessa forma, a causa das discrepâncias entre os resultados do modelo e os dados observados pode ser mais bem avaliada.

Outro estudo realizado com este período de dados foi à comparação dos resultados de concentrações de ozônio e de seus precursores produzidos por três modelos de qualidade do ar utilizados comumente por alunos e pesquisadores do grupo envolvido em estudos referentes à poluição atmosférica no IAG-USP. Foram analisados os resultados obtidos pelo modelo *off-line* CIT e pelos modelos *in-line* WRF-Chem e SPM-BRAMS (CARVALHO et al., 2008; MAZZOLI et al., 2008).

4.1.2. Região Metropolitana do Rio de Janeiro

As simulações realizadas para a RMRJ enfocaram, principalmente, dois aspectos muito importantes: as altas concentrações de ozônio registradas na RMRJ (nas poucas estações de monitoramento cujos dados encontram-se disponíveis) e o impacto das emissões provenientes de fontes móveis e fixas na formação do poluente em questão. Vale ressaltar que, ao contrário da RMSP, e conforme apresentado no item 2.3, na RMRJ, existe forte contribuição das emissões de NO_x e HC provenientes de fontes industriais (FEEMA, 2004). Outra questão importante abordada neste estudo foi a distribuição espacial das concentrações de ozônio na região. Uma vez que existem poucas estações que realizam o monitoramento das concentrações de O₃ na área é difícil avaliar a extensão do problema. A influência da topografia e das condições meteorológicas predominantes durante os eventos selecionados também foi avaliada. Vale ressaltar que, na literatura, até o presente momento, não há registro da aplicação e validação de modelos fotoquímicos de qualidade do ar aplicados a RMRJ.

Com base nos dados de qualidade do ar disponíveis para a região três períodos foram selecionados para análise. O período de 31 de outubro e 01 de novembro de 2006 foi utilizado para a realização dos testes relacionados à avaliação do impacto das fontes fixas e móveis na região. Nesse período, também avaliado para a RMSP, foram registradas violações ao PNQA estabelecido pela Resolução CONAMA 03/90 para o ozônio em estações próximas ao distrito industrial do Município de Duque do Caxias, onde se encontram indústrias com grande potencial poluidor. Para esse período foram realizadas três simulações considerando apenas as emissões provenientes das fontes fixas, as provenientes das fontes móveis e a soma de ambas as emissões. Com essas simulações, é possível avaliar o impacto de cada tipo de fonte de emissão, veicular e industrial, nas concentrações de ozônio registradas na RMRJ.

Além deste período, assim como o realizado para a RMSP, foram selecionados mais dois períodos onde violações ao PNQA foram registradas por algumas estações durante vários dias consecutivos. A simulação desses períodos auxiliará na identificação das condições meteorológicas de grande e meso-escala que podem contribuir para a ocorrência de altas concentrações de ozônio na região. Por meio destas também é possível identificar a influência da topografia na dispersão do ozônio e de seus precursores.

Avaliando os dados referentes aos períodos previamente selecionados para a RMSP apenas um período mereceu destaque. Entre 01 e 10 de setembro de 2004, assim como verificado para a RMSP, diversas violações ao PNQA também foram registradas na RMRJ como pode ser observado na Tabela 4-5. Nesse contexto, o referido período também foi simulado para a RMRJ.

Além deste, também foi selecionado o período entre 05 e 13 de março de 2007 quando oito dos nove dias apresentam valores de concentração de ozônio superiores ao limite de $160 \mu\text{g.m}^{-3}$. Nesse período, a ocorrência de violações foi registrada apenas em parte das estações cujos dados encontram-se disponíveis, como pode ser visto na Tabela 4-6. A habilidade do modelo em representar esse comportamento também será avaliada.

Tabela 4-5: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMRJ para o período entre 01 e 10 de setembro de 2004.

Data	RMRJ
01/09/2004	01 (04)
02/09/2004	03 (05)
03/09/2004	01 (04)
04/09/2004	00 (04)
05/09/2004	00 (04)
06/09/2004	02 (04)
07/09/2004	00 (04)
08/09/2004	01 (04)
09/09/2004	04 (04)
10/09/2004	04 (04)

Tabela 4-6: Número de estações com dados de concentração de ozônio disponíveis (entre parênteses) e número de estações com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio na RMRJ para o período entre 05 e 13 de março de 2007.

Data	RMRJ
05/03/2007	02 (04)
06/03/2007	04 (04)
07/03/2007	03 (04)
08/03/2007	02 (04)
09/03/2007	00 (04)
10/03/2007	03 (04)
11/03/2007	02 (04)
12/03/2007	02 (04)
13/03/2007	03 (04)

4.2. Configuração do Modelo

As simulações com o modelo regional SPM-BRAMS, para todos os períodos simulados, foram iniciadas com 24 horas de antecedência em relação aos períodos de interesse, sendo o primeiro dia descartado das análises para eliminar o efeito de *spin-*

up. Foram utilizadas para a inicialização, as análises do GFS (*Global Forecast System*) do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), antigo AVN.

Em relação aos testes de sensibilidade, realizados considerando apenas a RMSP, foram avaliados os efeitos da utilização de diferentes parametrizações de radiação, superfície, convecção e turbulência; de alterações nas grades do modelo com a utilização de resoluções espaciais mais refinadas; e da utilização de dados de entrada com maior resolução espacial e temporal. Todas as alterações realizadas foram comparadas a uma simulação referida como controle. Na simulação controle foi considerada para parametrização de radiação de onda longa e curta a opção baseada em Chen & Cotton (1983). O modelo TEB utilizado para parametrização da superfície em áreas urbanas foi mantido ativado. As parametrizações de convecção baseadas em Kuo (1974) e Souza & Da Silva (2003) foram consideradas apenas para a 1° grade. A primeira opção para parametrização dos coeficientes de difusão turbulenta horizontal (Smagorinsky, 1963) e vertical (Mellor & Yamada, 1982) no BRAMS foi utilizada. As simulações foram realizadas para um período de 96 horas (iniciadas em 29 de outubro de 2006). Na simulação controle foram utilizadas duas grades aninhadas, centradas em 23,55°S e 46,47°W, com espaçamento horizontal de 20 e 5 km, respectivamente.

Considerando os resultados obtidos com os testes de sensibilidade, para as simulações dos episódios selecionados, em ambas as regiões, foram consideradas duas grades aninhadas com resolução espacial de 16 km e de 4 km. É importante destacar que essa resolução é a mesma utilizada operacionalmente, no Laboratório MASTER (Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais) do IAG-USP, para a realização de previsão da qualidade do ar na RMSP. Por esse motivo e pelo fato desta ter apresentado bons resultados durante os testes de sensibilidade do modelo, essa resolução foi considerada nos demais episódios simulados para ambas as regiões. As duas grades contaram com 33 níveis verticais (do tipo sigma-z) e espaçamento variável até que este atingisse 1000 metros (começando com 70 metros de resolução e aumentando com um fator de 1.2). Após isso, o espaçamento vertical foi mantido constante até o topo do modelo (aproximadamente em 19000 metros). As mesmas parametrizações utilizadas na simulação controle foram consideradas. As grades foram centradas em 23,55°S e 46,47°W no caso da RMSP e em 22,80°S e 43,25°W para a RMRJ. A grade com 16 km de espaçamento horizontal possuiu, nos dois casos, uma área de 61440 km² (60 x 30 pontos de grade). Para a RMSP, a grade de 4 km abrangeu uma área de 29760 km² (com 62 x 30 pontos de grade em longitude

e latitude, respectivamente). No caso da RMRJ, a grade com 4 km de espaçamento horizontal possuiu domínio de 22464 km² (54 x 26 pontos de grade).

4.2.1. Módulo de Emissão

Em ambas as regiões, além do grande número de veículos em circulação e das grandes diferenças no perfil da frota, a heterogeneidade da distribuição espacial e temporal das fontes de emissão também apresenta-se como um fator complicador para a simulação das concentrações de poluentes. Isto porque a qualidade dos resultados dos modelos de qualidade do ar depende, em grande parte, dos dados de emissão (KLEMP et al., 2002), ou seja, para a implementação de modelos deste tipo, faz-se necessária uma representação acurada destas emissões. Outro problema, para o caso de fontes veiculares, segundo Mellios et al. (2006), é que as estimativas produzidas por meio dos inventários de emissão não necessariamente refletem as condições da frota em circulação e o nível de manutenção desta.

Embora de fácil localização, as fontes industriais também apresentam grande incerteza, pois dificilmente se sabe realmente a quantidade de material emitido. A queima de biomassa também é de difícil representação, pois, além da localização dos focos de queimada, exige o conhecimento do tipo de vegetação e das diferentes taxas de emissão associadas a este (FREITAS, 2009).

Para a RMSP, apenas um valor anual total de emissão veicular e industrial, por composto, é disponibilizado pela CETESB, conforme citado anteriormente. São fornecidas através do inventário, as emissões de CO, NO_x, PM₁₀, SO₂ e HC. Assim como apresentado em Freitas (2003) e Freitas et al. (2005), a distribuição espacial das emissões sobre a região é realizada com base no tipo de ocupação urbana, sendo duas áreas principais consideradas. A primeira, localizada no centro da RMSP, responsável por 70% das emissões veiculares, e uma área menos urbanizada, responsável por 30% dos totais emitidos. Para as emissões industriais, o contrário é considerado uma vez que a maior contribuição industrial não ocorre na área mais urbanizada da região. A distribuição dos tipos urbanos considerados pode ser observada na Figura 4-1.

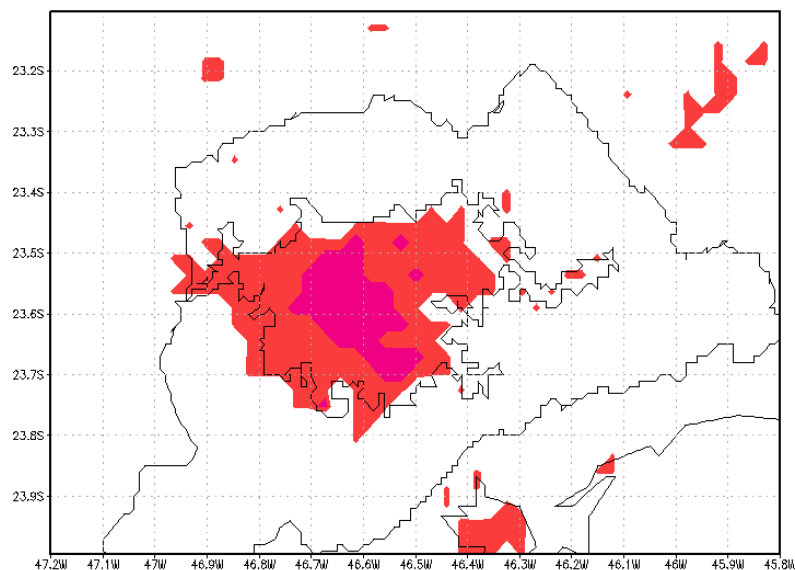


Figura 4-1: Distribuição espacial dos tipos urbanos 1 (no centro da região, em rosa) e 2 (em vermelho) na RMSP.

Contudo, como o inventário de emissões atmosféricas para a RMRJ fornece mais informações tanto a respeito das emissões veiculares como das emissões industriais, principalmente, no que se refere à localização das vias de tráfego de veículos e fontes industriais foram realizadas algumas alterações no código do modelo. Nesse contexto, no caso das emissões industriais, foi inserida no RAMSIN a possibilidade de leitura de arquivos, quando disponíveis, contendo a latitude, longitude e a emissão (em kg/s) de cada fonte de emissão disponível e para cada um dos seis poluentes considerados (monóxido e dióxido de nitrogênio, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de enxofre e hidrocarbonetos). Dessa forma, também é possível avaliar com o modelo em questão o impacto pontual da inclusão de novas fontes ou da implementação de tecnologias de controle de emissão nas já existentes. Ainda será possível considerar, da mesma forma que era realizado anteriormente, a emissão baseada nos valores totais e na classificação de áreas urbanas em regiões que não dispõem de informações mais detalhadas.

Para a emissão veicular, foram construídos arquivos para toda a América do Sul baseados na identificação de áreas urbanas (através do arquivo de vegetação atualmente em uso no BRAMS) e nas emissões totais disponíveis para São Paulo. No caso da área referente à RMRJ, estas informações foram substituídas pelos dados provenientes do inventário de emissões. A cada simulação, juntamente com a geração dos arquivos de superfície, são gerados os arquivos de emissão de acordo com a

grade considerada. Como exemplo, a distribuição espacial das emissões veiculares de monóxido de carbono e industriais de dióxido de enxofre na RMRJ é apresentada na Figura 4-2.

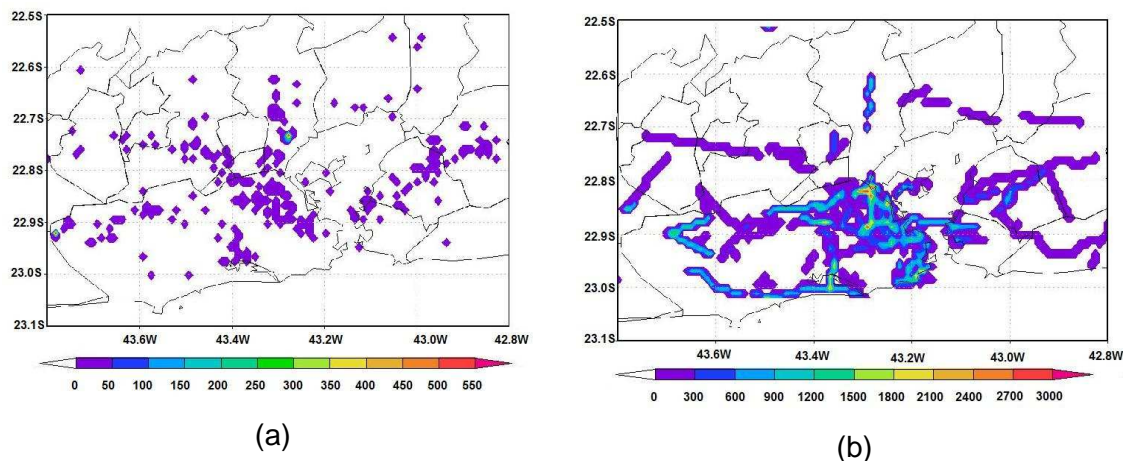


Figura 4-2: Distribuição espacial das emissões (a) de SO_2 emitido por fontes industriais, em 1000 toneladas por ano, e (b) de CO emitido por veículos automotores, em toneladas por ano, considerada pelo modelo SPM-BRAMS na RMRJ.

O ciclo diurno das emissões veiculares é ajustado por uma dupla gaussiana, de forma a representar os horários com maior fluxo de veículos. O modelo também considera uma variação nas emissões veiculares de acordo com o dia da semana. No caso, um dos métodos utilizados para estimar os perfis de emissão de poluentes atmosféricos de acordo com as condições da frota real é a utilização de dados de concentração de poluentes atmosféricos, principalmente, no que se refere às concentrações de monóxido de carbono (MELLIOS et al., 2006). Pont & Fontan (2001) também apontaram o CO como um excelente indicador dos níveis de circulação veicular.

Nesse sentido, através das concentrações de CO monitoradas em ambas as regiões metropolitanas consideradas, foi possível avaliar e estabelecer os perfis médios de emissão veicular no que tange as variações de acordo com a hora do dia e com o dia da semana. Em geral, o ciclo diurno médio das concentrações de CO, bastante similar nas duas regiões, apresentou dois picos de concentração associados com o tráfego de veículos: o primeiro pela manhã, entre 08 e 09 horas, e o segundo durante a noite, entre 18 e 20 horas (Figura 4-3). Em média, a redução das concentrações de monóxido de carbono nas regiões metropolitanas de São Paulo e do Rio de Janeiro foi de 10% e 1% aos sábados e 25% e 20% aos domingos, respectivamente.

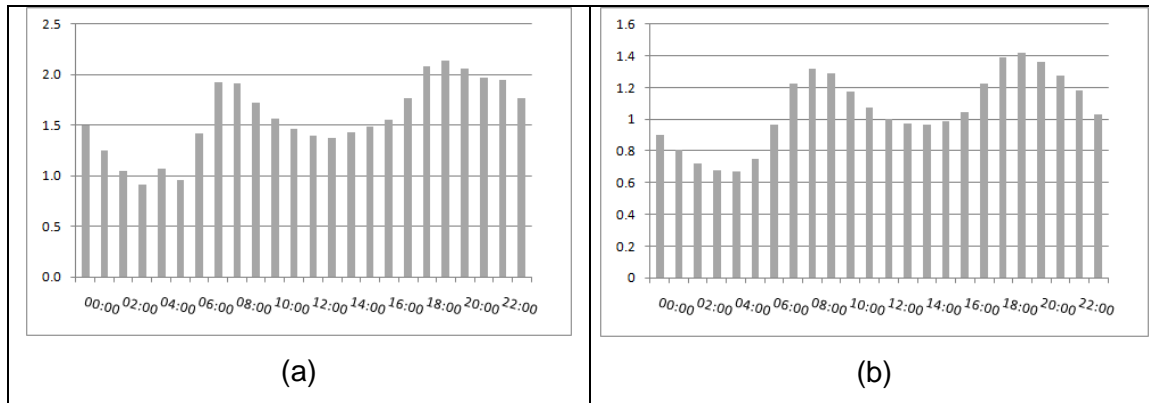


Figura 4-3: Ciclo diurno médio das concentrações de CO, em ppm, registradas (a) na RMSR (entre 1996 e 2006) e (b) na RMRJ (entre 2000 e 2008).

Também é importante ressaltar que o modelo SPM-BRAMS requer dados de NO e de NO₂. Contudo, apenas dados totais de NO_x são disponibilizados. Nesse contexto, foi assumido para o cálculo das taxas de emissão que 90% do NO_x correspondem a NO e apenas 10% a NO₂.

4.3. Métodos para Verificação e Análise dos Resultados

Para a validação dos resultados produzidos pelo modelo os seguintes métodos estatísticos foram aplicados: desvio padrão (σ), erro médio (ME), erro médio quadrático (MSE), raiz do erro médio quadrático ($RMSE$), o $RMSE_{UB}$ (índice proposto por PIELKE, 2002), a correlação de Pearson (R) e o índice de concordância (d). Como valores de referência foram utilizados os resultados obtidos através das redes de monitoramento da qualidade do ar em operação nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo. Vale ressaltar que os dados utilizados como referência nesse estudo foram cedidos gentilmente pela CETESB e pela FEEMA. Foram comparados aos resultados do modelo, principalmente, os dados de concentração de ozônio. Contudo, para as simulações dos episódios de concentração também foram efetuadas comparações (quando disponíveis) com os dados de concentrações dos óxidos de nitrogênio, importante precursor de ozônio, e de monóxido de carbono, considerado um bom indicador da emissão veicular. Os resultados do modelo referentes ao ponto de grade mais próximo à localização da estação foram extraídos e comparados às observações.

A correlação linear de Pearson (WILKS, 1995) é dada pela razão entre a covariância existente entre duas variáveis e o produto de seus desvios padrão, ou seja,

$$r_{yo} = \frac{\text{cov}(y, o)}{\sigma_y \sigma_o} = \frac{\sum_{i=1}^n [(y_i - \bar{y})(o_i - \bar{o})]}{\left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \right\}^{1/2}} \quad 4-1$$

A correlação é uma mostra da associação linear entre duas variáveis. Altas correlações indicam um bom acordo entre as fases das oscilações, ou seja, as variações ocorrem num mesmo sentido simultaneamente.

Apesar das correlações fornecerem uma boa informação sobre a relação linear entre as simulações e as observações, elas não levam em conta os desvios (*bias*) que podem estar presentes na previsão e nem fornecem uma amostra da acurácia das simulações. Dessa forma, é necessário utilizar métodos complementares que possibilitem identificar a magnitude desses desvios. Um desses métodos é o chamado erro médio (ME), dado por:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k) = \bar{y} - \bar{o} \quad 4-2$$

O erro médio é simplesmente a diferença entre a média das simulações e a média das observações, expressando, portanto, o desvio da simulação. O erro médio é representativo de toda a série de simulações não fornecendo informações sobre erros individuais. Sendo assim, este parâmetro não representa uma medida de acurácia. Simulações que em média são maiores que as observações apresentam ME superior a zero e simulações que em média são menores que as observações apresentam ME menor que zero.

Para a medida da acurácia das simulações, utilizou-se o erro médio quadrático (MSE), média quadrática das diferenças entre pares de simulações e observações, dado por:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - o_k)^2 \quad 4-3$$

Valores elevados de MSE indicam alto nível de discrepância entre simulações e observações. A raiz quadrada do MSE (RMSE) tem as mesmas dimensões das previsões e observações, podendo ser considerada como a magnitude típica dos erros das simulações.

Pielke (2002) apresenta outro parâmetro ($RMSE_{UB}$) para avaliar a habilidade (*skill*) de uma simulação:

$$RMSE_{UB} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [(y_k - \bar{y}) - (o_k - \bar{o})]^2 \right\}^{1/2} \quad 4-4$$

O $RMSE_{UB}$ representa a raiz do erro médio quadrático após a remoção de um desvio médio. É importante notar que este procedimento considera que a distribuição é aproximadamente normal. As análises que foram realizadas nesse trabalho não levam em conta esse fato e servem apenas como um complemento aos outros parâmetros que serão analisados. Segundo Pielke (2002), o *skill* de uma simulação é demonstrado nas seguintes condições:

1. $\sigma_{sim} \cong \sigma_{obs}$;
2. $RMSE < \sigma_{obs}$;
3. $RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$,

sendo σ_{obs} o desvio padrão das observações e σ_{sim} o desvio padrão das simulações.

Elbir (2003) definiu outro parâmetro para avaliar a eficiência de um modelo, o índice de concordância:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|y_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad 4-5$$

Nesta expressão, $d = 1$ significa total concordância entre simulações e observações.

Além das análises realizadas com o intuito de validar o modelo, foram realizadas análises focando a distribuição espacial das concentrações de ozônio. Para isso, alguns campos meteorológicos como vento, temperatura, umidade, radiação solar de onda curta, altura da camada de mistura, fração de céu claro, precipitação, entre outras variáveis geradas pelo modelo BRAMS durante os períodos de interesse foram avaliados. O objetivo destas análises é avaliar o papel das condições meteorológicas na formação e no transporte das moléculas de ozônio sobre a região considerada.

5. Resultados das Simulações realizadas para a RMSP

5.1. Testes de Sensibilidade

5.1.1. Resolução espacial horizontal

Além da simulação controle, cuja configuração foi apresentada na metodologia, foram realizadas duas simulações para testar o impacto da utilização de grade com menor espaçamento horizontal nas concentrações de ozônio e em alguns parâmetros meteorológicos. A primeira simulação considerou a mesma resolução utilizada operacionalmente no laboratório MASTER com duas grades aninhadas de 16 e 4 km, respectivamente. Nesta simulação foram considerados 75 x 38 pontos para a grade maior e 78 x 38 na grade menor. Para a segunda simulação, uma terceira grade, com resolução de 2 km foi adicionada (122 x 50 pontos).

Através dos resultados das simulações controle, 4 km e 2 km, foi possível observar que o impacto da utilização de diferentes resoluções horizontais nas concentrações de ozônio foi significativo, principalmente, no que se refere aos horários de máxima e a extensão de áreas que registraram violações do PNQA.

No dia 30 de outubro, as maiores concentrações de ozônio foram simuladas para o horário das 18 Z. Nestas, a localização do centro das máximas também foi coincidente - centrado sobre a RMSP. Contudo, a extensão dos núcleos com maiores valores de concentração variou significativamente nas grades com espaçamento horizontal de 5, 4 e 2 km (Figura 5-1). Na resolução de 5 km, referente à simulação controle, não foram observados valores acima do limite definido pela legislação em vigor ($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Na simulação 4 km, violações ao PNQA foram verificadas numa pequena região no horário das 18 Z. Os resultados para a grade de 2 km revelaram a ocorrência de ultrapassagens ao padrão sobre uma área maior e durante todo o período de 17 às 20 Z. Vale ressaltar que, de acordo com os dados da CETESB, a estação Santo André apresentou valor acima do limite no horário das 17 Z.

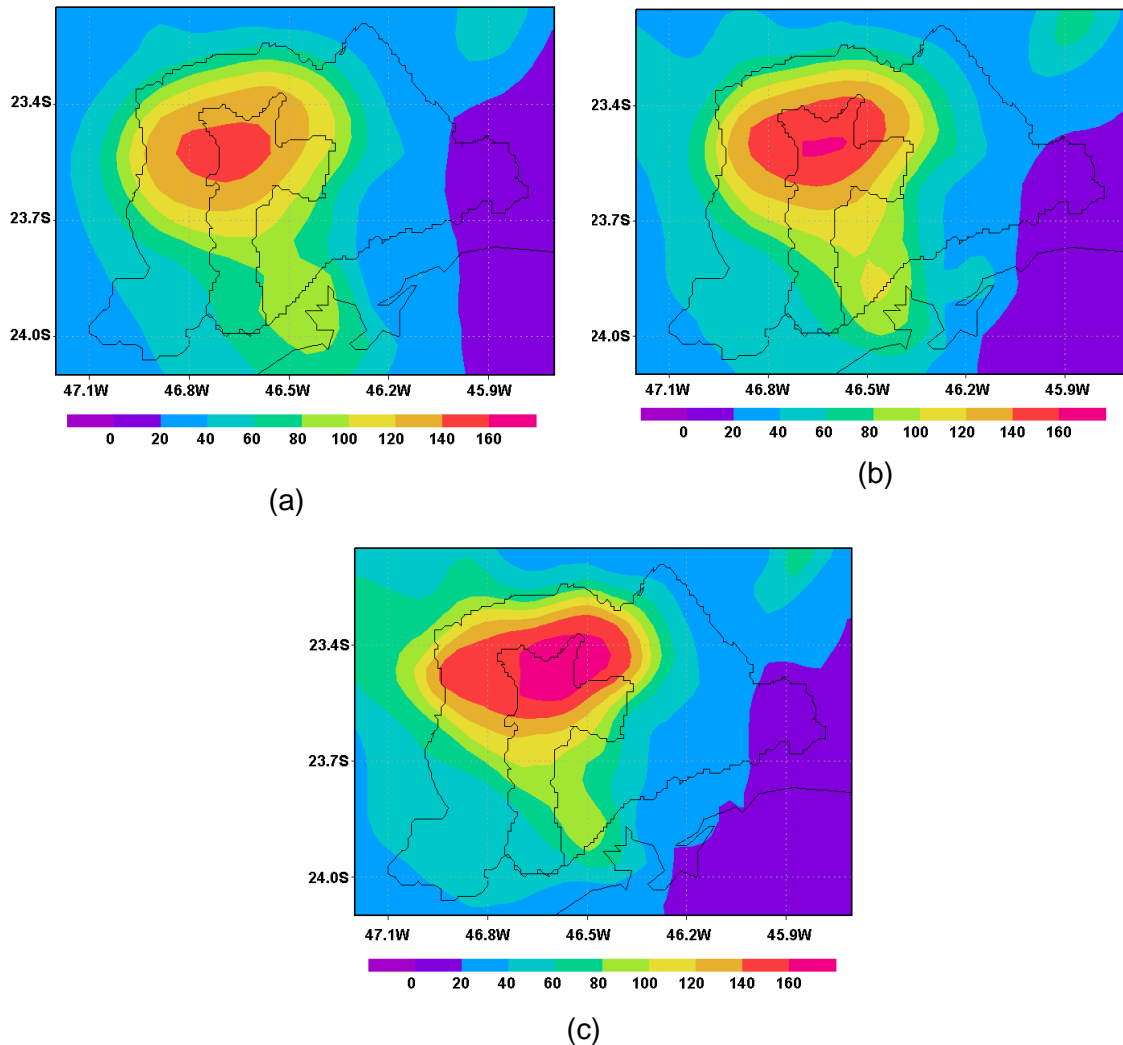


Figura 5-1: Distribuição espacial das concentrações de ozônio, em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, produzidas pelo modelo SPM-BRAMS nas simulações (a) controle (grade com resolução espacial de 5 km); (b) 4 km e (c) 2 km para o dia 30/10/2006 às 18 Z.

As maiores concentrações de ozônio também foram simuladas para o horário das 18 Z no dia 31 de outubro de 2006. Os campos referentes às grades de 5, 4 e 2 km são apresentados na Figura 5-2. Na grade de 5 km (simulação controle), dois núcleos com violações ao PNQA podem ser observados sobre a parte central da RMSP e sobre parte da Baixada Santista. O primeiro núcleo, sobre o litoral, se forma uma hora antes, às 17 Z. Às 19 Z apenas o segundo se mantém deslocado ligeiramente da posição original (para noroeste). Com a resolução de 4 km, a área onde valores acima dos $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ são observados é maior e se estende do centro ao sul da grade. No caso, violações ao padrão foram registradas apenas no horário das 18 Z. Considerando o espaçamento horizontal de 2 km, foram observadas violações das 14 às 20 Z. Entre as 14 e às 16 Z, o núcleo com violações se estende do norte do Município de São Paulo

até a região de Campinas. A partir das 17 Z, um núcleo com maiores concentrações é observado sobre parte da RMSP. Os dados de concentração de ozônio registrados pela rede da CETESB também revelaram violações ao padrão na maioria das estações disponíveis durante este dia.

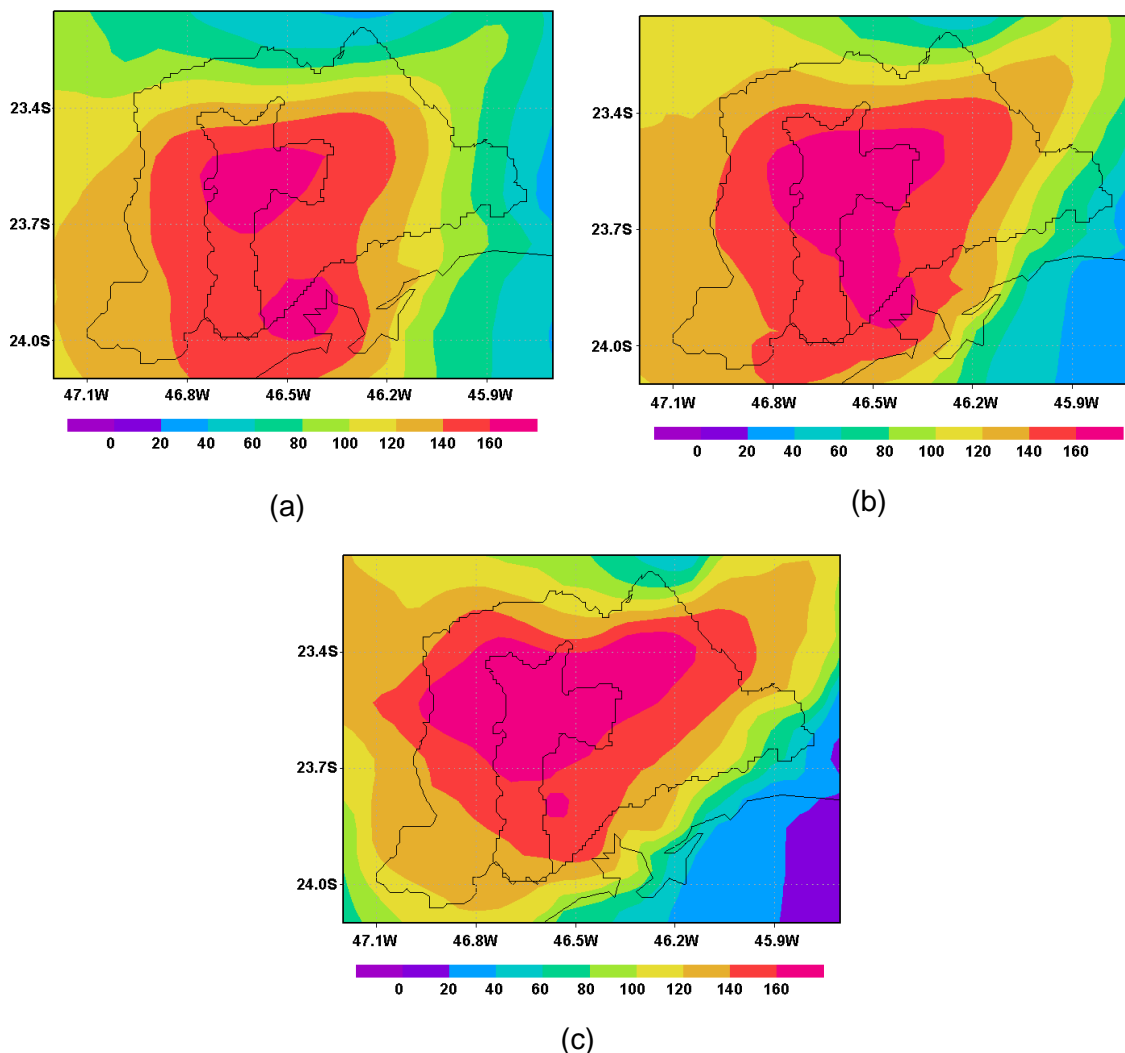


Figura 5-2: Distribuição espacial das concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas pelo modelo SPM-BRAMS nas simulações (a) controle (grade com resolução espacial de 5 km); (b) 4 km e (c) 2 km para o dia 31/10/2006 às 18 Z.

No dia 01 de novembro, as maiores diferenças entre os resultados foram encontradas. Com a grade de resolução de 5 km, as máximas concentrações, abaixo do PNQA, foram verificadas às 17 Z sobre a região próxima à Cubatão. Nas grades de 4 e 2 km foram observadas violações durante o início da tarde, entre 13 e 14 horas, na região de limite entre a RMSP e o litoral. As maiores concentrações de ozônio calculadas em cada uma das três simulações durante o dia 01 de novembro podem ser observadas na Figura 5-3.

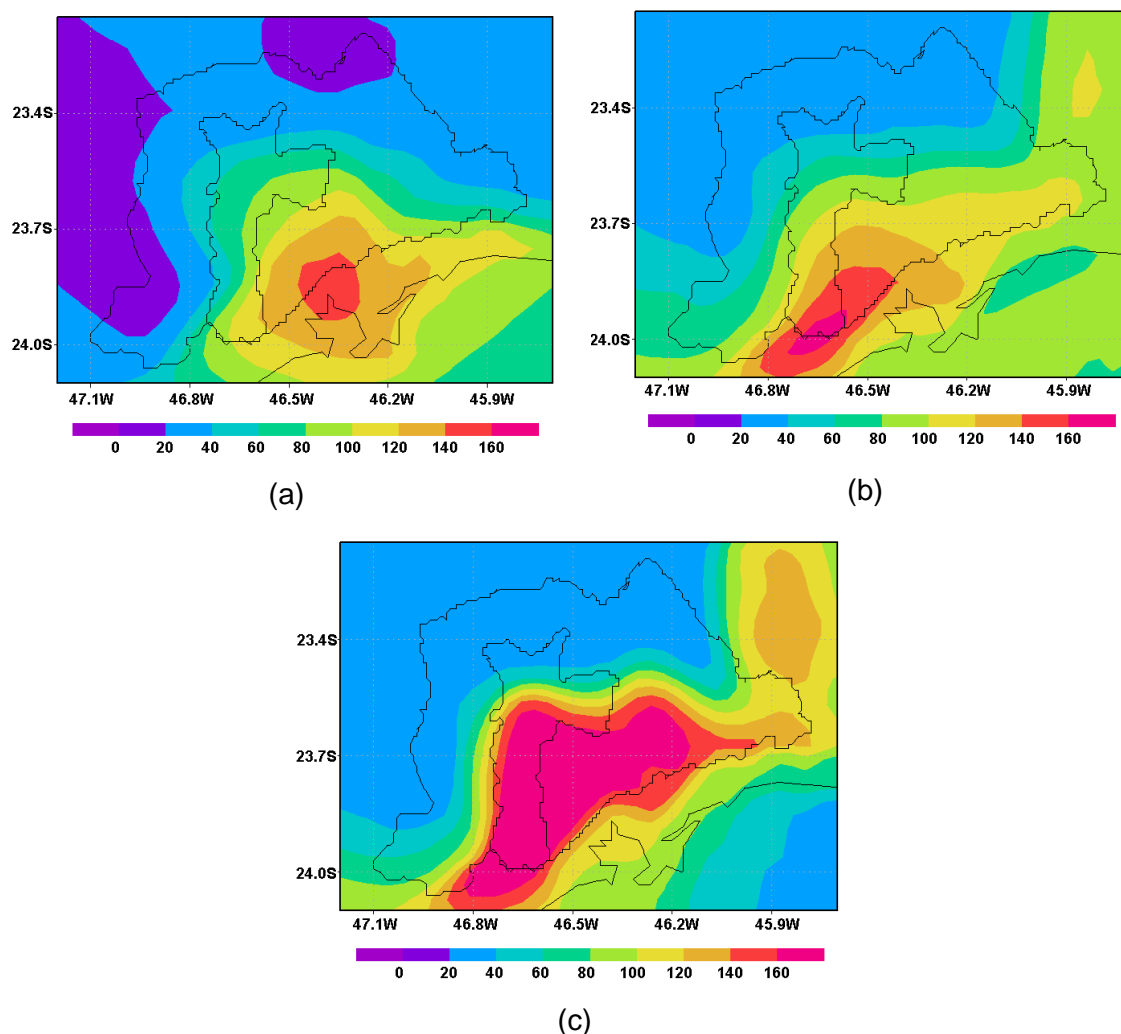


Figura 5-3: Distribuição espacial das concentrações de ozônio, em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, produzidas pelo modelo SPM-BRAMS nas simulações (a) controle (grade com resolução espacial de 5 km); (b) 4 km e (c) 2 km para o dia 01/11/2006 às 17 Z (a) e 14 Z (b e c).

Os resultados encontrados a partir da aplicação de métodos estatísticos aos valores de concentrações de O_3 , temperatura e umidade relativa do ar simulados pelo modelo SPM-BRAMS e registradas pelas estações de monitoramento da CETESB entre 30 de outubro e 01 de novembro de 2006 são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 5-1, 5-2 e 5-3. A correlação linear de Pearson (R) apresentou valores relativamente altos no que tange o ozônio. O menor índice de correlação, 0,73, correspondeu à estação de Diadema (simulação controle) e o mais alto, 0,92, foi verificando para as estações Parque Dom Pedro II, Pinheiros e Santana (todos referentes à simulação 2 km). Os resultados dos índices de correlação obtidos para a temperatura e umidade relativa do ar foram mais baixos. Os menores índices para estes parâmetros corresponderam às estações de São Caetano (0,67 nas simulações controle e 4 km) e

Ibirapuera (0,56 na simulação 4 km), respectivamente. Já os maiores valores de R verificados foram de 0,76 e 0,65 (na estação de Taboão da Serra, simulação de 2 km).

De acordo com o viés, o modelo superestimou as concentrações de O₃ e subestimou os valores de temperatura do ar para todas as estações. No caso da umidade relativa, os resultados variaram de acordo com a estação uma vez que o modelo subestimou os valores referentes às estações Ibirapuera e São Caetano do Sul e superestimou os correspondentes a Pinheiros e Taboão da Serra. Apenas para a temperatura do ar foi possível identificar uma tendência clara com menores valores sendo obtidos quando os resultados da simulação controle foram registrados. A diferença percentual média de σ_{sim} e σ_{obs} foi alta na maioria das estações, não indicando concordância com o primeiro critério para se obter *skill* em todos os parâmetros considerados. O segundo e o terceiro critério para a obtenção do skill foi atendido, em geral, para todos os pontos considerados, exceto para a umidade relativa do ar.

O índice de concordância (*d*) apresentou valores elevados para todos os parâmetros. Os valores médios foram de 0,89 para o ozônio, 0,81 para a temperatura do ar e 0,74 para a umidade relativa. É importante destacar que, em geral, o impacto da variação da resolução espacial horizontal do modelo não foi linear. Contudo, os resultados encontrados, principalmente, no caso da temperatura e da umidade relativa foram ligeiramente melhores nas simulações de maior resolução. No caso do ozônio, os efeitos da utilização de grades de 4 ou até mesmo 2 km não produziram melhoria nos resultados pontuais.

Tabela 5-1: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle, 4 km e 2 km no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Diadema	Controle	17,55	39,81	35,73	44,92	51,34	0,73	0,82
	4km	20,34	40,73	35,28	44,92	55,77	0,77	0,83
	2km	20,34	43,03	37,92	44,92	57,81	0,75	0,82
Ibirapuera	Controle	10,72	28,29	26,19	51,34	53,24	0,87	0,92
	4km	14,57	31,93	28,41	51,34	57,57	0,87	0,91
	2km	14,60	35,83	32,72	51,34	61,25	0,84	0,90
Mauá	Controle	4,45	29,71	29,38	44,88	47,13	0,79	0,89
	4km	9,32	30,84	29,39	44,88	53,29	0,83	0,90
	2km	11,36	35,67	33,82	44,88	59,10	0,82	0,88
Nossa Sra. do Ó	Controle	6,36	24,44	23,60	47,16	50,38	0,88	0,93
	4km	11,30	26,80	24,30	47,16	57,94	0,91	0,93
	2km	13,64	32,35	29,33	47,16	65,96	0,92	0,92
P. D. Pedro II	Controle	11,67	29,13	26,69	39,36	52,69	0,87	0,90
	4km	16,62	34,72	30,48	39,36	59,31	0,88	0,88
	2km	17,65	40,06	35,96	39,36	65,85	0,88	0,85
Pinheiros	Controle	15,21	29,72	25,54	40,59	54,26	0,89	0,90
	4km	17,55	32,57	27,44	40,59	58,68	0,91	0,89
	2km	17,49	34,15	29,34	40,59	62,04	0,92	0,89
Santo Amaro	Controle	2,63	30,53	30,42	48,30	50,83	0,81	0,90
	4km	5,68	31,64	31,12	48,30	55,65	0,83	0,90
	2km	5,34	33,59	33,16	48,30	56,29	0,81	0,89
Santana	Controle	9,25	26,34	24,66	50,26	52,69	0,88	0,93
	4km	12,30	27,21	24,27	50,26	58,23	0,91	0,94
	2km	14,31	32,01	28,63	50,26	67,21	0,92	0,92

Tabela 5-2: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura do ar (°C) disponíveis e com os resultados das simulações Controle, 4 km e 2 km no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Ibirapuera	Controle	-0,28	3,58	3,57	3,64	5,14	0,71	0,81
	4km	-1,02	3,69	3,55	3,64	5,09	0,71	0,80
	2km	-1,25	3,75	3,53	3,64	5,14	0,72	0,80
Pinheiros	Controle	-1,31	3,90	3,68	5,01	5,25	0,74	0,84
	4km	-1,45	4,07	3,80	5,01	5,35	0,73	0,83
	2km	-1,92	4,23	3,77	5,01	5,39	0,74	0,82
S. Caetano do Sul	Controle	-1,63	4,25	3,92	4,98	4,79	0,67	0,79
	4km	-1,84	4,39	3,99	4,98	4,91	0,67	0,79
	2km	-2,27	4,46	3,84	4,98	4,90	0,69	0,79
Taboão da Serra	Controle	-1,85	3,80	3,32	4,29	5,02	0,75	0,82
	4km	-2,14	4,05	3,44	4,29	5,15	0,75	0,81
	2km	-2,49	4,11	3,27	4,29	4,97	0,76	0,80

Tabela 5-3: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa do ar (%) disponíveis e com os resultados das simulações Controle, 4 km e 2 km no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Ibirapuera	Controle	-6,89	21,92	20,81	17,88	25,12	0,57	0,73
	4km	-4,84	21,17	20,61	17,88	24,51	0,56	0,73
	2km	-3,35	20,69	20,42	17,88	24,99	0,58	0,75
Pinheiros	Controle	8,07	22,62	21,13	19,74	25,46	0,58	0,71
	4km	8,62	23,35	21,71	19,74	25,75	0,57	0,70
	2km	10,31	23,77	21,42	19,74	26,11	0,59	0,70
S. Caetano do Sul	Controle	-11,34	22,41	19,33	20,03	23,30	0,61	0,74
	4km	-10,74	22,66	19,96	20,03	23,64	0,59	0,74
	2km	-8,94	21,16	19,18	20,03	23,49	0,62	0,76
Taboão da Serra	Controle	5,84	19,69	18,80	18,24	24,49	0,64	0,76
	4km	6,06	20,55	19,63	18,24	24,63	0,61	0,74
	2km	7,51	19,87	18,40	18,24	24,10	0,65	0,76

5.1.2. Parametrização de Radiação

Foram realizados testes alterando a opção de parametrização de radiação para as baseadas em Mahrer & Pielke (1977) e Harrington (1997). Essas simulações serão referidas no texto como simulação MP77 e H97, respectivamente. Em ambos os casos, o impacto nas concentrações de ozônio, considerando a simulação controle como referência, foi significativo. Os campos de radiação de onda curta e onda longa, temperatura do ar e umidade relativa também foram analisados.

No caso da temperatura e da umidade relativa, as maiores diferenças encontradas ficaram em torno de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ e de $\pm 20\%$, respectivamente. Quando comparada à simulação MP77, essas diferenças foram predominantemente negativas para a temperatura e positivas² para o campo de umidade. As diferenças foram, em geral, mais intensas no período noturno e no início da manhã (ver como exemplo a Figura 5-4). O mesmo padrão, com diferenças negativas de temperatura mais intensas também foram verificadas quando a simulação H97 foi comparada a simulação controle (exemplo na Figura 5-5). Em geral, os máximos valores foram verificados, principalmente, no centro da grade, sobre a RMSP. Analogamente ao identificado quando a simulação MP77 foi analisada, diferenças positivas nos índices de umidade relativa também foram encontradas na simulação H97.

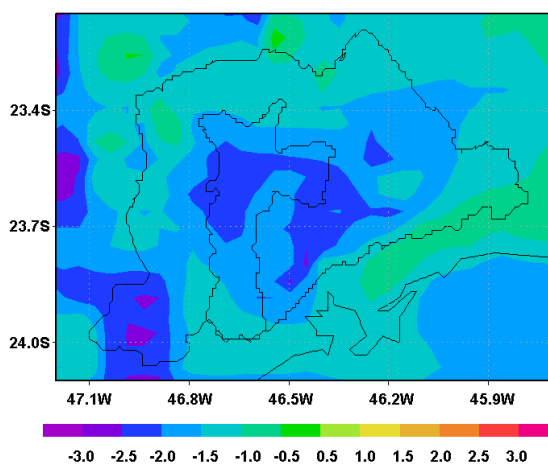


Figura 5-4: Diferenças entre os resultados de temperatura do ar, em $^{\circ}\text{C}$, gerados pelas simulações controle e MP77 no dia 30/10/2006 às 07 Z.

² Exceto no dia 01 de novembro onde diferenças negativas de UR foram verificadas pelo modelo, principalmente, no nordeste da grade.

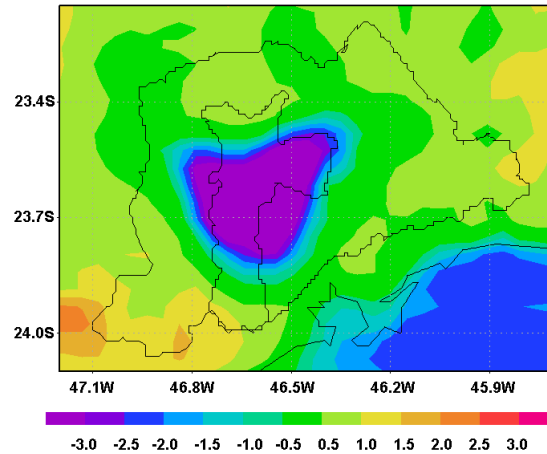


Figura 5-5: Diferenças entre os resultados de temperatura do ar, em $^{\circ}\text{C}$, gerados pelas simulações controle e H97 no dia 01/11/2006 às 11 Z.

Em relação ao ozônio, durante todo o dia 30 e até a madrugada do dia 31, as diferenças entre as concentrações produzidas durante as simulações controle, considerando a parametrização de Chen & Cotton (1983) e MP77 ficaram em torno de $\pm 20 \mu\text{g.m}^{-3}$. Nesse período, as diferenças na radiação de onda curta foram sempre maiores na simulação controle como pode ser observado, por exemplo, na Figura 5-6. A partir da manhã do dia 31, como apresentado na Figura 5-7, diferenças positivas e negativas superiores a $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ são verificadas em parte da grade. Durante o dia 01 de novembro, as concentrações foram predominantemente maiores na simulação com a segunda opção de parametrização do modelo. Neste dia, com a entrada de uma frente fria, a nebulosidade aumentou sobre a região. Vale relembrar que a parametrização referente à simulação MP77 não considera a presença de nuvens ou de material condensado.

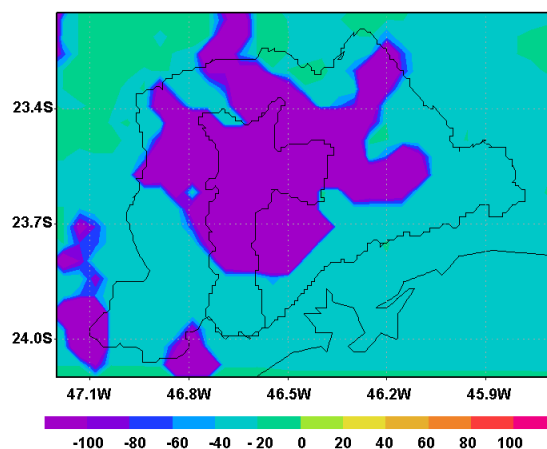


Figura 5-6: Diferenças entre a incidência de radiação de onda curta, em W.m^{-2} , referente às simulações controle e MP77 no dia 30/10/2006 às 11 Z.

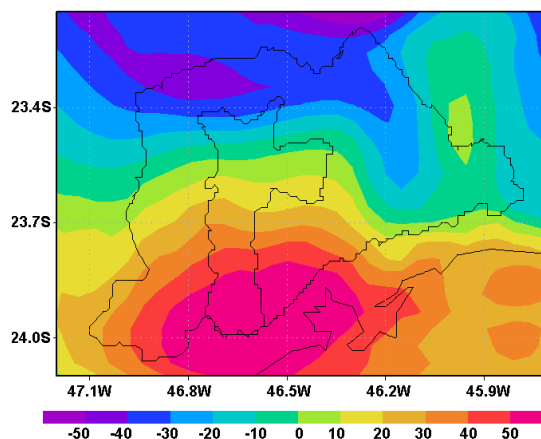


Figura 5-7: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, referente às simulações controle e MP77 no dia 31/10/2006 às 15 Z.

A diferença entre as concentrações de ozônio produzidas entre a simulação controle e a considerando a parametrização baseada em Harrington (1997), na madrugada e início da manhã do dia 30, varia entre $\pm 20 \mu\text{g.m}^{-3}$, sendo principalmente positiva na maior parte da grade e negativa no centro-sul e nordeste da mesma (Figura 5-8 a). A partir das 09 da manhã, diferenças superiores a $\pm 30 \mu\text{g.m}^{-3}$ foram encontradas. As máximas diferenças, ilustradas na Figura 5-8 b, superiores a $40 \mu\text{g.m}^{-3}$, correspondem ao horário das 15 Z, horário onde a maior incidência de radiação foi registrada. Depois desse horário, as diferenças caem significativamente. Na madrugada do dia 31 e durante a manhã e parte da tarde diferenças superiores a $-50 \mu\text{g.m}^{-3}$ surgem na porção nordeste da grade. Durante a tarde e início da noite, diferenças positivas de mesma magnitude são verificadas na porção sudeste da grade (exemplo na Figura 5-9). No dia 01, o ozônio produzido quando considerada a parametrização de Harrington foi bem superior ao registrado tanto pela simulação controle quanto pela rede de monitoramento da CETESB.

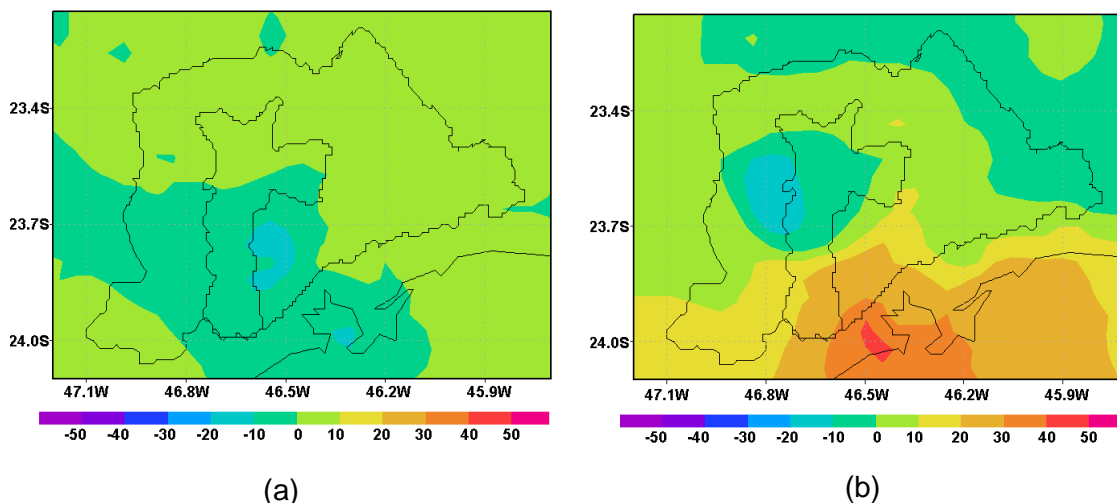


Figura 5-8: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e H97 no dia 30/10/2006 às (a) 07 Z e (b) 15 Z.

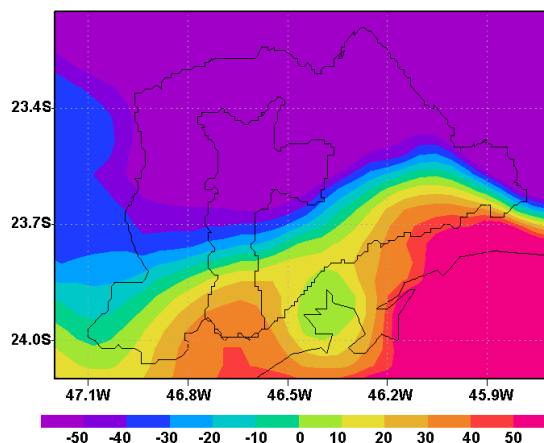


Figura 5-9: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e H97 no dia 31/10/2006 às 16 Z.

Os resultados das concentrações de ozônio simuladas pelo modelo SPM-BRAMS com diferentes opções para parametrização da radiação de onda curta e onda longa foram comparadas aos dados monitorados pela CETESB. Nos dois primeiros dias da campanha, 30 e 31 de outubro de 2006, todas as opções de parametrização apresentaram resultados de acordo com os observados (observar como exemplos a Figura 5-10). Em geral, no dia 30, a simulação H97 superestimou ligeiramente as concentrações. No dia 01 de novembro, apenas a simulação controle revelou resultados de acordo com os registrados pela rede de monitoramento. As simulações MP77 e H97 superestimaram as concentrações de O_3 em 4 e 10 vezes, respectivamente. O mesmo não foi verificado para a temperatura e a umidade relativa do ar, parâmetros cujos dados encontram-se disponíveis e podem ser utilizados para

comparação, como pode ser observado considerando os dados provenientes da Estação Ibirapuera, por exemplo, na Figura 5-11. Analisando os resultados produzidos para a radiação de onda curta e onda longa nas três simulações é possível destacar que no dia 01 de novembro as maiores diferenças, em relação à simulação controle, referem-se à radiação de onda curta, no caso de Mahrer & Pielke (1977) e a de onda longa, em Harrington (1997).

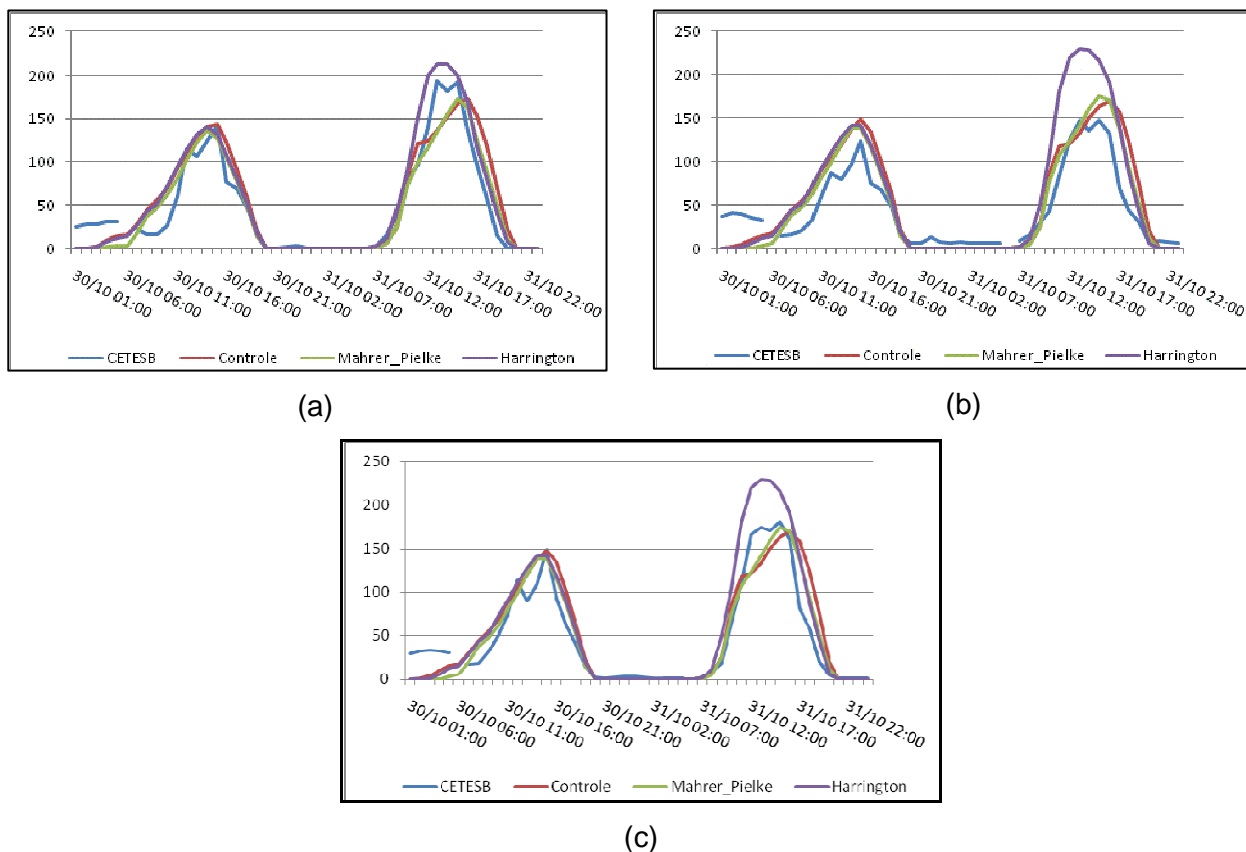


Figura 5-10: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) registradas pela rede de monitoramento da CETESB e as simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para as estações (a) Ibirapuera, (b) Parque Dom Pedro II e (c) Santana.

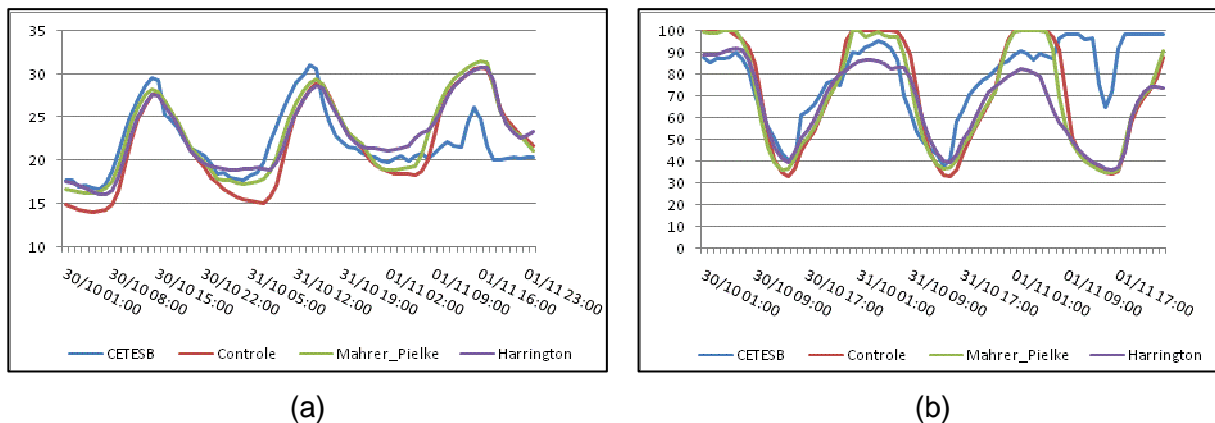


Figura 5-11: Comparação entre os valores de (a) temperatura (°C) e (b) umidade relativa do ar (%) registrados pela rede de monitoramento da CETESB na Estação Ibirapuera e as simuladas pelo modelo SPM-BRAMS.

5.1.3. Parametrização para Superfícies Urbanas (TEB)

Comparando os resultados obtidos através de simulações considerando o modelo TEB ativado (controle) e desativado (TEB-off), é possível identificar alterações menos intensas do que quando variações na parametrização de radiação foram testadas.

As diferenças entre os valores de temperatura e umidade relativa do ar obtidos através das simulações controle e TEB-off foram baixas e, em geral, negativas - inferiores a $-0,5^{\circ}\text{C}$ - e positivas - menores que 3% - (respectivamente) na maior parte do domínio, principalmente, fora da RMSP onde as maiores diferenças, conforme o esperado, foram identificadas. No dia 30 de outubro, dois núcleos de diferenças mais intensas (negativas a oeste da RMSP e positivas a leste) foram verificadas no início da manhã. O oposto foi observado no campo referente à umidade relativa do ar. Exemplos podem ser observados na Figura 5-12. Entre 17 e 21 Z do mesmo dia, um núcleo de diferença de temperatura positiva e de umidade relativa negativa surge e se desloca acompanhando a dianteira da frente de brisa. No dia 31 de outubro e 01 de novembro, durante a madrugada e o início da manhã, um intenso centro de diferença negativa no campo de temperatura e positiva no de umidade relativa se forma sobre a RMSP (ver Figura 5-13).

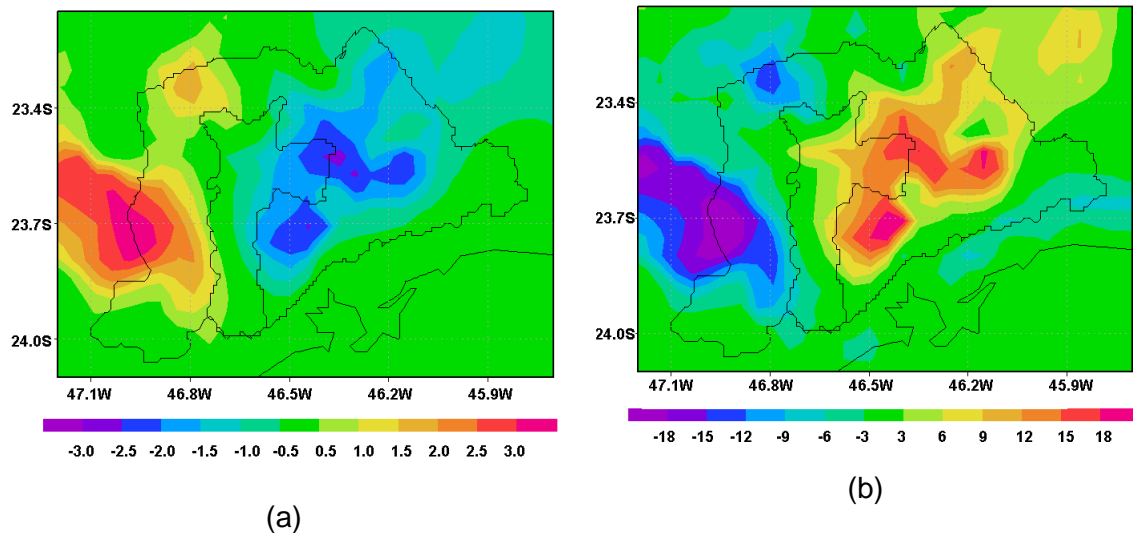


Figura 5-12: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações considerando a simulação controle e TEB-off no dia 30/10/2006 às 11 Z.

