

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia

Caroline Rosario Mazzoli da Rocha

Estudo Numérico da Influência das Mudanças Climáticas e das
Emissões Urbanas no Ozônio Troposférico da Região Metropolitana
de São Paulo

São Paulo
2013

Caroline Rosario Mazzoli da Rocha

Estudo Numérico da Influência das Mudanças Climáticas e das
Emissões Urbanas no Ozônio Troposférico da Região Metropolitana
de São Paulo

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

Tese de Doutorado apresentada ao 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.
Orientadora: Profa. Dra. Maria de Fatima Andrade.

São Paulo

2013

AGRADECIMENTOS

Primeiramente eu gostaria de agradecer aos meus pais que sempre me apoiaram em todas as minhas decisões e sempre colocaram o estudo a frente de tudo. Tenho certeza que as pessoas mais orgulhosas nesse momento são eles e, que, de alguma forma estarão sempre por perto dando toda força e amor que eu preciso pra ir sempre além.

Em segundo lugar quero muito agradecer a minha família, a família que eu formei e que é essencial pra mim. Meus dois príncipes são pessoas incríveis. Meu filhotinho Miguel é uma criança muito querida, que me fez conhecer um amor que eu não sabia que existia. O Edi é a pessoa que me deu o Miguel e muito mais que isso. Seu amor e carinho foram indispensáveis nesse processo. Sem ele eu não teria conseguido, porque são muitas atividades diferentes e todas demandam atenção e muita dedicação. É por eles que tudo vale a pena.

À Profa. Maria de Fatima, minha orientadora, pelas calmas e sábias palavras durante todo o tempo e também pelo apoio, confiança e amizade desde o início do doutorado e à sua família, que é mais que especial.

Aos professores do IAG pelos ensinamentos durante as disciplinas e seminários, principalmente ao Professor Gandu, que foi meu relator e membro da minha banca de qualificação.

Aos amigos do IAG pelo incentivo e companheirismo, em especial a alguns que fizeram parte da minha turma: Débora Brum, Karin Koop, Renata Tedeski, Ivan Saraiva, Diego Simões e Saulo Costa. Outros também que já estavam aqui quando cheguei, mas que não foram menos especiais: Taciana Toledo, Ricardo Hallak,

América Murguia e Tatiana Jorgetti. E outros ainda que eu conheci na etapa final e que contribuíram com ótimas dicas e discussões: Angel Vara, Cinthia S. Arellano e Camila Homann.

Aos amigos e companheiros de trabalho Leila D. Martins e Jorge A. Martins, pelo incentivo às publicações e ao trabalho em geral.

Aos amigos cariocas que estiveram presentes em alguns momentos, e mesmo de longe ajudaram e torceram pelo sucesso desse trabalho e, em especial à minha grande amiga Vanessa Silveira Barreto Carvalho, que participou do desenvolvimento do trabalho e foi quem veio junto do Rio comigo para se aventurar em São Paulo. Sempre estivemos unidas e dando força uma a outra.

Ao pessoal do Laboratório de Análise dos Processos Atmosféricos (LAPAt) pelo suporte no desenvolvimento do trabalho, pelos momentos de estudo, apoio com o modelo, com os equipamentos e os momentos de descontração.

Ao pessoal do Laboratório MASTER, pela ajuda no fornecimento dos dados e ajudas com a instalação do modelo, em especial ao Bruno Biazeto e ao Pedro “Linha” e mais especial ainda ao Enzo Todesco que me ajudou muito os dados do CCSM3.

A toda Gerência Regional de Navegação Aérea da INFRAERO pelo apoio nos momentos em que eu mais precisei para concluir o trabalho. A minha coordenadora, Myrian e ao gerente Leonir Pelati, pela liberação pelo tempo que eu precisava para me dedicar somente à tese e, especialmente às minhas grades amigas Ângela, Rosana e Josi, que acreditaram sinceramente em mim e torceram para que tudo desse certo.

Ao Departamento de Hidrografia e Navegação (DHN) pelo fornecimento das cartas sinóticas de superfície.

À Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), pela concessão dos dados da rede automática de monitoramento.

À Seção Técnica de Serviços Meteorológicos do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP por ter cedido os dados medidos na Estação Meteorológica do IAG.

Especial agradecimento aos órgãos de fomento CNPq (processo nº143317/2008-3) e CAPES pelo auxílio financeiro.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1. MEGACIDADES E A POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	23
1.2. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC)	28
1.2.1. CENÁRIOS DE EMISSÃO	29
1.3. REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO	32
1.4. MODELAGEM NUMÉRICA	40
1.5. OBJETIVO	42
2. COMPORTAMENTO DO OZÔNIO TROPOSFÉRICO	44
2.1. EFEITO DAS CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS NA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES	51
2.2. O MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR NO ESTADO DE SÃO PAULO	53
3. O MODELO WRF/CHEM.....	56
4. PERÍODO DE ESTUDO	63
4.1. CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA	63
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA QUALIDADE DO AR.....	70
5. METODOLOGIA	74
5.1. DEFINIÇÃO DAS SIMULAÇÕES.....	74
5.1.1. CASO 1.....	78
5.1.2. CASO 2.....	79
5.1.3. CASO 3.....	82
5.1.4. CASO 4.....	84
5.1.5. CASO 5.....	85
5.1.6. CASO 6.....	88
5.2. CONFIGURAÇÃO DO MODELO	88
5.3. CONSTRUÇÃO DOS ARQUIVOS DE EMISSÃO	90
5.4. AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DA SIMULAÇÃO.....	94
6. RESULTADOS	96

6.1. CASO 1.....	96
6.2. CASO 2.....	108
6.3. CASO 3.....	115
6.4. CASO 4.....	121
6.5. SUMÁRIO COMPARATIVO ENTRE OS CASOS 2, 3 E 4	126
6.6. CASO 5.....	128
6.7. CASO 6.....	139
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - GRUPOS E FAMÍLIAS DOS CENÁRIOS PROPOSTOS NO SRES.	31
FIGURA 2 - ILUSTRAÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS NO SRES.	31
FIGURA 3 - REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	32
FIGURA 4 - EXPANSÃO DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO PREVISTA PARA O ANO DE 2030.....	33
FIGURA 5 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (EM MM) MÉDIA MENSAL DE 1961 A 1990.	34
FIGURA 6 - TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS (EM °C) MÉDIAS MENSAIS DE 1961 A 1990.....	35
FIGURA 7 - EVOLUÇÃO DOS LIMITES DE EMISSÃO DOS POLUENTES DO PROCONVE PARA VEÍCULOS LEVES (A), VEÍCULOS PESADOS (B) E DO PROMOT (C).....	39
FIGURA 8 - NÚMERO DE DIAS, POR MÊS, COM ULTRAPASSAGEM AO PADRÃO NACIONAL DE QUALIDADE DO AR (PNQA) PARA O OZÔNIO (~83 PPB OU 160 MG.M ⁻³) PARA AS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA CETESB EM SÃO PAULO ENTRE OS ANOS DE 2000 A 2011.....	46
FIGURA 9 - NÚMERO DE DIAS, POR ANO, COM ULTRAPASSAGEM AO PADRÃO NACIONAL DE QUALIDADE DO AR (PNQA) PARA O OZÔNIO (~83 PPB OU 160 MG.M ⁻³) PARA AS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA CETESB EM SÃO PAULO ENTRE OS ANOS DE 2000 A 2011.....	47
FIGURA 10 - ISOPLETAS DE OZÔNIO.	51
FIGURA 11 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES AUTOMÁTICAS DE MONITORAMENTO DA CETESB NA RMSP.	55
FIGURA 12 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES MANUAIS DE MONITORAMENTO DA CETESB NA RMSP.....	55
FIGURA 13 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE MODELAGEM WRF VERSÃO 3.....	58
FIGURA 14 - SISTEMAS FRONTAIS QUE ATINGIRAM O PAÍS (ACIMA DA LINHA HORIZONTAL VERMELHA) NO MÊS DE NOVEMBRO DE 2011. FONTE: CPTEC-INPE.	64

FIGURA 15 - IMAGENS DO SATÉLITE GOES-12 ÀS 1500Z PARA O PERÍODO DE (A) 08, (B) 09, (C) 10, (D) 11, (E) 12, (F) 13, (G) 14 E (H) 15 DE NOVEMBRO DE 2011. FONTE: CPTEC-INPE.....	65
FIGURA 16 - CARTAS SINÓTICAS ÀS 1200Z DOS DIAS (A) 10 E (B) 11 E (C) 12 DE NOVEMBRO DE 2011.....	67
FIGURA 17 - RADIAÇÃO SOLAR PARA O NO PERÍODO DE 8 A 16 DE NOVEMBRO DE 2011 NA ESTAÇÃO LOCALIZADA NO MIRANTE DE SANTANA.....	68
FIGURA 18 - PRECIPITAÇÃO ACUMULADA (MM) NO PERÍODO DE 8 A 16 DE NOVEMBRO NA ESTAÇÃO LOCALIZADA NO MIRANTE DE SANTANA.....	69
FIGURA 19 - TEMPERATURA DIÁRIA NA ESTAÇÃO DO INMET LOCALIZADA NO MIRANTE DE SANTANA DURANTE O PERÍODO DE 8 A 16 DE NOVEMBRO (LINHA AZUL, EM °C) E UMIDADE (LINHA VERMELHA, EM %) REGISTRADA NA ESTAÇÃO.....	70
FIGURA 20 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA HORÁRIA DE OZÔNIO (EM $\mu\text{G}\cdot\text{M}^{-3}$) NA ESTAÇÃO DA CETESB LOCALIZADA NO IPEN - USP PARA O MÊS DE NOVEMBRO DE 2011.....	71
FIGURA 21 - ANOMALIA DE TEMPERATURA À SUPERFÍCIE PARA OS CENÁRIOS DEFINIDOS PELO IPCC.....	77
FIGURA 22 - CAMPO DE TEMPERATURA PROJETADO PELO MODELO CCSM3 PARA O ANO DE 2011 PARA O (A) CENÁRIO B1 E (B) CENÁRIO A2.....	81
FIGURA 23 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TEMPERATURA (°C) PROJETADO PELO MODELO CCSM3 PARA O ANO DE 2011 PARA O CENÁRIO B1 (A) E CENÁRIO A2 (B) PARA O PONTO CENTRAL DA GRADE DEFINIDA PARA AS SIMULAÇÕES.....	82
FIGURA 24 - CAMPO ESPACIAL DE TEMPERATURA PROJETADO PARA (A) 2020 E (B) EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TEMPERATURA PARA O MESMO ANO PARA O CENTRO DA RMSP E PERÍODO DE ESTUDO. AMBAS PROVENIENTES DO MODELO CCSM3 PARA O CENÁRIO A2.....	83
FIGURA 25 - CAMPO ESPACIAL DE TEMPERATURA PROJETADO PARA (A) 2050 E (B) EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TEMPERATURA PARA O MESMO ANO PARA O CENTRO DA RMSP E	

PERÍODO DE ESTUDO. AMBAS PROVENIENTES DO MODELO CCSM3 PARA O CENÁRIO A2.....	84
FIGURA 26 - CAMPO DE TEMPERATURA PROJETADO PARA 2020 (A) E 2050 (C), EVOLUÇÃO TEMPORAL DA VARIÁVEL PARA 2020 (B) E 2050 (D) PELO MODELO CCSM3 PARA O CENÁRIO B1.....	85
FIGURA 27 - GRADES UTILIZADAS NAS SIMULAÇÕES, ONDE O DOMÍNIO MAIOR É REPRESENTADO POR D01 E O MENOR POR D02.....	89
FIGURA 28 - DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL (EM HORA LOCAL) DAS EMISSÕES NO WRF/CHEM...92	
FIGURA 29 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS EMISSÕES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO) NA GRADE DE 9 KM (A) E 3 KM (B).....	93
FIGURA 30 - EVOLUÇÕES TEMPORAIS DE TEMPERATURA OBTIDAS DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR DE PINHEIROS (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADAS COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011.....	97
FIGURA 31 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS NA ESTAÇÃO DO IAG LOCALIZADA NO PARQUE DA ÁGUA FUNDA PARA O MÊS DE NOVEMBRO DE 2011.....	97
FIGURA 32 - PRECIPITAÇÃO MEDIDA NA ESTAÇÃO CLIMATOLÓGICA DO IAG LOCALIZADA NO PARQUE DA ÁGUA FUNDA PARA O MÊS DE NOVEMBRO DE 2011.....	98
FIGURA 33 - CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO, EM PPB, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR DE PINHEIROS (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011.	99
FIGURA 34 - CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO, EM PPB, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR LOCALIZADA NO PARQUE DO IBIRAPUERA (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011...100	
FIGURA 35 - CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO, EM PPB, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR LOCALIZADA NO IPEN - USP (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011.....	100

FIGURA 36 - CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO, EM PPB, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR LOCALIZADA EM MAUÁ (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011.	101
FIGURA 37 - CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO, EM PPB, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR LOCALIZADA EM SANTANA (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011.	102
FIGURA 38 - CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO, EM PPB, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR LOCALIZADA NA MOOCA (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011.	102
FIGURA 39 - CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO, EM PPB, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR LOCALIZADA EM DIADEMA (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011.	103
FIGURA 40 - CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO, EM PPM, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR LOCALIZADA EM PINHEIROS (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011...	104
FIGURA 41 - CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO, EM PPM, OBTIDA DA ESTAÇÃO DE QUALIDADE DO AR LOCALIZADA NO IPEN - USP (LINHA AZUL CLARO) E SIMULADA COM O WRF/CHEM (LINHA AZUL ESCURO) PARA O PERÍODO DE 8 A 15 DE NOVEMBRO DE 2011...	104
FIGURA 42 - EVOLUÇÃO DAS MÉDIAS DE CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO E VENTO SIMULADAS PELO WRF/CHEM PARA AS HORAS MARCADAS ACIMA DE CADA FIGURA.	107
FIGURA 43 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TEMPERATURA SIMULADA PARA O ANO DE 2011 PARA O CENÁRIO B1 (LINHA VERDE) E CENÁRIO A2 (LINHA PRETA) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	109
FIGURA 44 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO SIMULADAS PARA O ANO DE 2011 PARA O CENÁRIO A2 (LINHA PRETA) E B1 (LINHA VERDE) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.	110

FIGURA 45 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE COV (A) E NO _x (B) SIMULADAS PARA O ANO DE 2011 PARA O CENÁRIO A2 (LINHA PRETA) E B1 (LINHA VERDE) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	111
FIGURA 46 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRESSÃO EM SUPERFÍCIE PARA O CENÁRIO SRES B1 (A) E SRES A2 (B) SIMULADA PARA O ANO DE 2011 PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.	112
FIGURA 47 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ALTURA DA CAMADA LIMITE (EM METROS) PARA O CENÁRIO SRES B1 SIMULADA PARA O ANO DE 2011 PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.	113
FIGURA 48 - PERFIL DE CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO (ESCALA DE CORES, EM PPB) E ALTURA DA CAMADA LIMITE (LINHA VERDE, EM M) PARA O CENÁRIO SRES B1 SIMULADA PARA O ANO DE 2011 PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	114
FIGURA 49 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TEMPERATURA SIMULADA PARA OS ANOS DE 2020 (LINHA VERDE) E 2050 (LINHA PRETA) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.	116
FIGURA 50 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO SIMULADAS PARA O CENÁRIO A2 PARA OS ANOS DE 2020 (LINHA VERDE) E 2050 (LINHA PRETA) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.	117
FIGURA 51 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRESSÃO EM SUPERFÍCIE (EM PA) SIMULADAS PARA O CENÁRIO SRES A2 PARA OS ANOS DE 2020 (A) E 2050 (B) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	118
FIGURA 52 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ALTURA DA CAMADA LIMITE (EM METROS) SIMULADA PARA O CENÁRIO SRES A2 PARA OS ANOS DE 2020 (A) E 2050 (B) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	119
FIGURA 53 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE COV (A) E NO _x (B) SIMULADAS PARA OS ANOS DE 2020 (LINHA VERDE) E 2050 (LINHA PRETA) PARA O CENÁRIO A2 PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.	120

FIGURA 54 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TEMPERATURA SIMULADA PARA OS ANOS DE 2020 (LINHA VERDE) E 2050 (LINHA PRETA) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, PARA O CENÁRIO SRES B1.....	122
FIGURA 55 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO SIMULADAS PARA OS ANOS DE 2020 (LINHA VERDE) E 2050 (LINHA PRETA) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO, PARA O CENÁRIO SRES B1.....	123
FIGURA 56 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PRESSÃO EM SUPERFÍCIE (EM PA) SIMULADAS PARA O CENÁRIO SRES B1 PARA OS ANOS DE 2020 (A) E 2050 (B) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	123
FIGURA 57 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA ALTURA DA CAMADA LIMITE (EM METROS) SIMULADA PARA O CENÁRIO SRES A2 PARA OS ANOS DE 2020 (A) E 2050 (B) PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.....	124
FIGURA 58 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE COV (A) E NO _x (B) SIMULADAS PARA OS ANOS DE 2020 (LINHA VERDE) E 2050 (LINHA PRETA) PARA O CENÁRIO B1 PARA O PONTO CENTRAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO.	125
FIGURA 59 - EVOLUÇÃO DAS MÉDIAS DA CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO E VENTO SIMULADO PELO WRF/CHEM PARA AS HORAS MARCADAS ACIMA DE CADA FIGURA PARA O ANO DE 2020.....	129
FIGURA 60 - EVOLUÇÃO DAS MÉDIAS DA CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO E VENTO SIMULADAS PELO WRF/CHEM PARA AS HORAS MARCADAS ACIMA DE CADA FIGURA PARA O ANO DE 2050.....	131
FIGURA 61 - DIFERENÇA ENTRE OS CAMPOS MÉDIOS DE CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO SIMULADOS PARA 2011 E 2020.....	133
FIGURA 62 - DIFERENÇA ENTRE OS CAMPOS MÉDIOS DE CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO SIMULADOS PARA 2011 E 2050.....	134
FIGURA 63 - DIFERENÇA ENTRE OS CAMPOS MÉDIOS DE CONCENTRAÇÃO DE OZÔNIO SIMULADOS PARA 2020 E 2050.....	134

FIGURA 64 - DIFERENÇA ENTRE OS CAMPOS MÉDIOS (EM PPB) DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (A) E COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS (B) SIMULADOS PARA 2020 E 2050.	135
FIGURA 65 - CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO SIMULADAS PARA A ESTAÇÃO DE PINHEIROS PARA OS ANOS DE 2011 (LINHA AZUL ESCURO), 2020 (LINHA AZUL CLARO) E 2050 (LINHA VERDE).....	136
FIGURA 66 - CONCENTRAÇÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO SIMULADAS PARA A ESTAÇÃO DE PINHEIROS PARA OS ANOS DE 2011 (LINHA AZUL ESCURO), 2020 (LINHA AZUL CLARO) E 2050 (LINHA VERDE).....	137
FIGURA 67 - CONCENTRAÇÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS SIMULADOS PARA A ESTAÇÃO DE PINHEIROS PARA O ANO DE 2011.....	138
FIGURA 68 - CONCENTRAÇÕES DE COMPOSTOS ORGÂNICOS VOLÁTEIS SIMULADOS PARA A ESTAÇÃO DE PINHEIROS PARA OS ANOS DE 2020 (LINHA AZUL CLARO) E 2050 (LINHA VERDE).....	138
FIGURA 68 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DE TEMPERATURA (°C) SIMULADA PELO WRF/CHEM PARA OS CENÁRIOS SRES B1 (LINHA VERDE) E SRES A2 (LINHA PRETA).....	140
FIGURA 69 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA RADIAÇÃO SOLAR ($W.m^{-2}$) NA SUPERFÍCIE SIMULADA PELO WRF/CHEM PARA OS CENÁRIOS SRES B1 (A) E SRES A2 (B).....	141
FIGURA 70 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO SIMULADAS PELO WRF/CHEM PARA OS CENÁRIOS SRES B1 (LINHA VERDE) E SRES A2 (LINHA PRETA).....	141
FIGURA 71 - CORTE VERTICAL DAS CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO (EM PPB) SIMULADAS PELO WRF/CHEM PARA OS CENÁRIOS SRES B1 (A) E SRES A2 (B) PARA O PONTO CENTRAL DA RMSP.....	142
FIGURA 72 - DIFERENÇA ESPACIAL DAS CONCENTRAÇÕES DE OZÔNIO MÉDIAS (PPB) SIMULADAS PELO WRF/CHEM PARA OS CENÁRIOS SRES B1 E SRES A2.	143

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PADRÕES NACIONAIS DE QUALIDADE DO AR (RESOLUÇÃO CONAMA Nº03/90).....	45
TABELA 2 - ÍNDICE DA QUALIDADE DO AR PARA O OZÔNIO DE ACORDO COM A CETESB PARA OS DIAS CORRESPONDENTES AO PERÍODO DE ESTUDO. VALORES EM $MG \cdot M^{-3}$	72
TABELA 3 - SUMÁRIO DAS SIMULAÇÕES	75
TABELA 4 - PROPORÇÃO ESTIMADA (%) DAS EMISSÕES PARA OS ANOS DE 2020 E 2050 PARA O MP, CO, NOX E HIDROCARBONETOS (HC), COM BASE NO ANO DE 2010.	87
TABELA 5 - PARAMETRIZAÇÕES E ESQUEMAS UTILIZADOS NO WRF/CHEM.....	89
TABELA 6 - ÍNDICES ESTATÍSTICOS CALCULADOS PARA O CASO 1.	106
TABELA 7 - MÉDIAS ESPACIAIS E TEMPORAIS CALCULADAS COM OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 2 PARA ALGUMAS VARIÁVEIS SELECIONADAS.....	115
TABELA 8 - MÉDIAS ESPACIAIS E TEMPORAIS CALCULADAS COM OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CENÁRIO SRES A2 PARA ALGUMAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PARA OS ANOS DE 2020 E 2050.	121
TABELA 9 - MÉDIAS ESPACIAIS E TEMPORAIS CALCULADAS COM OS RESULTADOS OBTIDOS PARA O CENÁRIO SRES B1 PARA ALGUMAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PARA OS ANOS DE 2020 E 2050.	125
TABELA 10 - SUMÁRIO COMPARATIVO ENTRE ALGUMAS VARIÁVEIS SIMULADAS PARA OS ANOS 2011, 2020 E 2050 PARA O CENÁRIO SRES A2.	127
TABELA 11 - SUMÁRIO COMPARATIVO ENTRE ALGUMAS VARIÁVEIS SIMULADAS PARA OS ANOS 2011, 2020 E 2050 PARA O CENÁRIO SRES B1.	127
TABELA 12 - SUMÁRIO COMPARATIVO ENTRE ALGUMAS VARIÁVEIS SIMULADAS PARA OS ANOS 2011, 2020 E 2050.....	139
TABELA 13 - MÉDIAS ESPACIAIS E TEMPORAIS CALCULADAS COM OS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS CENÁRIOS DE CLIMA SRES B1 E SRES A2 E COM NOVOS INVENTÁRIOS DE EMISSÃO, PARA ALGUMAS VARIÁVEIS SELECIONADAS PARA O ANO DE 2050.....	144

LISTA DE ABREVIATURAS

CCR	<i>Climate Change Research Section</i>
CCSM3	<i>Community Climate System Model</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CLP	Camada Limite Planetária
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COV	Composto Orgânico Volátil
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
GDAS	<i>Global Data Assimilation System</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
HL	Hora Local
HBV	Horário Brasileiro de Verão
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia Estatística
ICU	Ilha de Calor Urbana
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LAPAT	Laboratório de Análise dos Processos Atmosféricos
MADE	<i>Modal Aerosol Dynamics Model for Europe</i>
ME	Erro médio
MM5	<i>Fifth-Generation PSU/NCAR Mesoscale Modeling System</i>
MSE	Erro médio quadrático

NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NO	Óxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	NO + NO ₂
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
O ₃	Ozônio
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PAN	Peroxi Acetil Nitrato
PBN	Peroxi Benzol Nitrato
PCPV	Plano de Controle da Poluição Veicular
PM	Material Particulado
PNQA	Padrão Nacional de Qualidade do Ar
PROCONVE	Programa de controle de emissões veiculares do estado de São Paulo
PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RADM2	<i>Regional Acid Deposition Model Mechanism</i>
RMSE	Raiz do Erro Médio Quadrático
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SEADE	Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SOA	<i>Secondary Organic Aerosol</i>
SORGAM	<i>Secondary Organic Aerosol Model</i>
SRES	<i>Special Report on Emission Scenarios</i>

TUV	<i>Tropospheric Ultraviolet-Visible Model</i>
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
USP	Universidade de São Paulo
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>
WRF/Chem	<i>Weather Research and Forecasting - Chemistry</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

RESUMO

MAZZOLI, C. R. **Estudo Numérico da Influência das Mudanças Climáticas e das Emissões Urbanas no Ozônio Troposférico da Região Metropolitana de São Paulo**, São Paulo, 2013. 162f. Tese de Doutorado – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

Esta tese de doutorado teve como objetivo avaliar o impacto na qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) de mudanças do clima a partir de cenários de mudança global oriundos do IPCC (*International Panel for Climate Change*) e das mudanças nas fontes urbanas da RMSP, decorrentes da implantação de políticas de controle de emissões veiculares. A qualidade do ar foi estimada por meio do modelo WRF/Chem (*Weather Research and Forecasting with Chemistry*). Os cenários do IPCC que foram utilizados representam situações futuras, levando-se em conta o aquecimento global dentro de suas perspectivas otimista (SRES B1) e pessimista (SRES B2). Para a representação desses dois cenários foram utilizadas as saídas do modelo climático global CCSM3 (*Community Climate System Model*), as quais serviram como condições iniciais e de contorno para o modelo utilizado no trabalho. A avaliação da qualidade do ar foi realizada com base na análise da concentração de ozônio na RMSP, para os anos de 2020 e 2050. Também, foram considerados os eventuais impactos na qualidade do ar considerando-se mudanças nas fontes de emissão veicular. Dessa forma foram estudados cenários com mudanças climáticas ou com variação nas emissões veiculares para os anos de 2020 e 2050 e com ambas para o ano de 2050. Os resultados foram avaliados através de métodos estatísticos em comparação com o caso base, que representa o comportamento do ozônio no período de estudo compreendido entre os dias 08 e 16 do mês de novembro de 2011. As análises estatísticas dos resultados das simulações em comparação com os dados medidos mostraram que o modelo representou de forma satisfatória as condições ambientais observadas no período de estudo.

Resultados das simulações de eventos futuros considerando os casos onde foram modificadas as condições meteorológicas para os anos de 2020 e 2050 e mantidas as emissões de 2011 mostraram pouca diferença das concentrações de ozônio sobre a RMSP. Por outro lado, resultados das simulações obtidos da alteração das emissões para os anos futuros, tendo como base as condições meteorológicas de 2011 apresentaram grande variação das concentrações de ozônio sobre a mesma área. Por fim, resultados obtidos a partir de simulações com alterações das condições meteorológicas e das emissões para o ano de 2050 para os dois cenários do IPCC mostraram as maiores diferenças entre os cenários simulados e ambos concordam na ocorrência de aumento de concentrações de ozônio no futuro. Pode-se explicar essa tendência de aumento a partir de duas hipóteses: o aumento da temperatura, favorecendo a ocorrência dos processos fotoquímicos e o maior controle das emissões por veículos pesados, levando a uma razão de Compostos Orgânicos Voláteis por Óxidos de Nitrogênio mais favorável para a formação do ozônio.

Palavras-Chave: Ozônio troposférico, emissões urbanas, mudanças climáticas.

ABSTRACT

MAZZOLI, C. R. **Numerical Study of Climate Change and Urban Emissions Influence over Tropospheric Ozone in the Metropolitan Area of São Paulo**, São Paulo, 2013. 162f. PhD *Dissertation – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo.*

This PhD dissertation aims to assess the impact of climate change on regional air quality from global change scenarios estimated by IPCC and control vehicle emissions changes over the Metropolitan Area of São Paulo (MASP). The air quality was estimated by WRF/Chem model. For this purpose, the scenarios proposed by IPCC that represent future situations were used, taking into account global warming in an optimist (SRES B1) and pessimist (SRES A2) perspective. The output files from the global climate model CCSM3 (Community Climate System Model) based in these scenarios were used as initial and boundary conditions for the model used in this work and, based on a defined set of cases, possible impacts on ozone concentrations were evaluated over the MASP for 2020 and 2050. Also, possible impacts on air quality were considered based on changes in the emission sources. In this way, the following cases were studied: 1) the actual emission for the two meteorological scenarios during 2020 and 2050; 2) same meteorological condition of 2011 for scenarios of urban emission with public politics of emission control for 2020 and 2050, and; 3) a scenario with 2050's emissions and IPCC meteorological conditions. Results were evaluated through statistical methods based on a control case, which represents the ozone concentrations during the period between November 08th and 16th of 2011. Results obtained with the control case simulation showed that the model represented satisfactorily environmental conditions observed during the study period. Simulation results of future events considering cases where weather conditions were modified for 2020 and 2050 and keeping the emissions of 2011 showed little difference in the ozone concentrations over the MASP. On the other hand, simulation results obtained from the

change in emissions for future years, based on weather conditions of 2011, showed a large variation of ozone concentrations over the same area. Finally, results from simulations with changes in weather and emissions for 2050, considering the two IPCC scenarios, showed major differences between the simulated scenarios and both of them show similar results in the sense that high ozone concentrations are estimated for the future. This trend of increased concentrations can be explained by two assumptions: higher temperature, causing the occurrence of photochemical processes, and the implementation of control emissions by heavy vehicles, leading to a ratio of Volatile Organic Compounds by Oxides of Nitrogen more favorable to the formation of ozone.

Keywords: Tropospheric ozone, urban emissions, climate change.

1. Introdução

1.1. Megacidades e a poluição atmosférica

No mundo atual, a quantidade de grandes complexos urbanos, as chamadas megacidades, vêm aumentando rapidamente e estas são focos de estudos relacionados com a poluição atmosférica. Megacidades podem ser definidas como áreas metropolitanas com mais de 10 milhões de habitantes, embora essa classificação não possa ser considerada absoluta, pois as estimativas de população não se baseiam nas mesmas áreas de referência, de acordo com Akimoto et al. (2003). Segundo as Nações Unidas, aproximadamente 4,9 bilhões de um total de 8,1 bilhões de habitantes viverão em cidades no ano de 2030 (GURJAR et al., 2008).

Segundo Gurjar & Lelieveld (2005), 3% da população mundial viviam em áreas urbanas no ano de 1800, passando a 47% por volta do ano 2000. Estima-se que no ano de 2030 a população aumente em 5 bilhões de habitantes, sendo que metade referente a países asiáticos. De acordo com os autores, megacidades podem causar grandes emissões de poluentes, podendo emitir grandes plumas de monóxido de carbono (CO). A influência da poluição no clima tem escalas locais, regionais e globais, devido a grande quantidade dessas regiões com alto potencial de emissão. O aumento da temperatura média e alteração no regime de chuvas sobre as cidades são impactos decorrentes das emissões antrópicas e de mudança do uso do solo, que já são sentidos atualmente. Estudos apontam mudanças significativas nos extremos de temperatura associados ao aquecimento global, especialmente de índices associados com a temperatura mínima registrada durante o dia, de acordo com Alexander et al. (2006). Os resultados desse trabalho destacam que mais de 70% da área terrestre

avaliada apresentou diminuição de noites frias e aumento na quantidade de noites mais quentes. Com relação às mudanças na precipitação foi constatado um aumento na sua quantidade, porém menor quando comparado às mudanças na temperatura.

Silva Dias et al. (2013) analisaram uma série temporal de precipitação do período entre 1933 e 2010 e encontraram tendências positivas na evolução de chuvas intensas em São Paulo. Índices climáticos foram responsáveis pela explicação de 85% do aumento na frequência de extremos durante o período seco. Já no período chuvoso os índices explicaram menos quando comparados ao período seco. Tal fato indica que outros fatores como o crescimento da influência da ilha de calor urbana e o efeito da poluição atmosférica na microfísica das nuvens devem ser considerados.

Segundo Lawrence et al. (2007), megacidades e outros grandes centros populacionais representam importantes fontes de poluentes para a atmosfera, com consequências na qualidade do ar local, regional e na química atmosférica global. As trocas regionais entre os poluentes acumulados próximos às suas fontes versus o transporte desse ar dependem das características meteorológicas, que variam em função da localização geográfica e estação do ano. Além disso, ambos os transportes, horizontal e vertical, contribuem para a exportação de poluentes sendo sua grandeza governada pelo tempo de vida dos mesmos.

Outro trabalho apresentando a mesma temática foi o de Jacob e Winner (2009). Segundo os autores, a qualidade do ar é diretamente dependente das condições atmosféricas e, conseqüentemente sensível às mudanças climáticas. Apontaram também que estudos recentes indicam estimativas do efeito das mudanças climáticas do século 21, através de correlações da qualidade do ar com variáveis meteorológicas, análises de resultados obtidos de modelos de transporte químico e através de simulações realizadas por modelos de circulação geral da atmosfera. A forte

correlação positiva entre altas temperaturas com a formação do ozônio na superfície em regiões poluídas aponta para um possível efeito prejudicial do aquecimento global. Estudos realizados com modelos acoplados de transporte químico e de circulação geral da atmosfera mostram que as mudanças climáticas por si só impactarão num aumento das concentrações de ozônio na superfície em regiões poluídas de 1 a 10ppb nas próximas décadas, com grandes efeitos em áreas urbanas. Essa “penalidade climática” indica que um controle mais rígido das emissões será necessário para atender aos padrões de qualidade do ar.

De acordo com Butler e Lawrence (2009), o número de megacidades tende a continuar crescendo no futuro e potencialmente influenciando a capacidade de oxidação da atmosfera, a forçante radiativa climática e os ecossistemas terrestres e oceânicos em escala global. Em seu trabalho os autores utilizaram a modelagem numérica para estudar os efeitos das emissões das megacidades na química atmosférica global e suas projeções para o futuro com base em quatro diferentes cenários, criados para representar condições atuais e futuras. Para isso, foram realizadas simulações com as emissões locais das megacidades selecionadas e outras simulações sem a emissão local das mesmas megacidades. As análises foram realizadas baseadas na subtração dos dois conjuntos de simulações citados acima. Resultados mostram grande influência das megacidades na formação de compostos nitrogenados, em especial o PAN (Peroxi Acetil Nitrato), o qual aumentou intensamente de forma global da ordem de 9% devido às megacidades (em condições de emissão baseada no ano 2000). Essa influência diminuiu sob o efeito de dois diferentes cenários projetados para o futuro: em condições de um cenário de baixa emissão, a influência das megacidades é geralmente reduzida e, em condições de um cenário de grande emissão projetada para o futuro, apesar da influência local das megacidades ser de aumento, a extensão geográfica dessa influência é menor. Os autores destacam que no modelo utilizado, o efeito das emissões das megacidades na

célula de grade que as mesmas estão localizadas é dependente de suas latitudes, sendo que em latitudes tropicais, as megacidades mostraram aumento de ozônio, enquanto que megacidades localizadas na região extratropical norte mostraram redução das concentrações do mesmo poluente. No caso das células de grade que continham megacidades na região extratropical sul, o efeito local nas concentrações de ozônio foi relativamente nulo, ou seja, não foram encontradas mudanças significativas com nenhum dos cenários utilizados para representar as emissões futuras. Nesse caso, foi observada moderada produção de ozônio no verão e moderada destruição no inverno.

Dentener et al. (2006) avaliaram os efeitos de mudanças das emissões e do clima na qualidade do ar com relação ao ozônio através da modelagem numérica, com simulações globais com três diferentes cenários de emissão. O primeiro cenário reflete a implementação de legislações atuais para a qualidade do ar ao redor do mundo; o segundo representa o caso mais otimista, onde as novas tecnologias são aplicadas para se obter o máximo de redução das emissões; e o último cenário é o mais pessimista projetado pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), o SRES A2. Os resultados apontam que no ano de 2030, o ozônio global em superfície tende a aumentar em $1,5 \pm 1,2$ ppb para o primeiro cenário e em $4,3 \pm 2,2$ ppb para o cenário pessimista do IPCC. Apenas o cenário onde as novas tecnologias foram implementadas resultou em uma diminuição das concentrações de ozônio, em $-0,8 \pm 0,6$ ppb, sendo que maiores reduções ocorreriam sobre os oceanos. Logo, para o ano de 2030, a legislação vigente nos dias atuais para as emissões de poluentes não seria suficiente para estabilizar ou reduzir os problemas relacionados às concentrações de ozônio. O cenário SRES A2, que está associado ao aumento de aproximadamente 5ppb na média de ozônio próximo à superfície no ano de 2030 e 20ppb em 2100, além de grande aumento da forçante radiativa e deposição, representa uma situação onde as políticas voltadas à qualidade do ar não são atendidas. Somente a introdução de

tecnologias rigorosas para a diminuição de óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, compostos orgânicos voláteis e o metano reduzem a atuação do ozônio como uma forçante climática e traz as concentrações do poluente na superfície para níveis mais aceitáveis. São necessárias análises de custo-benefício em reduzir emissões de poluentes no contexto de políticas públicas, para garantir uma atmosfera mais limpa para as próximas gerações.

Zeng et al. (2008) estudaram o impacto das mudanças climáticas nas concentrações de ozônio troposférico e seu balanço global, através da modelagem numérica e estimativas de cenários do IPCC. Segundo os autores, o ozônio é atualmente o terceiro gás de maior importância para o efeito estufa, ficando atrás do dióxido de carbono (CO_2) e do metano (CH_4). Para o estudo, foram realizados cálculos para o ano de 2100 com o intuito de avaliar as respostas da modelagem com relação a: 1) mudanças antropogênicas nas emissões (de acordo com o cenário SRES A2), 2) mudanças climáticas (através do dobro de CO_2 emitido) e 3) mudanças climáticas idealizadas associadas a alterações na emissão biogênica. Seus resultados sugerem que o aumento das emissões antropogênicas dos precursores do ozônio podem contribuir para um grande aumento do poluente na troposfera. Através do cenário mais pessimista (com muita emissão - SRES A2), valores obtidos de ozônio foram inaceitavelmente altos levando-se em conta os limites para impactos na saúde. Ainda segundo os autores, mudanças climáticas causam impactos no ozônio de forma local e em seu balanço global, através de mudanças na circulação e variáveis meteorológicas. O aumento do vapor d'água gera redução substancial do ozônio, especialmente na baixa troposfera tropical. Por outro lado, altas temperaturas projetadas favorecem a produção fotoquímica do poluente e a decomposição dos Peróxi Acetil Nitrato (PAN), o que leva a altas concentrações de ozônio na superfície de algumas regiões. Mudanças na convecção, quando a emissão de CO_2 foi dobrada, apontam modificações da distribuição de NO_x . Convecção profunda transporta o NO_x e

outros precursores de ozônio de maneira mais eficiente nas regiões tropicais, o que contribui positivamente para a produção química do ozônio através da elevada presença de NO_x e HO_x . Por fim, mudanças climáticas também modificam a capacidade de oxidação da atmosfera consideravelmente. O tempo de vida do metano é encurtado em 1,8 anos quando mudanças no clima são incluídas no cálculo, devido ao aumento do radical hidroxila ($\text{OH}\cdot$) em um clima mais úmido.

1.2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

Muitos dos trabalhos cujo tema central relaciona megacidades e poluição atmosférica faz uso de cenários de emissão propostos pelo IPCC, visto os trabalhos citados acima. Com isso, esta seção foi destinada à descrição desta organização e dos cenários utilizados por diferentes grupos de pesquisa.

De acordo com o site oficial do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC - <http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml> - acesso em 27/07/2012), o grupo é o principal organismo internacional para a avaliação das mudanças climáticas. O mesmo foi estabelecido pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP, do inglês *United Nations Environment Programme*) em conjunto com a Organização Meteorológica Mundial (OMM) para fornecer ao mundo uma visão clara e científica sobre o estado da arte do conhecimento das mudanças do clima e seus potenciais impactos ambientais e socioeconômicos. Seus integrantes são responsáveis por analisar e avaliar as informações científicas, técnicas e socioeconômicas recentes produzidas no mundo e que sejam relevantes para a compreensão das mudanças no clima.

Milhares de cientistas de todo o mundo contribuem para o trabalho do IPCC voluntariamente. A revisão dos relatórios produzidos e outras publicações é uma parte

essencial do processo, para garantir uma avaliação objetiva e completa de informações atuais. O IPCC tem como objetivo refletir uma série de opiniões e conhecimentos. Por ser um organismo intergovernamental, é aberto a todos os países membros da Organização das Nações Unidas (ONU) e da OMM. Atualmente 195 países são membros do organismo. Governantes participam do processo de revisão e das plenárias, onde as principais decisões sobre o programa de trabalho do IPCC são tomadas e os relatórios são aceitos, adotados e aprovados.

O IPCC é composto de três grupos de trabalhos, a saber: WG1, responsável por analisar os aspectos físicos científicos do sistema climático e das mudanças climáticas; WG2, que analisa a vulnerabilidade socioeconômica e dos sistemas naturais com relação às mudanças climáticas, suas consequências positivas e negativas e opções para adaptação a essas mudanças e; WG3, que analisa formas de mitigar as mudanças climáticas através do estabelecimento de limites ou atuando na prevenção das emissões de gases do efeito estufa e melhorando atividades que removam os gases nocivos da atmosfera.

1.2.1. Cenários de emissão

O IPCC desenvolveu um conjunto de cenários de emissão. O *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) descreve esses novos cenários e como os mesmos foram desenvolvidos (NAKICENOVIC et al., 2000). Estes abordam diferentes fatores que podem influenciar as emissões futuras, como o desenvolvimento demográfico, tecnológico e econômico. Os cenários incluem diferentes possibilidades de desenvolvimento global, que estão associados a fontes e sumidouros de CO₂ e outros gases de efeito estufa, como estruturas alternativas de energia e mudanças no uso do solo. A construção dos cenários foi baseada na literatura, em aproximações de modelos de crescimento econômico e uso de combustíveis, e através da colaboração

de diferentes grupos de pesquisa interdisciplinar. O conjunto de cenários inclui emissões antropogênicas dos gases do efeito estufa mais relevantes e de outros compostos como o dióxido de enxofre (SO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos totais e menos metano. Emissões futuras representam grandes incertezas e por isso são importantes as análises de diferentes cenários para avaliação da variabilidade dos resultados. Os gases do efeito estufa e as emissões de SO₂ são o *input* básico para determinar os padrões climáticos através dos modelos numéricos, em conjunto com uma boa representação da circulação geral da atmosfera (IPCC, 2000).

A Figura 1 apresenta um esquema dos cenários futuros descritos no SRES. Não existe diferenciação quanto à probabilidade de ocorrência dos mesmos. O conjunto consiste em seis grupos de cenários designados para quatro famílias. A família A1 possui quatro grupos e a A2, a B1 e a B2 possuem um grupo cada, caracterizando desenvolvimentos alternativos de tecnologias alternativas em energia. O A1F1 representa intensivo uso de combustíveis fósseis; no A1T predominam os combustíveis não fósseis e o A1B é balanceado. Em cada família e grupos de cenários, alguns compartilham hipóteses harmônicas com relação à população, produção e energia global. Estes cenários são marcados na figura como “HS”. Os “OS” denotam cenários que exploram incertezas nas forçantes baseadas nos cenários descritos anteriormente.

O cenário A1 descreve o mundo futuro com rápido crescimento econômico, população global que possui um pico no meio do século e tende a diminuir após o valor máximo e uma rápida introdução de energias novas e mais eficientes. O A2 descreve o mundo bastante heterogêneo. É baseado na preservação das identidades locais e a população global tende a crescer continuamente. O cenário B1 descreve a população global da mesma maneira que no cenário A1, porém, com rápidas mudanças na

estrutura da economia através de redução no uso de materiais e a introdução de tecnologias limpas e eficientes. Esse cenário reflete a sustentabilidade ambiental. Por fim, o cenário B2 descreve um mundo focado em soluções locais com relação à economia, condições sociais e sustentabilidade ambiental. Possui tendência de contínuo crescimento populacional, porém, numa taxa menor do que a do cenário A2, níveis intermediários de desenvolvimento econômico e mudanças na tecnologia menos rápidas e mais diversificadas do que nos cenários B1 e A1.

A Figura 2 ilustra os cenários descritos acima e fornece uma visão das forçantes e da escala de abrangência. Observa-se que o A1 e o B1 possuem tendência global, enquanto o A2 e o B2 são voltados a mudanças locais.

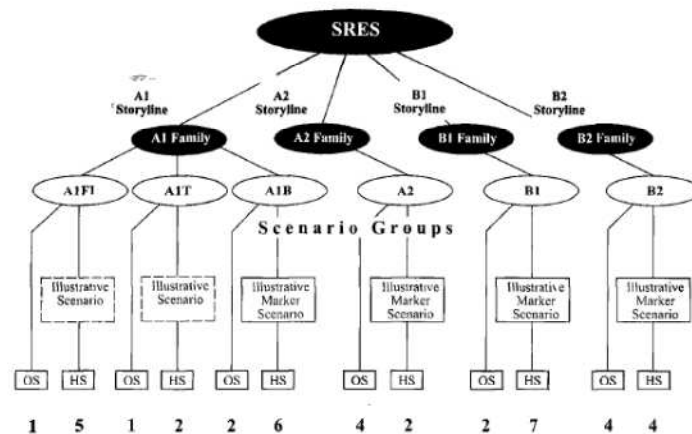


Figura 1 - Grupos e famílias dos cenários propostos no SRES.

FONTE: Nakicenovic et al., 2000.

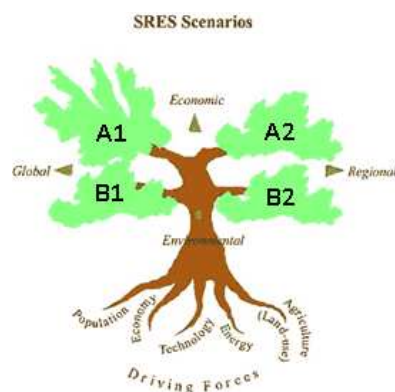


Figura 2 - Ilustração dos cenários propostos no SRES.

FONTE: Nakicenovic et al., 2000.

1.3. Região Metropolitana de São Paulo

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) é considerada atualmente uma das maiores regiões metropolitanas do mundo, sendo composta por 39 municípios localizados numa área de aproximadamente 7958 km². A população total é estimada em 19 milhões e 700 mil habitantes, de acordo com o último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE) em 2010, o que corresponde a 48% da população total do estado. Está localizada sobre uma região de planalto centrada em 23°S e 46°W na região sudeste do Brasil e cerca de 720 metros acima do nível do mar. A área urbana está situada na Bacia Sedimentar de São Paulo, cujo principal vale é o do Rio Tietê (CETESB, 2009). É cercada principalmente pela Serra da Cantareira e pela Serra do Mar e está localizada a cerca de 50 km do Oceano Atlântico. Através da Figura 3, extraída do *Google Earth*, é possível visualizar a ocupação urbana que caracteriza a RMSP para o ano de 2011.

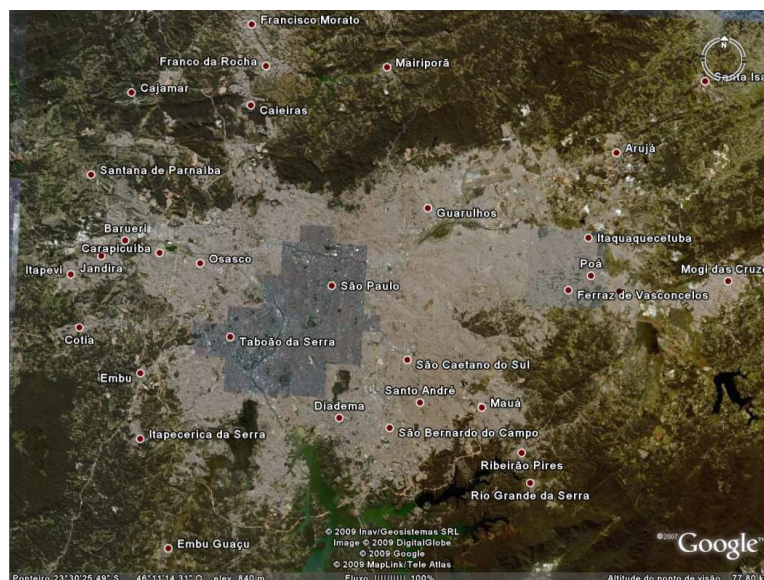


Figura 3 - Região Metropolitana de São Paulo.

Fonte: Google Earth, 2011.

Na Figura 4 é possível visualizar uma estimativa de aumento da área urbana da RMSP para o ano de 2030 elaborada por Nobre et al. (2011). Segundo os autores, baseado

no modelo de expansão urbana construído a partir de dados históricos de imagens do satélite LANDSAT (2001-2008) a tendência é que a área urbana atual passará por poucas modificações. Contudo, áreas periféricas serão ocupadas exercendo forte pressão nos recursos naturais. Se essa estimativa se concretizar, esse crescimento poderá ser acompanhado pelo aumento das emissões de poluentes e a consequente piora na qualidade do ar na região.

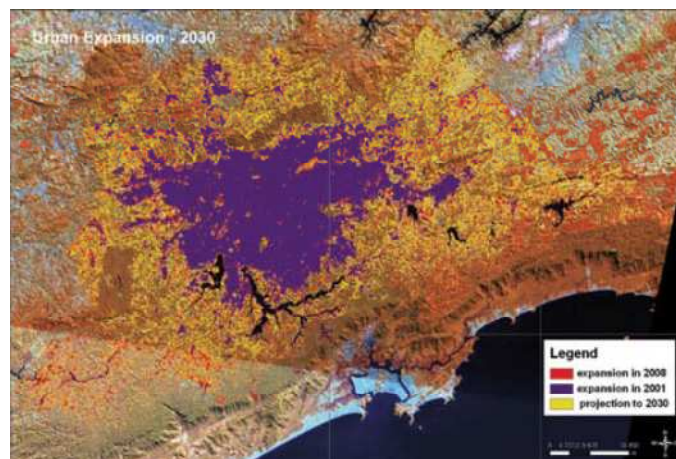


Figura 4 - Expansão da Região Metropolitana de São Paulo prevista para o ano de 2030.

Fonte: Nobre et al. (2011).

Com relação à caracterização meteorológica da RMSP, o período chuvoso ocorre nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro e o período seco nos meses de maio, junho, julho e agosto, de acordo com as normais climatológicas obtidas da estação de superfície localizada no Mirante de Santana e disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - Figura 5). As máximas temperaturas, obtidas da mesma fonte, são registradas nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março e as mínimas ocorrem entre de junho e agosto, conforme Figura 6.

Os meses de inverno são considerados desfavoráveis à dispersão de poluentes como o monóxido de carbono, material particulado e o dióxido de enxofre, devido às condições de estabilidade da atmosfera e a menor quantidade de precipitação

registrada. No caso do ozônio (O_3), maiores concentrações são verificadas na primavera e verão, já que como poluente secundário, sua formação depende da radiação solar, dentre outros fatores. Contudo, devido à sensibilidade dos poluentes com relação às condições meteorológicas, esses padrões de comportamento podem variar de ano para ano. Por exemplo, no caso da ocorrência de um sistema típico de verão, como é o caso das Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), pode ocorrer dias com muita nebulosidade e grande intensidade de precipitação. Isso leva a uma diminuição das concentrações de ozônio no período de influência desse sistema. Por outro lado, durante o inverno, é passível de o estado de São Paulo estar sob a influência de um bloqueio atmosférico, o qual impede que sistemas frontais atinjam a região, gerando uma intensa massa de ar seco sobre a maior parte do Brasil central e, conseqüentemente, ausência de chuva e dias bastante poluídos. Influências de menor escala também podem ser observadas, como a ocorrência da brisa marítima que, segundo Freitas (2003), age no sentido de dispersar os poluentes através da intensificação do vento na área mais urbanizada, além da frente de brisa que transporta o ar local para outras regiões (FREITAS et al., 2007).

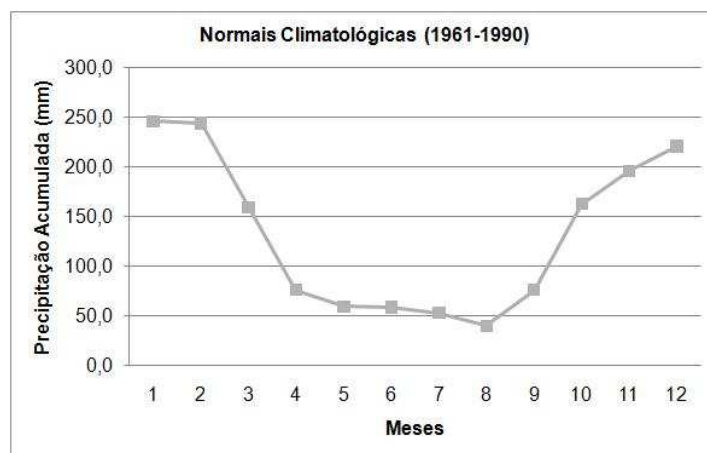


Figura 5 - Precipitação acumulada (em mm) média mensal de 1961 a 1990.

Fonte: Normais Climatológicas - INMET.

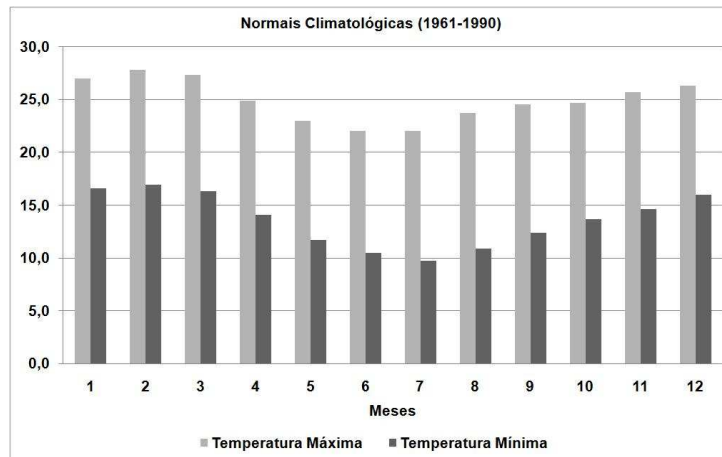


Figura 6 - Temperaturas máximas e mínimas (em °C) médias mensais de 1961 a 1990.

Fonte: Normais Climatológicas - INMET.

De acordo com a CETESB (Relatório de Qualidade do Ar do estado de São Paulo de 2010, ano-base 2009), a quantidade de indústrias potencialmente poluidoras presentes na RMSP somou um total de aproximadamente 2000, distribuídas por toda a região. O número de veículos, crescente com o passar do tempo, foi estimado em 9,7 milhões, dentre leves e pesados (CETESB, 2010). A frota no ano foi composta por 7,9 milhões de veículos do ciclo Otto (motores que utilizam combustíveis leves, exceto motocicletas), 515 mil veículos a diesel e 1,3 milhões de motocicletas, que representam cerca de 1/5 do total nacional. De acordo com as estimativas de 2009, essas fontes de poluição foram responsáveis pela emissão para a atmosfera dos seguintes poluentes: 1,57 milhões de t/ano de monóxido de carbono, 382 mil t/ano de hidrocarbonetos, 376 mil t/ano de óxidos de nitrogênio, 63 mil t/ano de material particulado total e 25,5 mil t/ano de óxidos de enxofre. Desses totais, os veículos foram responsáveis por 97% das emissões de CO, 97% de HC, 96% de NO_x, 40% de MP e 32% de SO_x. Salienta-se que o Brasil é o único país no mundo que conta com uma frota veicular que utiliza etanol em larga escala como combustível. Na frota baseada no ano de 2009 na RMSP, os veículos movidos a etanol hidratado representaram 9,9% e os movidos à gasool (mistura 22% de etanol e 78% de gasolina) 53,6%. O álcool etílico, considerando o anidro e o hidratado, correspondeu a

65,6% do combustível consumido, segundo dados de consumo. Os veículos do tipo bicombustível corresponderam a 17,8%, as motocicletas representaram 13,4% e os veículos movidos a diesel 5,3% da frota. Cabe destacar ainda que a frota da RMSP é bastante antiga, sendo que, considerando como referência o ano de 2009, 57,8% desta era anterior a 1999.

Com base nos Relatórios da Qualidade do Ar do estado de São Paulo de 2011 e 2012 (CETESB, 2011; CETESB, 2012), que tiveram como referência os anos de 2010 e 2011, respectivamente, uma nova metodologia para estimativa das emissões (baseada do 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários) foi apresentada e os novos valores de emissões foram consideravelmente menores comparados aos Relatórios anteriores. A frota de veículos apresentada foi de aproximadamente 6,5 milhões de veículos, incluindo automóveis, caminhões, ônibus e motocicletas, com idade média de 10 anos. De acordo com as estimativas de 2010, essas fontes de poluição foram responsáveis pela emissão para a atmosfera dos seguintes poluentes: 161 mil t/ano de monóxido de carbono, 35 mil t/ano de hidrocarbonetos, 84 mil t/ano de óxidos de nitrogênio, 5 mil t/ano de material particulado e 9 mil t/ano de óxidos de enxofre. Desses totais, os veículos foram responsáveis por 97% das emissões de CO, 77% de HC, 82% de NO_x, 40% de MP e 36% de SO_x. A justificativa da redução das emissões baseia-se na renovação da frota veicular e, por esta ser composta atualmente de veículos bicombustíveis. Entretanto, existe grande incerteza na definição desses valores, exigindo maiores e melhores estudos sobre as emissões, em especial com relação ao fator de deterioração dos veículos que impacta diretamente nas emissões.

Dessa forma, os problemas de qualidade do ar na RMSP ocorrem principalmente em função da emissão dos poluentes provenientes dos veículos, motivo pelo qual se enfatiza a importância do controle das emissões veiculares. No caso do ozônio, é

necessário o controle dos compostos orgânicos voláteis (COV) e óxidos de nitrogênio ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), que são os precursores desse poluente a partir dos processos fotoquímicos. Além do ozônio, tais processos ainda geram outras substâncias agressivas, também denominadas oxidantes fotoquímicos (são exemplos: Peroxi Acetil Nitrato (PAN), formaldeídos, Peroxi Benzol Nitrato (PBN)), e uma quantidade considerável de aerossóis secundários, que em função de seu pequeno tamanho afetam a saúde da população (CETESB, 2012).

Baseado nos registros obtidos das estações de monitoramento da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), altas concentrações de poluentes atmosféricos, regularmente medidos são frequentemente verificadas. Poluentes como o material particulado (MP) e o ozônio (O_3) influenciam a vida da população em geral e este último é o que mais apresenta violação do Padrão Nacional de Qualidade do Ar (PNQA) (DOMINICI et al., 2006; ITO et al., 2005). Estudos que relacionam as concentrações de ozônio e material particulado com a saúde apontam altas taxas de mortalidade quando altos valores destes poluentes são registrados (SALDIVA et al., 1995). Problemas respiratórios e de degradação da fauna e flora também são apontados por Burnett et al. (1994) e Ghini (2005). O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico desta megacidade tende a contribuir para uma deterioração progressiva da qualidade do ar e conseqüentemente da saúde humana, a menos que continuem a serem implantadas medidas específicas que visam atenuar tal fato, como por exemplo, programas de controle das emissões.

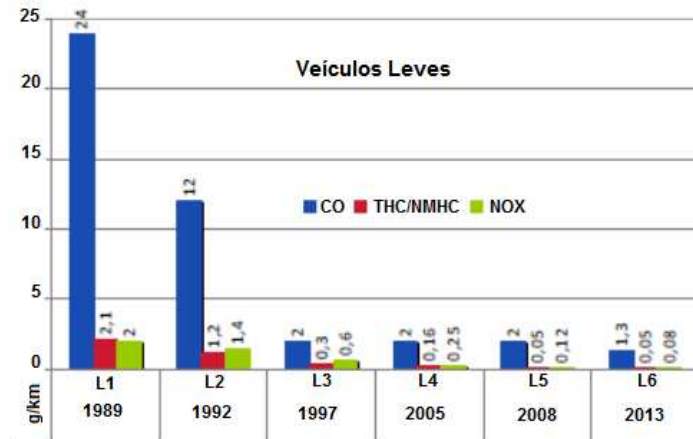
Com o intuito de minimizar o agravamento da poluição atmosférica foram instituídos programas de controle das emissões. O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) é o principal programa de controle das emissões veiculares e tem sido responsável pela redução do impacto ambiental, principalmente com relação ao monóxido de carbono e ao material particulado na RMSP. O mesmo

foi instituído pela Resolução CONAMA nº 18, de 06 de maio de 1986. A partir da fase atual do Programa, mesmo com a aplicação de novos limites de emissão, a redução da carga de poluentes tende a ser menor, levando-se em conta também o expressivo aumento da frota. Ainda são esperados, no entanto, ganhos ambientais, tanto com o PROCONVE quanto com o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), cuja nova fase estabelecerá limites mais restritivos de emissão de poluentes, estão previstos para serem implantados (CETESB, 2011).

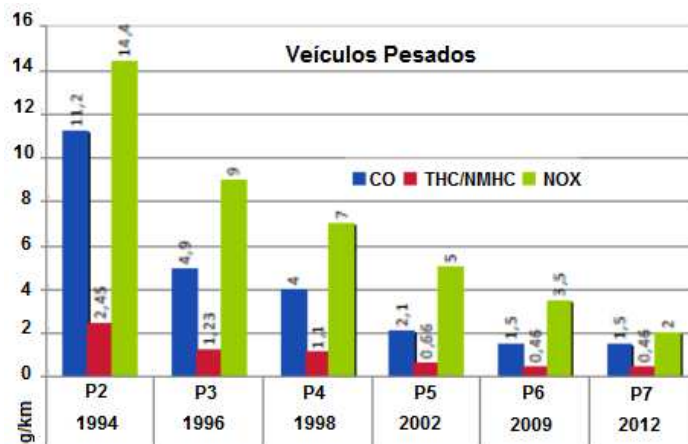
A situação atual das condições de tráfego e poluição atmosférica na RMSP requer outros tipos de medidas que visem complementar os programas que vem sendo desenvolvidos, tais como a inspeção veicular, melhoria da qualidade dos combustíveis, planejamento do uso do solo, maior eficiência do sistema viário e melhorias no transporte público (CETESB, 2011). Com o intuito de promover políticas voltadas ao controle e a melhora da qualidade do ar, a CETESB divulgou em 2012 o Plano de Controle da Poluição Veicular (PCPV) do estado para o período de 2011 a 2013. O Plano propõe a adoção de ações que promovam o controle das emissões dos veículos através de fiscalização, gestão de frotas e o incentivo a manutenção preventiva e qualificada. Espera-se que a implantação dessas medidas resulte na melhoria da qualidade do ar nas cidades do estado de São Paulo.

A Figura 7 apresenta a evolução dos limites de emissão dos poluentes incluídos no PROCONVE e PROMOT. Na legenda, a cor azul representa o monóxido de carbono, a vermelha representa o total de hidrocarbonetos e menos o metano e a verde os óxidos de nitrogênio. Observa-se que houve grande redução desses limites com relação a todos os poluentes com o passar dos anos. A Figura 7A representa os limites para veículos leves e as fases do PROCONVE para essa categoria até o ano de 2013. Nota-se que a redução das emissões de monóxido de carbono (CO) é a mais intensa e as maiores quedas ocorreram entre os anos de 1989 e 1997. No caso dos veículos pesados

(Figura 7B), responsáveis por grande emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x), tanto o CO, quanto o NO_x apresentaram intensa queda dos limites de emissão. Já no caso das motocicletas (PROMOT), apresentado na Figura 7C, também foi observada grande redução das emissões de CO no início do programa. As duas últimas fases não apresentaram significativa diferença.



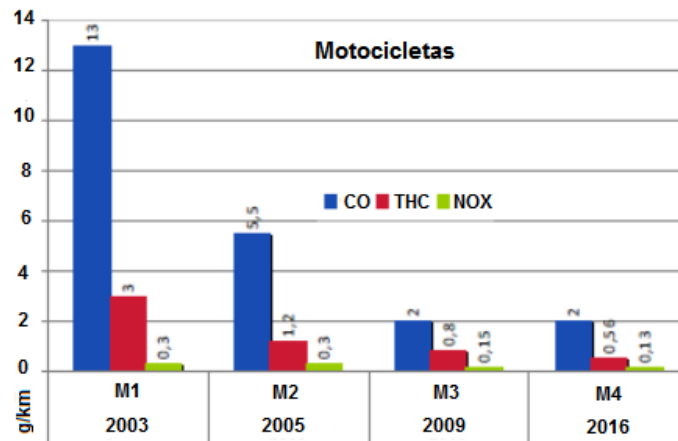
(a)



(b)

Figura 7 - Evolução dos limites de emissão dos poluentes do PROCONVE para veículos leves (a), veículos pesados (b) e do PROMOT (c).

FONTE: PCPV (2011 - 2013).



(c)

Figura 7 - Continuação.

1.4. Modelagem numérica

A descrição da circulação atmosférica local e dos fenômenos associados ao transporte advectivo é fundamental para a compreensão do processo de dispersão de poluentes. Para isso, a representação, tanto em superfície quanto em altitude, de campos meteorológicos como vento, temperatura, umidade e outros parâmetros importantes relacionados à turbulência atmosférica são essenciais. São estas condições que determinam o transporte horizontal e vertical, e, por conseguinte, as condições de dispersão. É importante ressaltar que, além das condições meteorológicas, a qualidade do ar depende também das características locais, como a topografia, tipologia e distribuição espacial das fontes emissoras de poluentes.

A modelagem numérica da atmosfera é essencial para se entender os impactos e implicações das escalas local, regional e global e suas inter-relações com relação à poluição atmosférica e as mudanças climáticas (GURJAR & LELIEVELD, 2005). Quando da utilização de modelos de qualidade do ar, que incluem os processos químicos, a simulação dos processos dispersivos vai determinar, em grande parte, a qualidade das representações das concentrações de poluentes atmosféricos.

Há dois grupos principais de modelos de qualidade do ar, os chamados off-line, os quais resolvem separadamente os processos meteorológicos e os processos químicos, e os modelos online, que são capazes de representar a interação destes dois componentes do sistema atmosférico ao mesmo tempo. No primeiro caso, os modelos off-line utilizam dados observados ou saídas de modelos meteorológicos como base para a dispersão dos poluentes. Nesse caso, a dispersão é realizada com base nos dados observados e interpolados para a grade do modelo ou com base em simulações meteorológicas, com resultados em pontos de grade. As desvantagens desse tipo de modelos são: a necessidade de interpolação; o tratamento de diferentes resoluções temporais e espaciais entre os campos meteorológicos e químicos e; a limitação das variáveis para análise. Ressalta-se, porém, que muitas vezes essa categoria de modelo é utilizada como regulatório pelas Agências Ambientais e possuem mais baixo custo computacional. Por outro lado, há atualmente o intenso desenvolvimento de modelos de qualidade do ar que contêm a química acoplada à meteorologia (os denominados modelos online), que possibilitam que a descrição dos processos meteorológicos de transporte seja incorporada de forma mais realista nas simulações químicas. Nesse caso, as variáveis químicas interagem com as meteorológicas e vice versa, isto é, os parâmetros são dependentes e influenciam nos resultados obtidos. Vantagens significativas desse tipo de modelo são: não é necessária a interpolação temporal ou espacial dos campos; esquemas numéricos e parametrizações físicas são as mesmas; todas as variáveis meteorológicas ficam disponíveis a todo o momento e; a possibilidade de feedbacks dos processos meteorológicos e físico-químicos (BAKLANOV et al., 2011). Um exemplo que merece destaque é a interação dos aerossóis com a microfísica das nuvens. Em função do tamanho dos aerossóis espera-se um tamanho específico de gotas de nuvem, o que vai impactar no tipo de precipitação. O ponto desfavorável desses modelos é o alto custo computacional, o que torna difícil a realização de simulações climáticas.

1.5. Objetivo

O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto das mudanças climáticas e das políticas locais de controle de emissões veiculares na poluição atmosférica em escala local, especificamente sobre as concentrações de ozônio troposférico na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A modelagem numérica dos processos envolvidos foi realizada através do modelo WRF/Chem. Como objetivos específicos destacam-se:

- Através de parâmetros estatísticos comumente utilizados, verificar a habilidade do modelo em representar os campos atmosféricos atuais, comparando os resultados modelados com aqueles observados nas estações de monitoramento de qualidade do ar da CETESB;
- Utilizar os cenários de mudanças climáticas elaborados pelo IPCC (SRES A2 e SRES B1 provenientes do modelo CCSM3) para representar as projeções futuras de concentrações de ozônio na RMSP;
- Avaliar o efeito de mudanças de emissões da frota veicular em função da implantação de políticas públicas de redução de emissões sobre a concentração de ozônio, considerando os anos de 2020 e 2050.

No próximo capítulo será descrito o comportamento do ozônio troposférico sobre a RMSP, bem como sua formação, relação com meteorologia, padrões nacionais adotados e a rede de monitoramento na RMSP. Em seguida, no capítulo 3 será apresentada a estrutura do modelo utilizado para as simulações, o WRF/Chem. O período de estudo será apresentado no capítulo 4, onde será feita a caracterização meteorológica e a da qualidade do ar através das informações disponíveis para o período. No capítulo 5 será apresentada a metodologia utilizada e compreenderá a

definição das simulações e a configuração utilizada do modelo. Nessa parte, será descrita a construção dos arquivos de emissão a partir dos dados para a RMSP e a avaliação estatística utilizada para a análise dos resultados de simulação e comparação com medidas. No capítulo 6 serão apresentados os resultados obtidos para cada um dos estudos de casos definidos na metodologia. Por fim, no capítulo 7 serão apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Comportamento do ozônio troposférico

O ozônio é considerado um poluente na troposfera, diferentemente da estratosfera, onde este gás age no sentido de filtrar os raios ultravioletas emitidos pelo Sol. Em toda atmosfera o ozônio é um composto fotoquímico secundário, isto é, sua formação ocorre a partir de reações químicas e na presença de luz solar, não sendo emitido diretamente por nenhuma fonte. Em condições apropriadas como altas temperaturas, baixa umidade relativa, ventos fracos e a existência de precursores (óxidos de nitrogênio - NO_x e compostos orgânicos voláteis - COV) sua formação pode ser mais efetiva.

De acordo com Seinfeld e Pandis (1998), o balanço global do ozônio na troposfera é composto pela produção, através do transporte proveniente da estratosfera e da produção química, e pela perda, através da deposição seca na superfície terrestre e através da destruição química. Segundo os autores, climatologicamente, os principais episódios de altas concentrações de ozônio estão associados a movimentos atmosféricos lentos, isto é, sistemas de alta pressão. A subsidência do ar associada a estes sistemas de alta pressão atmosférica gera uma inversão dos perfis normais de temperatura (normalmente a temperatura tende a diminuir com a altura na troposfera), a qual age como um tampão para as concentrações de poluentes numa camada rasa da troposfera.

Visando evitar os riscos à saúde da população, e de acordo com a viabilidade técnica e fatores políticos, econômicos e sociais foram definidos padrões nacionais de qualidade do ar (PNQA), de acordo com a Resolução CONAMA nº03/90 para os seguintes poluentes: partículas totais em suspensão, partículas inaláveis, fumaça,

dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, monóxido de carbono e ozônio. Foram definidos padrões primários, no qual se houver ultrapassagem do limite definido a saúde da população é afetada e os padrões secundários, que se referem aos níveis desejados dos respectivos poluentes e, significa mínimo efeito adverso sobre a população (CETESB, 2010). A Tabela 1 sintetiza os valores definidos para cada poluente de acordo com a Resolução CONAMA nº3/90. Os padrões primário e secundário para o ozônio são de $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, equivalente a aproximadamente 83ppbv, e essa concentração, calculada através da média de 1 hora não deve ser ultrapassada mais de uma vez ao ano, segundo os critérios da Resolução.

Tabela 1 - Padrões nacionais de qualidade do ar (Resolução CONAMA nº3/90).

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Padrão Secundário ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 horas ¹	240	150
	MGA ²	80	60
Partículas Inaláveis (PM ₁₀)	24 horas ¹	150	150
	MAA ³	50	50
Fumaça	24 horas ¹	150	100
	MAA ³	60	40
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	24 horas ¹	365	100
	MAA ³	80	40
Dióxido de nitrogênio (NO ₂)	1 hora	320	190
	MAA ³	100	100
Monóxido de carbono (CO)	1 hora ¹	40000	40000
		35ppm	35ppm
	8 horas ¹	10000	10000
		9ppm	9ppm
Ozônio (O ₃)	1 hora ¹	160	160

Fonte: CETESB, 2010.

Observações:

- 1 - Não deve ser excedido mais de uma vez ao ano.
- 2 - Média geométrica anual.
- 3 - Média aritmética anual.

De acordo com a CETESB (2012), para a RMSP os episódios mais acentuados ocorrem na primavera e no verão, quando as condições meteorológicas apropriadas são frequentemente encontradas. A Figura 8 apresenta o número de dias com ultrapassagem ao Padrão Nacional de Qualidade do Ar (PNQA) para o ozônio para as estações de monitoramento da CETESB no Estado de São Paulo. Observa-se que, em 12 anos de dados, os meses com mais ultrapassagens do PNQA foram outubro, com 130 dias, seguido do mês de março, com 99 dias e, com 95 e 90 dias, os meses de fevereiro e dezembro, respectivamente, coincidindo com as estações da primavera e verão. Com relação à variação anual do poluente, observa-se que houve um aumento do número de dias com ultrapassagem ao PQAR até o ano de 2002. Entre esse ano e 2006 houve um decréscimo desse número, conforme a Figura 9. No ano de 2007 o número de dias com ultrapassagem ao padrão de qualidade do ar foi maior do que nos anos anteriores, e observou-se uma queda no ano seguinte, porém, a tendência voltou a aumentar entre 2008 e 2011, destacando esse último ano, cujo alto valor de ultrapassagens pode estar relacionado a períodos secos e temperaturas máximas registradas acima das normais climatológicas durante o inverno.

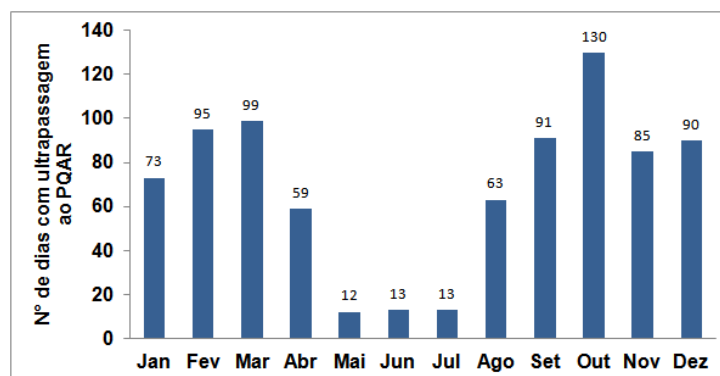


Figura 8 - Número de dias, por mês, com ultrapassagem ao Padrão Nacional de Qualidade do Ar (PNQA) para o ozônio (~ 83 ppb ou $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) para as estações de monitoramento da CETESB em São Paulo entre os anos de 2000 a 2011.

Fonte: Adaptado de CETESB, 2012.

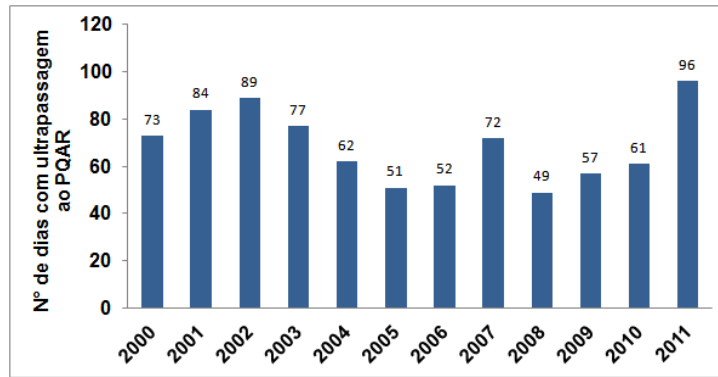


Figura 9 - Número de dias, por ano, com ultrapassagem ao Padrão Nacional de Qualidade do Ar (PNQA) para o ozônio (~ 83 ppb ou $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) para as estações de monitoramento da CETESB em São Paulo entre os anos de 2000 a 2011.

Fonte: Adaptado de CETESB, 2012.

Na troposfera, a produção do ozônio ocorre na presença de luz solar, a partir da interação desta com óxido de nitrogênio ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$). Os óxidos de nitrogênio, por sua vez, são formados no processo de combustão dos veículos, processos industriais, incinerações, dentre outros. A reação (2.1) representa o início do ciclo da formação do ozônio troposférico, seguida pela oxidação do óxido de nitrogênio (NO) a dióxido de nitrogênio (NO_2) (2.2), em um processo foto-estacionário na ausência de compostos orgânicos voláteis (COV).



O NO_2 presente na atmosfera, principalmente em áreas bastante urbanizadas, sofre fotólise dando origem ao NO e ao oxigênio no estado básico $\text{O}(^3\text{P})$, de acordo com a reação (2.3). Cabe ressaltar que o comprimento de onda necessário para que ocorra a fotólise deve ser menor do que 420 nm. Na reação (2.4), o $\text{O}(^3\text{P})$ reage com a molécula de oxigênio formando o ozônio.



Uma vez formado, o O_3 reage rapidamente com o NO regenerando o NO_2 , como mostrado na reação (2.5):



As reações (2.3) a (2.5) representam o ciclo estacionário de ozônio, onde todo o composto formado é destruído. Este ciclo é denominado estado foto-estacionário (SEINFELD & PANDIS, 1998).

Os mecanismos descritos anteriormente não levam em conta a presença dos COV, que funcionam desequilibrando os processos de formação de O_3 . O termo COV é utilizado para representar o conjunto dos compostos orgânicos presentes na atmosfera na fase gasosa, com exceção do monóxido de carbono (CO) e do dióxido de carbono (CO_2) (SEINFELD & PANDIS, 1998). Os COV são emitidos por fontes antropogênicas, mas também são amplamente emitidos por fontes biogênicas, ou seja, pela vegetação (na presença de radiação fotossinteticamente ativa, RFA ou PAR, do termo em inglês "photosynthetically active radiation", apresentando forte aumento na emissão à medida que a temperatura aumenta). Na RMSP a emissão dos COV ocorre majoritariamente pela emissão antropogênica, através da queima incompleta dos combustíveis ou evaporação. Um dos COV mais importantes é o metano (CH_4), pois é o mais abundante na atmosfera e possui tempo de residência de décadas, além de ser emitido por ambas as fontes, biogênica e antropogênica (ATKINSON, 2000).

O principal componente da química de formação do ozônio na presença dos COV é o radical hidroxila ($\text{OH}\cdot$). Este radical é encontrado em grande quantidade na atmosfera e tem como característica reagir principalmente com os gases-traço, através do processo de oxidação. Este processo leva ao aparecimento de radicais intermediários (como o alcóxi - $\text{RO}_2\cdot$ e o hidroperóxido - $\text{HO}_2\cdot$) que reagem com o NO presente, promovendo a conversão de NO a NO_2 (JACOB, 1999). Por fim, com a presença da radiação ultravioleta proveniente do sol, há a formação de O_3 .

A principal reação de formação do radical hidroxila na atmosfera ocorre através da fotólise do ozônio, que dá origem a uma molécula de oxigênio e a um átomo de oxigênio no estado mais excitado. Este, por sua vez, reage com o vapor d'água formando dois radicais hidroxilas, conforme reações (2.6) e (2.7).



Logo, a representação da oxidação dos COV é dada pela sequência das reações (2.8) a (2.11).



Como os radicais intermediários irão reagir no sentido de converter NO em NO_2 conforme reações (2.12) e (2.13), o resultado seria uma alta produção de ozônio. Por

outro lado, conforme apresentado na reação (2.5), o ozônio formado também é consumido. Dessa forma, devido ao grande aumento da conversão NO – NO₂ o resultado é efetivamente uma alta taxa de formação do ozônio (ATKINSON, 2000).



Outro papel desempenhado pelos radicais intermediários é o consumo do O₃, quando são encontradas baixas concentrações de NO na atmosfera. As reações (2.14) e (2.15) apresentam o possível consumo do ozônio pela reação com estes radicais.



Logo, uma representação do balanço da formação do ozônio é resultado da competição entre as reações (2.16) e (2.17).



Em geral, numa atmosfera poluída existe a competição entre os COV e o NO_x pelo radical hidroxila. Numa alta razão de COV para NO_x, o OH vai reagir principalmente com os COV; numa baixa razão a reação com o NO_x predomina. A hidroxila reage com os COV e com o NO_x numa taxa igual quando a razão da concentração de COV:NO_x possui determinado valor. Considerando uma atmosfera urbana, como a RMSP, a razão aproximada é de 5,5:1. Portanto, se esta razão for pequena, significa que existem altos níveis de NO_x e, portanto, a atmosfera é denominada COV-limitante,

onde, neste caso, os valores de concentrações de ozônio tenderiam a diminuir à medida que as concentrações dos COV também diminuíssem. Por outro lado, razões mais altas significariam uma atmosfera dominada pelos COV, e as concentrações de ozônio tenderiam a diminuir se a concentração de NO_x fosse reduzida, o que caracteriza a atmosfera NO_x -limitante (SEINFELD & PANDIS, 1998). A Figura 10 ilustra essa relação entre os óxidos de nitrogênio e os compostos orgânicos voláteis, através de isopleias, onde as concentrações de ozônio são representadas em função das concentrações de NO_x e COV. A linha mais escura, que corta diagonalmente o gráfico, separa os regimes COV-Limitante (área superior a linha) e NO_x -Limitante (área inferior a linha).

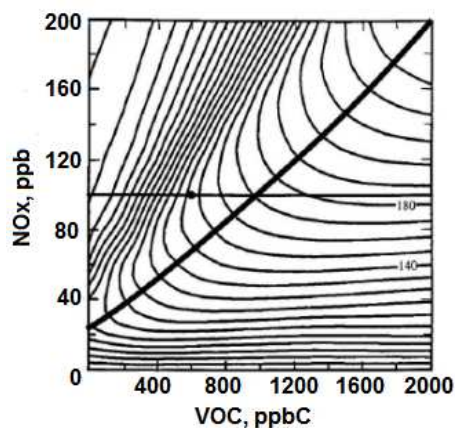


Figura 10 - Isopleias de ozônio.

Fonte: Seinfeld & Pandis (1998).

2.1. Efeito das condições atmosféricas na concentração de poluentes

As condições atmosféricas representam um fator determinante para a avaliação da qualidade do ar. Sob diferentes condições, os poluentes podem ser transportados a longas distâncias e afetar remotamente uma região, mesmo que não seja aquela onde foi originado.

Em geral, elevadas concentrações de ozônio são caracterizadas pela presença em escala sinótica de movimento subsidente do ar proveniente da troposfera, resultando no favorecimento de uma camada de inversão mais persistente, ausência de nuvens, altas temperaturas e velocidades do vento relativamente baixas associadas ao fraco gradiente horizontal de pressão em torno de um sistema de alta pressão próximo à superfície (MARTINS, 2006). A radiação ultravioleta também tem um papel fundamental nos processos fotoquímicos que levam à formação do ozônio. A RMSP é influenciada por diversos sistemas de diferentes escalas e que colaboram para a melhor ou pior qualidade do ar na região (SÁNCHEZ-CCOYLLO & ANDRADE, 2002). Dentre estes destacam-se os sistemas pré-frontais, os complexos convectivos de mesoescala, as linhas de instabilidade, sistemas associados à penetração de brisa marítima, sistemas orográficos sobre as Serras da Mantiqueira e do Mar e interações do fluxo atmosférico com a presença da ilha de calor urbana na RMSP.

No estudo realizado por Freitas (2003) foi abordada a influência de circulações locais como a da ilha de calor urbana e da brisa marítima, assim como a interação entre as circulações resultantes desses fenômenos sobre a dispersão de poluentes na RMSP. O autor destaca que durante eventos intensos de ilhas de calor as concentrações de poluentes podem ser maiores, apesar das baixas correlações geralmente encontradas. Nestas ocasiões, os ventos são geralmente fracos. Fortes ventos contribuem para uma maior mistura na Camada Limite Planetária (CLP) e reduzem o contraste de temperatura entre a região urbana e a região rural. A brisa marítima tem papel fundamental na dispersão de poluentes. Com a intensificação dos ventos na área urbana, em decorrência da penetração da brisa, as concentrações dos poluentes analisados tiveram uma queda da ordem de 90%.