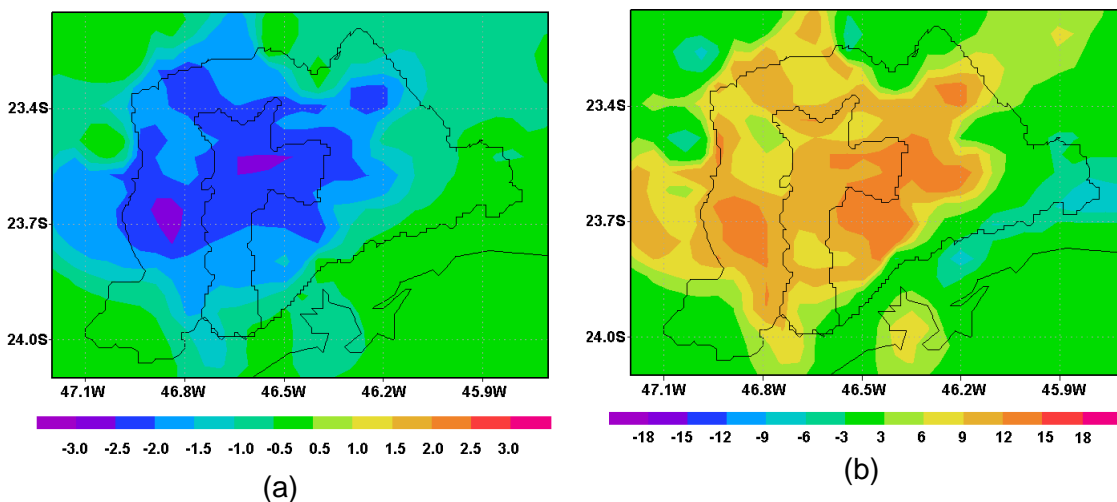


Figura 5-13: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em $^{\circ}\text{C}$, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações considerando a simulação controle e TEB-off no dia 31/10/2006 às 10 Z.

No que se refere às concentrações de ozônio, as máximas diferenças entre as simulações controle e TEB-off ficaram em torno de $\pm 20 \mu\text{g.m}^{-3}$ até as 18 Z do dia 30. Após esse horário, diferenças negativas mais intensas, de até $40 \mu\text{g.m}^{-3}$, foram observadas ao longo da frente de brisa (exemplo na Figura 5-14). No restante da grade, as diferenças foram predominantemente negativas e abaixo dos $10 \mu\text{g.m}^{-3}$. Esse padrão foi mantido até as 09 da manhã do dia 31. Diferenças positivas mais intensas surgem, principalmente, sobre o oceano entre 15 e 18 Z como o ilustrado na Figura 5-15. Durante o final da tarde e início da noite, as diferenças são

predominantemente positivas, exceto por uma região localizada na dianteira da frente de brisa, de forma similar ao identificado no caso da temperatura. No final da noite do dia 31, madrugada e início da manhã do dia 01 de novembro, as diferenças mantiveram-se baixas, inferiores a $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ na maior parte do domínio. Às 11 Z, um forte núcleo de diferenças negativas aparece no centro da grade. A partir desse horário as diferenças passam a ser predominantemente positivas. Núcleos com diferenças mais intensas aparece, novamente sobre o oceano entre 15 e 17 Z.

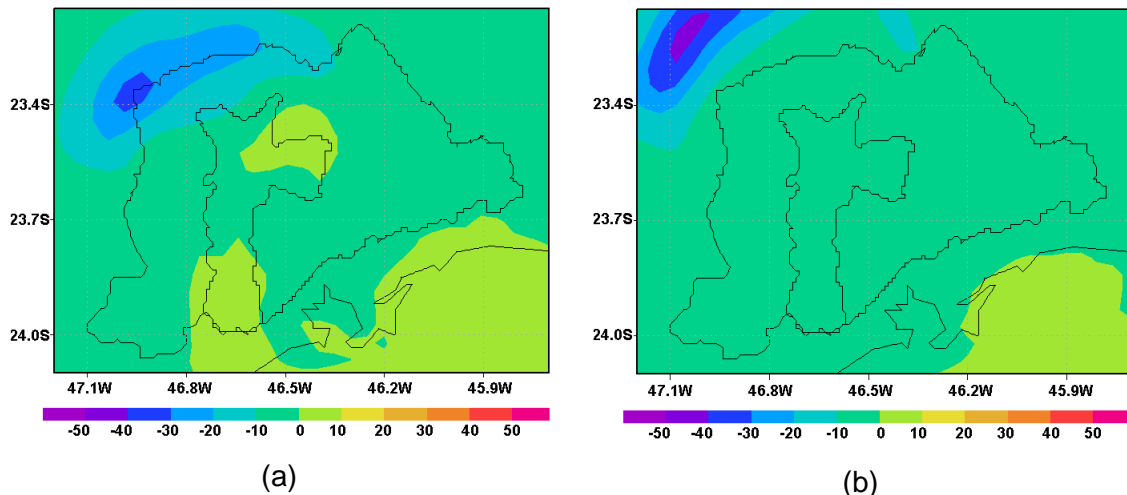


Figura 5-14: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e TEB-off no dia 30/10/2006 às (a) 19 Z e (b) 21 Z.

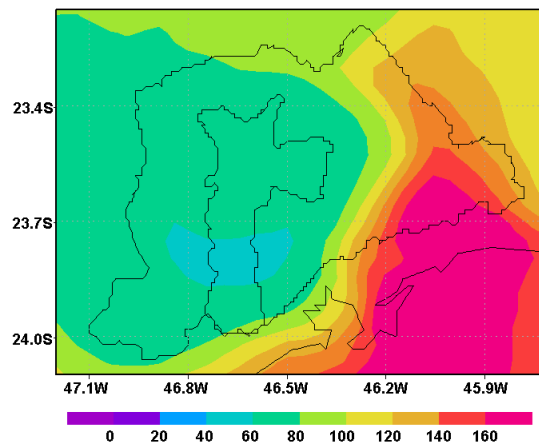


Figura 5-15: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e TEB-off no dia 31/10/2006 às 17 Z.

Comparando pontualmente os resultados referentes às duas simulações foi possível verificar que as principais diferenças foram registradas no que tange a umidade relativa. Como exemplo, a comparação com as observações realizadas pela CETESB

na Estação Ibirapuera é apresentada na Figura 5-16. Em todas as estações o perfil é bem semelhante, as diferenças entre os resultados de concentrações de ozônio produzidos pelo SPM-BRAMS através das simulações controle e TEB-off não é muito significativa. Para a temperatura do ar, as principais diferenças são encontradas no que tange os valores mínimos. O oposto acontece quando considerada a umidade relativa do ar. Contudo, as diferenças no caso da umidade relativa do ar são bem mais visíveis.

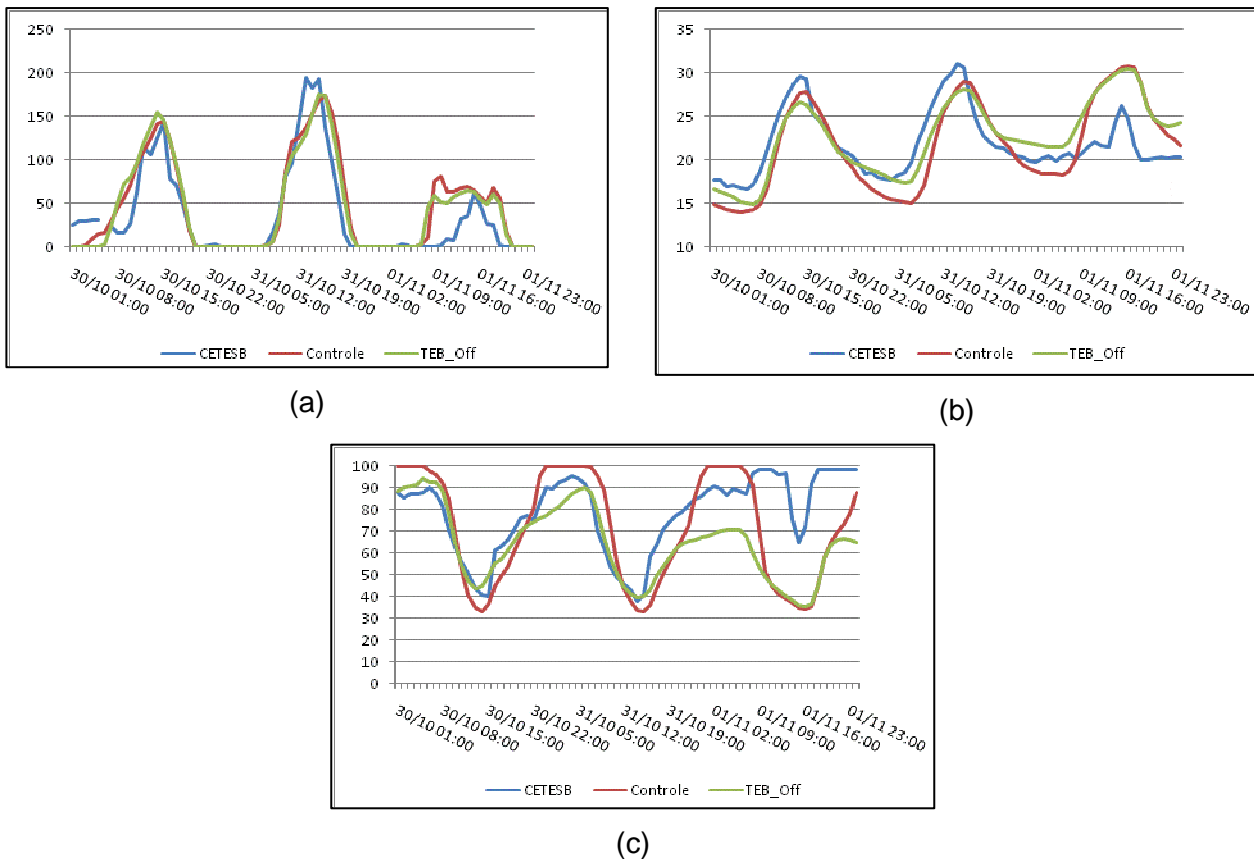


Figura 5-16: Comparação entre os valores de (a) concentração de ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), (b) temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e (c) umidade relativa do ar (%) registrados pela rede de monitoramento da CETESB na Estação Ibirapuera e as simuladas pelo modelo SPM-BRAMS.

Os resultados obtidos a partir da utilização de métodos estatísticos para a comparação dos valores de concentração de ozônio, temperatura do ar e umidade relativa produzidos pelo modelo SPM-BRAMS nas simulações controle e TEB-Off e os monitorados pela CETESB podem ser observados nas Tabelas 5-4, 5-5 e 5-6, respectivamente.

Considerando os resultados obtidos para as concentrações de ozônio, foi possível observar que os valores da correlação linear de Pearson (R) para o período verificam-se índices variando entre 0,73 e 0,90. Em geral, resultados ligeiramente superiores foram encontrados quando os resultados da simulação TEB-Off foi considerada. O oposto foi verificado para a temperatura e a umidade relativa do ar, que apresentaram índices de correlação mais baixos, porém, ligeiramente superiores na simulação controle. Os valores encontrados variaram entre 0,67 e 0,75 para a temperatura e 0,43 e 0,64 para a umidade relativa. Como citado anteriormente, as diferenças foram mais sensíveis quando a umidade relativa foi considerada.

Os valores do *viés* calculado indicam que o modelo superestimou as concentrações de ozônio registradas pela rede de monitoramento em ambas as simulações. Os maiores valores corresponderam às estações de Diadema e Pinheiros. Em geral, o *viés* foi superior na simulação controle. Também foi possível observar que a simulação controle subestimou a temperatura do ar em todas as estações consideradas. O mesmo não foi identificado na simulação TEB-Off que superestimou ligeiramente os resultados nas estações Ibirapuera e São Caetano do Sul. Exceto no caso da estação Ibirapuera, a simulação TEB-Off apresentou os menores valores. No caso da umidade relativa, ambas as simulações superestimaram os valores nas estações Pinheiros e Taboão e subestimaram no Ibirapuera e em São Caetano do Sul - estações que apresentaram os resultados mais distantes das observações. Os índices mais próximos das observações foram verificados na estação localizada no Município de Taboão da Serra.

Avaliando-se o primeiro critério para se obter *skill* em uma simulação, foi possível verificar que a média das diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} foi inferior a 15%, exceto para as estações P. Dom Pedro e Pinheiros (altamente influenciadas pelo tráfego veicular), no caso do ozônio. Em geral, o modelo esteve em concordância quando comparado às estações da CETESB. Os altos valores de desvio padrão encontrados provavelmente são devidos a grande variação das concentrações de ozônio ao longo do dia (perfil médio diário). Apenas a estação Ibirapuera apresentou para a temperatura do ar diferenças percentuais superiores a 15%. Para a umidade relativa, todas as estações apresentaram valores superiores a 15% quando considerada a simulação controle e inferiores na simulação com o TEB desativado.

Analisando os valores de RMSE foi possível avaliar o segundo critério para a obtenção do *skill* da simulação ($RMSE < \sigma_{OBS}$). O segundo critério foi atingido por todas as

estações no que se refere às concentrações de ozônio e a temperatura do ar. Para a umidade relativa apenas os resultados referentes às estações Pinheiros e Taboão (simulação TEB-Off) satisfizeram esse critério. O último critério utilizado para análise de *skill* considera o $RMSE_{UB}$. Neste caso, todas as estações consideradas satisfizeram o critério para todos os parâmetros, exceto, para a UR, as estações Ibirapuera (em ambas as simulações), Pinheiros e Taboão (apenas na simulação controle).

O índice de concordância (d), calculado para avaliar quantitativamente os valores de concentração de ozônio obtidos pelas simulações, apresentou valores altos variando entre 0,82, na estação Diadema (simulação controle), e 0,94, na estação Santana (simulação TEB-Off). Em geral, assim como no caso do índice de correlação, os resultados com o TEB desativado foram ligeiramente superiores. O mesmo ocorreu para a temperatura que apresentou valores entre 0,79 (estação São Caetano – simulação controle) e 0,84 (estação Pinheiros nas duas simulações e estação Taboão na simulação TEB-Off). Os altos valores encontrados indicaram uma concordância entre os valores produzidos pelo modelo e as observações. Os valores do índice d calculados para a umidade relativa foram mais baixos do que os referentes à temperatura e ao ozônio. Os valores entre 0,65, na estação São Caetano – simulação TEB-Off, e 0,76, na estação Taboão – simulação controle, foram superiores na simulação controle.

Tabela 5-4: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e TEB-Off no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Diadema	Controle	17,55	39,81	35,73	44,92	51,34	0,73	0,82
	TEB-Off	14,39	35,36	32,30	44,92	48,21	0,76	0,85
Ibirapuera	Controle	10,72	28,29	26,19	51,34	53,24	0,87	0,92
	TEB-Off	9,63	26,61	24,80	51,34	53,15	0,89	0,93
Mauá	Controle	4,45	29,71	29,38	44,88	47,13	0,79	0,89
	TEB-Off	1,55	25,89	25,84	44,88	45,00	0,83	0,91
N. Sra. do Ó	Controle	6,36	24,44	23,60	47,16	50,38	0,88	0,93
	TEB-Off	6,63	24,95	24,06	47,16	52,46	0,89	0,93
P. D. Pedro	Controle	11,67	29,13	26,69	39,36	52,69	0,87	0,90
	TEB-Off	10,79	28,52	26,40	39,36	53,53	0,88	0,90
Pinheiros	Controle	15,21	29,72	25,54	40,59	54,26	0,89	0,90
	TEB-Off	14,55	29,30	25,43	40,59	55,19	0,90	0,90
Santo Amaro	Controle	2,63	30,53	30,42	48,30	50,83	0,81	0,90
	TEB-Off	1,10	28,78	28,76	48,30	49,57	0,83	0,91
Santana	Controle	9,25	26,34	24,66	50,26	52,69	0,88	0,93
	TEB-Off	8,37	25,32	23,89	50,26	53,53	0,89	0,94

Tabela 5-5: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e TEB-Off no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Ibirapuera	Controle	-0,28	3,58	3,57	3,64	5,14	0,71	0,81
	TEB-Off	0,78	3,26	3,16	3,64	4,26	0,69	0,81
Pinheiros	Controle	-1,31	3,90	3,68	5,01	5,25	0,74	0,84
	TEB-Off	-0,42	3,60	3,58	5,01	4,43	0,71	0,84
S. Caetano	Controle	-1,63	4,25	3,92	4,98	4,79	0,67	0,79
	TEB-Off	0,36	3,85	3,84	4,98	4,37	0,67	0,81
Taboão	Controle	-1,85	3,80	3,32	4,29	5,02	0,75	0,82
	TEB-Off	-1,20	3,36	3,13	4,29	4,43	0,74	0,84

Tabela 5-6: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa (%) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e TEB-Off no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}	R	Índice d
Ibirapuera	Controle	-6,89	21,92	20,81	17,88	25,12	0,57	0,73
	TEB-Off	-14,02	22,72	17,89	17,88	16,89	0,46	0,65
Pinheiros	Controle	8,07	22,62	21,13	19,74	25,46	0,58	0,71
	TEB-Off	2,25	18,37	18,23	19,74	17,90	0,53	0,71
S. Caetano	Controle	-11,34	22,41	19,33	20,03	23,30	0,61	0,74
	TEB-Off	-20,49	27,54	18,41	20,03	17,68	0,52	0,63
Taboão	Controle	5,84	19,69	18,80	18,24	24,49	0,64	0,76
	TEB-Off	1,43	17,45	17,39	18,24	18,72	0,55	0,74

5.1.4. Parametrização de Turbulência

Apenas um teste foi realizado em relação à parametrização de turbulência. Ao invés da opção de parametrização onde tanto os coeficientes horizontais quanto os verticais são calculadas em esquemas baseados em Smagorinsky (1963) – considerada na simulação controle, foi utilizada a primeira opção disponível no BRAMS. Esta (a ser referida como simulação MY82), conforme já explicitado, parametriza a difusão vertical através da energia cinética turbulenta prognosticada pelo modelo de acordo com o proposto por Mellor & Yamada (1982).

Nos três dias simulados, as diferenças nas concentrações de ozônio geradas entre a simulação controle e a simulação MY82 foram baixas, principalmente, durante o período noturno e as manhãs. Em geral, os valores obtidos nesse período foram menores que $\pm 10 \mu\text{g.m}^{-3}$ em todo o domínio do modelo. Um núcleo com diferenças negativas mais intensas, ao norte-noroeste da RMSP, foi observado no dia 31 entre as 15 e 18 Z (exemplo na Figura 5-17). No dia 01 de novembro, um centro de diferenças positivas (entre 40 e 50 $\mu\text{g.m}^{-3}$) é observado, às 12 Z, sobre a região central da grade como pode ser visto na Figura 5-18 (a). A partir das 14 Z, dois núcleos negativos (Figura 5-18 b), que se mantiveram até as 18 Z, foram verificados sobre os limites da RMSP.

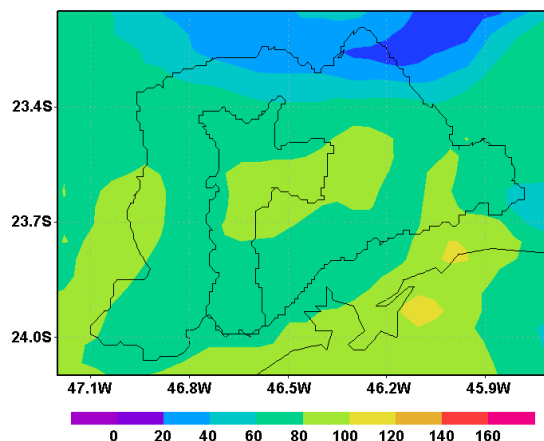


Figura 5-17: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e MY82 no dia 31/10/2006 às 17 Z.

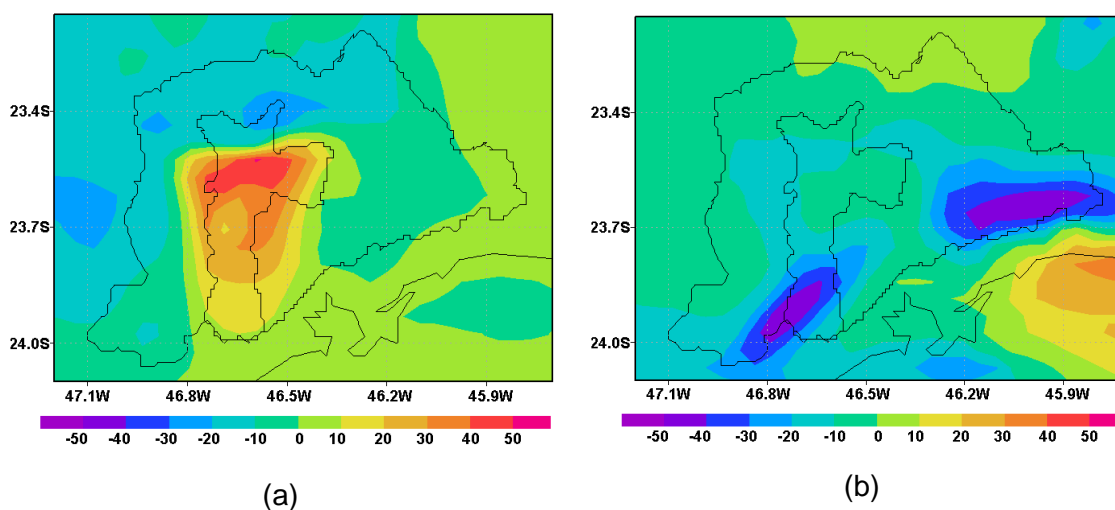


Figura 5-18: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e MY82 no dia 01/11/2006 às (a) 12 Z e (b) 16 Z.

Em geral, as diferenças no que se refere à temperatura do ar também foram baixas (em torno de $\pm 2^\circ\text{C}$). Valores superiores a este foram verificados apenas durante alguns horários durante o dia e sempre fora da região metropolitana. A umidade relativa foi mais sensível a alteração na parametrização de turbulência. Contudo, assim como para a temperatura, as diferenças na UR também foram menos intensas sobre a RMSP. Fora desta região, diferenças máximas de 20% foram verificadas praticamente durante toda a simulação. Na RMSP, diferenças dessa ordem foram identificadas apenas durante o dia 01 de novembro como ilustrado na Figura 5-19.

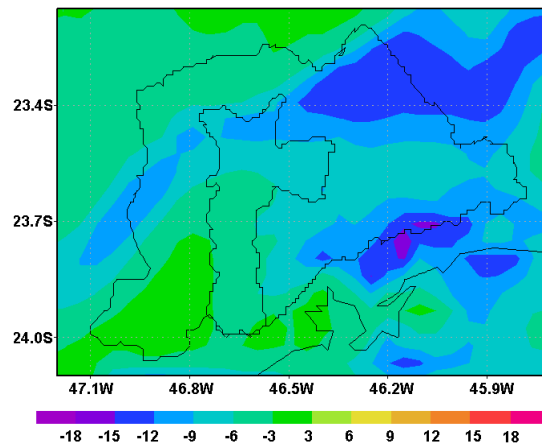


Figura 5-19: Diferenças entre os resultados de umidade relativa, em %, gerados pelas simulações considerando a simulação controle e MY82 no dia 31/10/2006 às 20 Z.

Assim como verificado quando consideradas diferentes resoluções horizontais, dentre as variáveis, o ozônio foi o que apresentou a menor variação no que tange a análise dos índices estatísticos, apresentados nas Tabelas 5-7, 5-8 e 5-9. O índice de correlação linear de Pearson revelou, para a temperatura e para a umidade relativa, apresentou valores ligeiramente superiores na simulação MY82 em todos os pontos considerados. A variação do viés calculado na simulação controle e MY82 também foi maior no caso das variáveis meteorológicas. No caso da temperatura do ar, em todas as estações consideradas, o viés foi menor quando a opção de turbulência no modelo foi substituída.

O primeiro critério para a obtenção do *skill* foi cumprido não apresentando significativas diferenças daqueles calculados e discutidos para a simulação controle. Apenas a estação São Caetano que antes não estava em conformidade com o segundo critério para a umidade relativa do ar apresentou resultados na simulação MY82 que atendem este critério. O mesmo ocorreu no ponto referente à estação Taboão da Serra em relação ao terceiro critério.

Os valores do índice de concordância indicaram, assim como no caso da correlação linear de Pearson, resultados ligeiramente superiores para temperatura e umidade relativa. No caso do ozônio, essa variação não foi observada em todas as estações. Dentre todos os pontos e parâmetros considerados, a estação São Caetano do Sul, no que se refere a umidade relativa, foi a que apresentou a maior variação no índice d (passou de 0,74 na simulação controle para 0,79 na simulação MY82).

Tabela 5-7: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e MY82 no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Diadema	Controle	17,55	39,81	35,73	44,92	51,34	0,73	0,82
	MY82	18,41	43,53	39,44	44,92	54,32	0,69	0,79
Ibirapuera	Controle	10,72	28,29	26,19	51,34	53,24	0,87	0,92
	MY82	9,86	28,73	26,99	51,34	53,09	0,86	0,92
Mauá	Controle	4,45	29,71	29,38	44,88	47,13	0,79	0,89
	MY82	4,23	31,43	31,14	44,88	47,37	0,77	0,87
N. Sra. do Ó	Controle	6,36	24,44	23,60	47,16	50,38	0,88	0,93
	MY82	8,20	23,20	21,70	47,16	51,55	0,91	0,94
P. D. Pedro	Controle	11,67	29,13	26,69	39,36	52,69	0,87	0,90
	MY82	11,62	28,98	26,55	39,36	53,03	0,87	0,90
Pinheiros	Controle	15,21	29,72	25,54	40,59	54,26	0,89	0,90
	MY82	14,38	28,61	24,74	40,59	53,90	0,90	0,91
Santo Amaro	Controle	2,63	30,53	30,42	48,30	50,83	0,81	0,90
	MY82	3,12	33,53	33,39	48,30	52,54	0,78	0,88
Santana	Controle	9,25	26,34	24,66	50,26	52,69	0,88	0,93
	MY82	9,20	25,80	24,10	50,26	53,03	0,89	0,94

Tabela 5-8: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e MY82 no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Ibirapuera	Controle	-0,28	3,58	3,57	3,64	5,14	0,71	0,81
	MY82	0,16	3,51	3,50	3,64	5,16	0,73	0,82
Pinheiros	Controle	-1,31	3,90	3,68	5,01	5,25	0,74	0,84
	MY82	-0,80	3,74	3,66	5,01	5,33	0,75	0,86
S. Caetano	Controle	-1,63	4,25	3,92	4,98	4,79	0,67	0,79
	MY82	-1,32	3,99	3,76	4,98	4,75	0,70	0,82
Taboão	Controle	-1,85	3,80	3,32	4,29	5,02	0,75	0,82
	MY82	-1,41	3,56	3,27	4,29	5,12	0,77	0,85

Tabela 5-9: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa (%) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e MY82 no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Ibirapuera	Controle	-6,89	21,92	20,81	17,88	25,12	0,57	0,73
	MY82	-3,42	19,91	19,61	17,88	24,28	0,60	0,76
Pinheiros	Controle	8,07	22,62	21,13	19,74	25,46	0,58	0,71
	MY82	11,20	23,15	20,27	19,74	24,96	0,60	0,71
S. Caetano	Controle	-11,34	22,41	19,33	20,03	23,30	0,61	0,74
	MY82	-7,06	19,15	17,81	20,03	21,94	0,64	0,79
Taboão	Controle	5,84	19,69	18,80	18,24	24,49	0,64	0,76
	MY82	9,20	20,17	17,95	18,24	24,07	0,67	0,76

5.1.5. Parametrização de cumulus

Foram realizadas duas simulações, além da simulação controle, considerando variações na parametrização de convecção. Conforme relatado anteriormente, na simulação controle foram ativadas as parametrizações de cumulus profundos e rasos, baseadas em Kuo (1974) e Souza & Da Silva (2003) para a primeira grade (de 20 km). Na primeira simulação, a opção de parametrização de cumulus baseada em Kuo (1974) foi alterada para a baseada em Grell (1993) e a parametrização de cumulus rasos foi mantida ligada. Na segunda simulação, foi avaliado o impacto da não consideração da parametrização para cumulus rasos disponível no modelo.

O impacto de utilizar a parametrização baseada em Grell (1993) nas concentrações de ozônio foi pequeno, inferior a $\pm 10 \mu\text{g.m}^{-3}$, praticamente durante toda a simulação. Apenas no dia 01 de novembro, diferenças mais intensas da ordem de $\pm 40 \mu\text{g.m}^{-3}$ foram verificadas durante a tarde em algumas áreas na RMSP como pode ser observado na Figura 5-20. Conforme relatado anteriormente, nesse dia foi registrado um aumento da nebulosidade sobre região por conta da aproximação de uma frente fria.

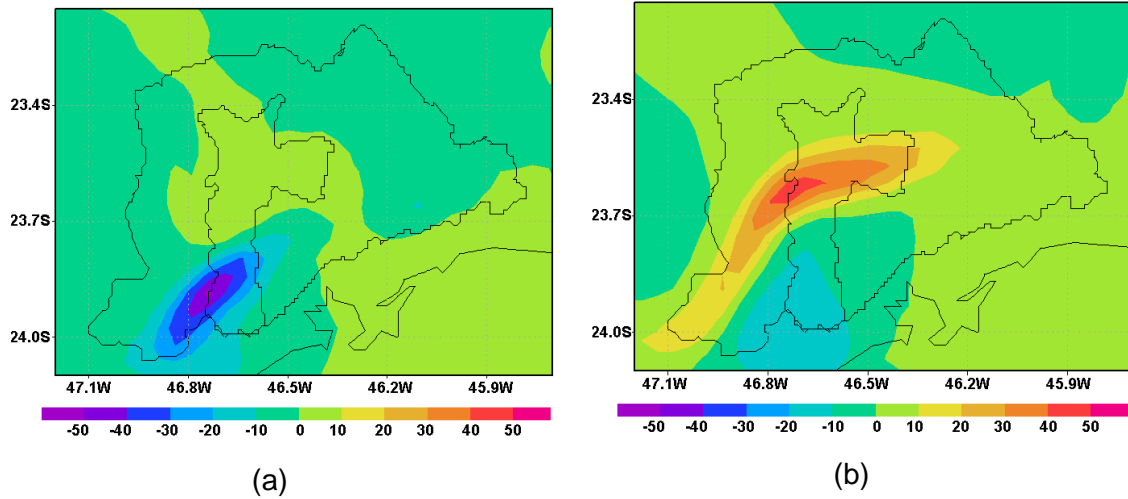


Figura 5-20: Diferenças entre as concentrações de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, produzidas nas simulações controle e considerando a parametrização baseada em Grell (1993) no dia 01/11/2006 às (a) 17 Z e (b) 21 Z.

Na temperatura e umidade relativa do ar, as maiores diferenças, em relação à simulação controle, também foram, em geral, pequenas – menores que $\pm 0,5^\circ\text{C}$ e $\pm 3\%$, respectivamente. As diferenças mais intensas foram verificadas em alguns horários a partir da noite do dia 31, principalmente, nas bordas do domínio. Assim como para o ozônio, também foram identificadas diferenças mais fortes nos campos de temperatura e umidade relativa durante o dia 01 de novembro como pode ser observado na Figura 5-21.

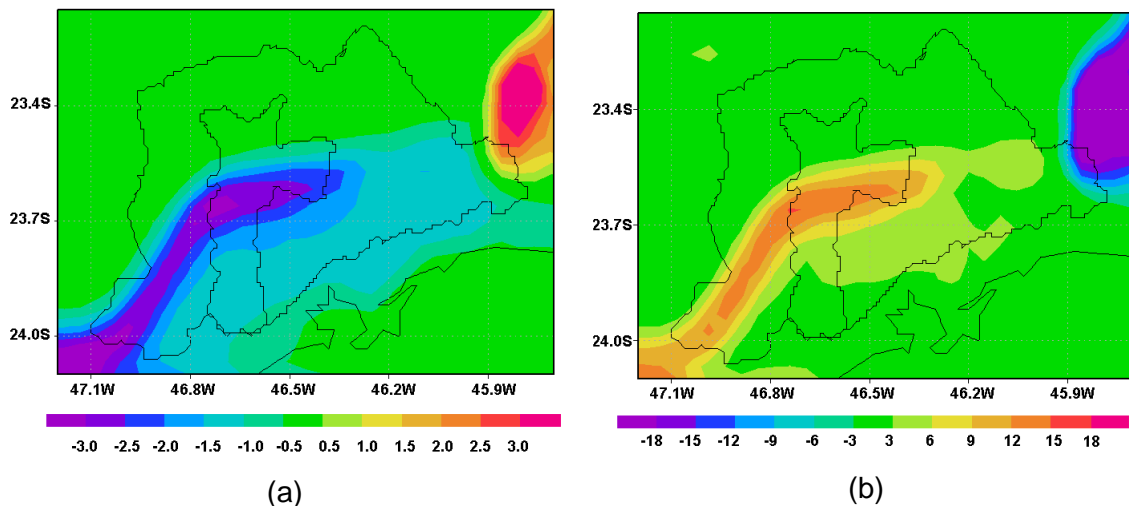


Figura 5-21: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em $^\circ\text{C}$, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações controle e considerando a parametrização baseada em Grell (1993) no dia 01/11/2006 às 21 Z.

Foram verificadas diferenças na fração de céu claro simulada pelo modelo, principalmente, durante o período da manhã como pode ser observado na Figura 5-22. No geral, a diferença na precipitação não foi significativa sobre a RMSP. Alguns valores mais intensos foram verificados no final da tarde do dia 01 próximo as bordas do domínio.

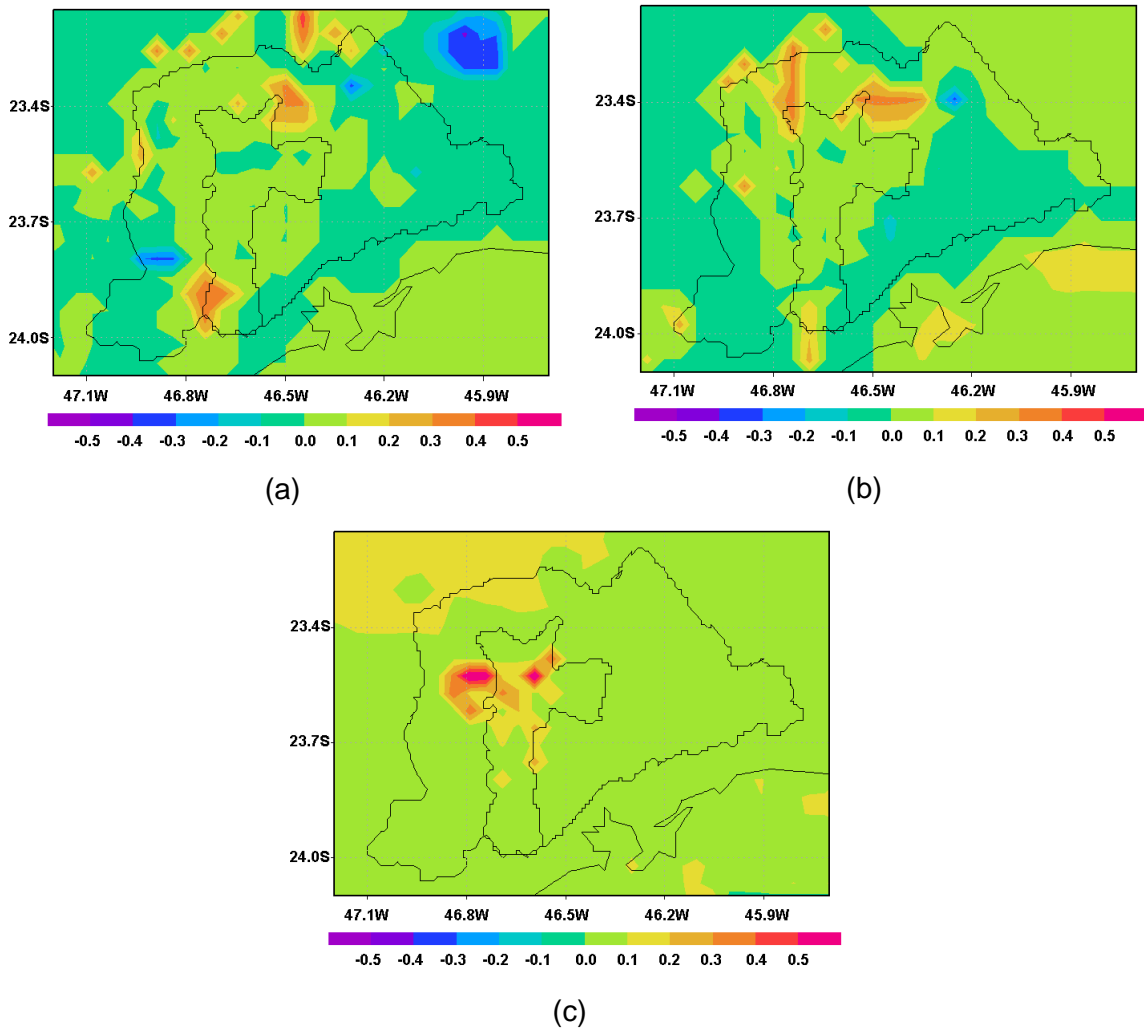


Figura 5-22: Diferenças entre os resultados de fração de céu claro gerados pelas simulações controle e considerando a parametrização baseada em Grell (1993) nos dias (a) 30/10/2006 08 Z, (b) 31/10/2006 09 Z e (c) 01/11/2006 10 Z.

Os resultados encontrados quando a parametrização de cumulus rasos foi desligada apresentaram desvios ainda menores em relação à simulação controle. No caso do ozônio, por exemplo, as diferenças encontradas nunca superaram o valor de $\pm 10 \mu\text{g.m}^{-3}$. Para a temperatura e a umidade relativa, as diferenças também foram baixas. Os maiores valores para ambas as variáveis foram atingidos na manhã do dia 30 de outubro como ilustrado na Figura 5-23.

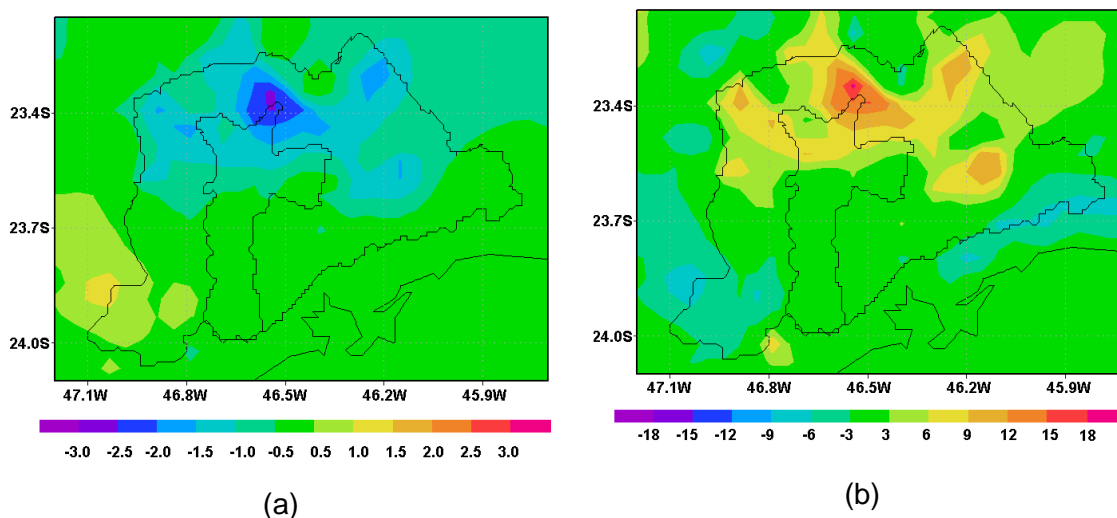


Figura 5-23: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em °C, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações controle e considerando a parametrização baseada em Souza & Da Silva (2003) desativada no dia 30/10/2006 às 11 Z.

Comparando os valores obtidos através das três simulações com os dados da CETESB não foi possível observar grandes variações nos resultados dos índices estatísticos considerados por este estudo, tanto no caso das concentrações de ozônio quanto no caso da temperatura e umidade relativa do ar (resultados não mostrados).

5.1.6. Dados para inicialização do modelo

Para avaliar o impacto da utilização de dados de entrada com melhor resolução espacial e temporal foi realizado o *downscaling* a partir da análise do GFS/NCEP (1° de resolução). A primeira simulação foi realizada com duas grades, sendo a primeira de baixa resolução (40 km) e a segunda de 20 km. Com os resultados dessa simulação, referentes à grade de 20 km, foram gerados os arquivos necessários para a inicialização do modelo. Com estes foi realizada outra simulação para uma grade de 5 km, coincidente com a utilizada na simulação controle. Essa rodada será referida como simulação *downscaling*. As mesmas parametrizações consideradas na simulação controle foram utilizadas.

Em média, o impacto nas concentrações de ozônio foi mais significativo do que nos demais testes de sensibilidade. Durante o período noturno, principalmente, nos dias 30 e 31 de outubro, os desvios (em geral, de até 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), em relação a simulação

controle foram predominantemente negativos sobre a RMSP, indicando valores superiores na simulação *downscaling* (observar como exemplo a Figura 5-24). No dia 30, um núcleo negativo mais intenso, que se mantém até as 09 Z, é identificado no litoral, próximo à região de Cubatão.

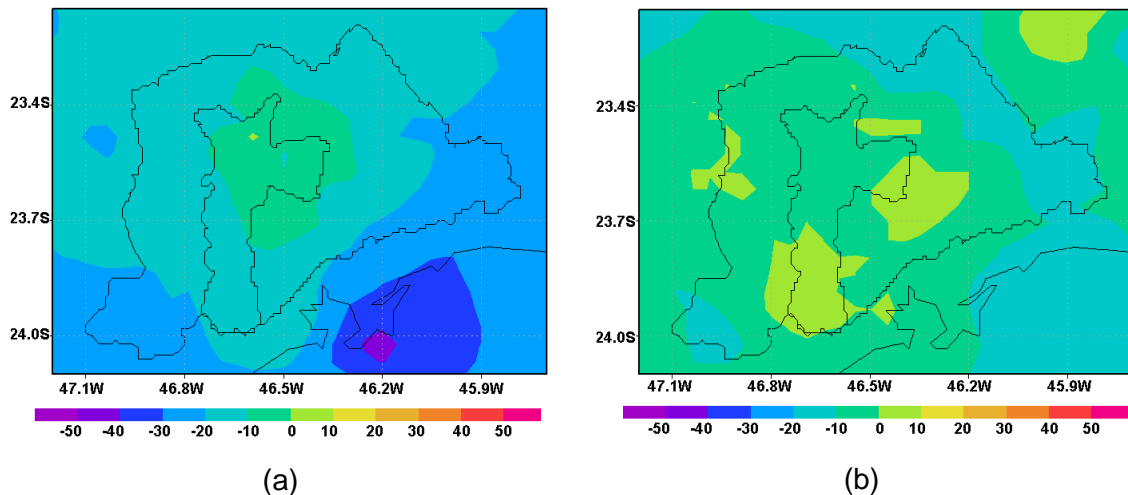


Figura 5-24: Diferenças entre os resultados de concentração de ozônio, em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, gerados pelas simulações controle e *downscaling* (a) no dia 30/10/2006 às 05 Z e (b) no dia 31/10/2006 às 03 Z.

Durante o dia 30, como pode ser observado na Figura 5-25 (a), um núcleo com desvios negativos entre 30 e 40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pode ser observado a leste da RMSP. Esse núcleo é intensificado entre 13 e 14 Z e mantém-se por várias horas (até as 21 Z). Às 17 Z (Figura 5-25 b), um núcleo com intensos desvios positivos surge a leste da região metropolitana. Após esse horário, ambos os núcleos deslocam-se para noroeste (com a penetração da brisa marítima). Um intenso núcleo com diferenças negativas também é verificado sobre a RMSP durante o final da manhã e parte da tarde do dia 31 de outubro. No litoral, novamente são verificadas fortes diferenças positivas indicando valores superiores na simulação controle. No dia 01 de novembro, fortes desvios positivos foram encontrados sobre a RMSP, principalmente, no leste da região e em parte da Baixada Santista. Os campos destacados acima podem ser observados na Figura 5-26.

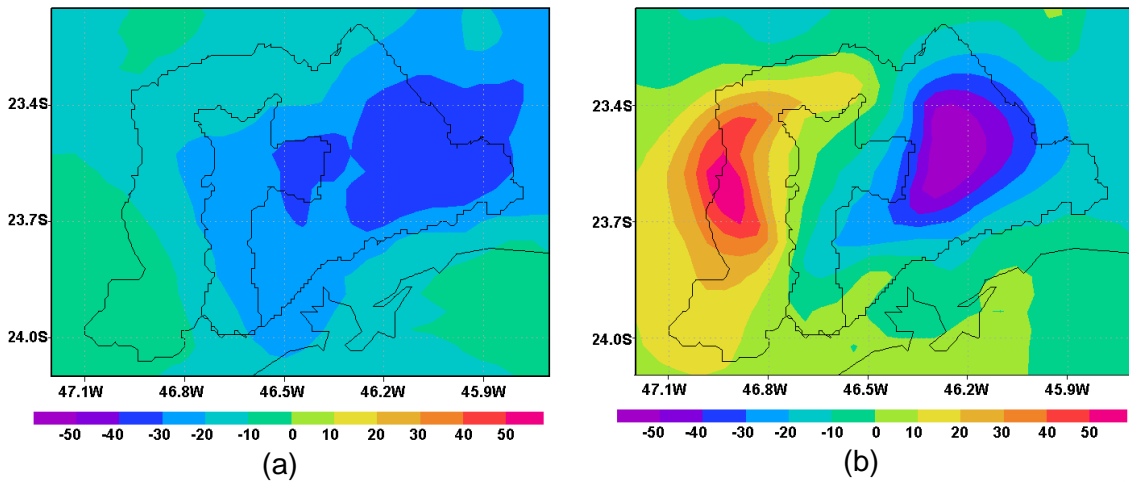


Figura 5-25: Diferenças entre os resultados de concentração de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, gerados pelas simulações controle e *downscaling* no dia 30/10/2006 às (a) 12 Z e (b) 17 Z.

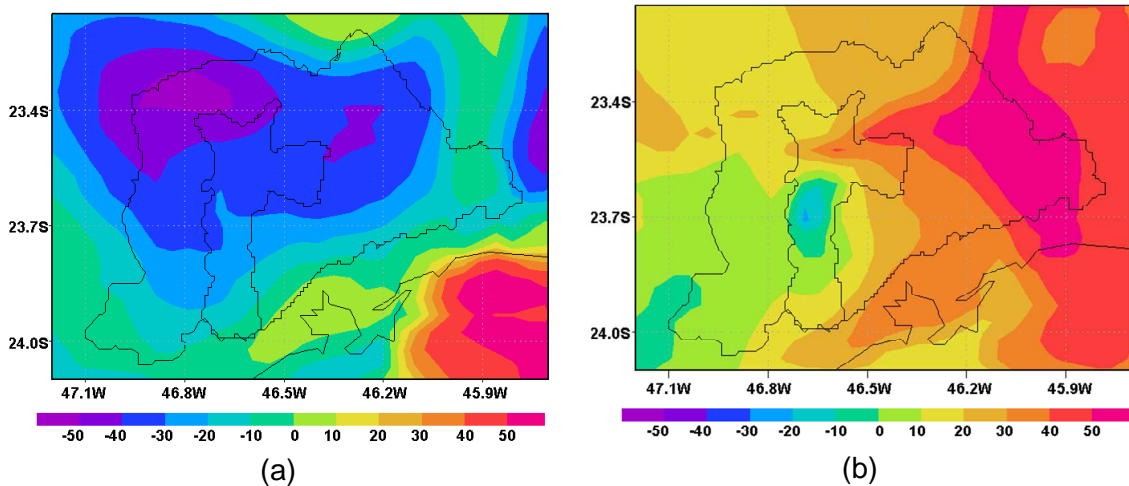


Figura 5-26: Diferenças entre os resultados de concentração de ozônio, em $\mu\text{g.m}^{-3}$, gerados pelas simulações controle e *downscaling* (a) no dia 31/10/2006 às 14 Z e (b) no dia 01/11/2006 às 12 Z.

Ao contrário do identificado na avaliação das diferenças nas concentrações de ozônio geradas pela simulação controle e *downscaling*, as menores diferenças nos campos de temperatura e umidade foram encontradas no final da manhã e no início da tarde (como exemplo, observar a Figura 5-27). Entre 19 e 23 Z, tanto no dia 30 quanto no dia 31 de outubro, diferenças negativas superiores a 15% foram identificadas à leste da RMSP. Diferenças positivas intensas nos valores de umidade relativa também foram verificadas na região da frente de brisa nos dias 30 de outubro e, principalmente, no dia 01 de novembro. As diferenças para a temperatura do ar não foram tão visíveis. Analisando individualmente os campos de UR e os de vento gerados em cada uma das simulações verifica-se que as principais diferenças devem-

se ao posicionamento da frente de brisa, mais avançada na simulação *downscaling*. Entre 09 e 11 Z do dia 01, foi verificado sobre a área central da RMSP um intenso núcleo positivo no campo da UR e negativo para a temperatura do ar.

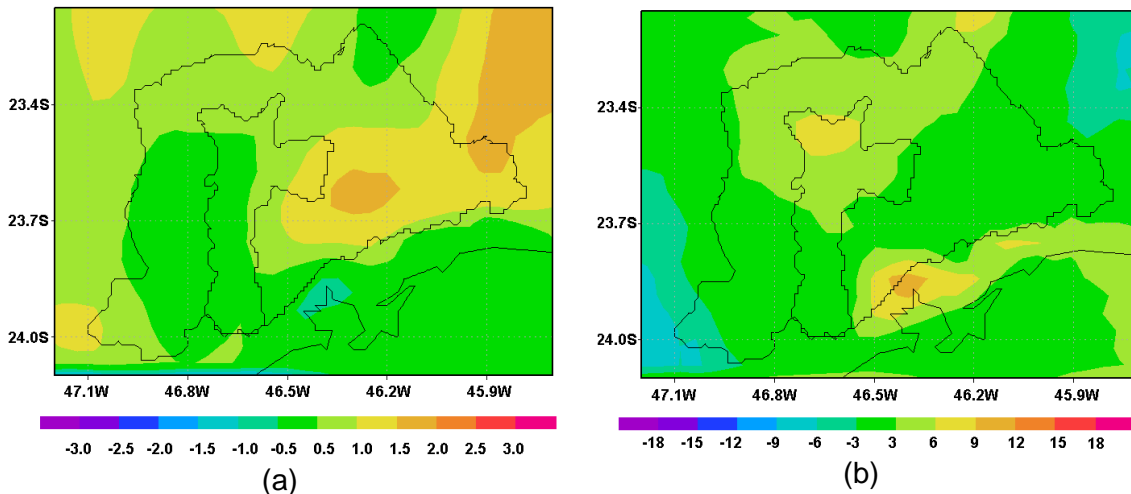


Figura 5-27: Diferenças entre os resultados de (a) temperatura, em °C, e (b) umidade relativa do ar, em %, gerados pelas simulações controle e *downscaling* no dia 30/10/2006 às 14 Z.

Em geral, comparando os resultados obtidos nas simulações controle e *downscaling* com as observações realizadas pela rede de monitoramento da CETESB foi possível verificar uma melhoria na representação das curvas e, principalmente, dos máximos na maioria das estações. Os perfis obtidos para o período estão apresentados na Figura 5-28.

Para o dia 30 de outubro, apenas os perfis, produzidos pela simulação com o *downscaling*, referentes às estações Nossa Senhora do Ó e Mauá apresentaram melhorias, em relação à simulação controle, revelando valores máximos mais próximos do verificado nas estações de monitoramento. As demais estações consideradas apresentaram resultados bem próximos aos verificados na simulação controle, exceto para a estação Santo Amaro que superestimou as concentrações antes representadas corretamente pela simulação controle. No dia 31, a maioria das estações apresentou resultados na simulação *downscaling* mais próximos dos observados, exceto no caso das estações Parque Dom Pedro II e Pinheiros, estações localizadas em áreas altamente influenciadas pelo tráfego veicular. As concentrações máximas diárias também foram, em geral, mais bem representadas no dia 01 de novembro. Vale ressaltar que não houve alteração significativa no perfil das concentrações neste dia, em geral, não bem representado por ambas as simulações.

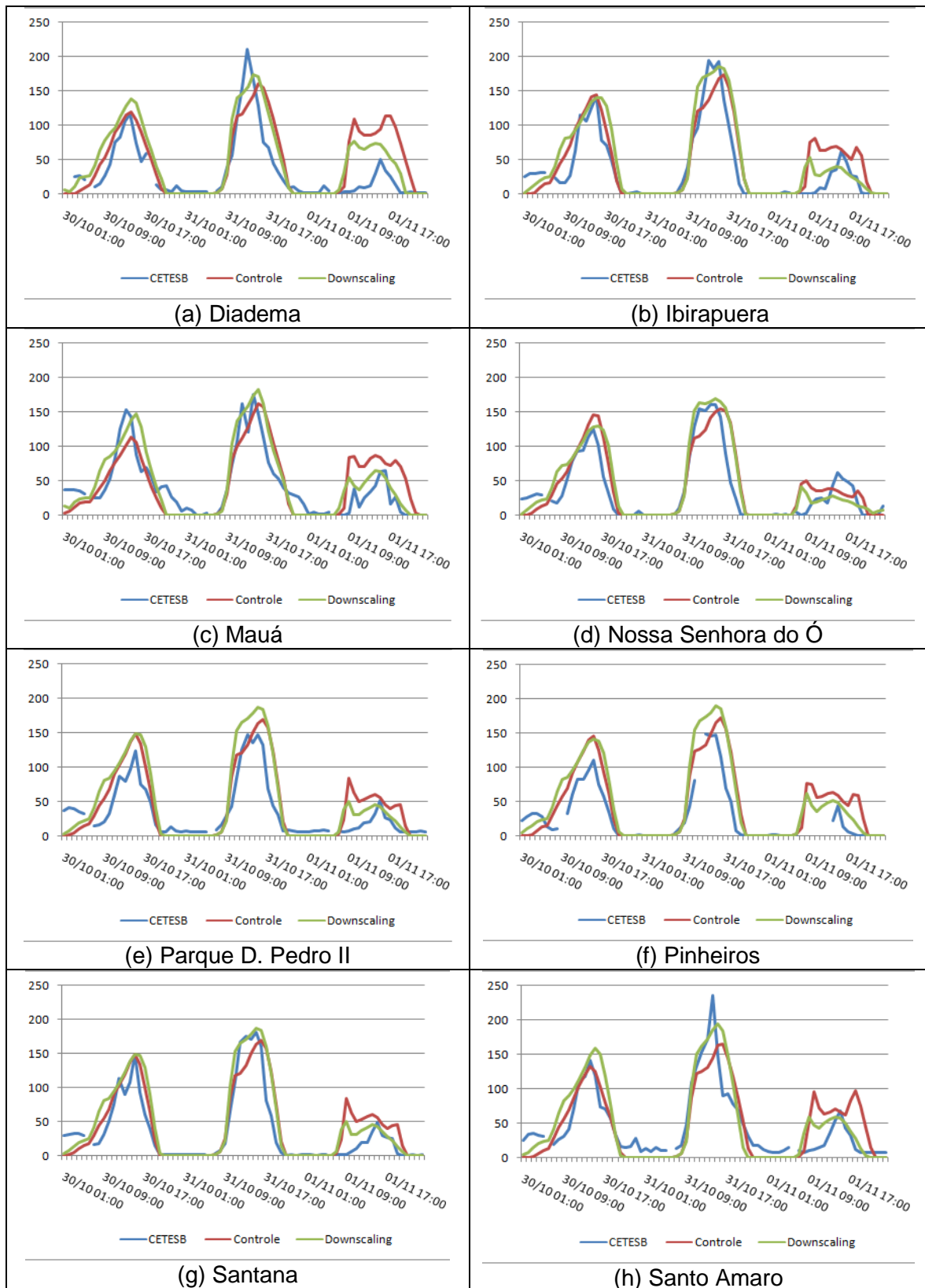


Figura 5-28: Comparação entre os valores de concentração de ozônio, em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, obtidos através das simulações controle e downscaling e registrados pela rede de monitoramento da CETESB.

O impacto da simulação *downscaling* nos valores de temperatura e umidade relativa do ar calculados para os pontos onde estão localizadas as estações da CETESB foi bem menor do que o observado quando as concentrações de ozônio foram analisadas. Como exemplo, a comparação para a estação Ibirapuera é apresentada na Figura 5-29. Em geral, todas as estações apresentaram resultados semelhantes. No caso, os valores mínimos de temperatura do ar ficaram mais próximos dos observados, principalmente, no dia 31 de outubro e 01 de novembro. Pequenas variações foram verificadas nos valores máximos. O maior impacto durante o período noturno já havia sido identificado quando as diferenças em todo o domínio foram consideradas. As diferenças foram ainda menores no caso da umidade relativa do ar, principalmente, nos dois primeiros dias da simulação.

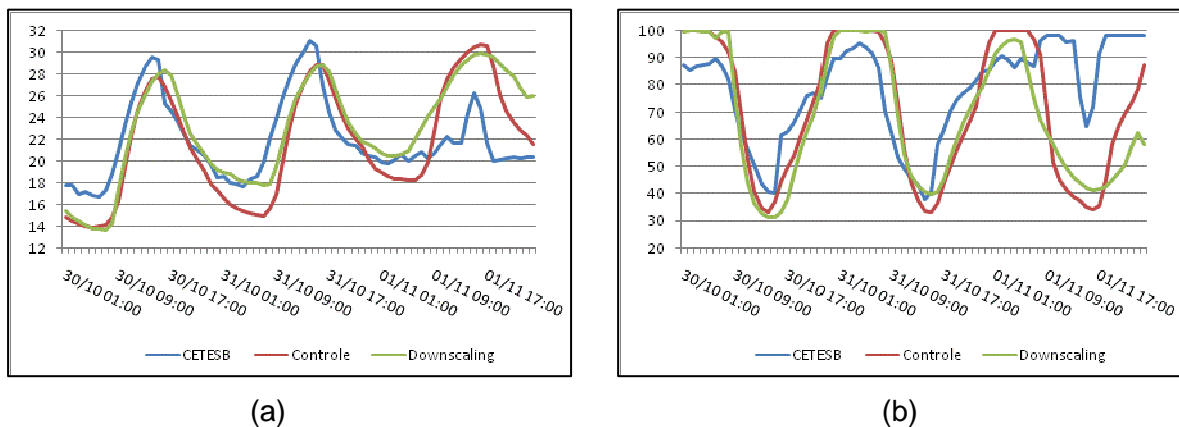


Figura 5-29: Comparação entre os valores de (a) temperatura (°C) e (b) umidade relativa do ar (%) registrados pela rede de monitoramento da CETESB na Estação Ibirapuera e as simuladas pelo modelo SPM-BRAMS.

Melhores resultados no que se refere às concentrações de ozônio também foram observados quando alguns métodos estatísticos foram calculados (Tabela 5-10). Um aumento nos valores dos índices de correlação linear de Pearson e de concordância foi identificado em todos os pontos considerados com destaque para as estações de Diadema, Mauá e Santo Amaro. Essas estações também foram as que apresentaram as maiores diferenças nos valores do RMSE e $RMSE_{UB}$. A média da correlação, no que tange as concentrações de O_3 , passou de 0,84, na simulação controle, para 0,91, na simulação *downscaling*. Em geral, o desvio padrão e o viés calculados com os resultados da simulação *downscaling* apresentaram resultados mais distantes do obtido para as observações, em relação à simulação controle.

Para a temperatura e a umidade relativa do ar, os resultados, apresentados na Tabela 5-11 e na Tabela 5-12, não revelaram significativas melhorias em relação à simulação controle. No caso, tanto os índices de correlação quanto os de concordância apresentaram valores, em geral, menores para a simulação *downscaling*.

Tabela 5-10: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e *Downscaling* no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Diadema	Controle	17,55	39,81	35,73	44,92	51,34	0,73	0,82
	<i>Downscaling</i>	16,87	31,33	26,40	44,92	52,92	0,86	0,90
Ibirapuera	Controle	10,72	28,29	26,19	51,34	53,24	0,87	0,92
	<i>Downscaling</i>	11,63	27,10	24,48	51,34	58,97	0,91	0,94
Mauá	Controle	4,45	29,71	29,38	44,88	47,13	0,79	0,89
	<i>Downscaling</i>	6,10	23,85	23,06	44,88	53,14	0,90	0,94
N. Sra. do Ó	Controle	6,36	24,44	23,60	47,16	50,38	0,88	0,93
	<i>Downscaling</i>	8,94	25,26	23,63	47,16	55,66	0,91	0,94
P. D. Pedro	Controle	11,67	29,13	26,69	39,36	52,69	0,87	0,90
	<i>Downscaling</i>	14,20	31,49	28,10	39,36	59,32	0,91	0,90
Pinheiros	Controle	15,21	29,72	25,54	40,59	54,26	0,89	0,90
	<i>Downscaling</i>	17,92	31,52	25,92	40,59	59,79	0,94	0,90
Santo Amaro	Controle	2,63	30,53	30,42	48,30	50,83	0,81	0,90
	<i>Downscaling</i>	4,22	27,18	26,86	48,30	59,36	0,89	0,93
Santana	Controle	9,25	26,34	24,66	50,26	52,69	0,88	0,93
	<i>Downscaling</i>	11,78	25,33	22,42	50,26	59,32	0,93	0,95

Tabela 5-11: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura (°C) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e *Downscaling* no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Ibirapuera	Controle	-0,28	3,58	3,57	3,64	5,14	0,71	0,81
	<i>Downscaling</i>	0,97	3,75	3,62	3,64	4,79	0,66	0,78
Pinheiros	Controle	-1,31	3,90	3,68	5,01	5,25	0,74	0,84
	<i>Downscaling</i>	-0,26	3,95	3,94	5,01	4,77	0,67	0,82
S. Caetano	Controle	-1,63	4,25	3,92	4,98	4,79	0,67	0,79
	<i>Downscaling</i>	-0,53	4,40	4,37	4,98	4,49	0,57	0,75
Taboão	Controle	-1,85	3,80	3,32	4,29	5,02	0,75	0,82
	<i>Downscaling</i>	-0,66	3,53	3,47	4,29	4,49	0,68	0,82

Tabela 5-12: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa (%) disponíveis e com os resultados das simulações Controle e Downscaling no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Estação	Simulação	Viés	RMSE	RMSE _{UB}	σ_{Obs}	σ_{Sim}	R	Índice d
Ibirapuera	Controle	-6,89	21,92	20,81	17,88	25,12	0,57	0,73
	<i>Downscaling</i>	-9,90	23,38	21,18	17,88	24,05	0,52	0,70
Pinheiros	Controle	8,07	22,62	21,13	19,74	25,46	0,58	0,71
	<i>Downscaling</i>	6,26	22,69	21,81	19,74	23,73	0,50	0,68
S. Caetano	Controle	-11,34	22,41	19,33	20,03	23,30	0,61	0,74
	<i>Downscaling</i>	-14,74	24,07	19,03	20,03	21,18	0,57	0,70
Taboão	Controle	5,84	19,69	18,80	18,24	24,49	0,64	0,76
	<i>Downscaling</i>	3,45	18,92	18,60	18,24	21,83	0,58	0,75

5.1.7. Resumo dos resultados obtidos com os testes de sensibilidade

Os resultados obtidos através da análise de variações na resolução espacial horizontal indicaram um impacto significativo, principalmente, no tamanho das áreas afetadas, sobre a RMSP, por concentrações de ozônio superiores à estabelecida pelo PNQA. Em geral, nos 3 dias de simulação, quanto maior a resolução horizontal utilizada, maior foi a extensão da área atingida por maiores concentrações de O₃. Ou seja, no caso, a grade com 2 km de resolução foi a que apresentou maiores concentrações sobre uma área maior dentro do domínio do modelo. Em relação às comparações pontuais com os dados registrados pela rede de monitoramento da CETESB, não foi identificado um comportamento linear. Contudo, os resultados dos índices estatísticos para o ozônio e para as variáveis meteorológicas consideradas foram ligeiramente superiores nas simulações considerando as grades de 4 e 2 km.

Grandes diferenças foram verificadas nas análises correspondentes a distribuição de concentração de ozônio produzidos em 3 simulações considerando as parametrizações de Chen & Cotton (1983), Mahrer & Pielke (1977) e Harrington (1997). As maiores diferenças corresponderam ao dia 01 de novembro quando foi observado um aumento de nebulosidade sobre a região. As concentrações de ozônio nesse dia foram bastante superestimadas nas simulações MP77 e H97. No geral, a parametrização de Chen & Cotton (1983) mostrou-se a mais adequada.

A avaliação dos resultados obtidos com a simulação considerando o modelo TEB ativado ou não, não influenciou significativamente as concentrações de ozônio simuladas pelo modelo. Esses resultados foram corroborados pela análise pontual

realizada para as estações da CETESB com dados disponíveis. Em geral, uma pequena diferença foi notada, com resultados ligeiramente melhores na simulação com o TEB desligado. Para a temperatura e umidade relativa, o impacto foi maior e a simulação controle (com o TEB ligado) apresentou os melhores índices estatísticos. O índice de correlação de Pearson médio, para a umidade relativa do ar, foi de 0,52, com o TEB desligado, para 0,60.

A simulação realizada considerando a primeira opção de parametrização de turbulência disponível no BRAMS revelou impactos mais fortes no campo da umidade relativa. Os índices estatísticos de correlação e concordância apresentaram resultados ligeiramente superiores tanto para a umidade quanto para a temperatura do ar. No caso das concentrações de ozônio, o efeito não foi linear. Algumas estações apresentaram resultados ligeiramente superiores, enquanto outras não.

O impacto de variações na parametrização de cumulus disponível no modelo nas concentrações de ozônio e nos parâmetros meteorológicos considerados foi, em geral, pequeno. Assim como nos testes com as parametrizações de radiação, as diferenças mais significativas foram verificadas no dia 01 de novembro. As comparações pontuais não revelaram diferenças significativas.

O impacto da inicialização do modelo com dados com maior resolução foi avaliado através da utilização dos próprios resultados obtidos com grades de menor resolução para alimentar o modelo. No caso, duas simulações foram realizadas: a primeira com duas grades aninhadas, de 40 e 20 km, e a segunda com apenas uma grade de 5 km. Os resultados da primeira rodada foram utilizados para inicialização do modelo na segunda simulação. Os resultados obtidos revelaram significativas variações, principalmente, no que tange as concentrações de ozônio. Um forte impacto nos campos de temperatura e umidade também foi observado. A comparação dos resultados de forma pontual revelou índices de correlação e concordância mais elevados para o ozônio. O oposto ocorreu para a temperatura e para a umidade relativa. É importante destacar aqui que, em geral, os monitores de ozônio, na rede de monitoramento da CETESB, são instalados em localidades consideradas representativas de uma escala urbana e não de uma escala local. Isso se deve, principalmente, ao fato do ozônio ser um poluente secundário.

5.2. Avaliação dos Episódios de Concentração de Ozônio

5.2.1. Entre 24 de fevereiro e 05 de março de 2003

5.2.1.1. Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar

Durante o período de interesse, foi identificada, por meio da avaliação dos dados de reanálise produzidos pelo NCEP, a atuação de um sistema de alta pressão sobre toda a região sudeste do Brasil. A predominância dos ventos em escala sinótica durante o período foi de sudeste com ventos de NE, principalmente, entre os dias 28 de fevereiro e 03 de março. Os dados provenientes do METAR produzido no aeroporto de Guarulhos identificaram predominância de condições de céu-claro ou pouca cobertura de nuvens na maior parte do período. A partir da noite do dia 05 de março, em decorrência da entrada de um sistema frontal, foi registrado um aumento na cobertura de nuvens.

Para esse período, o modelo BRAMS apresentou resultados coerentes com o observado, com predominância de condições de céu claro. No final da tarde e início da noite do dia 03 de março, os resultados indicaram a presença de nebulosidade sobre todo o leste da RMSP com ocorrência de precipitação sobre o litoral do Estado (Figura 5-30 a). No dia 04 de março, como ilustrado na Figura 5-30 (b), durante a tarde, também foi verificada precipitação e nebulosidade, principalmente, sobre o sudoeste e norte do domínio. A partir da tarde do dia 05 também foi verificado um aumento da fração de cobertura de nuvens em praticamente toda a grade considerada.

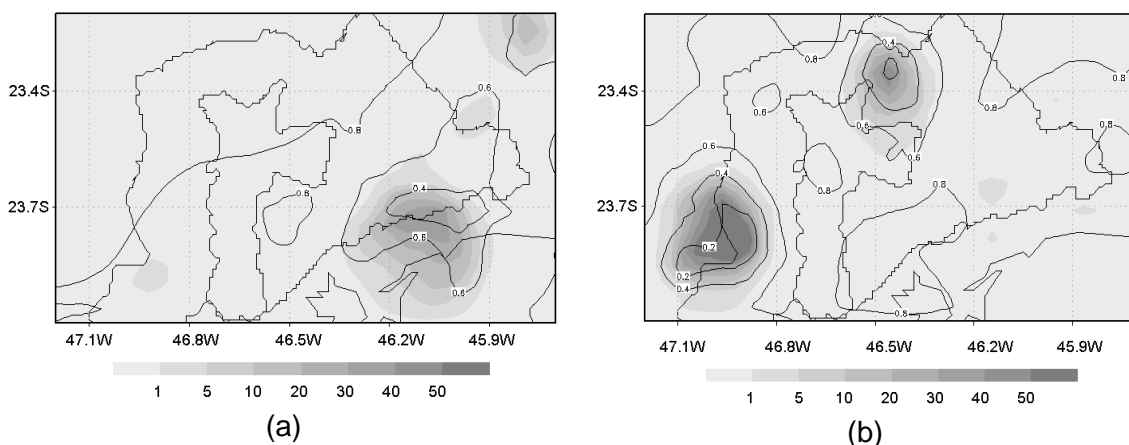


Figura 5-30: Fração de cobertura de nuvens (contornos) e precipitação (sombreado), em mm/hora, simuladas pelo modelo BRAMS para os dias (a) 03/03/2003 às 20 Z e (b) 04/03/2003 às 16 Z.

As observações meteorológicas produzidas através do METAR também revelaram a ocorrência de altas temperaturas durante todo o período. A média das máximas ficou em torno de 32 °C. A velocidade média dos ventos registrados durante o período no aeroporto revelou valores ligeiramente acima dos 2 m.s⁻¹. Durante todo o período simulado, o modelo também apresentou resultados condizentes com as observações. Foram identificados altos valores de temperatura e baixa umidade relativa durante o final da manhã e todas as tardes, além de ventos fracos, principalmente, durante as madrugadas e as manhãs.

O maior número de estações com registros superiores ao limite estabelecido pelo CONAMA ocorreu nos dias 24 e 28 de fevereiro e 01 e 04 de março. Na maior parte do período foram identificadas características similares onde o padrão sinótico de larga escala com ventos fracos favoreceu a propagação de circulações de mesoescala. Em geral, foram verificados ventos fracos, principalmente, durante a madrugada e manhã com intensificação no início da tarde dos ventos de SE. O horário em que a frente de brisa atingiu o centro da grade variou um pouco de acordo com o dia. Vale ressaltar que o centro da grade (ponto com latitude -23,6° S e longitude -46,4° W) está localizado a 60 km da linha de costa. O horário no qual a brisa marítima atingiu esse ponto foi determinado através do aumento da velocidade dos ventos e do aumento da razão de mistura. A atuação da brisa marítima auxiliou no transporte das concentrações de ozônio e de seus precursores como será apresentado adiante.

No dia 24, por exemplo, maiores níveis de concentração de ozônio começaram a se formar na RMSP às 12 Z (10 horas da manhã). A maior intensidade da pluma foi simulada pelo modelo entre meio dia e uma hora da tarde. Por cinco horas após o seu início, a pluma não se deslocou, mantendo-se centrada, principalmente, sobre parte dos municípios de São Paulo e Osasco. Durante esse período, os ventos simulados sobre a região foram bem fracos. Apenas às 18 Z, com a entrada brisa marítima, a pluma começa a se deslocar em direção ao noroeste da RMSP. A evolução do campo de vento e das concentrações de ozônio simuladas a partir das 12 Z (com intervalo de 2 horas) pode ser observada na Figura 5-31.

Outro aspecto interessante verificado nos resultados do modelo referentes ao dia 24 de fevereiro foi a amplitude dos picos de concentração de NO_x, em média menor, do que nos demais dias do período. Os valores máximos simulados ficaram em torno de 50 µg.m⁻³, durante a manhã, e 40 µg.m⁻³, no período noturno como pode ser observado na Figura 5-32. Em geral, considerando todo o período, o contrário foi

identificado com maiores valores durante a noite na maioria dos dias simulados. Esse comportamento é condizente com o registrado pela rede de monitoramento da CETESB.

Em relação às variáveis meteorológicas simuladas pelo modelo, além das condições de ventos calmos, também foram simulados, durante o final da manhã e parte da tarde do dia 24 de fevereiro, altos valores de temperatura do ar e de radiação de onda curta incidente (superiores a 30 °C e 900 W.m⁻², respectivamente) e baixos valores de umidade relativa (inferiores a 40% na maior parte do domínio). Os valores da altura da camada limite planetária (CLP) variaram entre 250 m e 2250 m durante o dia. Durante a madrugada e a manhã do dia 24, boa parte da grade apresentou valores inferiores a 500 m. No final da manhã, a altura média da CLP na RMSP passou a aumentar ficando em torno de 1000 m. Ao final da tarde, os valores eram superiores a 1500 m em todo o domínio, exceto na faixa litorânea que apresentou valores inferiores a 1000 m.

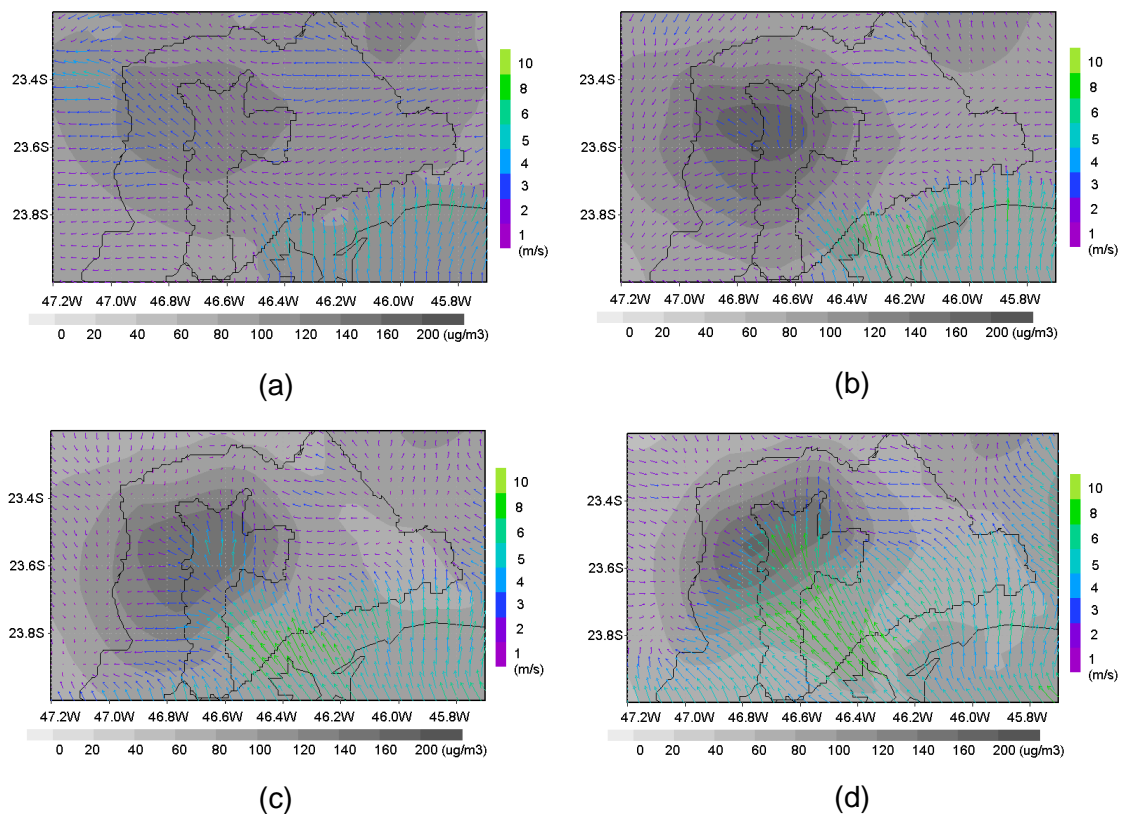


Figura 5-31: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 24 de fevereiro (a) 12 Z, (b) 14 Z, (c) 16 Z e (d) 18 Z.

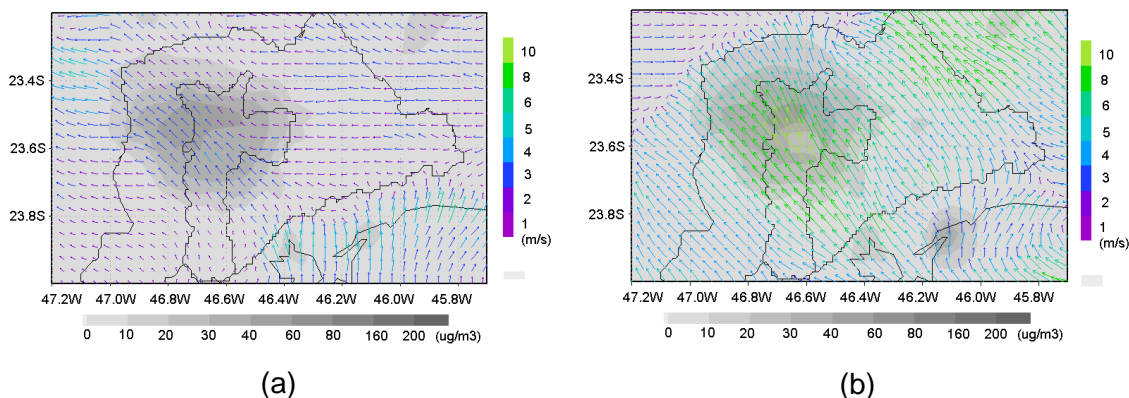


Figura 5-32: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 24 de fevereiro (a) 11 Z e (b) 21 Z.

No dia 25 de fevereiro, um grande núcleo com concentrações de ozônio que caracterizam violações ao PNQA foi verificado sobre o centro da RMSP entre as 15 e 19 Z (Figura 5-34 a). Apenas após as 20 Z, as concentrações começaram a diminuir e a pluma foi deslocada para NW com a entrada da frente de brisa. Nos dias 26 e 27, as concentrações de O_3 simuladas pelo modelo foram menores e o centro da pluma esteve ligeiramente deslocado para noroeste (exemplo na Figura 5-34 b). Uma característica comum nestes três dias foi a não dissipação por completo da pluma de NO_x que permaneceu durante todo o dia sobre o centro da grade. Durante a madrugada, também foi observado que a pluma persistiu, contudo, com menor intensidade, sobre a região.

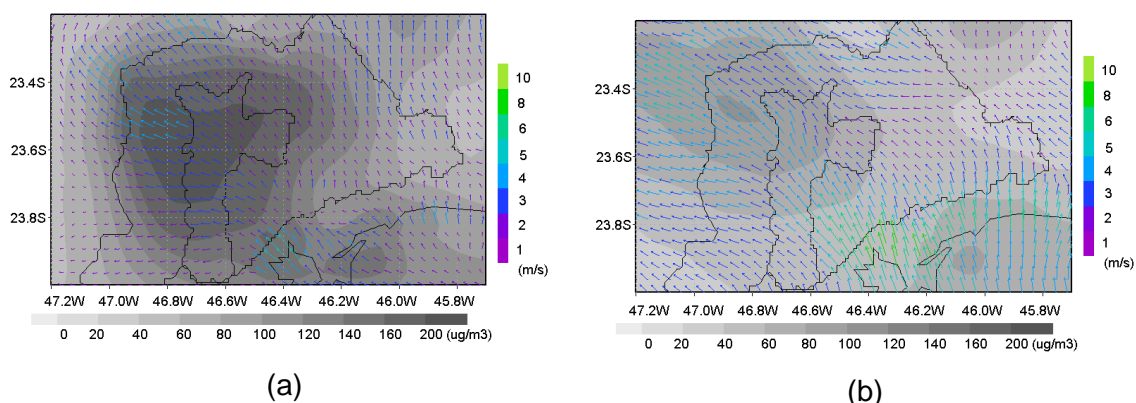


Figura 5-33: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente aos dias (a) 25 de fevereiro às 18 Z e (b) 27 de fevereiro às 14 Z.

Durante os dias 28 de fevereiro e 01 de março características bem similares foram verificadas. Nos dois dias, a pluma de concentração de ozônio começou a surgir às 11 Z, com máxima intensidade às 17 Z quando maiores valores foram verificados em boa

parte da RMSP e em parte do litoral sobre os municípios de Cubatão e Santos (Figura 5-34). A partir desse horário, o deslocamento para noroeste da pluma, impulsionado pela entrada da brisa marítima, foi rápido.

Outro ponto em comum foi o acúmulo de NO_x durante a madrugada. Em geral, a pluma de NO_x se dissipa após o pico noturno. Contudo, tanto no dia 28 quanto no dia 01, durante a madrugada, a pluma não se dissipou e manteve-se sobre o centro-oeste da RMSP. Durante a manhã, com o aumento da emissão veicular, os níveis de NO_x ultrapassam os $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ como pode ser visto na Figura 5-35. Assim como no dia 24 de fevereiro, as concentrações dos óxidos de nitrogênio foram superiores durante o dia.

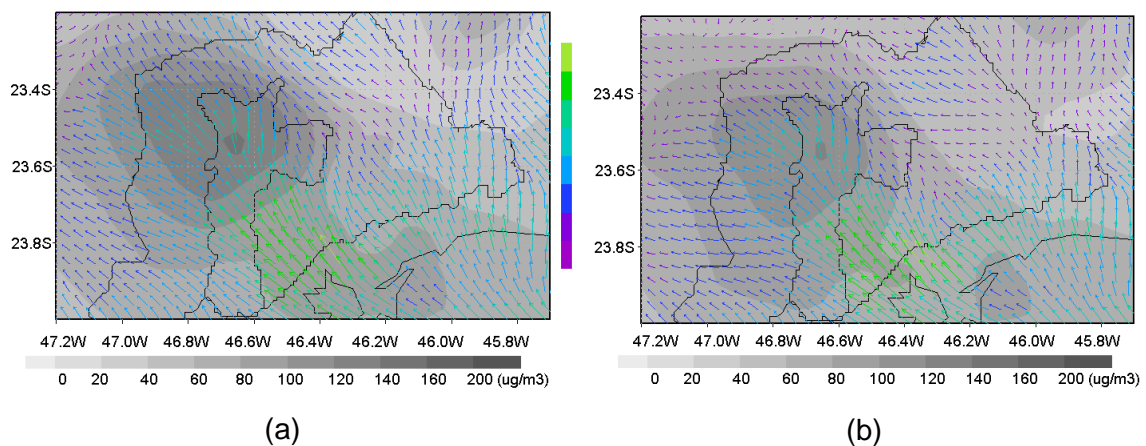


Figura 5-34: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente aos dias (a) 28 de fevereiro às 17 Z e (b) 01 de março às 17 Z.

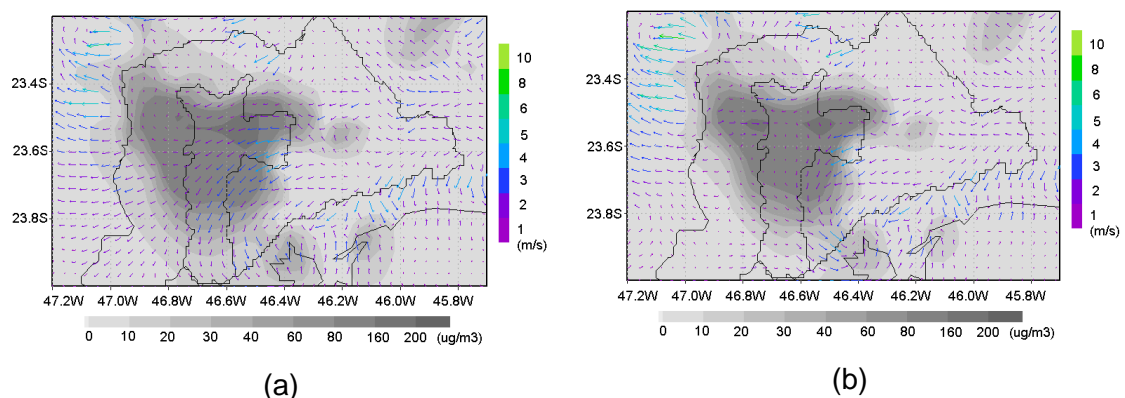


Figura 5-35: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente aos dias (a) 28 de fevereiro às 10 Z e (b) 01 de março às 10 Z.

As condições meteorológicas simuladas pelo modelo para os dias 28 de fevereiro e 01 de março revelaram a ausência de nuvens e de precipitação em todo o domínio. A

temperatura esteve acima dos 30 °C e os valores de UR foram inferiores a 30% durante a tarde em ambos os dias. Em toda a RMSP, os valores de altura da CLP foram inferiores a 300 m durante toda a madrugada e o início da manhã o que pode ter contribuído para o acúmulo dos NO_x , assim como de outros precursores (Figura 5-36). No final da manhã, conforme o esperado, a altura da CLP começa a aumentar atingindo valores superiores a 2000 m em algumas áreas.

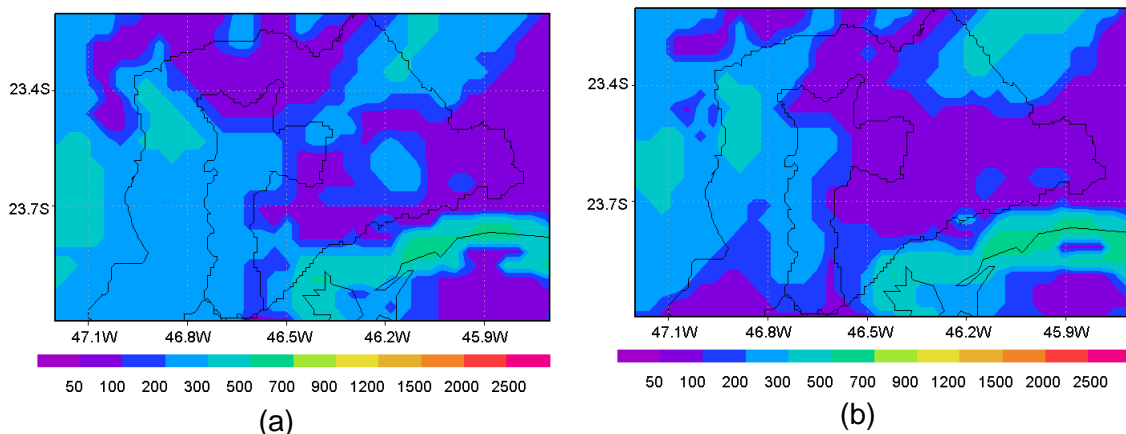


Figura 5-36: Altura da CLP (m) referente aos dias (a) 28 de fevereiro às 06 Z e (b) 01 de março às 06 Z.

Durante a noite do dia 28 e madrugada do dia 01, também foi possível observar a ocorrência de brisa terrestre, não muito intensa, em parte do litoral paulista. A partir das 23 Z (21 horas), pode ser observado o enfraquecimento dos ventos sobre a linha de costa. No dia 28 de fevereiro, duas horas mais tarde, foi possível observar a inversão dos ventos em alguns pontos do litoral (Figura 5-37), apesar dos ventos utilizados para a inicialização do modelo serem de SE. Assim como o identificado por Freitas (2003) não é possível observar a brisa terrestre sobre toda a faixa litorânea.

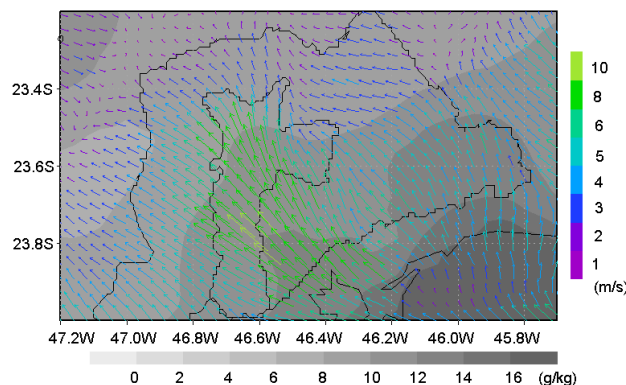


Figura 5-37: Campo de Vento e de razão de mistura (g/kg) referente ao dia 28 de fevereiro às 23 Z.

Nos dias 02 e 03 de março de 2003, os ventos de escala sinótica se intensificam ligeiramente e as concentrações de O_3 simuladas pelo modelo SPM, em geral, foram mais baixas do que as verificadas nos dias anteriores. Um aspecto interessante observado no dia 03 de março foi a advecção da pluma de ozônio para sudeste durante parte da tarde. Apenas após as 18 Z, o núcleo com concentrações mais intensas passou a ser deslocado para noroeste acompanhando a frente de brisa.

No dia 04 de março também foi identificada a ocorrência de ventos ligeiramente mais fortes durante a madrugada e a manhã. A partir das 16 Z, também foi detectada a intensificação dos ventos associados com o aumento da atividade convectiva na região. Dois núcleos com concentrações de O_3 e de NO_x mais intensas, sobre o centro da RMSP e sobre parte do litoral, foram verificados (Figura 5-38). No caso das concentrações de NO_x foi verificado que o núcleo permaneceu durante todo o dia centrado sobre a RMSP. Apenas a partir do final da noite, após o segundo pico de emissão de poluentes associado ao tráfego veicular, a pluma passou a ser transportada para NW.

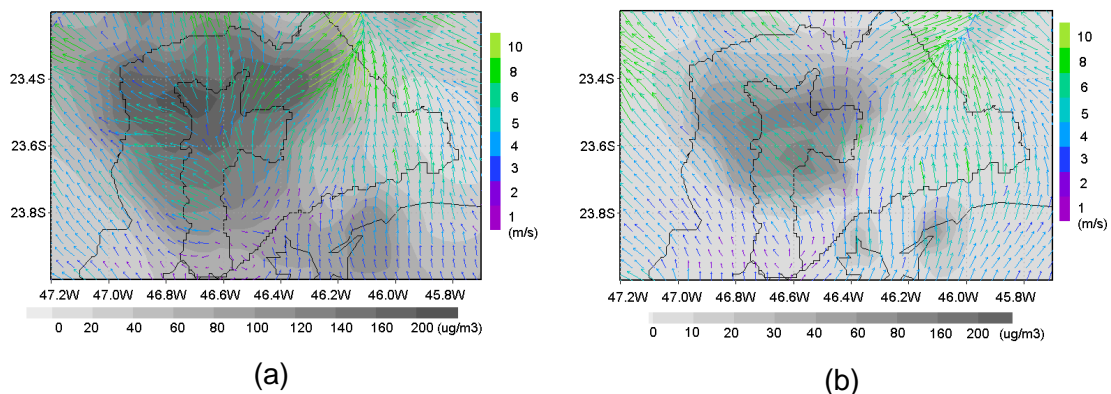


Figura 5-38: Campo de Vento e Concentração de (a) ozônio ($\mu g \cdot m^{-3}$) e (b) NO_x ($\mu g \cdot m^{-3}$) referente ao dia 04 de março as 19 e 20 Z, respectivamente.

A ocorrência de precipitação, por conta da aproximação de um sistema frontal, ainda que fraca, parece ter alterado a distribuição das concentrações de ozônio, ora mantendo os pontos de máxima intensidade no centro da grade (entre as células convectivas como pode ser observado na Figura 5-39 a), ora os deslocando para fora destas (Figura 5-39 b). Contudo, é importante ressaltar que o modelo não registrou queda nos valores de concentração de ozônio nos dias 04 e 05 como poderá ser visto no item 5.2.2.2. Vale também destacar que apesar de não representar o processo de deposição de poluentes de forma explícita, o modelo, em geral, consegue simular a redução nas concentrações de precursores e do próprio ozônio através da

representação de fenômenos associados a turbulência e a dispersão destes poluentes.

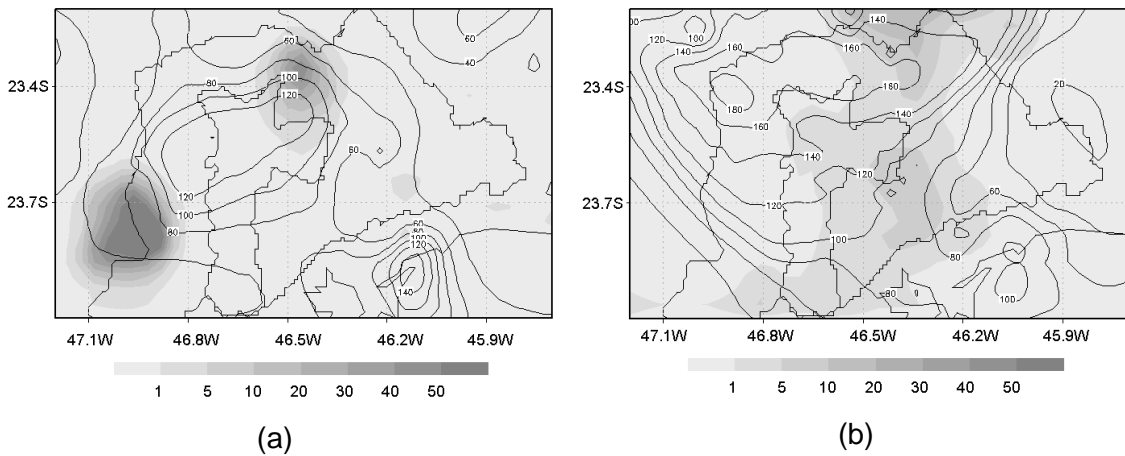


Figura 5-39: Campo de precipitação (mm/hora) e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 04 de março às (a) 16 Z e (b) 20 Z.

No dia 05 de março a maioria das estações da CETESB registrou queda nas concentrações de ozônio. Apenas as estações Ibirapuera e Santo Amaro registraram índices de qualidade do ar considerados inadequados. Observando os resultados da simulação é possível inferir que essa diminuição das concentrações de ozônio deve estar relacionada com o aumento da nebulosidade e conseqüente diminuição da radiação solar incidente, além é claro, da ocorrência de precipitação que atuou, principalmente, na remoção de alguns precursores. O modelo SPM-BRAMS também registrou diminuição nas concentrações dos poluentes primários e secundários durante o dia 05. Avaliando a evolução das concentrações de NO_x foi possível detectar um leve aumento das concentrações no período da manhã (associado à intensificação do tráfego de veículos). Contudo, a pluma foi menos intensa do que normalmente seria em um dia de semana. O núcleo de concentrações dos óxidos de nitrogênio mais elevados permaneceu centrado sobre o município de São Paulo até as 20 horas. As máximas concentrações, inferiores a $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, foram simuladas mais cedo que o normalmente verificado, às 13 Z (11 da manhã).

5.2.2.2. Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados medidos pela CETESB

Os resultados de concentração de ozônio simulados pelo modelo SPM-BRAMS foram, em média, menores do que os registrados pela rede de monitoramento da CETESB. Com exceção de algumas estações, o modelo subestimou as concentrações de O_3 registradas pela CETESB, principalmente, no período entre 27 de fevereiro e 04 de março. No último dia de simulação, 05 de março de 2003, o modelo superestimou os valores de concentração em todas as estações consideradas. As estações cujos picos de concentração foram melhores simulados pelo modelo foram as estações Parque Dom Pedro e São Miguel Paulista (Figura 5-40). Também vale a pena ressaltar que, no dia 26 de fevereiro, o modelo representou adequadamente os maiores valores de O_3 em todas as estações. Nesse dia, apenas a estação Santana apresentou resultados superiores aos simulados pelo SPM-BRAMS.

O comportamento diurno das concentrações de ozônio e o horário de ocorrência dos máximos foi, em geral, bem representado pelo modelo em todos os pontos considerados. Um ponto a ser discutido é a simulação de valores de concentração acima dos $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ durante a madrugada do dia 24, em todas as estações, e na madrugada do dia 25, excetuando-se as estações Moóca, Parque Dom Pedro, Pinheiros e Santana. Esse padrão não foi identificado através dos dados provenientes do monitoramento da qualidade do ar na região, com exceção da estação Santo Amaro que apresentou esse comportamento, com concentrações noturnas acima de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ em todos os dias considerados. Esse comportamento, ilustrado pelos dados observados no local, não é muito comum em grandes centros urbanos, uma vez que existe muito NO disponível. A reação de consumo do NO com o O_3 é bastante rápida na troposfera, e a diminuição das concentrações de ozônio durante a noite, em geral, ocorre de forma brusca.

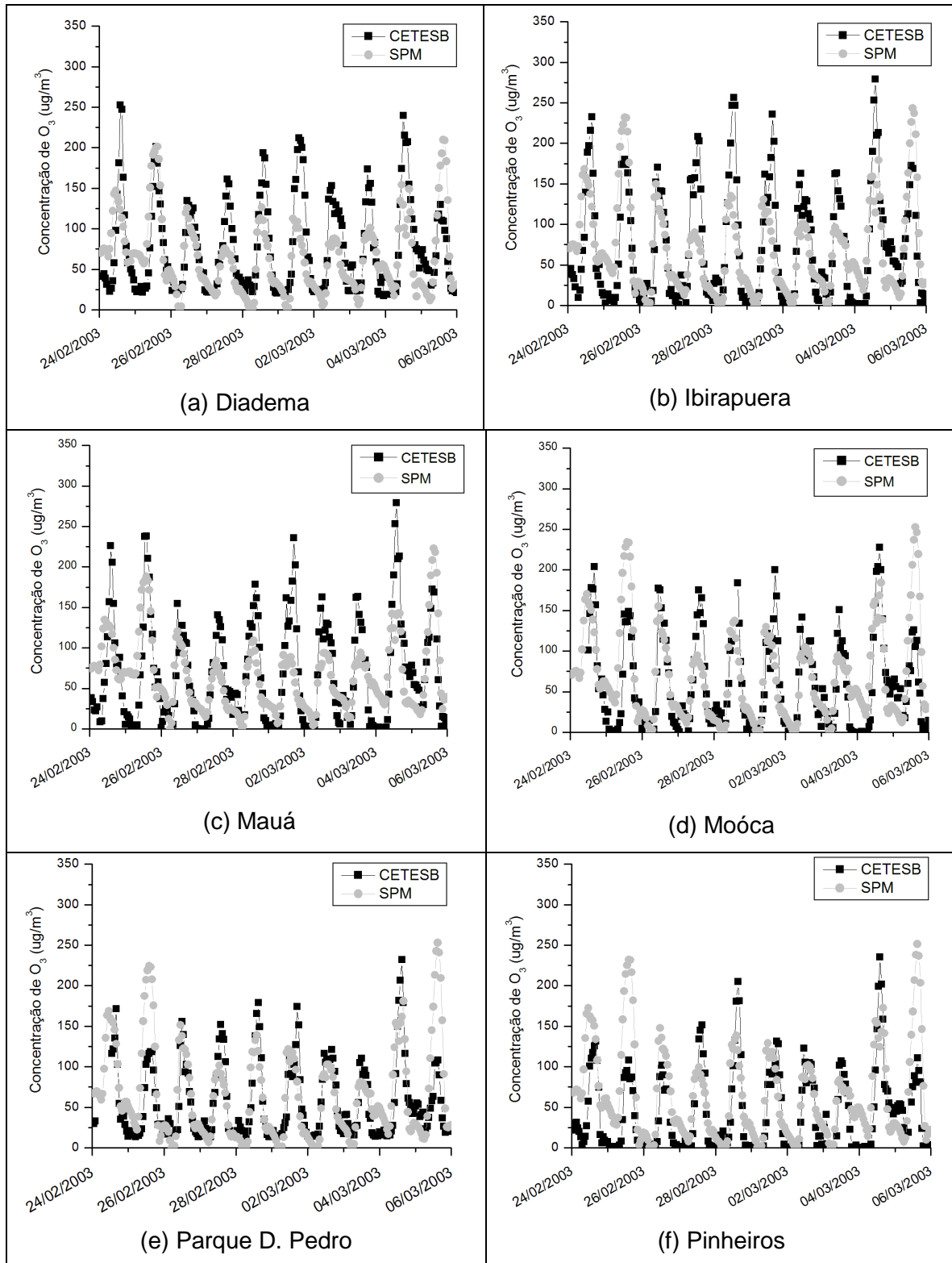


Figura 5-40: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu g.m^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

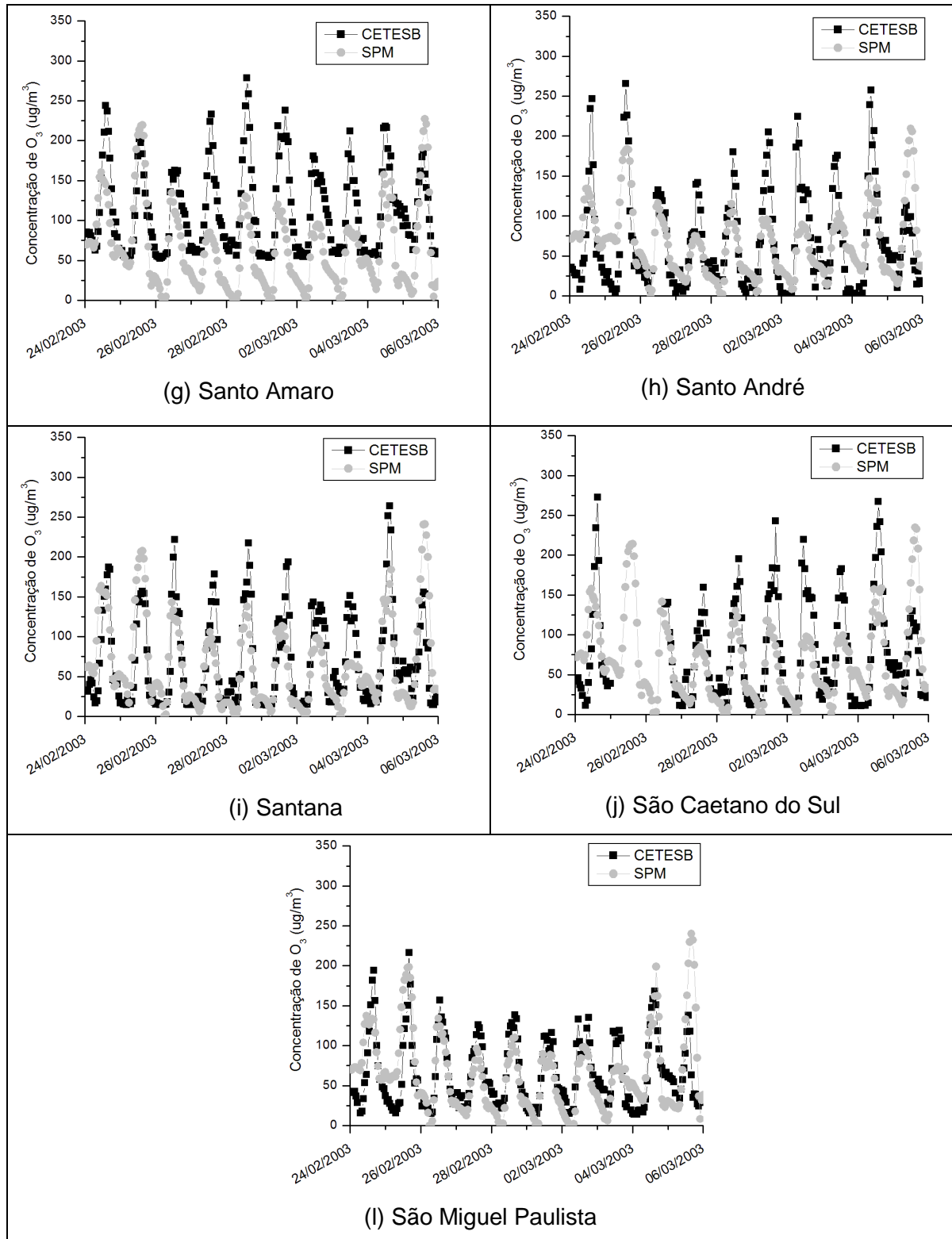


Figura 5-40: Continuação.

O perfil das concentrações dos óxidos de nitrogênio e de monóxido de carbono não foi tão bem representado pelo modelo como pode ser observado nas Figuras 5.41, 5.42 e 5.43. A influência direta das fontes de emissão atmosférica na concentração destes compostos, provavelmente, é a principal causa deste comportamento. Em relação ao

monóxido de nitrogênio, em geral, as concentrações desses poluentes foram bastante subestimadas pelo modelo, principalmente, em estações influenciadas diretamente por vias de tráfego intenso de veículos, como é o caso das estações Cerqueira César e Parque Dom Pedro – consideradas estações de escala local (Figura 5-41). No caso das concentrações de NO_2 , o perfil diário foi ligeiramente melhor simulado. A magnitude das concentrações foi mais bem representada no caso das estações consideradas de caráter mais regional como é o caso das estações Ibirapuera e Mauá (Figura 5-42). A representação simplificada das emissões no modelo, que considera apenas duas taxas, considerando o grau de urbanização da região, é uma das possíveis causas para estes resultados. Além disso, como o mecanismo químico pelo qual os óxidos de nitrogênio reagem não é bem descrito pelo SPM, isso também pode contribuir para a má representação desses compostos.

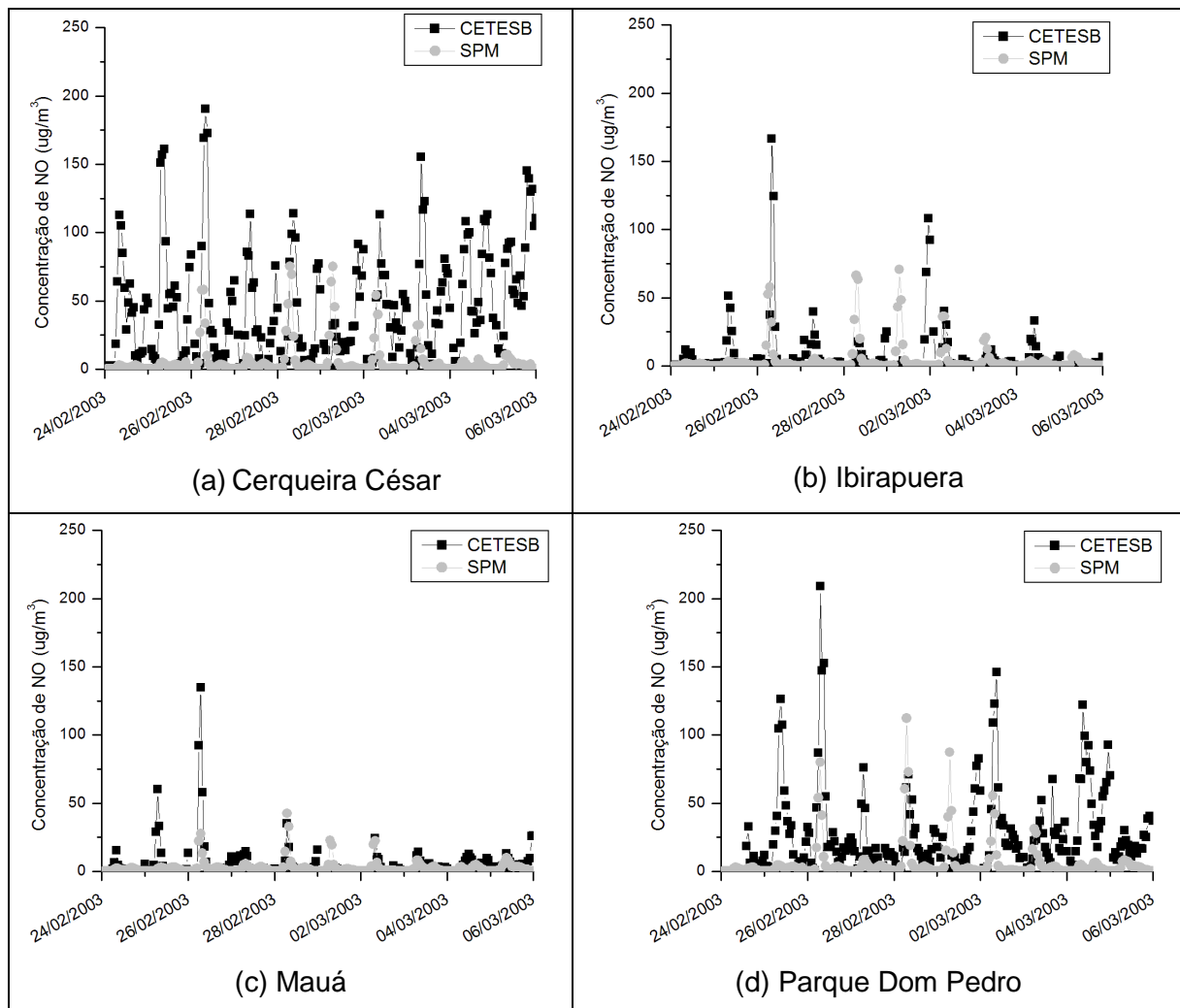


Figura 5-41: Comparação entre as concentrações de NO ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

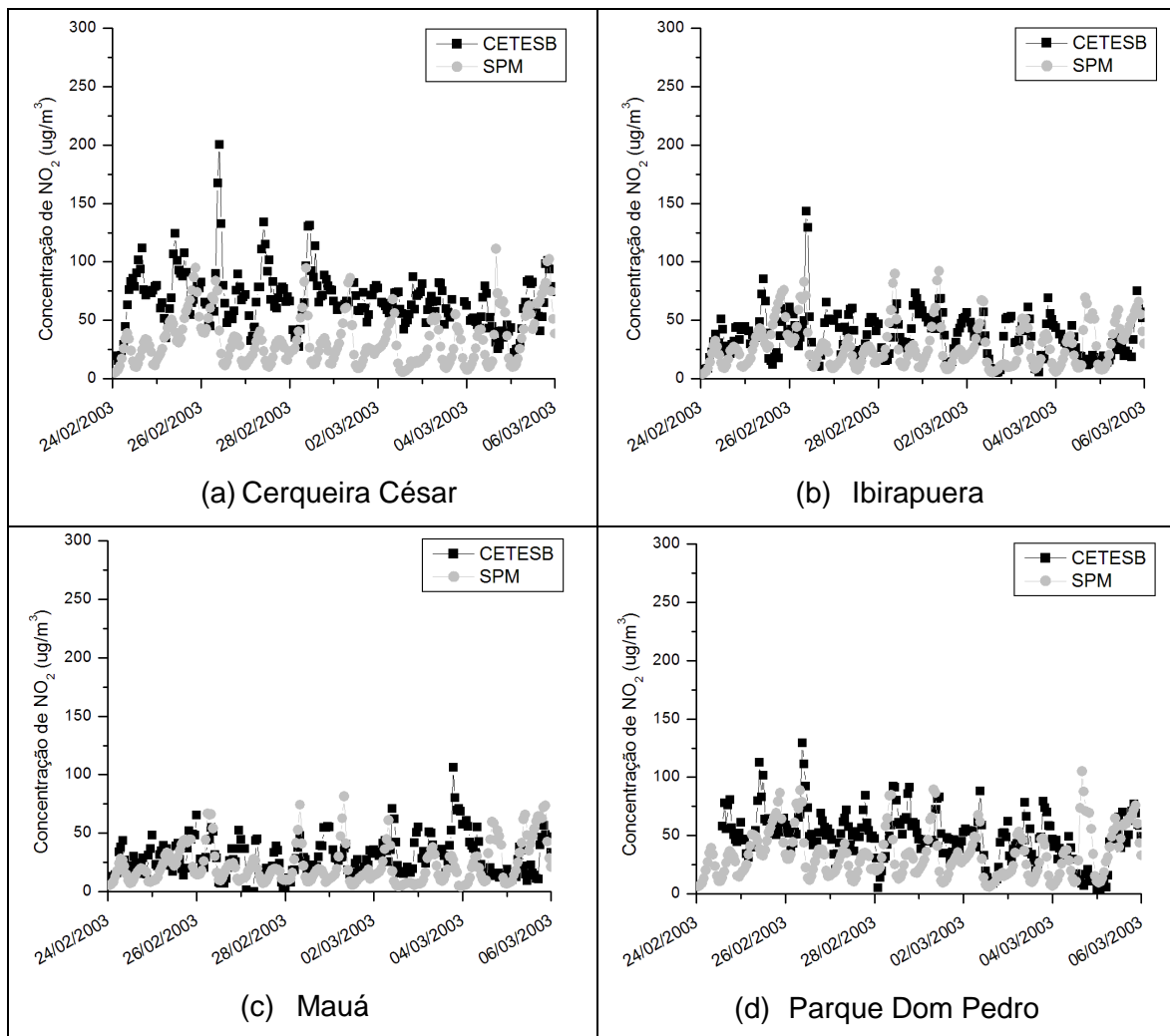


Figura 5-42: Comparação entre as concentrações de NO_2 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

Outro ponto importante é a dificuldade em comparar uma estimativa suavizada do modelo, gerada com resolução de 4 por 4 km, com dados pontuais médios horários, uma vez que a maioria das estações de monitoramento da CETESB representa condições bem locais. Por exemplo, estações expostas à intensa atividade veicular são muito susceptíveis a variações no tráfego como engarrafamentos, acidentes, entre outros que não são representadas pelo modelo e que impactam diretamente a concentração de poluentes, principalmente, no que tange os poluentes primários. Na verdade, esse não é um problema exclusivo do modelo SPM-BRAMS. Exceto para alguns casos e estudos específicos, os modelos de qualidade do ar utilizam valores médios de emissão, os quais desconsideram eventuais alterações locais, como a

ocorrência de um acidente veicular que pode ocasionar um engarrafamento, e com isso alterar a emissão de poluentes e, por conseguinte, sua concentração na atmosfera.

Vale também destacar que o resultado gerado pelo modelo representa as concentrações em um ponto de grade, calculado com resolução espacial de 4 km e de que, na verdade, os valores utilizados para comparação representam as concentrações referentes ao ponto mais próximo da localidade real da estação e não, necessariamente, o exato local em que a estação se encontra. Em alguns casos, estações próximas, mas com características distintas, são representadas pelo mesmo ponto de grade do modelo como é o caso, por exemplo, das estações Cerqueira César e Pinheiros e Congonhas e Ibirapuera. Mesmo localizadas a apenas 3 km de distância uma da outra, as estações Cerqueira César e Pinheiros apresentam comportamentos similares com algumas variações, principalmente, no que se refere ao ciclo diurno e aos valores mínimos de concentração, superiores na estação Pinheiros (Figura 5-43). Nas estações Congonhas e Ibirapuera, ainda mais próximas (localizadas a aproximadamente 2,7 km de distância), as variações foram bem mais nítidas. Comparando os valores registrados nessas estações com os resultados do modelo, é possível verificar a dificuldade deste em simular as bruscas variações das concentrações de CO, principalmente, nos horários de pico. O ponto referente às estações Congonhas e Ibirapuera, por exemplo, parece simular melhor as concentrações registradas na segunda estação que possui características mais regionais (localizada dentro do Parque do Ibirapuera). A estação Congonhas representa condições de escala local estando localizada a apenas 6 metros da Avenida Bandeirantes que registra um grande fluxo de veículos leves e pesados durante praticamente todos os dias.

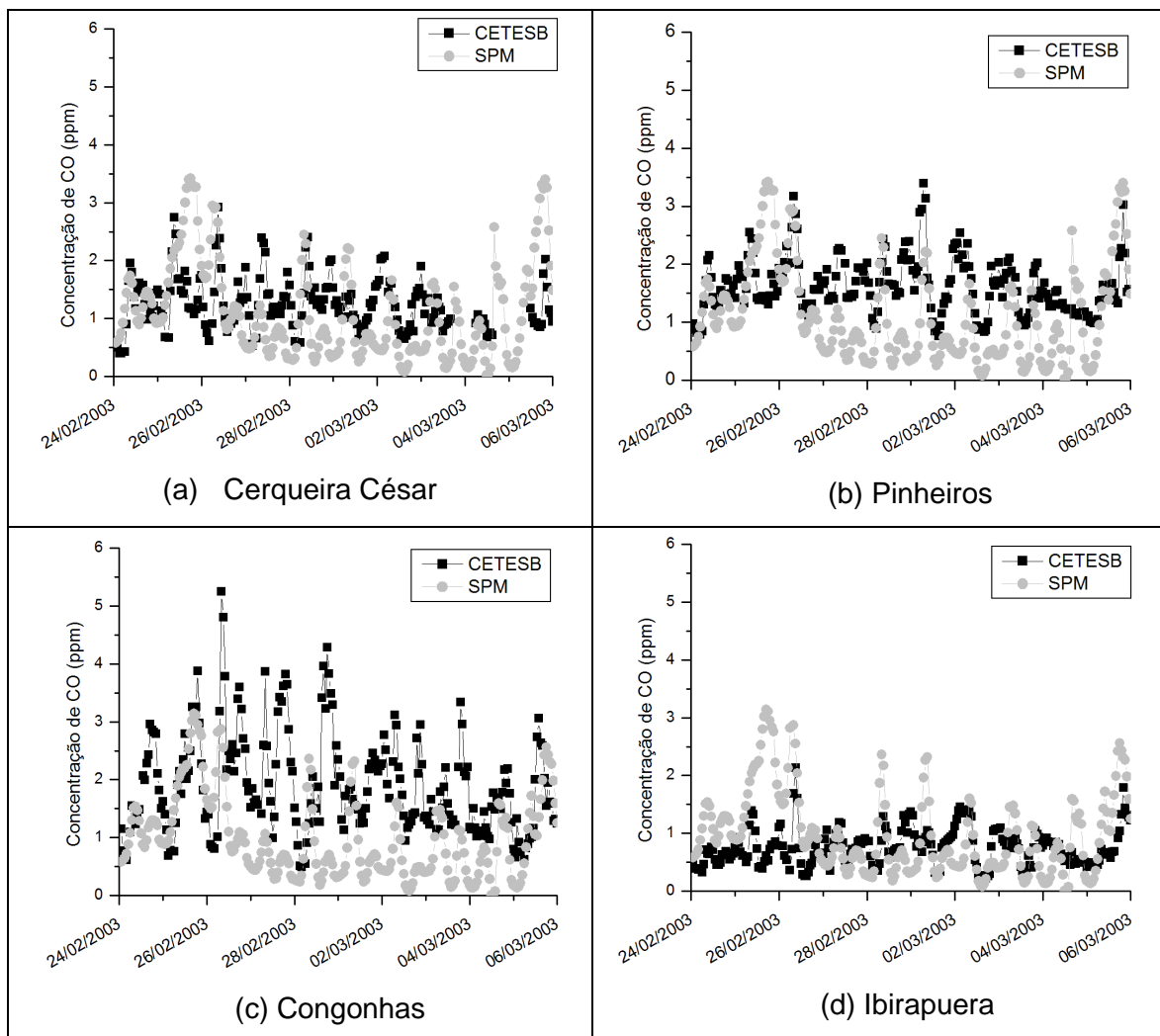


Figura 5-43: Comparação entre as concentrações de CO (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

A utilização de métodos estatísticos para a comparação entre as concentrações de O_3 simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e os resultados obtidos a partir da rede de monitoramento da CETESB entre 24 de fevereiro e 05 de março de 2003 revelaram índices de correlação linear de Pearson (R) variando entre 0,65, em Santo André, e 0,73, em Santana como pode ser observado na Tabela 5-13.

O viés indicou que o modelo subestimou as concentrações de ozônio na maior parte dos pontos onde existe o monitoramento. Apenas as estações Moóca, Parque Dom Pedro, Pinheiros e São Miguel Paulista revelaram valores de viés positivos.

Avaliando-se o primeiro critério para se obter *skill* em uma simulação, foi possível verificar que a média das diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} foi superior a 25% nas estações Mauá e Santo André. A diferença do desvio padrão simulado e observado foi inferior a 10% nas estações Moóca, Santana e Santo Amaro. É importante enfatizar que os altos valores de desvio padrão encontrados, provavelmente, são devidos a grande variação das concentrações de ozônio ao longo do dia. Em todas as estações foram verificados altos valores do *RMSE*, indicando uma diferença entre os valores simulados e os observados a cada hora. Com o cálculo do *RMSE* foi possível avaliar o segundo critério para a obtenção do *skill* da simulação. Dentre todas as estações, apenas a estação Santo Amaro não satisfaz este critério. Todas as estações satisfizeram o 3º critério para obtenção do *skill* estabelecido por Pielke (2002).

O cálculo do índice de concordância (*d*) revelou valores entre 0,71 e 0,85, nas estações de Santo Amaro e Santana, respectivamente. Estes resultados indicam a concordância entre os valores produzidos pelo modelo e as observações.

Tabela 5-13: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) disponíveis no período de 24 de fevereiro a 05 de março de 2003.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Diadema	0,68	43,21	-9,15	0,80	42,23	56,83	45,90
Ibirapuera	0,72	48,53	-2,44	0,82	48,46	69,44	54,31
Mauá	0,70	45,38	-1,61	0,80	45,35	63,44	43,29
Moóca	0,71	44,65	9,41	0,83	43,65	56,84	57,50
Parque Dom Pedro	0,71	41,68	9,06	0,82	40,68	46,89	57,28
Pinheiros	0,68	49,53	23,46	0,77	43,62	49,58	58,04
São Miguel Paulista	0,68	37,49	1,03	0,81	37,47	42,83	49,78
Santo André	0,65	45,88	-1,08	0,77	45,87	60,73	42,15
Santana	0,73	41,13	-2,87	0,85	41,03	58,14	54,08
São Caetano do Sul	0,67	47,76	-9,93	0,78	46,71	62,66	47,03
Santo Amaro	0,71	60,76	-45,45	0,71	40,32	54,30	51,83

Comparando os resultados obtidos com o modelo BRAMS para a temperatura do ar com os dados registrados pelas estações da CETESB é possível verificar que a estação de São Miguel Paulista foi, em geral, a mais bem representada (Figura 5-44). Para a estação do Ibirapuera e, principalmente, para a estação São Caetano do Sul, o

modelo subestimou os valores de temperatura máxima. A amplitude do ciclo diurno da temperatura do ar na estação São Caetano do Sul foi bastante subestimada, contudo os valores de temperatura mínima estiveram próximos dos registrados na estação de monitoramento. Em relação à umidade relativa, como pode ser observado na Figura 5-45, também foi possível verificar que, novamente, no caso das estações Ibirapuera e São Caetano no Sul, o modelo subestimou os máximos valores. Os valores registrados pelas estações Parque Dom Pedro e São Miguel Paulista foram, em geral, bem representados pelo modelo. Tanto para a temperatura do ar quanto para a umidade relativa não houve uma boa representação da variação diurna registrada em todas as estações nos dias 04 e 05 de março. A diminuição da amplitude do ciclo diurno destas variáveis pelo modelo deve-se ao aumento da nebulosidade simulada pelo mesmo.