Outro aspecto da interação das concentrações de ozônio com as condições atmosféricas foi apontado por Freitas et al. (2005). Através de medidas realizadas pela

rede de monitoramento da CETESB, foi possível observar picos noturnos com concentrações superiores a $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. O trabalho apresenta as concentrações médias para três das estações utilizadas pelos autores (Cubatão, Diadema e Ibirapuera). Uma vez que não existe formação de ozônio durante a noite, certamente esses máximos noturnos estão relacionados a algum tipo de transporte. Lin et al. (2004), através de medidas realizadas com sondagens de ozônio e da técnica de trajetórias identificaram picos noturnos semelhantes, os quais foram atribuídos ao transporte, tanto vertical quanto de outras regiões de alta formação de ozônio. Mazzoli et al. (2010) analisaram um período de 4 anos (entre 2003 e 2006) de dados de concentração de ozônio registradas na RMSP. Foi detectada a maior ocorrência desses eventos durante os meses de primavera e verão e as maiores concentrações dos mesmos foi verificada nos meses de janeiro, fevereiro e outubro. Contudo não foram feitas associações dos episódios com eventos meteorológicos específicos.

2.2. O monitoramento da qualidade do ar no estado de São Paulo

A rede de estações da CETESB foi formada nos anos 70 quando se iniciou o monitoramento das concentrações do dióxido de enxofre e fumaça através de uma rede manual. No ano de 1981 a rede manual foi complementada com a instalação de 20 estações automáticas, que passaram a obter concentrações horárias de poluentes como o dióxido de enxofre, partículas inaláveis, óxidos de nitrogênio, ozônio, monóxido de carbono, metano, hidrocarbonetos totais (metano e não metano), além de variáveis meteorológicas, como a temperatura, umidade relativa, direção e velocidade do vento e pressão atmosférica. Atualmente, os municípios da RMSP contam com 22 estações automáticas fixas (Figura 11) e 14 manuais (Figura 12). Nas duas figuras apresentadas observa-se que a maioria das estações está localizada na região central da RMSP. Cabe destacar que a rede de monitoramento da CETESB

está em contínuo melhoramento, no sentido de aumentar o número de estações e atualizar os métodos de amostragem e tecnologias empregadas (CETESB, 2010).

Com relação ao monitoramento do ozônio, apenas há medição através da rede automática e nas seguintes estações: Parque Dom Pedro II, Santana, Mooca, Ibirapuera, São Caetano do Sul, Cerqueira César, Diadema, Santo Amaro, Santo André, Ibirapuera, Pinheiros, IPEN-USP, Nossa Senhora do Ó. Em função da localização de cada uma dessas estações, as concentrações registradas podem refletir influências locais. Por exemplo, as localizadas na região do ABC paulista, como é o caso da estação de São Caetano do Sul, estão sujeitas a fontes industriais e não majoritariamente a fontes veiculares, embora estas também sejam significativas. As estações localizadas no Parque do Ibirapuera e no IPEN-USP estão menos expostas a influências diretas de vias de tráfego. Outras, por sua vez, estão localizadas ao lado de vias importantes da cidade, como é o caso da estação de Pinheiros. Essa diferença das características locais pode levar a diferentes interpretações, principalmente nas altas concentrações registradas do poluente. Esse fato também é refletido nas simulações realizadas com os modelos numéricos, uma vez que a representação das fontes não é pontual e características muito particulares das localidades em que as estações estão instaladas não podem ser representadas.

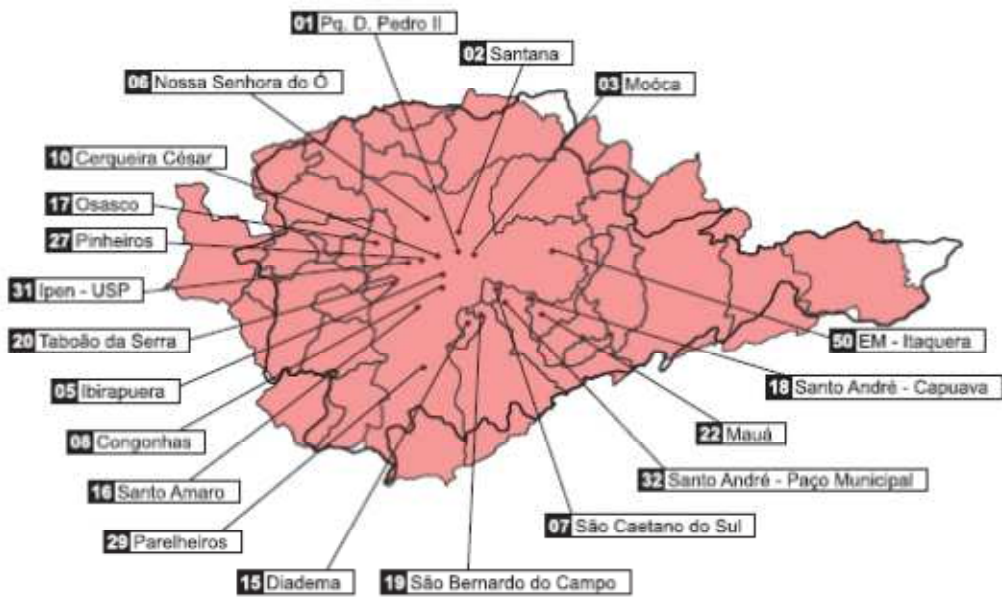


Figura 11 - Localização das estações automáticas de monitoramento da CETESB na RMSP.

Fonte: CETESB, 2012.

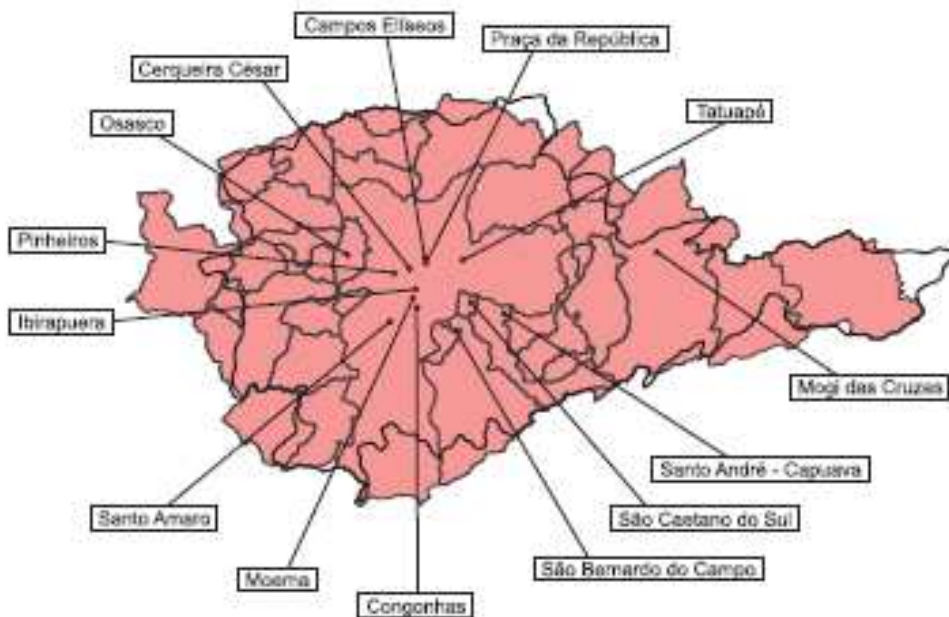


Figura 12 - Localização das estações manuais de monitoramento da CETESB na RMSP.

Fonte: CETESB, 2012.

3. O modelo WRF/Chem

Conforme descrito por Grell et al. (2005), foi desenvolvido um modelo meteorológico *online*, acoplado com o módulo químico, chamado *Weather Research and Forecasting/Chemistry* (WRF/Chem), em que os processos relacionados à qualidade do ar são consistentes com o tratamento da parte meteorológica. Ambos os processos utilizam o mesmo esquema de transporte (conservação de massa e escalares), a mesma grade (horizontal e vertical) e o mesmo esquema físico para o transporte sub-grade¹. Além disso, o mesmo passo de tempo é utilizado não necessitando de interpolação temporal. O módulo químico consiste na representação da deposição seca, das emissões biogênicas, antropogênicas, do solo, do mar, e em diferentes mecanismos químicos, que podem ser escolhidos pelo usuário, além de um complexo esquema de fotólise e um avançado módulo de aerossóis.

Sabe-se que simular e prever a qualidade do ar é um problema complicado, tanto em relação à meteorologia (no que diz respeito à velocidade e direção do vento, turbulência, radiação, nuvens e precipitação) quanto em relação à química (nos processos de deposição e transformações químicas). Na atmosfera real, os processos químicos e físicos funcionam de forma acoplada, isto é, a química pode afetar os processos atmosféricos, como por exemplo, através do balanço de radiação, ou através da interação dos aerossóis com núcleos de condensação de nuvens. Da mesma forma, a presença de nuvens e a precipitação influenciam as transformações químicas e o processo de remoção, e mudanças locais no vento ou na turbulência continuamente afetam o transporte químico (GRELL et al., 2005).

¹ Os processos que possuem dimensões menores do que a resolução da grade do modelo são denominados sub-grade.

O modelo WRF consiste em uma versão mais atualizada do *Mesoscale Modeling System* (MM5). O código do WRF foi construído para ser portátil e eficiente num ambiente de computação paralela, é modular e possui um único código fonte, com atualizações frequentes pela comunidade científica. Tais características visam atender diferentes aplicações, como a pesquisa e a operação. O modelo oferece um grande número de opções físicas, e pode ser utilizado para diferentes interesses em diferentes escalas, desde poucos metros a centenas de quilômetros. Estas aplicações incluem pesquisa e previsão numérica operacional do tempo, assimilação de dados, pesquisa de parametrizações físicas, simulações climáticas, da qualidade do ar, acoplamento oceano-atmosfera e simulações idealizadas (como a geração de ondas baroclínicas, vórtices e convecção).

A Figura 13 apresenta um esquema geral da estrutura de funcionamento do sistema WRF versão 3 (SKAMAROCK et al., 2008). O *WRF Preprocessor System* (WPS) consiste no pré-processador que é utilizado basicamente para simulação de casos reais. Este é composto por um conjunto de três programas cujo papel principal é preparar os dados de entrada para simulações. Cada um destes programas desempenha um estágio de preparação: o *geogrid* define os domínios do modelo e interpola o dado geográfico estático (topografia) para as dimensões definidas pelo usuário; o *ungrib* extrai os campos meteorológicos no formato GRIB e o *metgrid* interpola horizontalmente os campos meteorológicos extraídos pelo *ungrib* para a grade definida pelo usuário. No núcleo *Advanced Research WRF* (ARW) é onde o processamento é efetivamente realizado. Nesse núcleo as equações são descritas e o processo de integração é realizado. Detalhes sobre o modelo e suas atualizações podem ser obtidos no sítio: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf>.

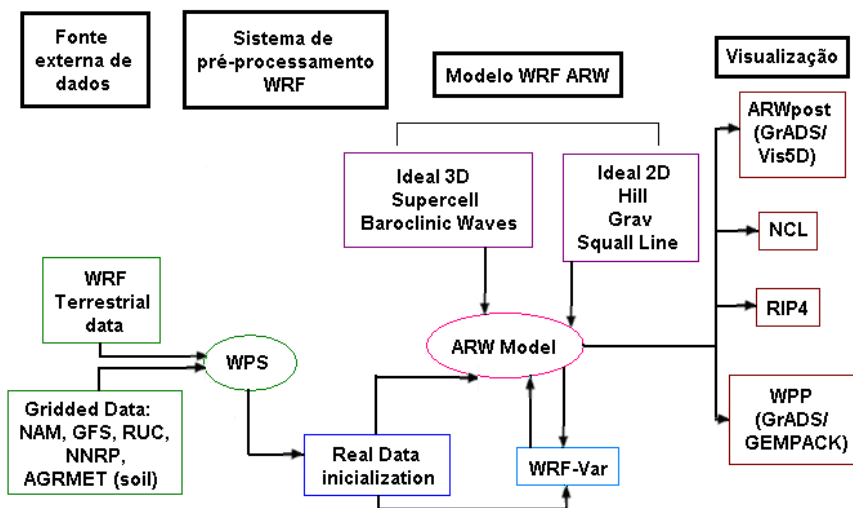


Figura 13 - Fluxograma do Sistema de Modelagem WRF versão 3.

Fonte: Adaptada de (SKAMAROCK et al., 2008).

O ARW é uma das opções de núcleo dinâmico oferecida pelo WRF. Este núcleo representa um modelo não hidrostático que utiliza a equação da continuidade de massa. O único termo negligenciado em todo o conjunto de equações é o termo de aquecimento diabático, que tem sua contribuição na equação de tendência da pressão. Como consequência, a estrutura dinâmica permite o uso de alta resolução. Horizontalmente, todas as equações do modelo estão nos moldes das projeções: Lambert, Polar ou Mercator. A coordenada vertical é do tipo sigma, caracterizada por acompanhar o terreno. O modelo faz uso do esquema numérico de integração de 2ª e 3ª ordem de Runge-Kutta e opção de 2ª a 6ª ordem para o esquema de advecção nas direções horizontal e vertical. A grade utilizada é do tipo C de Arakawa, na qual as variáveis cinemáticas são deslocadas em relação às variáveis termodinâmicas, sendo integradas em meio espaçamento de grade, ou seja, $\Delta x/2$, $\Delta y/2$ e $\Delta z/2$, nas direções zonal, meridional e vertical, respectivamente.

Com relação ao módulo químico incluído no modelo, os dados de entrada necessários para representar as condições iniciais devem estar em pontos de grade e podem ser

provenientes de dados observados, da análise de outros modelos ou ainda das previsões dos mesmos. Cabe ressaltar que os dados de emissão biogênica e os da química são opcionais, visto que estas medições não são frequentemente realizadas e de acordo com o foco do estudo, estas podem então ser consideradas. O processo segue com a inicialização, onde ocorre a verificação da necessidade de interpolação dos dados de entrada, que é feita no WPS. Nesse momento, também são feitas as opções dos níveis verticais, tanto em relação ao espaçamento entre estes quanto em relação à quantidade de níveis. Além disto, as características da grade como as fronteiras, o ponto central e a projeção a serem utilizadas são definidos. O processamento ocorre a partir da resolução das equações, no módulo WRF/Chem. Neste caso, o ARW, responsável pelo transporte das espécies químicas, faz uso de uma solução espacial de quinta ordem para o fluxo de divergência horizontal (advecção) na equação da conservação de um escalar e de terceira ordem para o fluxo de divergência vertical, acoplado com um esquema de integração no tempo de terceira ordem de Runge-Kutta. O transporte turbulento na camada limite é resolvido através do esquema de fechamento turbulento de Mellor-Yamada de ordem 2,5 (MELLOR e YAMADA, 1982). Por fim, o pós-processamento pode ser realizado através de diferentes programas definidos pelo usuário.

De acordo com Grell et al. (2005), o modelo WRF/Chem manteve a mesma formulação física e química do MM5/Chem (GRELL et al., 2000), em particular a relacionada ao poluente ozônio. As equações de Euler não hidrostáticas representam o conjunto das equações governantes. Estas, por sua vez, são escritas na forma de fluxo utilizando variáveis com propriedades conservativas.

Para o mecanismo químico utilizado, trinta e nove espécies são prognosticadas. Para o módulo de aerossol, outras trinta e quatro variáveis são adicionadas, incluindo o número total de partículas em cada moda, assim como todas as espécies primárias e

secundárias (orgânicas e inorgânicas) para a moda de acumulação e Aitken, e três espécies para representar a moda grossa (fontes antropogênicas, marinha e aerossóis derivados do solo) (GRELL et al., 2005).

O mecanismo utilizado para a química da fase gasosa foi originalmente desenvolvido por Stockwell et al. (1990) para o *Regional Acid Deposition Model* (RADM2). Esse mecanismo é amplamente utilizado por modelos atmosféricos para a previsão de concentrações de oxidantes e poluentes do ar. As espécies inorgânicas incluídas no RADM2 são representadas por quatorze espécies estáveis, quatro intermediárias reativas e três espécies estáveis abundantes (oxigênio, nitrogênio e água). A química orgânica da atmosfera é representada por vinte e seis espécies estáveis e dezesseis radicais peróxidos. Os compostos orgânicos são agrupados com base na semelhança de suas características de reatividade. O método de aproximação do estado quase estacionário, com vinte e duas espécies diagnosticadas e outras trinta e oito previstas, é utilizado para prever a produção química e os termos de perda de tendência na solução numérica. A integração no tempo das 38 espécies previstas é então resolvida utilizando estas tendências através do método atrasado de Euler. As condições iniciais e de fronteira para as variáveis prognósticas da fase gasosa são baseadas na descrição feita por Mckeen et al. (2002). No início da integração a atmosfera é considerada limpa e os perfis verticais que caracterizam este estado da atmosfera foram obtidos através de medidas realizadas pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

O módulo de aerossóis é baseado no *Modal Aerosol Dynamics Model for Europe* (MADE - ACKERMANN et al., 1998). Aerossóis orgânicos secundários (SOA, do inglês *Secondary Organic Aerosol*) têm sido incorporados no MADE por meio do *Secondary Organic Aerosol Model* (SORGAM - SCHELL et al., 2001). O processo mais importante para a formação do aerossol secundário é a nucleação homogênea no sistema água -

ácido sulfúrico. O crescimento do aerossol por condensação ocorre em duas etapas: produção de material condensável (vapor) pela reação de precursores químicos e condensação e evaporação de espécies voláteis sobre o aerossol.

A frequência de fotólise para as vinte e uma reações fotoquímicas da fase-gás é calculada para cada ponto da grade. Nesse caso, a frequência de fotólise de um gás leva em conta o fluxo actínico, isto é, a absorção de um comprimento de onda através da secção, sendo também calculada on-line. Uma vantagem desse método é que a absorção calculada é dependente da temperatura. O modelo de fotólise pode ser aplicado em qualquer passo de tempo. Entretanto, para maior eficiência computacional sugere-se que a rotina da fotólise seja chamada com intervalos de trinta minutos. No caso da deposição seca, os fluxos de gases traço e partículas da atmosfera para a superfície são calculados pela multiplicação das concentrações na camada mais baixa do modelo pela variação da velocidade de deposição, espacialmente e temporalmente, que é proporcional a soma das três características da resistência (aerodinâmica, subcamada e superficial). Nesse caso, a resistência da superfície é derivada de resistências de superfície do solo e de plantas. As propriedades das plantas são determinadas através de informações sobre o uso do solo e da estação do ano. A resistência da superfície também depende do coeficiente de difusão, da reatividade e solubilidade da água e da reatividade dos gases traço (GRELL, et al., 2005).

O módulo de emissões foi preparado para a entrada de dados obtidos na região em que o modelo venha a ser aplicado. Originalmente, as emissões antropogênicas no modelo foram preparadas para representar os Estados Unidos, as quais são baseadas no inventário nacional de emissões disponível para a localidade. Porém, estas podem ser definidas de acordo com inventários locais, podendo ser aplicadas em qualquer região onde se haja dados disponíveis. O WRF/Chem possui um módulo para representar as fontes biogênicas, onde são tratadas as emissões dos isoprenos,

monoterpenos, outros compostos orgânicos voláteis, além das emissões do nitrogênio proveniente do solo. Em resumo, basta ter os dados de entrada para alimentar as condições iniciais do modelo, pois os módulos são bastante detalhados e específicos para cada caso de interesse de estudo.

4. Período de estudo

Após análise dos últimos anos, com relação às altas concentrações de ozônio registradas na RMSP, foi selecionado o período de estudo, que compreende o mês de novembro de 2011, especificamente o período entre 0000Z do dia 08 e o mesmo horário do dia 16. Durante o dia 11 de novembro de 2011 foram verificadas ultrapassagens das concentrações de ozônio em algumas estações de monitoramento da CETESB. Por ser uma data relativamente recente, o período foi selecionado por representar as condições atuais da RMSP, principalmente com relação à poluição atmosférica, isto é, as influências dos programas de controle de emissão no estado e as condições atuais de circulação de veículos.

4.1. Caracterização Meteorológica

De acordo com o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE), durante o mês de novembro de 2011, quatro sistemas frontais atingiram o país, número abaixo da climatologia para as latitudes entre 25°S e 35°S. A primeira frente do mês foi verificada no dia 06 de novembro, atingindo o estado do Rio Grande do Sul e causando queda de temperatura e pouca quantidade de chuva nessa região. Pode-se observar através da Figura 14 a trajetória das frentes que passaram pelo litoral do país. A segunda frente atingiu a região de Iguape (SP), localizada ao sul da cidade de Santos, litoral paulista. Já a terceira frente, formou-se a partir da organização da nebulosidade presente já no sudeste do país, na região de Santos e atingiu o estado da Bahia. A última frente atingiu o país, mas não passou do estado do Rio Grande do Sul.

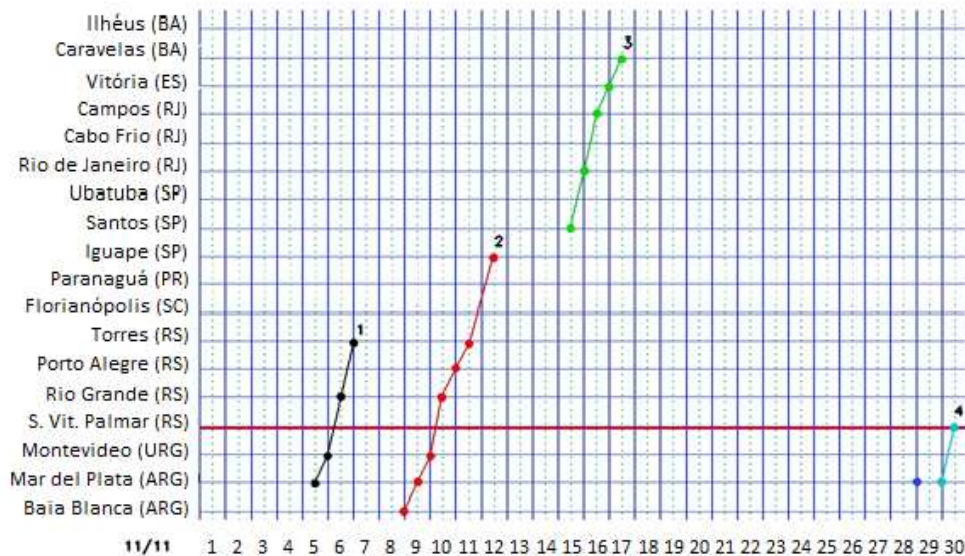


Figura 14 - Sistemas frontais que atingiram o país (acima da linha horizontal vermelha) no mês de novembro de 2011. Fonte: CPTEC-INPE.

A Figura 15 apresenta uma sequência de imagens do satélite GOES-12 do canal infravermelho obtidas do CPTEC-INPE para o período de 08 a 15 de novembro as 1500Z (13:00 Horário Brasileiro de Verão - HBV). A partir do dia 08 observou-se nebulosidade no sul do país e sua organização ao longo do dia 09 (Figura 15a e 15b). No dia 10, uma frente fria com características bem definidas visualmente, com uma banda de nebulosidade extensa e um centro de baixa pressão em sua retaguarda foi facilmente observada (Figura 15c). Durante esses três dias iniciais houve o predomínio de ausência de nebulosidade sobre o estado de São Paulo. No dia 11, contudo, o sistema frontal se enfraqueceu e grande parte da nebulosidade seguiu em direção ao oceano (Figura 15d). Essa frente que se deslocou para o oceano não afetou diretamente o estado de São Paulo, sendo observada nesse dia nebulosidade esparsa sobre a região de interesse. O dia seguinte se manteve parecido com o dia anterior de acordo com a Figura 15e. Já para o dia 13 foi observada grande quantidade de nuvens sobre a região sul, sudeste e parte do centro-oeste do Brasil, conforme Figura 15f. E por fim, os dois últimos dias do período, 14 e 15 de novembro foram marcados pela presença de grande nebulosidade (Figura 15g e 15h).

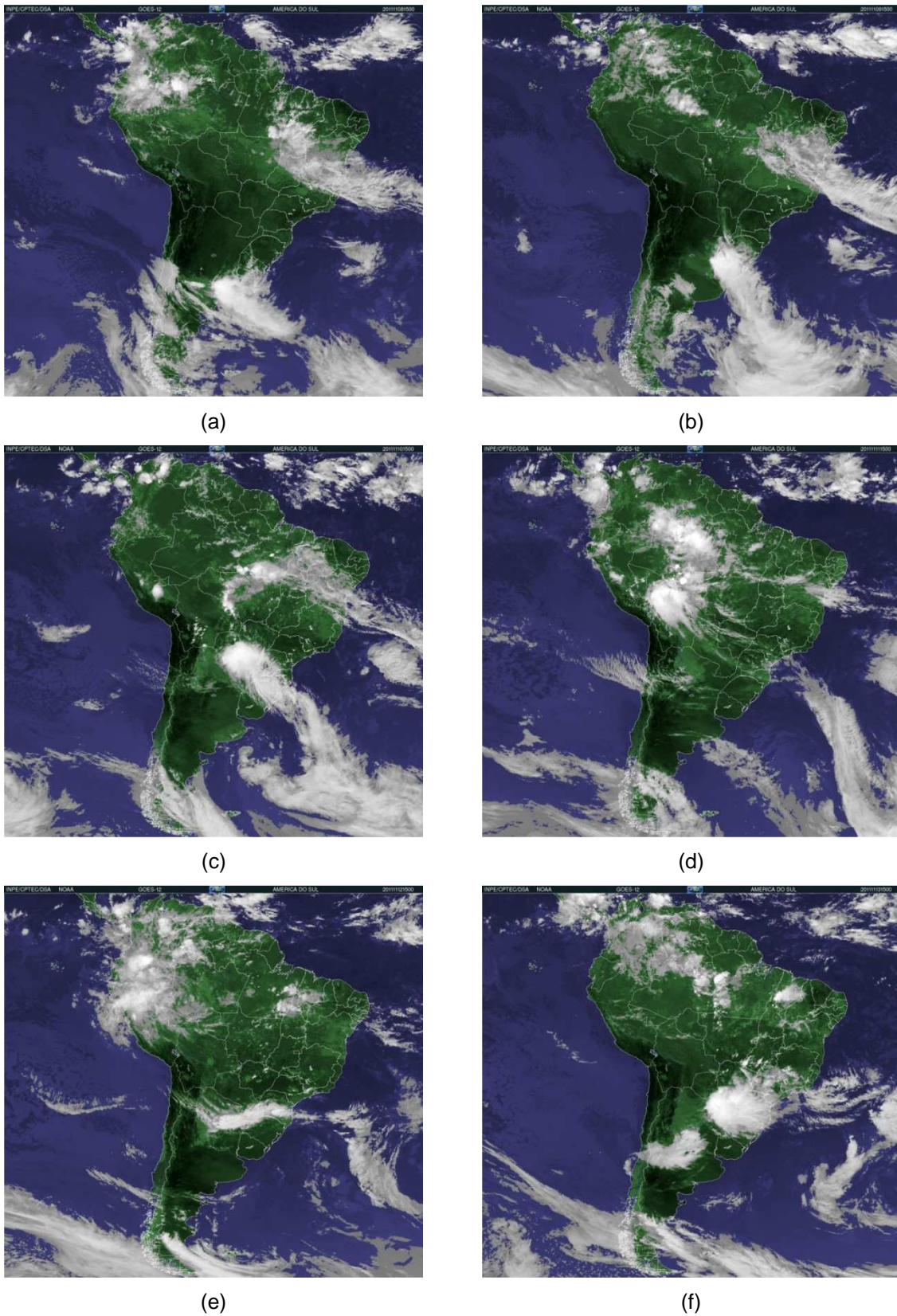


Figura 15 - Imagens do satélite GOES-12 às 1500Z para o período de (a) 08, (b) 09, (c) 10, (d) 11, (e) 12, (f) 13, (g) 14 e (h) 15 de novembro de 2011. FONTE: CPTEC-INPE.

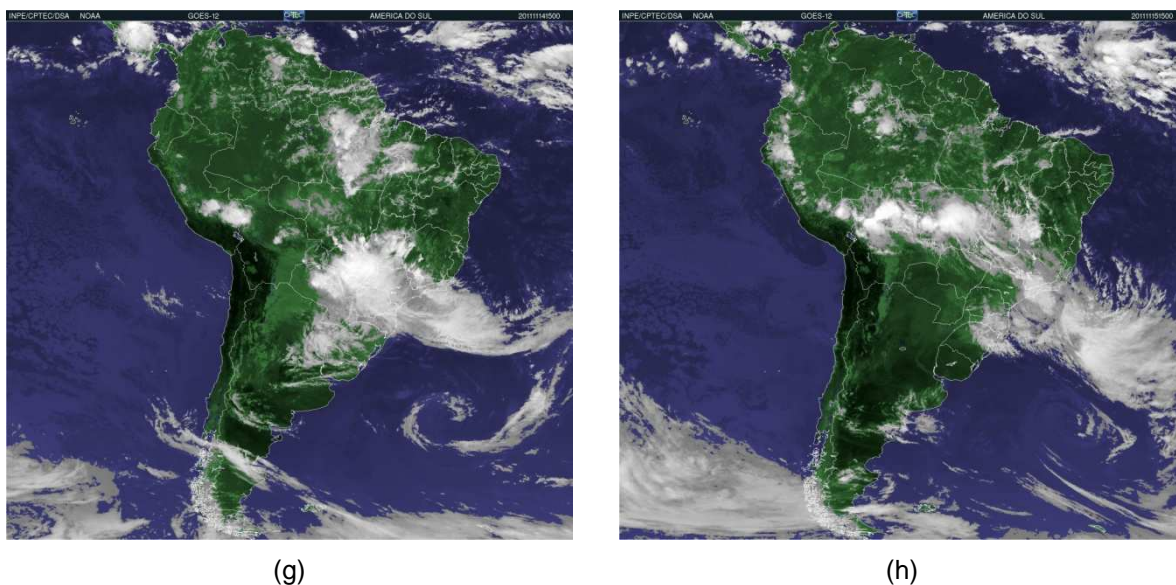
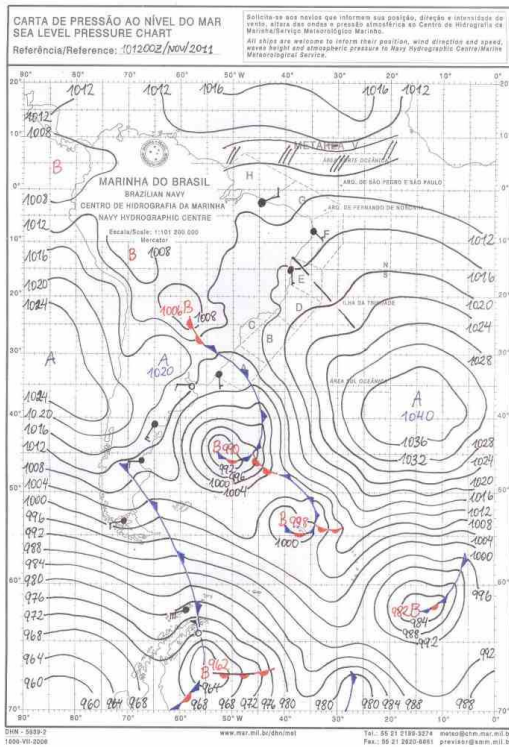
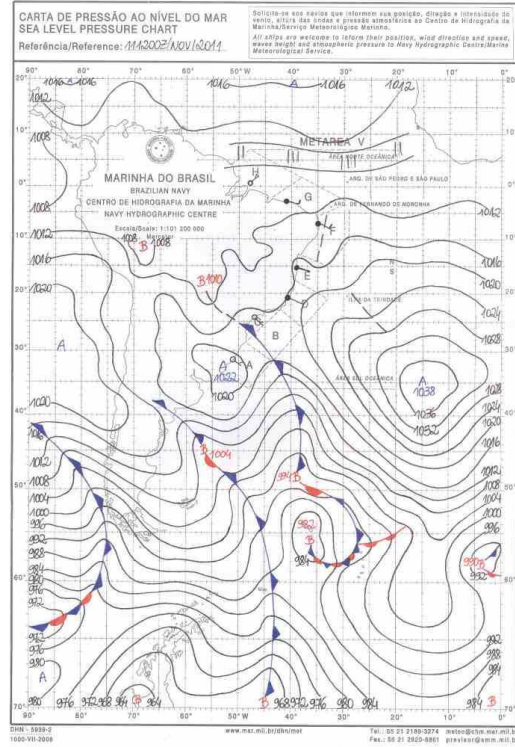


Figura 15 - Continuação.

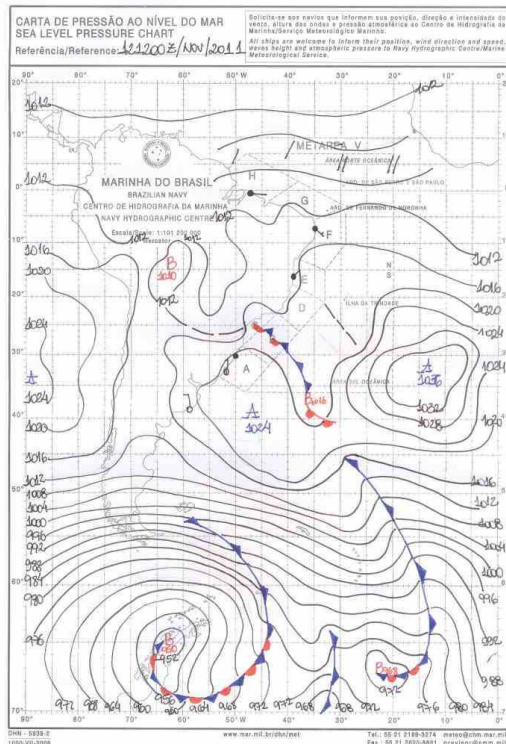
A Figura 16 apresenta as cartas sinóticas dos dias 10, 11 e 12 de novembro às 1200Z, obtidas da Divisão de Hidrografia da Marinha do Brasil. Apenas esses três dias foram mostrados por representar o dia anterior e o posterior ao dia mais poluído do período de estudo (dia 11/11). Observa-se no dia 10 (Figura 16a) a frente fria também verificada através das imagens de satélite sobre o sul do Brasil. O estado de São Paulo está sob a influência da Alta Subtropical da América do Sul (ASAS). No dia 11, a alta pressão ainda predomina em São Paulo, porém, observa-se a frente fria com tendência de deslocamento para o oceano próximo ao estado (Figura 16b). No dia 12 a situação apresentada na carta sinótica já não é bem definida, onde o estado ainda parece estar sob condições de alta pressão atmosférica, contudo, há uma frente fria com um ramo estacionário próximo ao estado de São Paulo (Figura 16c).



(a)



(b)



(c)

Figura 16 - Cartas sinóticas às 1200Z dos dias (a) 10 e (b) 11 e (c) 12 de novembro de 2011.

FONTE: Divisão de Hidrografia da Marinha do Brasil.

Valores de radiação solar, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a estação localizada no Mirante de Santana, foram utilizados para avaliar a quantidade de radiação incidente na região de interesse. Através da Figura 17, observa-se a sequência de radiação solar (em $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$) registrada na estação ao longo do mês de novembro. Observa-se que os valores encontrados durante o período são, em geral, bastante elevados. A primeira quinzena do mês foi marcada por valores na ordem de $3000 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-2}$, indicando uma situação característica de intensa radiação solar incidente, ausência de nebulosidade significativa ou a passagem de algum sistema frontal. Este fato sugere condições favoráveis para a formação do ozônio na troposfera, pois há essa condição de intensa radiação podendo estar associada à emissão dos precursores do ozônio, o que ocorre durante a maior parte dos dias na RMSP. Na metade do mês, contudo, houve uma diminuição na intensidade da radiação, com valores chegando a menos da metade do registrado no início do período. Outro período de diminuição da radiação pode ser observado na última quinzena do mês. Os valores registrados estão de acordo com a nebulosidade observada durante o período através da análise das imagens de satélite.

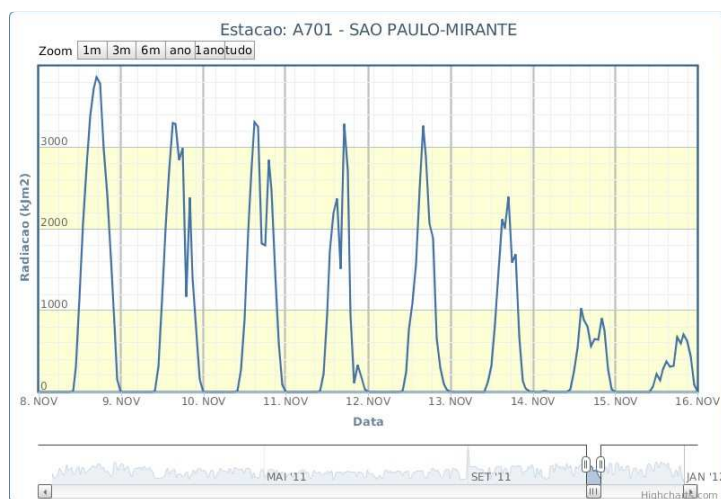


Figura 17 - Radiação solar para o período de 8 a 16 de novembro de 2011 na estação localizada no Mirante de Santana.

Fonte: INMET.

A Figura 18 apresenta o total de precipitação, acumulada em 24h, na estação meteorológica do INMET, com o intuito de uma análise mais localizada sobre a região de interesse e disponibilidade de dados observados. Observa-se que foi uma semana relativamente seca, com ocorrência de precipitação nos dias 14, 15 e 16 de novembro, que pode estar associada à influência do sistema frontal observado nestes dias próximo a região. Ainda assim, o total acumulado nesses dias foi abaixo de 25 mm individualmente, o que representa baixa intensidade de precipitação.



Figura 18 - Precipitação acumulada (mm) no período de 8 a 16 de novembro na estação localizada no Mirante de Santana.

Fonte: INMET.

Na Figura 19, observa-se os valores de temperatura e umidade relativa registrados na estação do Mirante de Santana. O ciclo diurno variou em torno dos 20°C. O dia mais quente foi o dia 11, que também apresentou as maiores concentrações do ozônio em grande parte das estações da CETESB. No final da semana as amplitudes térmicas diárias foram diminuindo com pouca variação entre os períodos diurno e noturno, provavelmente associadas a maior cobertura de nuvens, como foi mostrada através das imagens de satélite. A umidade relativa apresentou grande amplitude durante o início da semana, apresentado horários bastante secos, como foi o caso dos dias 09, 10 e 11 de novembro, com valores mínimos abaixo de 30%. O final da semana apresentou

características diferentes, mantendo valores mais altos de umidade relativa. Tal fato também pode ser observado nos valores de temperatura e estiveram associados à passagem de um sistema frontal sobre a RMSP.

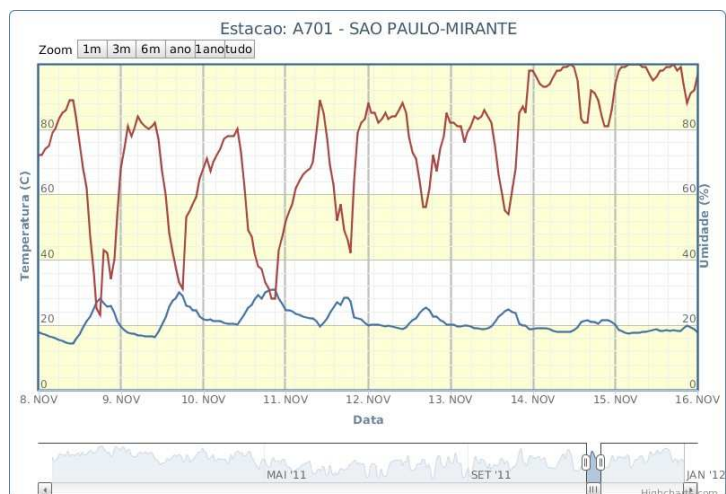


Figura 19 - Temperatura diária na estação do INMET localizada no Mirante de Santana durante o período de 8 a 16 de novembro (linha azul, em °C) e umidade (linha vermelha, em %) registrada na estação.

Fonte: INMET.

4.2. Caracterização da Qualidade do Ar

A qualidade do ar é analisada diariamente pela CETESB de acordo com os valores de concentração dos poluentes regulamentados que são monitorados. São então realizados cálculos para comparação com os padrões de qualidade do ar (valores máximos horários para o O_3 e NO_2 , médias móveis de oito horas e máximo horário para o CO, médias de 24 horas para o SO_2 e PM_{10} e médias geométricas de 24 horas para o particulado total em suspensão - PTS). Os valores obtidos são utilizados para enquadrar a estação em uma das faixas de definição de qualidade do ar previamente definidas tendo como base a legislação ambiental.

As concentrações de ozônio registradas na estação do IPEN - USP podem ser observadas na Figura 20. Nota-se que a primeira quinzena do mês foi marcada por altas concentrações do poluente, destacando-se o dia 11 que registrou valor aproximado de $350 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Após o dia 11 as amplitudes das concentrações diminuíram e mantiveram-se mais baixas até o final do mês, mas ainda com a ocorrência de violação ao padrão de qualidade do ar.

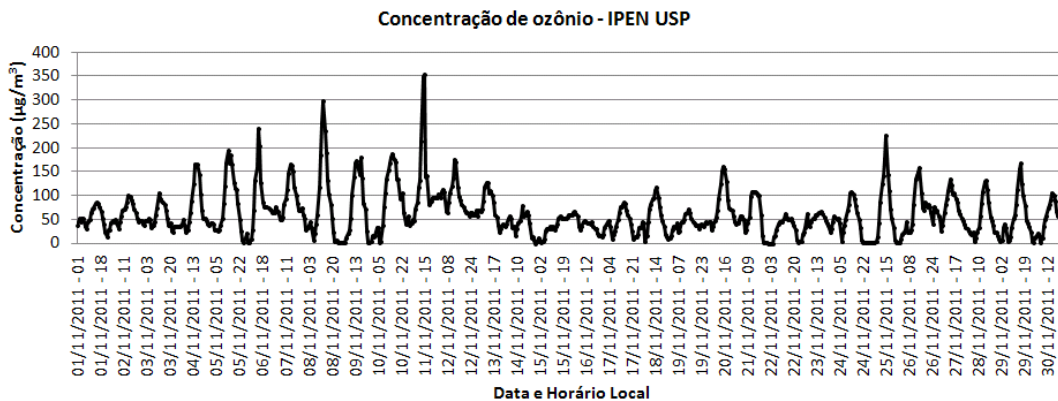


Figura 20 - Concentração média horária de ozônio (em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) na estação da CETESB localizada no IPEN - USP para o mês de novembro de 2011.