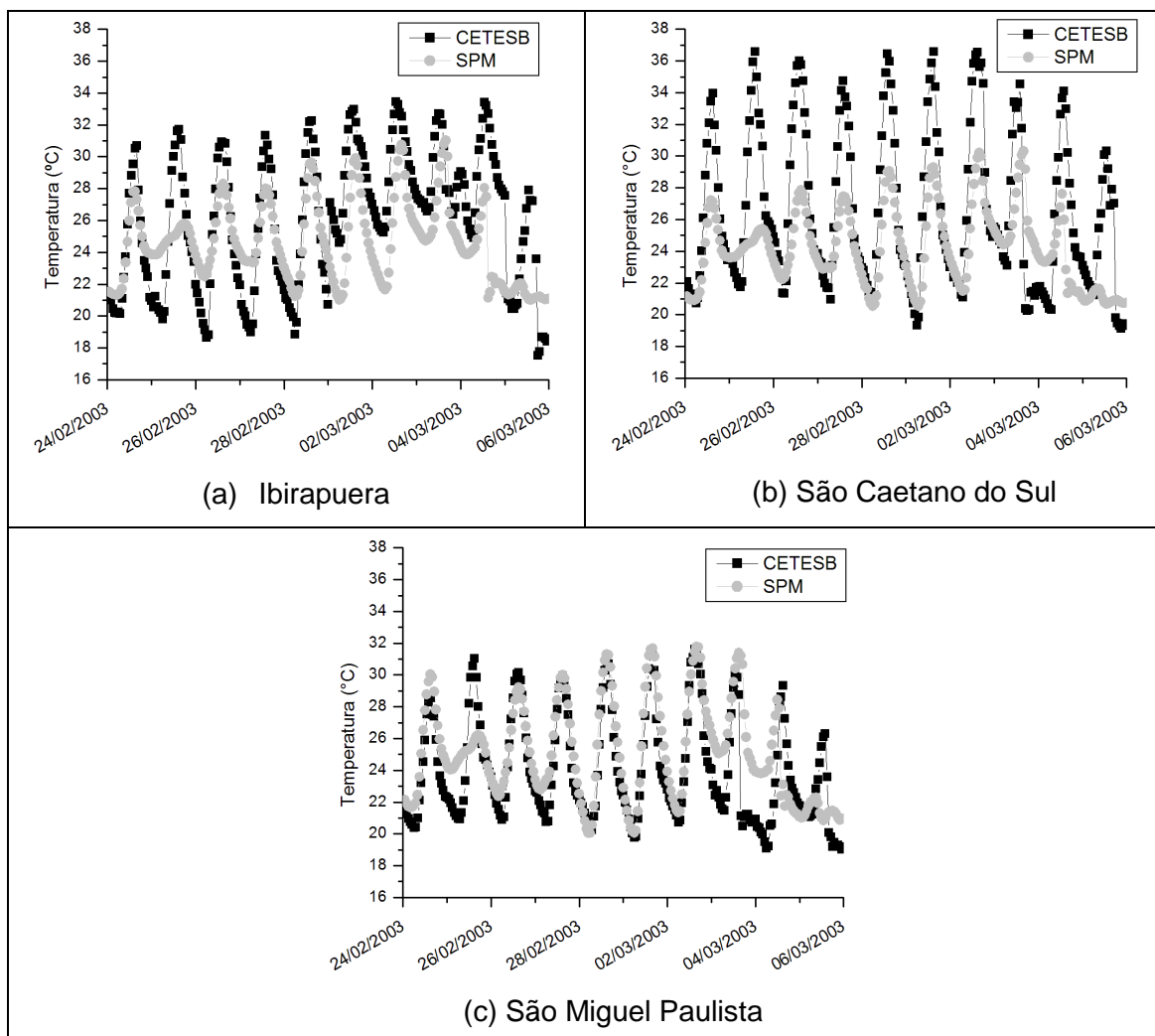


Figura 5-44: Comparação entre a temperatura do ar (°C) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

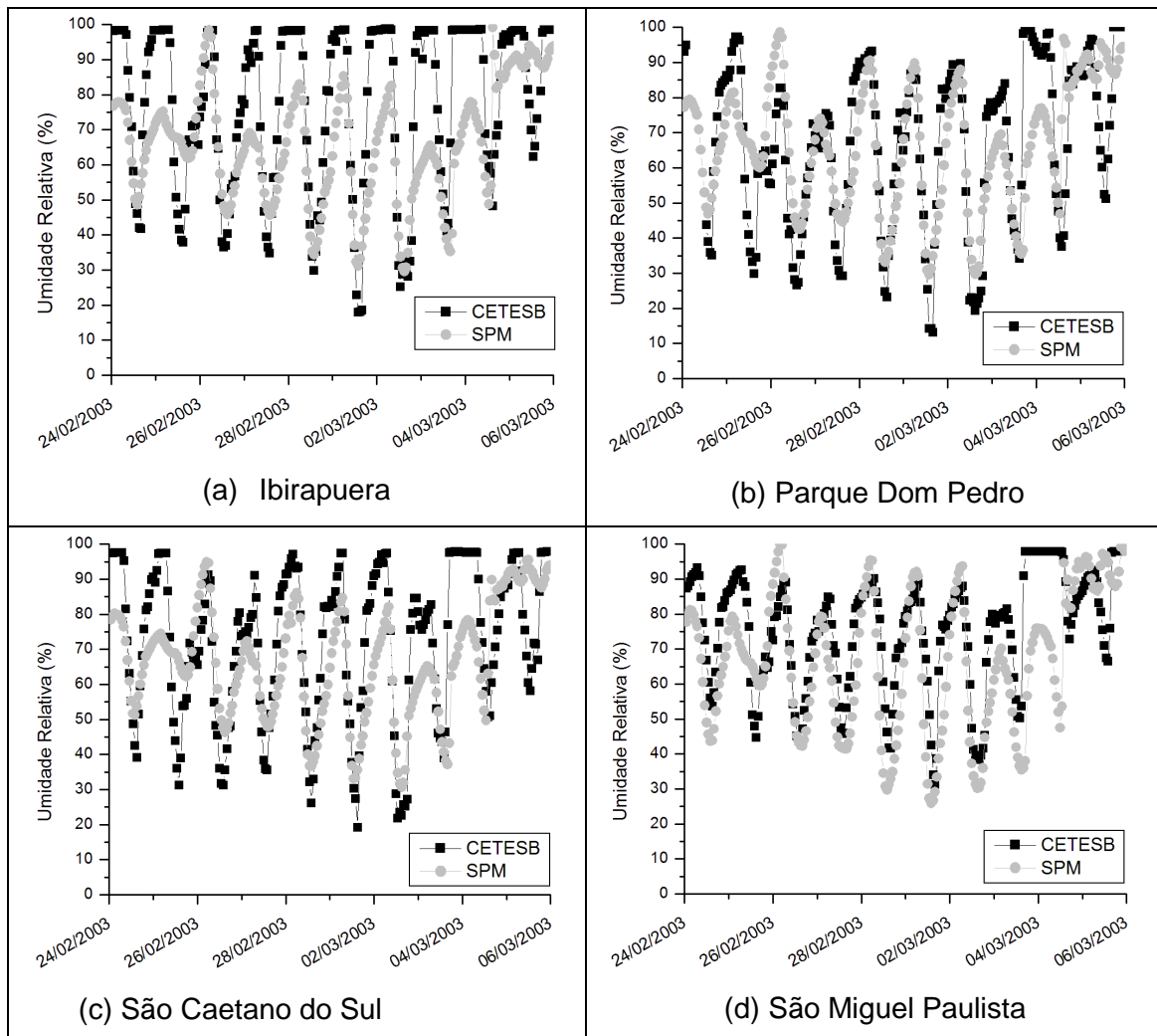


Figura 5-45: Comparação entre a umidade relativa do ar (%) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

Os métodos estatísticos aplicados aos valores simulados de temperatura e de umidade relativa do ar pelo modelo SPM-BRAMS e os observados a partir da rede de monitoramento da CETESB para o período de 24 de fevereiro a 05 de março de 2003 podem ser observados na Tabela 5-14 e na Tabela 5-15. Os índices de correlação linear de Pearson (R), para a temperatura do ar, revelaram valores variando entre 0,70, para a estação Ibirapuera, e 0,79, referente a São Miguel Paulista. Os valores de R para a umidade relativa não variaram significativamente entre as estações (em torno de 0,70).

Os valores de ME revelaram que, em geral, o modelo subestimou os valores de ambos os parâmetros meteorológicos considerados, assim como das concentrações de ozônio. O ME foi positivo apenas para a temperatura do ar na estação São Miguel Paulista.

As diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} foram significativas nas estações Ibirapuera e São Caetano do Sul no que tange a temperatura do ar e na estação Ibirapuera no caso da umidade relativa do ar, não satisfazendo o primeiro critério para a obtenção do *skill* da simulação. As demais estações apresentaram valores mais próximos e satisfizeram este critério. O segundo e o terceiro critérios foram atendidos para as comparações em todas as estações para ambas as variáveis meteorológicas.

O índice de concordância (*d*) revelou valores entre 0,71 e 0,87. A estação Ibirapuera e a estação São Miguel Paulista foram as que obtiveram, respectivamente, esses índices considerando a temperatura do ar. Para a umidade relativa, os valores do índice *d* variaram entre 0,77, considerando a estação Ibirapuera, e 0,87, na estação São Miguel Paulista.

Tabela 5-14: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura do ar (°C) disponíveis no período de 24 de fevereiro a 05 de março de 2003.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Ibirapuera	0,70	3,40	-1,46	0,75	3,07	4,26	2,51
São Miguel Paulista	0,79	2,38	1,04	0,87	2,14	3,40	3,16
São Caetano do Sul	0,74	4,22	-2,27	0,71	3,56	5,00	2,47

Tabela 5-15: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa do ar (%) disponíveis no período de 24 de fevereiro a 05 de março de 2003.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Ibirapuera	0,70	20,35	-11,36	0,77	16,89	23,64	16,50
Parque Dom Pedro	0,71	16,47	-0,77	0,83	16,45	23,46	18,24
São Miguel Paulista	0,72	16,80	-9,33	0,80	13,97	16,74	19,98
São Caetano do Sul	0,70	16,49	-5,47	0,80	15,56	21,79	16,21

5.2.2. Entre 01 e 10 de setembro de 2004

5.2.2.1. Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar

Assim como no período analisado no item anterior, a RMSP encontrava-se sobre a influência de um sistema de alta pressão. Durante o período de interesse, dois sistemas frontais atingiram a região como pode ser observado na Figura 5-46. O primeiro sistema frontal atingiu o estado de São Paulo com baixa intensidade no dia 02 de setembro. O segundo sistema atuou sobre a região a partir do dia 10 de setembro, provocando precipitação nos dias 11 e 12 do mesmo mês.

Nos primeiros dias (entre 01 e 04 de setembro), apenas algumas estações registraram a ocorrência de violações ao PNQA estabelecido para o ozônio. Nesse período, a predominância dos ventos foi de NE-N-NW. De acordo com os dados provenientes do METAR dos aeroportos de Congonhas e de Guarulhos, ambos localizados na RMSP, durante a maior parte desses dias, foi registrada presença de nebulosidade. As temperaturas registradas também revelaram valores mais baixos do que as verificadas para o período referente a fevereiro e março de 2003.

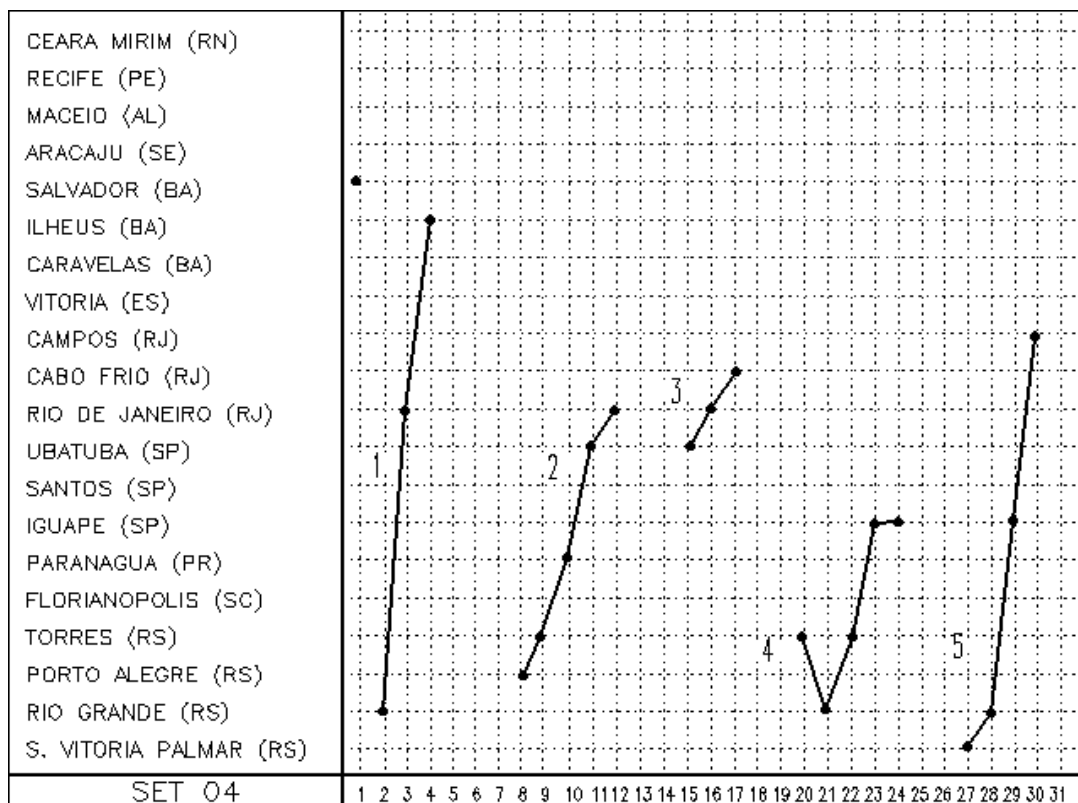


Figura 5-46: Frequência de entrada de frentes frias no mês de Setembro de 2004.

(Fonte: CPTEC, 2004)

No dia 01 de setembro, o modelo representou condições coerentes com as observações meteorológicas disponíveis para a região com presença de nebulosidade no período da manhã e no final da noite, temperaturas amenas (máxima em torno de 28 °C) e umidade relativa mínima em torno de 50% no período da tarde. A pluma com concentrações mais altas de NO_x forma-se pela manhã, com a intensificação do tráfego de veículos, e mantém-se até as 14 Z como pode ser observado na Figura 5-47. As concentrações de ozônio simuladas pelo modelo não ultrapassaram os 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, comportamento em concordância com os dados registrados na maioria das estações da CETESB.

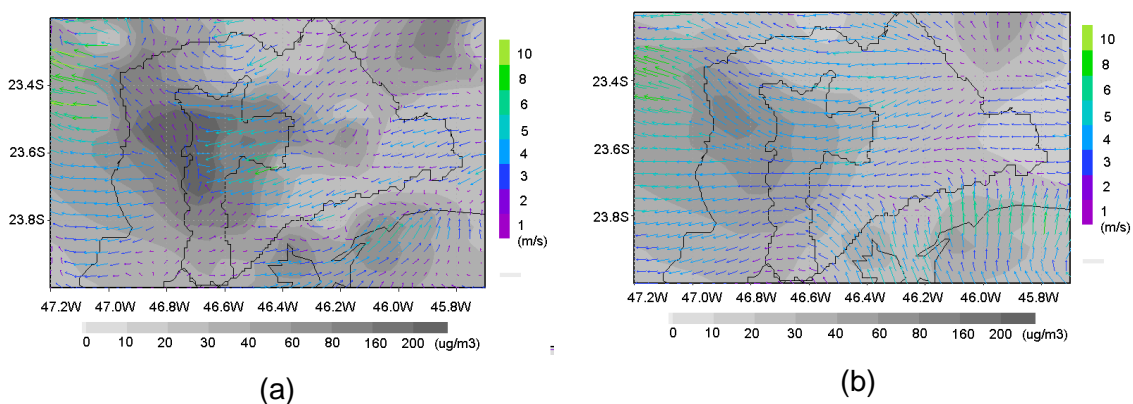


Figura 5-47: Campos de vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 01 de setembro de 2004 às (a) 11 Z e (b) 14 Z.

No dia 02 de setembro, a passagem de um sistema frontal de baixa intensidade, produziu um aumento de nebulosidade diminuindo a incidência de radiação solar, conforme exemplificado na Figura 5-48, e, por conseguinte, diminuindo o potencial de formação de moléculas de ozônio. Os ventos simulados alternaram entre moderados, durante a madrugada e manhã, e fortes, no período da tarde, o que contribuiu para a dispersão dos precursores e do próprio ozônio formado sobre a região. Nenhuma violação ao PNQA foi identificada tanto nos dados simulados quanto nos registrados pelas estações de monitoramento durante esse dia. Ainda em função da passagem da frente fria, foi simulada precipitação leve, inferior a 5 mm/hora, na porção sul da RMSP durante o dia 03 entre as 13 e 15 Z. Avaliando os dados de qualidade do ar foi possível observar que neste dia, dentre as 05 estações de monitoramento localizadas na área onde foi simulada precipitação, apenas uma, Santo André, apresentou níveis de concentração de ozônio acima dos delimitados pela legislação em vigência. No

restante do domínio foi identificada a ocorrência de ventos muito fracos durante a madrugada e manhã.

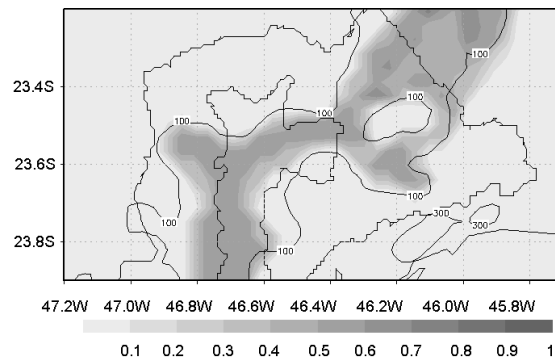


Figura 5-48: Cobertura de Nuvens e de Radiação incidente de onda curta (Wm^{-2}) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às 12 Z.

Tanto no dia 02 quanto no dia 03 de setembro de 2004, a ocorrência de ventos fracos durante a madrugada e a manhã contribuiu para o acúmulo das concentrações de NO_x . Em grande parte do domínio, durante esses períodos, os ventos atingiram valores inferiores a 1 m/s (caracterizando assim condições de calmaria). Dessa forma, parte da pluma formada à noite a partir do aumento da emissão veicular manteve-se durante a madrugada, sendo somada, posteriormente, a pluma gerada a partir das emissões provenientes do pico de emissão veicular pela manhã, como mostrado na Figura 5-49.

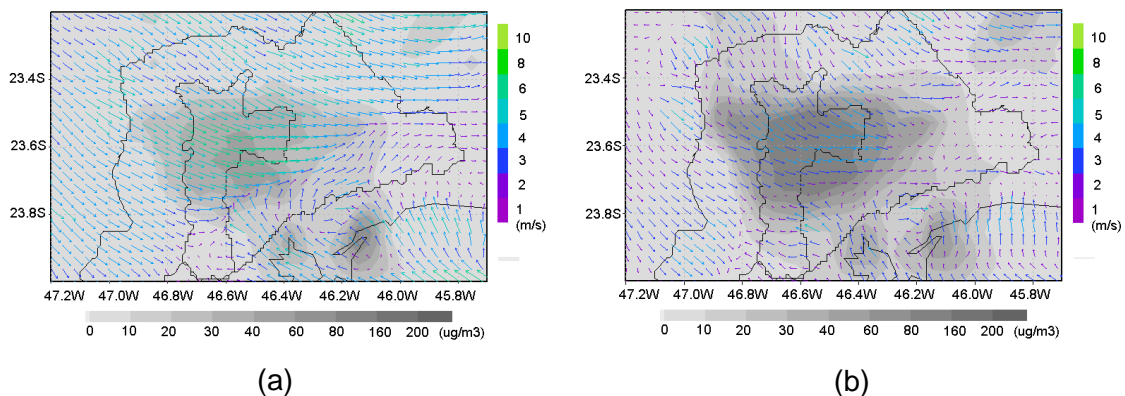


Figura 5-49: Campos de Vento e Concentração de NO_x ($\mu g \cdot m^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às (a) 20 Z e (b) 23 Z e ao dia 03 de setembro às (c) 02 Z; (d) 05 Z; (e) 08 Z; e (f) 11 Z.

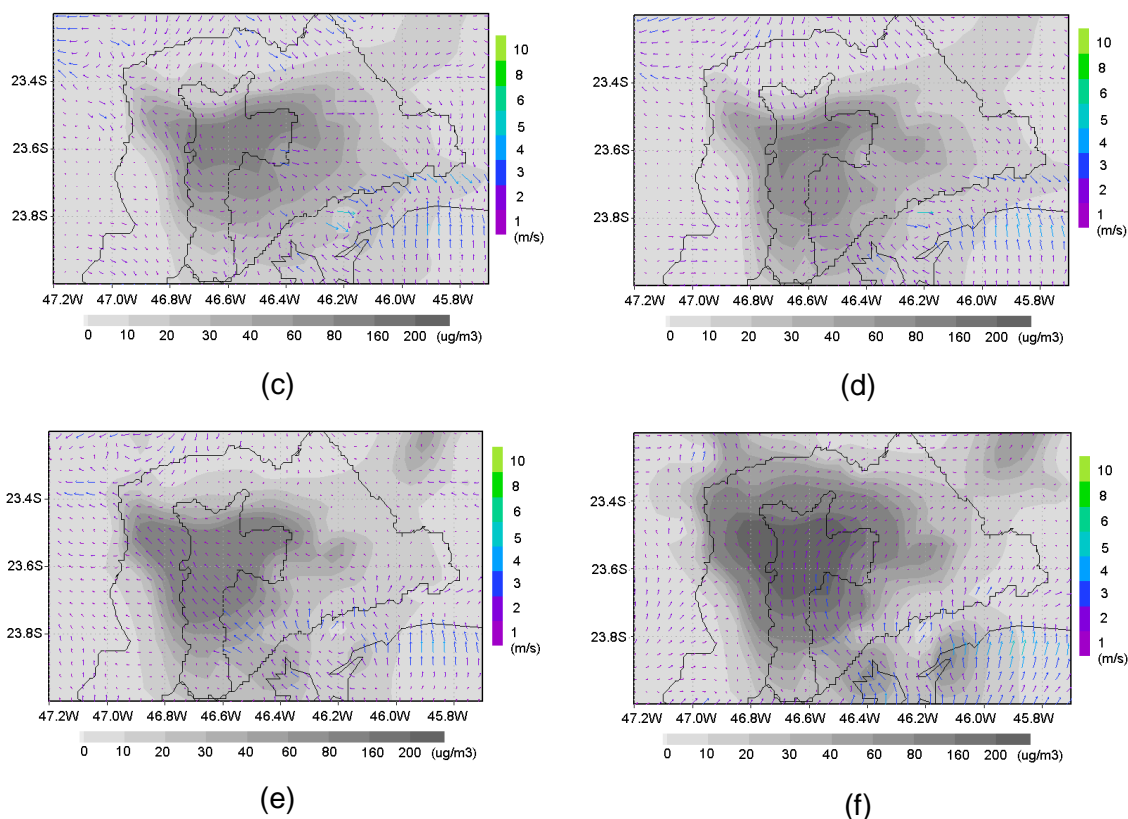


Figura 5-49: Continuação.

No dia 04, o modelo indicou a presença de nebulosidade sobre toda a RMSP e o litoral durante a manhã e o início da tarde, horários favoráveis para a produção fotoquímica. Esse comportamento também foi identificado por meio das observações realizadas nos aeroportos de Congonhas e de Guarulhos. As concentrações de ozônio e de óxidos de nitrogênio simuladas não revelaram altos valores de concentração durante todo o dia. Esse comportamento apresentou-se em concordância com o registrado pela rede de monitoramento da CETESB.

A partir do dia 05, as concentrações de ozônio começaram a aumentar com índices de qualidade do ar inadequado atingindo a maioria das estações que compõem a rede de monitoramento. Em geral, o modelo simulou, para o período entre o dia 05 e 10, condições meteorológicas similares com a ocorrência de ventos fracos durante a madrugada e manhã seguidos por ventos variando entre moderados e fortes no período da tarde e início da noite. Também foi observado um aumento gradual da temperatura do ar em todo o domínio. Entre os dias 08 e 10, quando as maiores concentrações foram registradas, as máximas diárias simuladas pelo modelo revelaram valores de temperatura acima dos 30° C. O mesmo foi observado a partir dos dados provenientes do METAR dos aeroportos de Congonhas e de Guarulhos. A

predominância de condições de céu claro registrada nestes aeródromos também foi identificada através dos resultados do modelo. Também é importante destacar que o modelo simulou a ocorrência de baixos valores de umidade relativa do ar (inferior aos 30% em alguns pontos).

Outro ponto interessante foi a intensidade e a dimensão da pluma de ozônio simulada pelo SPM-BRAMS durante esse período. Na Figura 5-50 são apresentados os campos de vento e as concentrações de ozônio para os horários em que os máximos valores de O_3 foram simulados entre os dias 05 e 10 de setembro de 2004. Através desta, também é possível verificar a presença de ventos de SE associados à entrada da brisa marítima. Tais ventos atuaram na dispersão da pluma para noroeste da RMSP. Nesse período, de acordo com os resultados do modelo, a entrada da brisa marítima no centro do domínio ocorreu entre 11 e 14 Z. Os picos de concentração de ozônio foram simulados pelo modelo entre 9 e 12 Z. Os valores das concentrações de O_3 simuladas pelo SPM-BRAMS atingiram valores elevados, mas não ultrapassaram o PNQA ao contrário do registrado por diversas estações da CETESB alocadas na região (observar item 5.2.2.2). A pluma atingiu a maior dimensão e as maiores concentrações no dia 05 e no dia 08 de setembro. A ocorrência de ventos mais fracos durante a tarde do dia 09 manteve a pluma sobre a RMSP por mais tempo, até as 16 Z.

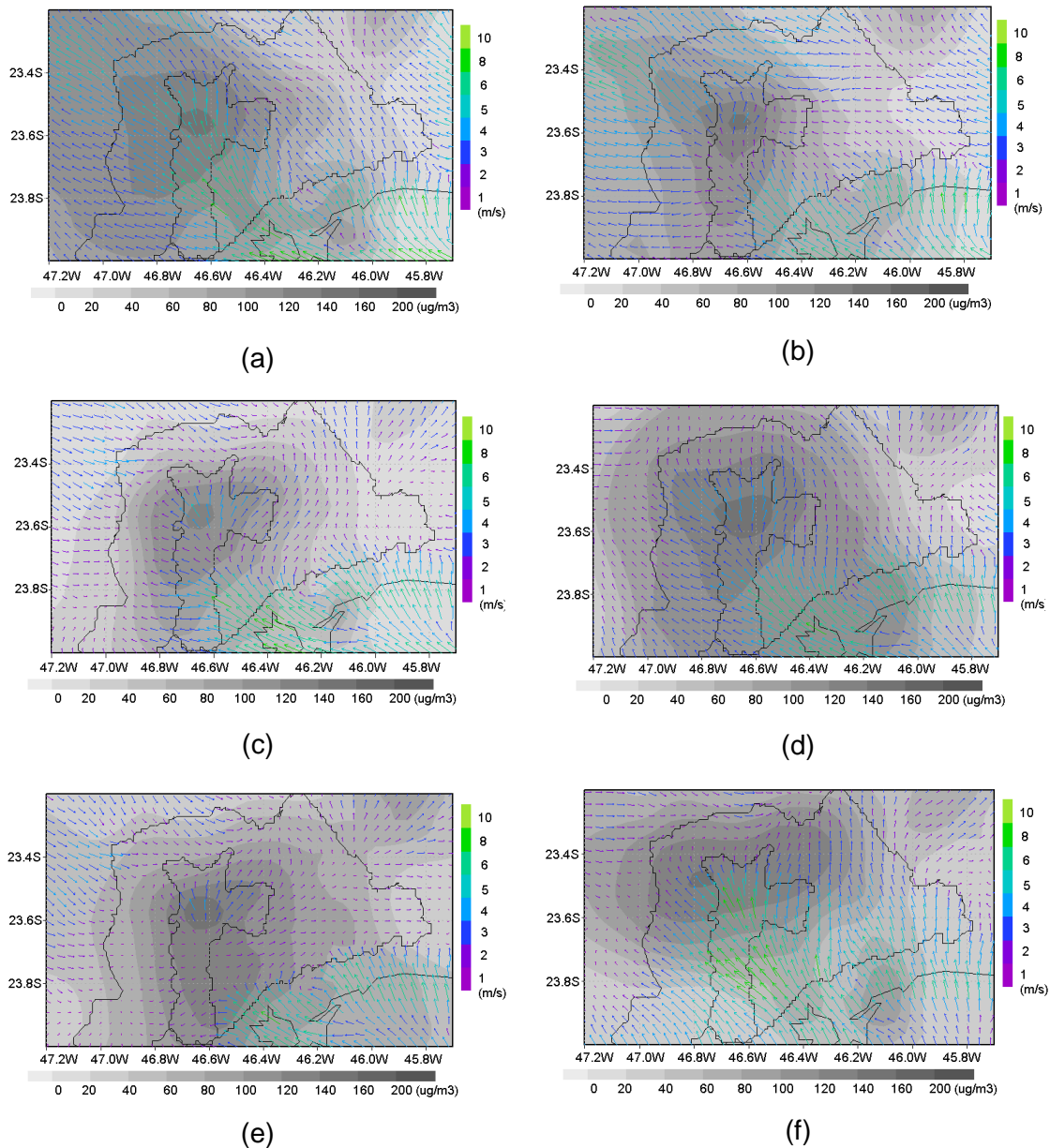


Figura 5-50: Campos de Vento e Concentração de O₃ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia (a) 05 de setembro de 2004 às 18 Z; (b) 06 de setembro às 15 Z; (c) 07 de setembro às 17 Z; (d) 08 de setembro às 16 Z; (e) 09 de setembro às 15 Z; e (f) 10 de setembro às 18 Z.

No dia 11 e 12, a passagem de um sistema frontal sobre o Estado de São Paulo provocou a ocorrência de chuvas que auxiliaram na remoção de poluentes diminuindo as concentrações de poluentes registradas sobre a RMSP.

5.2.2.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados medidos pela CETESB

Apesar de alguns picos diários serem subestimados pelo modelo, principalmente, nos últimos cinco dias da simulação, as concentrações de ozônio foram mais condizentes com os resultados obtidos pela rede de monitoramento no período de 01 a 10 de setembro. Em geral, o aumento ou a diminuição dos máximos valores de ozônio foram bem simulados pelo modelo. O melhor desempenho do modelo correspondeu às estações Pinheiros e Nossa Senhora do Ó como pode ser observado na Figura 5-51.

É importante ressaltar também que, no dia 02 de setembro, o modelo simulou, por conta da passagem de um sistema frontal, concentrações de ozônio abaixo das registradas em todas as estações da CETESB com dados disponíveis. No entanto, a redução brusca nos picos de concentração de ozônio verificado no dia 04 de setembro de 2004 em todas as estações da CETESB foi bem representado pelo modelo. Essa diminuição nas concentrações esteve relacionada com o aumento de nebulosidade na região (também comprovada por observações realizadas em aeroportos da região).

Outro ponto interessante é a ocorrência, em algumas situações, de um pico de concentração noturna nos dados simulados (observar, por exemplo, as estações Diadema e Santo Amaro). Sem incidência de radiação solar neste período, não há formação de novas moléculas de ozônio e a concentração do poluente tende a cair de forma brusca. Contudo, picos noturnos de concentração são registrados, em alguns casos, pelas estações de monitoramento. A causa deste aumento, também observado em outros centros urbanos, ainda não é bem entendida, mas existem evidências de que haja um transporte vertical deste poluente, de níveis mais altos para a superfície (BALBINO, 2008). Dessa forma, a geração destes picos pelo modelo (que ainda são bastante superestimados durante as simulações realizadas), indica que as condições meteorológicas devem ser as responsáveis por este aumento das concentrações à noite.

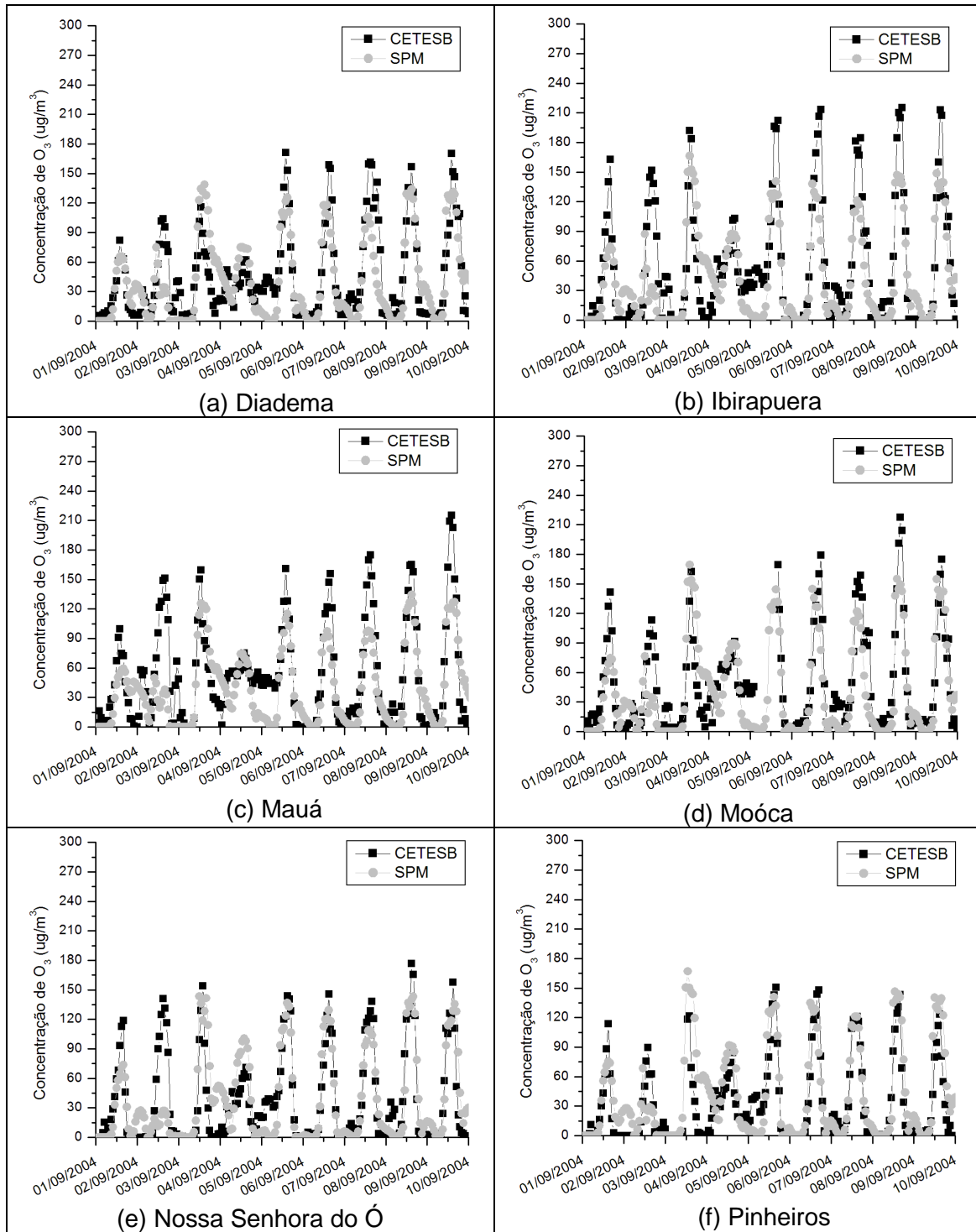


Figura 5-51: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu g.m^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

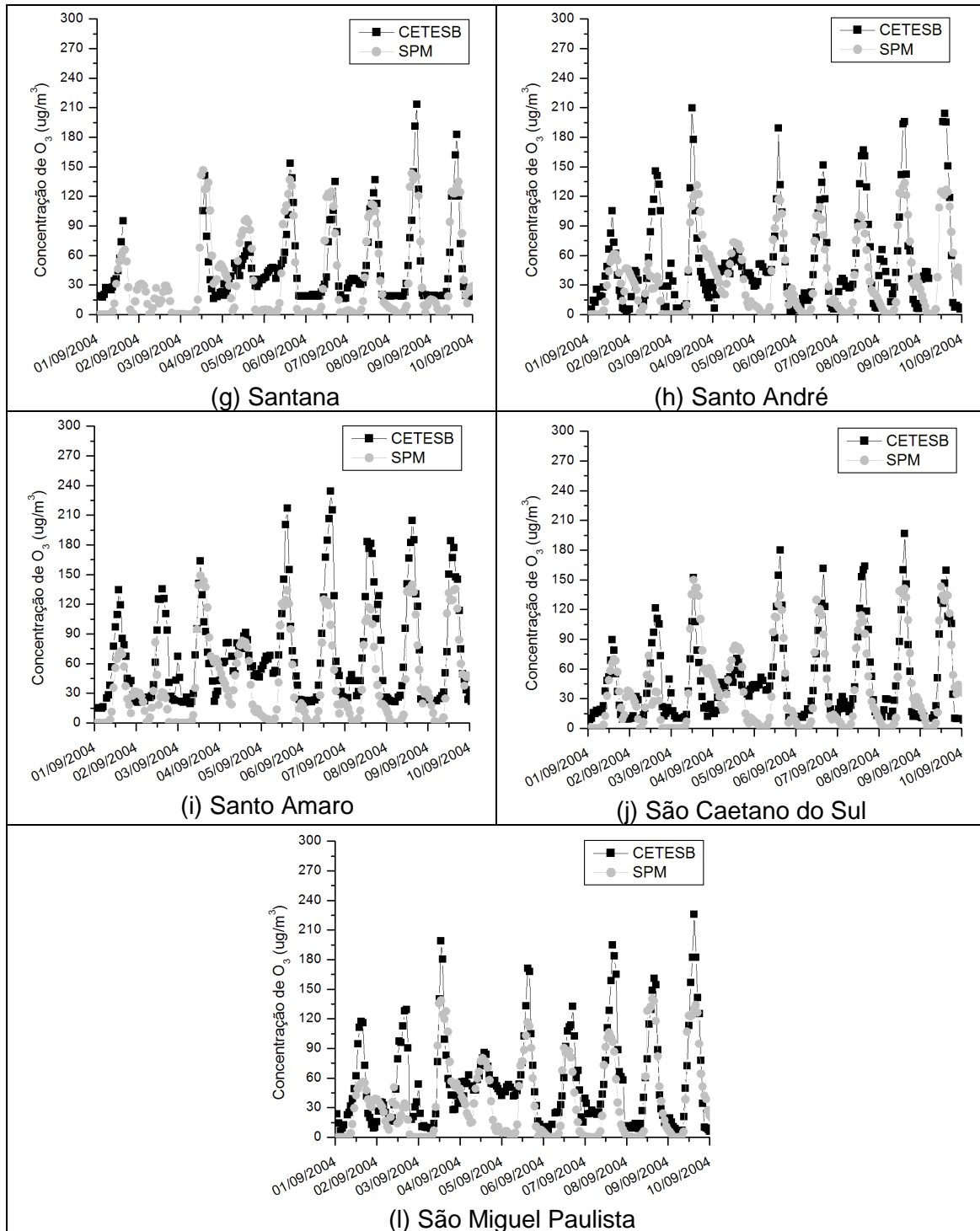


Figura 5-51: Continuação.

Assim como nas simulações referentes ao período de 24 de fevereiro a 05 de março de 2003, o ciclo diurno das concentrações dos óxidos de nitrogênio e do monóxido de carbono não foi bem representado, ao contrário do verificado no caso das concentrações de ozônio. Apesar de também depender do perfil das fontes de emissão de poluentes atmosféricos, a forte dependência das concentrações de O_3 com as condições meteorológicas, principalmente, no que tange a incidência de

radiação solar e a presença de nebulosidade, justifica tal comportamento. A comparação das concentrações de NO e de NO₂ simuladas pelo modelo e as registradas em alguns pontos da RMSP pela rede de monitoramento da CETESB pode ser observada na Figura 5-52 e na Figura 5-53, respectivamente. A magnitude das concentrações de NO foi bastante subestimada em alguns dias, com destaque novamente para a estação de Cerqueira César (localizada próxima a vias de intenso tráfego de veículos). Assim como para o período anteriormente analisado, a magnitude das concentrações de dióxido de nitrogênio simuladas pelo modelo esteve mais de acordo com as registradas pela CETESB.

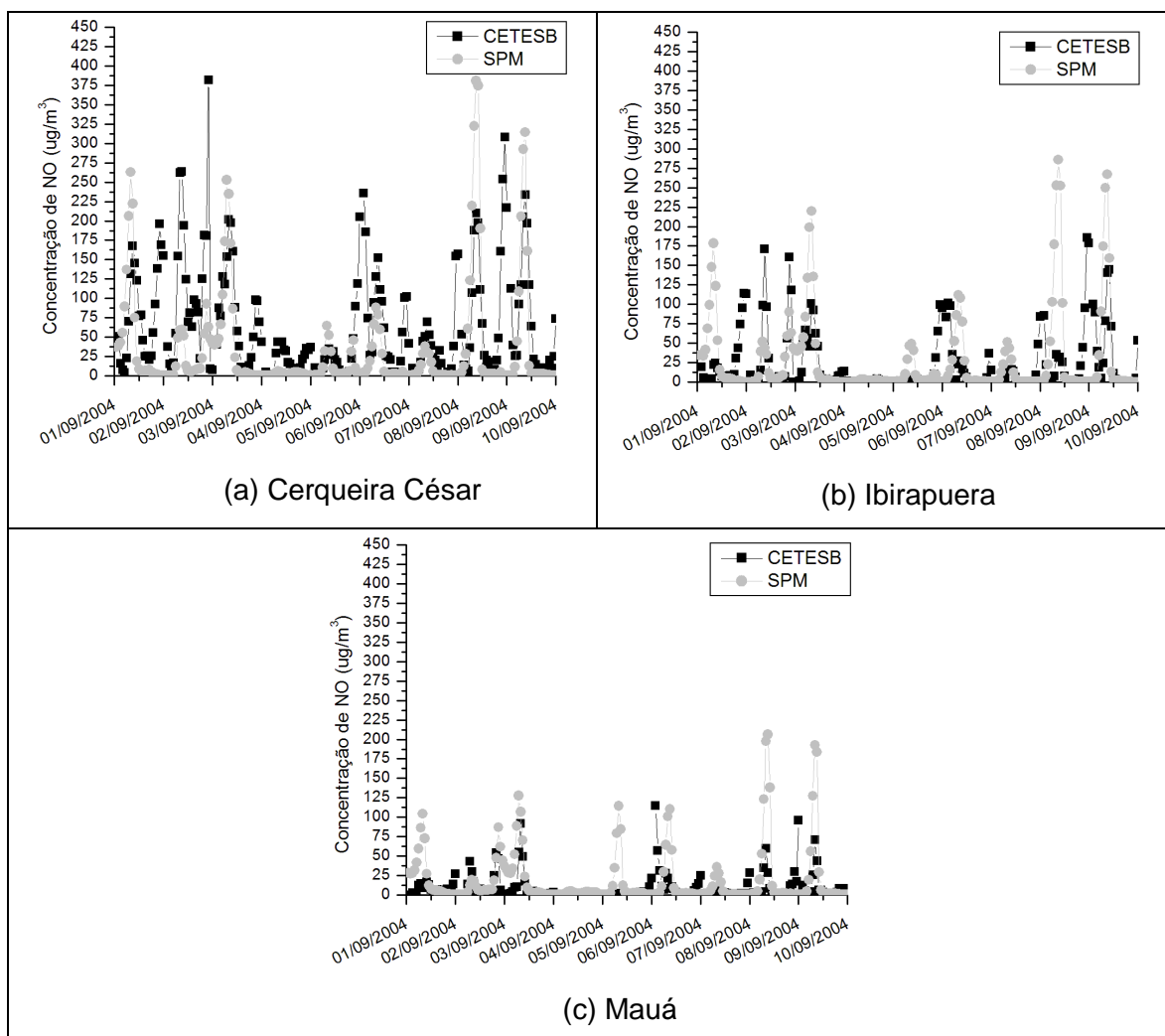


Figura 5-52: Comparação entre as concentrações de NO ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

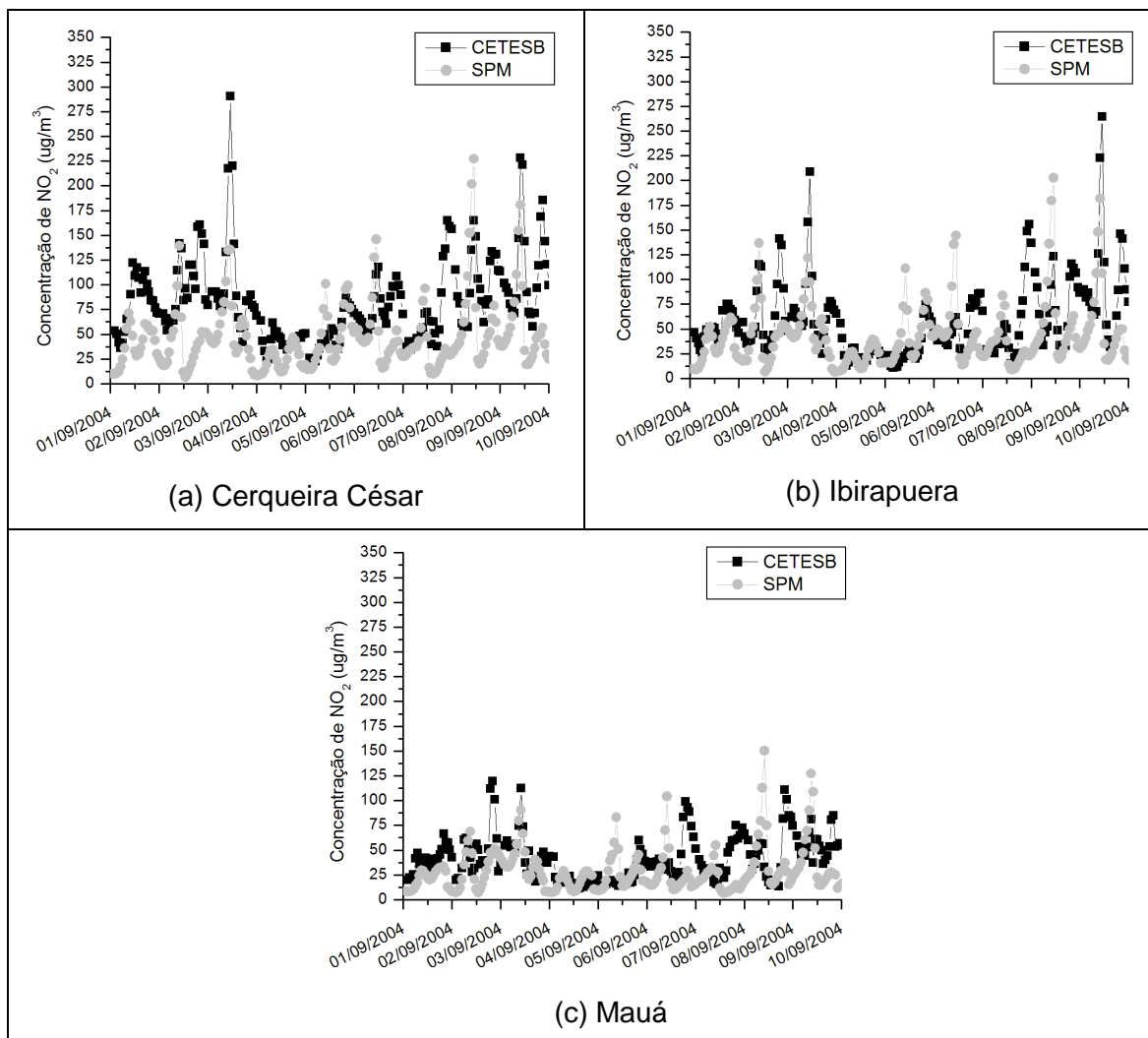


Figura 5-53: Comparação entre as concentrações de NO₂ (µg.m⁻³) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

O modelo SPM-BRAMS também apresentou algumas dificuldades em simular a evolução das concentrações de CO ao longo dos 10 dias considerados (Figura 5-54), principalmente, no que se refere à representação de alguns picos de concentração na estação de Pinheiros, localizada bem próxima a Marginal. Para as demais estações, pode-se destacar que o modelo superestimou alguns resultados referentes aos picos de concentração registrados durante as manhãs dos dias 08 e 09 de setembro de 2004.

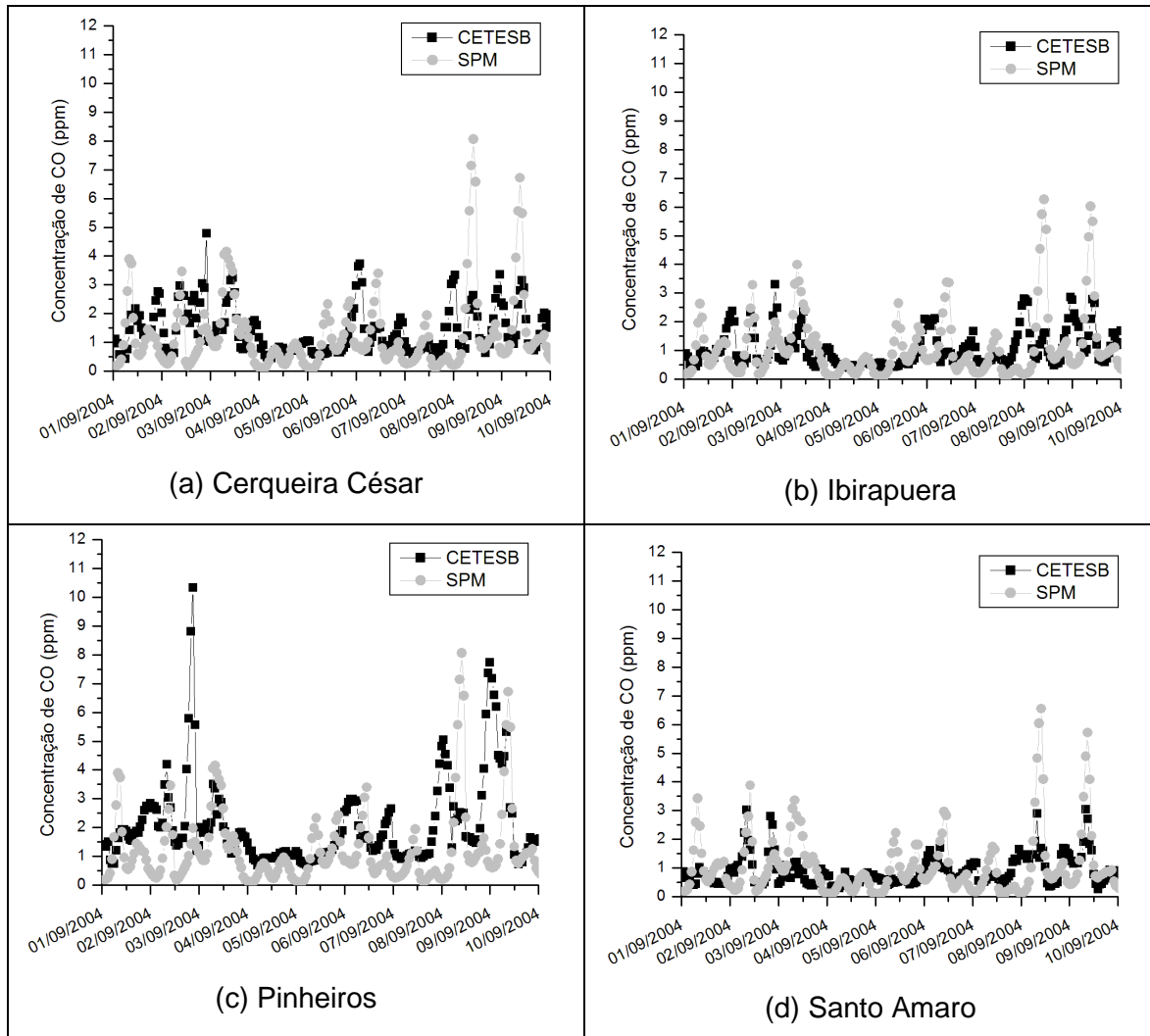


Figura 5-54: Comparação entre as concentrações de CO (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

Os resultados encontrados a partir da aplicação de métodos estatísticos às concentrações de O_3 simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e registradas pelas estações de monitoramento da CETESB entre 01 e 10 de setembro de 2004 são apresentados na Tabela 5-16. A correlação linear de Pearson (R) apresentou valores relativamente altos. O menor índice de correlação, igual a 0,75, correspondeu à estação de Santo André e o mais alto, igual a 0,83, foi verificando para a estação de Pinheiros.

De acordo com o viés, o modelo novamente subestimou as concentrações de O_3 para todas as estações, exceto Pinheiros e Nossa Senhora do Ó. A diferença percentual média de σ_{sim} e σ_{obs} foi inferior a 10% indicando concordância com o primeiro critério

para se obter *skill*. O segundo e o terceiro critério para a obtenção do *skill* foi atendido para todos os pontos considerados.

O índice de concordância (*d*) apresentou valores elevados que variaram entre 0,83 (nas estações de Santo André e Santo Amaro) e 0,90 (na estação Nossa Senhora do Ó). Em geral, os métodos revelaram que a simulação apresentou resultados em bom acordo com as observações.

Tabela 5-16: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) disponíveis no período de 01 a 10 de setembro de 2004.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Diadema	0,78	27,94	-2,17	0,88	27,85	43,72	40,97
Ibirapuera	0,82	38,29	-10,30	0,87	36,88	63,41	46,88
Mauá	0,80	32,87	-10,09	0,86	31,28	51,56	38,77
Moóca	0,81	31,53	-6,37	0,89	30,88	52,48	47,80
Nossa Sra do Ó	0,81	29,39	1,35	0,90	29,36	48,99	46,05
Pinheiros	0,83	28,27	10,65	0,89	26,19	41,91	47,17
São Miguel Paulista	0,81	34,34	-17,34	0,86	29,64	50,66	42,12
Santo André	0,75	35,60	-12,07	0,83	33,50	50,40	38,56
Santana	0,82	27,71	-4,31	0,89	27,37	40,78	48,35
São Caetano do Sul	0,81	28,59	-5,78	0,89	28,00	45,46	44,39
Santo Amaro	0,81	39,47	-25,37	0,83	30,23	51,86	43,87

Em geral, o modelo simulou bem o comportamento da temperatura e da umidade relativa do ar ao longo do período considerado. Nesse caso, como pode ser visto na Figura 5-55, as máximas temperaturas diárias foram mais bem representadas em três das cinco estações consideradas, com destaque para a estação São Miguel Paulista. A umidade relativa do ar apresentou resultados, em geral, superestimados pelo modelo durante a maior parte do período, possivelmente, em função da subestimativa dos valores de temperatura. Os melhores resultados, no caso, foram verificados para a estação São Caetano do Sul. Algumas hipóteses que podem justificar essa questão incluem o fato de que o modelo pode não estar representando corretamente as características da região, influenciada também por fontes industriais (ao contrário das demais estações, basicamente expostas a fontes veiculares). A comparação entre os resultados para a umidade relativa simulada pelo modelo e monitorada pelas estações da CETESB é apresentada na Figura 5-56.

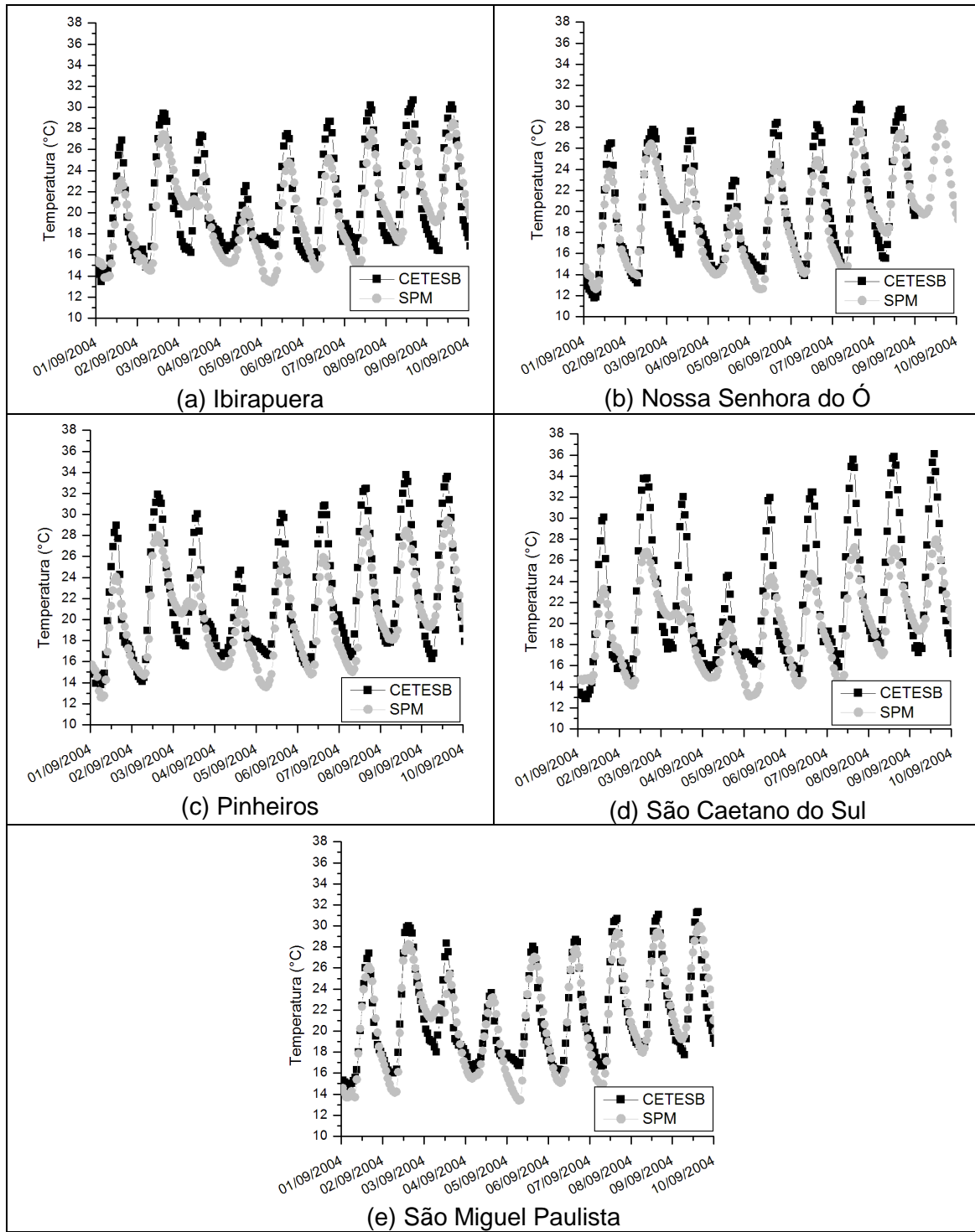


Figura 5-55: Comparação entre a temperatura do ar (°C) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

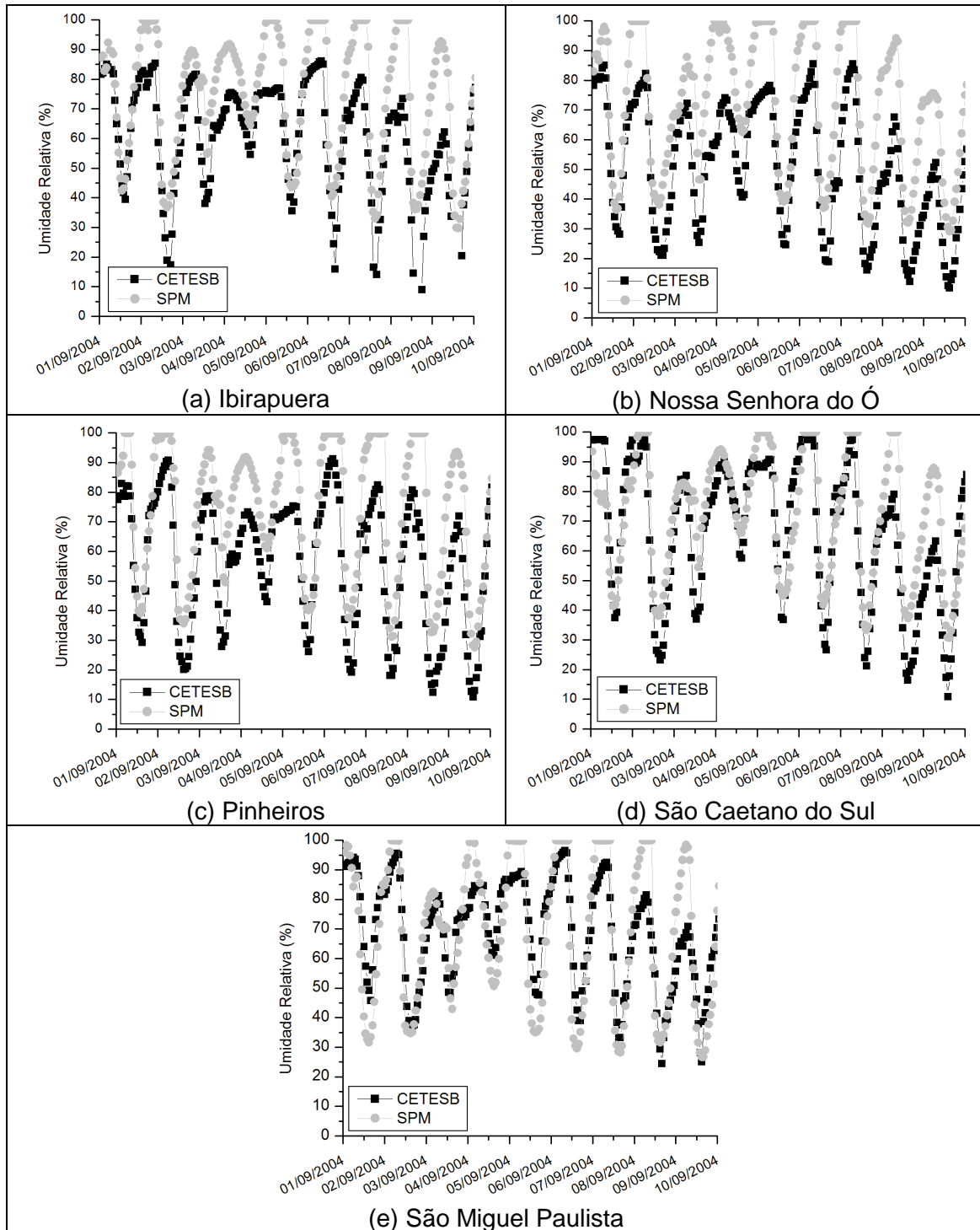


Figura 5-56: Comparação entre a umidade relativa do ar (%) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

O índice de correlação linear de Pearson revelou, para a temperatura e para a umidade relativa, valores entre 0,71 e 0,90. A estação Ibirapuera foi a que apresentou os menores valores de R enquanto a estação Nossa Senhora do Ó apresentou os melhores resultados como está ilustrado nas Tabelas 5-17 e 5-18.

O erro médio calculado indicou que o modelo subestimou os valores de temperatura e superestimou a umidade relativa do ar em todas as estações consideradas.

Apenas a estação de São Caetano do Sul apresentou uma diferença mais acentuada entre o desvio padrão das observações e aquele obtido a partir da simulação. Dessa forma, em geral, o primeiro critério para a obtenção do skill foi cumprido. As estações Ibirapuera, Nossa Senhora do Ó e Pinheiros apresentaram resultados que não satisfizeram o segundo critério estabelecido por Pielke (2002) que determina que o RMSE deve ser inferior ao desvio padrão calculado a partir das observações. O terceiro critério que considera o $RMSE_{UB}$ para verificar se a simulação possui skill quando comparada às observações foi satisfeito por todas as estações consideradas.

Todas as estações apresentaram altos valores para o índice d, indicando concordância entre os resultados simulados e os observados. Os mais altos valores foram obtidos para a estação de São Miguel Paulista, tanto considerando a temperatura (0,93) quanto à umidade relativa (0,91).

Tabela 5-17: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura do ar ($^{\circ}C$) disponíveis no período de 01 a 10 de setembro de 2004.

Sites	R	RMSE	ME	Índice d	$RMSE_{UB}$	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Ibirapuera	0,71	3,39	-0,76	0,83	3,30	4,57	3,97
Nossa Sra do Ó	0,90	2,34	-0,78	0,93	2,20	5,00	4,21
Pinheiros	0,81	3,50	-1,50	0,86	3,17	5,37	4,23
São Miguel Paulista	0,87	2,33	-0,17	0,93	2,32	4,41	4,61
São Caetano do Sul	0,75	4,66	-2,14	0,78	4,15	6,18	3,92

Tabela 5-18: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa do ar ($^{\circ}C$) disponíveis no período de 01 a 10 de setembro de 2004.

Sites	R	RMSE	ME	Índice d	$RMSE_{UB}$	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Ibirapuera	0,79	19,79	15,19	0,77	12,68	18,24	20,25
Nossa Sra do Ó	0,90	23,20	20,98	0,78	9,88	21,13	22,92
Pinheiros	0,82	22,52	18,05	0,79	13,47	22,04	23,16
São Miguel Paulista	0,87	12,93	0,44	0,91	12,92	18,16	24,94
São Caetano do Sul	0,77	16,59	6,43	0,86	15,29	23,89	20,69

5.2.3. Entre 16 e 25 de fevereiro de 2005

5.2.3.1 Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar

Baixos índices de precipitação e temperaturas acima das médias climatológicas foram registrados na maior parte da região sudeste do Brasil durante todo o mês de fevereiro de 2005. Nesta região, de acordo com o CPTEC (2005), apenas o norte dos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro apresentaram anomalias de precipitação positivas (em decorrência da atuação de um episódio de Zona de Convergência do Atlântico Sul – ZCAS entre os dias 13 e 22 de fevereiro).

Durante o período analisado, dois sistemas frontais atuaram sobre a região como pode ser visto na Figura 5-57. O primeiro, de baixa intensidade, atingiu o Estado de São Paulo no dia 19. Através dos dados de METAR dos aeroportos de Guarulhos e Congonhas foi possível observar o aumento da nebulosidade com a ocorrência de chuva leve durante a noite do dia 18 e de névoa úmida em boa parte do dia 19. O segundo sistema frontal, localizado sobre o oceano, reorganizou-se, a partir da interação com um cavado localizado sobre o litoral paulista, deslocando-se para a região da baixada santista, onde enfraqueceu (CPTEC, 2005).