Na Tabela 2 observa-se o índice da qualidade do ar para o poluente ozônio. Pode-se notar que durante os cinco primeiros dias, nenhuma das estações em que havia dados válidos para o ozônio apresentou boa qualidade do ar. Destaque para os dias 8 e 11, quando algumas estações apresentaram má qualidade do ar, com concentrações entre 200 e $800 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Isso significa que toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda apresentar falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde podem atingir grupos sensíveis como crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas (CETESB, 2012). No dia 13 de novembro algumas estações ainda apresentavam qualidade do ar regular, porém com tendência de melhora, o que de fato ocorreu nos dois últimos dias, quando todas as estações com dados de ozônio apresentaram boa qualidade do ar. Cabe destacar que, para efeito de divulgação a maior concentração registrada indica a categoria da qualidade do ar.

Tabela 2 - Índice da qualidade do ar para o ozônio de acordo com a CETESB para os dias correspondentes ao período de estudo. Valores em $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

	08/11/2011	09/11/2011	10/11/2011	11/11/2011
Boa (0 - 80)	-	-	-	-
Regular (>80 - 160)	Mauá, Mooca, Diadema, Parelheiros, Santo André - Capuava	Santana, Mooca, Diadema, Nossa Sra. do Ó, Parelheiros, Pinheiros, Santo André - Capuava	Santana, Parque D. Pedro, Mooca, Diadema, Nossa Sra. do Ó, Parelheiros, Pinheiros	Mauá, Parelheiros, Santo André - Capuava
Inadequada (>160 - 200)	Santana, Parque D. Pedro, Nossa Sra. do Ó	Mauá, Ibirapuera, São Caetano do Sul, IPEN-USP	Mauá, Ibirapuera, São Caetano do Sul, IPEN-USP, Santo André - Capuava	Diadema
Má (>200 - 800)	Ibirapuera, IPEN- USP, São Caetano do Sul, Pinheiros	-	-	Santana, Parque D. Pedro, Ibirapuera, Mooca, São Caetano do Sul, IPEN-USP, Nossa Sra. do Ó, Pinheiros
	12/11/2011	13/11/2011	14/11/2011	15/11/2011
Boa (0 - 80)	-	Mauá, Diadema, Parelheiros, Santo André - Capuava	Santana, Mauá, Parque D. Pedro, Ibirapuera, Mooca, São Caetano do Sul, Diadema, IPEN- USP, Nossa Sra. do Ó, Parelheiros, Pinheiros, Santo André - Capuava	Santana, Mauá, Parque D. Pedro, Ibirapuera, Mooca, São Caetano do Sul, Diadema, IPEN- USP, Nossa Sra. do Ó, Parelheiros, Pinheiros, Santo André - Capuava
Regular (>80 - 160)	Mauá, Parque D. Pedro, Ibirapuera, Mooca, São Caetano do Sul, Diadema, Nossa Sra. do Ó, Parelheiros, Pinheiros, Santo André - Capuava	Santana, Parque D. Pedro, Ibirapuera, Mooca, São Caetano do Sul, Nossa Sra. do Ó, Pinheiros	-	-
Inadequada (>160 - 200)	Santana, IPEN- USP	-	-	-
Má (>200 - 800)	-	-	-	-

Os índices verificados indicando alta concentração de poluentes, principalmente no início da semana, podem estar associados às condições meteorológicas observadas. Havia condições ambientais favoráveis à formação do ozônio, como o ar seco, altas temperaturas e ausência de nuvens na região. Como consequência, houve maior intensidade de radiação solar, fator essencial para a formação do poluente, juntamente com a emissão de seus precursores.

Conforme descrito anteriormente, a formação do ozônio troposférico ocorre quando óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COV) reagem na atmosfera na presença de luz solar. A exaustão de motores de veículos, emissões industriais e solventes químicos representam a maior fonte antropogênica dos precursores do ozônio no caso da RMSP. Como é um poluente secundário, em regiões amplamente urbanizadas as maiores concentrações deste poluente podem não ser registradas nas áreas mais centrais. Ainda que os compostos sejam formados em áreas urbanas, estes podem ser transportados pelo vento por longas distâncias ocasionando altas concentrações em locais menos urbanizados, além de poder ter grande contribuição das fontes biogênicas de hidrocarbonetos nessas regiões. O aumento da concentração de ozônio com a distância está relacionado com a reatividade diferente entre o NO_x e os COV. Como o NO_x é mais reativo, à medida que o ar é deslocado ocorre uma mudança na relação COV/ NO_x e esta se torna mais favorável para a formação do ozônio.

5. Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada neste trabalho, que foi separada da seguinte maneira: primeiramente foi apresentada a definição das simulações, onde foram apresentados os casos de estudo e seus objetivos. Na sequência, foi apresentada a configuração utilizada no modelo e descrição dos cenários utilizados nas simulações, a metodologia empregada para criação dos arquivos de emissão e o tratamento para representação dos cenários do IPCC no WRF/Chem. Por fim, foi apresentada a avaliação estatística, que foi aplicada aos resultados das simulações como forma de comparação e validação do modelo para o período em que havia dados observados.

5.1. Definição das Simulações

Foram definidos seis conjuntos de simulações para o período de interesse, conforme apresentado na Tabela 3. No primeiro caso pretendeu-se representar e avaliar as concentrações atuais do ozônio na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Cabe destacar que esse caso será referenciado como caso base, pois, para esse período existem dados medidos disponíveis para a validação dos resultados obtidos com o modelo. O objetivo do segundo caso foi servir de comparação para os dois casos seguintes, o terceiro e o quarto, já que para esse caso foram utilizados os resultados da previsão do modelo climático global CCSM3 para o ano de 2011 levando-se em conta o cenário mais pessimista (SRES A2) e o mais sustentável (SRES B1). O intuito do terceiro caso foi avaliar o impacto das mudanças previstas na temperatura global e outros parâmetros meteorológicos necessários para inicialização do modelo, nas concentrações de ozônio, sobre a mesma região. Para isso, resultados da previsão do

modelo climático global CCSM3 para os anos de 2020 e 2050 representando o cenário mais pessimista (SRES A2) foram utilizados. O quarto caso é semelhante ao segundo, porém utilizou o cenário mais sustentável (SRES B1) com relação às previsões climáticas segundo o mesmo modelo. Com o quinto caso pretendeu-se estimar uma situação futura, com mudanças nas emissões urbanas, considerando-se a aplicação de políticas de controle de emissões que estão presentes na agenda política, considerando os anos de 2020 e 2050 e, para isso, as condições meteorológicas atuais foram utilizadas. Nesse caso o intuito foi estimar a situação predita caso as condições atmosféricas se mantenham como as de hoje em dia, mas com modificação nas emissões. O sexto e último caso considera a mudança tanto nas fontes urbanas quanto às mudanças climáticas do cenário mais pessimista para o ano de 2050.

Tabela 3 - Sumário das simulações

	Meteorologia	Emissão	Objetivo
Caso 1	Dados meteorológicos do período de estudo (2011)	Emissão baseada no inventário da CETESB e medidas experimentais de fatores de emissão com dados de túneis	Verificar se as concentrações ambientais simuladas estão de acordo com as medidas para o período selecionado
Caso 2	Dados meteorológicos dos dois cenários do IPCC para o ano de 2011	Emissão baseada no inventário da CETESB e medidas experimentais de fatores de emissão com dados de túneis	Avaliar as condições ambientais de no ano de 2011 mantendo-se os padrões de emissão do período de estudo em ambos os cenários do IPCC
Caso 3	Dados meteorológicos do IPCC (SRES A2) para os anos de 2020 e 2050	Emissão baseada no inventário da CETESB e medidas experimentais	Avaliar as condições ambientais nos anos de 2020 e 2050 mantendo-se os padrões de emissão do período de estudo (2011)
Caso 4	Dados meteorológicos do IPCC (SRES B1) para os anos de 2020 e 2050	Emissão baseada no inventário da CETESB e medidas experimentais	Avaliar as condições ambientais nos anos de 2020 e 2050 mantendo-se os padrões de emissão do período de estudo (2011)

Tabela 3 - Continuação.

Caso 5	Dados meteorológicos do período de estudo (2011)	Futura - Emissão estimada para o futuro, levando-se em conta os programas de controle de emissão (para 2020 e 2050)	Avaliar as condições ambientais levando-se em conta redução das emissões considerando novas fases do PROCONVE
Caso 6	Dados meteorológicos dos cenários do IPCC para o ano de 2050	Futura - Emissão estimada para o futuro, levando-se em conta os programas de controle de emissão (para 2050)	Avaliar as condições ambientais levando-se em conta redução das emissões considerando novas fases do PROCONVE e as mudanças climáticas

Os dados das projeções futuras dos cenários do IPCC utilizados nesse trabalho foram extraídos do modelo *Community Climate System Model* (CCSM3 - COLLINS et al., 2006), desenvolvido e utilizado pela Seção de Pesquisa de Mudanças Climáticas (*Climate Change Research Section* - CCR) do *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). Essa seção utiliza modelos climáticos acoplados para estudar a sensibilidade e a estabilidade do Sistema Terrestre quando sujeito a diferentes forçantes, incluindo mudanças dos gases do efeito estufa e aerossóis, dentre outras. Apesar da previsão com o modelo CCSM3 ter sido realizada até o ano de 2100 para o caso mais pessimista e até o ano de 2200 no caso sustentável, os anos de 2020 e 2050 foram escolhidos para avaliação, pois, com o passar dos anos, fica cada vez mais difícil estimar as emissões locais, sujeitas a políticas públicas vigentes, tamanho da região, quantidade de habitantes, dentre outros fatores.

A Figura 21 apresenta a anomalia de temperatura à superfície prevista pelo sistema CCSM3 em função dos anos. A linha preta inferior à temperatura de 0°C representa a integração com o modelo no modo de análise, isto é, o modelo foi executado após a data em que os fatos ocorreram, tendo, dessa forma, uma maior quantidade de dados observados para a condição inicial da simulação. Isso foi feito até o ano 2000 quando o modelo então começou a ser executado no modo de previsão. As linhas coloridas representam os cenários definidos com base na emissão de poluentes estimados para

o futuro. Em especial, a linha vermelha, que representa o cenário SRES A2, aponta o pior cenário futuro, com anomalia positiva de temperatura superior a 3°C no ano de 2090 e com tendência de subida e a linha azul representa o cenário SRES B1, caso mais sustentável, com anomalia positiva de aproximadamente 1°C constante ao longo dos 200 anos da integração.

O sistema CCSM3 é composto de um grupo de modelos acoplados. Para representar a atmosfera, o *Community Atmosphere Model* versão 3 (CAM3; COLLINS et al. 2004, 2006) é utilizado. Além deste, são componentes do sistema: o *Community Land Surface Model* version 3 (CLM3; OLESON et al. 2004; DICKINSON et al. 2006) para representar a superfície, o *Community Sea Ice Model* version 5 (CSIM5; BRIEGLEB et al. 2004) para representação do gelo marinho, e o *Parallel Ocean Program* versão 1.4.3 (POP; SMITH & GENT, 2002) para representar o oceano.

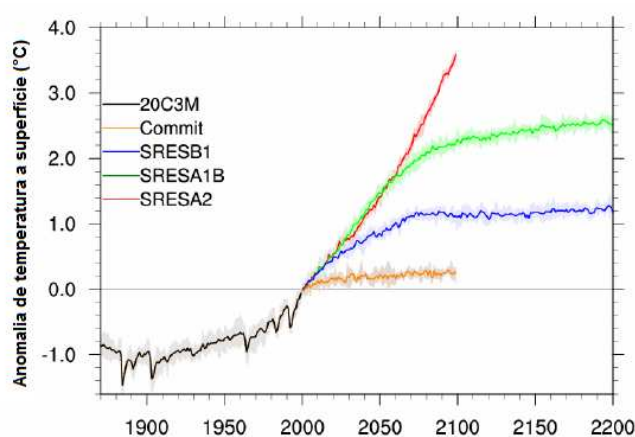


Figura 21 - Anomalia de temperatura à superfície para os cenários definidos pelo IPCC.

Fonte: Adaptada de http://www.cgd.ucar.edu/ccr/strandwg/CCSM3_AR4_Experiments.html, acesso em 26/06/2012.

A versão padrão do CAM3 é baseada em um núcleo dinâmico espectral e Euleriano com truncamento espectral triangular nos números de onda 31, 42 e 85. O espaçamento de grade zonal no Equador varia de 3,75° a 1,41° para a configuração T31 e T85. A dimensão vertical é tratada usando 26 níveis com uma coordenada

híbrida que acompanha o terreno. Esse tipo de combinação utiliza coordenada sigma nos níveis mais baixos (que são influenciados pela topografia), apenas níveis de pressão nos níveis mais altos do modelo e, nos níveis intermediários, alterna entre coordenadas sigma e níveis de pressão. O modelo de superfície é integrado na mesma grade horizontal do que o modelo atmosférico, embora cada grade seja dividida para representar as características do solo, como vegetação, áreas urbanas, lagos e gelo. São utilizadas 10 camadas abaixo da superfície para representar o solo.

Com isso, para utilizar esses dados como condição inicial do WRF/Chem, foi necessária a conversão do sistema de coordenadas, de níveis híbridos para níveis de pressão e de grade triangular espectral para uma grade regular de 1,5° de espaçamento de grade, o que corresponde a aproximadamente 153 km, para a latitude de São Paulo.

5.1.1. Caso 1

No primeiro caso o modelo WRF/Chem foi utilizado a fim de representar as condições atmosféricas e químicas observadas no período selecionado levando-se em conta a emissão presente, isto é, representando o contexto atual das emissões de poluentes e políticas governamentais vigentes. Este caso é uma simulação de controle, já que existiam dados observados para o período e foi possível a comparação dos valores simulados e medidos e, portanto, o principal objetivo foi a validação do WRF/Chem, para que o mesmo pudesse ser utilizado para os casos seguintes.

Os campos atmosféricos utilizados como condição inicial das simulações com o WRF/Chem foram obtidos do *Global Data Assimilation System* (GDAS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). As análises globais possuem espaçamento de grade de 1° (equivalente a aproximadamente 102 km) e estão

disponíveis a cada 6 horas. Para criação desses campos, o modelo global do NCEP, o *Global Forecast System* (GFS) é utilizado. Essas análises são preparadas aproximadamente 1 hora após a inicialização do modelo com o intuito de obter maior quantidade de observações e, assim, melhorar a qualidade dos campos meteorológicos. Esse modelo é bastante utilizado como condição inicial de outros modelos (de área limitada) e, no caso específico do WRF, o modelo utiliza as saídas do GFS sem a necessidade de preparação dos dados que serão utilizados como condição inicial. O WRF reconhece o formato de saída do GFS e busca as informações necessárias para o instante inicial das simulações.

As emissões foram baseadas no inventário de emissões da CETESB e medidas experimentais de fatores de emissão com dados de túneis para o ano de 2011, segundo o mesmo procedimento adotado para o experimento de 2004 descrito por Sanchez-Ccoyllo et al. (2008) e Martins et al. (2006). Com isso, garante-se que as medidas tomadas para uma melhora da qualidade do ar adotada pelo governo, como a renovação da frota veicular e o uso de combustíveis alternativos, sejam embutidas no padrão de emissão. O processo de preparação dos dados de emissão para entrada no WRF/Chem é descrito a seguir nas configurações do modelo.

5.1.2. Caso 2

Esse caso também visou representar as condições ambientais do período de estudo (novembro de 2011), porém foram utilizados como condição inicial os campos meteorológicos do CCSM3 para os dois cenários selecionados, o mais pessimista (SRES A2) e o sustentável (SRES B1). Cabe ressaltar que para o ano de 2011 o modelo CCSM3 já operava no modo prognóstico e, por isso, foram utilizados os dois cenários para serem utilizados como condição inicial.

As simulações desse caso foram realizadas com o objetivo de servirem de comparação com os resultados obtidos dos casos para os cenários futuros. Por isso, foi utilizada a mesma configuração física do modelo, ou seja, não foram representadas pelo modelo a microfísica e a convecção (através da parametrização de cumulus), já que caso estivessem ligadas poderiam levar a situação de ocorrência de precipitação. Com relação às emissões, o mesmo arquivo, construído para o ano de 2011 foi utilizado.

A Figura 22 mostra campos espaciais de temperatura previstos pelo modelo CCSM3 para o ano de 2011 para os cenários SRES B1 (Figura 22a) e SRES A2 (Figura 22b), que foram utilizados no WRF/Chem como condição inicial e de contorno. Esses campos foram selecionados dentre o conjunto de dados utilizados no período. Como são saídas de um modelo, existe uma variação horária das condições sobre as regiões. Observa-se que para esse tempo, para o cenário B1 maiores temperaturas foram previstas para boa parte do Brasil, quando comparadas ao cenário A2, o qual, na média global apresenta um maior aumento de temperatura quando comparado ao cenário B1. No restante da América do Sul, maiores valores de temperatura foram previstos no cenário A2. Ressalta-se que para o ano de 2011 os dois cenários são muito parecidos com relação a essa variável e, por isso, poucas diferenças foram previstas.

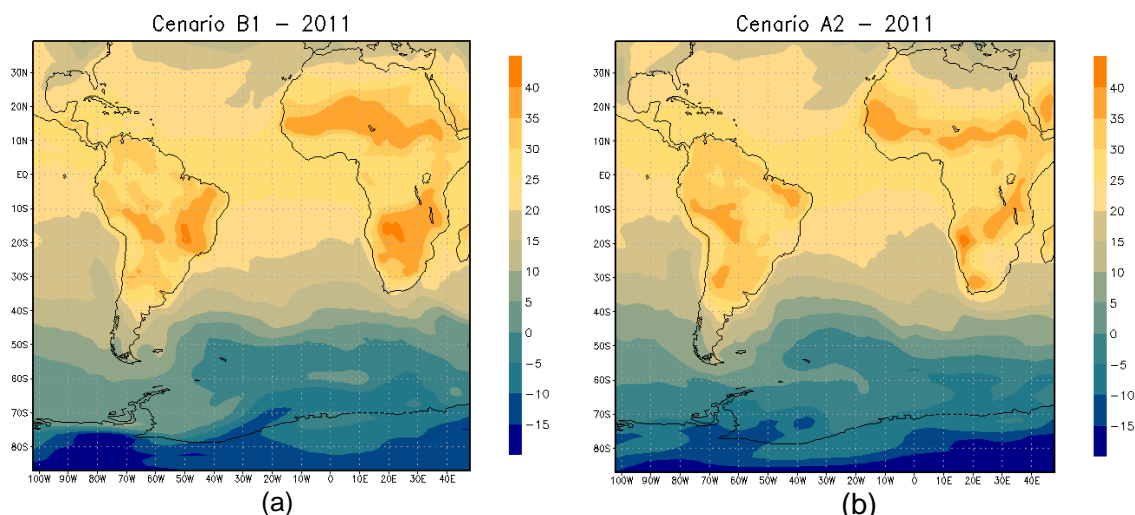


Figura 22 - Campo de temperatura projetado pelo modelo CCSM3 para o ano de 2011 para o (a) cenário B1 e (b) cenário A2.

A Figura 23 apresenta perfis diários de temperatura para os mesmos cenários, SRES B1 (Figura 23a) e SRES A2 (Figura 23b) do modelo CCSM3 para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo, que corresponde ao centro das grades definidas para as simulações. Dessa forma foi possível visualizar a variação da temperatura ao longo do período de simulação e a média da variável no tempo (linha verde na figura), para o mesmo ponto. A média para o cenário B1 foi de aproximadamente 25,5°C, enquanto para o cenário A2 foi ligeiramente superior a 27°C. Porém, a variação ao longo do tempo para os dois cenários foi bastante diferente. O cenário B1 apresentou uma queda da temperatura no dia 12 de novembro e manteve valores mais baixos até o final do período, conforme também verificado nas condições observadas para a região. Após esse dia, a variação diurna típica da temperatura não foi observada, só voltando a aumentar no final do período selecionado. Já o cenário A2, apresentou tendência de aumento ao longo do período, com as amplitudes aproximadamente constantes, situação bastante diferente das observadas no período através dos dados medidos.

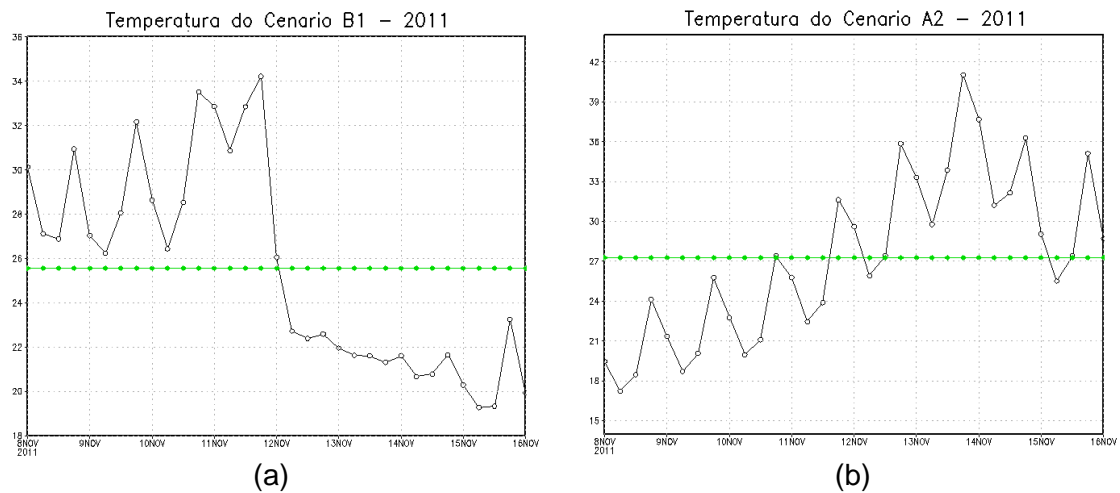


Figura 23 - Evolução temporal de temperatura (°C) projetado pelo modelo CCSM3 para o ano de 2011 para o cenário B1 (a) e cenário A2 (b) para o ponto central da grade definida para as simulações.

5.1.3. Caso 3

Neste caso, foram consideradas as emissões de 2011 (inventário construído com base em dados oficiais e medidas de campo), e as condições meteorológicas do cenário SRES A2 do IPCC, para os anos de 2020 e 2050. Tal cenário representa a situação mais pessimista das projeções, segundo simulações realizadas com o modelo CCSM3. O objetivo desse caso foi avaliar o impacto nas concentrações de ozônio sobre a RMSP com base nas condições meteorológicas futuras prognosticadas neste cenário e considerando as emissões da RMSP igual a dos dias atuais, ou seja, caso as políticas ambientais não obtenham avanços e os padrões de emissão continuem de acordo com o panorama atual.

A Figura 24a apresenta um campo de temperatura obtido do modelo CCSM3 para o mês de novembro de 2020 e a Figura 24b apresenta a variação diária de temperatura para o mesmo cenário e para o período de simulação, ou seja, 8 a 16 de novembro de 2020. Esse perfil foi extraído para o ponto localizado no centro das grades utilizadas nas simulações (centro da RMSP). A linha verde em destaque na figura representa a média calculada para o mesmo ponto.

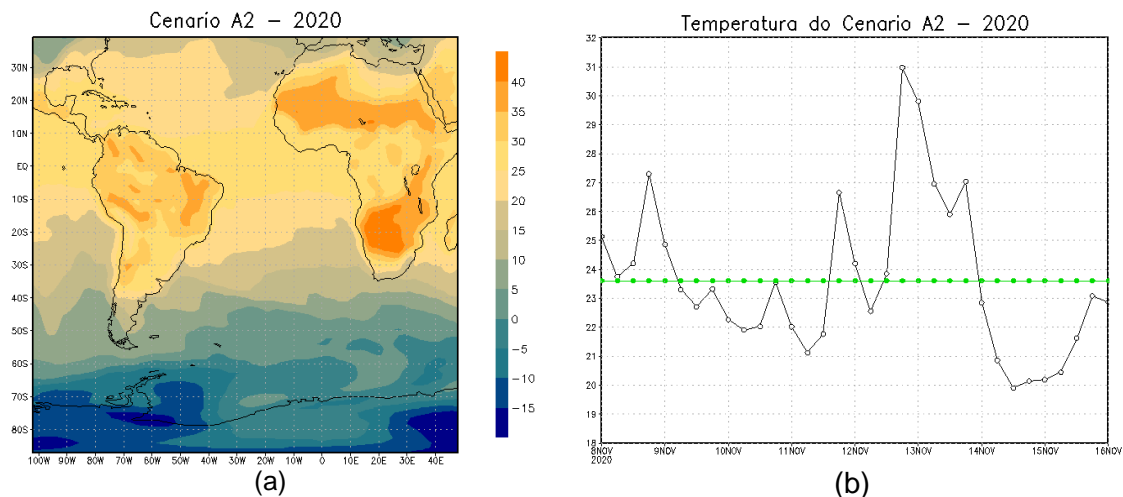


Figura 24 - Campo espacial de temperatura projetado para (a) 2020 e (b) evolução temporal de temperatura para o mesmo ano para o centro da RMSP e período de estudo. Ambas provenientes do modelo CCSM3 para o cenário A2.

As Figura 25a e 25b são análogas as anteriores, porém para o ano de 2050. Observa-se que a média de temperatura calculada para o ano de 2020 é pouco acima de 23,5°C e para o ano de 2050 esse valor é de aproximadamente 26,5°C, conforme esperado pelas projeções do modelo global do IPCC. Contudo, existem regiões observadas nos campos espaciais de temperatura para o ano de 2050 que são mais baixas do que as projetadas para o ano de 2020. Isso mostra que, em geral, a temperatura média tende a aumentar, mas existem regiões onde a temperatura é menor no ano de 2050, como é o caso da região ao sul da África, que apresenta uma maior área com mais altas temperaturas para o ano de 2020.

No caso da RMSP (Figura 25b), as evoluções dos campos de temperatura estimadas para os anos de 2020 e 2050 estiveram dentro do representado nas projeções do IPCC, ou seja, médias de temperaturas médias mais altas no ano de 2050. Observa-se que os extremos de temperatura (máximas e mínimas) diários foram mais altos para o ano de 2050 quando comparadas ao ano de 2020.

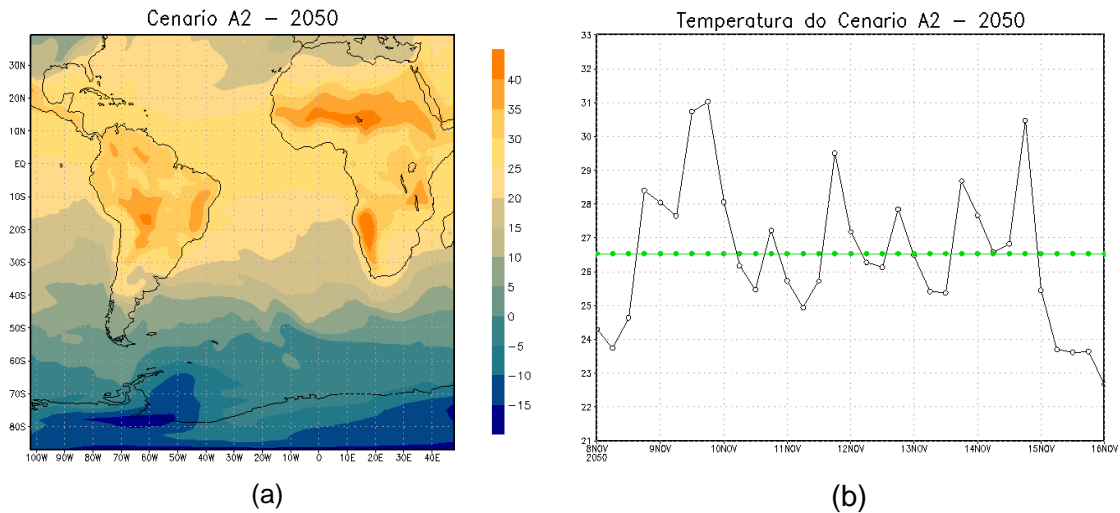


Figura 25 - Campo espacial de temperatura projetado para (a) 2050 e (b) evolução temporal de temperatura para o mesmo ano para o centro da RMSP e período de estudo. Ambas provenientes do modelo CCSM3 para o cenário A2.

5.1.4. Caso 4

Para esse caso foi utilizada a mesma condição de emissão apresentada nos casos 2 e 3, ou seja, permaneceram inalterados os padrões de emissão obtidos do inventário da CETESB e de medidas de campo para o ano de 2011. A principal diferença em relação ao caso 3 foi a representação das condições meteorológicas mais sustentáveis com relação à previsão dos modelos climáticos utilizados pelo IPCC. O cenário SRES B1, representado pela linha azul na Figura 21, indica anomalia positiva aproximadamente constante em torno de 1°C ao longo dos 100 anos de previsão com o sistema CCSM3.

A Figura 26 apresenta o campo espacial de temperatura para o cenário sustentável (B1) para o ano de 2020 (Figura 26a), o perfil diário de temperatura para o mesmo ano (Figura 26b), o campo espacial de temperatura para o ano de 2050 (Figura 26c) e o perfil diário de temperatura para 2050 (Figura 26d). Através da análise dessas figuras é possível observar que a média de temperatura calculada para a região central de São Paulo é menor em 2020, com valor pouco acima de 23°C , quando comparada a

média da variável para o ano de 2050, com valor de 26°C. Porém, a variação ao longo do período é diferente entre os dois anos escolhidos. Para 2020, houve uma tendência de aumento da temperatura ao longo dos dias, com amplitudes aproximadamente constantes. Já para o ano de 2050, o perfil para esse ponto do domínio foi bastante diferente, com variações menos regulares.

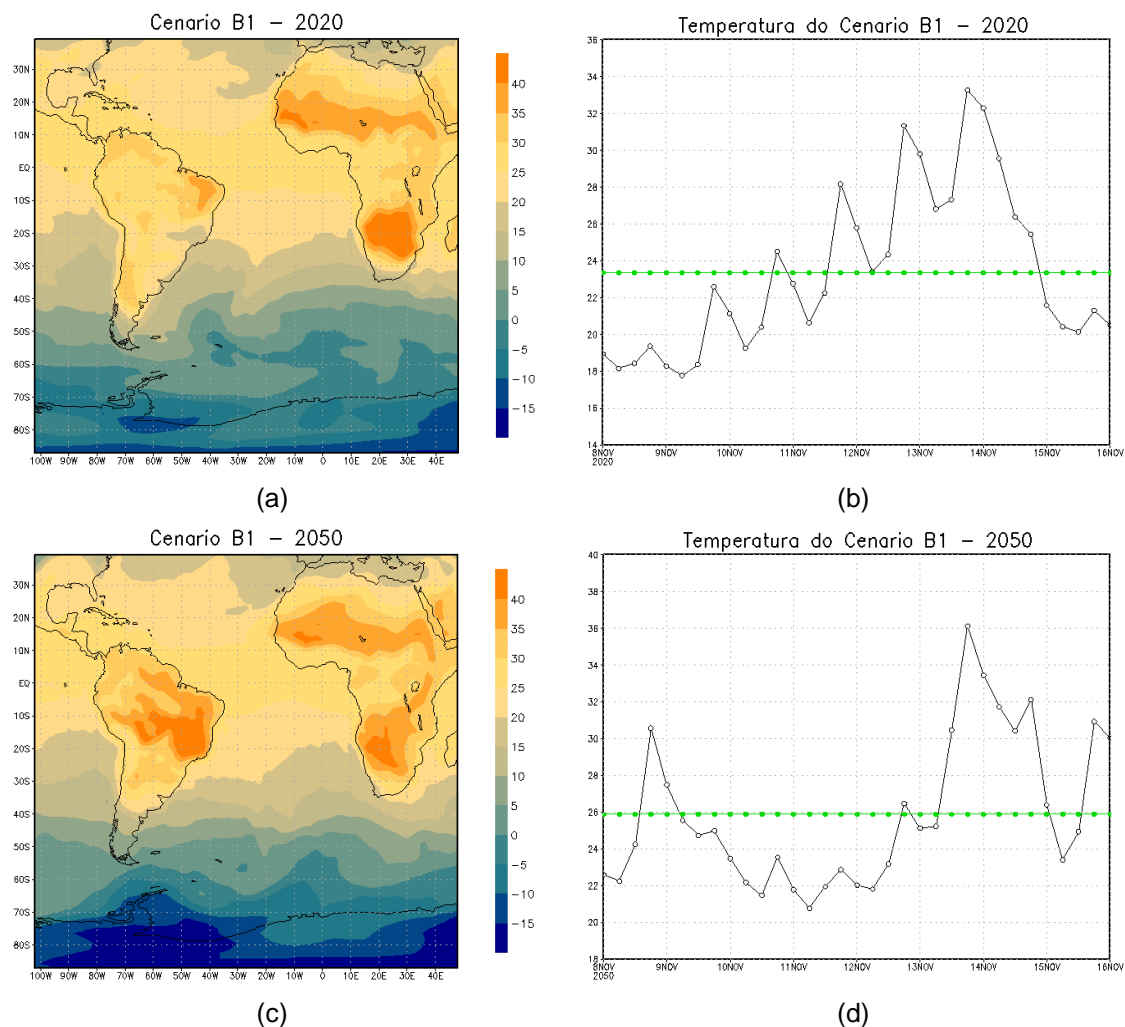


Figura 26 - Campo de temperatura projetado para 2020 (a) e 2050 (c), evolução temporal da variável para 2020 (b) e 2050 (d) pelo modelo CCSM3 para o cenário B1.

5.1.5. Caso 5

No caso 5, foram mantidas as condições meteorológicas iniciais para o ano de 2011 (baseadas no modelo GFS e iguais às apresentadas no caso 1) e estimadas novas

emissões para o ano de 2020 e 2050 para a RMSP. A Tabela 4 apresenta a variação das emissões esperadas para os anos de 2020 e 2050 com base no ano de 2010 para os quatro poluentes primários no estado de São Paulo. Espera-se que para o ano de 2020, a emissão de material particulado por veículos leves seja 33,3% menor do que a do ano de 2010 e que assim se mantenha para o ano de 2050. Nota-se que existe uma tendência de redução das emissões de todos os poluentes para os veículos leves, e a mesma tendência pode ser observada para os ônibus e caminhões no caso no material particulado, monóxido de carbono e óxidos de nitrogênio. Por outro lado, a emissão estimada para as motocicletas tende a aumentar. Estima-se que para o ano de 2020, as emissões de material particulado aumente 5 vezes e assim também se mantenha para o ano de 2050, ainda com base no ano de 2010. Esse caso particular das motocicletas se dá pelo envelhecimento da frota. Até que novos padrões de emissão entrem em vigor para essa categoria de veículos, segundo os programas de controle de emissão, além do tempo para a renovação da frota, espera-se que a emissão proveniente das motocicletas aumente. O que também contribui para o aumento das emissões das motocicletas é que, considera-se que o fator de envelhecimento seja muito alto para essa categoria.

Foi considerado para a estimativa da frota um índice de motorização de 32 veículos por 100 habitantes, de acordo com o trabalho de Esteves et al. (2007), que considerou a análise do mesmo ano da Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados - SEADE, a qual é responsável pela produção e disseminação de análises e estatísticas socioeconômicas e demográficas. Para o cálculo da emissão veicular foi considerada a metodologia adotada pela CETESB, chamada de *bottom-up*. Nesse caso, é levada em consideração a idade e a quilometragem percorrida pelo veículo em um ano e o fator de emissão de cada categoria de veículo (tipo, idade e fator de envelhecimento). Os fatores de emissão que foram considerados para os anos de 2020 e 2050 foram calculados considerando a aplicação dos padrões de emissão estabelecidos nas

novas fases do PROCONVE tanto para veículos leves quanto pesados. No caso dos novos caminhões e ônibus foram considerados que os motores a diesel atendem aos padrões EURO II (CETESB, 2011). Como pode ser observado na tabela há um decréscimo nos fatores de emissão maior da situação atual para 2020 e depois menor comparando-se 2020 e 2050. No caso do Material Particulado e dos óxidos de nitrogênio, a maior redução será observada nos veículos pesados, enquanto que para o monóxido de carbono praticamente não haverá redução das suas emissões. Quando se analisa a razão entre compostos orgânicos voláteis e os óxidos de nitrogênio observa-se que esta passará para um cenário mais favorável à formação de ozônio, já que a redução das concentrações desse poluente pode levar a uma relação com os COV mais favorável à formação do ozônio. Como apresentado na Tabela 4, as reduções dos COV estimadas foram pequenas e ainda houve diminuição de NO_x , que também leva a maior formação de ozônio.

Tabela 4 - Proporção estimada (%) das emissões para os anos de 2020 e 2050 para o MP, CO, NO_x e hidrocarbonetos (HC), com base no ano de 2010.

		2020	2050
MP	Leves	33,3	33,3
	Moto	500	500
	Ônibus	20	10
	Caminhão	25	8
CO	Leves	50	50
	Moto	133,3	140
	Ônibus	50	50
	Caminhão	25	25
NO_x	Leves	50	50
	Moto	100	50
	Ônibus	66,7	66,7
	Caminhão	83,3	83,3
HC	Leves	60	36
	Moto	200	200
	Ônibus	100	100
	Caminhão	100	100

Com a representação da redução das emissões considerando as estimativas apresentadas acima e das condições meteorológicas para o ano de 2011, esperou-se avaliar o impacto dos esforços públicos nas reduções das emissões dos poluentes. Além disso, esperou-se também avaliar a contribuição das emissões na poluição da RMSP, principalmente com relação às concentrações de ozônio.

5.1.6. Caso 6

Neste último caso, foram feitas duas simulações para o ano de 2050 com as condições meteorológicas obtidas dos dois cenários do IPCC, o SRES B1 e o SRES A2 e com as emissões futuras estimadas para a RMSP. Pretendeu-se com isso, analisar as concentrações de ozônio estimadas para o ano de 2050, em função da combinação das duas possíveis fontes de influência na formação do poluente. Os detalhes dos campos meteorológicos utilizados nesse caso foram detalhados nos casos 3 e 4 e as estimativas de emissão para 2050 foram detalhadas no caso 5.

5.2. Configuração do modelo

Foram utilizadas duas grades com espaçamento horizontal de 9 e 3 km, centradas no centro da cidade de São Paulo, nas coordenadas 23.55°S e 46.53°W. A Figura 27 apresenta a disposição destas grades, que são quadradas, ambas com 100 pontos em x e y.

As duas grades foram aninhadas e a simulação foi realizada com representação das condições atmosféricas e da química local para ambas as grades. Foram utilizados 35 níveis na vertical e as parametrizações e esquemas utilizados para as simulações estão apresentadas na Tabela 5. Destaca-se que os processos de microfísica e convecção não foram utilizados nas simulações quando foram usadas as projeções.

Com isso, pretendeu-se eliminar uma previsão desigual de ocorrência de precipitação nos anos futuros. Por exemplo, se as condições atmosféricas fossem favoráveis à passagem de um sistema frontal no ano de 2020 e não fosse esperada a mesma condição para o ano de 2050, as comparações seriam de condições ambientais diferentes. Sem a representação dos processos, entretanto, garantiu-se que não ocorresse chuva nas simulações dos anos futuros.

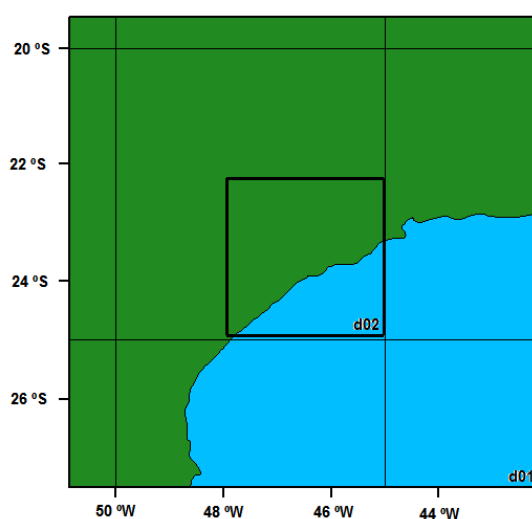


Figura 27 - Grades utilizadas nas simulações, onde o domínio maior é representado por d01 e o menor por d02.

Tabela 5 - Parametrizações e esquemas utilizados no WRF/Chem.

Parâmetro / Processos	Parametrização / Esquema	Descrição
Radiação de onda curta	Esquema de Dudhia (DUDHIA, 1989)	Integração simples da radiação permitindo absorção e espalhamento em nuvens e céu claro
Radiação de onda longa	Esquema RRTM (MLAWER et al., 1997)	Modelo de transferência radiativa rápida. Sistema acurado que usa valores tabelados para obter eficiência. Leva em conta múltiplas bandas, gases traço e espécies microfísicas

Tabela 5 - Continuação.

Microfísica*	Lin (LIN et al., 1983)	Esquema que contempla seis classes de hidrometeoros: vapor d' água, água de nuvem, chuva, gelo, neve e graupel
Convecção*	Grell-Devenyi (GRELL e DEVENYI, 2002)	Parametrização convectiva com múltiplas hipóteses de fechamento (método de ensemble com 144 membros)
Superfície	Noah (EK et al., 2003)	Unificação dos esquemas do NCEP/NCAR/AFWA, com umidade e temperatura do solo em 4 camadas
Camada superficial	Teoria da similaridade de Monin-Obukov (MONIN & OBUKHOV, 1954; CARLSON & BOLAND, 1978)	Baseado em Monin-Obukov com subcamada viscosa de Carlson-Boland e funções de similaridade padrões provenientes de tabelas
Mecanismo Químico	RADM2 (CHANG et al., 1989)	Espécies inorgânicas: 14 estáveis, 4 reativas intermediárias e 3 abundantes (oxigênio, nitrogênio e água); Espécies orgânicas: 26 estáveis e 16 radicais peroxi
Fotólise	Madronich (MANDRONICH, 1987)	Modelo de transferência radiativa (TUV - <i>Tropospheric Ultraviolet-Visible Model</i>) acoplado com hidrometeoros, aerossóis e parametrização convectiva

* Estes processos foram representados nos casos 1 e 5.

5.3. Construção dos arquivos de emissão

O inventário de emissões constitui uma grande fonte de incerteza na modelagem de qualidade do ar. Dados de emissões de poluentes e seus precursores não estão disponíveis em resolução espacial e temporal adequada para a simulação de qualidade do ar. Mesmo os totais de emissão por cada região brasileira carecem de dados, avaliação de acurácia e atualizações permanentes. Foram utilizados dados de emissão veicular da RMSP obtidos de inventários oficiais e de medidas realizadas pelo

Laboratório de Análise dos Processos Atmosféricos (LAPAt) para aprimoramento dos fatores de emissão.

A maior parte dos dados necessários para a utilização do módulo químico no WRF/Chem não são rotineiramente medidos pelas estações de qualidade do ar da CETESB, e, por isso, campanhas intensivas de coletas de dados são extremamente importantes para a realização das simulações de espécies químicas. É verdade que muitas aproximações são realizadas, pois a dinâmica das partículas e dos gases na atmosfera é resultado de influências locais e remotas. Portanto, quanto mais se conheça seus mecanismos de formação, composição e remoção, mais representativo será o arquivo que é utilizado como condição inicial no modelo.

Para a RMSP estão sendo consideradas somente as emissões veiculares, que de acordo com a CETESB (2012), constituem a principal fonte de gases precursores do ozônio e das partículas finas. Para a construção de um inventário de emissão veicular são necessárias informações sobre fatores de emissão por tipo de veículo e combustível (em $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ ou $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$), atividade veicular (quantos quilômetros cada veículo roda por dia) e número de veículos em cada tipo, além da distribuição espacial dessa fonte. Essas informações foram obtidas de diferentes bases de dados.

Os fatores de emissão foram baseados no inventário de emissões da CETESB e medidas obtidas de campanhas intensivas de coleta de dados em experimentos em túneis (MARTINS et al., 2006; SANCHEZ-CCOYOLLO et al., 2008). Com esses dados torna-se possível representar impactos das condições atuais da frota veicular, e o uso de diferentes tipos de combustíveis, dentre outras condições locais. A Figura 28 mostra a distribuição ao longo de um dia das espécies representativas dos veículos leves (monóxido de carbono – CO – e compostos orgânicos voláteis - COV) e dos veículos pesados (dióxido de enxofre - SO_2 e material particulado – MP). Esse perfil foi

criado com base na contagem de veículos e em medidas realizadas dentro e fora de túneis na capital no ano de 2011 (amostragens realizadas nos túneis Jânio Quadros e Rodoanel). Para os veículos leves, observam-se dois picos definidos que representam os horários de maior circulação de veículos, com possibilidade de congestionamentos, ou seja, o início da manhã e o final da tarde. Já os veículos pesados circulam de forma mais homogênea, tendo o seu máximo ao longo do dia. Também foram levados em conta, os diferentes tipos de veículos que rodam diariamente na cidade, como ônibus, que usam majoritariamente o biodiesel como fonte de energia, caminhões, carros, que rodam com gasolina (mistura de 28% de álcool e 72% de gasolina), etanol e a mistura desses dois combustíveis e motocicletas a gasool. Destaca-se que esse perfil é característico da época para o qual foi construído, pois restrições de circulações são eventualmente aplicadas pelo governo do estado. É possível que para o ano de 2050 o padrão de circulação não seja o mesmo que foi definido para os dias atuais e que haja mudanças significativas, mas não existem parâmetros atualmente que possam ser utilizados para representar essas expectativas.

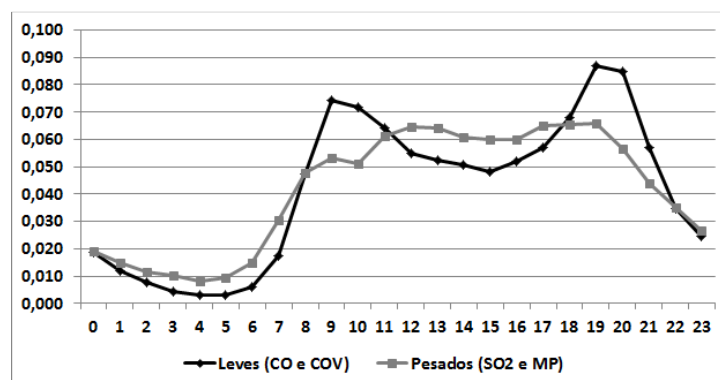


Figura 28 - Distribuição temporal (em hora local) das emissões no WRF/Chem.

Embora seja cada vez mais difícil estimar o horário de maior movimentação de veículos ao longo do dia, devido à grande quantidade dos mesmos nas ruas, as distribuições dos poluentes apresentam um comportamento médio observado. Com relação à distribuição espacial é necessário que as células de grade que contenham

grandes vias de tráfego tenham um peso maior comparadas as demais ruas. Para essa representação foi utilizado um arquivo baseado na luminosidade emitida pela cidade e disponibilizado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). O trabalho de Martins et al. (2008) descreve o procedimento adotado, onde foi realizada uma calibração de luminosidade com densidade populacional e número de veículos. A intensidade de luzes é utilizada para distribuir espacialmente o número de veículos. Esse esquema está sendo utilizado como aproximação de localização de fontes urbanas para todo o Brasil, com resultados de previsão de poluentes no sítio www.lapat.iag.usp.br. A Figura 29 mostra os campos espaciais de monóxido de carbono (CO) utilizados pelo WRF/Chem para as duas grades definidas para as simulações. Através da Figura 29a, para a grade de 9 km é possível identificar a RMSP no centro da grade, parte da emissão do Rio de Janeiro, além de grandes e importantes vias de tráfego, como é o caso da Rodovia Presidente Dutra e cidades do interior dos estados, principalmente de São Paulo. Através da Figura 29b, observa-se a emissão da Região Metropolitana de São Paulo e a do interior do estado, como é o caso da região de Campinas, que também contribui intensamente para as emissões do estado.

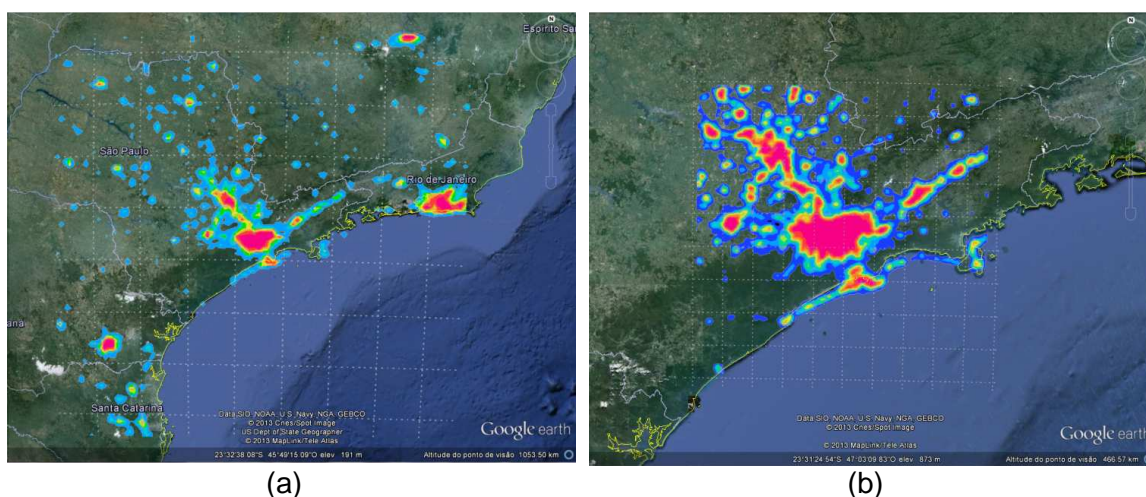


Figura 29 - Distribuição espacial das emissões de monóxido de carbono (CO) na grade de 9 km (a) e 3 km (b).

5.4. Avaliação Estatística da simulação

A avaliação estatística dos resultados obtidos das simulações foi realizada com base em parâmetros estatísticos comumente utilizados para esse fim. A análise da qualidade dos resultados produzidos pelas simulações pode ser feita através da utilização de diferentes métodos estatísticos, com métricas para correlação e diferença entre simulação e dados experimentais. Desde 1884, estas técnicas de verificação vêm sendo aplicadas à modelagem numérica da atmosfera. Apesar das diferentes formas de visualizar o problema, todas envolvem medidas de relação entre a previsão ou conjunto de previsões e dados observados para o mesmo período (WILKS, 1995).

Para tal, os seguintes métodos estatísticos foram calculados: desvio padrão (σ), erro médio (ME), erro médio quadrático (MSE), raiz do erro médio quadrático (RMSE), correlação linear de Pearson (R) e o índice de concordância (d).

O erro médio (ME) representa a diferença entre a média da simulação e a média das observações, indicando o desvio da simulação. Este índice indica o desvio em relação a toda série e não representa desvios individuais de pares de simulação e observação. Já o erro médio quadrático (MSE) representa a média quadrática da diferença entre os pares de simulação e de observação. Altos valores deste índice indicam grandes discrepâncias entre as observações e as simulações.

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n s_i - o_i = \bar{s} - \bar{o} \quad (5.1)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2 \quad (5.2)$$

A correlação linear de Pearson foi utilizada para a avaliação da acurácia dos modelos em relação à observação, a qual é dada pela razão entre a covariância entre duas

variáveis e o produto dos seus desvios padrão. O valor esperado encontra-se entre -1 e 1, onde no caso positivo a relação linear entre as variáveis x e y é perfeita.

$$R_{xy} = \frac{\text{COV}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (5.3)$$

$$= \frac{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\left\{ \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}} \quad (5.4)$$

O *skill* das simulações também representa a acurácia relativa de um conjunto de simulações, em relação a algum caso controle ou alguma previsão de referência. De acordo com Pielke (2002), uma simulação deve obedecer algumas condições para que o *skill* seja obtido: os desvios padrão da série observada e da série simulada devem ser aproximadamente iguais ($\sigma_{obs} \cong \sigma_{sim}$), a raiz do erro médio quadrático (RMSE) deve ser menor do que o desvio padrão da observação ($RMSE < \sigma_{obs}$) e o $RMSE_{UB}$, que representa a raiz do erro médio quadrático após a remoção de um desvio médio, também deve ser menor do que o desvio padrão da observação ($RMSE_{UB} < \sigma_{obs}$). O índice $RMSE_{UB}$ pode ser obtido através de:

$$RMSE_{UB} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(y_i - \bar{y}) - (o_i - \bar{o})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

O Índice de concordância, que avalia a exatidão entre duas séries, foi outro parâmetro utilizado para avaliar o desempenho dos modelos (ELBIR, 2003).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|s_i - \bar{o}| + |o_i - \bar{o}|)^2} \quad (5.6)$$

6. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através das simulações com o WRF/Chem. Os resultados foram obtidos através das variações das condições, tanto com relação às condições atmosféricas iniciais quanto com relação às emissões de poluentes atuais, estimadas através dos inventários de emissão oficiais e medidas de campo para os anos de 2020 e 2050. Os programas de controle das emissões veiculares já em vigência foram considerados para construção dos casos definidos na metodologia. Foram seis casos no total, onde buscou-se avaliar os impactos de cada uma das forçantes: atmosférica e emissão, separadamente.

6.1. Caso 1

O primeiro caso, denominado controle, foi definido para validar o modelo e suas parametrizações utilizadas no trabalho. Na simulação realizada, para o mês de novembro de 2011, foram acionadas as opções físicas para representar as condições atmosféricas observadas, como a microfísica e a convecção, para representar a nebulosidade e as eventuais precipitações. Para a validação, foram realizadas comparações entre os valores registrados nas estações de qualidade do ar da CETESB e valores simulados pelo modelo. Para isso, foram utilizadas todas as estações que havia dados disponíveis de concentração de ozônio no período.

A partir da Figura 30, observa-se o perfil de temperatura simulado pelo WRF/Chem para o período de 08 a 15 de novembro de 2011 para a estação da CETESB localizada em Pinheiros. Os valores foram bem representados, assim como a variação diurna esperada para a temperatura. Até mesmo a redução das amplitudes diárias

observadas a partir do dia 12, em decorrência da ocorrência de precipitação, foi bem representada pelo modelo.

Observa-se na Figura 31, as curvas de temperatura máxima, média e mínima registradas na estação do IAG localizada no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga (também conhecido como Parque da Água Funda). Houve uma queda da temperatura a partir do dia 12, associada à passagem de um sistema frontal próximo a região. Essa figura mostra outro ponto da cidade onde há dados disponíveis de temperatura. Nesse período nas estações de monitoramento da CETESB em que havia dados sobre as concentrações de ozônio medidas não havia valores de temperatura.

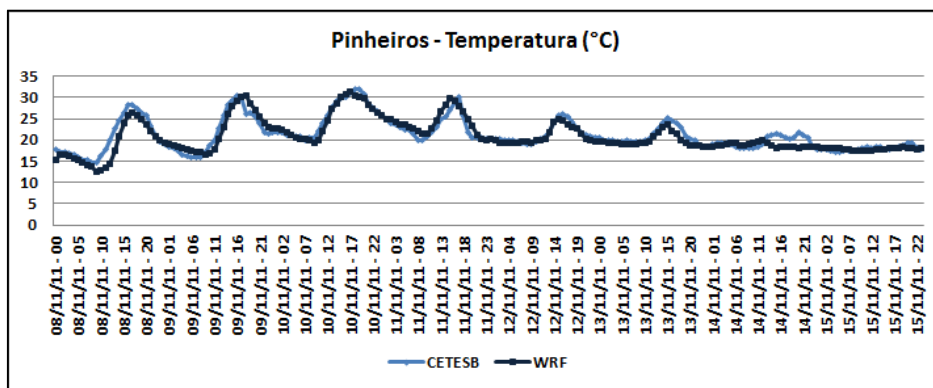


Figura 30 - Evoluções temporais de temperatura obtidas da estação de qualidade do ar de Pinheiros (linha azul claro) e simuladas com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

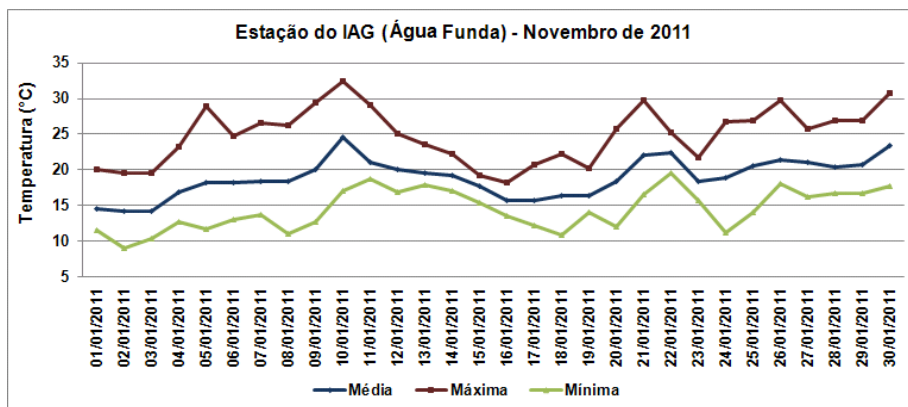


Figura 31 - Perfis de temperatura medidos na estação do IAG localizada no Parque da Água Funda para o mês de novembro de 2011.

A Figura 32 mostra a precipitação diária também obtida na Estação Climatológica do IAG, enfatizando a passagem do sistema frontal responsável pela ocorrência de precipitação entre os dias 12 e 17 do mês de novembro.

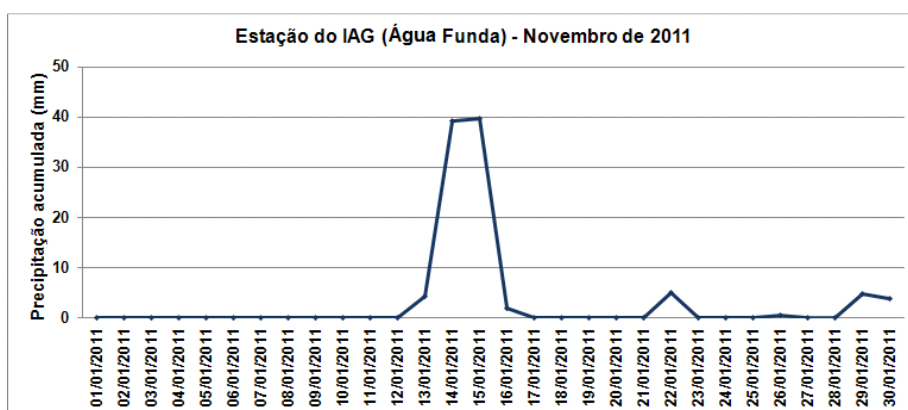


Figura 32 - Precipitação medida na Estação Climatológica do IAG localizada no Parque da Água Funda para o mês de novembro de 2011.

As Figuras 33 a 39 apresentam a comparação entre os perfis de ozônio simulados pelos WRF/Chem e medidos nas estações automáticas de monitoramento da CETESB. Para a estação localizada em Pinheiros (Figura 33) observa-se que concentrações medidas chegaram a valores bastante elevados nos dias 08 e 11 do mês de novembro, atingindo aproximadamente 160 ppb. Destaca-se que o padrão de qualidade do ar definido para o poluente é de aproximadamente 82 ppb. Em geral, o modelo representou bem a variação diurna, com a formação do poluente associada à incidência da radiação solar durante o dia e seu consumo no período noturno, associados à emissão de seus precursores e de reações de consumo do ozônio. Há a ocorrência de picos noturnos que também foram representados em alguns eventos noturnos, representando o transporte vertical ou horizontal. Nota-se que também foi bem representada a diminuição da concentração de ozônio no dia 12, quando foi registrada precipitação na região. Contudo, a ultrapassagem ao padrão de qualidade do ar não foi bem representada pelo modelo. No primeiro dia de simulação não se

esperava que o modelo representasse o alto valor registrado, uma vez que a atmosfera está limpa no início da simulação e o primeiro dia não deve ser utilizado para as análises. Destaca-se que a estação de Pinheiros está localizada ao lado de uma importante via de tráfego da região e, por isso, é sensível às emissões veiculares e eventuais ocorrências associadas a esse processo, como o consumo de ozônio pelo NO emitido principalmente pelos veículos pesados.

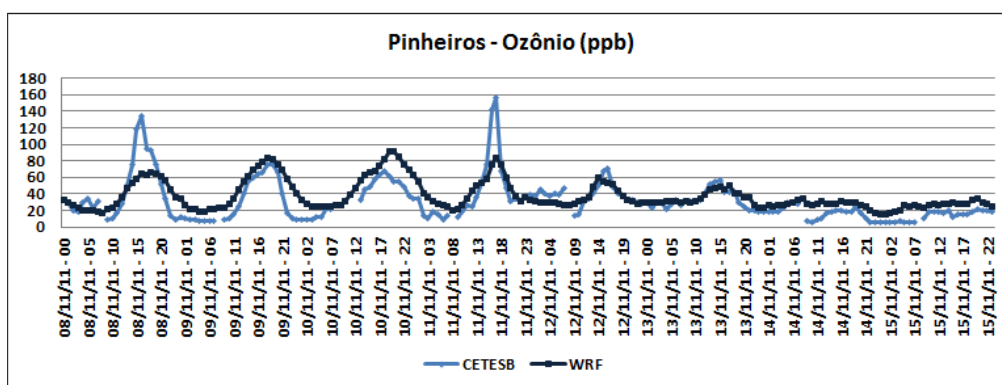


Figura 33 - Concentração de ozônio, em ppb, obtida da estação de qualidade do ar de Pinheiros (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

A Figura 34 apresenta o perfil das concentrações de ozônio da estação localizada no Parque no Ibirapuera. Essa estação apresenta condições diferentes da anterior, uma vez que se encontra numa região mais arborizada e com menor influência direta das vias de tráfego ao redor. Os resultados obtidos pelo modelo para o ozônio foram semelhantes. A oscilação diurna quando não há nebulosidade é bem representada, através do aumento das concentrações após o meio do dia e o consumo do poluente no período noturno. Contudo, nesse caso, as concentrações simuladas foram levemente deslocadas com relação aos valores medidos. O período afetado pela presença de nebulosidade (a partir da segunda metade do período de simulações) apresentou alteração do perfil de concentração do ozônio, ficando esse mais homogêneo entre o dia e a noite, estando de acordo com o registrado na estação.

A estação localizada no IPEN – USP (Figura 35) apresentou padrão semelhante ao obtido na estação do Ibirapuera, ou seja, apesar da boa representação do ciclo diurno, os máximos valores foram levemente deslocados em relação aos máximos valores medidos e os valores simulados não representaram os valores mais altos. Porém, após o dia 12 de novembro a amplitude das concentrações foi reduzida, como também foi observado nos registros da estação.

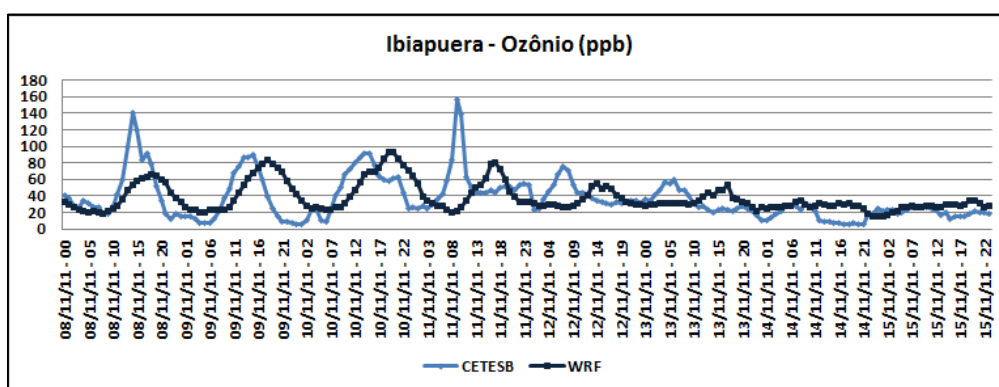


Figura 34 - Concentração de ozônio, em ppb, obtida da estação de qualidade do ar localizada no Parque do Ibirapuera (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

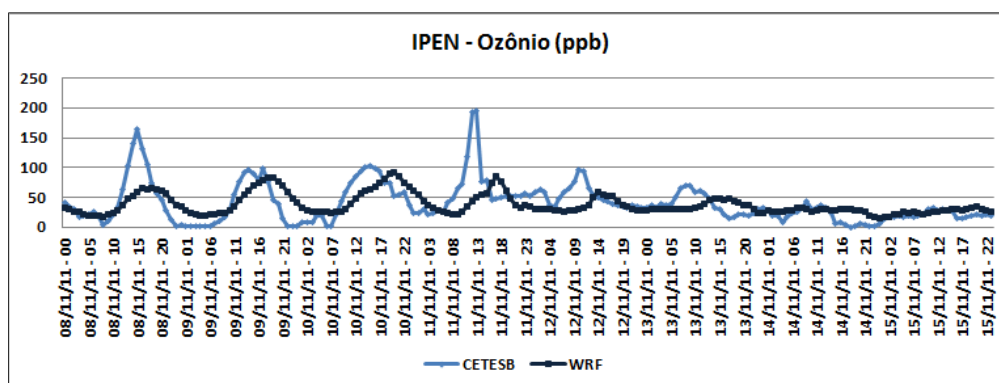


Figura 35 - Concentração de ozônio, em ppb, obtida da estação de qualidade do ar localizada no IPEN - USP (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

Já a estação localizada em Mauá (Figura 36) possui características locais bastante diferentes das apresentadas anteriormente, por ser uma região também caracterizada pela influência industrial. Nessa estação os valores máximos de ozônio registrados

foram menores comparados às duas estações analisadas acima e, nesse caso, as concentrações simuladas com o WRF/Chem foram mais bem representadas durante todo o período. Observa-se mais uma vez que a redução da amplitude foi bem representada pelo modelo após o dia 12 de novembro. Deve-se observar que, em geral, o modelo não representou os valores mais elevados de concentração de ozônio, indicando que ainda há problemas com o inventário de emissões, provavelmente com uma subestimativa das emissões dos Compostos Orgânicos Voláteis.

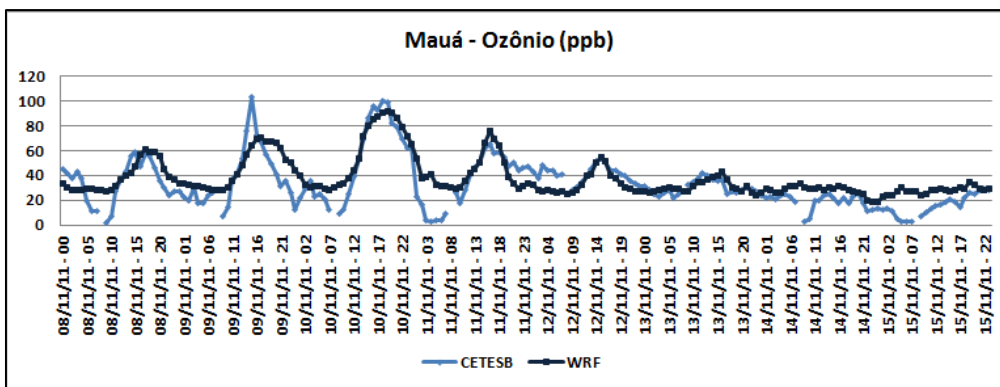


Figura 36 - Concentração de ozônio, em ppb, obtida da estação de qualidade do ar localizada em Mauá (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

A Figura 37 apresenta as concentrações observadas e simuladas para a estação de qualidade do ar localizada em Santana. Durante o período de altos valores observados (dia 11) o modelo não representou bem tal situação. Contudo, o mesmo se mostrou sensível às condições meteorológicas observadas da metade para o final do período estudado, que indicavam maior quantidade de nebulosidade e, conseqüentemente, menores concentrações e menor amplitude das mesmas.

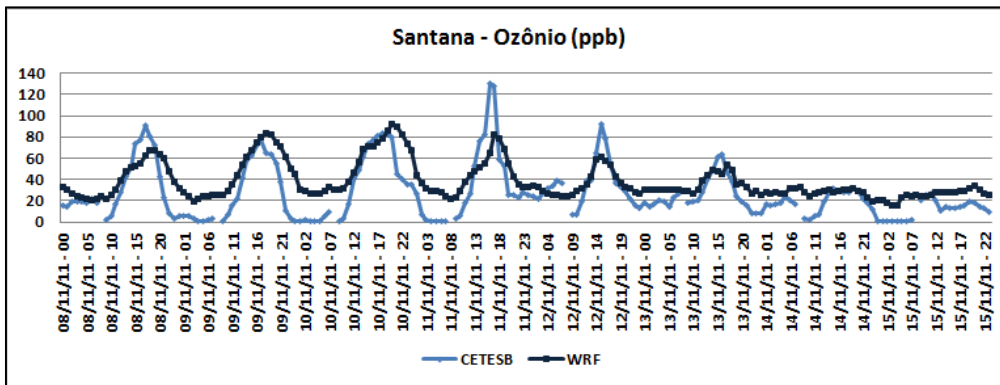


Figura 37 - Concentração de ozônio, em ppb, obtida da estação de qualidade do ar localizada em Santana (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

As estações de qualidade do ar localizadas na Mooca (Figura 38) e em Diadema (Figura 39) apresentaram padrões semelhantes na simulação das concentrações do ozônio. Ambas representaram bem a variação diurna do poluente, tanto no início do período quanto no final da simulação, quando houve alteração das condições atmosféricas pelo sistema frontal. Contudo, o dia mais poluído, 11 de novembro, teve seus valores subestimados pelo modelo.

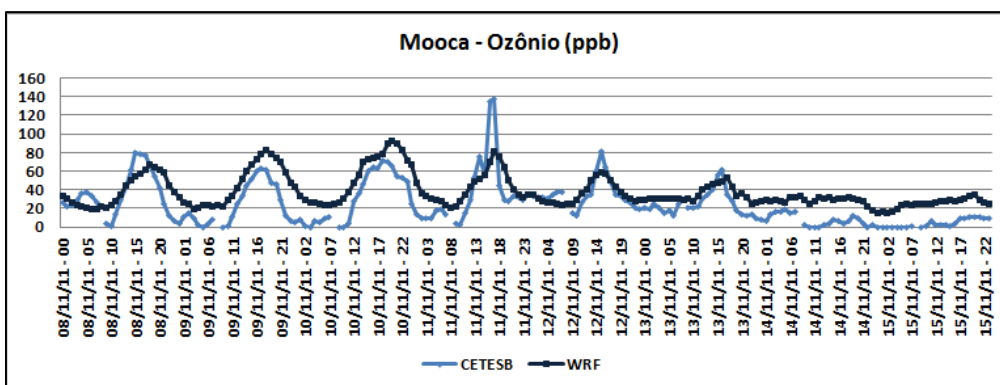


Figura 38 - Concentração de ozônio, em ppb, obtida da estação de qualidade do ar localizada na Mooca (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

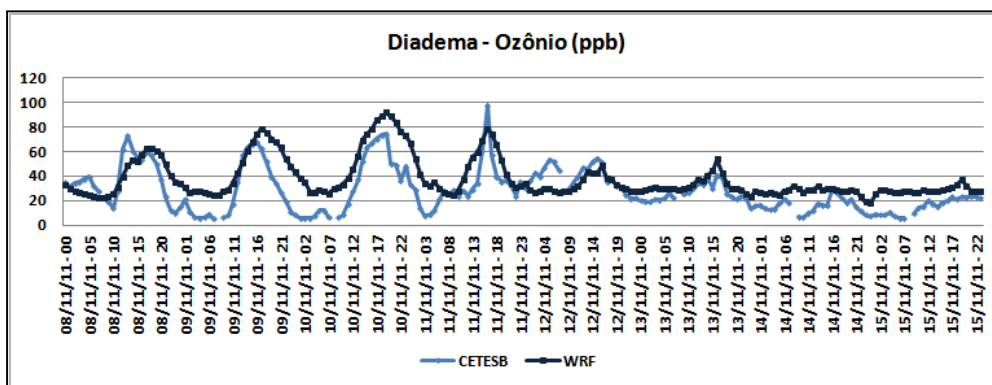


Figura 39 - Concentração de ozônio, em ppb, obtida da estação de qualidade do ar localizada em Diadema (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

As Figuras 40 e 41 apresentam as concentrações de monóxido de carbono (CO) obtidas das estações da CETESB localizadas em Pinheiros e no IPEN – USP e simuladas com o WRF/Chem. Observa-se um padrão oposto nas duas estações analisadas com relação a esse poluente. Para a estação de Pinheiros, os valores de CO foram subestimados e para a estação localizada no IPEN – USP, os mesmos foram superestimados. Entretanto, em ambas as estações, os períodos de máximos e mínimos valores foram representados. De fato, o CO é um composto primário influenciado pela emissão direta dos veículos leves. Como a estação de Pinheiros está localizada ao lado de uma grande via de transporte da RMSP, os valores simulados foram mais baixos do que os medidos. Já na estação do IPEN – USP, que está mais afastada das grandes vias de tráfego, o modelo tendeu a superestimar as concentrações do monóxido de carbono.

A Tabela 6 apresenta os índices estatísticos calculados para avaliar quantitativamente a simulação realizada. Os valores obtidos revelam que as concentrações de ozônio, em geral, foram bem representadas. Já com relação à temperatura, a correlação obtida para a estação de Pinheiros foi de 0,93 indicando boa representação linear dos valores observados e simulados. Os piores índices de correlação foram calculados para o monóxido de carbono, o que já era esperado, devido à influência local das

fontes sobre as concentrações do poluente e as deficiências do inventário de emissões, tanto do ponto de vista de total emitido quanto de sua variação temporal e espacial.

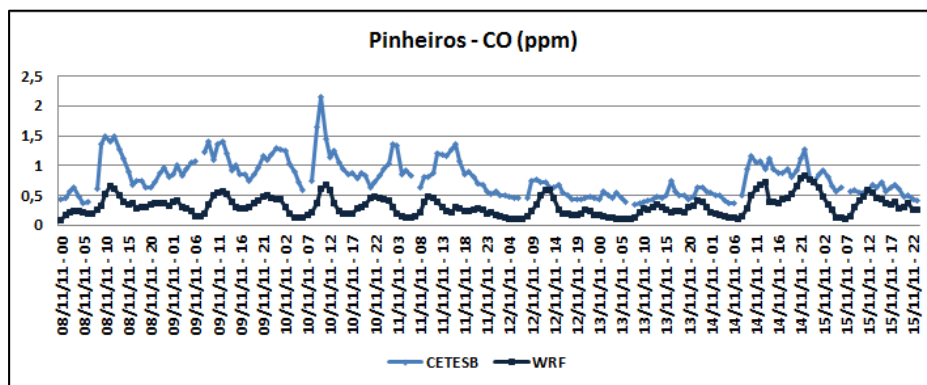


Figura 40 - Concentração de monóxido de carbono, em ppm, obtida da estação de qualidade do ar localizada em Pinheiros (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

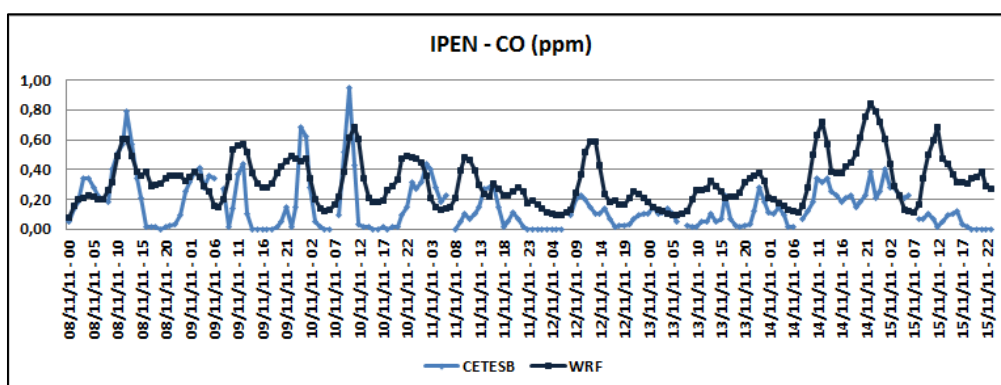


Figura 41 - Concentração de monóxido de carbono, em ppm, obtida da estação de qualidade do ar localizada no IPEN - USP (linha azul claro) e simulada com o WRF/Chem (linha azul escuro) para o período de 8 a 15 de novembro de 2011.

Analisando os índices estatísticos calculados para avaliar as concentrações de ozônio simuladas e observadas nota-se que a melhor correlação obtida foi na estação de Mauá, com 0,81. Nas estações localizadas no IPEN e em Ibirapuera os valores de correlação obtidos foram abaixo de 0,50 indicando que o poluente não foi muito bem representado. Essas estações possuem características semelhantes, já que ambas estão localizadas relativamente distantes de grandes vias de tráfego e com influência de regiões mais arborizadas. Para as outras estações para as quais havia dados

medidos, os valores calculados do coeficiente de correlação estiveram acima de 0,70, indicado uma boa representação dos valores observados.

Com relação ao índice de concordância (d), que avalia a exatidão das duas séries, o melhor valor também foi calculado para a estação localizada em Mauá. Os valores desse índice variaram entre 0,58 e 0,81 e em geral acompanharam os valores obtidos para o coeficiente de correlação.

Para obter o *skill* da simulação algumas condições devem ser obedecidas, conforme apresentado anteriormente. Para todas as estações os valores de desvio padrão das séries observadas e simuladas não são iguais e, por isso, não é possível afirmar que foi obtido *skill* dessas séries. Contudo, os outros dois critérios, que afirmam que o RMSE e o $RMSE_{UB}$ devem ser menores do que o desvio padrão observado foram respeitados em todas as estações. De certa forma, os modelos tendem a representar um padrão de variação mais suave das variáveis. Oscilações muito abruptas, como a que foi verificada com relação ao ozônio no período de estudo selecionado, geralmente não são bem representadas, o que não compromete a confiabilidade do modelo.

A sequência de figuras (Figura 42) mostra a evolução das concentrações de ozônio (na escala de cores) e os vetores de vento simulados para o período. As figuras são médias das horas marcadas acima de cada imagem. Observa-se que durante o período noturno maiores concentrações do poluente foram observadas fora da RMSP e durante o dia esse padrão se inverte e as maiores concentrações podem ser observadas na região mais central. Até o horário das 0900Z, que corresponde a 07:00 HBV, não há um padrão bem definido. Para o horário das 1200Z as concentrações mais elevadas estão localizadas no centro da grade, na área mais urbanizada, influenciada pelas maiores emissões dos precursores de ozônio, além da incidência de

radiação solar direta, o que contribui para a formação do poluente. A pluma com maiores concentrações tende a se deslocar para o interior do estado a partir das 1500Z, o que pode estar associado à ocorrência de brisa marítima. Contudo, nesse horário ainda são observadas altas concentrações sobre a RMSP. Com o passar das horas, a tendência da pluma de maiores concentrações continua a de deslocamento para o interior do estado e, as 2100Z altos valores de ozônio já deixaram a RMSP e encontram-se totalmente no interior. De forma geral foi possível observar o processo de formação e consumo/transporte do poluente.

Tabela 6 - Índices estatísticos calculados para o caso 1.

Pinheiros							
	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{sim}	σ_{obs}
O ₃ (ppb)	0,76	17,65	6,76	0,81	16,30	17,84	25,12
CO (ppm)	0,51	0,53	-0,46	0,49	0,26	0,15	0,31
Temperatura (°C)	0,93	1,48	-0,40	0,96	1,42	3,92	3,82
Ibirapuera							
	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{sim}	σ_{obs}
O ₃ (ppb)	0,36	25,78	0,79	0,58	25,76	17,41	26,38
CO (ppm)	0,40	0,23	0,23	0,55	0,17	0,15	0,16
IPEN / USP							
	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{sim}	σ_{obs}
O ₃ (ppb)	0,49	29,66	-2,67	0,60	29,54	17,43	34,00
CO (ppm)	0,42	0,24	0,17	0,55	0,17	0,16	0,16
Mauá							
	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{sim}	σ_{obs}
O ₃ (ppb)	0,81	12,92	5,05	0,86	11,89	15,98	20,41
Santana							
	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{sim}	σ_{obs}
O ₃ (ppb)	0,79	19,33	11,32	0,80	15,67	17,71	25,65
Mooca							
	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{sim}	σ_{obs}
O ₃ (ppb)	0,76	20,68	13,75	0,77	15,44	17,74	24,08
Diadema							
	R	RMSE	ME	Índice d	RMSE _{UB}	σ_{sim}	σ_{obs}
O ₃ (ppb)	0,72	16,37	10,15	0,77	12,85	16,60	17,97

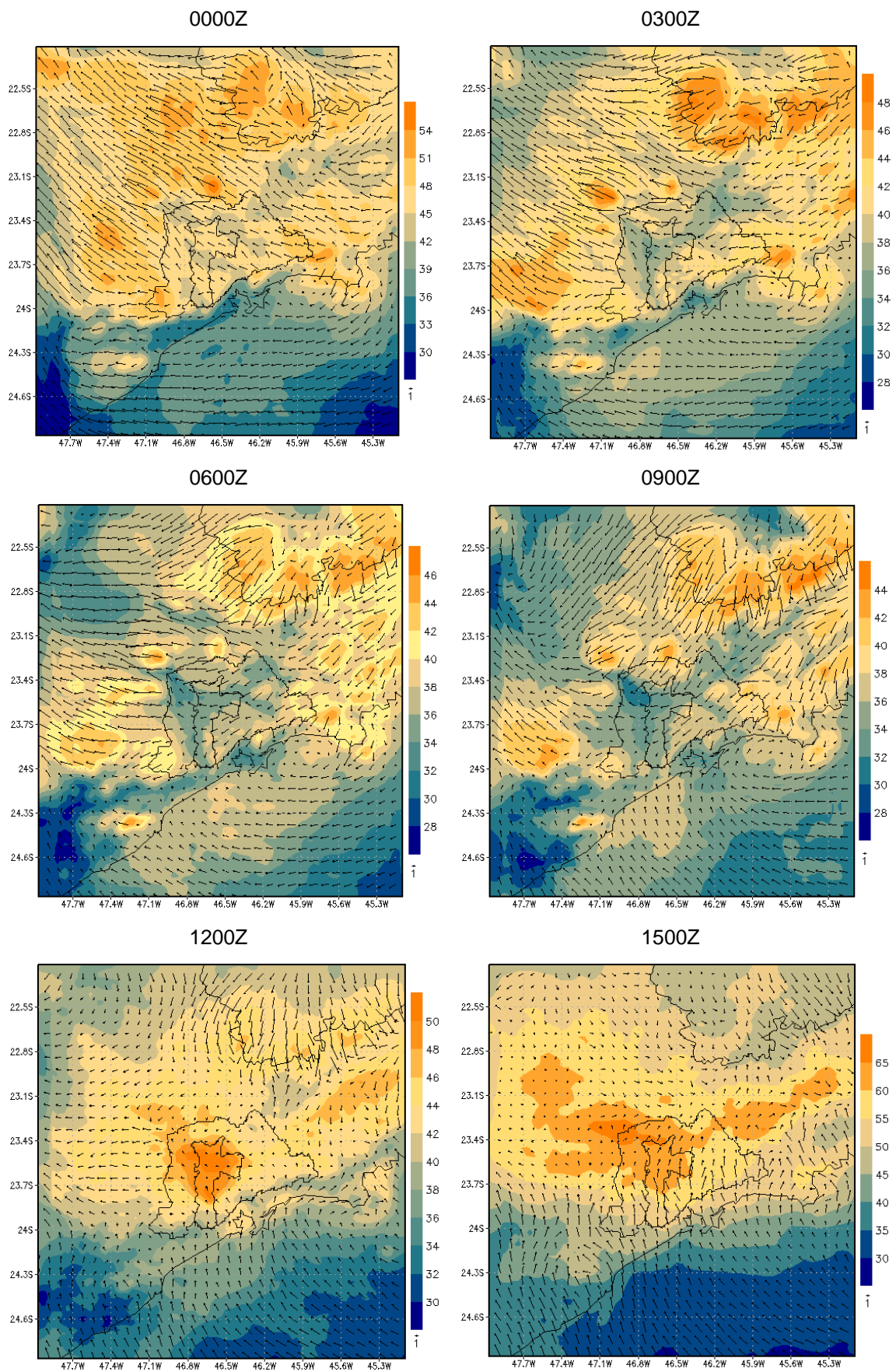


Figura 42 - Evolução das médias de concentração de ozônio (em ppb) e vento simuladas pelo WRF/Chem para as horas marcadas acima de cada figura.