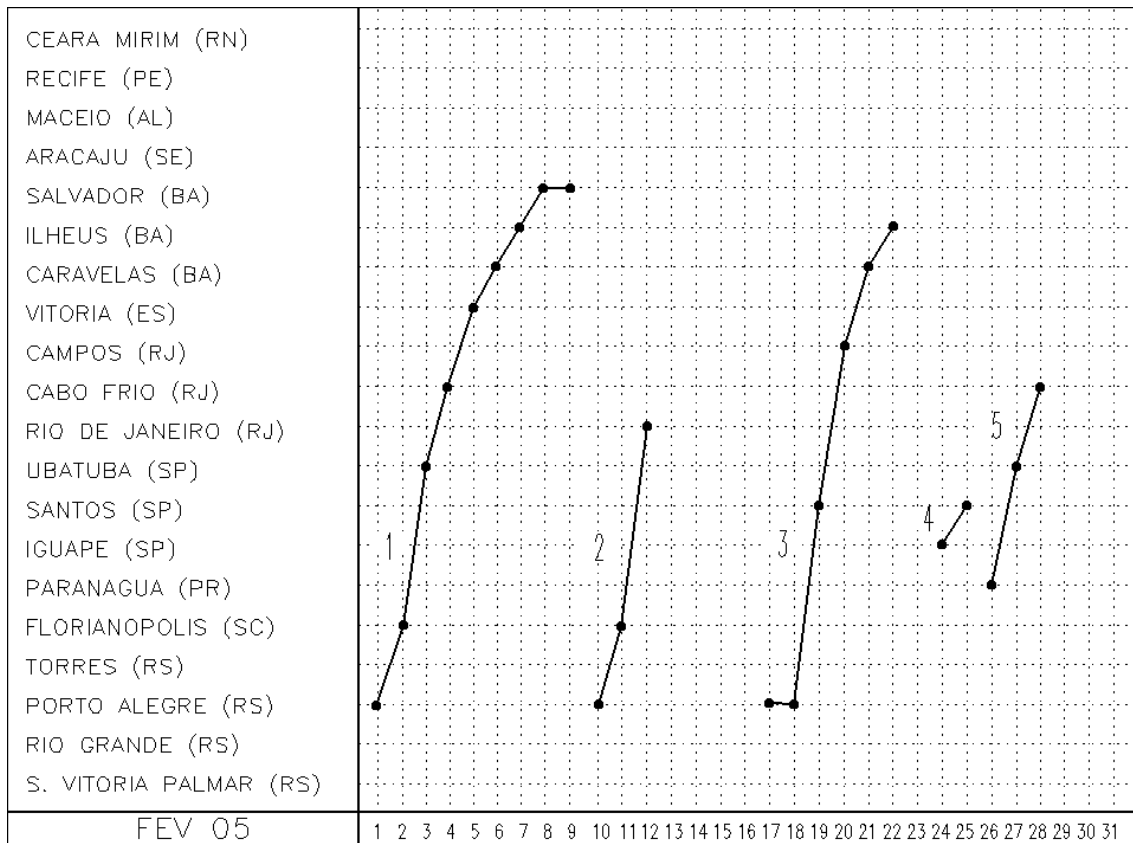


Figura 5-57: Frequência de entrada de frentes frias no mês de Fevereiro de 2005.

(Fonte: CPTEC, 2005)

Os resultados do modelo BRAMS indicaram para o dia 16 de fevereiro de 2005 a ocorrência de ventos bem fracos durante a madrugada e a manhã. Somente a partir do meio dia os ventos passam a se intensificar. Os valores de concentrações de O_3 também passaram a aumentar a partir deste horário quando há uma maior incidência de radiação solar. Contudo, não foram simuladas pelo modelo SPM-BRAMS valores superiores ao PNQA durante o dia 16. Os picos de concentração (entre 100 e 120 $\mu g.m^{-3}$) foram verificados entre 18 e 20 Z no canto noroeste do domínio (Figura 5-58 a). A influência da propagação da brisa marítima no deslocamento da pluma com maiores concentrações de ozônio também pode ser observada. Valores mais elevados de NO_x (acima de 160 $\mu g.m^{-3}$) foram identificados no período da manhã (exemplo na Figura 5-58 b). Durante a tarde, a pluma não se dissipou completamente. Em geral, condições de céu-claro, altas temperaturas (em torno de 28 °C) e baixos índices de umidade relativa (abaixo de 60%) foram identificados no centro do domínio, durante a tarde. Esse comportamento apresenta concordância com as observações realizadas nos aeroportos de Congonhas e de Guarulhos.

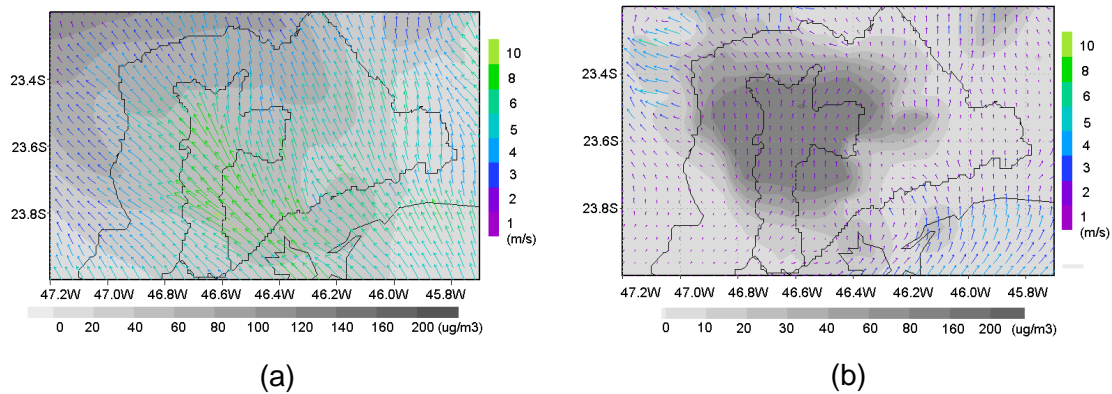


Figura 5-58: Campos de Vento referente ao dia 16 de fevereiro de 2005 e de (a) Concentração de O_3 ($\mu g \cdot m^{-3}$) às 18 Z; (b) Concentração de NO_x ($\mu g \cdot m^{-3}$) às 10 Z.

A ocorrência de ventos fracos durante a madrugada, a manhã e o início da tarde foi verificada no dia 17 de fevereiro de 2005. Os valores máximos de concentração de ozônio foram simulados pelo modelo entre as 16 e 18 Z com valores entre 140 e 160 $\mu g \cdot m^{-3}$ como pode ser visto na Figura 5-59. Durante a manhã, também foram simulados altos valores de NO_x , associados com a emissão veicular. Entre 09 e 10 Z pode ser observada uma ligação entre o núcleo de concentrações simuladas sobre a região da Baixada Santista e o produzido sobre a RMSP indicando o transporte de precursores (no caso, dos óxidos de nitrogênio) no sentido litoral - RMSP (Figura 5-60). Em relação às condições meteorológicas, o modelo simulou a presença de nuvens durante a maior parte do dia em quase todo o domínio. Os valores de temperatura (de umidade relativa) foram ligeiramente mais elevados (mais baixos) do que no dia anterior.

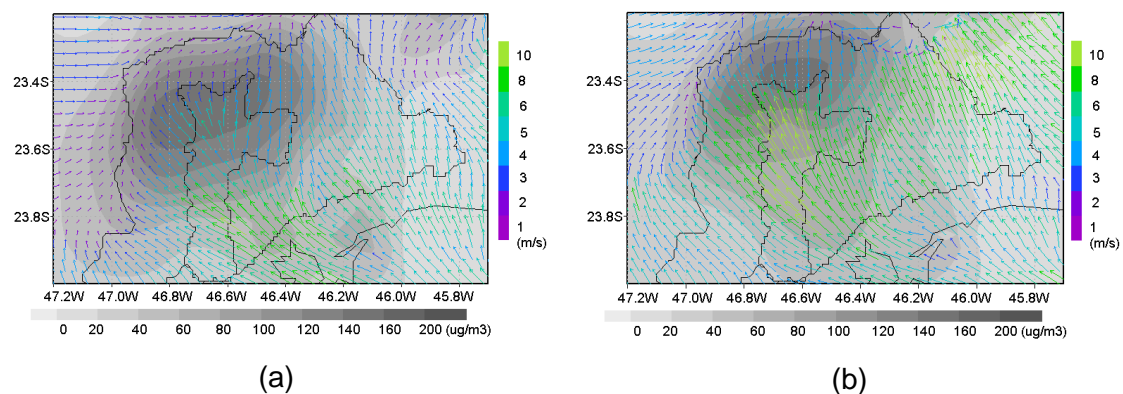


Figura 5-59: Campos de Vento e Concentração de O_3 ($\mu g \cdot m^{-3}$) referente ao dia 17 de fevereiro de 2005 às (a) 18 Z e (b) 20 Z.

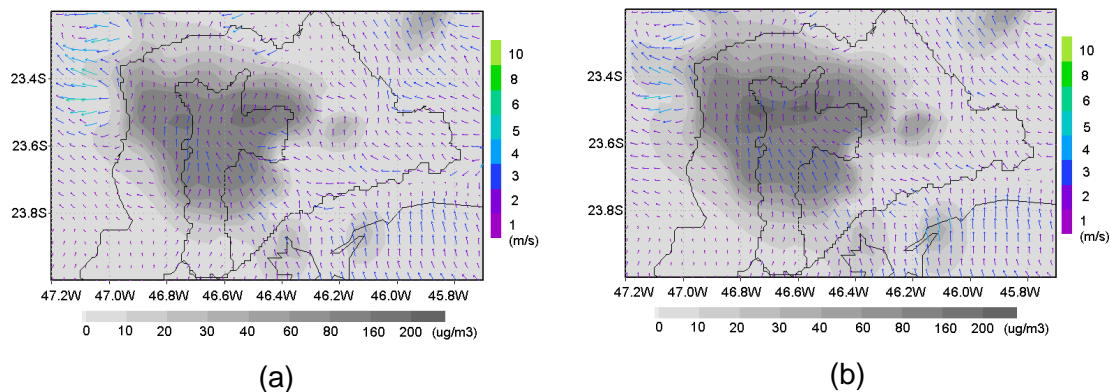


Figura 5-60: Campos de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 17 de fevereiro de 2005 às (a) 09 Z e (b) 10 Z.

Ventos com intensidade moderada são verificados durante a madrugada e a manhã do dia 18. A partir das 13 Z, a pluma de ozônio sobre o noroeste da RMSP começa a ser formada. Máximos valores, entre 140 e 160 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, são identificados sobre a região entre 17 e 19 Z. As concentrações de NO_x simuladas pelo modelo SPM durante a manhã foram, em geral, mais baixas do que as observadas nos dias anteriores. No final da tarde e durante a noite, fortes ventos de nordeste (associados com uma célula convectiva localizada no NE do domínio) encontram os ventos de SE, decorrentes da entrada da brisa marítima deslocando a pluma de NO_x para a região sudoeste da grade como pode ser observado na Figura 5-61. Valores de temperatura acima dos 30 °C e de UR abaixo dos 40% foram verificados durante a tarde na maior parte do domínio.

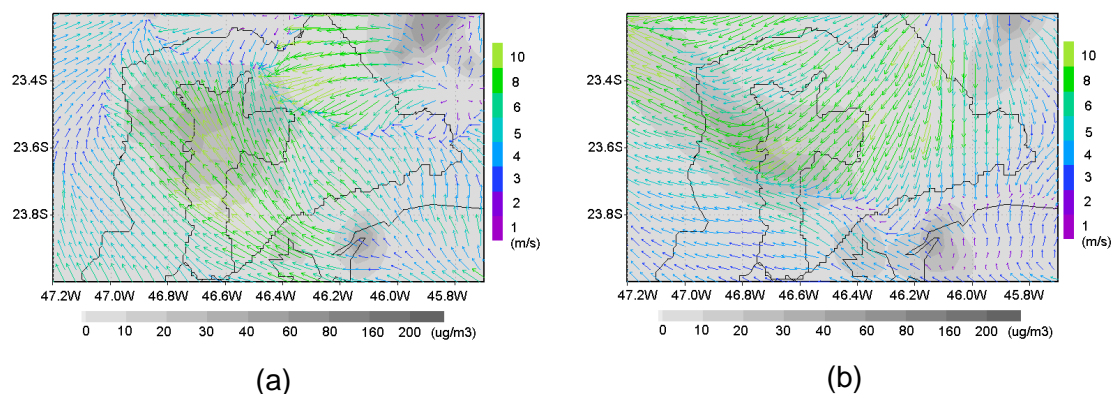


Figura 5-61: Campos de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 18 de fevereiro de 2005 às (a) 20 Z e (b) 23 Z.

Nos dias 19, 20 e 21 de fevereiro de 2005, os resultados das concentrações de ozônio e dos óxidos de nitrogênio revelaram valores mais baixos. Em nenhum desses dias, o modelo simulou violações ao PNQA. Os dados de concentração de ozônio registrados

pela rede de monitoramento da CETESB também não indicaram a ocorrência de ultrapassagens ao padrão nos dias 20 e 21. Contudo, no dia 19, foram registradas violações em 4 estações que compõem a rede.

Analisando as condições meteorológicas simuladas pelo BRAMS durante esses dias foi possível observar a ocorrência de ventos fracos durante a madrugada e a manhã do dia 19 e de ventos mais intensos durante esses períodos nos dias 20 e 21. Os valores máximos de temperatura do ar foram maiores no dia 19 (oscilando entre 26 e 28 °C na maior parte da RMSP). Nos dias 20 e 21, esses valores ficaram entre 22 e 26 °C revelando resultados mais baixos do que os registrados nos aeroportos e nas estações da CETESB que registram esse parâmetro. O modelo também indicou a presença de nebulosidade a partir do final da tarde do dia 19 e predominância de condições de céu-claro nos dois dias subsequentes. Esse comportamento apresentou coerência com os dados de METAR dos aeroportos de Guarulhos e Congonhas.

Durante o dia 22 de fevereiro de 2005, pode-se observar um aumento nas concentrações de ozônio simuladas pelo modelo a partir das 13 Z, com núcleo mais intenso no centro da grade. Com a entrada da brisa marítima também é possível observar o transporte de ozônio da Baixada Santista para a RMSP (Figura 5-62). Os máximos valores de concentração de O₃ (entre 140 e 160 µg.m⁻³) foram verificados às 19 Z. Altos valores de concentração dos óxidos de nitrogênio também foram identificados durante a manhã e à noite tanto na RMSP quanto no litoral paulista (sobre a região de Santos e Cubatão). Foram simuladas condições de céu-claro, temperaturas em elevação (máximas acima dos 30 °C) e baixos índices de UR (variando entre 30 e 40% na maior parte do domínio).

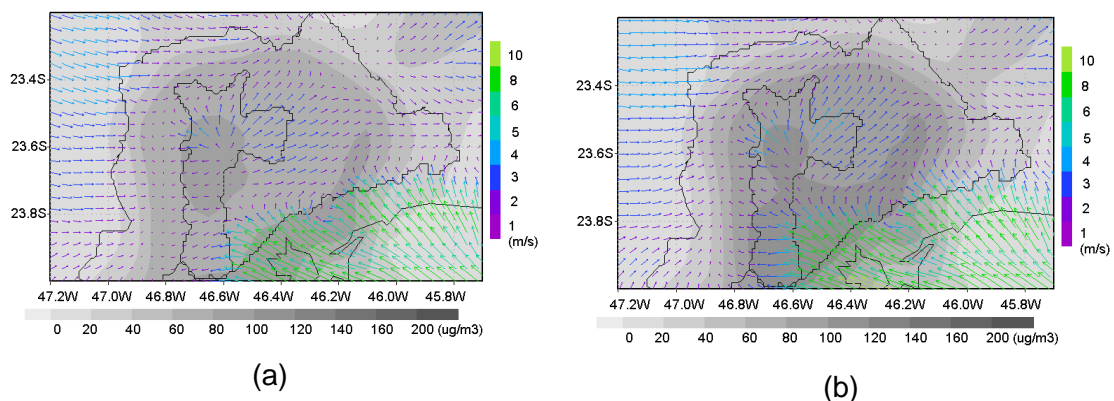


Figura 5-62: Campos de Vento e Concentração de O₃ (µg.m⁻³) referente ao dia 22 de fevereiro de 2005 às (a) 16 Z e (b) 17 Z.

Condições meteorológicas similares as do dia 22 de fevereiro também foram simuladas pelo modelo no dia 23. Os picos de concentração de ozônio, ainda inferiores ao PNQA, foram verificados entre as 17 e 20 Z. O transporte de pluma deu-se para leste-sudeste, seguindo a linha de convergência dos ventos sinóticos de W-NW (de intensidade moderada) com os ventos relativos de SE à entrada da brisa marítima.

Algumas peculiaridades foram identificadas através dos resultados do modelo referentes ao dia 24 de fevereiro de 2005. O núcleo da pluma com maiores concentrações de ozônio foi localizado no noroeste da RMSP durante o dia 24. Neste dia, ventos ligeiramente mais fortes foram simulados para a madrugada e manhã. À tarde, os ventos enfraquecem e as concentrações de ozônio atingem valores bem elevados, superiores ao PNQA, tanto na RMSP quanto na baixada Santista. Não é possível verificar a entrada da brisa. Sobre a RMSP, conforme pode ser observado na Figura 5-63, valores acima de $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ foram simulados durante a maior parte da tarde (entre 17 e 21 Z – exemplo na Figura 5-63 a). Vale ressaltar que valores desta ordem foram realmente observados em pelo menos 4 pontos da região, nas estações Ibirapuera, Moóca, Santana e Santo Amaro. Altos valores de NO_x foram simulados durante todo o dia sobre a RMSP. Um aspecto importante simulado pelo modelo e não corroborado pelos dados disponíveis foi a diminuição da temperatura do ar. Os valores da altura da CLP, principalmente, durante a tarde, também foram mais baixos do que os simulados para os demais dias do período (Figura 5-63 b).

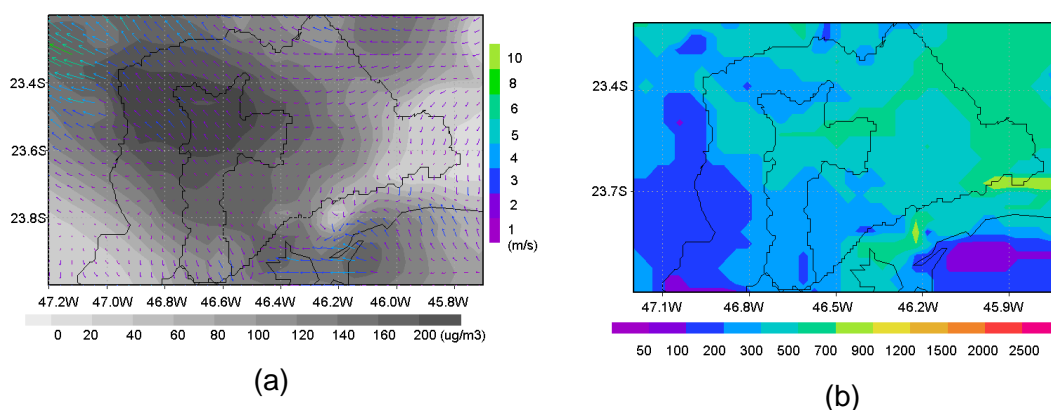


Figura 5-63: (a) Campos de Vento e Concentração de O_3 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) e (b) Altura da CLP (m) referente ao dia 24 de fevereiro de 2005 às 18 Z.

No dia 25, o modelo simulou a ocorrência de ventos fracos durante a madrugada e a manhã. O núcleo de máximas concentrações de ozônio manteve-se deslocado

ligeiramente para leste do Município de São Paulo. Altos valores de concentração foram verificados entre as 14 e 20 Z. Foram simulados valores que representam violações ao PNQA. Assim como no dia 24, a brisa marítima não conseguiu atingir a região metropolitana e houve transporte de poluentes da RMSP para o litoral no final da tarde e no início da noite. Altas concentrações de NO_x também foram simuladas durante todo o dia (e, principalmente, à noite) sobre o centro da grade. Os valores da altura da CLP e da temperatura do ar apresentaram as mesmas tendências verificadas para o dia anterior. No caso do ozônio, é interessante observar que as maiores concentrações de ozônio foram registradas numa área onde a razão das concentrações de NO_2 e de NO apresentou os valores mais elevados. Segundo CETESB (2002), a razão calculada entre as concentrações de dióxido de nitrogênio e as de monóxido de nitrogênio (NO_2/NO) é essencial para a formação da molécula de ozônio, uma vez que estes participam do ciclo fotoquímico deste poluente. Dessa forma, espera-se que razões mais altas sejam associadas a maiores valores de ozônio. Através da Figura 5-64 é possível verificar que as maiores concentrações de ozônio foram geradas em locais onde a concentração de NO_2 superou mais de 10 vezes as de NO .

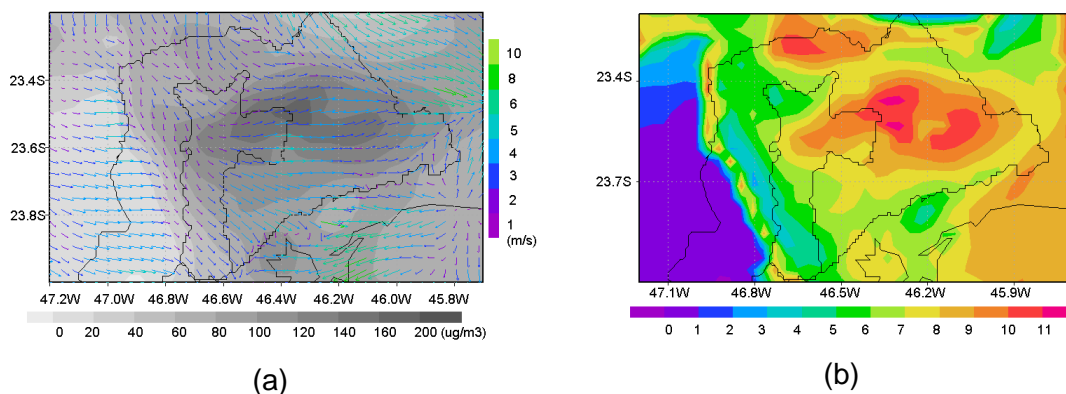


Figura 5-64: (a) Campos de Vento e Concentração de O_3 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) e (b) Razão NO_2/NO referente ao dia 25 de fevereiro de 2005 às 16 Z.

5.2.3.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados medidos pela CETESB

Em geral, como pode ser observado na Figura 5-65, o ciclo diurno das concentrações foi relativamente bem simulado pelo modelo fotoquímico simplificado. O horário das máximas concentrações de ozônio esteve de acordo com as observações na maioria dos casos. Os valores máximos de concentração de ozônio, incluindo as violações ao PNQA, foram mais bem simulados nos últimos 4 dias de simulação, entre 22 e 25 de

fevereiro de 2005, exceto para as estações de Mauá e Pinheiros. Vale destacar, que no dia 24, os picos de concentração foram superestimados em algumas estações. Apenas a estação Pinheiros, apresentou melhores resultados entre os dias 18 e 21, quando as concentrações de O_3 simuladas pelo modelo apresentaram menores valores.

Outro ponto importante que o modelo não conseguiu simular novamente, no caso da estação Santana, a exemplo do identificado no período de setembro de 2004, foi a manutenção de concentrações acima de $50 \mu\text{g.m}^{-3}$ durante o período noturno em todos os dias considerados. Esse padrão também havia sido verificado para a estação Santo Amaro, nos períodos referentes aos anos de 2003 e 2004.

Os dados de concentração de ozônio registrados pela CETESB revelaram, em alguns dias, a ocorrência de um pico de concentração noturna em algumas estações. O mesmo foi verificado através dos resultados simulados pelo modelo, em algumas ocasiões. Nos dias 19 e 24, por exemplo, tanto o modelo quanto os resultados da CETESB indicaram um aumento das concentrações de O_3 , na grande maioria das estações, durante a noite, quando não há incidência de radiação solar. É importante destacar que tal representação das concentrações de ozônio durante o período noturno depende de vários fatores, como a advecção do poluente de outras regiões, processos de transporte vertical, concentrações do poluente compatíveis em níveis mais altos da atmosfera, entre outros. Sendo assim, é de se esperar que, uma vez que não há a entrada de massas de ar poluídas nas fronteiras da grade simulada, que essa representação só ocorra de maneira satisfatória em alguns casos muito particulares.

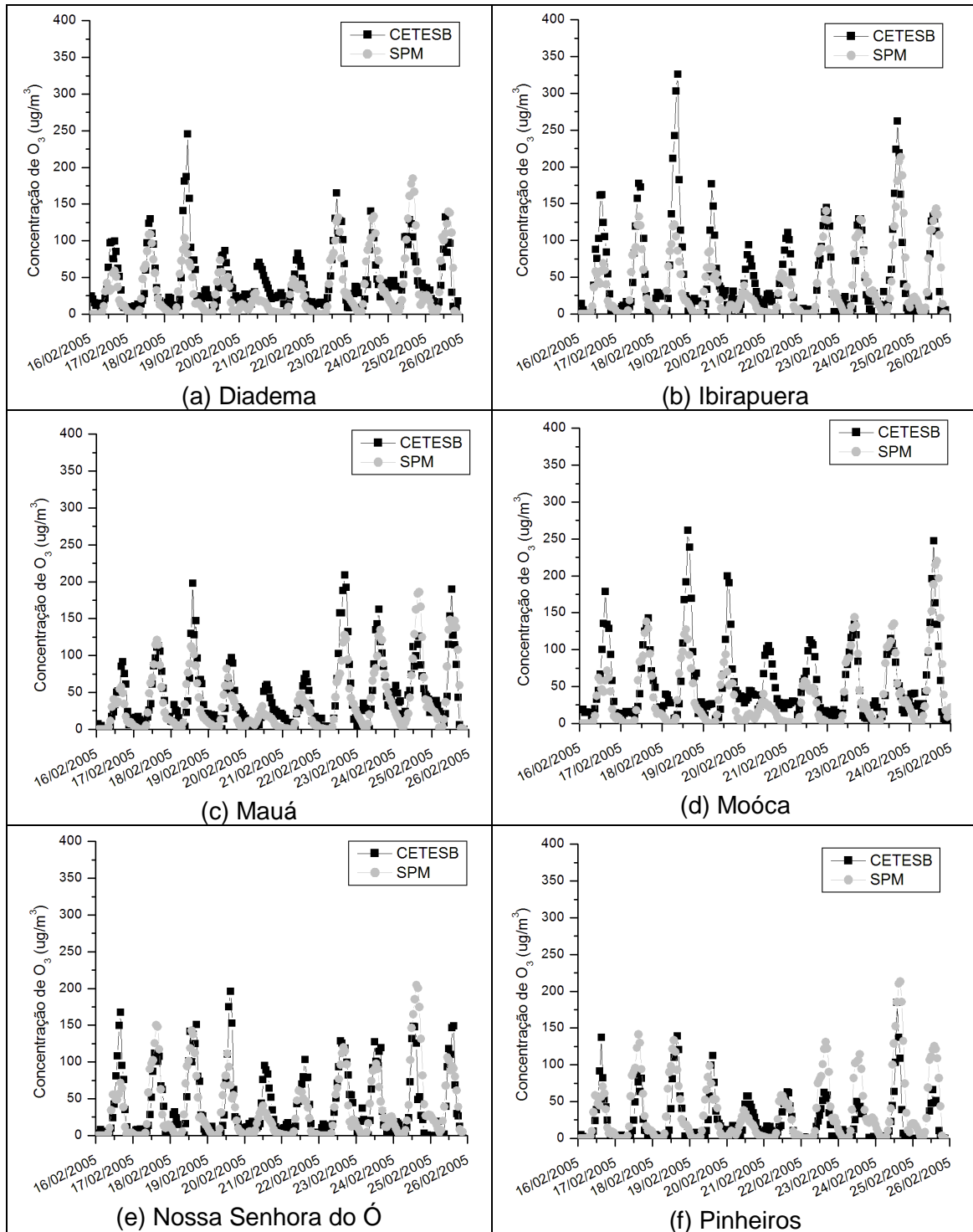


Figura 5-65: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu g.m^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

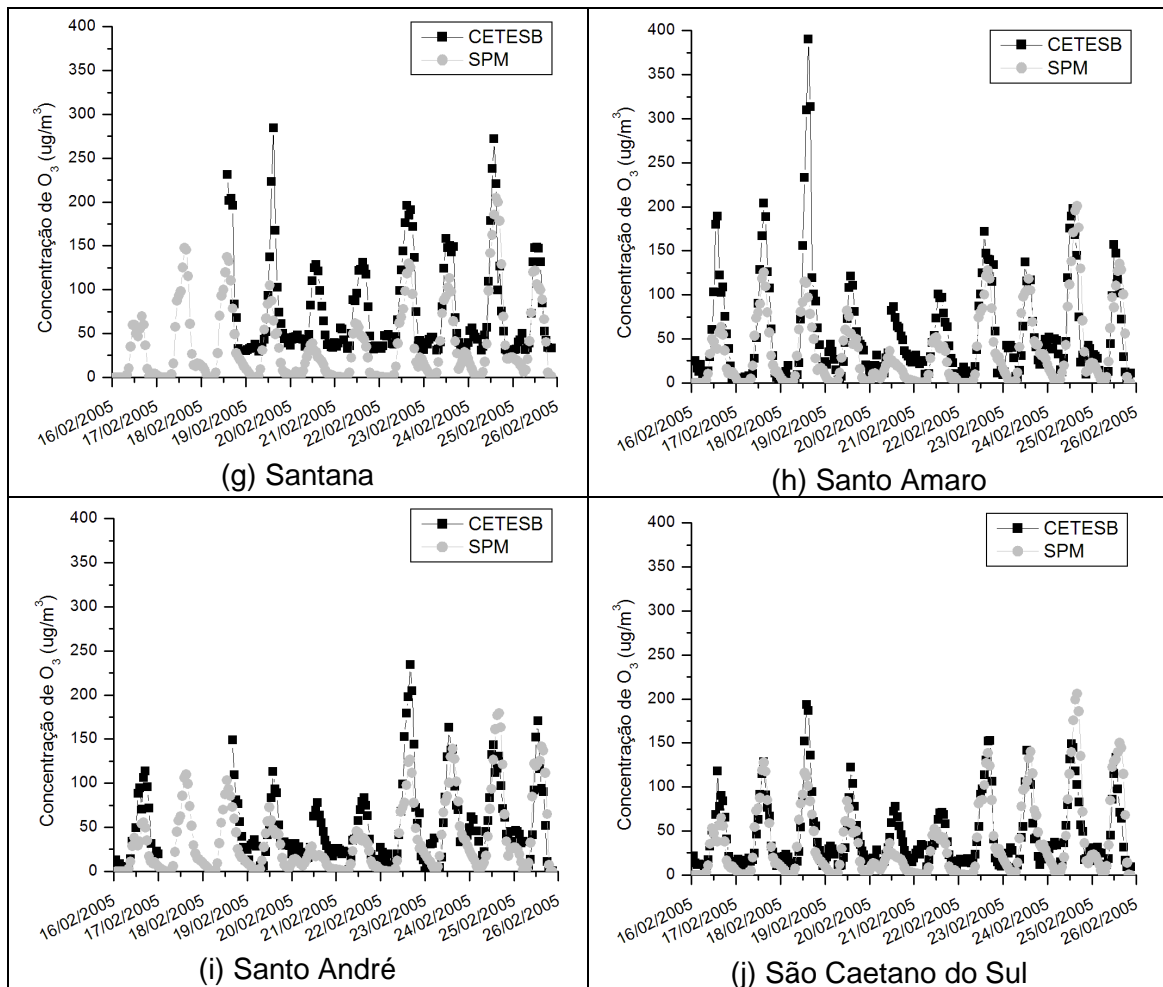


Figura 5-65: Continuação.

As bruscas variações nas concentrações de monóxido de nitrogênio, principalmente, em estações altamente expostas a emissão veicular (exemplo na Figura 5-66 b), novamente, não foram bem representadas pelo modelo. No entanto, o horário dos picos de concentração, principalmente, dos verificados durante a manhã, mostraram-se de acordo com os resultados. A magnitude de alguns picos de concentração de NO₂ também não foi bem representada pelo SPM-BRAMS em ambas as estações (Figura 5-67). Vale ressaltar que algumas das estações que, em geral, registram concentrações de NO_x não apresentaram dados válidos durante o período considerado.

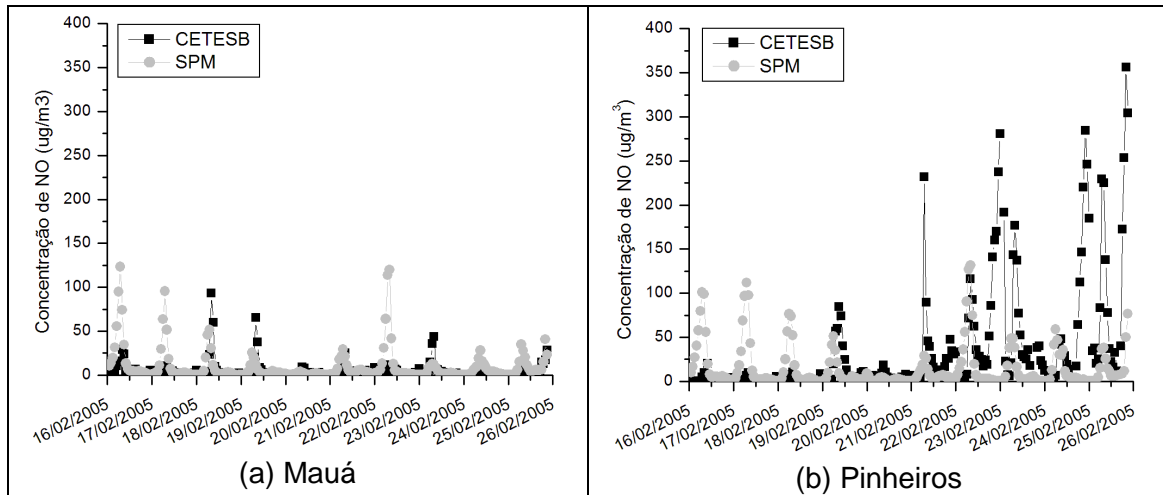


Figura 5-66: Comparação entre as concentrações de monóxido de nitrogênio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

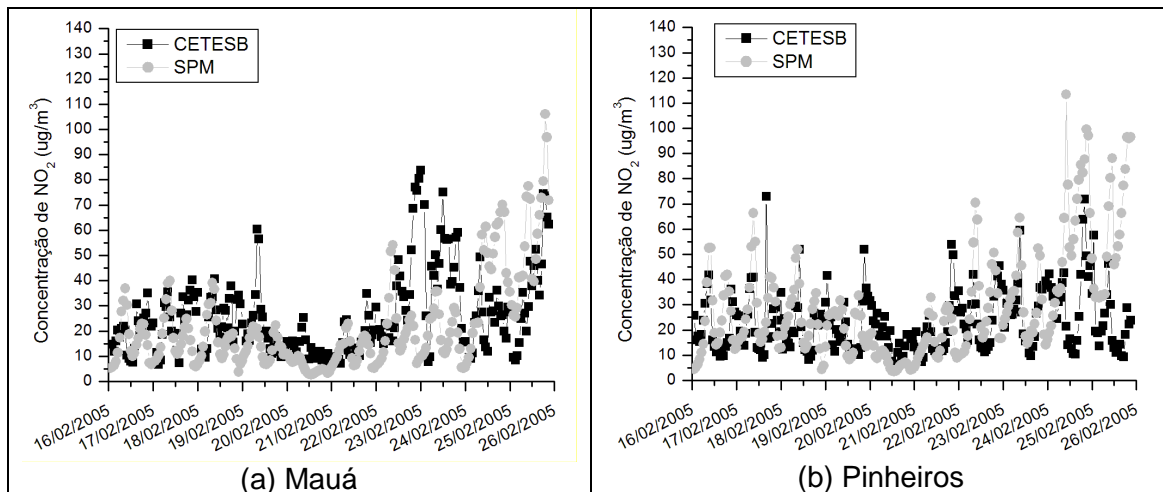


Figura 5-67: Comparação entre as concentrações de dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

Como pode ser observado na Figura 5-68, as concentrações de CO, em geral, foram subestimadas pelo modelo. Um aspecto importante bem representado pelo SPM-BRAMS foi a tendência de aumento das concentrações registradas em todas as estações nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2005. Vale ressaltar que, nestes dias, o modelo foi melhor nas estações Cerqueira César e Pinheiros, localizadas próximo a vias de tráfego com fluxo intenso de veículos.

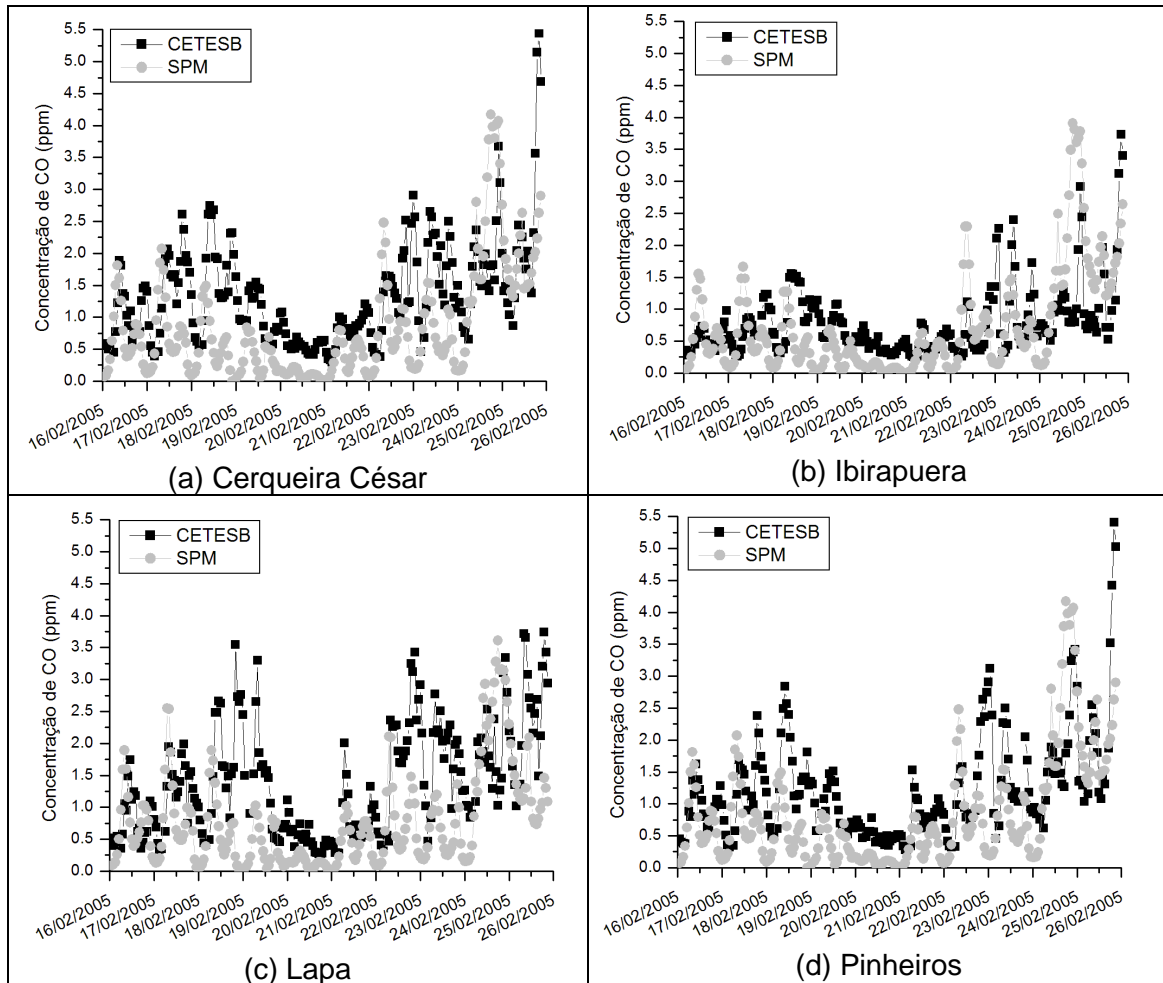


Figura 5-68: Comparação entre as concentrações de monóxido de carbono (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

Os resultados obtidos a partir da utilização de métodos estatísticos para a comparação dos valores de concentração de ozônio simulados pelo modelo SPM-BRAMS e os monitorados pela CETESB podem ser observados na Tabela 5-19. Observando os resultados obtidos através da correlação linear de Pearson (R) para todo o período verificam-se índices variando entre 0,73 e 0,83. Estes valores se referem às estações de Santo Amaro e Mauá, respectivamente. Vale lembrar que o modelo subestimou os picos de concentração de O_3 registrados nos 3 primeiros dias da simulação na Estação Santo Amaro, ocasionando uma menor correção nesta localidade.

O cálculo do viés indicou que, exceto para a estação de Pinheiros (que registrou valor positivo), o modelo subestimou as concentrações de ozônio registradas pela rede de monitoramento. Os maiores valores do viés corresponderam às estações de Santana e Santo Amaro.

Analisando o primeiro critério para se obter *skill* em uma simulação, foi possível verificar que a média das diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} foi significativa nas estações Ibirapuera, Pinheiros, Santana e Santo Amaro. Nas demais estações, o modelo foi considerado em concordância quando comparado às estações da CETESB. Com o cálculo do *RMSE* foi possível avaliar o segundo critério para a obtenção do *skill* da simulação. Dentre todas as estações apenas a estação Pinheiros não satisfaz esse critério. Todas as estações consideradas satisfizeram o terceiro critério para a obtenção do *skill*.

Em relação ao índice *d*, foram verificados valores variando entre 0,78, na estação Santana, e 0,90, na estação Mauá. Estes resultados indicam uma concordância entre os valores produzidos pelo modelo e as observações.

Tabela 5-19: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) disponíveis no período de 16 a 25 de fevereiro de 2005.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Diadema	0,76	29,42	-9,53	0,85	27,84	39,90	40,43
Ibirapuera	0,78	39,12	-10,19	0,85	37,77	60,53	44,78
Mauá	0,83	26,15	-6,35	0,90	25,37	44,67	42,39
Moóca	0,75	36,68	-12,40	0,84	34,52	50,29	46,49
N. Senhora do Ó	0,76	31,59	-2,15	0,86	31,52	46,11	44,01
Pinheiros	0,74	33,92	14,74	0,80	30,56	32,51	45,22
Santo André	0,79	31,82	-14,67	0,86	28,23	44,79	41,14
Santana	0,81	49,62	-36,95	0,78	33,12	56,58	45,45
São Caetano do Sul	0,80	27,20	-4,82	0,88	26,77	38,52	44,62
Santo Amaro	0,73	44,18	-18,69	0,79	40,03	58,97	41,71

A comparação entre os resultados de temperatura e umidade relativa simulados pelo BRAMS e os observados pelas estações de monitoramento da CETESB pode ser observada na Figura 5-69 e Figura 5-70, respectivamente. Assim como o verificado para os outros períodos analisados até o momento, foi possível observar que o modelo subestimou os valores máximos de temperatura do ar praticamente durante todo o período na maioria das estações. Vale ressaltar que, novamente, a estação São Caetano do Sul foi a que apresentou os valores de temperatura máxima mais subestimados. O ciclo diurno foi bem simulado, exceto nos dias 24 e 25 de fevereiro de 2005, quando o modelo registrou um aumento de nebulosidade. Os resultados obtidos para a umidade relativa do ar não se apresentaram de acordo com as

observações. Nos dias 22 e 23 de fevereiro de 2005, por exemplo, os valores mínimos e máximos de UR foram bastante subestimados pelo BRAMS.

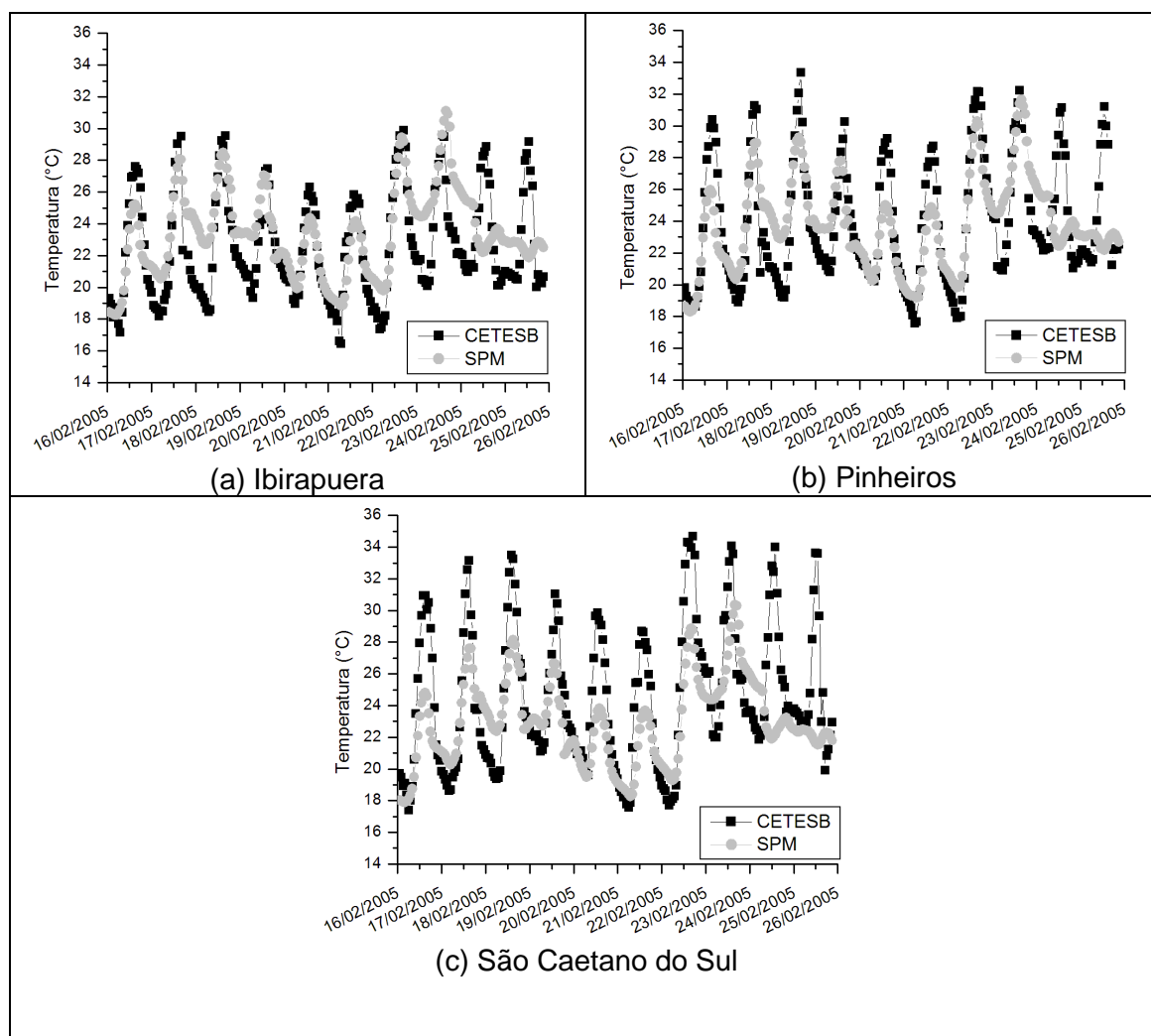


Figura 5-69: Comparação entre a temperatura do ar (°C) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

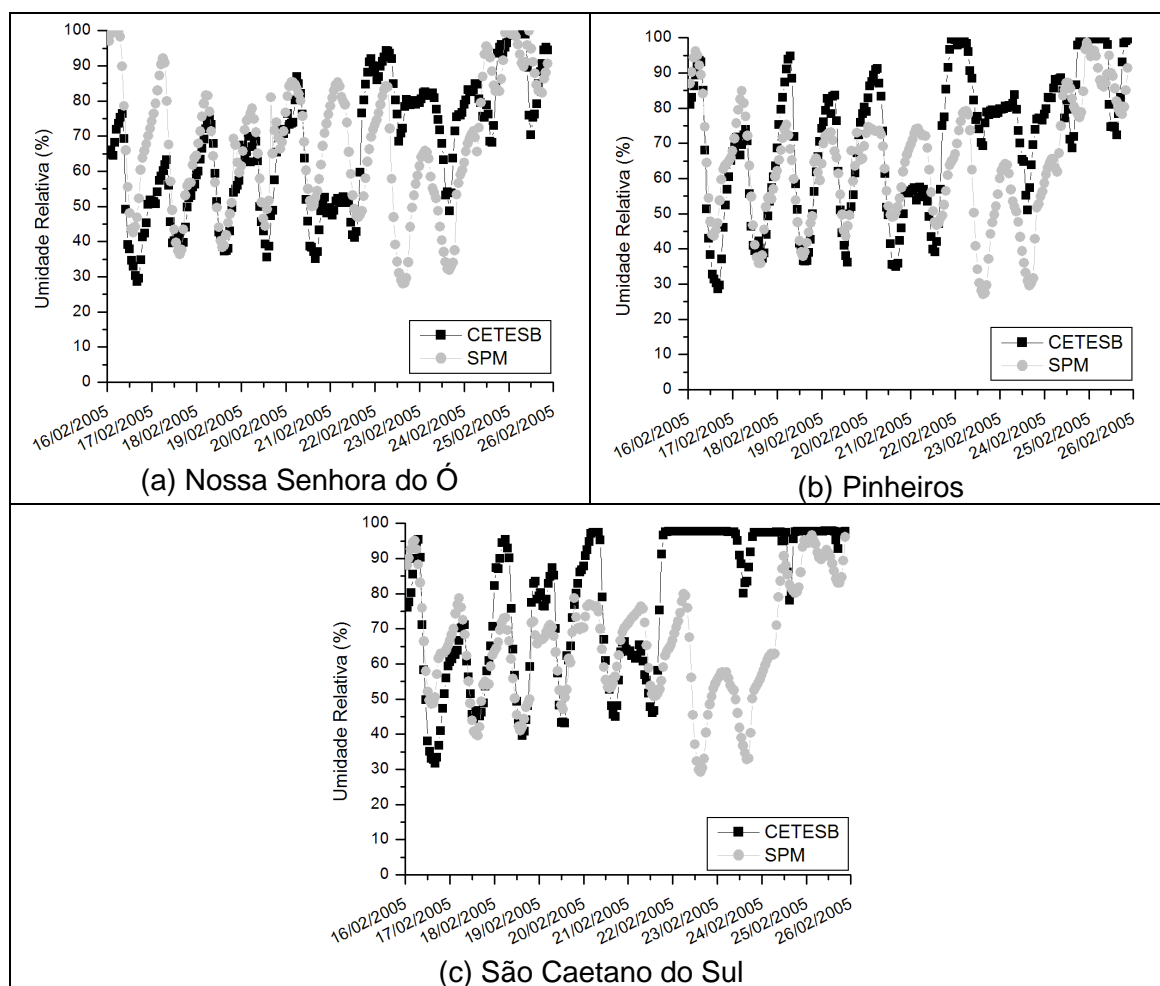


Figura 5-70: Comparação entre a umidade relativa do ar (%) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

A utilização dos índices estatísticos considerados por este estudo para a temperatura do ar e umidade relativa, durante o período de 16 a 25 de fevereiro de 2005, revelou valores de correlação mais baixos do que os verificados para os demais períodos. Em geral, para a temperatura do ar, o índice de correlação de Pearson variou entre 0,66, na estação do Ibirapuera, e 0,74 em Pinheiros (Tabela 5-20). Para a umidade relativa, os valores de R foram bem abaixo dos verificados para os demais períodos, como é possível verificar na Tabela 5-21. Os valores variaram entre 0,38, para a estação São Caetano do Sul, e 0,62, na estação Pinheiros.

A análise do viés revelou valores negativos tanto para a temperatura quanto para a umidade relativa do ar nas estações Pinheiros e São Caetano do Sul, indicando que o modelo subestimou os dados observados. Apenas as estações Ibirapuera, no caso da temperatura do ar, e Nossa Senhora do Ó, para a UR, apresentaram valores positivos.

O primeiro critério para obtenção do *skill* em uma simulação revelou diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} significativas em todas as estações e para ambos os parâmetros, exceto para a umidade relativa do ar simulada para a estação de Nossa Senhora do Ó. Dessa forma, o modelo não se apresentou em concordância quando comparado às estações da CETESB. O segundo e o terceiro critério foram atendidos por todas as estações para a temperatura. No referente à umidade relativa, apenas a estação Pinheiros atendeu a estes critérios.

Os valores do índice *d* foram superiores a 0,7, excetuando o calculado para a umidade relativa na estação São Caetano do Sul. Os valores mais altos, para ambos os parâmetros, foram verificados para a estação Pinheiros.

Tabela 5-20: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de temperatura do ar (°C) disponíveis no período de 16 a 25 de fevereiro de 2005.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Ibirapuera	0,66	2,75	0,88	0,78	2,61	3,43	2,66
Pinheiros	0,74	2,62	-0,12	0,83	2,62	3,89	2,77
São Caetano do Sul	0,70	3,53	-1,48	0,76	3,20	4,46	2,68

Tabela 5-21: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados de umidade relativa do ar (°C) disponíveis no período de 16 a 25 de fevereiro de 2005.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Nossa Sra. do Ó	0,49	18,80	1,13	0,71	18,76	18,65	18,64
Pinheiros	0,62	17,45	-6,60	0,76	16,15	19,84	16,73
São Caetano do Sul	0,38	24,52	-13,27	0,62	20,62	20,56	15,90

5.2.4. Entre 07 e 17 de janeiro de 2006

5.2.4.1 Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar

O mês de janeiro de 2006 foi marcado pela ausência de chuvas em boa parte do sudeste do Brasil em decorrência da atuação de um bloqueio atmosférico em áreas oceânicas extratropicais (CPTEC, 2006). A configuração do bloqueio acarretou no predomínio de um sistema de alta pressão sobre o continente sul-americano com ocorrência de altas temperaturas em torno na região que pode ter contribuído para os altos níveis de ozônio registrados na RMSP.

Entre os dias 07 e 17 de janeiro, após a desconfiguração de um episódio de ZCAS, as condições meteorológicas foram bastante similares ao verificado nos episódios anteriormente analisados, com predominância de ocorrência de ventos fracos entre o final da noite e início da tarde, seguido pela intensificação dos ventos associados à circulação de brisa marítima. Na maioria dos dias simulados, a propagação da frente de brisa atuou na dispersão das concentrações de ozônio sobre a região.

As condições meteorológicas foram bastante similares durante esses dias, com predominância de céu-claro, altos valores de incidência de radiação de onda curta, temperaturas máximas superando os 28 °C e valores de UR entre 40 e 60% durante a tarde sobre a maior parte da RMSP. O modelo simulou a presença de nebulosidade e a ocorrência de precipitação no noroeste do domínio, fora da RMSP. Também foram verificadas situações com ventos fracos entre o final da noite do dia anterior e a manhã destes dias.

A configuração do campo de vento, principalmente, durante a manhã, parece ter influenciado diretamente a posição de formação da pluma com maiores concentrações de ozônio. Nos dias 07 e 10, a formação de maiores concentrações foi observada na região central-noroeste do domínio. Nos dias 08 e 09, a formação deu-se mais para sul-sudeste da RMSP. O horário, a extensão e a intensidade em que os máximos valores de concentração de O₃ foram simulados também variaram de um dia para o outro como pode ser observado na Figura 5-71. Os valores dos picos de concentração simulados pelo modelo ficaram próximos, porém não representaram violações ao PNQA, estando na faixa entre 140 e 160 µg.m⁻³ (exceto no dia 08 de janeiro de 2006 quando estes estiveram entre 100 e 120 µg.m⁻³).

Em relação às concentrações de óxidos de nitrogênio simuladas entre 07 e 10 de janeiro de 2006, foram verificados altos valores associados com o pico diurno e noturno (exceto para o dia 08 quando as concentrações foram mais baixas). No dia 09, por exemplo, altas concentrações de NO_x foram simuladas na RMSP e em parte da baixada Santista durante todo o dia. A pluma não se dispersou completamente durante a noite e foi somada as concentrações em decorrência do aumento do fluxo de tráfego de veículos durante a manhã do dia 10 de janeiro de 2006 (Figura 5-72 e Figura 5-73).

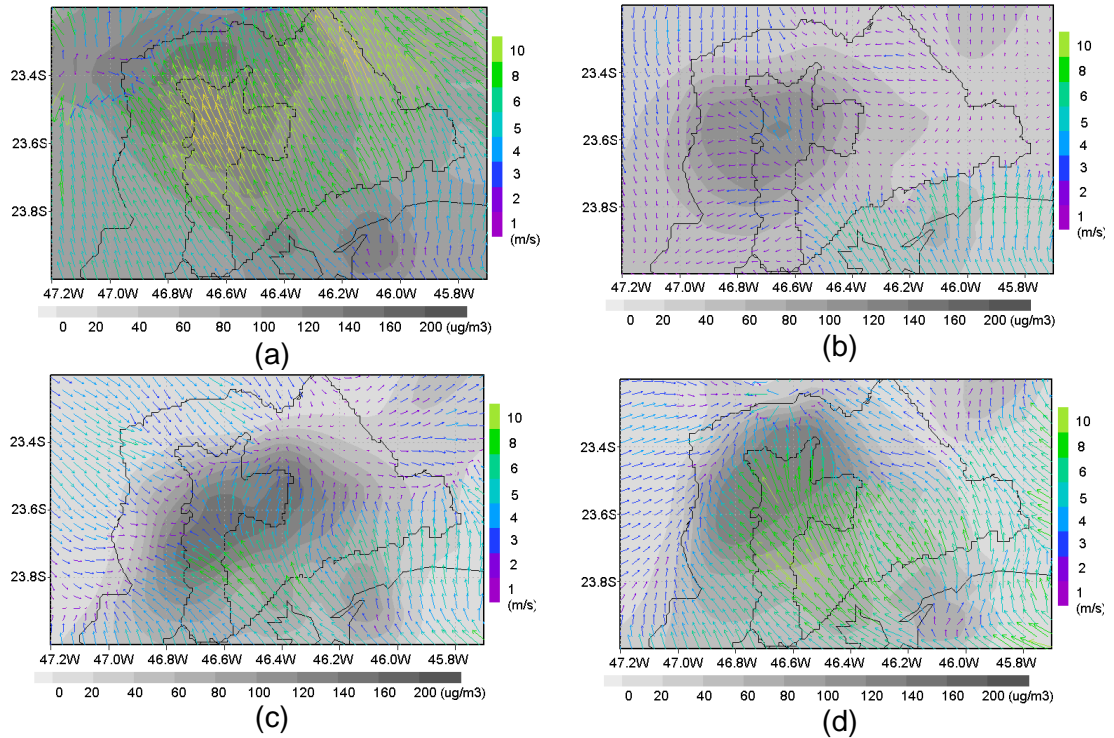


Figura 5-71: Campos de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente aos dias (a) 07 de janeiro de 2006 às 20 Z; (b) 08 de janeiro de 2006 às 14 Z; (c) 09 de janeiro de 2006 às 17 Z; (d) 10 de janeiro de 2006 às 18 Z.

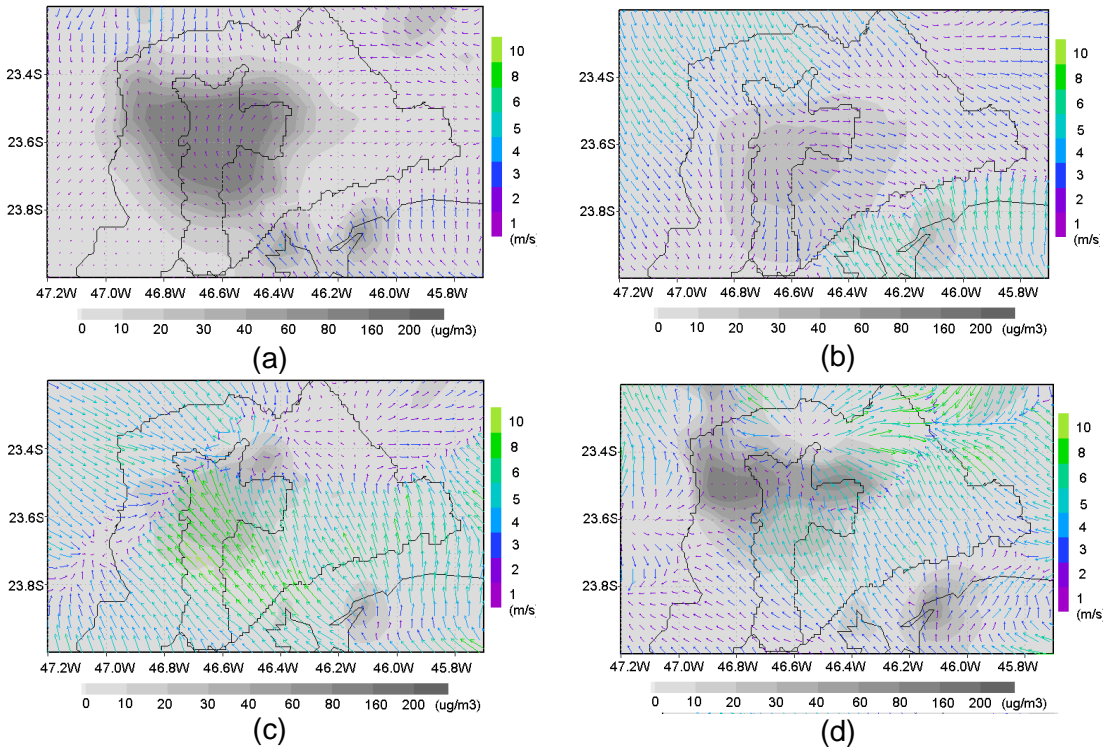


Figura 5-72: Campos de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 09 de janeiro de 2006 às (a) 10 Z, (b) 14 Z, (c) 18 Z e (d) 22 Z.

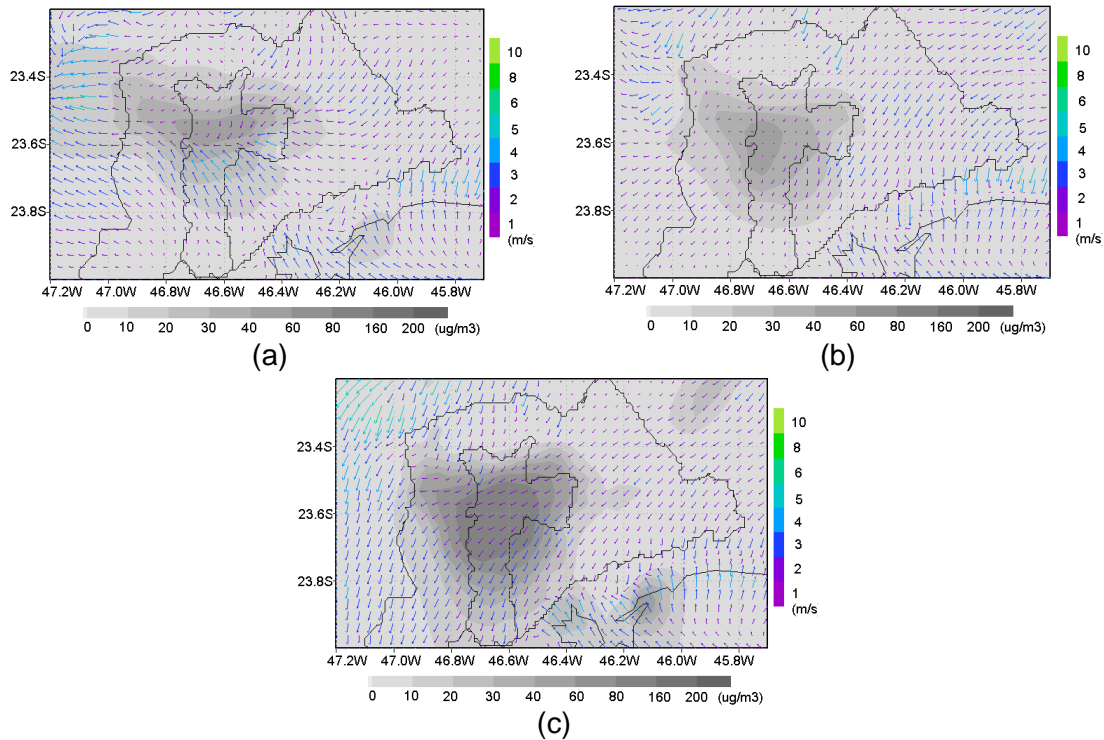


Figura 5-73: Campos de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 10 de janeiro de 2006 às (a) 02 Z, (b) 06 Z e (c) 10 Z.

No dia 11 de janeiro de 2006, ventos ligeiramente mais fortes foram observados no centro da RMSP durante a madrugada e a manhã. A intensidade e direção destes ventos influenciaram diretamente a posição onde os núcleos com maiores concentrações de ozônio foram simulados (no noroeste da RMSP). O início da formação de um núcleo com maiores concentrações de ozônio ocorreu por volta das 14 Z e valores superiores ao PNQA foram identificados entre as 18 e 21 Z sobre a RMSP (Figura 5-74). Os máximos valores de concentração de NO_x não foram muito intensos durante este dia. Os resultados do modelo indicaram condições de céu-claro e alta incidência de radiação solar. As temperaturas máximas foram mais amenas variando entre 22 e 26 °C sobre a região. Esses valores foram, em geral, inferiores aos registrados nos aeroportos de Congonhas e de Guarulhos e nas estações da rede da CETESB.