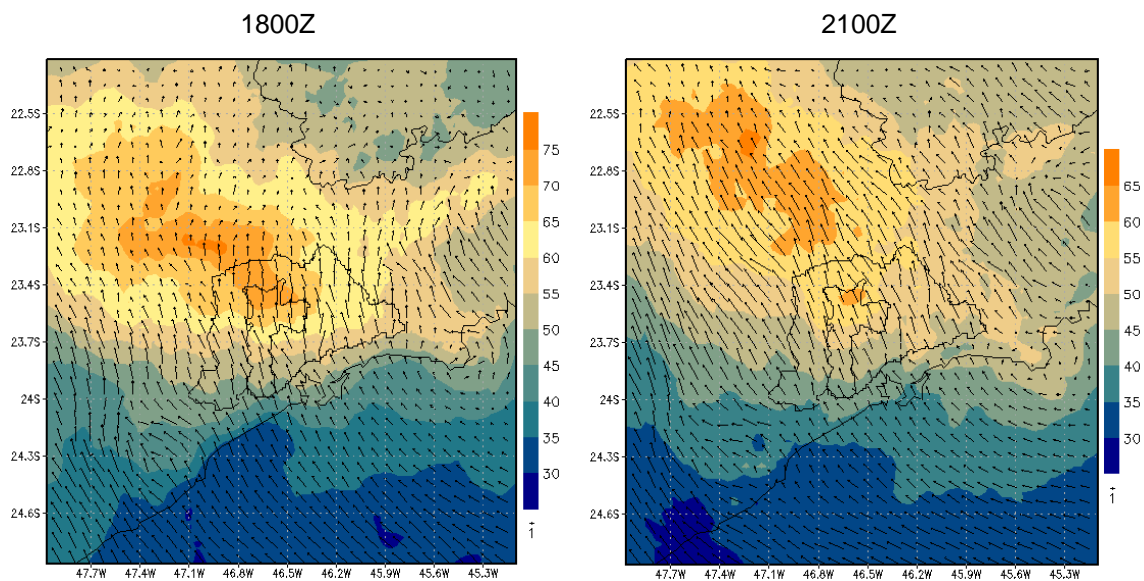


Figura 42 - Continuação.

A partir da análise desse caso, observou-se que as temperaturas foram bem representadas pelo modelo, bem como as concentrações de ozônio. Enfatiza-se que são grandes as aproximações realizadas para esse tipo de simulação. Dessa forma, considerou-se que o modelo representou satisfatoriamente as condições ambientais observadas no período de estudo e foi utilizado como caso base para os outros cenários a seguir, que visam representar condições ambientais futuras, com relativa segurança.

6.2. Caso 2

Para esse caso foram utilizados os dados meteorológicos do CCSM3 como condição inicial e de contorno, considerando os dois cenários escolhidos: o mais pessimista (SRES A2) e o sustentável (SRES B1), mantendo-se o mesmo arquivo de emissão, referente ao ano de 2011. A Figura 43 mostra a evolução temporal de temperatura simulada para os dois cenários, SRES B1 (linha verde) e SRES A2 (linha preta). No caso do cenário sustentável, observou-se a representação da variação diurna para a variável, e, em geral, uma leve tendência de decréscimo, a menos do dia 12, que foi o

mais quente dentre os simulados. Esse perfil é diretamente influenciado pelas condições iniciais e de contorno do modelo, já que a microfísica e a parametrização de cumulus foram desligadas nesse caso, para evitar a comparação de situações com condições atmosféricas diferentes com relação à precipitação. No caso do cenário mais pessimista, a variação diurna da temperatura também foi representada, porém observou-se uma tendência oposta, de subida com o passar do tempo, principalmente a partir do dia 12. Na análise de toda a área simulada observam-se comportamentos diferentes para cada ponto de grade.

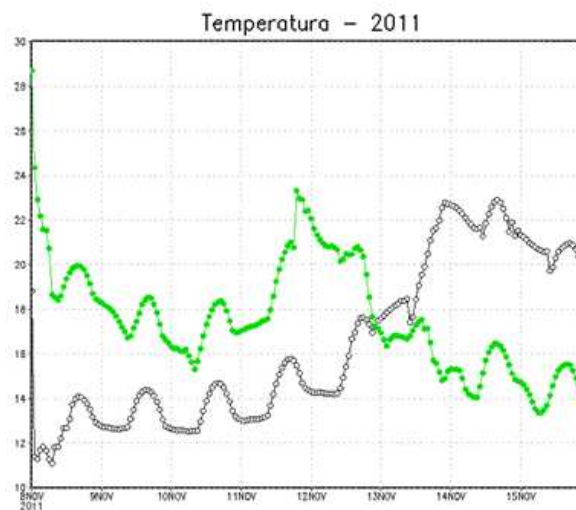


Figura 43 - Evolução temporal de temperatura (em $^{\circ}\text{C}$) simulada para o ano de 2011 para o cenário B1 (linha verde) e cenário A2 (linha preta) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

Já a variação ao longo do tempo das concentrações de ozônio obtida para o mesmo ponto, apresentada na Figura 44, mostra altas concentrações simuladas para o dia 12 de novembro para o cenário mais sustentável (linha verde) e altas concentrações do poluente a partir do dia 13 para o cenário mais pessimista (linha preta). No início do período as concentrações apresentaram pouca variação, mas a variação diurna foi representada. Apesar de não terem sido representadas a microfísica e a convecção, esse resultado do modelo só pode estar associado às condições meteorológicas nos

respectivos cenários, já que os arquivos de emissão utilizados nos dois cenários também foram os mesmos.

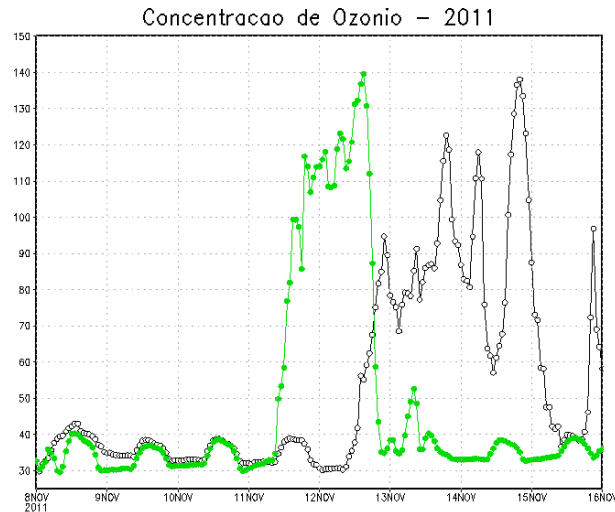


Figura 44 - Evolução temporal das concentrações de ozônio (em ppb) simuladas para o ano de 2011 para o cenário A2 (linha preta) e B1 (linha verde) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

As Figura 45a e 45b mostram o comportamento dos precursores de ozônio ao longo do período para o mesmo ponto da grade para ambos cenários. Observou-se que maiores concentrações de COV (Figura 45a) e de NO_x (Figura 45b) foram verificadas no início do período para o cenário SRES B1. Já para o cenário SRES A2 o padrão simulado foi inverso, quando maiores concentrações de ambos os precursores ocorreram na segunda metade do período. Contudo, as concentrações de COV nos dois casos são em torno de uma ordem de grandeza maior do que as concentrações de NO_x. Houve uma mudança na relação entre COV e NO_x, comparativamente com o caso 1. Apesar da fonte não ter mudado, a mudança de temperatura pode ter tornado a atmosfera mais reativa e diminuído mais rapidamente a concentração de NO_x. De qualquer forma, as maiores concentrações de ozônio foram obtidas quando foram simuladas as maiores concentrações de seus precursores, descartando-se o primeiro dia dessa análise.

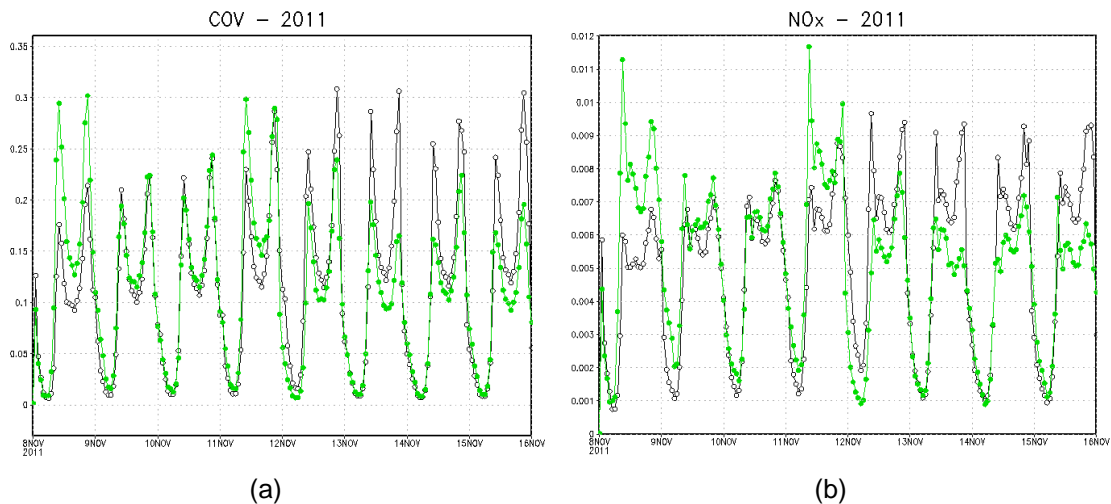


Figura 45 - Evolução temporal das concentrações (em ppm) de COV (a) e NO_x (b) simuladas para o ano de 2011 para o cenário A2 (linha preta) e B1 (linha verde) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

Com relação às condições meteorológicas, um campo que apresentou uma evolução bem diferente entre os cenários foi a pressão atmosférica na superfície, expressa em Pascal (Pa) e apresentada na Figura 46. Descartando-se o primeiro dia na análise, o cenário SRES B1 (Figura 46a) apresentou maior variação durante o período. Já o cenário SRES A2 (Figura 46b) apresentou maiores valores no início da simulação, mas a partir do dia 11 a tendência foi de queda até o dia 13, quando então foi observada então nova tendência de aumento. Apesar da microfísica e da convecção não terem sido acionadas na modelagem, os campos provenientes do modelo CCSM3 utilizados como condição inicial e de contorno possuem diferenças e representam uma situação atmosférica prevista que pode apresentar características da passagem de um sistema frontal, por exemplo, e que vai influenciar o comportamento das variáveis simuladas. De fato, como observado no campo de pressão simulado com o WRF/Chem, a queda observada a partir do dia 11 para o SRES A2 pode indicar a ocorrência de uma frente no período para esse cenário (Figura 46b). A queda de pressão e o aumento da temperatura podem levar a condições favoráveis a altas concentrações de poluentes, como foi observado nas concentrações de ozônio. O mesmo padrão não foi verificado para o cenário SRES B1. A alta concentração de

ozônio simulada para o meio do período não pode ser associada aos padrões de variação de pressão, mas está de acordo com o aumento de temperatura simulado para o mesmo dia.

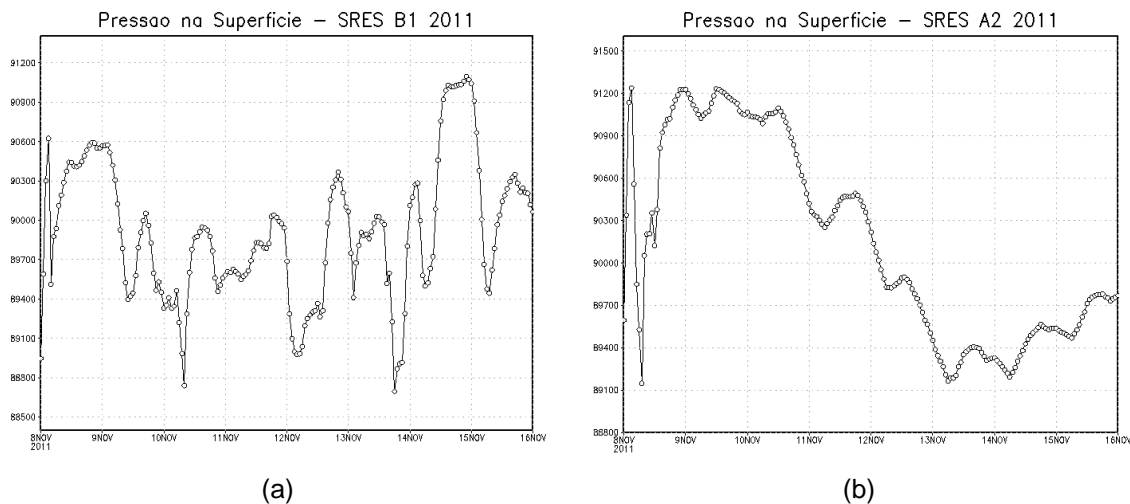


Figura 46 - Evolução temporal da pressão em superfície (em Pa) para o cenário SRES B1 (a) e SRES A2 (b) simulada para o ano de 2011 para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

Em busca do entendimento da ocorrência de altas concentrações do ozônio verificadas no cenário SRES B1, a Figura 47 mostra a altura da camada limite (em metros) simulada para o mesmo período e mesmo ponto. A altura da camada limite possui uma variação característica de estar mais elevada durante o dia, devido ao aquecimento da superfície e a maior mistura observada durante esse período e de maior instabilidade e, em função de condições opostas, menor altura durante a noite. Dessa forma, possui grande influência sobre a dispersão de poluentes, pois quanto mais estável estiver a camada, pior será a dispersão dos poluentes, ou seja, camada mais alta é favorável a uma menor concentração de poluentes. Com relação ao ozônio essa relação pode ser inversa, uma vez que o poluente é formado quando são registradas altas temperaturas, que, por sua vez, são obtidas quando se tem altos valores de radiação solar incidente, resultando em maior altura da camada limite. Através da Figura 47 observa-se que no dia 12 de novembro, quando foi verificada a

ocorrência de altas concentrações de ozônio, a altura da camada limite foi bem maior quando comparada ao restante do período de simulação, mostrando a dependência desse poluente fotoquímico à radiação solar. Esse resultado da relação direta entre a altura da camada limite com altas concentrações de ozônio também foi verificado por Freitas et al. 2000, que analisou a relação entre as concentrações de ozônio na superfície e suas relações com altura da camada limite obtida através de um SODAR (Sondador Acústico).

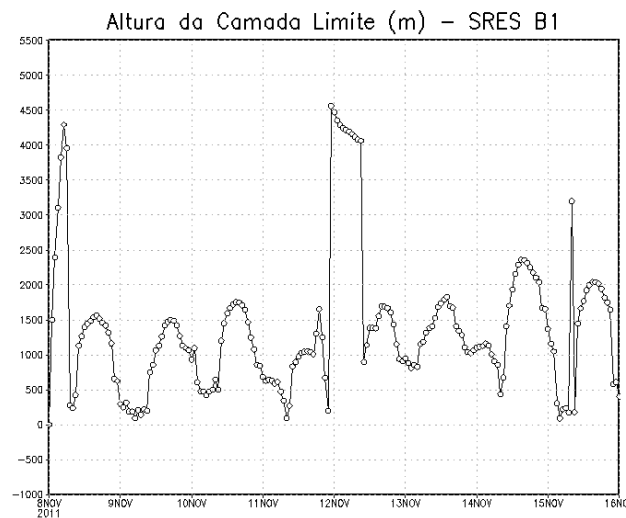


Figura 47 - Evolução temporal da altura da camada limite (em metros) para o cenário SRES B1 simulada para o ano de 2011 para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

A Figura 48 destaca a interação entre a camada limite e as concentrações de ozônio ao longo do tempo de simulação para o mesmo ponto das figuras anteriores. Através do corte vertical foi possível visualizar que quando a camada limite estava mais espessa, maior concentração de ozônio foi verificada na superfície. Outro ponto que merece destaque é que altas concentrações de ozônio também foram verificadas acima da camada limite, como por exemplo, nos dias 11 e 13 de novembro. Isso indica que como a camada limite não teve maior desenvolvimento, provavelmente devido a mais baixas temperaturas na superfície, os precursores do ozônio, que também atuam no processo de destruição do poluente, ficam aprisionados nessa camada e não atingem níveis mais altos para destruir o ozônio. Logo, ficou clara a diferença do

comportamento do poluente dentro da camada limite e fora, na atmosfera livre, onde nem sempre há compostos que vão atuar no sentido de destruir o ozônio e, assim, maiores concentrações também são verificadas.

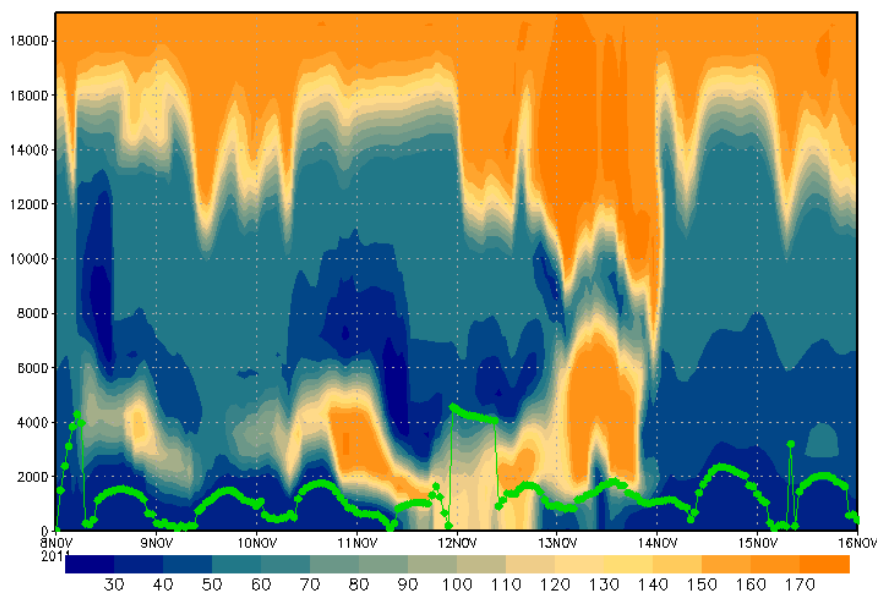


Figura 48 - Perfil de concentração de ozônio (escala de cores, em ppb) e altura da camada limite (linha verde, em metros) para o cenário SRES B1 simulada para o ano de 2011 para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

Destaca-se que foi apresentada a variação em um único ponto da grade e sabe-se que a variação espacial é grande. Devido a essa variabilidade espacial e temporal nos resultados apresentados, decidiu-se por apresentar os valores médios. Dessa forma, a Tabela 7 apresenta médias calculadas para toda a grade e todos os tempos das simulações para esse caso. Observa-se pelos valores apresentados abaixo que não existe diferença significativa entre as condições simuladas para os dois cenários com relação à maioria das variáveis. Apesar da temperatura simulada ter sido mais baixa para o cenário A2 na grade utilizada, a concentração de ozônio foi praticamente igual a do cenário B1. Com relação aos outros compostos químicos apresentados na tabela, o mesmo padrão, de pouca variação entre os cenários, foi observado. O monóxido de carbono, que é diretamente dependente da emissão, apresentou valores

aproximadamente iguais para os dois cenários, o que também não foi diferente para os óxidos de nitrogênio. A umidade relativa foi a variável que apresentou maior variação entre os cenários, com uma diferença em torno de 10%, sendo menos úmido o cenário mais pessimista.

A hipótese para explicar a ocorrência de resultados médios tão semelhantes é que o modelo CCSM3, cujos dados foram utilizados como condição inicial das simulações, começou a ser utilizado no modo previsão a partir do ano 2000, com suas tendências específicas em função dos cenários projetados para o futuro. Com isso, para o ano de 2011 as condições atmosféricas ainda não eram muito diferentes para os cenários escolhidos para o trabalho. Apesar da pouca diferença encontrada, as condições meteorológicas foram as responsáveis pelas variações obtidas nesse caso, mostrando a grande relação entre as variáveis.

Tabela 7 - Médias espaciais e temporais calculadas com os resultados obtidos para o caso 2 para algumas variáveis selecionadas.

	Cenário B1	Cenário A2
Ozônio (ppb)	46,09	46,27
Monóxido de carbono (ppb)	85,56	86,00
Temperatura (°C)	18,10	17,02
Monóxido de nitrogênio (ppb)	0,139	0,142
Dióxido de nitrogênio (ppb)	1,04	1,06
NO _x (NO+NO ₂) (ppb)	1,18	1,20
COV (ppb)	29,3	30,7
Umidade relativa (%)	85,17	75,94

6.3. Caso 3

Os resultados obtidos nesse caso foram obtidos das simulações baseadas no cenário mais pessimista, o SRES A2, descrito na metodologia. Os perfis de temperatura

simulados para os anos de 2020 e 2050 são apresentados na Figura 49. Observou-se que a variação diurna foi bem representada pelo modelo e que maiores valores foram obtidos para o ano de 2050 (linha preta na figura). Em geral, tanto as temperaturas máximas quanto as mínimas foram maiores para o ano de 2050, de acordo com o que se espera com o passar dos anos segundo as estimativas para esse cenário.

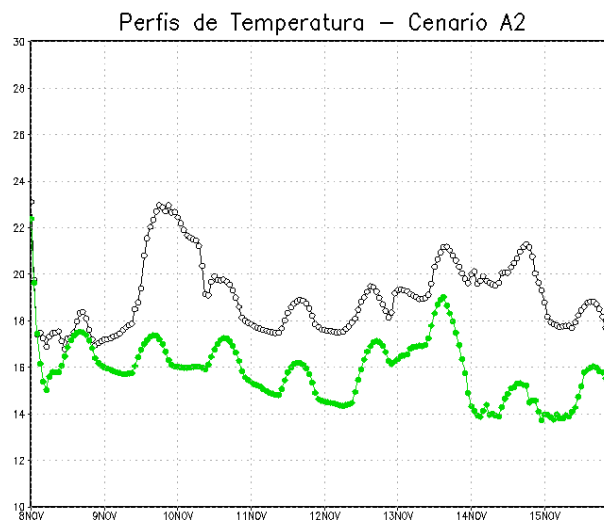


Figura 49 - Evolução temporal de temperatura (em °C) simulada para os anos de 2020 (linha verde) e 2050 (linha preta) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

No caso dos perfis de ozônio simulados para os mesmos anos, ou seja, para 2020 (linha verde) e 2050 (linha preta), observou-se um comportamento bastante diferente entre os anos para todo o período (Figura 50). Em ambos os casos a variação diurna pode ser observada, porém alguns eventos de altas concentrações foram encontradas na simulação. Para o ano de 2020, o dia 13 de novembro apresentou um pico bastante elevado, com concentrações que chegaram a 140ppb. Note que esse valor corresponde a uma ultrapassagem ao padrão (~83ppb) de qualidade do ar para o poluente. Para o ano de 2050 um pico com a mesma magnitude foi verificado no início do período, no dia 09 do mês. De forma geral, o ano de 2050 apresentou maiores amplitudes de concentração quando comparado a 2020. Além disso, as maiores concentrações de ozônio verificadas durante o período para ambos os anos, foram

acompanhadas pelo mesmo padrão de variação da temperatura, como observado na Figura 49.

Mais uma vez, as variações encontradas para esse cenário ocorreram em função apenas das condições meteorológicas utilizadas como condição inicial e de contorno no modelo regional, já que o arquivo de emissão utilizado foi o mesmo (referente ao ano de 2011) para ambos os anos.

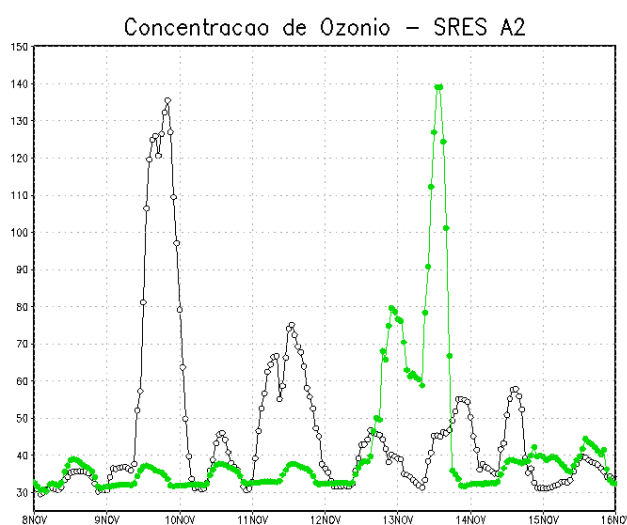


Figura 50 - Evolução temporal das concentrações de ozônio (em ppb) simuladas para o cenário A2 para os anos de 2020 (linha verde) e 2050 (linha preta) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

A Figura 51 mostra a evolução temporal da pressão na superfície simulada pelo WRF/Chem para os anos de 2020 e 2050. Da análise das variações de pressão simuladas para o período, não fica clara a relação entre a ocorrência de algum evento meteorológico nas concentrações de ozônio obtidas para o mesmo cenário, a menos para o ano de 2020 (Figura 51a), quando no final do dia 13 foi verificada uma queda acentuada na pressão atmosférica, coincidindo com o maior pico de ozônio simulado.

Dessa forma, buscou-se relacionar as concentrações de ozônio simuladas com a altura da camada limite para os dois anos. A Figura 52 mostra a evolução das alturas

da camada limite para os dois anos. No caso de 2020 (Figura 52a), quando um pico com alta concentração de ozônio foi verificado no dia 13 de novembro, a altura da camada limite foi ligeiramente diferente dentre os dias de simulação, mas a altura máxima não apresentou diferença dos outros dias. Já para o ano de 2050 (Figura 52b), a máxima concentração de ozônio, verificada no dia 09, foi acompanhada da maior altura da camada limite dentre os dias simulados. Porém, para a segunda grande concentração do poluente, que ocorreu no dia 11 de novembro, o mesmo padrão não foi verificado na altura da camada limite. Por fim, no final do período, quando maiores amplitudes de concentração de ozônio foram verificadas, houve alteração também no padrão da camada limite.

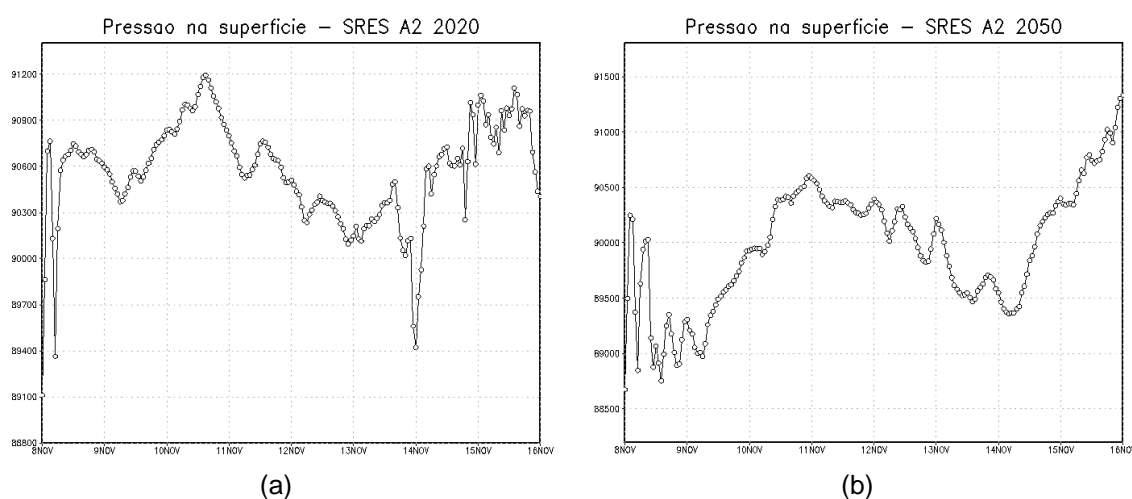


Figura 51 - Evolução temporal da pressão em superfície (em Pa) simuladas para o cenário SRES A2 para os anos de 2020 (a) e 2050 (b) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

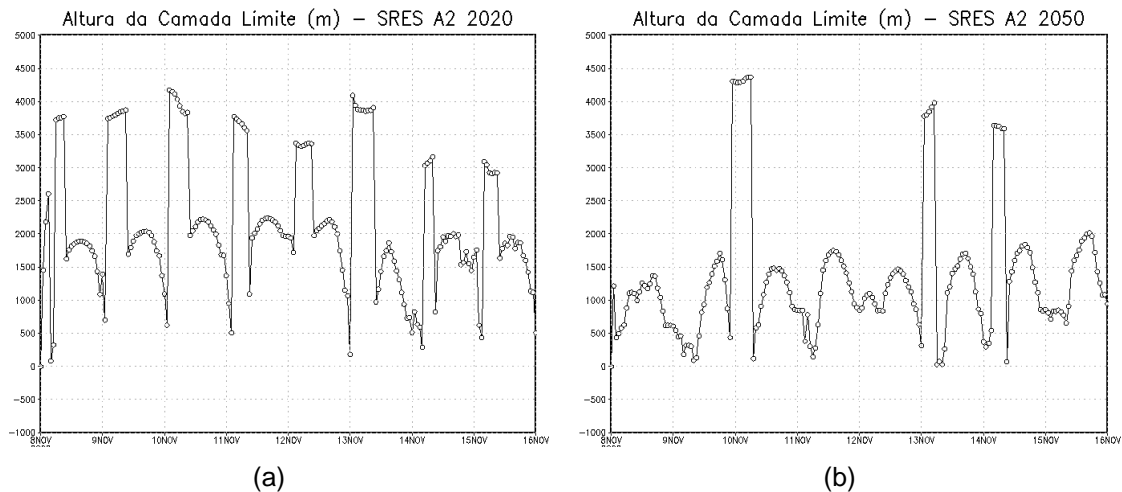


Figura 52 - Evolução temporal da altura da camada limite (em metros) simulada para o cenário SRES A2 para os anos de 2020 (a) e 2050 (b) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

Ainda buscando-se uma relação entre as possíveis variáveis que podem influenciar nas concentrações de ozônio, já que não foram considerados os processos de microfísica e convecção e, portanto a mesma intensidade de radiação estava disponível nos dois anos analisados, verificaram-se as relações entre os precursores do poluente. As concentrações de COV podem ser observadas na Figura 53a e as de NO_x na Figura 53b. Nota-se que para o ano de 2020 (linha verde) tem-se menores concentrações do que o ano de 2050 para os dois precursores analisados, tanto os compostos orgânicos voláteis quanto os óxidos de nitrogênio tiveram um aumento no dia em que também foram verificadas altas concentrações de ozônio. Nesse caso, a relação entre os precursores pode ter levado a uma condição favorável para a formação do ozônio.

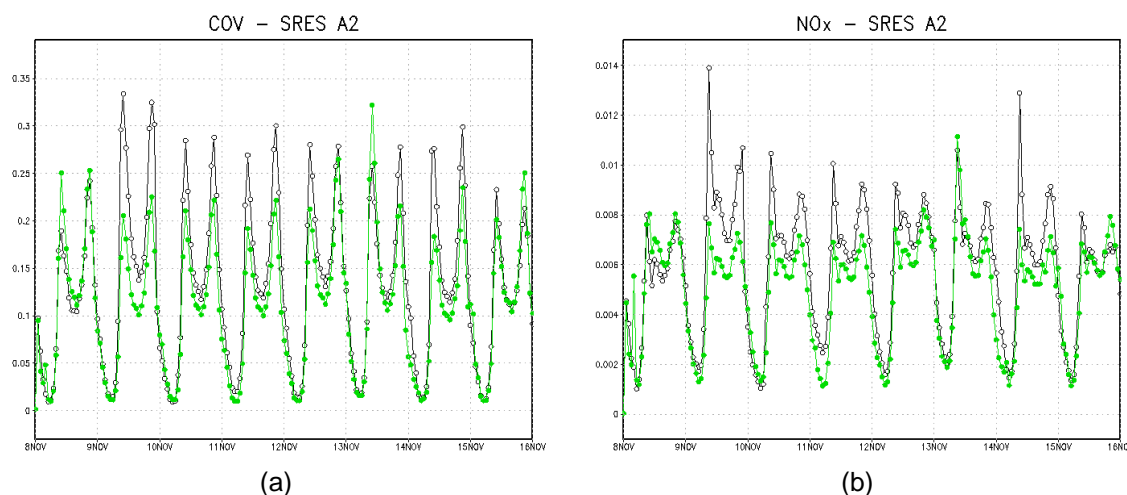


Figura 53 - Evolução temporal das concentrações (em ppm) de COV (a) e NO_x (b) simuladas para os anos de 2020 (linha verde) e 2050 (linha preta) para o cenário A2 para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

As médias espaciais e temporais calculadas para todo o período das simulações para o cenário SRES A2 são apresentadas na Tabela 8. Observou-se que, com relação à concentração de ozônio, o ano de 2050 apresentou concentração de cerca de 7ppb maior quando comparada ao ano de 2020, o que representa um aumento de aproximadamente 14% nas concentrações do poluente. Cabe destacar que apenas as condições meteorológicas foram diferentes entre os casos. Em geral, todas as concentrações, bem como os valores de temperatura e umidade foram maiores para o ano de 2050, o que está de acordo com as estimativas do IPCC. Dos precursores do ozônio, os óxidos de nitrogênio não apresentaram muita diferença, mas houve aumento dos compostos orgânicos voláteis, o que influencia no aumento das concentrações do poluente. Deve-se lembrar que a atual configuração da relação COV/NO_x indica uma atmosfera COV-limitante, que pode sofrer modificação em função da influência das condições atmosféricas na reatividade dos compostos.

Tabela 8 - Médias espaciais e temporais calculadas com os resultados obtidos para o cenário SRES A2 para algumas variáveis selecionadas para os anos de 2020 e 2050.

	2020	2050
Ozônio (ppb)	41,51	48,50
Monóxido de carbono (ppb)	85,66	87,97
Temperatura (°C)	16,84	19,74
Monóxido de nitrogênio (ppb)	0,140	0,141
Dióxido de nitrogênio (ppb)	1,021	1,183
NO _x (NO+NO ₂) (ppb)	1,162	1,325
COV (ppb)	28,97	33,60
Umidade relativa (%)	88,39	90,32

6.4. Caso 4

Os resultados obtidos para esse caso tiveram como base o cenário considerado sustentável pelas projeções do IPCC. As temperaturas previstas para os anos de 2020 e 2050 ficaram aproximadamente constantes e em torno de 1°C acima do observado no ano 2000, de acordo com o gráfico de anomalias de temperatura estimado pelas projeções. A Figura 54 apresenta os perfis de temperatura simulados para o ano de 2020 (linha verde) e 2050 (linha preta). Para ambos os anos as variações diárias foram relativamente bem representadas. Observou-se que para o ano de 2020 houve uma tendência de subida dos valores simulados, o que não foi observado para o ano de 2050. No dia 14 de novembro, em ambos os anos, foi observado um padrão semelhante de aumento de temperatura no início do período noturno e a manutenção desses valores durante o dia.

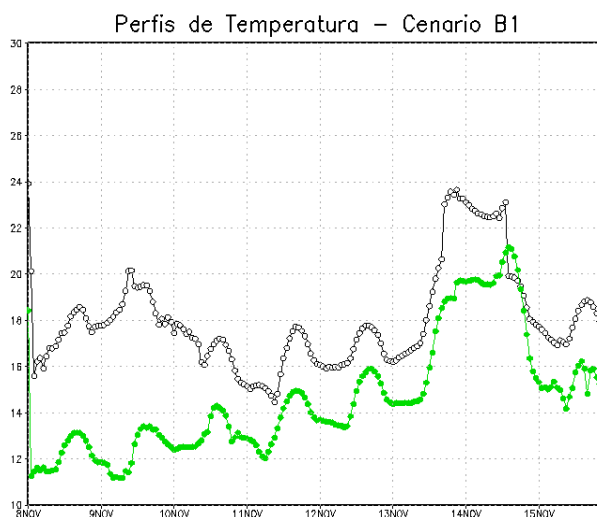


Figura 54 - Evolução temporal de temperatura (em °C) simulada para os anos de 2020 (linha verde) e 2050 (linha preta) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo, para o cenário SRES B1.

Já no caso dos perfis de ozônio, apresentados na Figura 55, verificou-se que para o ano de 2020 a variação foi menor no início do período, mas houve dois máximos de concentrações entre os dias 14 e 15 de novembro, sendo que o primeiro deles ocorreu no período noturno e ambos caracterizam uma ultrapassagem do padrão para o poluente. Esses extremos se relacionam com as temperaturas simuladas para o mesmo ano, conforme mostrado na figura anterior. Contudo, o mesmo comportamento não foi verificado para o ano de 2050. As concentrações simuladas para esse ano apresentaram maiores amplitudes diárias e máximos valores da ordem de 80ppb.

Com relação à pressão atmosférica na superfície, os dois anos também apresentaram evolução bastante diferente. Para 2020 (Figura 56a), houve duas quedas mais abruptas nos dias 11 e 15 de novembro, sem relação com a variação de temperatura. Já para o ano de 2050 (Figura 56b) foi observada uma evolução temporal diversa, com o aumento da pressão no dia 12. Para esse cenário também não fica clara a relação entre a ocorrência de algum evento meteorológico nas concentrações de ozônio obtidas para o período.

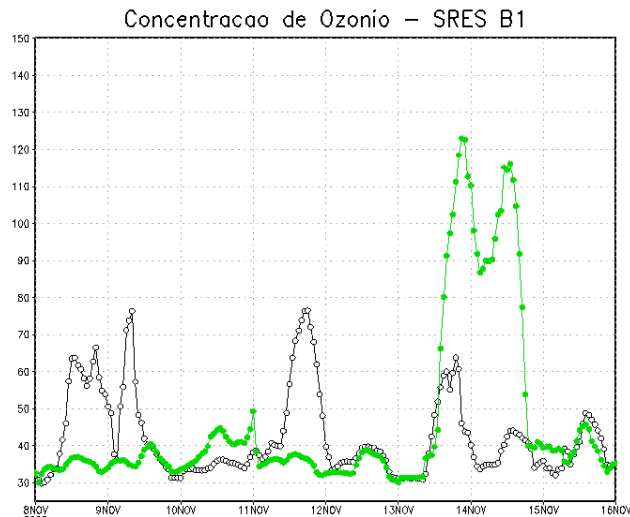


Figura 55 - Evolução temporal das concentrações de ozônio (em ppb) simuladas para os anos de 2020 (linha verde) e 2050 (linha preta) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo, para o cenário SRES B1.

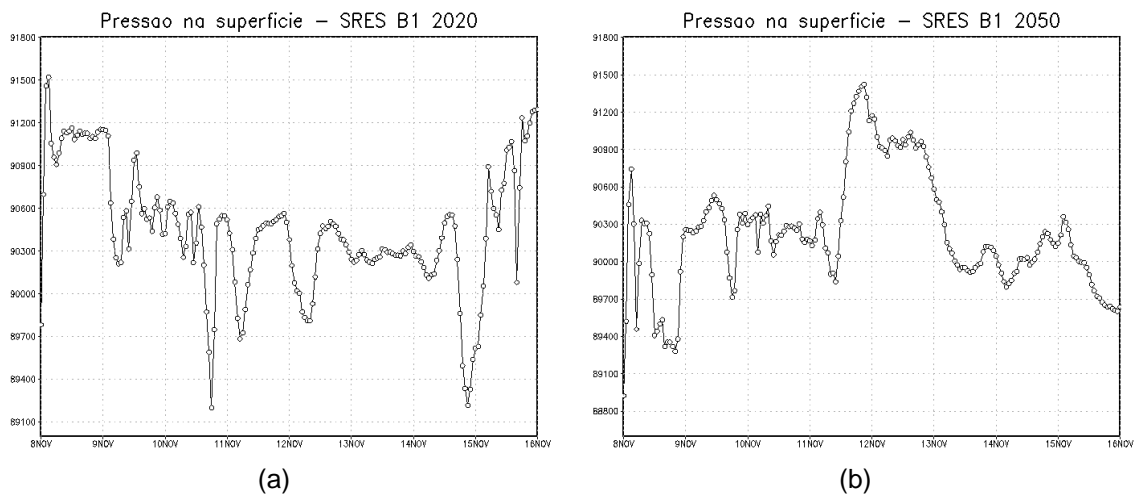


Figura 56 - Evolução temporal da pressão em superfície (em Pa) simuladas para o cenário SRES B1 para os anos de 2020 (a) e 2050 (b) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

As alturas da camada limite para os dois anos podem ser observadas na Figura 57. No ano de 2020, quando foram observadas altas concentrações de ozônio no dia 14, a altura da camada limite foi ligeiramente superior comparada aos outros dias de simulação, podendo indicar condição favorável à formação do ozônio, já que temperaturas mais altas levam a formação de altas concentrações do poluente. Com

relação ao ano de 2050, um padrão bem semelhante ao de 2020 foi encontrado, diferentemente do padrão observado para as concentrações de ozônio.

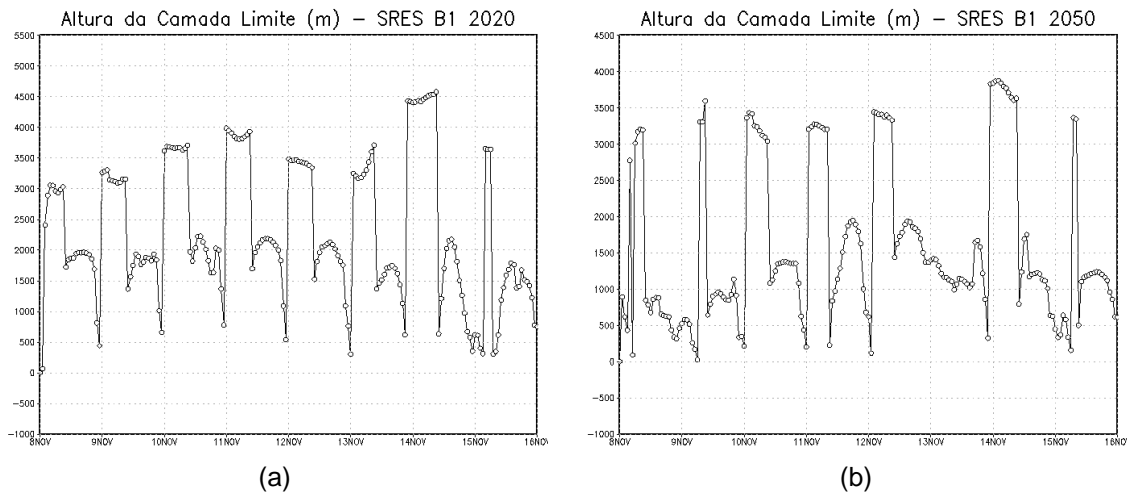


Figura 57 - Evolução temporal da altura da camada limite (em metros) simulada para o cenário SRES A2 para os anos de 2020 (a) e 2050 (b) para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

Com relação aos precursores do ozônio, pode-se observar a evolução temporal dos compostos orgânicos voláteis e dos óxidos de nitrogênio na Figura 58a e 58b, respectivamente. O mesmo padrão do caso anterior pode ser observado, onde a relação entre os precursores pode ter levado a uma condição favorável para a formação do ozônio no ano de 2020. Para esse ano, no dia em que foram observadas as altas concentrações do O_3 maiores concentrações de COV também foram observadas. A variação diária apresentada para o ano de 2050 foi mais homogênea, de acordo com as concentrações de ozônio verificadas nesse período.

As médias calculadas para toda a grade e todos os tempos de simulação para o cenário SRES B1 e para 2020 e 2050 são apresentadas na Tabela 9. No caso desse cenário mais sustentável as diferenças encontradas entre as variáveis, em geral, também foram pequenas. Contudo, um padrão diferente foi observado com relação às concentrações de ozônio. O ano de 2050 apresentou um valor médio menor do que o

estimado para o ano de 2020, apesar de a temperatura média ter sido maior para o ano de 2050, em torno de 3,5°C. Isso mostra a dependência do poluente em função das condições meteorológicas previstas para o período.

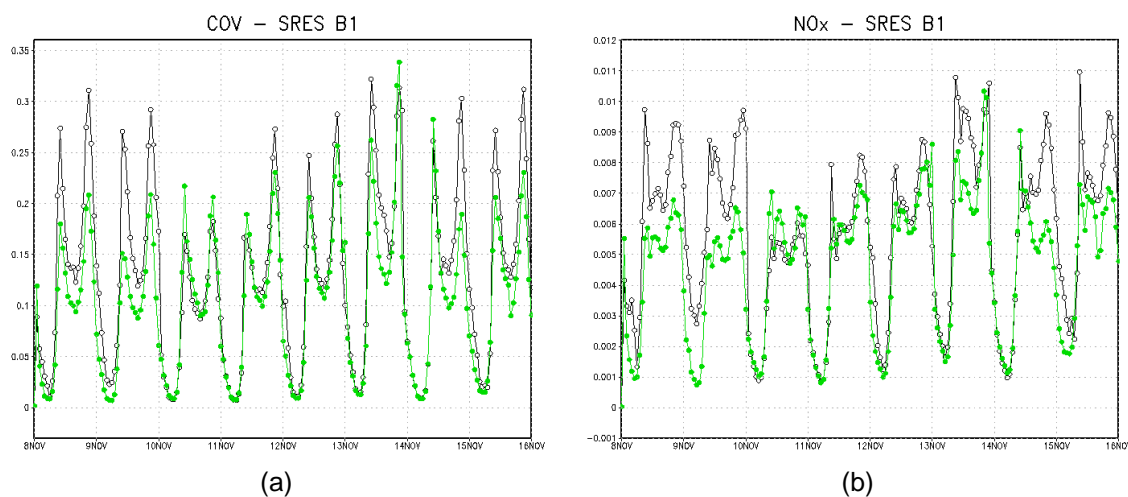


Figura 58 - Evolução temporal das concentrações (em ppm) de COV (a) e NO_x (b) simuladas para os anos de 2020 (linha verde) e 2050 (linha preta) para o cenário B1 para o ponto central da Região Metropolitana de São Paulo.

Tabela 9 - Médias espaciais e temporais calculadas com os resultados obtidos para o cenário SRES B1 para algumas variáveis selecionadas para os anos de 2020 e 2050.

	2020	2050
Ozônio (ppb)	47,79	44,92
Monóxido de carbono (ppb)	85,03	86,60
Temperatura (°C)	15,62	19,03
Monóxido de nitrogênio (ppb)	0,132	0,145
Dióxido de nitrogênio (ppb)	0,962	1,155
NO _x (NO+NO ₂) (ppb)	1,094	1,30
COV (ppb)	27,21	33,33
Umidade relativa (%)	78,91	79,95

6.5. Sumário comparativo entre os casos 2, 3 e 4

Nesta seção são apresentados os resultados de uma comparação entre os casos simulados com a mesma configuração do modelo, representando diferentes condições meteorológicas com base nos cenários do IPCC, através do modelo CCSM3 e com a mesma condição de emissão, baseada no inventário de fontes veiculares para o ano de 2011 (casos 2, 3 e 4 apresentados anteriormente).

As Tabelas 10 e 11 apresentam valores médios de concentração de ozônio, concentração de óxidos de nitrogênio, concentração de compostos orgânicos voláteis, temperatura e umidade relativa para os anos de 2011, 2020 e 2050 calculados para todos os tempos e pontos da grade de maior resolução das respectivas simulações.

Para o cenário SRES A2 (Tabela 10), as concentrações de ozônio simuladas foram maiores para o ano de 2050, porém a concentração média calculada para o ano de 2020 foi menor do que a calculada para o ano de 2011. O aumento entre o ano de 2011 e 2050 foi de aproximadamente 4,5% e de 2020 para 2050 foi de 14%. As médias das temperaturas seguiram o mesmo padrão das concentrações de ozônio, sendo maiores para o ano de 2050, e ligeiramente menor para o ano de 2020, quando comparado ao ano de 2011. Entre os precursores do ozônio, os óxidos de nitrogênio apresentaram maiores concentrações para o ano de 2011, seguido do ano de 2020 e de 2050. Contudo, essas concentrações são muito parecidas entre os anos. Os compostos orgânicos voláteis seguiram o padrão do próprio ozônio, com maiores concentrações obtidas para o ano de 2050, seguida do ano de 2011 e de 2020. O que faz sentido para uma atmosfera COV-limitante, ou seja, as concentrações dos COV vão influenciar majoritariamente as concentrações de ozônio. A única variável que aumentou linearmente a cada ano analisado foi a umidade relativa do ar, que apresentou maiores valores para o ano de 2050.

No caso do cenário SRES B1 (Tabela 11), com relação às concentrações de ozônio, o padrão foi diferente do cenário pessimista. Nesse caso sustentável as concentrações do ano de 2020 foram maiores do que a do ano de 2011, porém o ano de 2050 apresentou o menor valor simulado. A relação entre os COV e os NO_x foi diferente, mas não resultaram em um aumento do ozônio, mesmo considerando que para o ano de 2050 maiores concentrações de COV foram simulados.

Tabela 10 - Sumário comparativo entre algumas variáveis simuladas para os anos 2011, 2020 e 2050 para o cenário SRES A2.

	2011	2020	2050
O ₃ (ppb)	46,27	41,51	48,50
NO _x (ppb)	1,20	1,16	1,18
COV (ppb)	30,7	28,9	33,6
Temperatura (°C)	17,02	16,84	19,74
UR (%)	75,94	88,39	90,32

Tabela 11 - Sumário comparativo entre algumas variáveis simuladas para os anos 2011, 2020 e 2050 para o cenário SRES B1.

	2011	2020	2050
O ₃ (ppb)	46,09	47,79	44,92
NO _x (ppb)	1,18	1,09	1,30
COV (ppb)	29,3	27,2	33,3
Temperatura (°C)	18,10	15,62	19,03
UR (%)	85,17	78,91	79,95

Após análise comparativa entre os anos de 2011, 2020 e 2050, concluiu-se que as condições meteorológicas foram muito importantes para as diferenças encontradas, e que, a não linearidade da variação das médias pode estar ligada as condições iniciais e as de contorno que forçam o modelo a se ajustar às mesmas. Apesar da não representação da microfísica e da convecção para garantir que não ocorresse

precipitação, por exemplo, as diferentes condições atmosféricas previstas para cada um dos cenários e anos foram diferentes a ponto de influenciar as concentrações dos poluentes sobre a região.

6.6. Caso 5

Neste caso consideram-se cenários urbanos futuros de emissão de poluentes em função da aplicação do PROCONVE. As estimativas para representação das emissões foram feitas para os anos de 2020 e 2050. Neste caso foram utilizadas as condições meteorológicas do caso base, ano de 2011, proveniente do GFS. Com isso, esperou-se avaliar apenas o impacto da mudança das emissões e eliminar o efeito de alterações no clima. Para essas simulações foram representadas a microfísica e a convecção, já que não foram alteradas as condições meteorológicas para os diferentes anos. Dessa forma, garantiu-se que a comparação fosse feita entre situações semelhantes.

Na Figura 59 observam-se as concentrações de ozônio, na escala de cores, e os vetores de vento simulados com as condições iniciais meteorológicas do ano de 2011 e as emissões para o ano de 2020. As figuras apresentadas são médias dos horários marcados acima de cada uma das mesmas, com intervalo de 3 horas, para todo o período da simulação. As 0000Z, as concentrações de ozônio sobre a RMSP são baixas, assim como no interior do estado de São Paulo. Durante os horários noturnos, maiores concentrações do poluente foram observadas fora da RMSP e o escoamento dos ventos é mais intenso em direção ao interior do estado. Essa configuração do vento começou a mudar por volta das 0600Z e às 0900Z já se observava uma condição diferente de movimento. Com o passar do tempo, a concentração de ozônio começou a aumentar sobre a região central, chegando a valores máximos por volta das 1200Z, o que corresponde a 10:00 HBV. Nesse momento o vento é mais calmo

sobre a RMSP, tendendo a manter os precursores do ozônio sobre a região. Ressalta-se que quando comparado ao caso controle (caso 1), no ano de 2020 as máximas concentrações na RMSP ocorrem mais cedo e são mais intensas. Às 1500Z as concentrações simuladas diminuíram ligeiramente e se deslocaram para o interior do estado, porém, com menor intensidade.

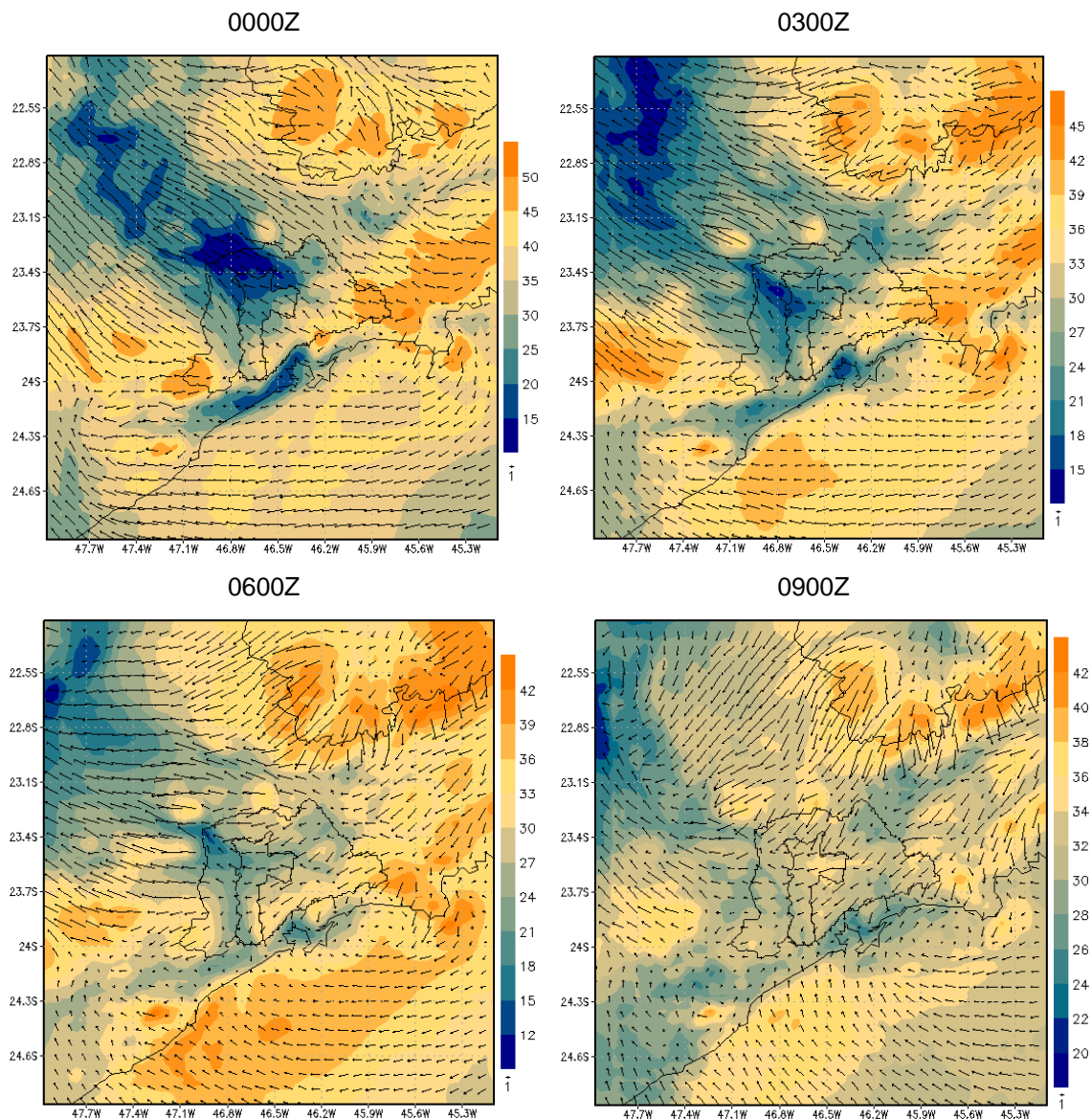


Figura 59 - Evolução das médias da concentração de ozônio (em ppb) e vento simulado pelo WRF/Chem para as horas marcadas acima de cada figura para o ano de 2020.

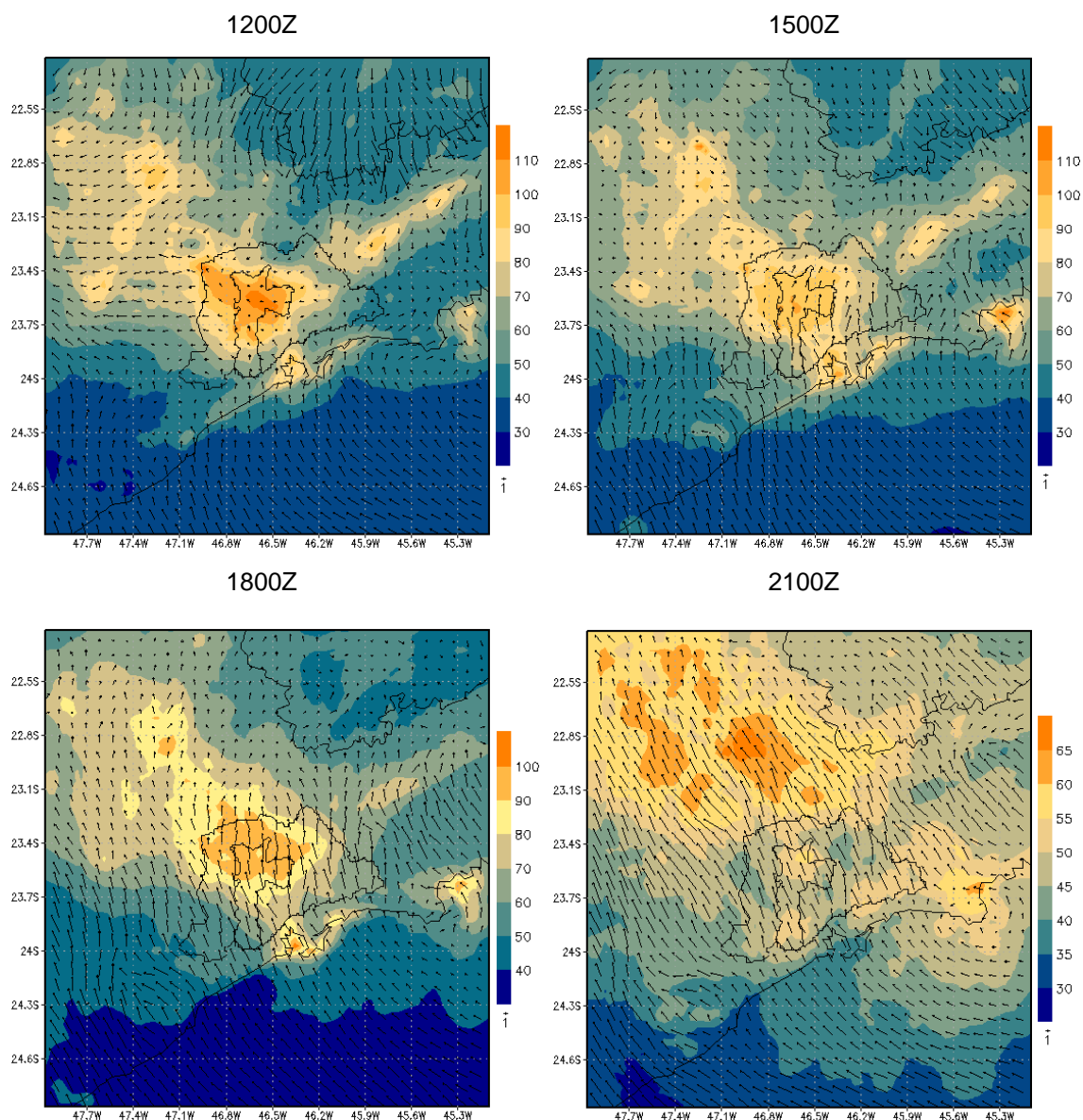


Figura 59 - Continuação.

Para o ano de 2050, o mesmo padrão foi observado, conforme apresentado na Figura 60. Entretanto, as médias calculadas para todo o período de simulação para os horários definidos com intervalos de 3 horas foram maiores para esse ano quando comparadas as do ano de 2020. Como as condições meteorológicas utilizadas como condição inicial e de contorno foram as mesmas nas duas simulações, esperava-se encontrar os mesmos padrões espaciais de distribuição das concentrações, contudo foi observada uma elevação das concentrações de ozônio em algumas áreas, apesar das reduções nas emissões.

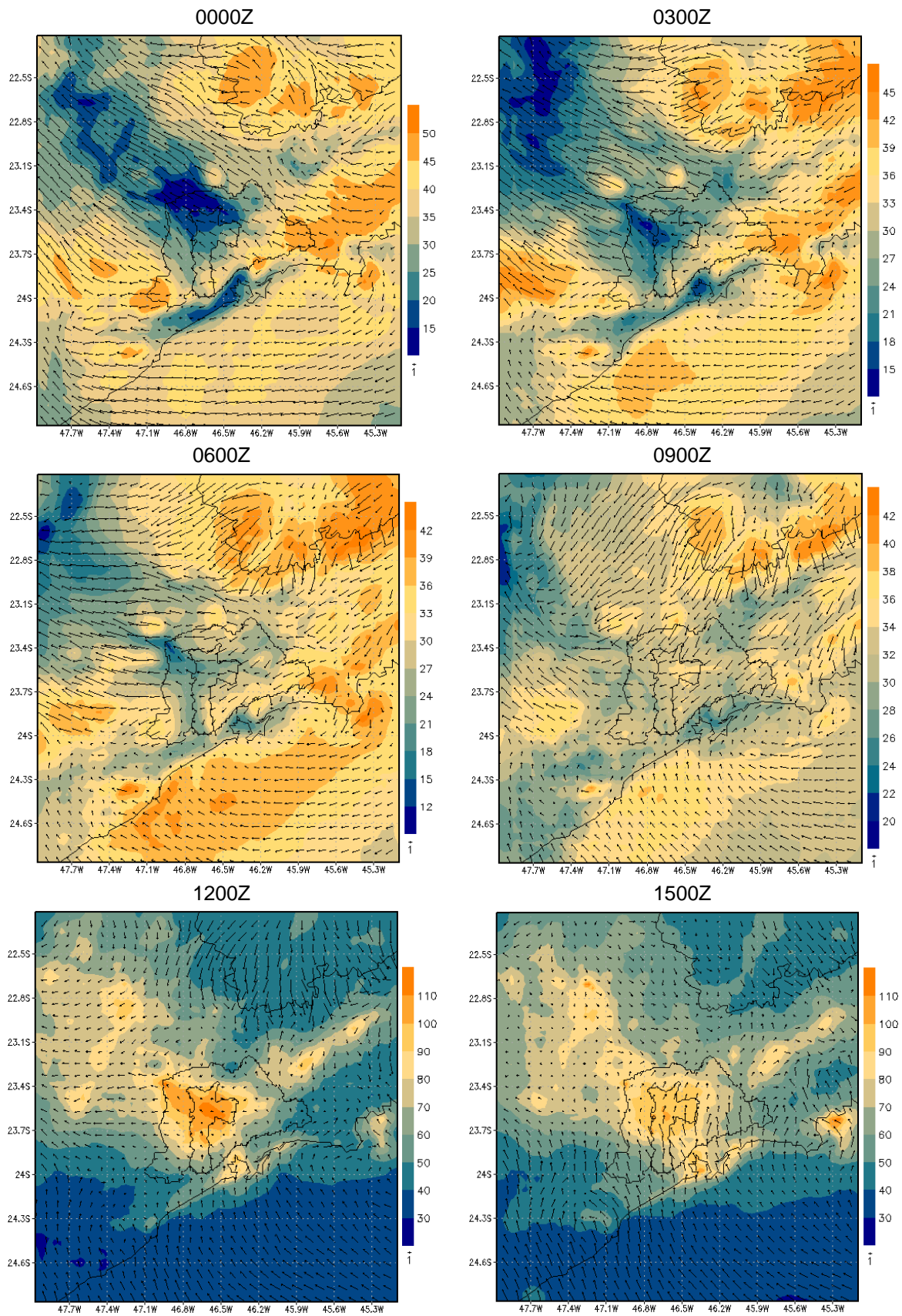


Figura 60 - Evolução das médias da concentração de ozônio (em ppb) e vento simuladas pelo WRF/Chem para as horas marcadas acima de cada figura para o ano de 2050.

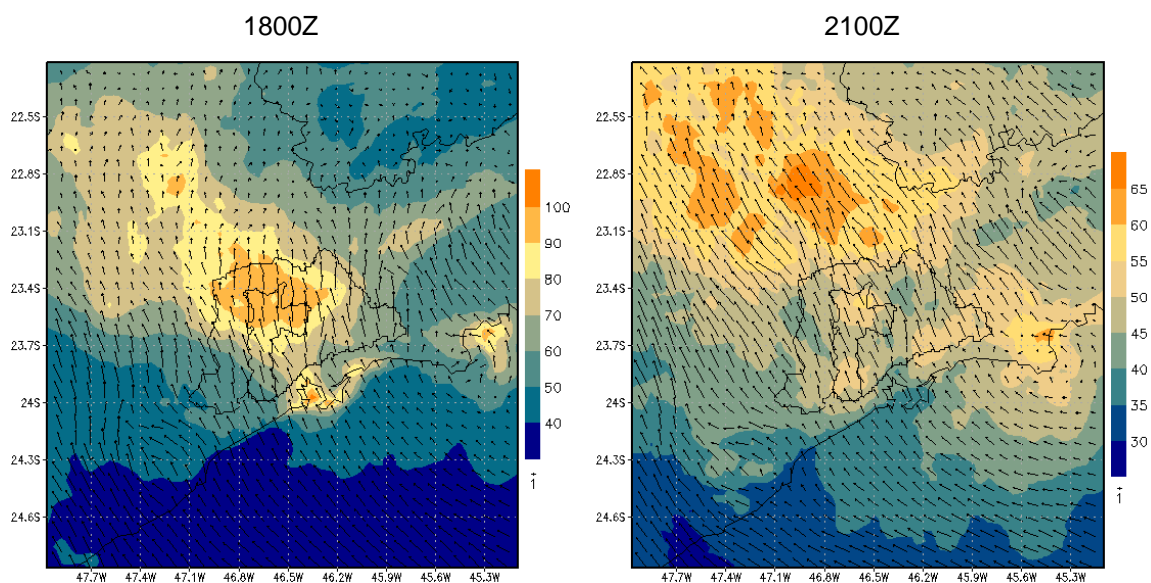


Figura 60 - Continuação.

Esses resultados mostram como, no caso de poluentes secundários, a modelagem atmosférica é essencial na descrição do comportamento destes, que não se comportam de forma linear de acordo com a redução de seus precursores.

Em geral, baseado na análise das médias horárias espaciais para os anos de 2020 e 2050, observou-se o transporte da pluma do poluente oriundo da região central da RMSP em direção ao noroeste do estado. Tal configuração tem forte dependência da brisa marítima originada do contraste entre continente e oceano, um padrão de grande importância para as condições de tempo e para a dispersão de poluentes na área urbana. A penetração da brisa marítima na RMSP também tem forte influência sobre a turbulência atmosférica e sobre os movimentos verticais. Também, existe forte modificação nos índices de umidade da região, pois a frente de brisa transporta umidade da região oceânica para a região continental, contribuindo para melhores condições de remoção dos poluentes.

Para enfatizar as principais diferenças entre os campos simulados para os anos de 2011, 2020 e 2050 com relação às emissões, a Figura 61 mostra as diferenças

espaciais entre as concentrações médias de ozônio calculadas para as simulações de 2020 e 2011. Nota-se que as principais diferenças foram observadas sobre as regiões mais urbanizadas, cuja emissão é maior. No centro da RMSP as maiores diferenças encontradas foram da ordem de 10ppb. Destaca-se a região do litoral paulista e a do Vale do Paraíba, que também apresentaram diferenças positivas de concentração de ozônio. Para a maior parte da área simulada, as diferenças encontradas foram nulas ou negativas, indicando mesmo padrão ou ainda menores concentrações de ozônio previstas para o ano de 2020 em comparação aos dias atuais.

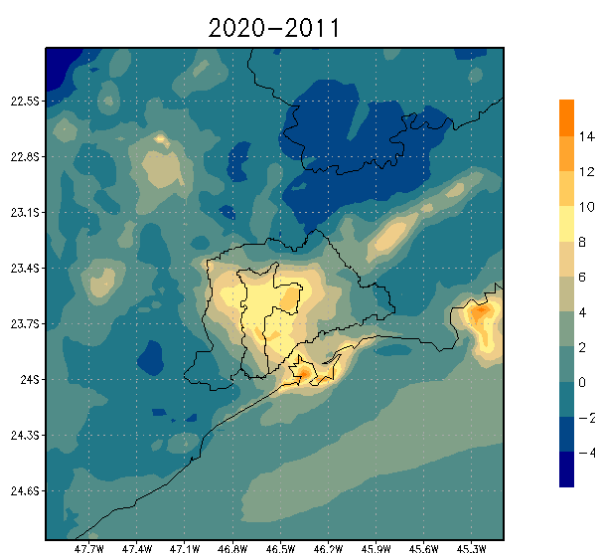


Figura 61 - Diferença entre os campos médios de concentração de ozônio (em ppb) simulados para 2011 e 2020.

No caso da diferença calculada entre os anos de 2050 e 2011 para o mesmo poluente (Figura 62), as diferenças encontradas foram maiores e observou-se a ocorrência do mesmo padrão espacial da diferença anterior (entre os anos de 2011 e 2020). Para o ano de 2050, a RMSP apresentou máximos valores em torno de 14ppb, ou seja, cerca de 4ppb superior do que o ano de 2020. Para o restante do domínio simulado as diferenças também foram menores. Menores regiões com diferenças negativas foram verificadas.

A Figura 63 destaca a diferença entre os anos de 2020 e 2050. Grande parte da região metropolitana e o interior do estado apresentam as maiores diferenças de concentração. Para toda a grade simulada, as diferenças foram positivas, indicando o aumento das concentrações em todo o domínio.

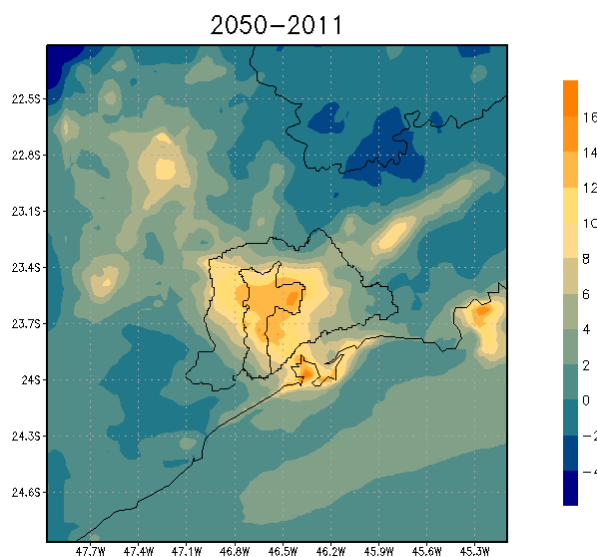


Figura 62 - Diferença entre os campos médios de concentração de ozônio (em ppb) simulados para 2011 e 2050.

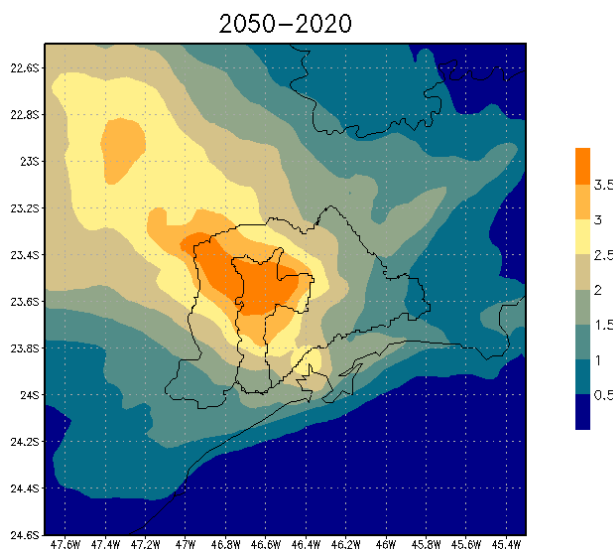


Figura 63 - Diferença entre os campos médios de concentração de ozônio (em ppb) simulados para 2020 e 2050.

A Figura 64 apresenta as diferenças entre os anos simulados para os óxidos de nitrogênio (Figura 64a) e para os compostos orgânicos voláteis (Figura 64b). Como esses compostos são os principais precursores do ozônio, a variação espacial da concentração dos mesmos, em conjunto com as condições atmosféricas interfere na química do poluente em questão. Os óxidos de nitrogênio apresentaram tendência de redução, principalmente nos pontos com maiores emissões, que é o centro da RMSP e do litoral paulista. No resto do domínio foi observado aumento do composto. No caso dos compostos orgânicos voláteis, além dos locais com intensa emissão, o interior do estado de São Paulo apresentou aumento das concentrações desse composto. Diferentemente do padrão encontrado para o NO_x , os COV não apresentaram reduções no restante do domínio, ou seja, além das regiões com maior intensidade de emissão, as diferenças entre os anos foi nula. Com esse resultado, pode-se esperar, na média, que maiores concentrações de ozônio sejam observadas nos anos futuros.

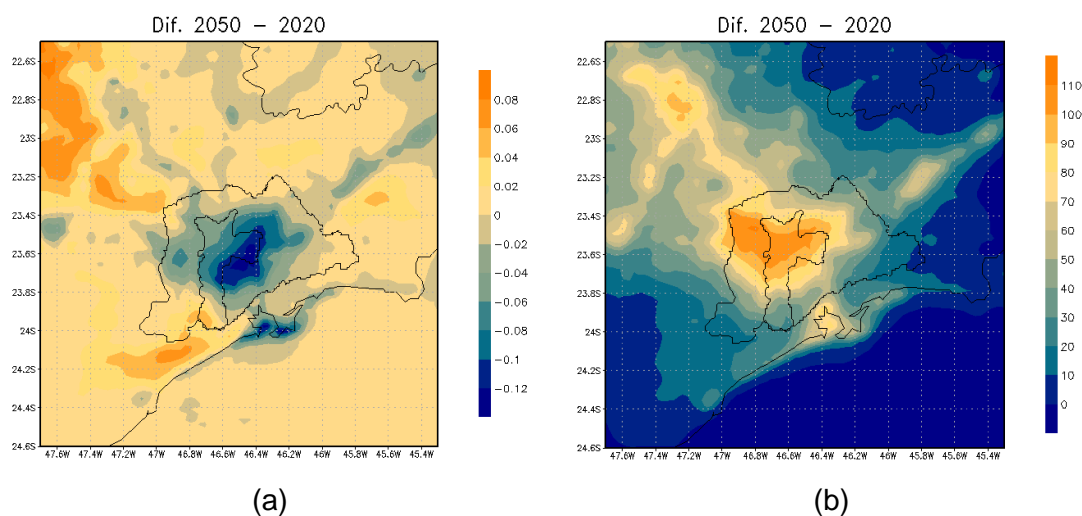


Figura 64 - Diferença entre os campos médios (em ppb) de óxidos de nitrogênio (a) e compostos orgânicos voláteis (b) simulados para 2020 e 2050.

A partir da análise das diferenças apresentadas, foi observado que as mesmas se acentuam com o passar dos anos no caso do ozônio, indicando aumento das concentrações do poluente para o futuro, apesar da tendência de redução das emissões dos precursores representada nos cenários de emissão utilizados nestes

casos de modelagem. De fato, a emissão dos poluentes como o monóxido de carbono, por exemplo, diminuiu 50% no caso dos veículos leves e ônibus e 75% no caso dos caminhões, mas dobrou no caso das motocicletas, sendo que esse poluente é majoritariamente emitido por veículos leves. No caso específico do ozônio, como é um poluente secundário, a diminuição das concentrações pode não estar diretamente ligada às reduções dos outros poluentes primários. Sua formação na atmosfera é complexa, bastante variável e dependente da emissão e razão entre seus precursores e das condições atmosféricas.

Além dos campos espaciais apresentados, os resultados das simulações foram comparados para um ponto da grade escolhido, que foi a estação da CETESB localizada em Pinheiros, por ter representado bem algumas variáveis no caso de validação do modelo (caso 1) e por estar localizada aproximadamente no centro das grades. A Figura 65 mostra as concentrações de ozônio simuladas para os anos de 2011 (linha azul escuro), 2020 (linha azul claro) e 2050 (linha verde). Os anos de 2020 e 2050 apresentaram o mesmo padrão, a menos de ligeiras diferenças nas concentrações, com dois picos no meio do dia, diferentemente do ano de 2011. Em geral, as concentrações de ozônio sobem rapidamente ainda no período da manhã, sofrem uma leve redução e tendem novamente a um aumento, de menor intensidade do que o primeiro e sofrem redução, também bruscamente, no período noturno.

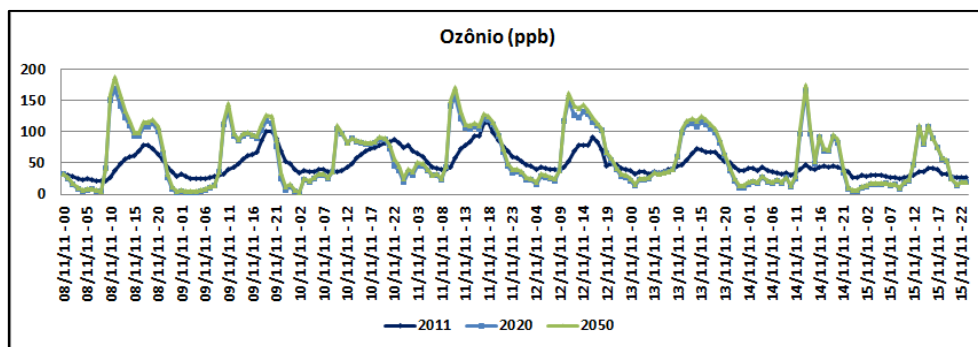


Figura 65 - Concentrações de ozônio (em ppb) simuladas para a estação de Pinheiros para os anos de 2011 (linha azul escuro), 2020 (linha azul claro) e 2050 (linha verde).

Com relação aos óxidos de nitrogênio ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), apresentados na Figura 66, observa-se que as diferenças entre os anos simulados foram menores quando comparadas ao comportamento do ozônio. Para os anos de 2020 e 2050 as concentrações tenderam a acompanhar a evolução temporal do ano de 2011 e foram muito parecidas entre si.

Nos cenários futuros considerou-se uma redução grande na emissão de NO_x em 2020 e menor entre esse ano e 2050, isto é, os maiores ganhos ambientais serão obtidos com a instalação das novas fases do PROCONVE que são dirigidas aos veículos pesados, estabilizando depois.

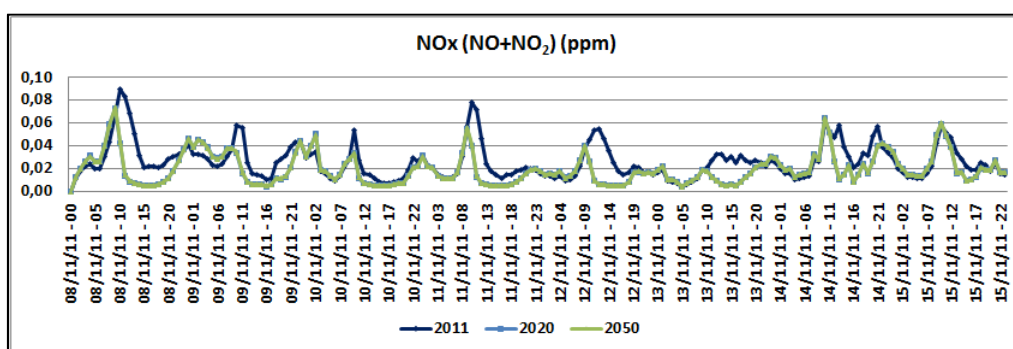


Figura 66 - Concentrações de óxidos de nitrogênio simuladas para a estação de Pinheiros para os anos de 2011 (linha azul escuro), 2020 (linha azul claro) e 2050 (linha verde).

A Figura 67 apresenta a evolução temporal dos compostos orgânicos voláteis (COV) simulados pelo WRF/Chem para o ano de 2011 e a Figura 69 apresenta a mesma evolução para os anos de 2020 e 2050. O mesmo composto foi apresentado em figuras diferentes devido à ordem de grandeza das concentrações. Caso fossem colocadas na mesma figura, não seria possível identificar a variação do ano de 2011, que foi muito mais baixa do que as simuladas para os anos de 2020 e 2050. Em geral, o padrão simulado foi o mesmo para todos os anos, variaram apenas as concentrações. Em comparação com as concentrações de NO_x , também foi semelhante e oposto quando comparado às concentrações de ozônio, indicando o

consumo dos precursores na formação do poluente fotoquímico secundário. A redução na concentração dos NO_x nos cenários futuros e aumento dos COV foram a causa do aumento do O_3 entre 2020/2050 e 2011.

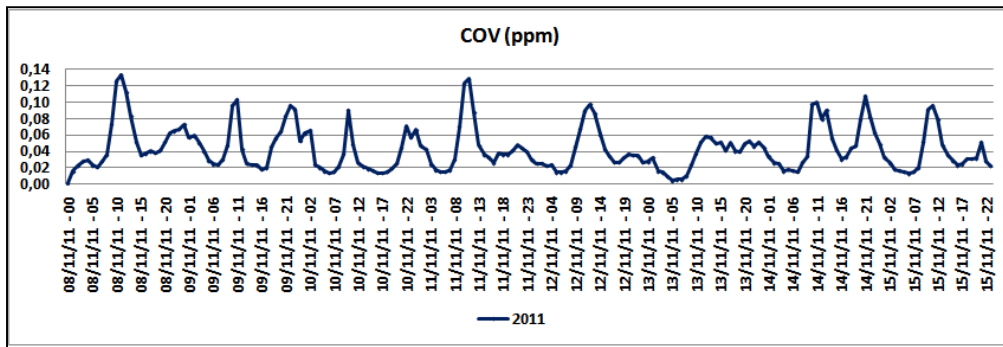


Figura 67 - Concentrações de compostos orgânicos voláteis simulados para a estação de Pinheiros para o ano de 2011.

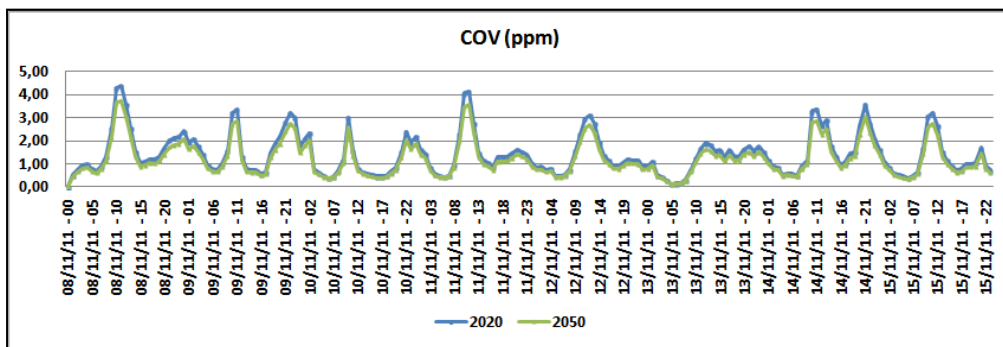


Figura 68 - Concentrações de compostos orgânicos voláteis simulados para a estação de Pinheiros para os anos de 2020 (linha azul claro) e 2050 (linha verde).

Ainda para esse caso, a Tabela 12 apresenta uma comparação das variáveis simuladas para esse caso e o caso base. As variáveis meteorológicas como a temperatura e a umidade não foram incluídas na tabela, pois seus valores foram mantidos constantes, uma vez que só foram alteradas as emissões. Observou-se que as diferenças entre as médias calculadas para todos os tempos e pontos de grade foram pequenas, com aumento das concentrações de ozônio de aproximadamente 2 ppb entre os anos de 2011 e 2050. A tendência dos óxidos de nitrogênio foi de redução e a dos compostos orgânicos voláteis foi de aumento. Em geral, apesar das

médias terem sido baixas, observou-se através da comparação espacial maiores diferenças. De fato, as maiores diferenças foram observadas sobre a Região Metropolitana de São Paulo, porém, quando a média foi calculada para toda a grade os valores não foram tão altos, influenciados por áreas da grade em que não houve muita diferença ou até mesmo foram observadas diminuição das concentrações.