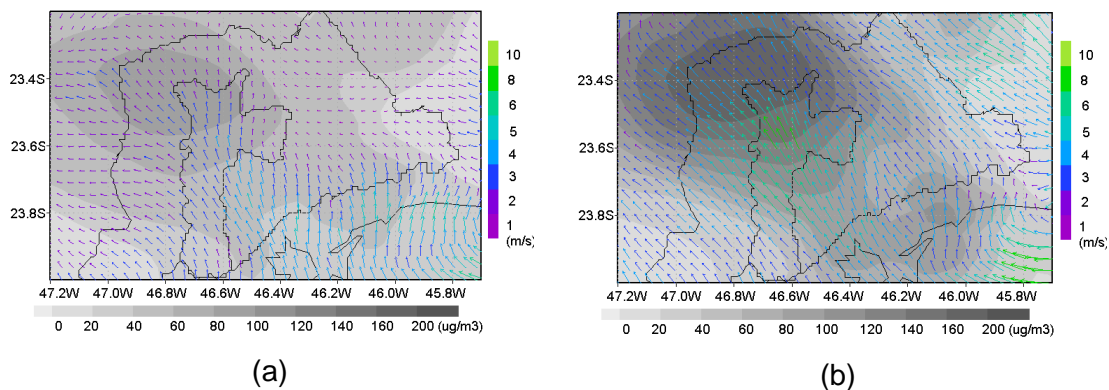


Figura 5-74: Campos de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 11 de janeiro de 2006 às (a) 14 Z e (b) 19 Z.

As concentrações de ozônio geradas pelo modelo SPM-BRAMS apresentaram altos valores entre os dias 12 e 16 de janeiro de 2006. Nos dias 12 e 15, os valores ficaram abaixo dos $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ estabelecidos como PNQA pela Resolução CONAMA 03/90. Vale ressaltar que os dados obtidos através da rede da CETESB realmente não revelaram a ocorrência de violações ao PNQA no dia 12 de janeiro de 2006. No dia 15, apenas duas ocorrências foram verificadas. Os resultados obtidos através da simulação para os dias 13, 14 e 16 revelaram valores acima do PNQA, em parte da RMSP, entre as 18 e 20 Z (em concordância com os resultados da CETESB). Todos esses dias apresentaram condições meteorológicas similares com ventos fracos (principalmente, entre o final da noite e o início da tarde), predominância de céu-claro, temperaturas máximas entre 28 e 30 °C e valores mínimos de UR variando entre 50 e 60%.

Violações ao PNQA também foram simuladas para o dia 17 de janeiro de 2006. Analogamente ao verificado no dia 11 de janeiro de 2006, a formação da pluma com maiores concentrações de O_3 se deu mais para norte-noroeste em decorrência de ventos ligeiramente mais fortes durante a manhã do dia 17 sobre o centro da RMSP. A temperatura do ar atingiu valores acima dos 30 °C e a umidade relativa apresentou índices em torno de 30% em parte da região.

5.2.4.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados medidos pela CETESB

Na Figura 5-75 está ilustrada a comparação entre os resultados das concentrações de ozônio simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as registradas pela rede de monitoramento da CETESB para o período entre 07 e 17 de janeiro de 2006. De um

modo geral, o modelo SPM-BRAMS representou bem tanto os picos de concentração diários quanto o ciclo diurno do poluente. Vale destacar que apenas nos dias 08, 16 e 17 de janeiro de 2006 o modelo subestimou as concentrações máximas de ozônio na maioria das estações.

Outro ponto importante foi a detecção das violações ao PNQA estabelecido para o ozônio em diversas estações de qualidade do ar, exceto o dia 16 quando o modelo subestimou as concentrações na maioria das estações. As concentrações registradas pela estação Santo Amaro foram subestimadas pelo modelo durante praticamente todo o período considerado, exceto no dia 13 de janeiro de 2006.

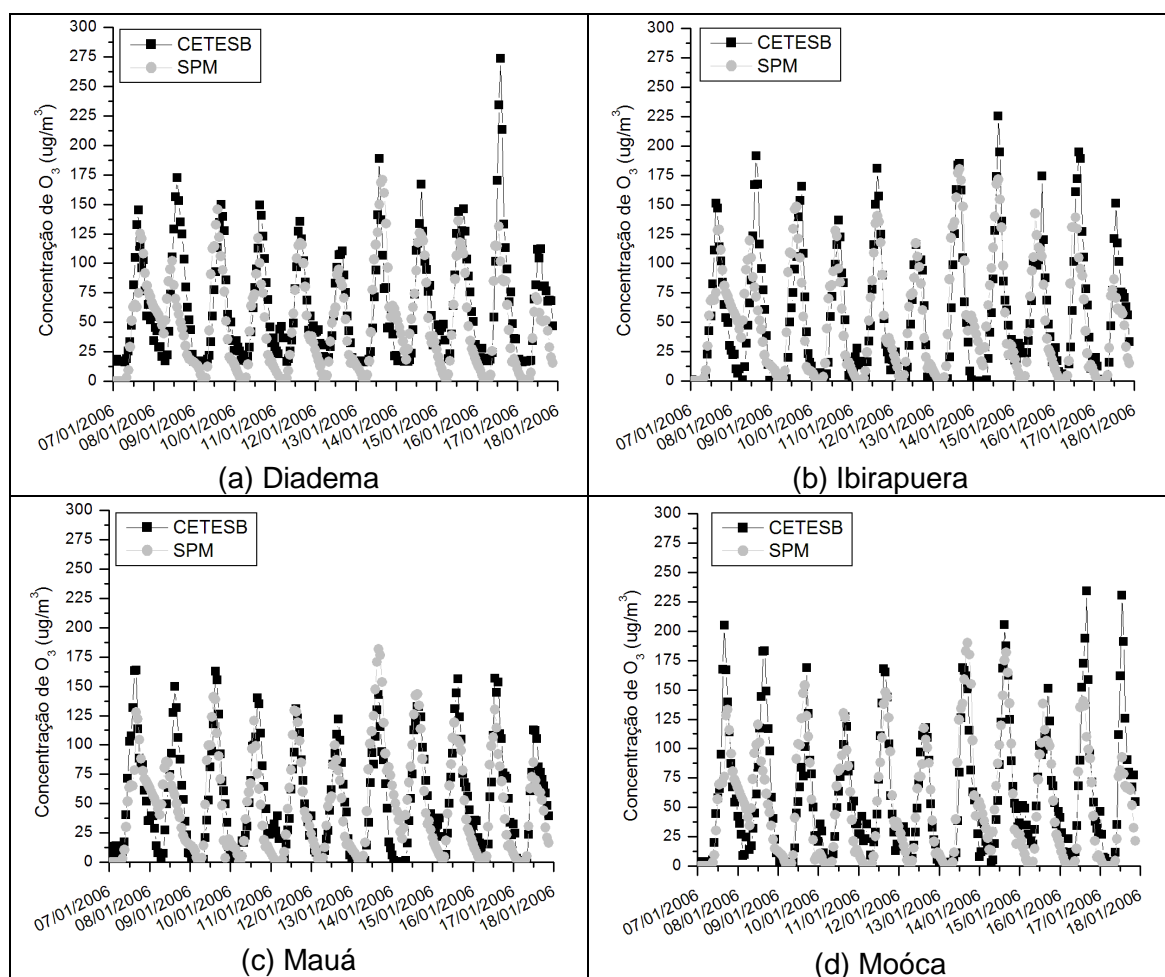


Figura 5-75: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu g.m^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

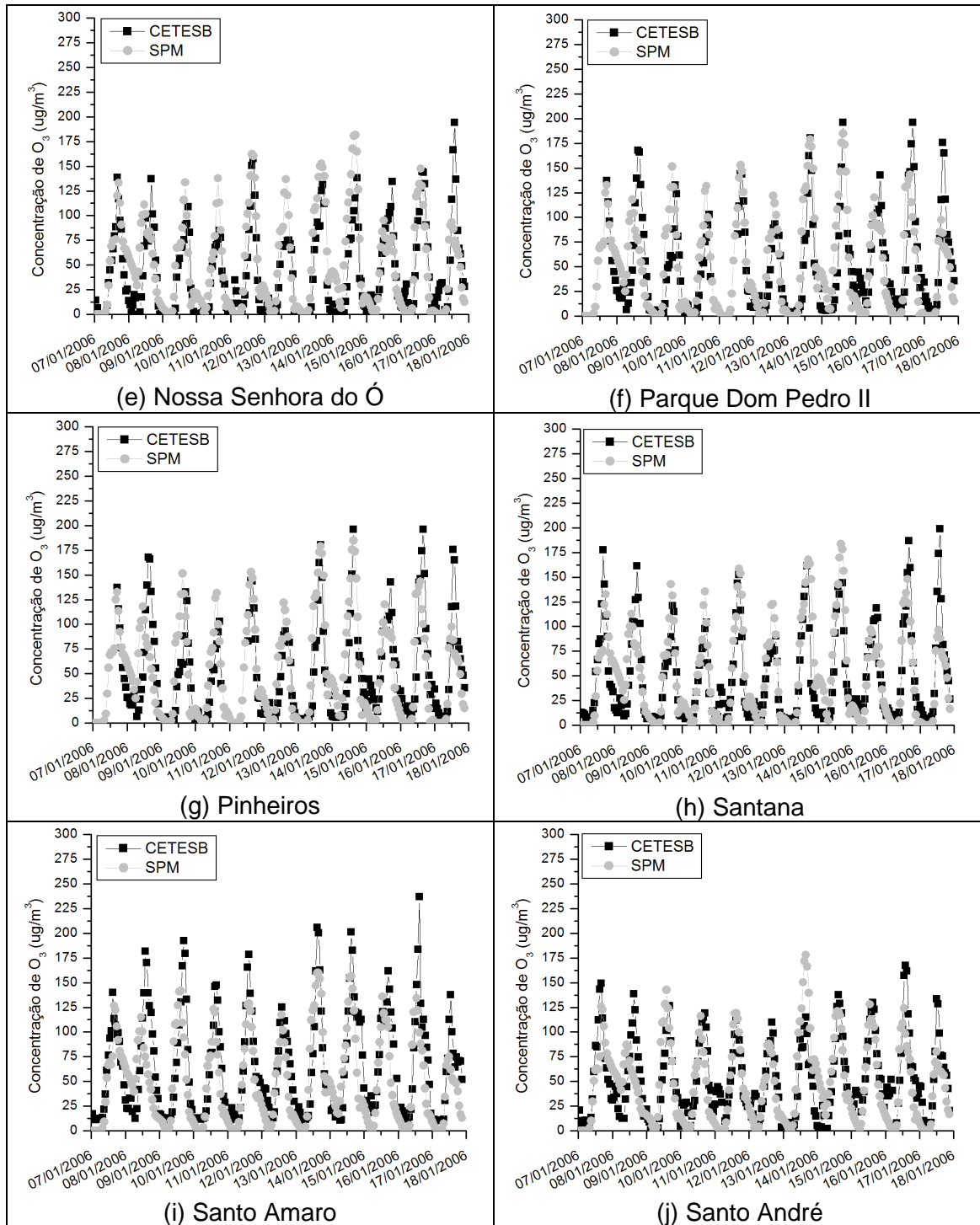


Figura 5-75: Continuação.

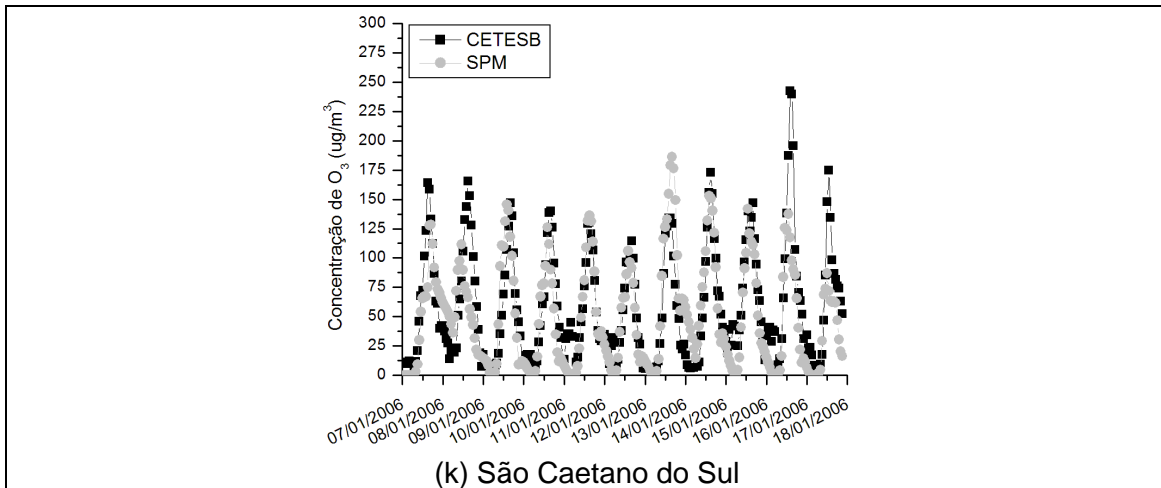


Figura 5-75: Continuação.

Novamente, assim como verificado para os demais períodos, as variações nas concentrações de monóxido de nitrogênio não foram bem representadas pelo modelo como ilustrado na Figura 5-76. Para o período em questão, entre 07 e 17 de janeiro de 2006, a magnitude das concentrações de NO_2 foi subestimada pelo SPM-BRAMS, principalmente, nas estações de Pinheiros e do Ibirapuera, respectivamente (Figura 5-77).

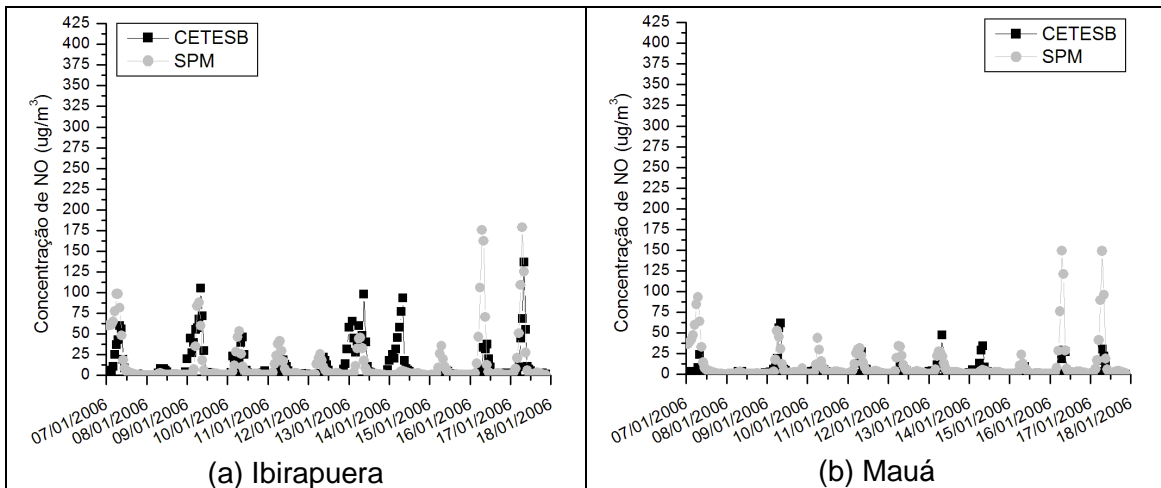


Figura 5-76: Comparação entre as concentrações de monóxido de nitrogênio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

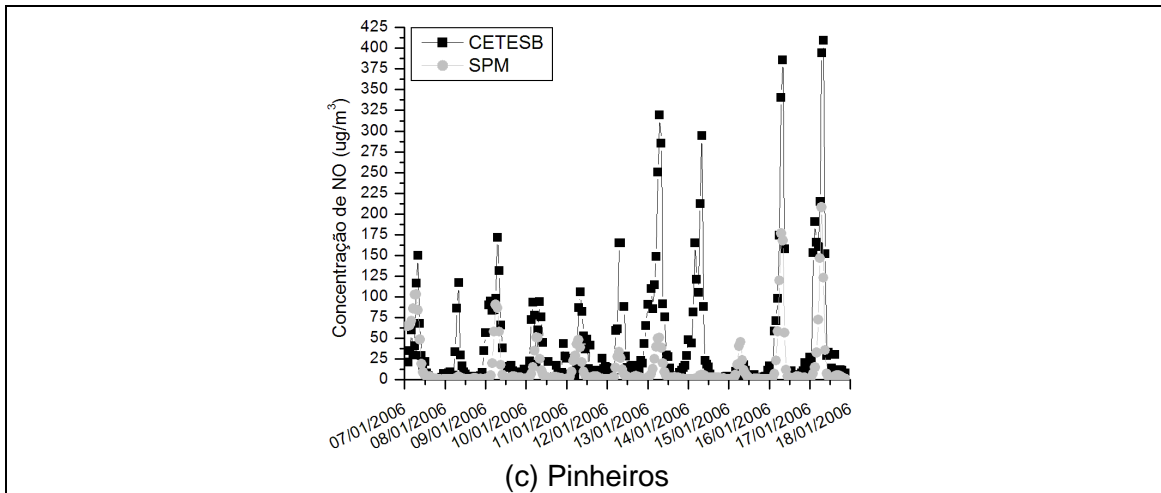
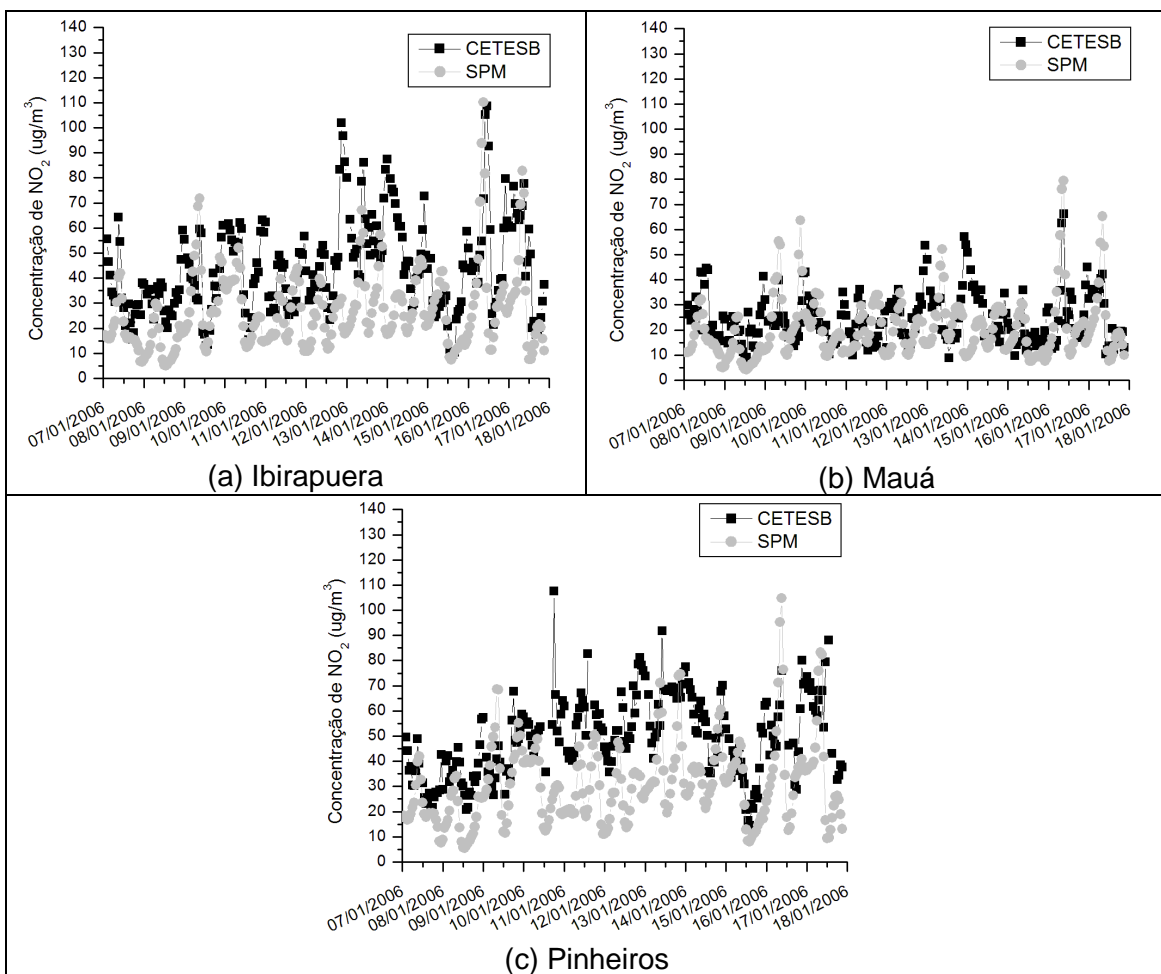


Figura 5-76: Continuação.

Figura 5-77: Comparação entre as concentrações de dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

O ciclo diário das concentrações de CO e a magnitude destas, em geral, não foram bem representados pelo modelo como pode ser observado na Figura 5-78. As concentrações de CO foram na maioria das vezes subestimadas pelo modelo,

principalmente, na estação de Osasco, localizada próxima a vias de tráfego intenso. Também é possível verificar que nos dias 16 e 17 de janeiro, o modelo superestimou o pico diurno das concentrações, principalmente, nas estações Centro e Ibirapuera.

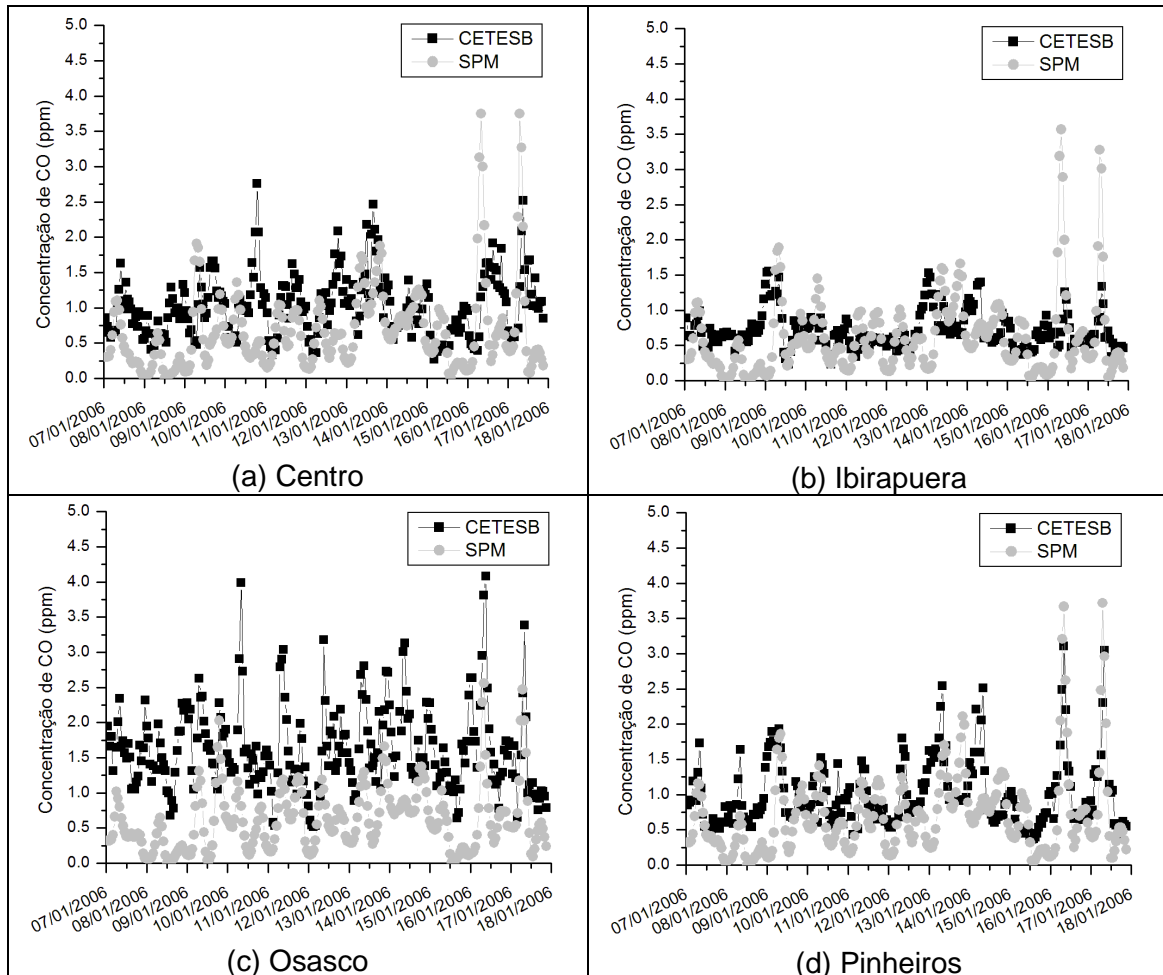


Figura 5-78: Comparação entre as concentrações de monóxido de carbono (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações registradas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

Os índices de correlação linear de Pearson, obtidos para todas as estações consideradas, revelaram valores relativamente altos, entre 0,76 e 0,84 (Tabela 5-22).

As estações Nossa Senhora do Ó, Parque Dom Pedro, Pinheiros e Santana apresentaram valores do viés positivos, indicando que o modelo superestimou os resultados. A estação de Pinheiros, por exemplo, apresentou valores positivos em todos os períodos simulados. Em geral, valores positivos foram identificados em estações expostas a intensa atividade veicular, ou seja, em estações sujeitas a alterações no perfil de emissão dos poluentes primários por conta de variações na

intensidade do tráfego de veículos. Como o modelo não considera, por exemplo, um congestionamento por conta de um eventual acidente, ele minimiza a emissão de compostos como o monóxido de nitrogênio, importante para o consumo de moléculas de ozônio. Por isso, em geral, é provável que o modelo superestime as concentrações de ozônio registradas nestas estações.

Comparando os desvios padrão das observações com os dos resultados simulados pelo SPM-BRAMS, é possível verificar que, em todas as estações, foi verificada uma boa concordância. Dessa forma, o primeiro critério para obtenção do *skill* da simulação foi satisfeito. A partir do RMSE e do $RMSE_{UB}$ foi possível avaliar o segundo e o terceiro critério. Os resultados do modelo estiveram de acordo em todas as estações.

O índice de concordância (*d*) revelou valores superiores a 0,84 para todas as estações analisadas, indicando novamente grande concordância entre os valores simulados e as observações.

Tabela 5-22: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados disponíveis no período de 07 a 17 de janeiro de 2006.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	$RMSE_{UB}$	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Diadema	0,76	33,37	-12,74	0,84	30,84	46,52	40,99
Ibirapuera	0,81	32,04	-0,13	0,89	32,03	54,62	47,22
Mauá	0,79	28,83	-3,10	0,88	28,66	45,13	42,30
Moóca	0,82	31,51	-5,55	0,90	31,01	54,22	48,99
N.Sra do Ó	0,81	29,67	9,72	0,88	28,04	43,14	46,67
Parque Dom Pedro	0,76	33,86	3,38	0,86	33,70	48,04	48,67
Pinheiros	0,81	32,70	15,73	0,87	28,66	42,46	48,11
Santo André	0,76	27,92	-2,96	0,86	27,77	39,05	40,68
Santana	0,84	26,12	2,50	0,91	26,00	45,63	46,69
São Caetano do Sul	0,79	31,85	-7,74	0,88	30,89	49,12	45,39
Santo Amaro	0,79	34,59	-13,67	0,86	31,78	51,26	44,00

Em geral, o modelo subestimou os resultados de temperatura em todas as estações. A amplitude do ciclo diurno da temperatura foi menor do que a registrada pela rede de monitoramento da CETESB, como pode ser observado na Figura 5-79. Os valores de umidade relativa do ar também não foram bem simulados pelo modelo durante o período considerado. As localidades que apresentaram as maiores diferenças entre os resultados de umidade relativa simulados e as observações foram a localizada no Parque do Ibirapuera e a de São Caetano do Sul, como está ilustrado na Figura 5-80.

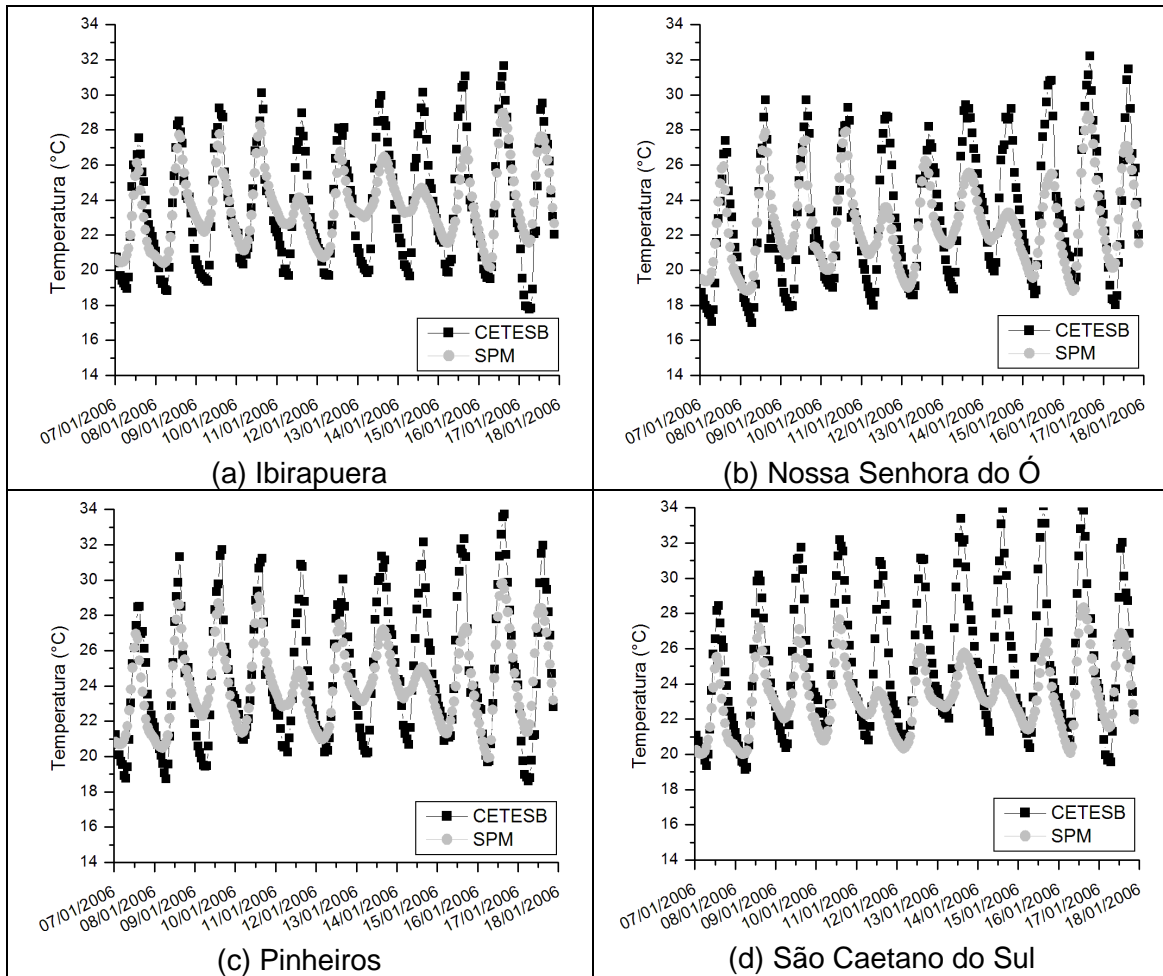


Figura 5-79: Comparação entre a temperatura do ar (°C) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

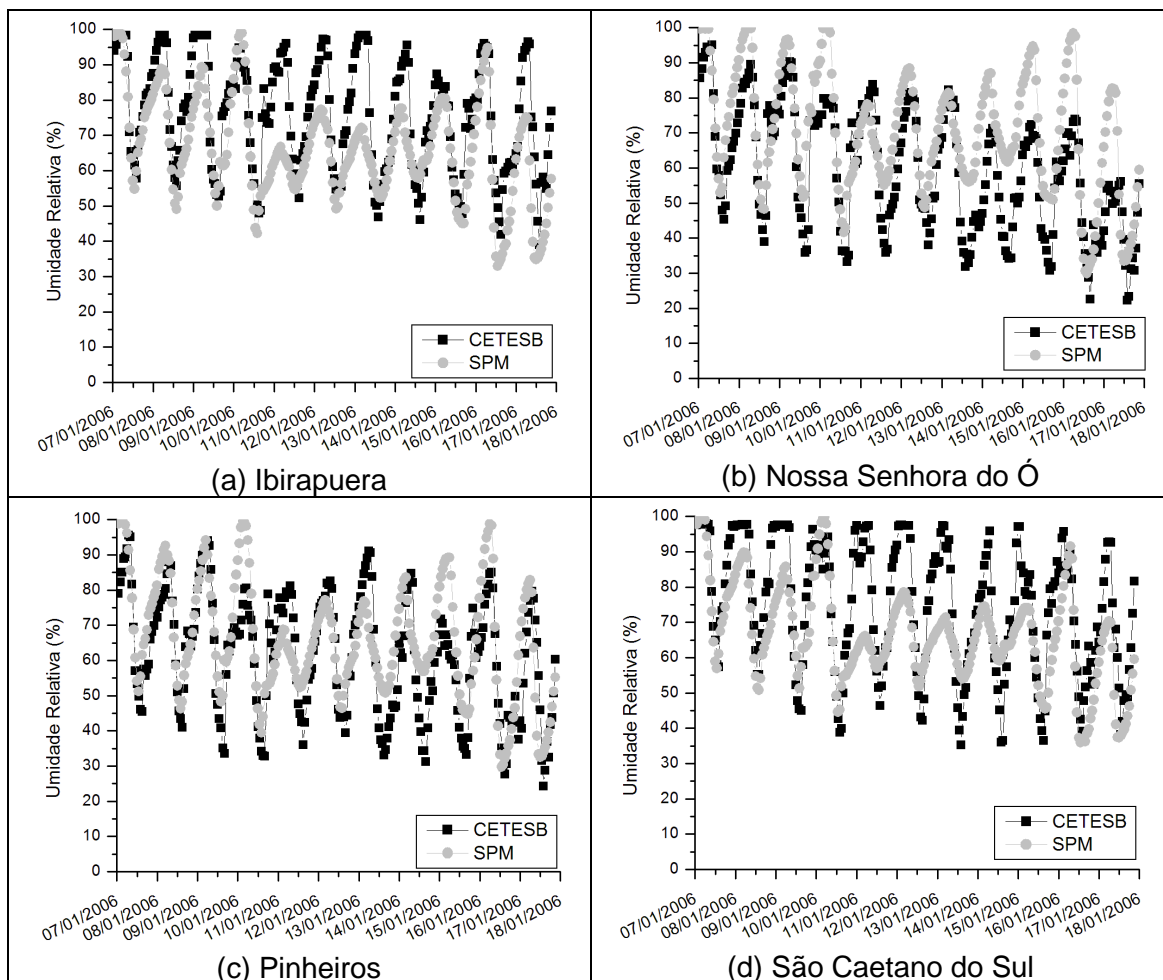


Figura 5-80: Comparação entre a umidade relativa do ar (°C) simulada pelo modelo SPM-BRAMS e as observadas pela rede de monitoramento da CETESB na RMSP.

Nas Tabelas 5-23 e 5-24 estão apresentados os índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados disponíveis de temperatura do ar e umidade relativa durante o período de interesse.

A correlação linear de Pearson para a temperatura do ar apresentou valores superiores a 0,80 em todas as estações. Os valores do índice de correlação para a umidade relativa foram superiores a 0,78.

Os valores do viés indicaram que o modelo subestimou a temperatura do ar medida em todas as estações de monitoramento consideradas. Para a umidade relativa, os resultados variaram com valores positivos para as estações Nossa Senhora do Ó e Pinheiros e negativos para Ibirapuera e São Caetano do Sul.

Diferenças percentuais acima de 30% foram obtidas entre o σ_{obs} e o σ_{sim} para todas as estações no caso da temperatura do ar. Para a umidade relativa do ar, os valores dos desvios padrão das observações e da simulação foram mais próximos. O segundo e o terceiro critério para a obtenção do *skill* de uma simulação foram satisfeitos para ambos os parâmetros na maior parte as estações consideradas, exceto na estação São Caetano do Sul, segundo o terceiro critério de avaliação no caso da temperatura do ar).

O índice de concordância revelou valores superiores a 0,8 para todas as estações e para ambos os parâmetros.

Tabela 5-23: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados disponíveis no período de 07 a 18 de janeiro de 2006.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Ibirapuera	0,86	1,94	-0,07	0,86	1,94	3,37	2,03
Nossa Sra do Ó	0,86	2,20	-0,55	0,87	2,13	3,80	2,41
Pinheiros	0,87	2,17	-0,57	0,87	2,09	3,77	2,28
São Caetano do Sul	0,86	3,05	-1,92	0,76	2,37	3,85	1,96

Tabela 5-24: Índices estatísticos calculados para todas as estações da CETESB com dados disponíveis no período de 07 a 18 de janeiro de 2006.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Ibirapuera	0,81	13,47	-9,59	0,82	9,46	16,00	14,62
Nossa Sra do Ó	0,82	14,95	10,72	0,83	10,41	17,60	17,41
Pinheiros	0,78	11,99	11,19	0,86	10,59	17,14	16,54
São Caetano do Sul	0,79	14,08	-8,37	0,82	11,33	18,50	14,10

6. Resultados das simulações realizadas para a RMRJ

6.1. Período entre 30 de outubro e 01 de novembro de 2006

6.1.1. Impacto de fontes fixas e móveis nas concentrações de poluentes

Para a avaliação do impacto das emissões de fontes fixas e móveis nas concentrações de poluentes simuladas pelo modelo SPM-BRAMS foi considerado o período de 30 de outubro até 01 de novembro de 2006. Vale ressaltar que as análises apresentadas neste item enfocam não somente o desempenho do modelo em simular as concentrações de ozônio e de seus precursores, mas também as diferenças obtidas entre os resultados das simulações considerando apenas as emissões veiculares, apenas as emissões industriais e ambas as emissões.

Conforme o esperado e em concordância com o discutido na seção 2.3, as diferenças das concentrações de CO simuladas pelo modelo considerando ambos os tipos de fontes de emissão (móveis e fixas) e apenas a contribuição das emissões veiculares foi praticamente nula. Os resultados considerando apenas as fontes fixas apresentaram pequenos núcleos (sobre áreas industriais) cujos valores ficaram bem abaixo dos produzidos pela simulação considerando as emissões veiculares. Em geral, no caso da simulação das emissões veiculares, apenas um núcleo de altas concentrações, centrado na RMRJ, foi verificado, principalmente, durante a manhã e o final da noite (picos associados com a intensificação do tráfego veicular). Exemplos do impacto, na distribuição espacial das concentrações de CO, considerando apenas as emissões industriais e apenas as emissões veiculares podem ser observados na Figura 6-1. Foram escolhidos para ilustração, horários que apresentaram o maior impacto em termos de concentração do poluente em questão.

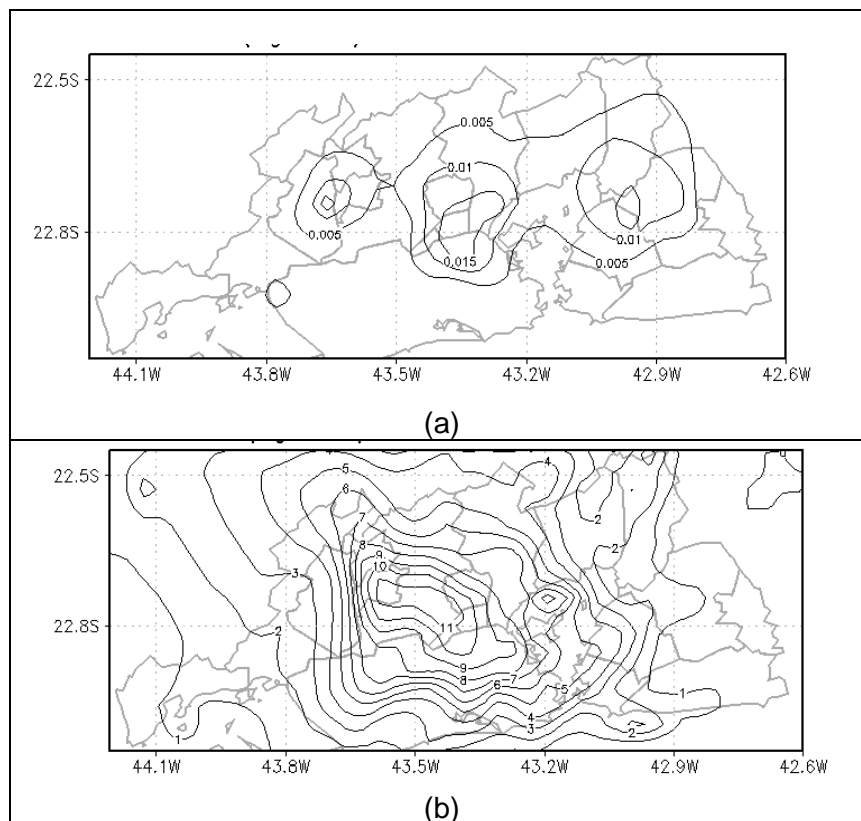


Figura 6-1: Concentrações de Monóxido de Carbono (ppm) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para o dia 31 de outubro de 2006 (a) às 08 Z (considerando apenas emissões industriais) e (b) às 19 Z (considerando apenas emissões veiculares).

No caso das concentrações dos óxidos de nitrogênio, diferenças significativas foram verificadas entre as simulações considerando todas as fontes inventariadas para a RMRJ e apenas as emissões provenientes de fontes industriais, principalmente, no que se refere às concentrações de NO (observar *Figura 6-2*). Assim como no caso da figura anterior, foram representados nesta, os horários que apresentaram o maior impacto em termos de concentração dos óxidos de nitrogênio. As diferenças, superiores a $100 \mu\text{g.m}^{-3}$, foram mais intensas entre o final da noite e o início da manhã, até o momento em que o tráfego veicular passa a se intensificar na região. É importante destacar que as principais diferenças foram encontradas na Bacia Aérea I, que possui centrais de geração termoelétrica, e na região da Bacia Aérea III onde se encontra o Complexo Petroquímico Duque de Caxias. Em relação às concentrações de NO_2 , apenas um núcleo com maiores concentrações sobre a região do Complexo Petroquímico Duque de Caxias foi verificado durante alguns horários da simulação considerando apenas as fontes fixas. Esse comportamento também foi identificado no que se refere às concentrações dos compostos orgânicos voláteis.

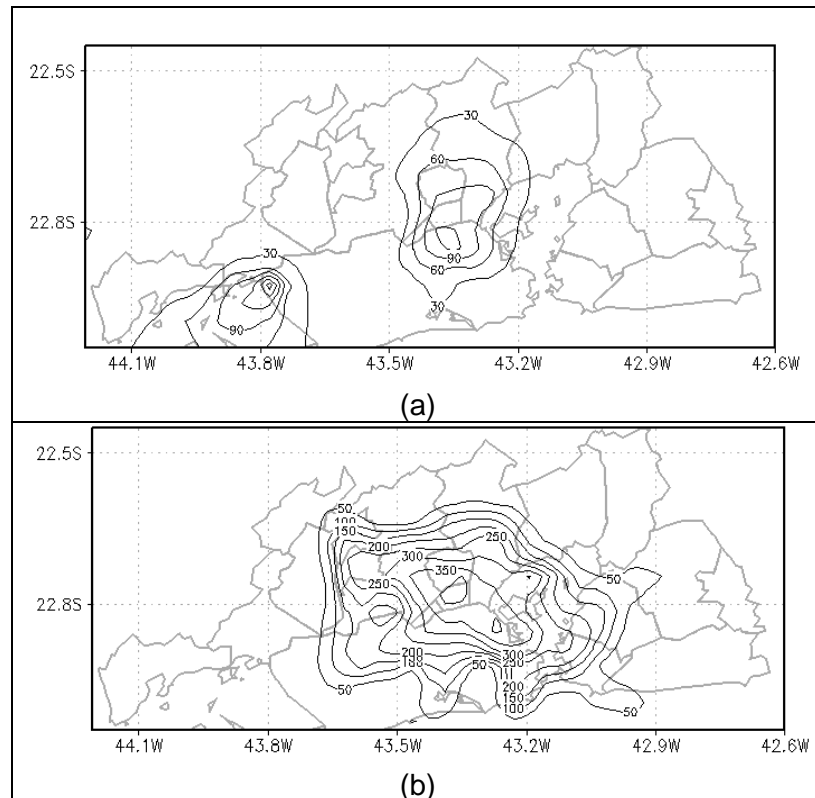


Figura 6-2: Concentrações de Monóxido de Nitrogênio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para o dia 30 de outubro de 2006 (a) às 10 Z (considerando apenas emissões industriais) e (b) às 21 Z (considerando apenas emissões veiculares).

Em concordância com os resultados do inventário de emissões, o maior impacto na qualidade do ar, considerando apenas a contribuição das fontes fixas foi verificado para as concentrações de dióxido de enxofre e material particulado, como pode ser visto na Figura 6-3. Para ambos os poluentes, dois núcleos centrados na região do Pólo Petroquímico de Duque de Caxias e na região de Santa Cruz foram identificados. No caso do SO_2 , os maiores valores foram simulados para a região da baixada fluminense (provavelmente, associado com as emissões da refinaria) e, no caso do $\text{PM}_{2.5}$, na região da Bacia Aérea I, próximo a Santa Cruz e Itaguaí.

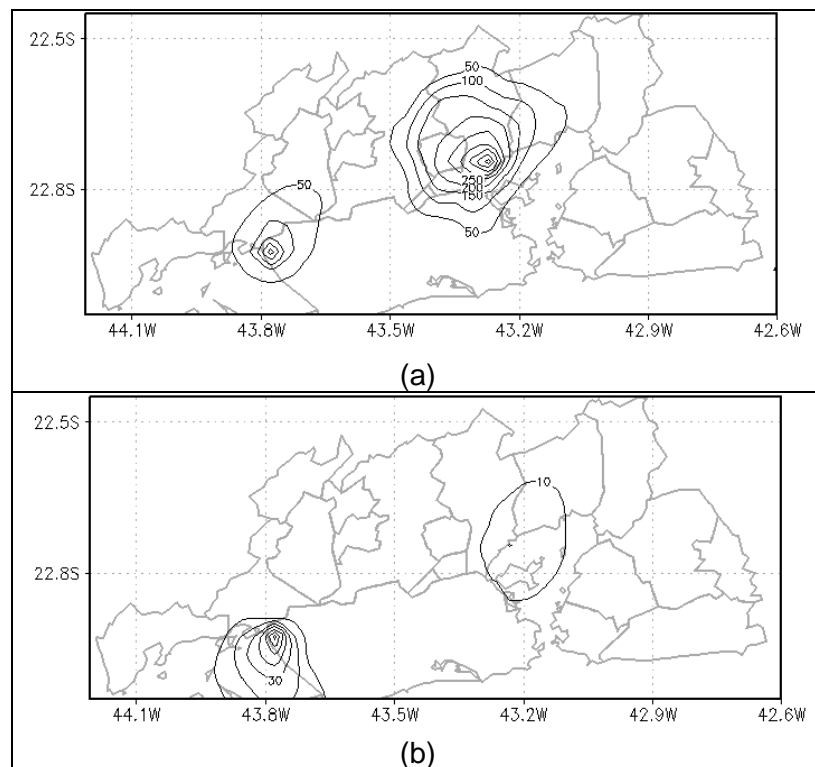


Figura 6-3: Concentrações (a) de Dióxido de Enxofre ($\mu\text{g.m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para o dia 31 de outubro de 2006 às 10 Z e (b) de Material Particulado fino ($\mu\text{g.m}^{-3}$) para o dia 01 de novembro de 2006 às 05 Z (ambas considerando apenas emissões industriais).

Em relação ao ozônio, as concentrações geradas na simulação considerando apenas as emissões industriais não foram muito significativas. Em geral, os maiores valores ficaram em torno de 20 a 30 $\mu\text{g.m}^{-3}$. Esse perfil possivelmente está associado com a baixa razão NO_2/NO encontrada na região quando apenas as fontes fixas são consideradas. O perfil muda substancialmente quando as fontes móveis são consideradas. Mesmo quando não se considera a contribuição das fontes fixas, valores de concentração superiores ao PNQA são verificados em diversas áreas da região metropolitana, com destaque para a região da Baixada Fluminense que, realmente, de acordo com o INEA, registra frequentemente violações ao padrão em questão. Exemplos da distribuição das concentrações de ozônio sobre a RMRJ considerando apenas as emissões industriais e apenas as emissões veiculares são apresentados na Figura 6-4.

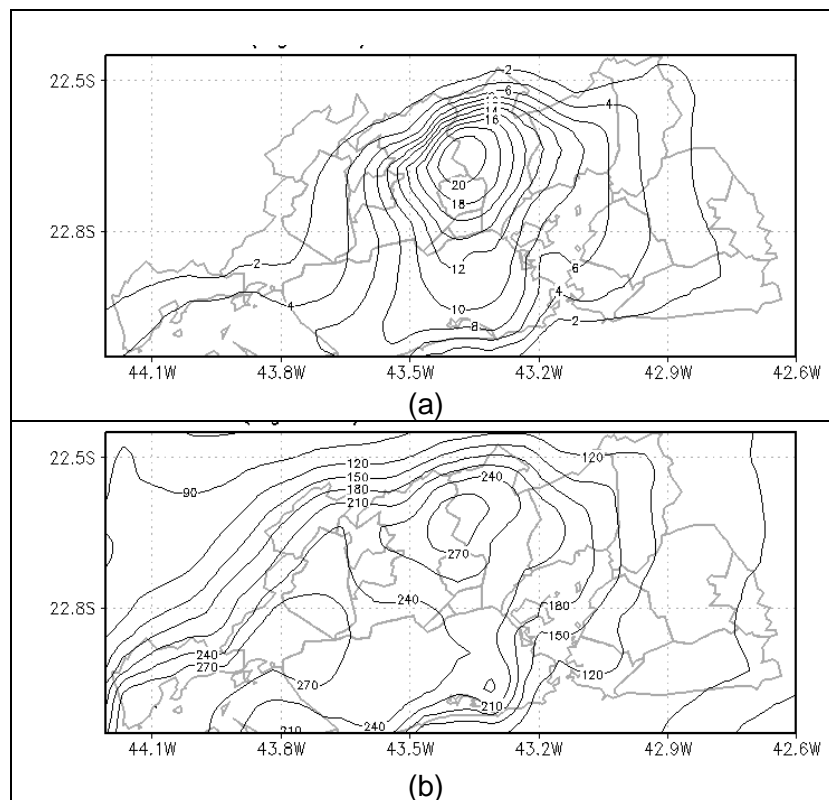


Figura 6-4: Concentrações de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para o dia 30 de outubro de 2006 (a) às 14 Z (considerando apenas emissões industriais) e (b) às 16 Z (considerando apenas emissões veiculares).

6.1.2. Avaliação dos resultados da simulação considerando todas as fontes inventariadas na RMRJ

6.1.2.1 Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar

Entre os dias 30 de outubro e 01 de novembro de 2006, de acordo com os dados do METAR registrados nos aeroportos Santos Dummont e Tom Jobim (Galeão), predominaram condições de céu-claro ou pouca nebulosidade, altos valores de temperatura do ar (mínima de 21 °C e máxima de 35 °C), baixos índices de umidade relativa, principalmente, durante a tarde, e ventos muito fracos sendo observados entre o final da noite e o início da tarde. Essas condições são favoráveis ao processo de formação de moléculas de ozônio.

Os resultados do modelo revelaram para o período condições similares as observadas. Valores de temperatura do ar acima dos 30 °C e de umidade relativa abaixo dos 50% foram verificados nos 3 dias de simulação durante parte da tarde. A ocorrência de ventos fracos entre o final da noite e o início da manhã também foi

simulada pelo BRAMS. O modelo indicou a presença de nebulosidade e precipitação durante a noite dos dias 31 de outubro e 01 de novembro em parte do domínio. Baixos valores da altura da camada de mistura foram predominantemente verificados pelo modelo (exceto para o período entre o final da manhã e início da tarde quando os valores alternaram entre 1200 e 2000 metros na maior parte da grade). Aspectos como a topografia acidentada da região, a proximidade com o oceano e a presença da baía de Guanabara parecem influenciar significativamente a configuração do campo de vento simulado pelo modelo BRAMS.

No dia 30 de outubro de 2006, condições de ventos fracos foram simuladas para o período da madrugada e manhã. Durante a manhã, principalmente entre 9 e 12 Z, altas concentrações de NO_x foram identificadas em grande parte da RMRJ (Figura 6-5). Somente a partir das 18 Z a pluma volta a se intensificar. No período noturno, ventos mais intensos atuam no transporte da pluma para noroeste. As concentrações de ozônio começam a aumentar por volta de 12 Z, primeiramente, nas bordas da região. Até as 15 Z, concentrações muito baixas são simuladas para o centro da grade. Entre 15 e 20 Z, violações ao PNQA são verificadas em toda a parte da região à esquerda da Baía de Guanabara. Também é possível observar o transporte para noroeste, provavelmente em virtude da entrada da brisa marítima (Figura 6-6). Contudo, analisando apenas esses resultados, não é possível isolar o papel da brisa marítima na região.

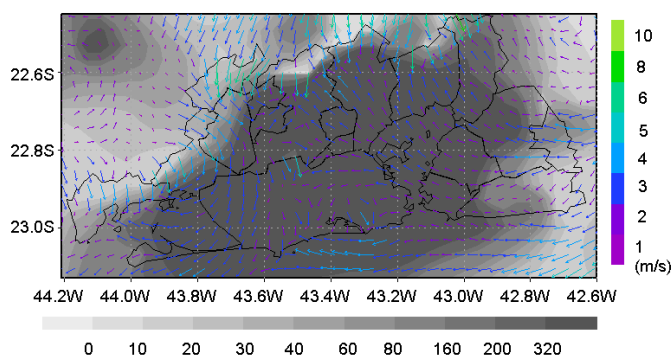


Figura 6-5: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 30 de outubro de 2006 às 10 Z.

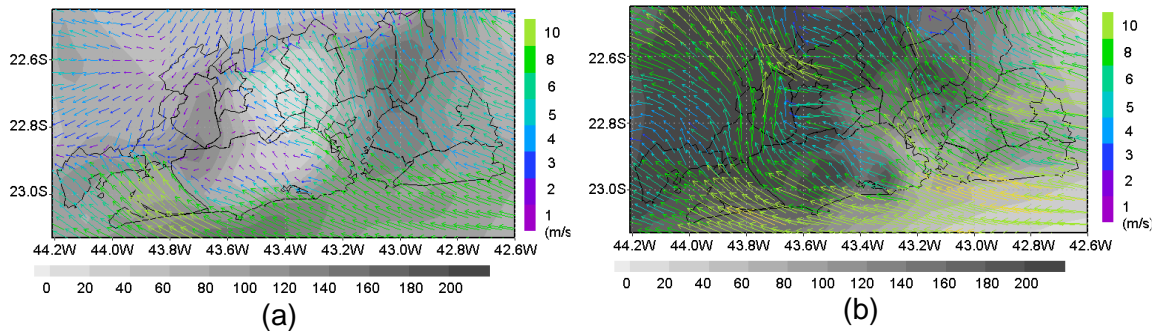


Figura 6-6: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 30 de outubro de 2006 às (a) 14 Z; e (b) 18 Z.

No dia 31 de outubro de 2006, durante toda a madrugada e início da manhã, foram verificados ventos fracos sobre toda a RMRJ. Altas concentrações de NO_x foram simuladas pelo modelo durante parte da manhã. Durante o período noturno, a pluma de NO_x simulada apresentou-se menos intensa. À tarde, altas concentrações de ozônio são observadas no lado esquerdo da Baía de Guanabara, como pode ser observado na Figura 6-7. Violações ao PNQA foram simuladas pelo modelo SPM-BRAMS, em parte da RMRJ, a partir do meio dia, durante toda a tarde. Assim como no dia 30 de outubro, o transporte de ozônio para noroeste da região pode ser verificado entre o final da tarde e início da noite.

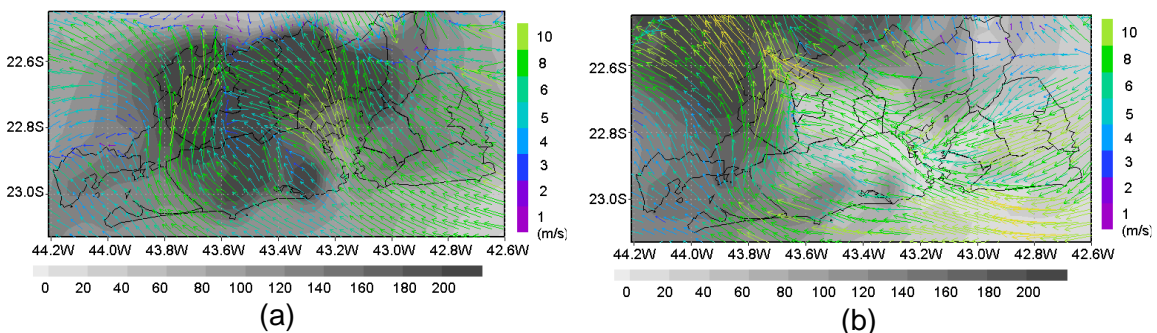


Figura 6-7: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 31 de outubro de 2006 às (a) 17 Z; e (b) 20 Z.

Durante o último dia simulado, os ventos fortes verificados pela manhã influenciam na forma e na extensão da pluma com maiores concentrações de NO_x . No período noturno, nesse dia, foram verificados valores mais elevados do que durante a manhã. É verificado o transporte para noroeste entre o final da tarde e início da noite a partir da atuação da brisa marítima. Os valores de concentração e a extensão da pluma com maiores concentrações de ozônio são menores no dia 01 de novembro (concordando com os resultados registrados pelas estações de monitoramento alocadas na região).

Nesse dia, conforme o verificado na Figura 6-8, a pluma esteve localizada mais próxima da linha costeira. Esse foi o único dia em que a pluma com maiores concentrações atingiu também os municípios de São Gonçalo e Niterói (localizados na Bacia Aérea IV, à direita da Baía de Guanabara).

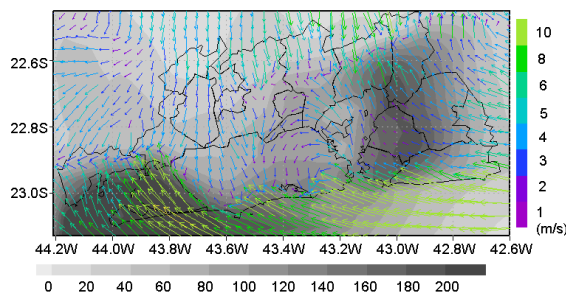


Figura 6-8: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 01 de novembro de 2006 às 15 Z.

6.1.2.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados monitorados na região

Apenas três estações de monitoramento na RMRJ apresentaram dados de concentração de ozônio válidos para o período considerado. É importante salientar que essas estações estão localizadas na Baixada Fluminense, no entorno do Pólo Petroquímico de Duque de Caxias. A pequena disponibilidade de dados dificulta a avaliação do desempenho do modelo em simular as concentrações de ozônio para a região como um todo, uma vez que as estações com dados válidos são localizadas numa área pequena (distam menos de 5 km uma da outra).

A comparação das concentrações de ozônio simuladas pelo modelo para o período de interesse e monitoradas pelo INEA na região pode ser observada na Figura 6-9. Através desta, é possível observar que o modelo teve dificuldades em representar o ciclo diurno das concentrações de ozônio. As máximas concentrações do poluente foram superestimadas na estação Campos Elíseos, durante os três dias do período, e nas estações Cidade dos Meninos e Jardim Primavera, no primeiro dia (30 de outubro de 2006). Nos dois últimos dias da simulação, o modelo para estas estações apresentou resultados de concentração máxima de ozônio próximos aos registrados pela rede de monitoramento. Vale também destacar que o modelo não conseguiu simular a ocorrência de diversos picos de concentração noturna de ozônio registrados nessas estações. Em geral, as concentrações de ozônio geradas pelo SPM-BRAMS

caíram significativamente durante a noite, provavelmente, por conta dos altos valores de NO simulados pelo modelo.

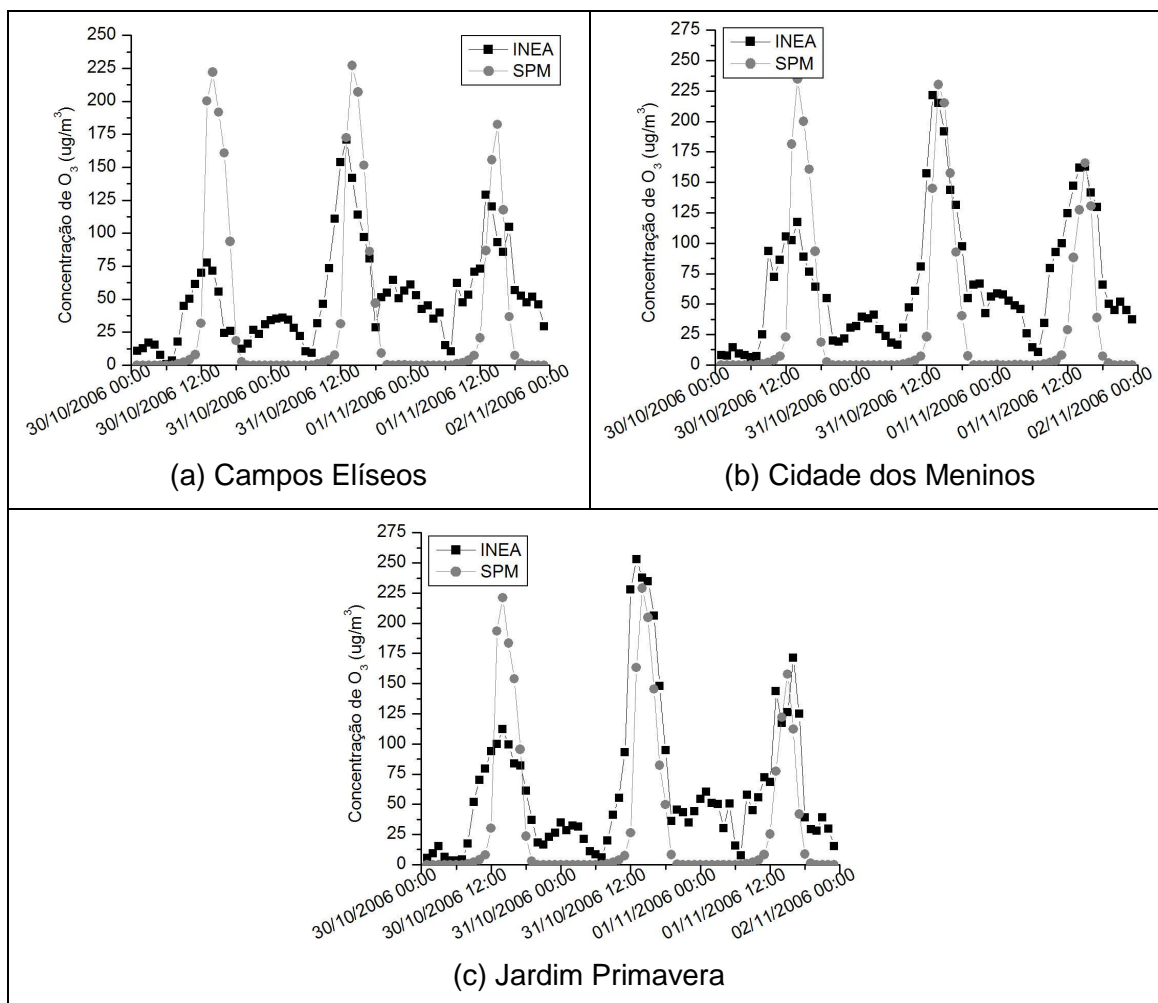


Figura 6-9: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações realizadas pela rede de monitoramento do INEA na RMRJ.

Na *Tabela 6-1* encontram-se apresentados os resultados obtidos a partir da utilização de métodos estatísticos para a comparação entre as concentrações de O_3 simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e os dados obtidos a partir da rede de monitoramento do INEA para o período entre 30 de outubro e 01 de novembro de 2006. O índice de correlação linear de Pearson (R) variando entre 0,59, em Campos Elíseos, e 0,77, na estação Jardim Primavera.

O viés indicou que o modelo subestimou as concentrações de ozônio nos pontos com dados disponíveis. O primeiro critério para se obter *skill* em uma simulação indicou que a média das diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} foi pequena (inferior a 10%) na

estação Jardim Primavera. Em todas as estações foram verificados altos valores do *RMSE*, indicando, conforme exposto anteriormente, uma diferença entre os valores simulados e os observados a cada hora. O cálculo do *RMSE* possibilitou a avaliação do segundo critério para a obtenção do *skill* da simulação. Novamente, apenas a estação Jardim Primavera satisfaz este critério e apenas a estação Campos Elíseos apresentou valor do $RMSE_{UB}$ superiores ao desvio da observação, não atendendo o 3º critério para obtenção do *skill*, conforme Pielke (2002).

O índice de concordância (*d*) revelou resultados variando entre 0,68 e 0,82, nas estações de Campos Elíseos e Jardim Primavera, respectivamente.

Tabela 6-1: Índices estatísticos calculados para todas as estações do INEA com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	$RMSE_{UB}$	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Campos Elíseos	0,59	56,49	-16,43	0,68	54,05	36,87	67,28
Cidade dos Meninos	0,74	55,01	-32,64	0,79	44,28	52,07	66,52
Jardim Primavera	0,77	51,50	-29,41	0,82	42,27	60,39	63,94

Comparando os resultados obtidos com a simulação e os observados em estações alocadas na RMRJ (Figura 6-10) é possível verificar que o modelo, em geral, representou de forma coerente o ciclo diurno da temperatura do ar. Os valores da temperatura máxima foram, em geral, superestimados na estação Jardim Primavera e no Aeroporto Campo dos Afonsos. Nos demais aeroportos cujos dados foram utilizados, o modelo representou bem a amplitude da variação diurna da temperatura e os valores máximos deste parâmetro.

A comparação dos dados de umidade relativa do ar observados em estações na RMRJ e os simulados pelo modelo para estas localidades é apresentada na Figura 6-11. Em geral, assim como para a temperatura do ar, o modelo representou bem o ciclo diurno da variável. Para a estação Jardim Primavera o modelo superestimou os resultados de UR máxima durante a noite dos dias 30 e 31 enquanto que, para a estação Nova Iguaçu, o modelo subestimou os valores máximos, principalmente, na madrugada desses mesmos dias. É importante destacar que o modelo representou de maneira satisfatória a tendência de aumento da temperatura observada no período simulado.

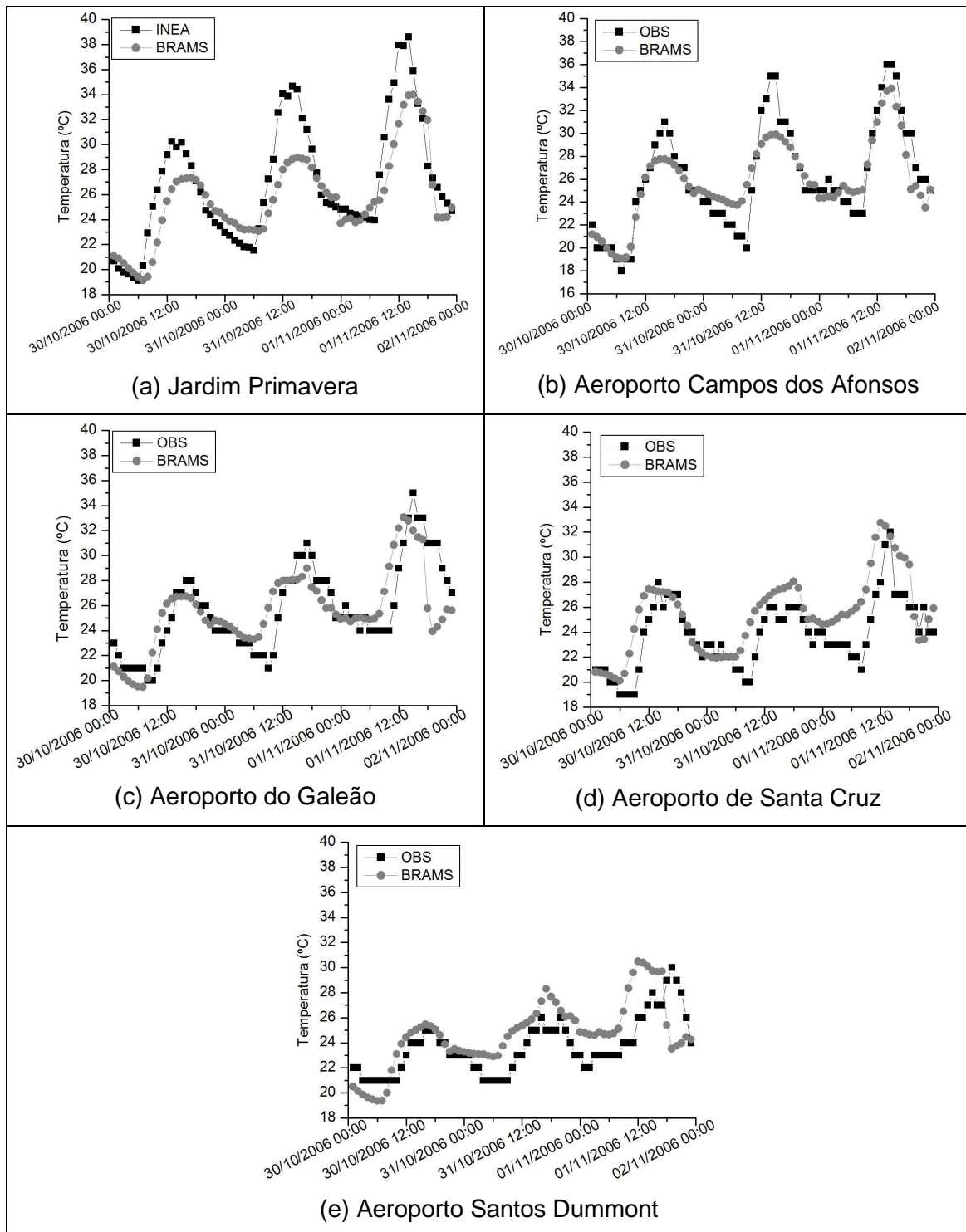


Figura 6-10: Comparação entre os valores de temperatura do ar simulados pelo modelo BRAMS e observações realizadas na RMRJ.

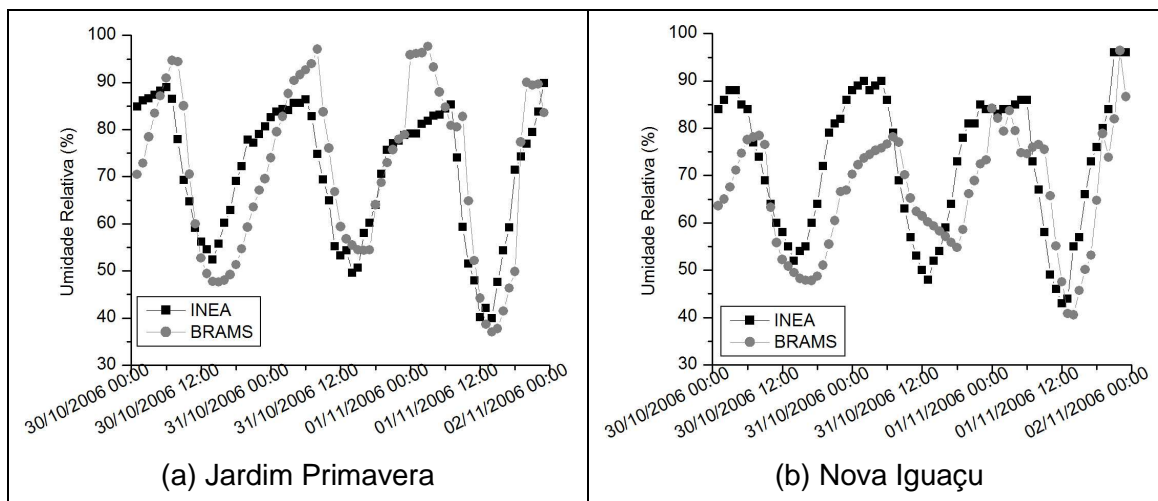


Figura 6-11: Comparação entre os valores de umidade relativa do ar simulada pelo modelo BRAMS e obtidos das observações realizadas na RMRJ.

Como pode ser observado nas Tabelas 6-2 e 6-3, os valores do índice de correlação de Pearson calculados indicaram resultados para a temperatura do ar e para a umidade relativa, em geral, superiores aos verificados com a análise estatística realizada considerando as concentrações de ozônio. Os valores encontrados, no caso da temperatura do ar, variaram entre 0,68, para o Aeroporto Santos Dummont, e 0,93, para o Aeroporto Campo dos Afonsos. Para a UR, os valores foram de 0,72, para a estação Nova Iguaçu, e 0,81, para a estação Jardim Primavera (localizada no Município de Duque de Caxias).

Em relação à temperatura do ar, o viés apresentou valores baixos, próximos a zero, nos aeroportos do Galeão e Campos dos Afonsos. Os resultados também indicaram que o modelo subestimou a temperatura do ar, principalmente, na estação Jardim Primavera e superestimou nos pontos referentes aos aeroportos de Santa Cruz e Santos Dummont (ambos localizados próximos ao litoral). No caso da umidade relativa, é possível destacar o valor encontrado para a estação Nova Iguaçu onde o modelo subestimou os valores observados.

Apenas as estações Jardim Primavera, para ambos os parâmetros, e Campos dos Afonsos, apenas para a temperatura do ar, apresentaram diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} mais elevadas. As demais estações atenderam ao critério para obtenção do skill de uma simulação. Com relação à temperatura do ar, o segundo critério não foi atendido apenas para o Aeroporto Santos Dummont enquanto que o terceiro foi atingido para todas as estações.

Os valores do índice de concordância (d) para a temperatura do ar foram relativamente altos, variando entre 0,74 e 0,84, para os Aeroportos Santos Dummont e Campo dos Afonsos, respectivamente. Para a UR, foram encontrados valores de 0,79, para a estação Nova Iguaçu, e 0,88, para a estação Jardim Primavera.

Tabela 6-2: Índices estatísticos calculados com dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) observados na RMRJ no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Jardim Primavera	0,88	2,74	-1,32	0,89	2,40	4,86	3,51
Campo dos Afonsos	0,93	1,90	-0,34	0,94	1,87	4,53	3,34
Galeão	0,76	2,33	-0,10	0,87	2,32	3,55	3,07
Santa Cruz	0,81	2,38	1,56	0,83	1,80	2,72	3,04
Santos Dummont	0,63	2,36	1,03	0,74	2,12	2,21	2,67

Tabela 6-3: Índices estatísticos calculados com dados de umidade relativa do ar ($^{\circ}\text{C}$) observados na RMRJ no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Jardim Primavera	0,81	10,40	0,56	0,88	10,39	13,98	17,85
Nova Iguaçu	0,72	12,17	-6,41	0,79	10,34	14,82	12,33

6.2. Avaliação dos episódios de concentração de ozônio

6.2.1. Período entre 01 e 10 de setembro de 2004

6.2.1.1. Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar

Em geral, durante o período de interesse, foram registradas condições com pouca ou nenhuma nebulosidade e temperaturas elevadas durante o dia. Segundo o CPTEC (CPTEC/INPE, 2004), neste período, apenas um sistema frontal atingiu a região (no dia 03 de setembro). Os dados obtidos nos aeroportos Santos Dummont e Galeão, exceto para alguns períodos, também indicaram o aumento e a presença de nebulosidade a partir do final da tarde do dia 03, no dia 04 e em parte do dia 05. Não foi registrada ocorrência de precipitação durante todo o período, concordando com resultados disponibilizados pela Fundação GEORIO (GEORIO, 2010). Nos demais dias, houve predomínio de condições de céu-claro ou com pouca nebulosidade. Estas condições foram, em geral, bem representadas pelo modelo.

No dia 01 de setembro, as temperaturas máximas simuladas pelo BRAMS variaram entre 24 e 28 $^{\circ}\text{C}$ em boa parte da RMRJ. Essas condições estiveram de acordo com

as observações conforme será discutido e apresentado no item 6.2.1.2. Durante a manhã, a pluma com maiores concentrações de NO_x manteve-se sobre praticamente toda a RMRJ, principalmente, sobre os municípios localizados a esquerda da Baía de Guanabara. No final da tarde e início da noite, associado com a atividade veicular, ocorre um aumento nas concentrações. Nesse período, a pluma com maiores concentrações de NO_x é transportada para noroeste com a intensificação dos ventos a partir do litoral. A evolução do campo de vento e das concentrações de NO_x simuladas pelo SPM para o período entre 01 de setembro de 2004 às 18 Z e 02 de setembro de 2004 às 02 Z pode ser observada através das Figuras 6-12 e 6-13.

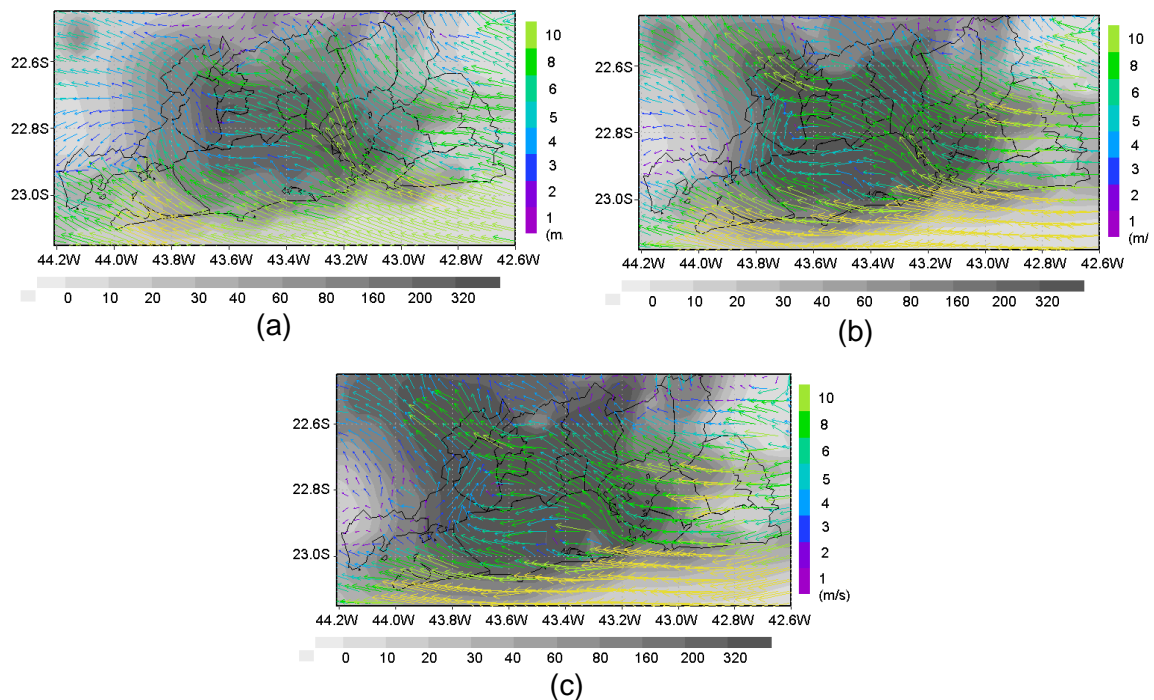


Figura 6-12: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 01 de setembro de 2004 às (a) 18 Z; (b) 20 Z; (c) 22 Z.

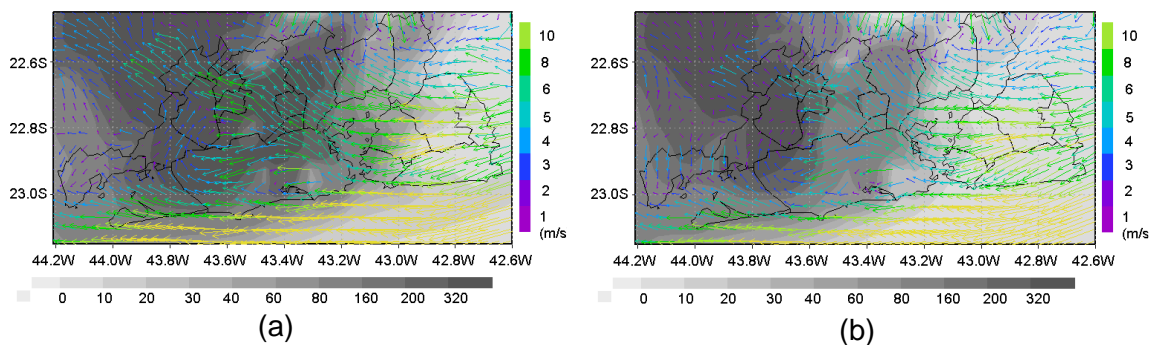


Figura 6-13: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às (a) 00 Z e (b) 02 Z.

Maiores valores de concentração de ozônio, no dia 01 de setembro, começaram a ser detectados a partir das 14 Z. Violações ao PNQA foram simuladas em parte do domínio entre 16 e 20 Z, principalmente, no litoral da Bacia Aérea I e norte - noroeste da RMRJ, como pode ser observado na Figura 6-14. Um núcleo com menores concentrações pode ser observado em parte da região central do domínio. Nessa região, os valores da razão NO_2/NO mantiveram-se mais baixas, superando a razão de 2 para 1 apenas no período entre 16 e 17 Z. Também foi verificado, assim como para o caso do NO_x , o transporte da pluma com maiores concentrações de O_3 para a região noroeste da grade a partir da intensificação dos ventos provenientes do litoral.

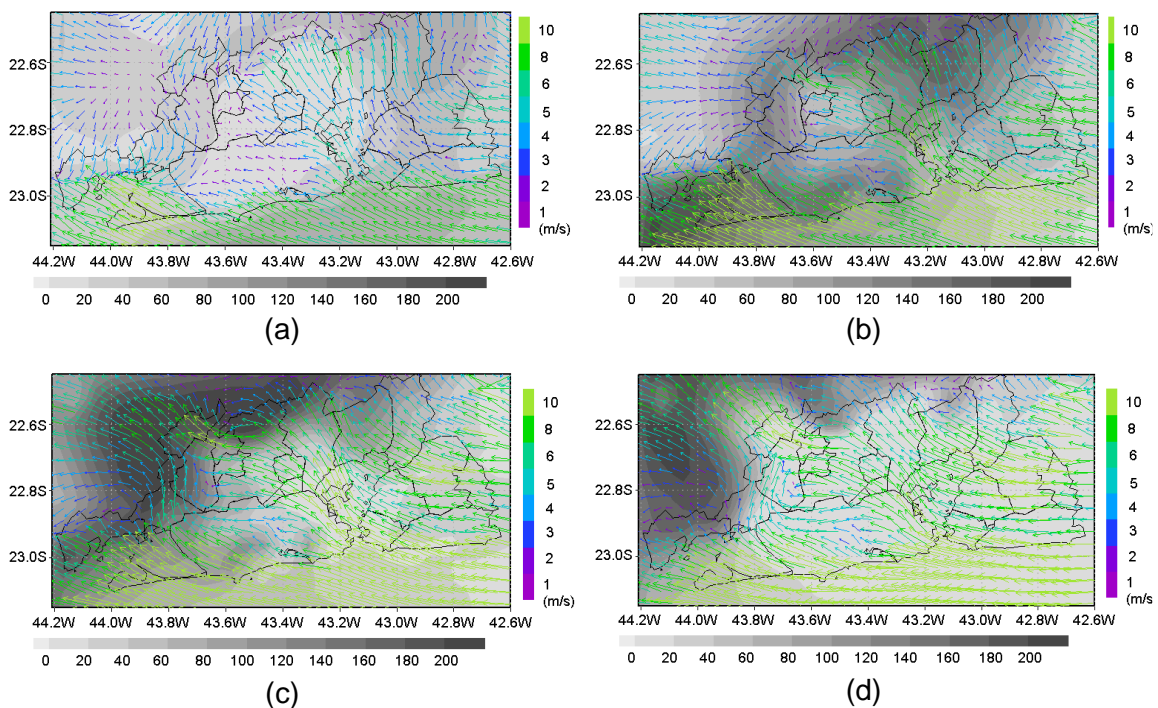


Figura 6-14: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 01 de setembro de 2004 às (a) 14 Z; (b) 16 Z; (c) 18 Z e (d) 20 Z.

Os maiores valores de temperatura do ar simulados pelo modelo foram superiores aos 30 °C em parte da região metropolitana durante a tarde do dia 02 de setembro. Os índices de umidade relativa do ar ficaram abaixo dos 40% na maior parte do domínio. Assim como para o dia 01, o modelo simulou condições de céu-claro concordando com as observações realizadas na região. Um núcleo com altas concentrações de NO_x é gerado pelo SPM-BRAMS durante a manhã e ocupa a maior parte da Bacia Aérea III e parte da Bacia Aérea IV. A delimitação do núcleo com maiores concentrações dos óxidos de nitrogênio segue a configuração do campo de vento durante este período (Figura 6-15). À noite, a pluma atinge valores bem elevados. Durante a madrugada, como pode ser observados através das Figuras 6-16 e 6-17, a

dispersão é dificultada por conta da ocorrência de ventos fracos que contribuem para a manutenção de altas concentrações na região. Provavelmente, em decorrência dos altos valores de concentrações de NO simulados pelo SPM-BRAMS, as concentrações de ozônio foram mais baixas do que no dia anterior. Núcleos com valores acima dos $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ foram verificados apenas no Município de Magé e no litoral do Município de Itaguaí às 18 Z, como ilustrado na Figura 6-18.

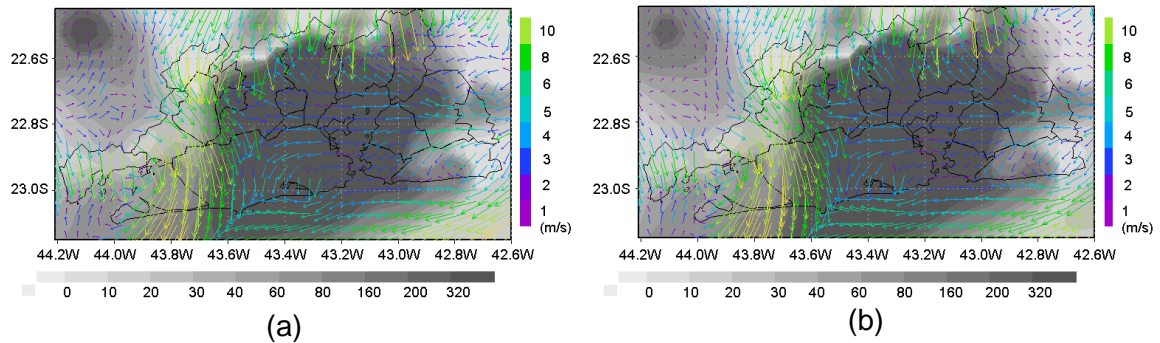


Figura 6-15: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às (a) 10 Z e (b) 11 Z.

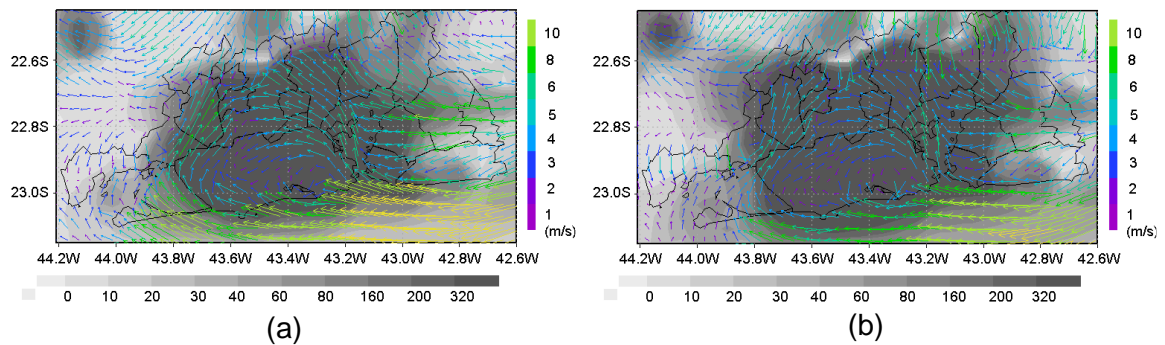


Figura 6-16: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às (a) 20 Z e (b) 22 Z.

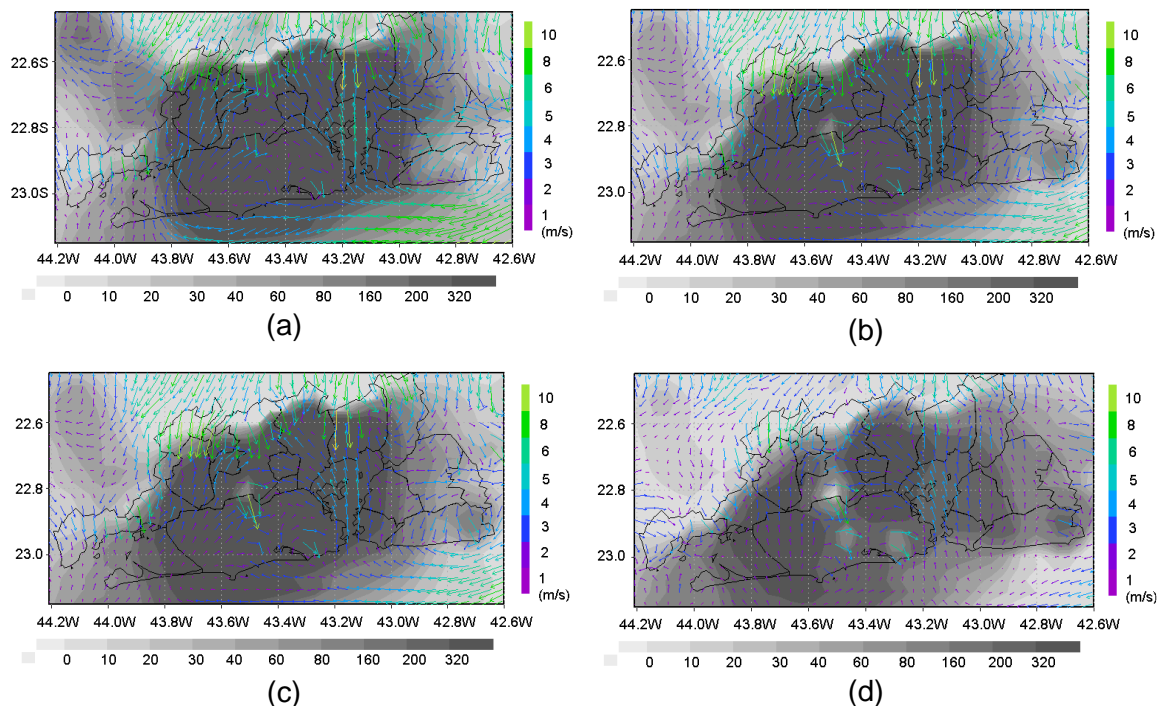


Figura 6-17: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 03 de setembro de 2004 às (a) 00 Z; (b) 02 Z; (c) 04 Z e (d) 06 Z.

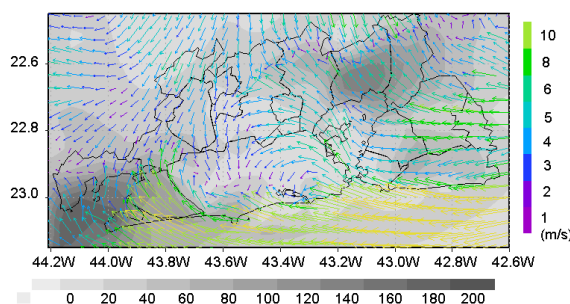


Figura 6-18: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 02 de setembro de 2004 às 18 Z.

No dia 03 de setembro de 2004, altas concentrações de O_3 foram simuladas, principalmente, no litoral, a partir das 15 Z, coincidindo com a região que apresentou os maiores valores da razão NO_2/NO (Figura 6-19). As máximas concentrações de NO_x foram identificadas as 10 Z e as 22 Z. Durante o final da tarde e início da noite, com a intensificação dos ventos do litoral pode ser observado o transporte para a região NNW do domínio, assim como o verificado para o dia 01 de setembro. Os valores de temperatura e umidade relativa durante a tarde variam entre 26 e 30 °C e 40 e 50%, respectivamente, na maior parte da RMRJ. Durante a noite do dia 03, o modelo simulou a presença de nuvens.

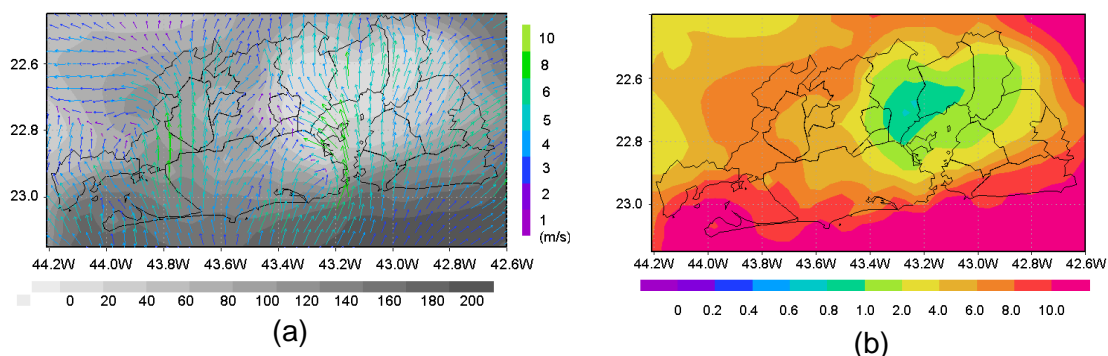


Figura 6-19: (a) Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) e (b) Razão NO_2/NO referente ao dia 03 de setembro de 2004 às 15 Z.

Associado a presença de nebulosidade, também verificada nos dias 04 e 05 de setembro de 2004, foi identificada uma diminuição na temperatura do ar. Em ambos os dias, a pluma de NO_x foi menos intensa. A extensão da pluma com maiores concentrações também foi menor. Nos dias 04 e 05, altos valores de ozônio foram verificados entre 14 e 20 Z. No dia 04 de setembro, as violações ao PNQA foram simuladas, principalmente, sobre os Municípios de Magé e Guapimirim, como pode ser observado na Figura 6-20. Vale ressaltar que ambos não possuem estações que realizam o monitoramento das concentrações de ozônio e de seus precursores em operação. O núcleo com concentrações acima do padrão estabelecido para o ozônio, no dia 05, começou sobre o centro do domínio e foi transportado para noroeste com a intensificação dos ventos provenientes do litoral durante a tarde (Figura 6-21).

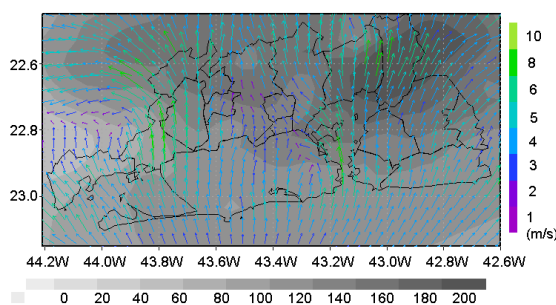


Figura 6-20: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 04 de setembro de 2004 às 14 Z.

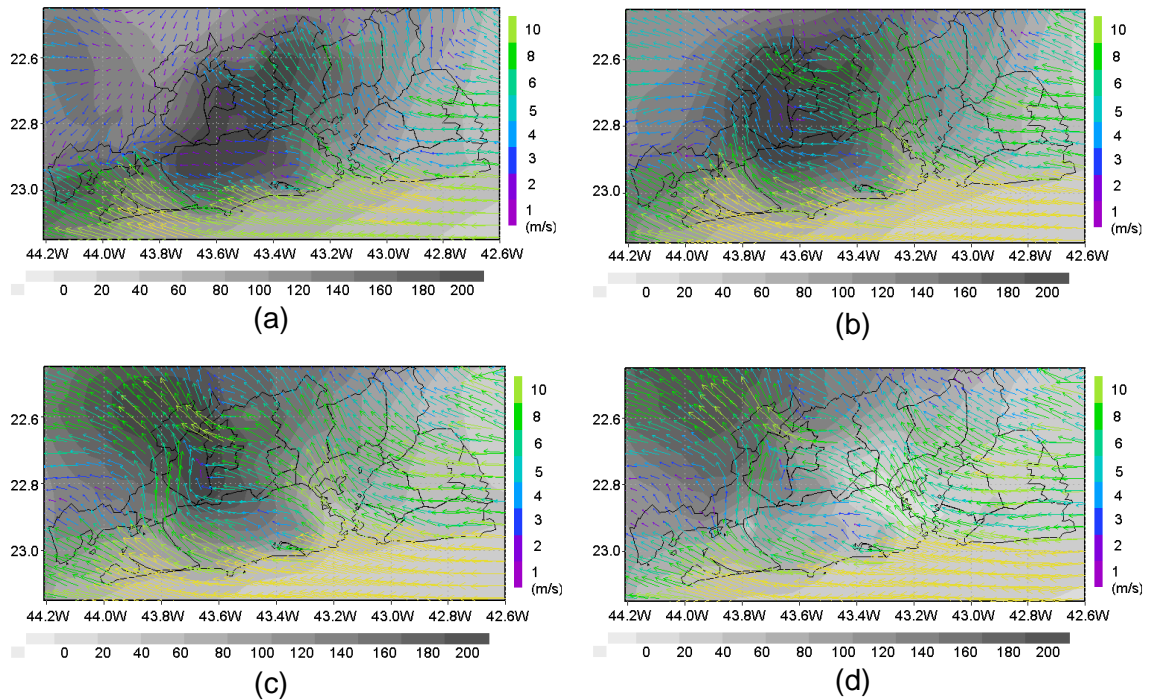


Figura 6-21: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 05 de setembro de 2004 às (a) 14 Z; (b) 16 Z; (c) 18 Z e (d) 20 Z.

Condições de céu-claro voltam a ser simuladas pelo modelo a partir do dia 06 de setembro de 2004. O modelo também simulou um aumento na temperatura do ar que chegou a valores em torno de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ em parte da região. Os picos de concentração de NO_x diurno e noturno foram verificados às 11 e 21 Z. A extensão da pluma com maiores concentrações foi bem maior do que a verificada nos dias anteriores. Durante a noite, a pluma que também atingiu boa parte da Bacia Aérea IV foi advectada para noroeste do domínio. Altas concentrações de ozônio foram simuladas pelo SPM entre 16 e 17 Z na maior parte do domínio. A máxima extensão da pluma com violações ao PNQA estabelecido para o ozônio foi simulada pelo SPM-BRAMS às 16 Z, como ilustrado na Figura 6-22.

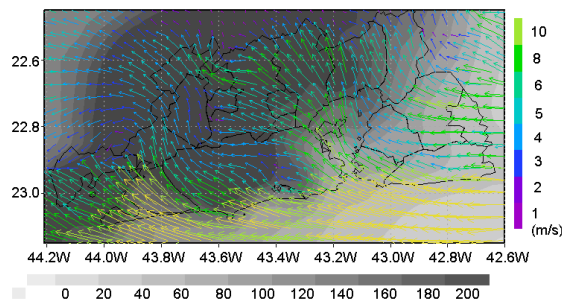


Figura 6-22: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 06 de setembro de 2004 às 16 Z.

Valores de temperatura superiores aos 30 °C e de UR inferiores a 50% são verificados em grande parte da região nos dias subsequentes. Entre os dias 07 e 10 de setembro de 2004, as maiores concentrações de NO_x no período da manhã são verificadas as 11 Z. Nos dias 08 e 09, a ocorrência de ventos fracos dificulta a dispersão da pluma gerada durante o período noturno quem é mantida durante a madrugada sobre a RMRJ. Em relação ao ozônio, é possível observar nos dias 07 e 08 um perfil bastante similar. Em ambos os dias, a pluma começa a ser formada a partir das 15 Z, principalmente sobre o litoral da Bacia Aérea I e o Município de Magé (Figura 6-23). Entre 17 e 20 Z, com a intensificação dos ventos provenientes do litoral, também é possível observar um deslocamento da pluma para noroeste. No dia 09 de setembro a pluma com maiores concentrações de ozônio também começa a se formar na mesma região dos dias 07 e 08. Contudo, a extensão da área que a pluma com violações ao PNQA atinge e a duração do evento são menores. No último dia de simulação, são verificadas violações ao PNQA em grande parte da RMRJ durante a tarde, como pode ser observado na Figura 6-24.

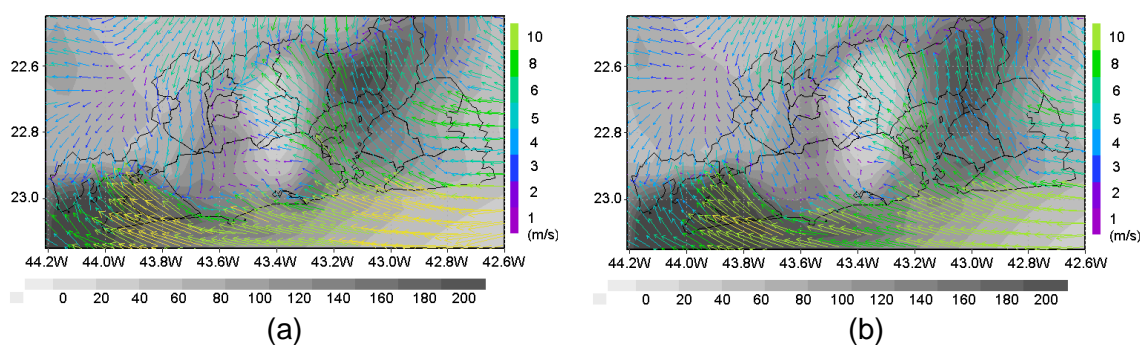


Figura 6-23: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia (a) 07 de setembro de 2004 às 15 Z e (b) 08 de setembro de 2004 às 15 Z.

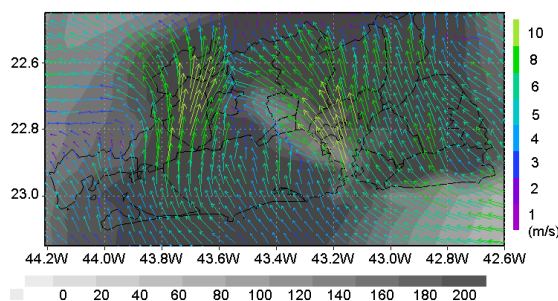


Figura 6-24: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) referente ao dia 10 de setembro de 2004 às 17 Z.

6.2.1.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados monitorados na região

As comparações das concentrações de O_3 simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as registradas pela rede de monitoramento do INEA podem ser observadas na Figura 6-25. Por meio destas, é possível verificar que o modelo teve dificuldades em simular de maneira adequada os máximos de concentração de ozônio na maior parte do período, em geral, superestimando os valores observados. Os dias 01, 09 e 10 de setembro de 2004, foram os dias nos quais o modelo, em geral, melhor representou as concentrações de ozônio monitoradas. No dia 01, a exceção foi a estação Jardim Primavera, único site que registrou violações ao PNQA estabelecido pela Resolução CONAMA 03/90 para o ozônio. No dia 10 de setembro de 2004, a exceção foi a estação Duque de Caxias que registrou a máxima concentração de ozônio registrada no período.

O horário no qual as máximas concentrações foram simuladas, em geral, foi coerente com os horários dos máximos observados. Durante a noite, o modelo simulou concentrações de ozônio bem mais baixas do que as observadas. Nesse período, altas concentrações de NO foram simuladas pelo SPM. Isso pode indicar uma superestimativa destes valores por parte do modelo que, por sua vez, pode ser decorrente de uma superestimativa das emissões de NO_x consideradas para a RMRJ durante o período noturno. A ausência de dados de NO para comparação dificultou a identificação das reais causas desse problema.

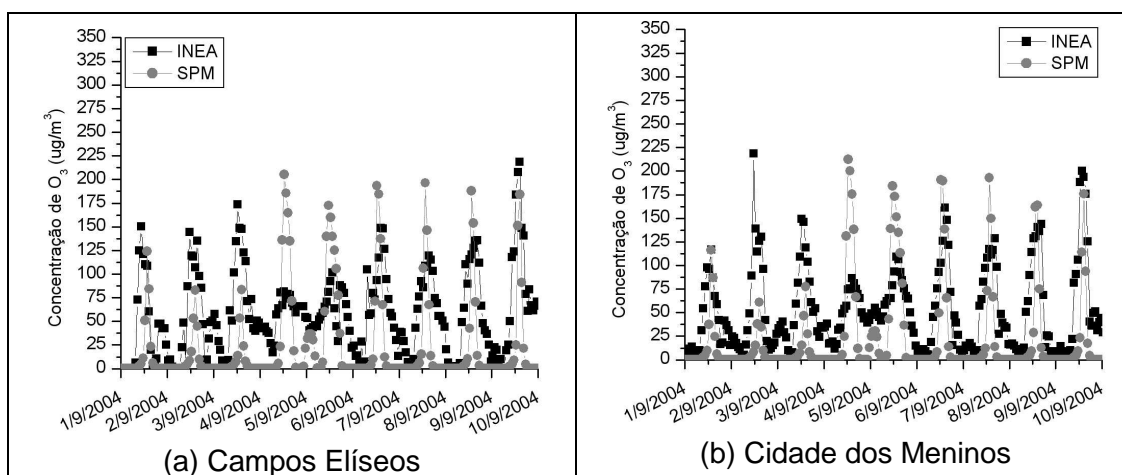


Figura 6-25: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu g.m^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações realizadas pela rede de monitoramento do INEA na RMRJ.

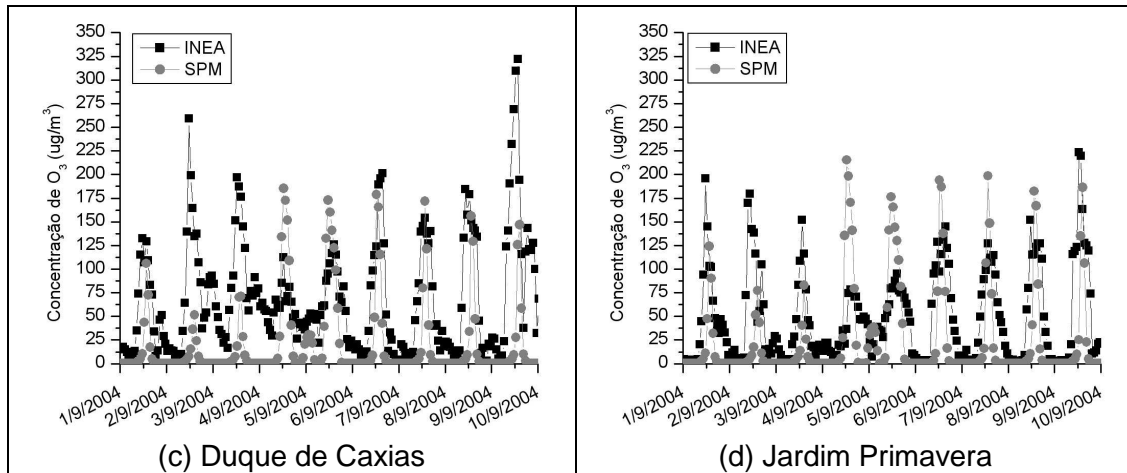


Figura 6-25: Continuação.

Os resultados obtidos por meio da utilização de métodos estatísticos para a comparação entre as concentrações de O_3 simuladas pelo modelo e os observados na RMRJ revelou resultados do índice de correlação de Pearson inferiores aos verificados no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2006, como pode ser observado na Tabela 6-4. O maior valor deste índice foi de 0,60 na estação Cidade dos Meninos. Vale ressaltar que a proximidade entre as estações com dados disponíveis dificulta a verificação dos resultados do modelo para a região como um todo.

O viés apresentou valores negativos indicando que o modelo subestimou as concentrações de ozônio nos pontos com dados disponíveis. A média das diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} foi pequena, obedecendo ao primeiro critério para a obtenção do *skill* em uma simulação. A análise do RMSE, que novamente apresentou valores elevados, e do $RMSE_{UB}$ indicou que nenhuma das estações satisfaz o segundo e o terceiro critério para obter o *skill* da simulação.

Os valores do índice de concordância (*d*), assim como o índice de correlação, também indicaram resultados inferiores aos da simulação apresentada no item 6.1.2.2, variando entre 0,56, na estação Duque de Caxias, e 0,71, na estação Cidade dos Meninos.

Tabela 6-4: Índices estatísticos calculados para todas as estações do INEA com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) disponíveis no período de 01 a 10 de setembro de 2004.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Campos Elíseos	0,52	61,32	-36,94	0,65	48,94	48,34	50,75
Cidade dos Meninos	0,60	54,58	-32,06	0,71	44,17	48,17	49,85
Duque de Caxias	0,47	79,34	-53,01	0,56	59,03	64,94	44,20
Jardim Primavera	0,53	55,92	-25,41	0,70	49,82	51,43	51,44

A comparação entre os resultados obtidos com a simulação e os dados de temperatura e umidade relativa do ar, registrados entre 01 e 10 de setembro de 2004 em estações alocadas na RMRJ, é apresentada nas Figuras 6-26 e 6-27, respectivamente. Em geral, o BRAMS representou de forma coerente o ciclo diurno de ambos os parâmetros. A amplitude do ciclo diurno da temperatura do ar, contudo, não foi bem representada pelo modelo na maioria das estações consideradas. Em relação a temperatura do ar, é importante destacar a habilidade do modelo em simular a queda na temperatura registrada durante o dia 04 de setembro. Dentre as estações com dados de temperatura disponíveis para o período em questão, a estação Nova Iguaçu foi a mais bem representada pelo modelo. No caso da UR, o modelo apresentou resultados bastante próximos aos verificados em todas as estações consideradas.

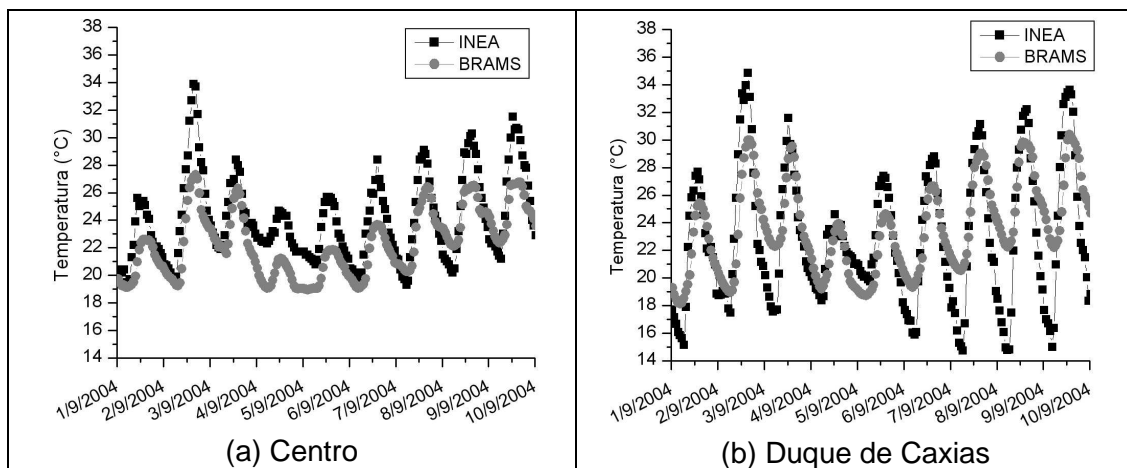


Figura 6-26: Comparação entre os valores de temperatura do ar simulados pelo modelo BRAMS e observações realizadas na RMRJ.

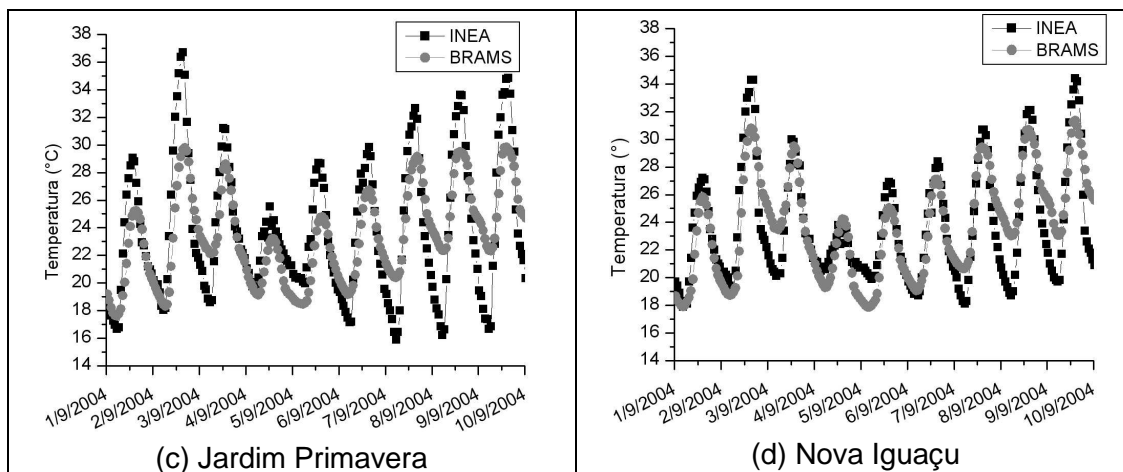


Figura 6-26: Continuação.

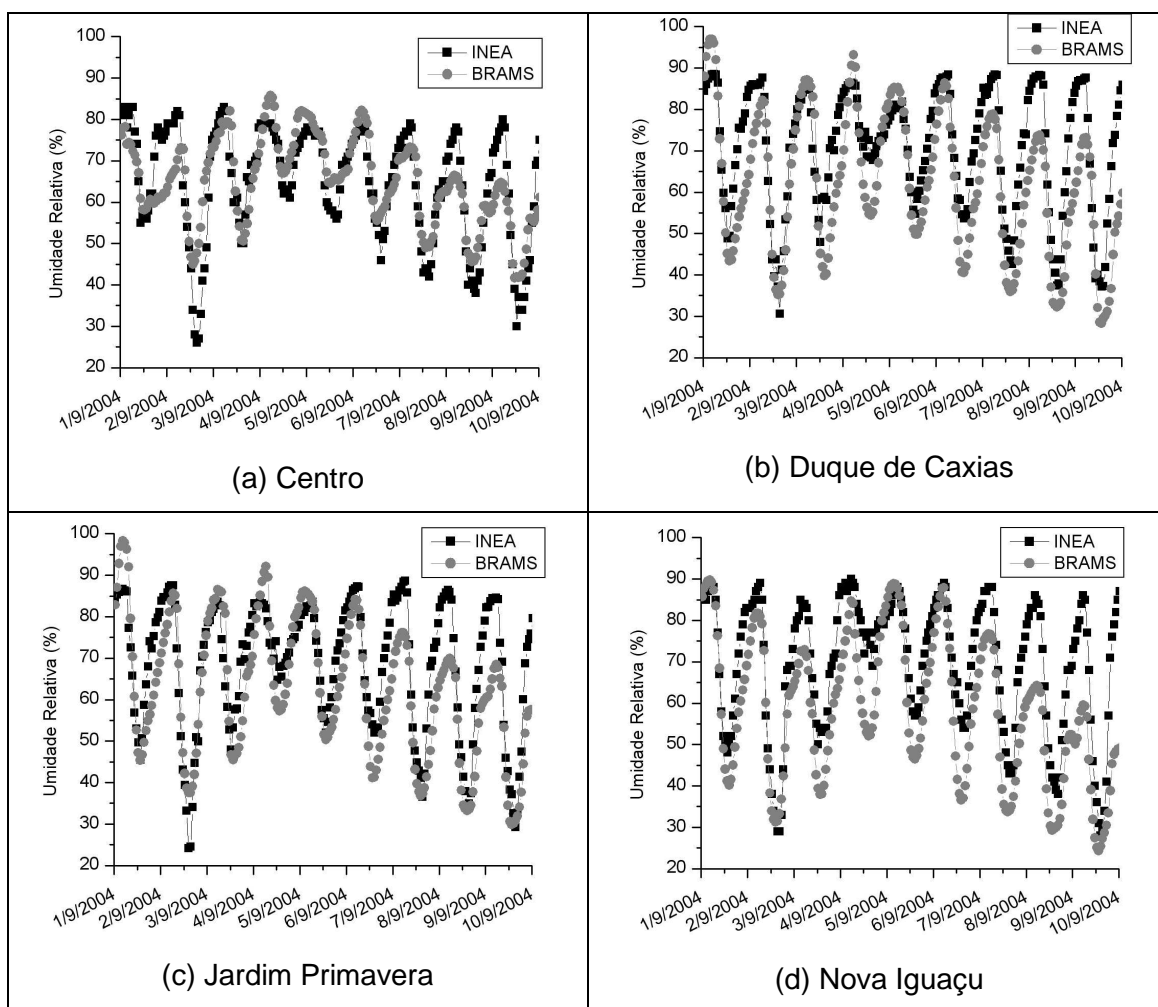


Figura 6-27: Comparação entre os valores de umidade relativa do ar simulados pelo modelo BRAMS e observações realizadas na RMRJ.

Para a temperatura e a umidade relativa do ar, os valores do índice de correlação de Pearson indicaram concordância entre os resultados simulados pelo BRAMS e os registrados em estações da região. Os valores variaram entre 0,78 (estação Duque de

Caxias) e 0,85 (estações Centro e Nova Iguaçu) para a temperatura do ar e entre 0,82 (estação Centro) e 0,87 (estação Nova Iguaçu), no caso da umidade relativa.

Para ambos os parâmetros aqui analisados, o viés revelou resultados negativos indicando que o modelo subestimou as observações. A única exceção foi para a temperatura do ar referente a estação Duque de Caxias.

Em geral, não foram verificadas diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} significativas, atendendo ao primeiro critério estabelecido para obtenção do skill de uma simulação. O segundo e o terceiro critério também foram atendidos, tanto para a temperatura quanto para a umidade relativa do ar, em todas as estações consideradas.

Como pode ser identificado na Tabela 6-5 e Tabela 6-6, os valores do índice de concordância (d) foram altos, ficando acima de 0,80 em todas as estações e para ambas as variáveis meteorológicas analisadas.

Tabela 6-5: Índices estatísticos calculados com dados de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) observados na RMRJ no período de 01 a 10 de setembro de 2004.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Centro	0,85	2,37	-1,71	0,82	1,63	3,06	2,36
Duque de Caxias	0,78	3,19	0,64	0,84	3,12	4,92	3,33
Jardim Primavera	0,82	2,93	-0,43	0,87	2,89	4,95	3,31
Nova Iguaçu	0,85	2,12	-0,22	0,92	2,11	4,05	3,29

Tabela 6-6: Índices estatísticos calculados com dados de umidade relativa do ar (%) observados na RMRJ no período de 01 a 10 de setembro de 2004.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Centro	0,82	7,72	-0,09	0,89	7,72	13,63	10,54
Duque de Caxias	0,84	12,66	-8,64	0,85	9,25	14,86	17,20
Jardim Primavera	0,86	10,45	-5,97	0,89	8,58	15,70	16,57
Nova Iguaçu	0,87	14,86	-12,10	0,83	8,63	16,20	17,36

6.2.2. Período entre 05 e 13 de março de 2007

6.2.2.2 Influência da circulação de grande e meso-escala na qualidade do ar

Segundo o CPTEC (CPTEC/INPE, 2007), no mês de março de 2007, a posição de cavados e vórtices ciclônicos em altos níveis auxiliou na permanência de uma massa de ar seco sobre a região sudeste. Nesse período, a ocorrência de precipitação em

toda a região esteve abaixo da média histórica. Isso foi confirmado através dos dados obtidos através da Fundação GEORIO (GEORIO, 2010). Entre os dias 05 e 13 de março não houve registro de precipitação nos 30 pluviômetros em operação na RMRJ. Os dados obtidos através do METAR produzido nos aeroportos do Galeão e Santos Dummont para o mesmo período revelaram condições de céu-claro, ventos fracos no período da manhã e temperaturas acima dos 30 °C durante a tarde.

Os resultados encontrados pelo modelo também indicaram o predomínio de condições de céu-claro e a não-ocorrência de precipitação. Valores de temperatura acima dos 30 °C e de umidade relativa abaixo dos 50%, na maior parte da região metropolitana, no período da tarde foram observados nos resultados.

No dia 05 de março de 2007, maiores concentrações de ozônio começam a se formar, às 15 Z, sobre parte da baixada fluminense e sobre parte do litoral, como pode ser observado na Figura 6-28(a). Com a intensificação dos ventos vindos do litoral, a pluma com maiores concentrações aumenta e passa a se deslocar para noroeste. Em algumas regiões são verificados valores acima do PNQA entre 17 e 20 Z (Figura 6-28b). Altas concentrações de óxidos de nitrogênio são simuladas nos períodos da manhã, entre 10 e 12 Z, e à noite, a partir das 20 Z. É possível verificar, durante o período noturno, o transporte da pluma de NO_x para noroeste. Outro ponto interessante, ilustrado na Figura 6-29, é que, até as 12 Z, a razão NO_2/NO é inferior a 1 na maior parte do domínio. Após as 15 Z, esse perfil se inverte. Nas regiões onde as maiores concentrações de ozônio foram simuladas, a razão entre as concentrações de NO_2 e as de NO é superior a 10.

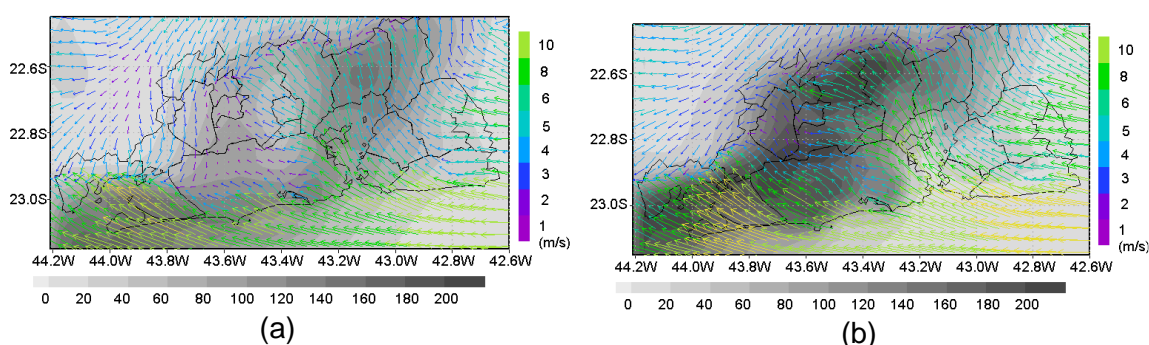


Figura 6-28: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 05 de março de 2007 às (a) 15 Z; e (b) 17 Z.

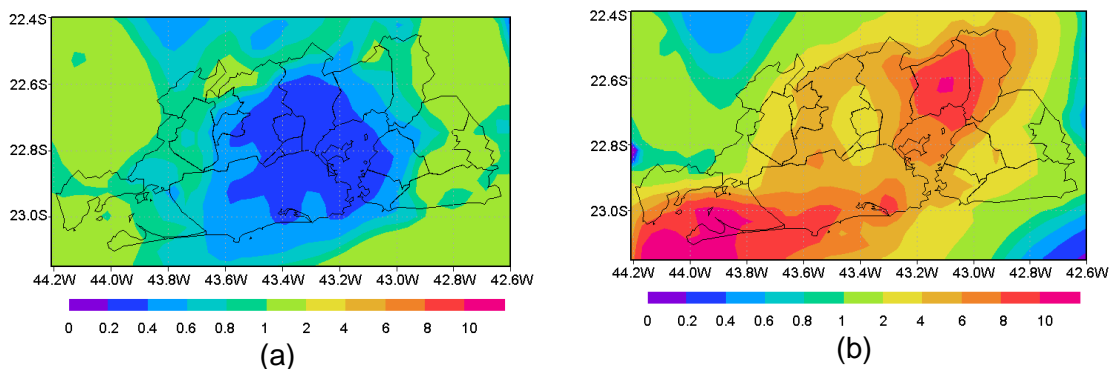


Figura 6-29: Razão entre as concentrações de NO_2 e de NO calculadas para o dia 05 de março de 2007 às (a) 12 Z; e (b) 15 Z.

As concentrações de ozônio, nos dias 06 e 07, também começaram a ser formadas na mesma região do dia anterior. Contudo, valores mais elevados e uma maior extensão de área com concentrações superiores ao limite estabelecido pelo CONAMA foram verificados. Assim como no dia 05, no final da tarde, a intensificação dos ventos vindos do litoral contribui para o deslocamento da pluma para noroeste. Como exemplo, referente ao dia 06 de março de 2007, a Figura 6-30 mostra a evolução do campo de vento e da distribuição das concentrações de ozônio simuladas pelo modelo SPM-BRAMS para a RMRJ.

Tanto no dia 06 quanto para o dia 07 de março, através da distribuição das concentrações de NO_x pela manhã, com a ocorrência de ventos mais fracos, é possível observar um núcleo com maiores valores sobre o centro da região. À noite, em ambos os dias, as concentrações foram menos intensas e pode-se verificar o transporte para noroeste do domínio, assim como verificado para o ozônio. A razão das concentrações de NO_2 e de NO , nesses dias, apresentou um comportamento similar ao descrito para o dia 05. Contudo, a extensão da área dentro do domínio com valores superiores a 10 foi maior do que a verificada para o dia 05.

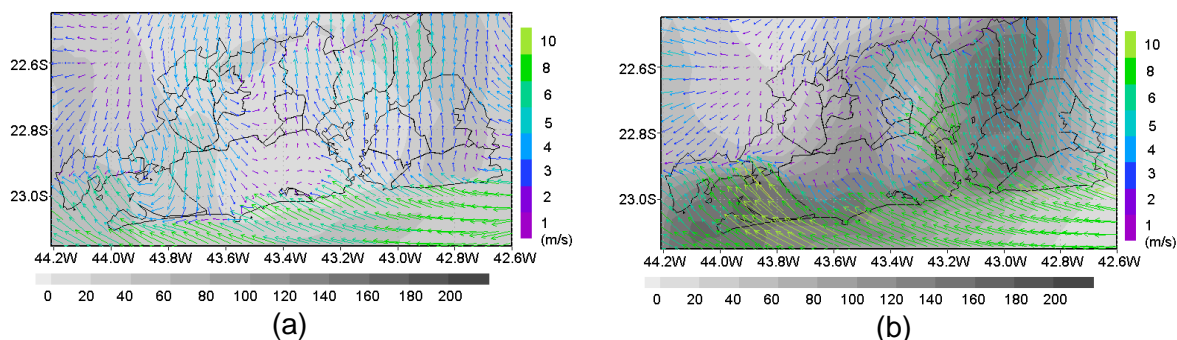


Figura 6-30: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 06 de março de 2007 às (a) 13 Z; (b) 15 Z; (c) 17 Z; (d) 19 Z; e (e) 21 Z.