Tabela 12 - Sumário comparativo entre algumas variáveis simuladas para os anos 2011, 2020 e 2050.

	2011	2020	2050
O ₃ (ppb)	42,26	43,02	44,01
NO _x (ppb)	5,85	4,58	4,46
COV (ppb)	12,47	33,46	37,76
CO (ppb)	170,4	199,1	196,2

6.7. Caso 6

Por fim, para o último caso foram utilizados os dados meteorológicos dos dois cenários do IPCC, o SRES B1 e o SRES A2, e as estimativas das emissões para o ano de 2050 como condição inicial e de contorno do WRF/Chem, quando se espera haver maiores diferenças com relação aos dias atuais. A evolução temporal das temperaturas para os dois cenários, extraídas no centro da RMSP foram apresentadas na Figura 69. Observou-se que a variação diurna não é bem definida e que ambos os cenários apresentaram o mesmo comportamento, de maiores temperaturas no início do período, temperaturas mais baixas nos dias no meio da simulação e nova tendência de aumento no final do período simulado.

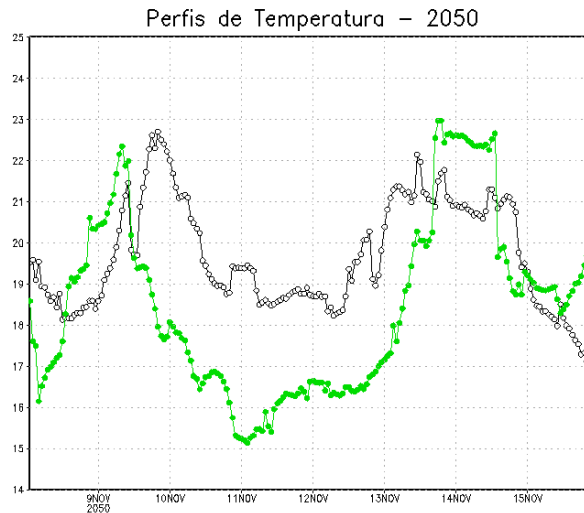


Figura 69 - Evolução temporal de temperatura (em °C) simulada pelo WRF/Chem para os cenários SRES B1 (linha verde) e SRES A2 (linha preta).

Com relação às condições atmosféricas previstas para esse período, os cenários apresentaram algumas diferenças. Observa-se na Figura 70 a evolução dos campos de radiação solar na superfície, enfatizando a diferença entre os dois cenários. O SRES B1 (Figura 70a) apresenta uma evolução mais homogênea, com dois dias apresentando maior valor de radiação, associado a menor quantidade de nebulosidade e o restante dos dias com valores de radiação reduzidos aproximadamente pela metade. Esse comportamento foi observado com a temperatura, conforme apresentado acima. Já o cenário SRES A2 (Figura 70b) apresentou uma evolução menos homogênea, com um dia com maior radiação solar incidente e outros com valores bem mais baixos. Tal padrão também pode ter influenciado a evolução de temperatura para esse cenário. Ainda assim, as temperaturas para o cenário SRES A2 simuladas foram maiores do que para o cenário B1, o que está de acordo com a média das projeções.

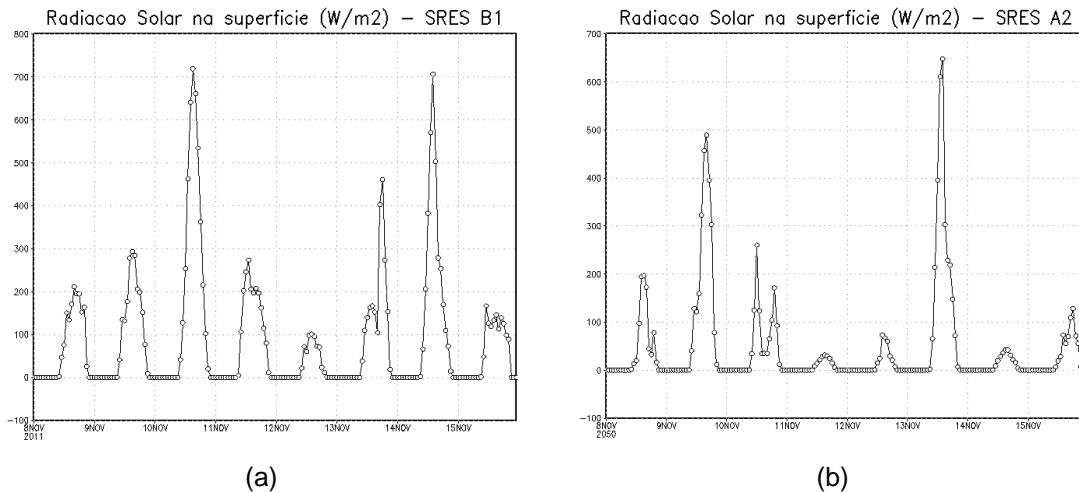


Figura 70 - Evolução temporal da radiação solar ($W.m^{-2}$) na superfície simulada pelo WRF/Chem para os cenários SRES B1 (a) e SRES A2 (b).

A Figura 71 apresenta os perfis de ozônio simulados para os dois cenários analisados, onde a linha verde representa o SRES B1 e a linha preta o SRES A2. Os padrões de variação foram relativamente parecidos entre os dois cenários, porém, a simulação com o SRES A2 apresentou maiores concentrações do poluente, a menos do primeiro dia, onde a amplitude das concentrações foi parecida entre os cenários.

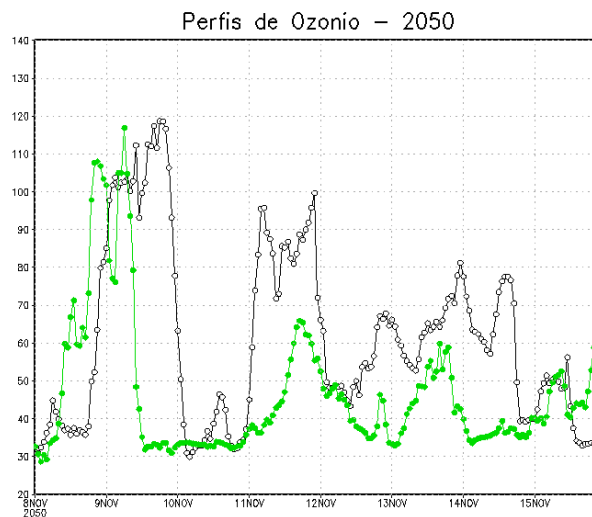


Figura 71 - Evolução temporal das concentrações de ozônio (em ppb) simuladas pelo WRF/Chem para os cenários SRES B1 (linha verde) e SRES A2 (linha preta).

A Figura 72 apresenta os perfis verticais do poluente ao longo do período de simulação para o ponto localizado no centro da RMSP. Observou-se que maiores

concentrações foram observadas não somente em superfície, mas também em níveis mais altos para o cenário SRES A2 (Figura 72b). Principalmente nos primeiros dias, foram encontradas altas concentrações de ozônio em níveis médios para esse cenário.

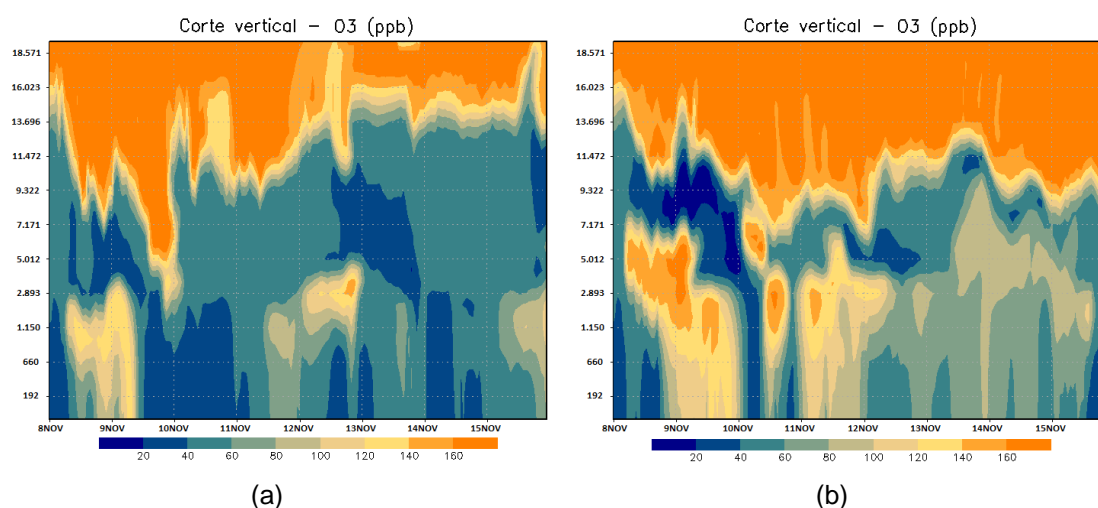


Figura 72 - Corte vertical das concentrações de ozônio (em ppb) simuladas pelo WRF/Chem para os cenários SRES B1 (a) e SRES A2 (b) para o ponto central da RMSP.

Para enfatizar a diferença entre os cenários projetados para o ano de 2050, com relação ao ozônio, foi apresentada a diferença entre os campos espaciais simulados pelo WRF/Chem (Figura 73). Observa-se que o campo é mais homogêneo, refletindo as condições iniciais e de contorno utilizadas para esse caso. Contudo, diferenças máximas são da ordem de 24ppb, encontradas sobre parte da Região Metropolitana de São Paulo e do interior. Apesar desse campo ser mais homogêneo, as maiores diferenças foram observadas sobre as regiões onde as concentrações máximas foram verificadas em outros casos analisados.

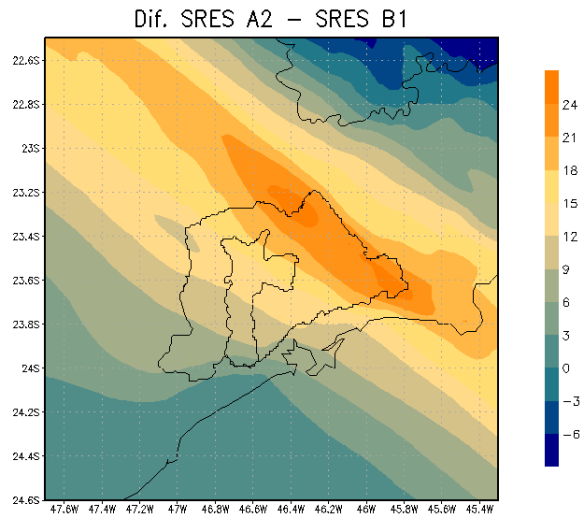


Figura 73 - Diferença espacial das concentrações de ozônio médias (em ppb) simuladas pelo WRF/Chem para os cenários SRES B1 e SRES A2.

Para fins de comparação entre os cenários estudados neste caso, a Tabela 13 apresenta as médias calculadas para todos os pontos da grade e todos os tempos da simulação realizada para o ano de 2050 para os dois cenários do IPCC. Observou-se que as concentrações de ozônio simuladas foram maiores quando foram utilizadas as condições meteorológicas e as condições estimadas de emissão para o ano de 2050, para ambos os cenários. Ou seja, com a combinação das estimativas de variações das condições atmosféricas e mais as estimativas de mudanças das emissões, maiores concentrações de ozônio foram encontradas com o passar do tempo. No caso desse poluente, maiores esforços de redução devem ser direcionados para os compostos orgânicos voláteis, já que a atmosfera urbana da RMSP possui uma relação COV/NO_x , que a caracteriza como COV-limitante (MARTINS et al., 2006).

Com relação às variáveis meteorológicas, observa-se que a média de temperatura foi muito próxima entre os cenários simulados, com diferença de aproximadamente $1^{\circ}C$ maior para o cenário mais pessimista, além de uma condição atmosférica mais úmida.

Tabela 13 - Médias espaciais e temporais calculadas com os resultados obtidos para os cenários de clima SRES B1 e SRES A2 e com novos inventários de emissão, para algumas variáveis selecionadas para o ano de 2050.

	SRES B1	SRES A2
Ozônio (ppb)	51,65	59,39
Monóxido de carbono (ppb)	83,82	82,52
Temperatura (°C)	19,45	20,50
Monóxido de nitrogênio (ppb)	0,067	0,046
Dióxido de nitrogênio (ppb)	0,955	0,826
NO _x (NO+NO ₂) (ppb)	1,022	0,872
COV (ppb)	36,76	29,84
Umidade relativa (%)	74,96	82,08

7. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho aborda a questão do impacto das mudanças climáticas na qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo considerando cenários climáticos do IPCC e também o impacto de implantação de políticas de controle de emissões. A questão chave que se colocou foi qual desses processos é mais importante do ponto de vista de qualidade do ar. O poluente que foi o foco das atenções foi o ozônio, que tem apresentado um aumento no número de ultrapassagens de seu padrão de qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo, e por ser secundário, tem uma forte dependência das condições atmosféricas.

O modelo WRF/Chem foi utilizado como principal ferramenta para avaliar as concentrações do ozônio troposférico sobre a Região Metropolitana de São Paulo, a partir de diferentes condições iniciais meteorológicas e de emissão de poluentes para a atmosfera. Para isso foram realizados seis grupos de simulações onde se esperou avaliar o comportamento das concentrações do ozônio em cada um dos mesmos.

No primeiro caso, o modelo regional WRF/Chem foi alimentado com dados do GFS (modelo global do NCEP), que é comumente utilizado para esse tipo de simulação, já que possui saídas preparadas em modo de análise, que garante uma boa representação da atmosfera e, assim, uma boa qualidade de condições iniciais e de contorno para as simulações regionais. Para a validação do WRF/Chem foi selecionado o período do dia 08 ao dia 16 de novembro de 2011, pois a Região Metropolitana de São Paulo registrou, em algumas das estações de monitoramento da qualidade do ar distribuídas sobre a cidade, altas concentrações de ozônio. O modelo representou de forma satisfatória as condições observadas para esse período e, por

isso, foi considerado adequado para os propósitos deste trabalho. Através da comparação dos valores simulados com dados medidos e obtidos das estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB, tanto do ozônio, quanto da temperatura, foi possível verificar a boa representação de diferentes condições atmosféricas, já que o período contou com a passagem de um sistema frontal próximo da região de estudo. Através da análise dos campos espaciais observou-se a variação diária das concentrações de ozônio e que as maiores concentrações foram verificadas sobre a área central da Região Metropolitana nos horários de maior emissão dos precursores de ozônio, os compostos orgânicos voláteis e os óxidos de nitrogênio. Cabe destacar que as concentrações do poluente em questão também são altamente dependentes das condições atmosféricas e plumas do poluente podem ser transportadas para outras regiões, como de fato foi verificada a movimentação dessa pluma em direção ao interior do estado, principalmente no início da tarde, associado ao padrão de brisa marítima que tem um importante papel na dispersão de poluentes em São Paulo.

Para o segundo caso, o mesmo período foi simulado, porém com uma condição inicial diferente para a parte meteorológica. Foram utilizadas as condições do modelo global CCSM3, que faz parte do conjunto de modelos definidos para fazer as estimativas globais de mudanças climáticas no IPCC. As saídas de dois cenários desse modelo foram utilizadas como condições iniciais e de contorno do WRF/Chem para a região de São Paulo: do SRES B1, que representa um cenário mais sustentável dentre as possíveis estimativas para o futuro abordadas neste trabalho (caso considerado sustentável) e o SRES A2, que visa representar uma condição futura onde as emissões globais continuem sendo como a dos dias atuais, sem preocupação de buscar medidas que visem à redução das emissões (caso considerado pessimista). A alocação temporal e espacial das emissões para a grade definida foi baseada no inventário oficial de emissões veiculares para o período em questão. Neste caso,

esperou-se avaliar apenas a influência das condições meteorológicas nas concentrações de ozônio simuladas para esse período. Esse caso também foi utilizado como caso base para as simulações realizadas para os anos futuros e, por isso, não foram acionadas as parametrizações da microfísica e da convecção, pois assim garantiu-se a comparação entre situações atmosféricas semelhantes. Os resultados mostraram que apesar do cuidado da não representação desses processos que poderiam levar à formação de nebulosidade e de precipitação, os mesmos apresentam características que levaram a representação pontual das concentrações de ozônio diferentes para cada um dos cenários. Os resultados médios apontaram um comportamento parecido entre os dois cenários e possivelmente o motivo para essa semelhança foi a pouca variação entre os cenários do IPCC para o ano de 2011. Ressalta-se que essa simulação climática com o modelo CCSM3 teve início no modo de previsão no ano 2000, apresentando tendências até o ano de 2100. Dessa forma, no ano de 2011, as condições ainda não eram muito diferentes entre os cenários. Contudo, apesar da pouca diferença média verificada entre os dois cenários, as condições meteorológicas foram as únicas responsáveis pelas mesmas.

No terceiro caso, o período escolhido, compreendido entre os dias 08 e 16 de novembro, foi simulado para os anos de 2020 e 2050, considerando as condições atmosféricas do cenário SRES A2 do modelo global CCSM3 para esses anos, e nas emissões veiculares do inventário oficial para o ano de 2011 (conforme o caso anterior). O objetivo desse caso foi avaliar a influência das mudanças climáticas nas concentrações de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo para os anos escolhidos considerando o pior cenário projetado para o futuro. Para isso, não foram acionadas as opções de parametrização da microfísica e da convecção, mais uma vez para garantir a comparação entre situações atmosféricas semelhantes. Dessa forma, as condições de radiação solar na superfície, variável que influencia diretamente a formação de ozônio, foram iguais para os dois anos simulados. Resultados médios

calculados com base em todos os tempos de simulação e todos os pontos da grade de maior resolução mostram que a concentração média de ozônio foi cerca de 14% maior para o ano de 2050, aumento que também foi verificado para a temperatura seguindo o mesmo percentual, quando comparado ao ano de 2020. Contudo, comparações realizadas entre os anos de 2011 e 2020, para esse mesmo cenário, mostrou que foram verificadas maiores médias de ozônio, temperatura, COV e NO_x para o ano de 2011. Contudo, maiores diferenças nos campos meteorológicos oriundos dos cenários do IPCC apresentam maiores diferenças com os dias atuais com o passar dos anos. Para o ano de 2020, por estar mais próximo do ano de 2011, era de se esperar que menores diferenças fossem encontradas. Os resultados pontuais mostraram dependência da relação entre os compostos orgânicos voláteis e os óxidos de nitrogênio para formação de ozônio, especialmente para dias em que altas concentrações foram simuladas.

O quarto caso foi semelhante ao anterior, porém foi baseado nas condições atmosféricas do cenário SRES B1, também do IPCC. O mesmo período escolhido, compreendido entre os dias 08 e 16 de novembro, foi simulado para os anos de 2020 e 2050 e as emissões veiculares foram obtidas do inventário oficial para o ano de 2011. O objetivo desse caso foi avaliar a influência das mudanças climáticas nas concentrações de ozônio sobre a Região Metropolitana de São Paulo para os anos escolhidos considerando o cenário sustentável projetado para o futuro. Também não foram acionadas as opções de parametrização da microfísica e da convecção para garantir a comparação entre situações atmosféricas semelhantes. Resultados médios calculados com base em todos os tempos de simulação e todos os pontos da grade para esse caso mostram que a concentração média de ozônio foi menor para o ano de 2050 em comparação com o ano de 2020 em cerca de 6%. Apesar desse decréscimo nas concentrações de ozônio, os valores de temperatura foram cerca de 3,5°C maiores para o ano de 2050, na média. Com relação aos precursores do ozônio, os

compostos orgânicos voláteis apresentaram um aumento aproximado de 18% e os óxidos de nitrogênio um aumento de 15%, ainda com relação ao ano de 2020. Comparações realizadas com o ano de 2011 para esse mesmo cenário, mostraram que a tendência de maiores médias de ozônio, temperatura, COV e NO_x foram verificadas para o ano de 2011 com relação ao ano de 2050.

No quinto caso, as condições meteorológicas foram mantidas constantes para os dois anos simulados: 2020 e 2050. Sendo que para isso, as condições iniciais e de contorno foram obtidas do GFS para o ano de 2011, diferentemente dos dois casos anteriores. Como o objetivo desse caso foi avaliar o impacto da alteração das emissões futuras nas concentrações de ozônio simuladas com o WRF/Chem, os arquivos de emissão foram preparados com base em estimativas levando em conta os programas de controle de emissão já em vigência e não foram utilizados cenários climáticos futuros. Resultados espaciais mostraram um padrão semelhante entre os anos e em ambos os casos, a ocorrência de brisa marítima, responsável pela dispersão de poluentes da Região Metropolitana de São Paulo, pôde ser verificada. Com relação à diferença entre os precursores de ozônio, foi observada uma redução dos óxidos de nitrogênio, principalmente sobre a área central da Região Metropolitana de São Paulo e um aumento das concentrações de compostos orgânicos voláteis para a mesma área. Através da média calculada para todos os tempos e pontos de grade para os anos de 2011, 2020 e 2050, foi possível observar o aumento crescente das concentrações de ozônio, apesar de pequenos, de 1,75% entre 2020 e 2011 e 4% entre 2050 e 2011. Os óxidos de nitrogênio diminuíram com os anos, em 21,7% entre 2020 e 2011 e 23,7% entre 2050 e 2011. Já com relação aos compostos orgânicos voláteis houve um grande aumento das concentrações. Em 2020 o valor simulado foi superior ao dobro do valor simulado em 2011, e superior ao triplo entre os anos em 2050.

O sexto e último caso foi realizado com o intuito de analisar as concentrações de ozônio simuladas pelo modelo regional WRF/Chem a partir das projeções das mudanças climáticas do IPCC, com as condições iniciais e de contorno obtidas do modelo global CCSM3 para ambos os cenários, o SRES A2 e o SRES B1 e considerando também as estimativas de mudanças das emissões urbanas, baseadas em programas de controle para o ano de 2050. Os resultados mostram que a variação diurna de temperatura não foi bem representada para os cenários simulados e que, apesar de diferentes condições meteorológicas, principalmente com relação à radiação solar em superfície, o padrão de variação das concentrações de ozônio foi semelhante. Com relação aos valores médios calculados para todos os tempos de simulação e todos os pontos de grade para os dois cenários selecionados para esse caso, as concentrações de ozônio foram as mais altas dentre todos os casos. Verificou-se que a associação das mudanças climáticas com as estimativas para as emissões futuras levou a um aumento das concentrações do poluente. Comparações entre o ano de 2011 e 2050 para os dois cenários mostraram um aumento de 10,8% nas concentrações de ozônio para o cenário SRES B1 e de 22% para o cenário SRES A2. Já com relação aos precursores de ozônio, os compostos orgânicos voláteis apresentaram aumento em torno de 20% para o cenário SRES B1 e discreta redução, de aproximadamente 3% para o cenário SRES A2. Os óxidos de nitrogênio apresentaram para ambos os cenários a tendência de forte aumento para o ano de 2050, em torno de 15% para o SRES B1 e 85% para o SRES A2.

É importante destacar que os resultados corroboram outros estudos que mostram que os impactos das mudanças climáticas são pequenos. Contudo, a maioria dos estudos foi realizada globalmente e não regionalmente e, dessa forma a comparação não é exata. Ainda assim, Jacob e Winner (2009) apontam em seu trabalho um aumento das concentrações de ozônio na superfície de regiões poluídas entre 1 e 10 ppb para as próximas décadas, com grande efeitos em áreas urbanas. O que está de acordo com

o encontrado para o caso da Região Metropolitana de São Paulo, onde foi obtido um aumento de aproximadamente 2ppb entre os anos de 2011 e 2050, levando-se em conta o cenário SRES A2 para representar as condições meteorológicas. Outro ponto diferente dessas comparações é que os trabalhos encontrados na literatura que se basearam em cenários para estimativa futura de emissão de poluentes utilizam todas as informações referentes a esses cenários, ou seja, a estimativa não só da meteorologia, mas também valores de emissão segundo as projeções do IPCC.

Muitos pontos não foram abordados neste trabalho, os quais têm grande influência no comportamento do ozônio. Pode-se citar, como exemplo, o uso do solo e urbanização que induzem a formação de ilhas de calor e podem influenciar a produção e dispersão do ozônio. Outro aspecto importante está relacionado ao uso de diferentes combustíveis e a mudança na composição destes, alterando a razão entre os precursores de ozônio, os COV e os NO_x. A correta estimativa das emissões é uma tarefa muito difícil, pois depende de suposições de crescimento populacional, desenvolvimento econômico, ações regulatórias e de produção de energia. Também não se considerou a questão da queima de biomassa nas estimativas presente e futura de produção de ozônio, mas de qualquer forma essa participação tende a diminuir com o tempo em função das políticas de restrição às queimadas tanto para a produção de etanol (no estado de São Paulo) quanto as da floresta (Centro e Norte do Brasil).

Outro ponto muito importante na simulação de poluentes através de modelos numéricos é a necessidade de se ter dados medidos para sua representação nas condições iniciais e de contorno no modelo. Os resultados são dependentes dessas informações e, no caso do ozônio, uma boa caracterização dos compostos orgânicos voláteis e dos óxidos de nitrogênio é essencial para a boa representação do poluente. Isso é uma tarefa difícil, pois além do monitoramento em mais pontos da cidade, seria

importante representar no modelo a variação da distribuição das emissões pela grade. Atualmente, todos os pontos da grade são representados igualmente, o que não é verdade quando se observa o dia a dia da cidade. Além de ocorrer em São Paulo, restrições de tráfego por alguns horários e tipos de veículos, principalmente nas grandes vias, existe também uma movimentação diferenciada de veículos pela manhã e pela tarde. Geralmente se tem maior circulação de veículos em direção ao centro da cidade na parte da manhã e grande circulação em direção as regiões periféricas no regresso desses veículos no período da tarde/início da noite.

Para trabalhos futuros, seria importante a escolha de outros períodos para análise, em diferentes estações do ano, para que a influência meteorológica seja mais bem identificada e associada a variações tipicamente observadas. Além disso, um período maior poderia ser selecionado, principalmente para a representação das variações climáticas estimadas pelos cenários do IPCC. Através de simulações climáticas, as tendências médias podem ser mais bem representadas (quando houver disponibilidade computacional). Além disso, seria muito importante a utilização de novas versões do WRF/Chem, além de outros mecanismos químicos, que tratam diferentemente as emissões e diferentes agrupamentos de compostos orgânicos voláteis são feitos. Além disso, pode-se citar:

- O desenvolvimento de um projeto com pesquisadores da área de economia, energia e transportes para estimativas mais precisas das emissões urbanas no futuro;
- A representação do inventário de emissão com melhor resolução temporal e espacial;
- A inclusão de fontes industriais no inventário de emissões;
- A avaliação do impacto do aumento do ozônio na saúde humana;
- A utilização de cenários regionais de mudanças climáticas para avaliação das variações das concentrações de ozônio.

Este trabalho iniciou uma nova linha de pesquisa que é da avaliação de cenários futuros de qualidade do ar considerando as eventuais mudanças climáticas e mudanças no inventário de emissões de poluentes. Esses estudos são extremamente importantes para o estabelecimento de estratégias de políticas públicas. A modelagem de qualidade do ar é uma ferramenta imprescindível para a análise e entendimento dos processos que ocorrem na atmosfera, e que determinam a qualidade do ar.

Referências Bibliográficas

- ACKERMANN, I. J. ; HASS, H.; MEMMESHEIMER, M. ; EBEL, A. ; BINKOWSKI, F. S. ; SHANKAR, U. Modal aerosol dynamics model for Europe: Development and first applications, *Atmospheric environment*, 32, No.17, 2981-2999, 1998.
- AKIMOTO. H. et al. Global Air Quality and Pollution. *Science*, 302, 1716-1719. DOI:10.1126/science.1092666, 2003.
- ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A. M. G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G; VINCENT, L.; STEPHENSON, D. B; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M; VASQUEZ-AGUIRRE, J. L. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophys. Res.*, **111**, D05109, doi:10.1029/2005JD006290, 2006.
- ATKINSON, R., 2000. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. *Atmospheric Environment*, 34 (2000) 2063-2101.
- BAKLANOV, A; MAHURA, A; SOKHI, R. S, 2011. Integrated Systems of Meso Meteorological and Chemical Transport Models. Springer, XVI, 186p, 2011.
- BRIEGLEB, B. P.; BITZ, C. M.; HUNKE, E. C.; LIPSCOMB, W. H.; HOLLAND, M. M.; SCHRAMM, J. L.; MORITZ, R. E. Scientific description of the sea ice component in the Community Climate System Model, Version Three. Tech. Rep. NCAR/TN-463STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 78 pp, 2004.
- BURNETT, R. T.; DALES, R. E.; RAIZENNE, M. E.; KREWSKI, D.; SUMMERS, P. W.; ROBERTS, G. R.; RAAD-YOUNG, M.; DANN, T. BROOK, J. Effects of low ambient levels of ozone and sulfates on the frequency of respiratory admissions to Ontario hospitals, *Environ. Res.*, 65 (2), 172-194, 1994.

- BUTLER, T. M.; LAWRENCE, M. G. The influence of megacities on global atmospheric chemistry: a modeling study. *Environment Chemistry*, 6, 219-225, DOI:10.1071/EN08110, 2009.
- CARLSON, T. N. & BOLAND, F. E. Analysis of urban-rural canopy using a surface heat flux/temperature model. *J. Appl. Meteor.*, 17, 998-1013, 1978.
- CETESB, 2009. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2009, São Paulo. Série Relatórios/Secretaria do Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 340 p. (ISSN 0103-4103).
- CETESB, 2010. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2010, São Paulo. Série Relatórios/Secretaria do Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 290 p. (ISSN 0103-4103).
- CETESB, 2011. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2011, São Paulo. Série Relatórios/Secretaria do Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 234 p. (ISSN 0103-4103).
- CETESB, 2012. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2012, São Paulo. Série Relatórios/Secretaria do Estado do Meio Ambiente, São Paulo, 120 p. (ISSN 0103-4103).
- CHANG, J. S.; BINKOWSKI, F. S.; SEAMAN, N. L.; MCHENRY, J. N.; SAMSON, P. J.; STOCKWELL, W. R.; WALCEK, C. J.; MANDRONICH, S.; MIDDLETON, P. B.; LANSFORD, H. H. The regional acid deposition model and engineering model. State-of-Science/Technology, Report 4, National Acid Precipitation Assessment Program, Washington, D.C. 1989.
- COLLINS, W. D.; RASCH, P. J.; BOVILLE, B. A.; HACK, J. J.; McCAA, J. R.; WILLIAMSON, D. L.; KIEHL, J. T.; BRIEGLEB, B. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM3). Tech. Rep. NCAR/TN-464_STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 226 pp, 2004.
- COLLINS, W. D.; BITZ, C. M.; BLACKMON, M. L.; BONAN, G. B.; BRETHERTON, C. S.; CARTON, J. A.; CHANG, P.; DONEY, S. C.; HACK, J. J.; HENDERSON, T. B.;

- KIEHL, J. T.; LARGE, W. G.; MCKENNA, D. S.; SANTER, B. D.; SMITH, R. D. The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). *Journal of Climate* 19, 2122-2143, 2006.
- DENTENER, F. ; STEVENSON, D. ; ELLINGSEN, K., et al. The global atmospheric environment for the next generation. *Environ. Sci. Technol.*, 40 (11), 3586-3594, 2006. DOI: 10.1021/es0523845.
- DICKINSON, R. E.; OLESON, K. W.; BONAN, G.; HOFFMAN, F.; THORNTON, P.; VERTENSTEIN, M.; YANG, Z-L.; ZENG, X. The Community Land Model and its climate statistics as a component of the Community Climate System Model. *J. Climate*, 19, 2302-2324, 2006.
- DOMINICI, F.; PENG, R. D.; BELL, M. L.; PHAM, L.; MCDERMOTT, A.; ZEGER, S. L.; et al. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *JAMA* 295 10, 1127-1134, 2006.
- DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of Atmos. Sci.*, 46, 3077-3107, 1989.
- EK, M. B.; MITCHELL, K. E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G.; TARPLEY, J. D. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model, *Journal of Geophysical Research*, 108(D22), 8851, 2003.
- 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.
- ESTEVES, G. R. T.; BARBOSA, S. C. S.; ARAÚJO, P. D.; SILVA, E. P. Estimativa dos Efeitos da Poluição Atmosférica sobre a Saúde Humana: Algumas Possibilidades Metodológicas e Teóricas para a Cidade de São Paulo. *InterfacEHS - Revista de Gestão Integrada em Saúde do Trabalho e Meio Ambiente* 1, 1-6. 2007.

- 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. XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro. Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, p. 2913-2920, 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.; ROZOFF, C; COTTON, W. R.; SILVA DIAS, P. L. Interactions of urban heat island and sea breeze circulations during winter over the Metropolitan Area of São Paulo – Brazil. *Bound-Layer Meteorol*, 122 (1), p. 43-65, DOI:10.1007/s10546-006-9091-3, 2007.
- 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 Sao Paulo, Brazil: Coupling and validation. *Atmospheric Environment*, 39(34): 6352-6361, 2005.
- GHINI, R. Mudanças climáticas globais e doenças de plantas, *Embrapa Meio Ambiente*, 1º Edição, 2005.
- GRELL, G. A.; DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letter*, 29(14), Article 1693, 2002.
- GRELL, G. A.; EMEIS, S.; STOCKWELL, W. R.; SCHOENEMEYER, T.; FORKEL, R.; MICHALAKES, J.; KNOCHE, R.; SEIDL, W. Application of a multiscale, coupled MM5/chemistry model to the complex terrain of the VOLTALP valley campaign. *Atmospheric Environment* 34, 1435–1453, 2000.
- GRELL, G. A.; PECKHAM, S. E.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S. A.; FROST, G.; SKAMOROCK, W. C.; EDER, B. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment* 39, 6957–6975, 2005.

- GURJAR, B. R.; BUTLER, T. M.; LAWRENCE, M. G.; LELIEVELD, J. Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmospheric Environment*, 42, 1593-1606, 2008.
- GURJAR, B. R.; LELIEVELD, J. New Directions: Megacities and global change. *Atmospheric Environment*, 39, 391–393, 2005.
- IPCC, 2000. NEBOJSA NAKICENOVIC et al. Special Report on Emission Scenarios.
- ITO, K.; LEON, S. F.; LIPPMANN, M. Associations between ozone and daily mortality: analysis and meta-analysis. *Epidemiology* 16, 446-457, 2005.
- JACOB, D. J. Introduction to atmospheric chemistry, *Princeton University Press*, New Jersey, 1999.
- JACOB, D. J.; WINNER, D. A. Effect of climate change on air quality. *Atmospheric Environment*, 43, 51-63, 2009.
- KARAM, H. A. Estudo dos Jatos de Baixos Níveis de Iperó e das Implicações no Transporte de Poluentes no Estado de São Paulo. *Tese de Doutorado submetida ao Departamento de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo*. 196 pp. São Paulo, 2002.
- LAWRENCE, M. G.; BUTLER, T. M.; STEINKAMP, J; GURJAR, B. R.; LELIEVELD, J. Regional pollution potentials of megacities and other major population centers. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 3969-3987, 2007.
- LIN, Y. L.; FARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Climate Appl. Meteor.*, 22, 1065–1092, 1983.
- LIN, C., WU, Y., LAI, C., LIN, P., LAI, H., LIN, P. (2004). Experimental investigation of ozone accumulation overnight during a wintertime ozone episode in south Taiwan. *Atmospheric Environment* 38 (2004) 4267-4278.
- MANDRONICH, S. Photodissociation in the atmosphere. 1: Actinic flux and the effects of ground reflections and clouds. *Journal of Geophysical Research*, 92, 9740-9752, 1987.

- MARTINS, J. A.; MARTINS, L. D.; FREITAS, E. D.; MAZZOLI, C. R.; HALLAK, R.; ANDRADE, M. F. Aplicação de imagens de satélite no desenvolvimento de inventários de emissão de alta resolução. *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, São Paulo, 2008.
- MARTINS, L. D. Sensibilidade da formação do ozônio troposférico às emissões veiculares na Região Metropolitana de São Paulo. São Paulo, 2006, 198p. *Tese de Doutorado do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo*.
- MARTINS, L. D.; ANDRADE, M. F.; FREITAS, E. D.; PRETO, A.; GATTI, L. V.; ALBUQUERQUE, E. L.; TOMAZ, E.; GUARDANI, M. L.; MARTINS, M. H. R. B.; JUNIOR, O. M. A., 2006. Emission Factors for Gas-Powered Vehicles Traveling Through Road Tunnels in São Paulo, Brazil. *Environmental Science & Technology*, 40 (21), 6722-6729.
- MAZZOLI, C. R.; FREITAS, E. D.; MARTINS, L. D.; CARVALHO, V. S. B.; MARTINS, J. A.; ANDRADE, M. F.. Some Features of Nocturnal Ozone Maxima Occurred Over the Metropolitan Area of São Paulo-Brazil. In: *The Meeting of the Americas*, 2010, Foz do Iguaçu. *Eos Trans. AGU - Meet. Am. Suppl.* v. 91(26). p. U23A-03, 2010.
- MCKEEN, S.A., WOTAWA, G., PARRISH, D.D., HOLLOWAY, J.S., BUHR, M.P., HUBBLER, G., FEHESENFELD, F.C., MEAGHER, J.F. Ozone production from Canadian wildfires during June and July of 1995. *Journal of Geophysical Research* 107 (D14) 0.1029/2001JD000697, 2002.
- MELLOR, G. L. & YAMADA, T. Development of a turbulence closure-model for geophysical fluid problems. *Ver. Geophys.*, 20, 4, 851-875, 1982.
- MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S. J.; BROWN, P. D.; IACONO, M. J.; CLOUGH, S. A. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research* 102 (D14), 16663–16682, 1997.

- MONIN, A. S. & OBUKHOV, A. M. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci., USSR*, (151), 163–187, 1954.
- NAIR, K. N.; FREITAS, E. D.; SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; SILVA DIAS, M. A. F.; SILVA DIAS, P. L.; ANDRADE, M. F.; MASSAMBANI, O. (2004). Dynamics of urban boundary layer over São Paulo associated with mesoscale processes. DOI 10.1007/s00703-003-0617-7, *Meteorology and Atmospheric Physics* (2004).
- NAKICENOVIC, N.; ALCAMO, J.; DAVIS, G.; VRIES, B.; FENHANN, J.; GAFFIN, S.; KERMETH G.; AMULF, G.; JUNG, T. Y.; KRAM, T.; ROVERE, E. L.; MICHAELIS, L.; SHUNSUKE, M; TSUNYUKI, M.; PEPPER, W.; PITCHER, H.; PRICE, L.; RIAHI, K.; ROEHL, A.; ROGNER, H-H.; SANKOVSKI, A.; SCHLESINGER, M.; SHUKLA, P.; SMITH, S.; SWART, R.; ROOIJEN, S.; VICTOR, N.; DADI, Z. Special Report on Emission Scenarios, Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 608 pp, 2000.
- NOBRE, C. A.; YOUNG, A. F.; SALDIVA, P. H. N.; ORSINI, J. A. M.; NOBRE, A. D.; OGURA, A. T.; THOMAZ, O.; PÁRRAGA, G. O. O.; SILVA, G. C. M.; VALVERDE, M.; SILVEIRA, A. C.; RODRIGUES, G. O. Chapter 11: Vulnerability of Brazilian megacities to climate change: the São Paulo Metropolitan Region (RMSP). In MOTTA, R. S. et al. *Climate change in Brazil: economic, social and regulatory aspects*. 358p, IPEA, 2011.
- OLESON, K.; DAI, Y.; BONAN, G. B.; BOSILOVICHM, M.; DICKINSON, R.; DIRMEYER, P.; HOFFMAN, F.; HOUSER, P.; LEVIS, S.; NIU, G-Y.; THORNTON, P.; VERTENTEIN, M.; YANG, Z.-L.; ZENG, X. Technical Description of the Community Land Model (CLM). Tech. Rep. NCAR/TN-461 + STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 174 pp. 2004.
- PIELKE, R. A. *Mesoscale meteorological modeling*. Second Edition. International Geophysics Series, vol 78. Academic Press, 676 p, 2002.
- SALDIVA, P. H. N.; POPE, C. A.; SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D.W.; LICHTENFELS, A.J.; SALGE, J. M.; BARONE, I.; BOHM, G. M. Air pollution and mortality in elderly

- people: a time-series study in Sao Paulo, Brazil. *Archives Environmental Health*, vol. 50, p. 159-163, 1995.
- SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; ANDRADE, M. F. The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, 116, 257-263, 2002.
- SÁNCHEZ-CCOYLLO, O. R.; YNOUE, R. Y.; MARTINS, L. D.; ASTOLFO, R.; MIRANDA, R. M.; FREITAS, E. D.; BORGES, A. S.; FORNARO, A.; FREITAS, H.; MOREIRA, A.; ANDRADE, M. F. Vehicular particulate matter emissions in road tunnels in São Paulo, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 149, 241-249, 2008.
- SCHELL B.; ACKERMANN, I. J.; HASS, H.; BINKOWSKI, F. S.; EBEL, A. Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system, *Journal of Geophysical research*, 106, 28275-28293, 2001.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. *Atmospheric Chemistry and Physics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1998.
- SILVA DIAS, M. A. F.; DIAS, J.; CARVALHO, L. M. V.; FREITAS, E. D.; SILVA DIAS, P. L. Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil. *Climatic Change*, v. 116 (3), 705-722, 2013. DOI 10.1007/s10584-012-0504-7.
- SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; DUDA, M. D.; HUANG, X.; WANG, W.; POWERS, J.G. A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, 2008.
- SMITH, R. D.; GENT, P. R. Reference manual for the Parallel Ocean Program (POP), ocean component of the Community Climate System Model (CCSM2.0 and 3.0). Tech. Rep. LA-UR-02-2484, Los Alamos National Laboratory, [Available online at <http://www.ccsm.ucar.edu/models/ccsm3.0/pop.>], 2002.
- STOCKWELL, W.R., MIDDLETON, P., CHANG, J.S., TANG, X., 1990. The second-generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. *Journal of Geophysical Research* 95, 16343–16367.

WILKS, D. S. Statistical methods in the atmospheric sciences, *Academic Press, San Diego*, 1995. 467 p.

ZENG, G.; PYLE, J. A.; YOUNG, P. J. Impact of climate change on tropospheric ozone and its global budgets. *Atmos. Chem Phys.*, 8, 369-387, 2008.