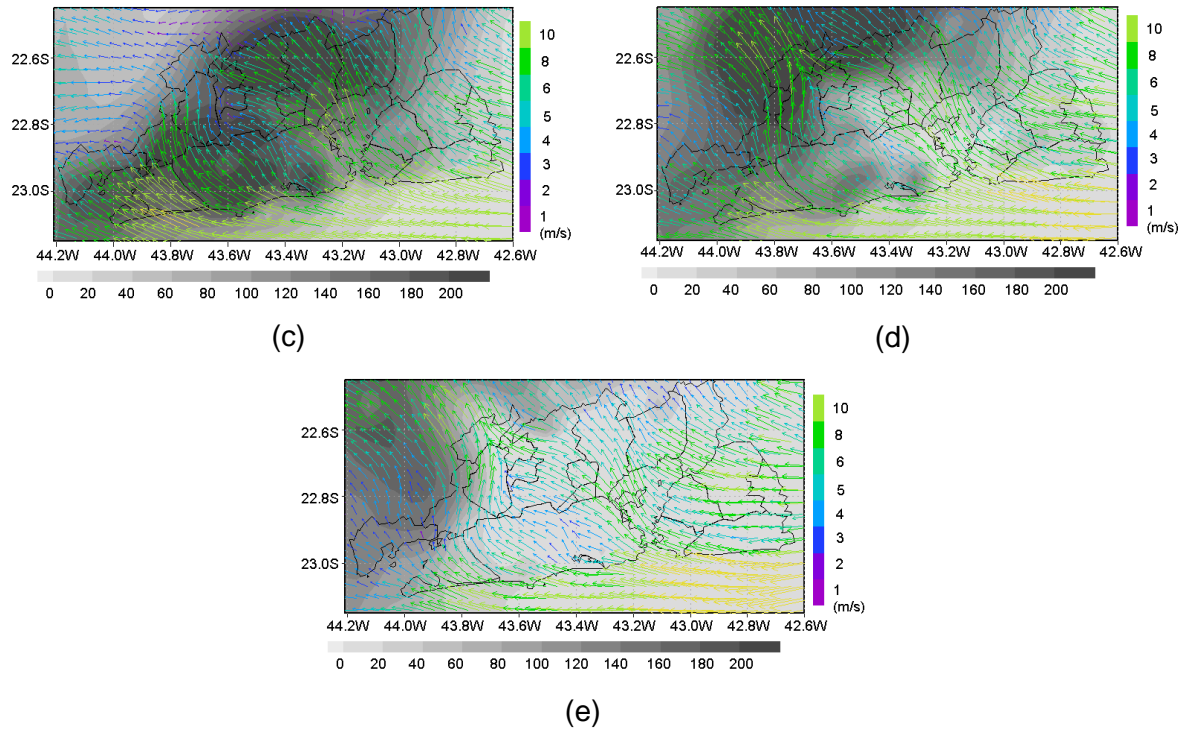


Figura 6-30: Continuação.

A configuração da pluma com maiores concentrações de ozônio começa um pouco diferente dos dias anteriores, no dia 08 de março de 2007. Como pode ser observado na Figura 6-31, forma-se, às 14 Z, no centro da região, uma área com menores valores de concentração (associadas, provavelmente, a valores da razão NO_2/NO inferiores a 1, ou seja, a maiores valores de concentração de monóxido de nitrogênio) enquanto altas concentrações são verificadas na região ao redor desta área. Concentrações bastante elevadas, superiores a $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, foram simuladas para boa parte da região metropolitana durante a tarde. A evolução das concentrações de NO_x simuladas para este dia na RMRJ apresentou comportamento similar ao verificado nos demais dias.

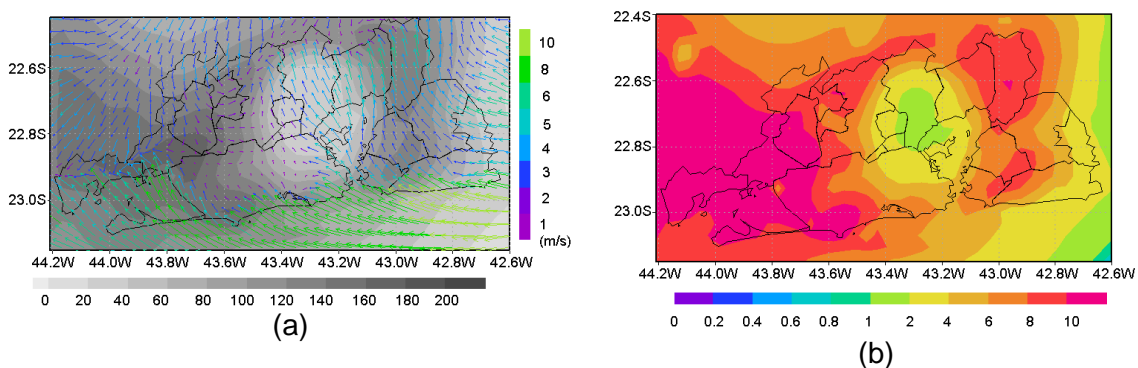


Figura 6-31: (a) Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) e (b) razão NO_2/NO referente ao dia 08 de março de 2007 às 14 Z.

O dia 09 apresentou valores de ozônio elevados, concentrados em uma área menor. A duração dos eventos de ultrapassagens do padrão neste dia também foi menor do que nos dias anteriores. Vale ressaltar que, neste dia, nenhuma das estações de monitoramento em operação na região registrou valores superiores aos estabelecidos como limite através do PNQA. As concentrações de NO_x neste dia foram superiores as dos dias anteriores, principalmente, durante o início da tarde, quando, em geral, menores valores são verificados. Isso provavelmente dificultou a formação de ozônio na região, principalmente, sobre o centro do domínio onde menores valores da razão NO_2/NO foram verificados.

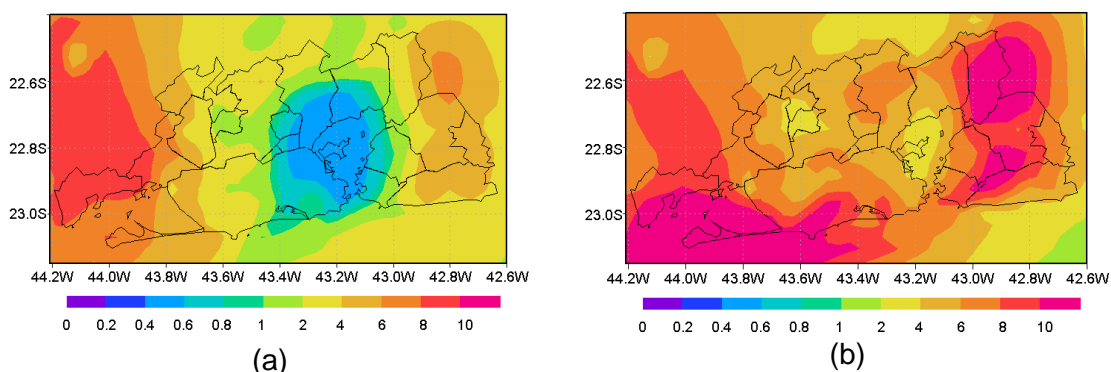


Figura 6-32: Razão das concentrações de NO_2 e de NO referente ao dia 09 de março de 2007 (a) 13 Z e (b) 15 Z.

No dia 10, dois núcleos com concentrações acima do PNQA se formam sobre parte da baixada fluminense e sobre parte do litoral do Município do Rio de Janeiro. Durante o final da tarde e início da noite, com a intensificação dos ventos associados com a brisa marítima, esses núcleos convergem formando um único núcleo (Figura 6-33). A pluma com maiores concentrações de NO_x pela manhã encontrou-se ligeiramente deslocada para esquerda, em relação à posição verificada nos demais dias, atingindo parte dos municípios de Niterói e São Gonçalo (localizados na Bacia Aérea IV). Durante a noite, a pluma indica menores valores de concentração de NO_x e uma extensão menor do que a verificada nos dias anteriores. Outro ponto interessante nos resultados obtidos pelo modelo para este dia, como pode ser visto na Figura 6-34, foi a ocorrência de altos valores da razão de concentração NO_2/NO em parte da região mesmo no período noturno.

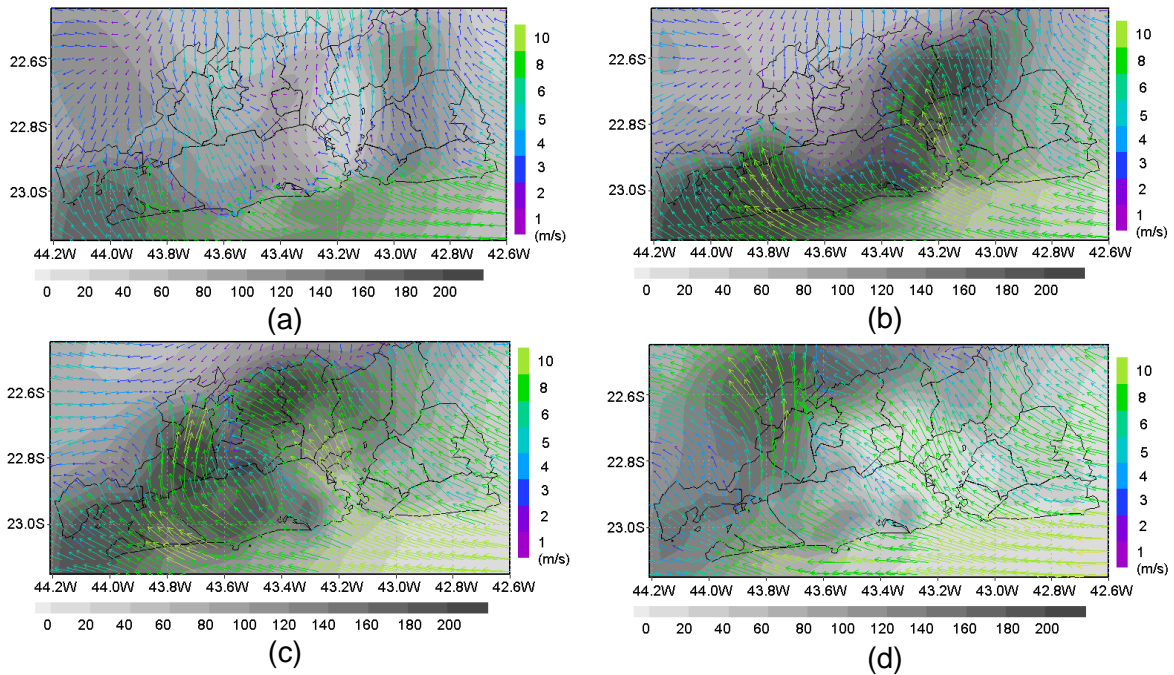


Figura 6-33: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 10 de março de 2007 às (a) 14 Z; (b) 16 Z; (c) 18 Z; e (d) 20 Z.

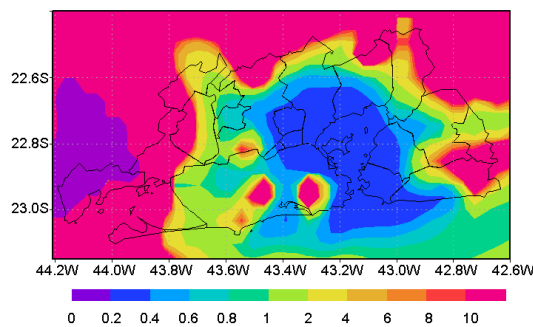


Figura 6-34: Razão das concentrações de NO_2 e de NO referente ao dia 10 de março de 2007 23 Z.

Não foram simuladas concentrações superiores a $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ no dia 11 de março de 2007. Contudo, duas estações na RMRJ apresentaram valores superiores a este. A intensidade e a extensão da pluma de NO_x , pela manhã e à noite, também foram inferiores as simuladas para os dias anteriores. No dia 12, as concentrações de ozônio voltam a subir e a pluma com valores acima dos estabelecidos como limite pela legislação atinge uma maior extensão do que a simulada pelo modelo no dia anterior. Violações ao PNQA são verificadas em algumas regiões entre 16 Z e 20 Z. Também é possível observar o transporte da pluma com maiores concentrações para noroeste neste período. Altos valores de concentração de NO_x são simulados pelo modelo, principalmente, pela manhã. À noite, a exemplo do verificado para o ozônio, observa-

se o transporte da pluma para noroeste, acompanhando os ventos vindos do litoral e da Baía de Guanabara.

Altos valores de concentração, incluindo violações ao PNQA, no dia 13 foram apenas verificados em parte da RMRJ como pode ser observado na Figura 6-35. A duração desses eventos também é mais curta do que a identificada em alguns dos dias anteriores. Em grande parte da região, as concentrações de NO_x simuladas pelo modelo apresentaram valores bastante elevados em boa parte da manhã e da noite, quando o fluxo de veículos é mais intenso. A maior extensão que a pluma atingiu foi simulada, durante a manhã e à noite, as 10 e 23 Z (Figura 6-36). Em comparação com os dias anteriores, os valores da razão NO_2/NO foram menores mesmo durante o período da tarde, fato que provavelmente contribuiu para os menores valores de concentração de ozônio na maior parte da região.

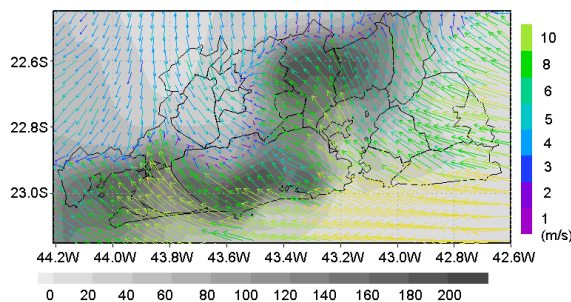


Figura 6-35: Campo de Vento e Concentração de Ozônio ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 13 de março de 2007 às 17 Z.

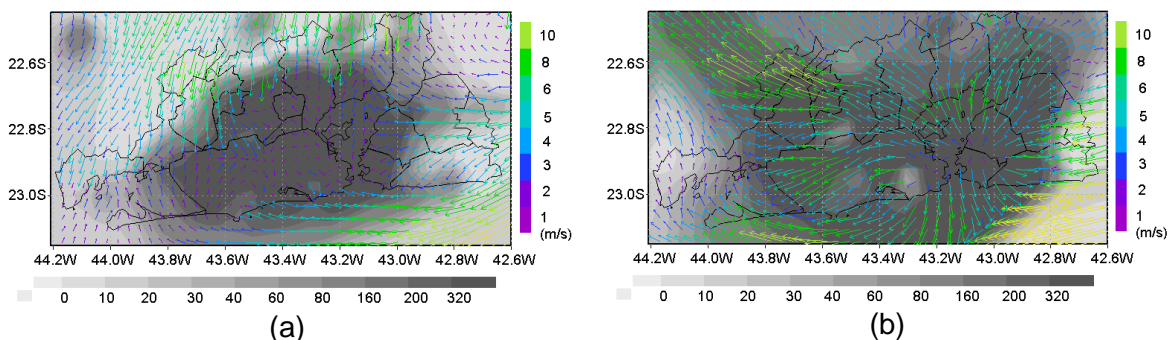


Figura 6-36: Campo de Vento e Concentração de NO_x ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) referente ao dia 13 de março de 2007 às (a) 10 Z e (b) 23 Z.

6.2.1.2 Comparação entre os resultados simulados pelo SPM-BRAMS e os dados monitorados na região

Para o período de 05 a 13 de março de 2007, cinco estações de monitoramento na RMRJ apresentaram dados de concentração de ozônio válidos. Novamente, todas

essas estações estão localizadas na Baixada Fluminense, área bastante influenciada por veículos e indústrias. O ciclo diurno foi, em geral, mais bem simulado pelo modelo, quando comparado ao período anterior (*Figura 6-37*). Contudo, exceto em alguns dias, para algumas estações, o modelo não representou os valores máximos das concentrações de ozônio de forma correta. Para as estações Campos Elíseos e Jardim Primavera, por exemplo, o modelo apresentou resultados próximos dos observados, principalmente, nos dois primeiros dias das simulações. Essas estações distam menos de 4 km uma da outra e são as mais próximas da Refinaria de Duque de Caxias, uma importante fonte de poluentes atmosféricos da região.

A estação Nova Iguaçu, localizada em uma área exposta diretamente a um intenso tráfego de veículos, foi a localização em que o modelo apresentou os resultados mais distantes das concentrações observadas pela rede de monitoramento. Outro ponto interessante a respeito da comparação dos resultados gerados pelo modelo e os observados é que, para alguns dias, o modelo superestima as concentrações enquanto que, para outros, subestima. Em geral, as demais estações apresentaram um comportamento mais linear. Por exemplo, as estações Campos Elíseos e Jardim Primavera, em média, apresentaram concentrações máximas superestimadas pelo modelo. Já as estações Duque de Caxias e Cidade dos Meninos apresentaram resultados, em média, subestimados pelo modelo.

Os resultados do índice de correlação de Pearson calculados a partir do uso de métodos estatísticos para a comparação entre as concentrações de O₃ simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e os dados obtidos a partir da rede de monitoramento do INEA para o período em questão foram mais baixos do que os verificados no período de 30 de outubro a 01 de novembro de 2007. Os resultados indicam valores entre 0,45, para a estação Nova Iguaçu, e 0,72, na estação Cidade dos Meninos (*Tabela 6-7*). É importante notar a diferença entre o número de dias utilizados nas duas análises (3 dias no primeiro e 9 no segundo)

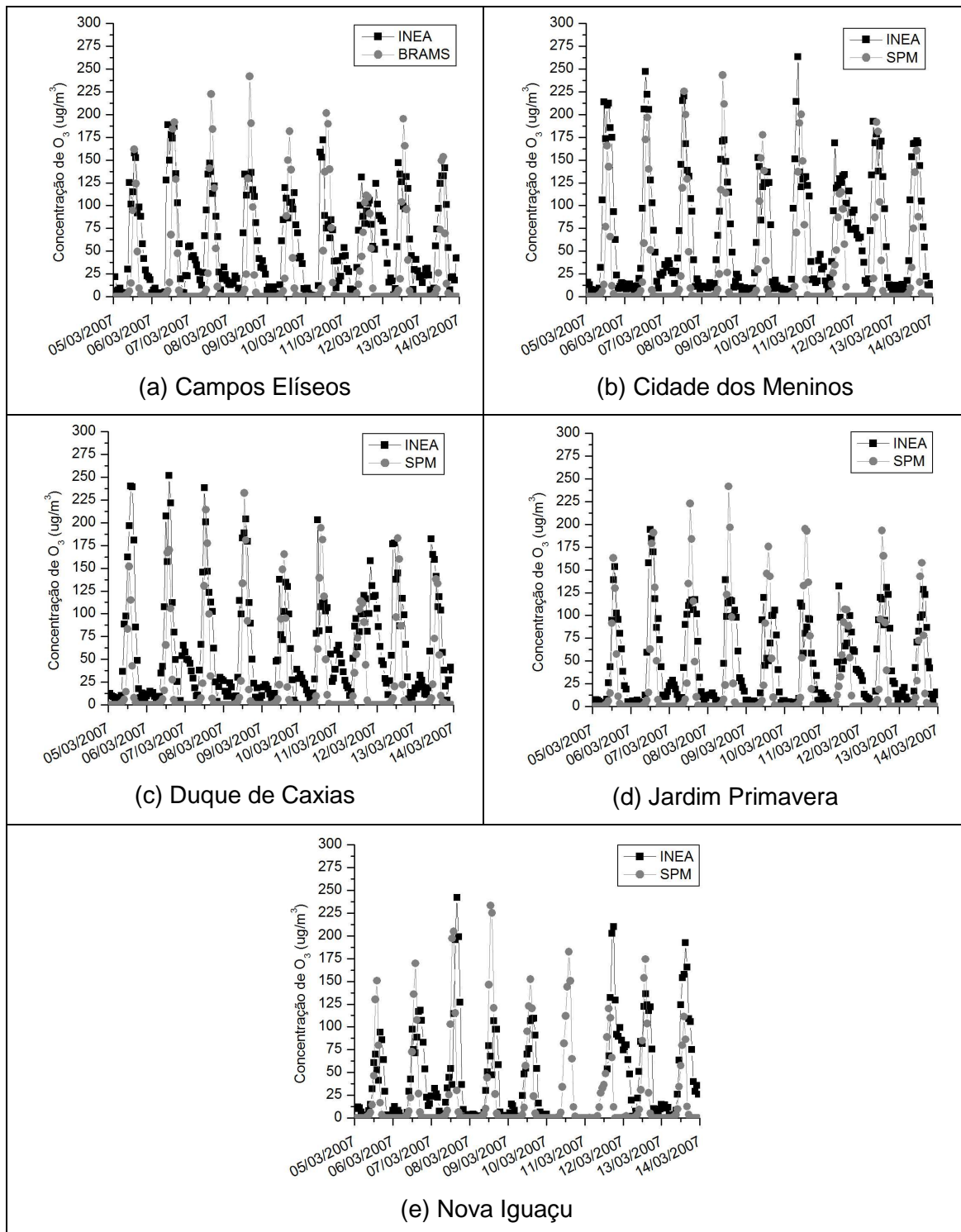


Figura 6-37: Comparação entre as concentrações de ozônio ($\mu g.m^{-3}$) simuladas pelo modelo SPM-BRAMS e as observações realizadas pela rede de monitoramento do INEA na RMRJ.

Novamente, o cálculo do viés indicou que o modelo subestimou as concentrações de ozônio em todos os pontos com dados disponíveis. Esse comportamento deve-se, principalmente, a subestimativa das concentrações no período noturno (por conta das altas concentrações de NO simuladas durante a noite). Em geral, as diferenças percentuais de σ_{sim} e σ_{obs} não foram tão significativas, atendendo ao primeiro critério para se obter *skill* em uma simulação. Através da comparação do RMSE e do $RMSE_{UB}$ com o desvio padrão das observações foi possível avaliar o segundo e o terceiro critério para obtenção do *skill* da simulação, respectivamente. No caso, apenas as estações Cidade dos Meninos e Duque de Caxias atenderam ao segundo critério e apenas a estação Nova Iguaçu não atendeu o terceiro critério.

O índice de concordância (*d*) revelou resultados variando entre 0,66, na estação Nova Iguaçu, e 0,77, nas estações de Cidade dos Meninos e Jardim Primavera, respectivamente.

Tabela 6-7: Índices estatísticos calculados para todas as estações do INEA com dados de concentração de ozônio ($\mu\text{g.m}^{-3}$) disponíveis no período de 05 a 13 de março de 2007.

Sites	R	RMSE	Viés	Índice d	$RMSE_{UB}$	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Campos Elíseos	0,62	53,87	-28,90	0,74	45,46	49,28	54,61
Cidade dos Meninos	0,72	61,25	-40,32	0,77	46,11	65,72	55,53
Duque de Caxias	0,66	59,56	-37,82	0,74	46,01	59,57	51,19
Jardim Primavera	0,63	46,78	-17,75	0,77	43,27	45,44	54,08
Nova Iguaçu	0,45	57,97	-20,90	0,66	54,07	52,18	50,96

Em geral, como pode ser observado na Figura 6-38, o modelo BRAMS subestimou os valores de temperatura máxima e superestimou os de temperatura mínima em todas as estações. A amplitude do ciclo diurno da temperatura foi bem inferior a registrada na RMRJ. Contudo, a comparação com os valores de temperatura da rua e de temperatura do *cânion* revelou resultados mais coerentes com as observações. Isso, provavelmente, deve-se ao fato destes corresponderem a um nível mais próximo a superfície, representando melhor os resultados medidos pelas estações meteorológicas que são localizadas na superfície. Vale ressaltar que os valores de temperatura do ar, assim como os de concentração de ozônio, são extraídos para o primeiro nível vertical do modelo, localizado a 33.4 metros da superfície.

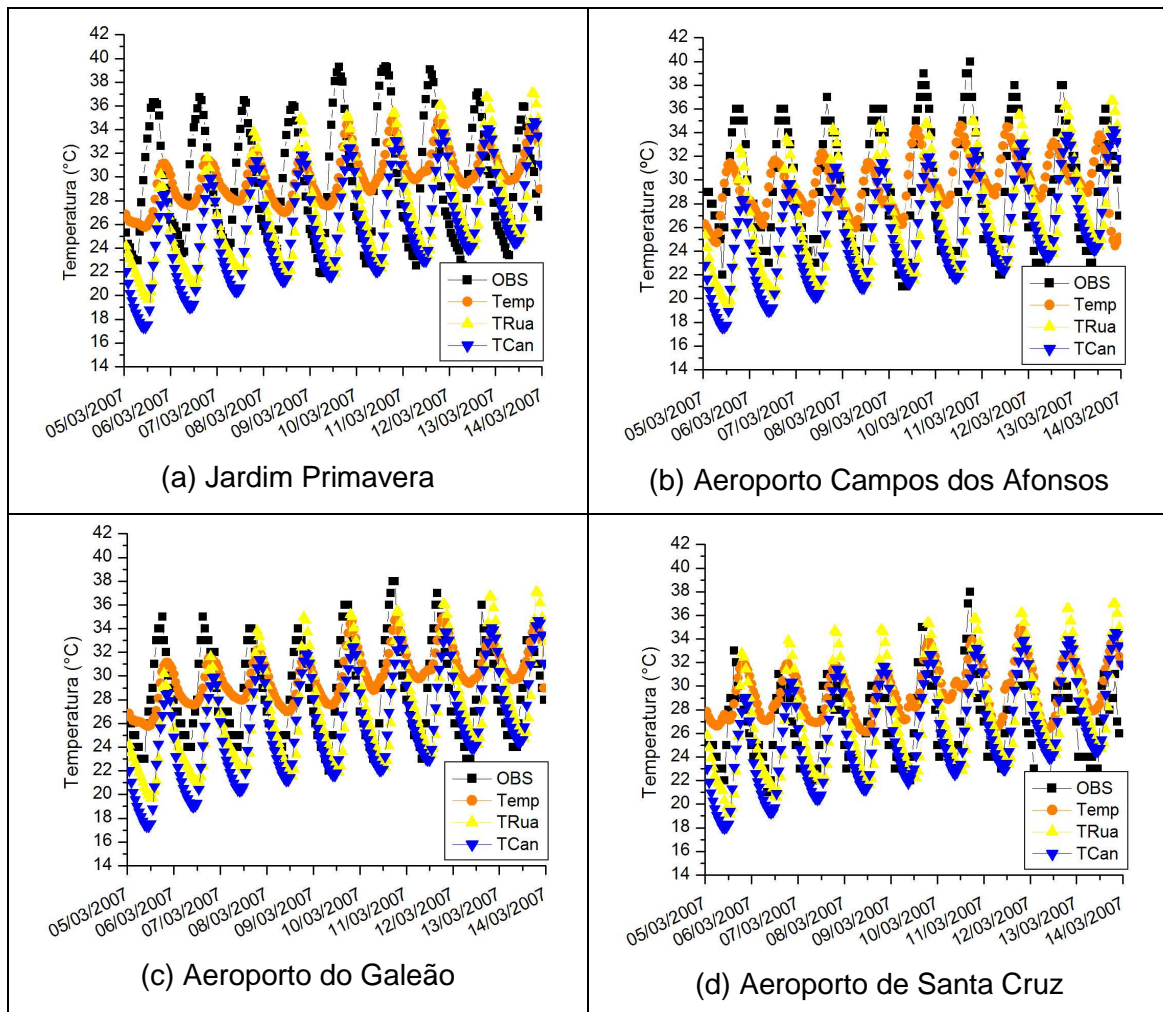


Figura 6-38: Comparação entre os valores de temperatura do ar, temperatura da rua e temperatura do *cânion* simulados pelo modelo BRAMS e observações realizadas na RMRJ.

A Tabela 6-8 apresenta os índices estatísticos calculados para todos os dados disponíveis de temperatura do ar observados em estações em operação na RMRJ. Foram considerados para comparação os resultados de temperatura, temperatura da rua e temperatura do *cânion* representado pelo modelo.

Em geral, a correlação linear de Pearson para a temperatura do ar apresentou valores relativamente baixos, principalmente, quando consideradas as observações realizadas em aeroportos da região. Apenas a estação Jardim Primavera apresentou resultado acima de 0,70. Em geral, com exceção desta estação, os valores de índice de correlação foram ligeiramente superiores quando considerada a temperatura do *cânion* para comparação. A temperatura da rua foi a que apresentou os menores índices.

Valores positivos (e, na maioria dos casos, menores) do viés foram encontrados para todos os pontos considerados quando analisada a temperatura do ar. Quando a comparação foi realizada considerando a temperatura da rua e a do *cânion* foram observados, em geral, valores do viés negativos, indicando uma subestimativa do modelo.

Diferenças significativas foram verificadas entre o σ_{obs} e o σ_{sim} para todas as estações quando analisada a temperatura do ar. Essas diferenças diminuiram significativamente quando foram consideradas para comparação a temperatura da rua e a do *cânion*. Logo, o primeiro critério para a obtenção do *skill* de uma simulação foi atendido apenas nestes casos. O segundo critério não foi atendido para os aeroportos Campos dos Afonsos e Galeão (ambas considerando as análises utilizando a temperatura da rua e a temperatura do *cânion*). O terceiro critério para a obtenção do *skill* de uma simulação foi satisfeito em todos os casos, exceto para o Aeroporto do Galeão quando a temperatura de rua foi considerada.

O índice de concordância revelou valores variando entre 0,57 e 0,73, nas estações Campos dos Afonsos e Jardim Primavera. Exceto para a estação Jardim Primavera, resultados ligeiramente superiores foram verificados quando a temperatura do *cânion* foi considerada.

Tabela 6-8: Índices estatísticos calculados com dados de temperatura do ar (°C) observados na RMRJ e os dados de temperatura, temperatura da rua (TR) e temperatura do *cânion* (TC) simulados pelo modelo BRAMS para o período de 05 a 13 de março de 2007.

Sites	T	R	RMSE	Viés	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{OBS}	σ_{SIM}
Jardim Primavera	T	0,74	3,61	0,20	0,73	3,60	4,95	2,27
	TR	0,45	5,01	-1,49	0,61	4,87	4,95	4,51
	TC	0,58	4,59	-2,54	0,68	3,82	4,95	4,18
Campo dos Afonsos	T	0,45	4,57	0,41	0,57	4,55	5,12	2,32
	TR	0,50	5,65	-2,46	0,66	5,10	5,12	4,54
	TC	0,63	5,48	-3,65	0,70	4,09	5,12	4,20
Galeão	T	0,53	3,47	0,90	0,64	3,35	3,96	2,12
	TR	0,48	5,13	-1,65	0,60	4,86	3,96	4,43
	TC	0,55	4,76	-2,71	0,68	3,91	3,96	4,36
Santa Cruz	T	0,56	4,43	2,01	0,62	3,94	4,73	2,20
	TR	0,38	4,78	0,67	0,58	4,73	4,73	4,55
	TC	0,56	3,68	-0,48	0,70	3,65	4,73	4,24

7. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

O presente estudo teve como foco principal realizar a avaliação da distribuição espacial das concentrações de ozônio troposférico e o impacto das mesmas sobre a qualidade do ar em escala local e regional em duas das maiores áreas urbanas do país: a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). Para isso, o modelo fotoquímico simplificado (SPM) acoplado ao modelo meteorológico de mesoescala BRAMS foi utilizado. Para a representação das emissões veiculares no modelo, foram construídos arquivos de emissão para toda a América do Sul baseados na identificação de áreas urbanas e nas emissões totais disponíveis para São Paulo que foram estimadas pela CETESB. No caso da RMRJ, por conta da disponibilidade de dados de emissão específicos para as principais vias de tráfego da região, estas informações foram substituídas. A inclusão das emissões provenientes das fontes industriais foi baseada em informações obtidas a partir dos órgãos ambientais das duas regiões metropolitanas.

Para a RMSP, o período correspondente à segunda campanha de monitoramento de ozônio realizada entre 30 de outubro e 01 de novembro de 2006 foi simulado para avaliar a sensibilidade das concentrações de ozônio e de algumas variáveis meteorológicas à utilização de diferentes parametrizações do modelo, condições iniciais e de fronteira com maior resolução espacial e temporal e também à utilização de grade com menor espaçamento horizontal. A extensão da área, onde altos valores de concentração de ozônio foram verificados, foi, em média, maior quanto maior a resolução horizontal utilizada. A comparação pontual dos resultados gerados pelo modelo com dados obtidos a partir da rede de monitoramento da CETESB revelou resultados ligeiramente melhores nas simulações considerando o espaçamento de 4 e 2 km. Com os testes de sensibilidade considerando diferentes parametrizações de radiação verificou-se que a parametrização de Chen & Cotton (1983) foi a mais adequada. A utilização do modelo TEB não influenciou significativamente as concentrações de ozônio simuladas pelo modelo. Contudo, o impacto na temperatura e umidade relativa, foi considerado significativo. Os principais impactos considerando alterações na parametrização de turbulência do modelo foram observados para a umidade relativa. Os resultados considerando a opção baseada em Mellor & Yamada (1982) mostraram-se ligeiramente melhores para a temperatura e para a umidade relativa. Alterações nas opções de parametrização de cumulus não produziram significativas variações nas concentrações de ozônio, assim como para a temperatura e umidade relativa. A inicialização do modelo com dados com maior resolução

produzidos pelo próprio modelo BRAMS produziu significativas variações nas concentrações de ozônio. A comparação dos resultados com dados de monitoramento revelou índices de correlação e concordância superiores para o ozônio e inferiores para a temperatura e para a umidade relativa.

Além deste período, também foram simulados, para a RMSP, quatro períodos quando altas concentrações de ozônio, superiores as estabelecidas pelo PNQA, foram registradas. Os períodos selecionados possuíram, em média, 10 dias e destacaram-se por conta da ocorrência de um grande número de violações registradas durante diversos dias consecutivos. Em geral, todos os períodos foram caracterizados pela influência de um sistema de alta pressão, condições de céu-claro e valores de temperatura do ar elevados. Em grande parte dos dias analisados, foi evidenciado um comportamento similar com a ocorrência de ventos fracos durante a madrugada e a manhã que contribuíram para o acúmulo de precursores na região. À tarde, predominantemente, foi identificada a intensificação dos ventos associados com a entrada da brisa marítima que atuou no transporte da pluma com maiores concentrações de ozônio, principalmente, para noroeste do domínio.

Alguns pontos em comum também foram verificados a partir da comparação dos resultados de concentração de ozônio produzidos pelo modelo SPM-BRAMS e os registrados pela rede de monitoramento da CETESB nos quatro períodos simulados. Em geral, o modelo representou de forma coerente o ciclo diurno do poluente. As concentrações máximas foram ligeiramente subestimadas na maioria das estações e períodos considerados. Os índices de correlação e concordância, em média, apresentaram bons resultados.

O modelo, em geral, teve dificuldade na representação do ciclo diurno e das concentrações máximas dos óxidos de nitrogênio e do monóxido de carbono registradas durante os episódios de poluição na RMSP. A forma de representação das emissões no modelo que considera apenas duas taxas de emissão que variam de acordo o grau de urbanização da região é uma das causas levantadas para este problema. Outro ponto que dificulta a representação, no caso dos óxidos de nitrogênio, é a descrição simplificada do mecanismo químico no qual esses compostos reagem.

A avaliação do desempenho do modelo em simular os valores de temperatura do ar e umidade relativa revelou, em alguns períodos, dificuldades na reprodução da amplitude do ciclo diurno de ambas as variáveis para algumas estações da CETESB.

É importante também destacar a dificuldade em comparar a estimativa suavizada gerada a partir dos resultados do modelo, com resolução de 4 por 4 km, com dados pontuais médios horários, principalmente, por conta da maioria das estações de monitoramento representar condições de escala local. Outra questão a ser considerada é que os valores utilizados para comparação representam, na verdade, as concentrações referentes ao ponto mais próximo da localidade real da estação e não, necessariamente, o exato local em que a estação se encontra.

O período de 30 de outubro até 01 de novembro de 2006 também foi considerado para a avaliação do impacto das emissões de fontes fixas e móveis nas concentrações de poluentes simuladas pelo modelo SPM-BRAMS na RMRJ. Praticamente não foram verificadas diferenças entre as concentrações de CO simuladas pelo modelo considerando ambos os tipos de fontes de emissão (móveis e fixas) e apenas a contribuição das emissões veiculares. Diferenças significativas foram verificadas no caso dos óxidos de nitrogênio e dos compostos orgânicos voláteis, principalmente, entre o final da noite e o início da manhã quando o tráfego veicular passa a se intensificar na região. As principais diferenças foram verificadas na Bacia Aérea I, que possui centrais de geração termoelétrica, e na Bacia Aérea III sobre a região onde se localiza o Complexo Petroquímico Duque de Caxias. A simulação considerando apenas a contribuição das fontes fixas apresentou impactos mais significativos, principalmente, no que tange as concentrações de dióxido de enxofre e material particulado. Em geral, as concentrações de ozônio geradas na simulação considerando apenas as emissões industriais não foram muito significativas, possivelmente por conta da baixa razão NO_2/NO . Mesmo sem considerar a contribuição das fontes fixas, valores de concentração superiores ao PNQA foram simulados em diversas áreas da região metropolitana, principalmente sobre a Baixada Fluminense. Além deste período, também foram realizadas simulações para outros dois períodos, quando foram registradas ultrapassagens ao PNQA durante alguns dias consecutivos na RMRJ.

A análise das condições meteorológicas sinóticas e de mesoescala revelou similaridades entre as duas regiões. Em geral, assim como o identificado nas simulações realizadas para a RMSP, nos três períodos simulados houve predomínio de condições de céu-claro ou pouca nebulosidade, altos valores de temperatura do ar e baixos índices de umidade relativa, principalmente, durante a tarde. Em alguns dias, ventos muito fracos foram verificados entre o final da noite e o início da tarde. Também

pode ser observado que a topografia da região e, principalmente, a proximidade com o oceano parecem influenciar significativamente o campo de vento simulado pelo modelo. A intensificação dos ventos provenientes do litoral durante a tarde contribuiu para o transporte dos precursores e do próprio ozônio para noroeste da grade em diversos dias simulados a exemplo do verificado para a RMSP.

A comparação dos resultados de concentração de ozônio registrados pelas estações de monitoramento da qualidade do ar com dados disponíveis para o período apresentou resultados inferiores aos verificados nas simulações realizadas para a RMSP apesar da utilização de dados de emissão mais refinados. É importante salientar que a pequena quantidade de estações com dados disponíveis dificultou a avaliação do desempenho do modelo em simular as concentrações de ozônio. Outra questão importante é que estas estações são localizadas a menos de 5 km umas das outras, dificultando ainda mais a avaliação das simulações sobre a RMRJ como um todo. A comparação realizada para a temperatura apresentou problemas, como o verificado para a RMSP, principalmente, no que diz respeito à representação da amplitude do ciclo diurno durante o período de 05 a 13 de março de 2007. Por conta desses resultados, foram extraídas do modelo resultados da temperatura da rua e da temperatura do *cânion* para os pontos considerados. Ambas apresentaram, em geral, melhores resultados no que tange a representação da amplitude do ciclo diurno. Contudo, os índices estatísticos apontaram resultados variados. Em geral, a temperatura do cânion apresentou resultados ligeiramente superiores às comparações realizadas considerando a temperatura e a temperatura da rua.

Considerando os resultados obtidos para a RMRJ, é possível indicar a necessidade de expansão da rede de monitoramento da qualidade do ar, principalmente, focando como áreas prioritárias a região litorânea da Bacia Aérea I, os municípios localizados ao norte da Baía de Guanabara, como Magé e Guapimirim, além de parte da região serrana, localizada a noroeste da RMRJ. Essas áreas, que ainda não possuem estações de monitoramento, apresentaram valores de concentração de ozônio acima dos PNQA estabelecidos para o Brasil.

7.1. Sugestões para trabalhos futuros

Durante a realização deste trabalho algumas questões foram levantadas e deverão ser abordadas em trabalhos futuros. Uma delas está relacionada com a necessidade de uma melhor representação dos compostos orgânicos voláteis (COVs) no SPM.

Segundo MARTINS (2006), considerando a análise das perturbações das emissões antrópicas de NO e de COVs, foi possível identificar que a formação do poluente ozônio na RMSP é mais sensível às variações dos COVs, destacando os aromáticos, alcenos, alcanos, aldeídos e alcoóis.

Outra questão importante refere-se à realização de novas simulações considerando, simultaneamente, a influência da emissão de ambas as regiões metropolitanas na qualidade do ar. Dessa forma, será possível identificar se existe interação, em determinadas situações, das plumas de concentração de ozônio, ou de seus precursores, geradas nas duas regiões. Importantes fontes de emissão significativas, como a Rodovia Presidente Dutra e a Companhia Siderúrgica Nacional, localizadas entre as duas metrópoles também deverão ser consideradas em trabalhos futuros.

8. Referências Bibliográficas

- ANDRADE, M. F., R. Y. YNOUE, R. HARLEY, A. H. MIGUEL. Air quality model simulating photochemical formation of pollutants: The São Paulo metropolitan area, Brazil. *International Journal of Environment and Pollution*, 22, 4, 2004.
- ALONSO, M. F., LONGO, K. M., FREITAS, S. R. Previsão da qualidade do ar e estudos de mudanças climáticas na América do Sul da escala regional para megacidades: atualização do banco de dados de emissões antrópicas e resultados preliminares. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia. São Paulo. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, São Paulo, SP, 2008.
- BAKLANOV, A. & KORSHOLM., U. On-line integrated meteorological and chemical transport modelling: advantages and prospective. In: Preprints ITM 2007: 29th NATO/SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, University of Aveiro, Portugal, 21-34, 2007.
- BALBINO, H. T. & FREITAS, E. D. Análise de picos secundários na concentração de ozônio em superfície sobre a Região Metropolitana de São Paulo. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis - SC. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006.
- BALBINO, H. T. Avaliação de modelos fotoquímicos de qualidade do ar e estudo das circulações atmosféricas nos processos de dispersão de poluentes. São Paulo, 2008. 126 f. Dissertação de Mestrado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2008.
- BIAZETO, B. Impacto da Precipitação no Ciclo de Assimilação em Modelos de Mesoescala. São Paulo, 2007. Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- BRÖNNIMANN, S. & NEU, U. Weekend-Weekday differences of near surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment*, 35, 8, 1127-1137, 1997.
- CALIXTO, F. C. Estudo Numérico sobre os Impactos da Expansão de Áreas de Pastagem e Cultivo de Soja nas Circulações Locais da Região Amazônica. São Paulo, 2008. Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- CARBONE, S. Modelagem de ozônio troposférico em regiões urbanas - aperfeiçoamento do módulo químico no modelo CIT. São Paulo, 2008. Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

- CARDOSO, M. F. Produção e transporte de ozônio troposférico em Cubatão, São Paulo. São Paulo, 1998. Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- CARMICHAEL, G. R., PETERS, L. K., KITADA, T. A second generation model for regional scale transport / chemistry / deposition. *Atmospheric Environment*, 20, 173-188, 1986.
- CARTER, W. P. L. Documentation of the SAPRC-99 chemical mechanism for VOC reactivity assessment volume 1 of 2 documentation text Final Report to California Air Resources Board. Air Pollution Research Center and College of Engineering Center for Environmental Research and Technology University of California, Riverside (Contract 92-329 and Contract 95-308 9252100-AP-RT17-001-FR) <<http://helium.ucr.edu/~carter/reactdat.htm>>, 2000.
- CARVALHO, V. S. B. Meteorologia da Qualidade do Ar no que tange as Concentrações de Ozônio e dos Óxidos de Nitrogênio na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica - UFRJ, COPPE.
- CARVALHO, V. S. B., ITIMURA, M. S., FREITAS, E. D. Avaliação dos resultados de concentração de ozônio troposférico simulados pelo modelo SPM-BRAMS sobre a RMSP. *Ciência e Natura*, v. Especi, 241-244, 2007.
- CARVALHO, V. S. B., MAZZOLI, C. R. R., FREITAS, E. D., ANDRADE, M. F., MARTINS, L. D. Análise Comparativa dos Resultados dos Modelos CIT, SPM-BRAMS e WRF/CHEM para o Período da Segunda Campanha de Ozônio em São Paulo. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo. **Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, São Paulo, SP, 2008.
- CARVALHO, V. S. B. & CAVALCANTI, P. M. P. S. Formação de ozônio troposférico na região de Macaé. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, XIII, 2004, Fortaleza. **Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Fortaleza, CE, 2004.
- CAVALCANTI, P. M. P. S. Avaliação dos Impactos Causados na Qualidade do Ar pela Geração Termelétrica, Rio de Janeiro, 2003. Dissertação de Mestrado da COPPE/PPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- CHANG, J. S., BROST, R. A., ISAKSEN, I. S. A., MADRONICH, S., MIDDLETON, P., STOCKWELL, W. R., WALCEK, C. J. A three-dimensional eulerian acid deposition model: physical concepts and formulation, *Journal of Geophysical Research*. 92 (D12): 14681-14700, 1987.
- CHEN, C. & COTTON, W. R. A one dimensional simulation of the stratocumulus capped mixed layer. *Boundary Layer Meteorology*, 25, 289-3321, 1983.

- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB).
Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2001. São Paulo, 2002.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Estudo do Comportamento do Ozônio na Região Metropolitana de São Paulo.** São Paulo, 2003.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB).
Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2003. São Paulo, 2004.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB).
Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2007. São Paulo, 2008.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB).
Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo – 2008. São Paulo, 2009.
- COMRIE, A. C., 1996. An all-season synoptic climatology of air pollution in the US–Mexico border region. *Professional Geographer*, 48 (3), 237–251.
- COMRIE, A. C. & YARNAL, B. Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations in Metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania. *Atmospheric Environment*, 26b (3), 301-312, 1992.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA), 2009. Conteúdo da Resolução CONAMA 18/1986. Acesso em 10 de março de 2009: <http://www.mma.gov.br/conama/> .
- COTTON, W. R., PIELKE SR. R. A., WALKO, R. L., LISTON, G. E., TREMBACK, C. J., JIANG, H., MCANELLY, R. L., HARRINGTON, J. Y., NICHOLLS, M. E., CARRIO, G. G., MCFADDEN, J. P., 2003. RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82, 5-29.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC), 2004. Boletim do Climanálise referente ao mês de Setembro de 2004. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>. Acesso em 12 de janeiro de 2010.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC), 2005. Boletim do Climanálise referente aos meses de fevereiro e março de 2005. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>. Acesso em 12 de janeiro de 2010.
- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC), 2006. Boletim do Climanálise referente ao mês de janeiro de 2006. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/>. Acesso em 12 de janeiro de 2010.

- CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (CPTEC), INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2007. BRAMS – First time user's guide (BRAMS VERSION 4.0).
- DEARDORFF, J. W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model, *Boundary Layer Meteorology*, 18, 495-527, 1980.
- DIEM, J. E. & COMRIE, A. C. Air quality, climate, and policy: a case study of ozone pollution in Tucson, Arizona. *Professional Geographer*, 53, 4, 469–491, 2001.
- DING, A., WANG, T., ZHAO, M., WANG, T., ZONGKAI, L. Simulation of sea-land breezes and a discussion of their implications on the transport of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China. *Atmospheric Environment*, 38, 6737-6750, 2004.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USA (EPA). Science algorithms of EPA MODELS-3 Community Multiscale Air Quality System, 1999.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USA (EPA). **Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants**. EPA 600/R-5/004aF, Volume I of III. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USA (EPA), 2005. Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule. Federal Register Vol.70, N.216. Disponível: http://www.epa.gov/scram001/guidance/guide/appw_05.pdf, 2006. Acesso em 06 de abril de 2010.
- ELBIR, T. Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment*, 37, 2149-2157, 2003.
- ELMINIR, H. K. Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of Total Environment*, 350, 225-237, 2005.
- FINLAYSON-PITTS, B. J. & PITTS, J. N. **Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere – Theory, Experiments, and Applications**. Academic Press, 2000.
- FREITAS, E. D. Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes. São Paulo, 2003, 156p. Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- FREITAS, E. D. Mudanças no uso do solo e seus impactos nos padrões atmosféricos e na qualidade do ar. São Paulo, 2009, 102p. Tese de Livre Docência – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

- FREITAS, E. D., ANDRADE, M. F., SILVA DIAS, P. L. Análise das concentrações de ozônio em superfície e sua possível relação com dados de altura da camada limite obtida através do Sodar Doppler. In: *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 11, Rio de Janeiro, 2000.
- 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*, 39, 34, 6352-6361, 2005.
- 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*. 122(1), 43-65, 2007.
- FREITAS, S. R., DIAS, M. A. S., DIAS, P. L. S. Modeling the convective transport of trace gases by deep and moist convection. *Hybrid Methods in Engineering*, USA, v. 2, n. 3, p. 317, 2000.
- FREITAS, S. R., LONGO, K., RODRIGUES, L. F. Modelagem numérica da composição química da atmosfera e seus impactos no tempo, clima e qualidade do ar. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n. 2, 188-207, 2009.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE ZUSAMMENARBEIT GMBH (FEEMA/GTZ), 1995. **Qualidade do ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro. 76 p.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA), 2004. **Inventário de Fontes de Emissão de Poluentes do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro**.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA), 2008. **Relatório de qualidade do ar no Estado do Rio de Janeiro – 2007**. Rio de Janeiro, 2008.
- FUNDAÇÃO CIDE. Centro de Informações e dados do Rio de Janeiro, 2008. Disponível em <<http://www.cide.rj.gov.br>>. Acesso em 01 de agosto de 2008.
- GALVEZ, O. Synoptic-scale transport of ozone into Southern Ontario. *Atmospheric Environment*, 41, 8579-8595, 2007.
- GOUVÊA, M. L. Cenários de impacto das propriedades da superfície sobre o conforto térmico humano na cidade de São Paulo. São Paulo, 2007. Dissertação de

- Mestrado, Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- GRELL, G. A., Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterization. *Monthly Weather Review*, 121, 764-787, 1993.
- GRELL, G.A., PECKHAM, S.E., SCHMITZ, R., MCKEEN, S.A., FROST, G., WILLIAM, C., SKAMAROCK, W.C., EDER, B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*, 39, 6957-6975, 2005.
- HARRINGTON, J. Y., The effects of radiative and microphysical processes on simulated warm and transition season arctic stratus. PhD Thesis, Colorado State University, Fort Collins, 1997.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Produto Interno Bruto dos Municípios 2003-2007. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2009. Acesso em 20 de março de 2010.
- INMET Departamento Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Normais Climatológicas. Brasília, 84 p. 1992.
- JACOB, D.J. **Introduction to Atmospheric Chemistry**. Princeton University Press, 1999, 267 pp.
- JACOBSON, M. Z. Fundamentals of Atmospheric Modeling. Cambridge University Press, USA, 1999, 656 pp.
- JEFRIES, H. E. **Chapter 5: Photochemical Air Pollution**. In: Air Chemistry, Global Changes and Air Pollution, 1999.
- JENKIN, M.E., DAVIES, T. J., STEDMAN, J. R. The origin and day-of-week dependence of photochemical ozone episodes in the UK. *Atmospheric Environment*, 36, 999-1013, 2002.
- KALTHOFF, N., KOTTMEIER, C., THÜRAUF, J., CORSMEIER, U., SAÏD, F., FRÉJAFON, E., PERROS, P.E. Mesoscale circulation systems and ozone concentrations during ESCOMPTE: a case study from IOP2b. *Atmospheric Research*, 74, 355-380, 2005.
- KLEMP, D., MANNSCHRECK, K., PÄTZ, H.-W., HABRAN, M., MATUSKA, P., SLEMR, F. Determination of anthropogenic emission ration in the Augsburg area from concentration ratios: results from long-term measurements. *Atmospheric Environment*, 36, S61-S80, 2002.
- KUO, H. L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 1232-1240, 1974.

- LAMB, R. G. *A Regional Scale (1000km) Model of Photochemical Air Pollution; Part I. Theoretical Formulation*; U.S. Environmental Protection Agency: Research Triangle Park, N.C., 1983; EPA-600/13-83-035. PB83-207688, 1983.
- LIMA/COPPE/UFRJ, FEEMA. Avaliação do Programa de Inspeção e Manutenção de veículos em uso do Rio de Janeiro, 2006.
- LOUREIRO, L. N. Panorâmica sobre emissões atmosféricas. Estudo de caso: avaliação do inventário emissões atmosféricas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro para fontes móveis. Rio de Janeiro, 2005, 171p. Tese de Doutorado da COPPE/UFRJ – Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MAHRER, Y. & PIELKE, R. A. A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Beitrag zur Physik der Atmosphere*, 50, 98-113, 1977.
- MARTINS, M. H. R. B., ANAZIA, R., GUARDANI, M. L. G., LACAVA, C. I. V., ROMANO, J., SILVA, S. R. Evolution of air quality in the São Paulo Metropolitan Area and its relation with public policies. *International Journal of Environment and Pollution* 22, 4, 430-440, 2004.
- MARTINS, J. A. Efeito dos núcleos de condensação na formação de nuvens e o desenvolvimento da precipitação na região amazônica durante a estação seca. São Paulo, 2006, 179 f. Tese de Doutorado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- MARTINS, L. D. Estimativa do impacto das emissões de hidrocarbonetos pela vegetação na formação de oxidantes fotoquímicos em São Paulo. São Paulo, 2002. Dissertação de Mestrado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- MARTINS, L. D. Sensibilidade da Formação de Ozônio Troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 2006, 198 p. São Paulo. Tese de Doutorado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- MARTINS, L. D. & ANDRADE, M. F. Ozone formation potentials of volatile organic compounds and ozone sensitivity to their emission in the megacity of São Paulo, Brazil. *Water, Air, & Soil Pollution*, DOI 10.1007/s11270-008-9740-x, 2008.
- MARTINS, L. D., MAZZOLI, C. R. R., MARTINS, J. A., FREITAS, E. D., HALLAK, R., SILVA JUNIOR, R. S., ANDRADE, M. F. Modelagem da qualidade do ar da megacidade de São Paulo utilizando o modelo on-line WRF/CHEM. In: V Congresso Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria. Anais do V Congresso Brasileiro de Micrometeorologia, 2007.

- MASSAMBANI, O. & ANDRADE, M. F. Seasonal behavior of tropospheric ozone in the Sao Paulo (Brazil) metropolitan area. *Atmospheric Environment*, 28, 19, 3165-3169, 1994.
- MASSON, V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357-397, 2000.
- MAZZOLI, C. R. R., CARVALHO, V. S. B., FREITAS, E. D., ANDRADE, M. F., MARTINS, L. D., MARTINS, J. A. Utilização de Métodos Estatísticos para Avaliação da Acurácia dos Resultados de Simulações Numéricas da Concentração de Ozônio Gerados pelos Modelos CIT, SPM-BRAMS e WRF/CHEM. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo. Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008.
- MCRAE, G., GOODIN, W., SEINFELD, J. H. Development of a second-generation mathematical model for urban air pollution- I - model formulation. *Atmospheric Environment*, 16, 4, 679-696, 1982.
- MCRAE, G. J., RUSSEL, A. G., HARLEY, R. Installation and Operation Manual CIT Photochemical Airshed Model. California Institute of Technology Pasadena, California, 1992.
- MELLIOS, G., VAN AASLT, R., SAMARAS, Z. Validation of road traffic urban emission inventories by means of concentration data measured at air quality monitoring stations in Europe. *Atmospheric Environment*, 40, 7362-7377, 2006.
- MELLOR, G. L. & YAMADA, T. Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysics*, 20, 4, 851-875, 1982.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA), LABORATÓRIO INTERDISCIPLINAR DE MEIO AMBIENTE (LIMA/COPPE) E FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA). Avaliação do Programa de Inspeção e Manutenção de veículos em uso do Rio de Janeiro, 2002.
- MINUZZI, R. B., SEDIYAMA, G. C., BARBOSA, E. M., MELO JÚNIOR, J. C. F. Climatologia do comportamento do período chuvoso da região Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22, 338-346, 2007.
- MIRANDA, R. M. Caracterização físico-química e propriedades ópticas do aerossol urbano da Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 2001. Tese de Doutorado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- MORRIS, R. E. & MYERS, T. C. "User's Guide for the Urban Airshed Model. Volume I: User's Manual for UAM (CB -IV)" prepared for the U.S. Environmental Protection

- Agency (EPA- 450/4-90-007a), Systems Applications International, San Rafael, CA. 1990.
- OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES. Relatório Final: Tendências na organização social do território das metrópoles, no período 1991-2000, 2009a. Disponível em: <http://www.observatoriodasmetrolopes.ufri.br/relat0082009.pdf>. Acesso em Novembro de 2009.
- OBSERVATÓRIO DAS METRÓPOLES. Como anda São Paulo? 2009b. Disponível: http://www.observatoriodasmetrolopes.ufri.br/Vol3_como_anda_sao_paulo.pdf. Acesso em Novembro de 2009.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE (OMS) WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global Update 2005. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02, 2006.
- PETERS, L. K., BERKOWITZ, C. M., CARMICHAEL, G. R., EASTER, R. C., FAIRWEATHER, G., GHAN, S. J., HALES, J. M., LEUNG, L. R., PENNELL, W. R., POTRA, F. A., SAYLOR, R. D., TSANG, T. T. The Current State and Future Direction of Eulerian Models in Simulating the Tropospheric Chemistry and Transport of Trace Species: A Review. *Atmospheric Environment*, 29, 2, 189-222, 1995.
- PIELKE, R. A. SR. Mesoscale meteorological modeling. Second Edition. International Geophysics Series, vol 78. *Academic Press*, 2002, 676 p.
- PIELKE, R. A., COTTON, W. R., WALKO, L. R., TREMBACK, C. J., LYONS, W. A., GRASSO, L. D., NICHOLLS, M. E., MORAN, M. D., WESLEY, D. A., LEE, T. J., COPELAND, J. H. A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 49, 69-91, 1992.
- PIRES-NETO, R. C., SALDIVA, P. H. N., DOLHNIKOFF, M. Efeitos da Poluição Atmosférica no Epitélio Respiratório das Vias Aéreas Superiores. Effects of Air Pollution on the Upper Airways Respiratory Epithelium. *Revista Brasileira de Medicina* (Rio de Janeiro), 2, 3-9, 2007.
- PONT, V. & FONTAN, J. Comparison between weekend and weekday ozone concentration in large cities in France. *Atmospheric Environment*, 35, 1527-1535, 2001.
- RAO, S.T., KU, J.-Y., BERNAN, S., ZHANG, K., MAO, H. Summertime characteristics of the atmospheric boundary layer and relationships to ozone levels over the eastern United States. *Pure and Applied Geophysics* 160, 21–55, 2003.

- ROSENTHAL, J. S., HELVEY, R. A., BATTALINO, T. E., FISK, C., GREIMAN, P. W. Ozone transport by mesoscale and diurnal wind circulations across southern California. *Atmospheric Environment*, 37, 2, S51-S71, 2003.
- RYAN, W. F., PIETY, C. A., LUEBEHUSEN, E. D. Air Quality Forecasts in the Mid-Atlantic Region: Current Practice and Benchmark Skill. *Weather and Forecasting*, 15, 1999.
- RYAN, W. F. & DICKERSON, R. R. Regional transport of pollutants and implications for 8-hour ozone non-attainment areas in Maryland. Report prepared for National Governor's Conference, 2000, 29pp.
- SALDIVA, P. H. N. Editorial: Nossos doentes pneumopatas e a poluição atmosférica. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 34, 1, 1, 2008.
- SÁNCHEZ-CCOYLLO, O., YNOUE, R. Y., MARTINS, L. D., ANDRADE, M. F. Impacts of ozone precursor limitation and meteorological variables on ozone concentration in Sao Paulo, Brazil. *Atmospheric Environment*, 40, S552-S562, 2006.
- SANCHEZ-CCOYLLO, O. R., MARTINS, L. D., YNOUE, R. Y., ANDRADE, M. F. The impact on tropospheric ozone formation on the implementation of a program for mobile emissions control: a case study in São Paulo, Brazil. *Environmental Fluid Mechanics* (London), 7, 95-119, 2007.
- SANTOS, U. P., TERRA FILHO, M., LIN, C., PEREIRA, L. A. A., VIEIRA, T. C., SALDIVA, P. H. N., BRAGA, A. L. F. Cardiac Arrhythmia Emergency Room Visits and Environmental Air Pollution in São Paulo, Brazil. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 62, 267-272, 2008.
- SEINFELD, J.H. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution. New York: John Willey & Sons, 1986.
- SHAN, W., YONGQAN, Y., JIANDA, Z., JI, X., DENG, X. Surface ozone and meteorological condition in a single year at an urban site in central-Easter China. *Environmental Monitoring and Assessment*, DOI 10.1007/s10661-008-0255-0, 2006.
- SILLMAN, S. The relation between ozone, NO_x, and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment*, 33, 1821-1845, 1999.
- SMAGORINSKY, J. General circulation experiments with the primitive equations: 1. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91, 99-164, 1963.
- SOUZA, E. P. & DA SILVA, E. M. Impacto da implementação de uma parametrização de convecção rasa em um modelo de mesoescala: descrição e testes de sensibilidade do esquema. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 18, 1, 33-42, 2003.

- TOON, O. B., TURCO, R. P., WESTPHAL, D., MALONE, R., LIU, M. S. A multidimensional model for aerosols: Description of computational analogs. ***Journal of Atmospheric Sciences***, 45, 2123-2143, 1988.
- ULKE, A. G. & ANDRADE, M. F. Modeling urban air pollution in São Paulo, Brazil: sensitivity of model predicted concentrations to different turbulence parameterizations. ***Atmospheric Environment***, 35, 1747-1763, 2001.
- VANDERSTRAETEN, P., WILLETTE, F., DUMONT, G. Working day versus non-working day ambient ozone concentrations in Brussels and in Belgium. In: Proceedings of EUROTRAC Symposium '96, Vol. 1. Computational Mechanics Publications, Southampton, 1996.
- VECCHI, R. & VALLI, G. Ozone assessment in the southern part of the Alps. ***Atmospheric Environment***, 33, 97-109, 1999.
- VENDRASCO, E. P., SILVA DIAS, P. L., FREITAS, E. D. Estudo do impacto na concentração de ozônio causado pela alteração na emissão de NOx e COV. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, SC. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, SC, 2006.
- VUKOVICH, F.M. & GUINNUP, D. An Investigation of the Meteorological Effects on Ozone during the 1995 OTAG Episode in the Northeast Corridor. Proceedings of the 91st Annual Meeting and Exhibition of the A&WMA. 14–18 June 1998, San Diego, CA, 1998.
- VUKOVICH, F. M. & SHERWELL, J. An examination of the relationship between certain meteorological parameters and surface ozone variations in the Baltimore–Washington corridor. ***Atmospheric Environment***. 37, 971-981, 2003.
- VUKOVICH, F.M., SHERWELL, J., WAYLAND, R. Characteristics of ozone in the Baltimore-Washington area established from 1-hour average observations. ***Journal of Air and Waste Management Association***, 49, 794–803, 1999.
- WALKO, R.L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization Part I: the single moment scheme. ***Atmospheric Research***, 38, 29 – 62, 1995.
- WALKO, R. L., BAND, L. E., BARON, J., KITTEL, T. G. F., LAMMERS, R., LEE, T. J., OJIMA, D., PIELKE, R. A., TAYLOR, C., TAGUE, C., TREMBACK, C. J., VIDALE, P. L. Coupled atmosphere-biophysics-hydrology models for environmental modeling. ***Journal of Applied Meteorology***, 39, 6, 931-944, 2000.
- WESTPHAL, D. L., TOON, O. B., CARLSON, T. N. A case study of mobilization and transport of Saharan Dust. ***Journal of Atmospheric Sciences***, 45, 2145-2175, 1988.

- 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***, 96, 22379-22400, 1991.
- WISE, E. K. & COMRIE, A. C. Meteorologically adjusted urban air quality trends in the Southwestern United States. ***Atmospheric Environment***, 39, 2969-2980, 2005.
- WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences, *Academic Press, San Diego*. 1995, 467 p.
- YNOUE, R. Y. O Impacto do uso de campos meteorológicos diagnósticos e prognósticos na produção e dispersão dos oxidantes fotoquímicos em São Paulo, São Paulo, 1999. Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico, Geofísico e de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- ZACHARIAS, D. C. Avaliação da acurácia dos modelos fotoquímicos eulerianos UAM e CIT na representação do comportamento dos compostos oxidantes fotoquímicos em Sorocaba. São Paulo, 2007. Dissertação de Mestrado do Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.

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](#)