



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.17.12.22 -TDI

**MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR EM SÃO
JOSÉ DOS CAMPOS: ANÁLISE EM DUAS REGIÕES
COM CARACTERÍSTICAS DISTINTAS DE OCUPAÇÃO
URBANA**

Fabício Kriger Ribeiro

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pela Dra. Maria Pau-
lete Pereira Martins, aprovada em
03 de maio de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E5L4SS>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.17.12.22 -TDI

**MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR EM SÃO
JOSÉ DOS CAMPOS: ANÁLISE EM DUAS REGIÕES
COM CARACTERÍSTICAS DISTINTAS DE OCUPAÇÃO
URBANA**

Fabício Kriger Ribeiro

Dissertação de Mestrado do Curso
de Pós-Graduação em Meteorolo-
gia, orientada pela Dra. Maria Pau-
lete Pereira Martins, aprovada em
03 de maio de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3E5L4SS>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Ribeiro, Fabrício Kriger.
R355m Monitoramento da qualidade do ar em São José dos Campos:
análise em duas regiões com características distintas de ocupação
urbana / Fabrício Kriger Ribeiro. – São José dos Campos : INPE,
2013.
xxiv + 140 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2013/05.17.12.22 -TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional
de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadora : Dra. Maria Paulete Pereira Martins.

1. monitoramento da qualidade do ar 2. ozônio 3. química da
atmosfera 4. ocupação urbana. I.Título.

CDU 551.510.41(815.6)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Meteorologia

Dr. Gilberto Fernando Fisch



Presidente / IAE/DCTA / SJCampos - SP

Dra. Maria Paulete Pereira Martins



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Ralf Gielow



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dra. Maria de Fátima Andrade



Convidado(a) / IAG/USP / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Fabício Kriger Ribeiro**

São José dos Campos, 03 de Maio de 2013

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro recebido por meio da bolsa de mestrado.

À Petrobras, pela possibilidade da utilização do laboratório CONSOLIDAR, adquirido pelo projeto “Implementação de um sistema de monitoramento atmosférico para o estudo dos impactos das queimadas na qualidade do ar e no clima” (Termo de cooperação científica INPE/Petrobras 00500023162064; RD 0101340/2006; SAP: 380/07).

RESUMO

A poluição atmosférica causa danos adversos aos seres vivos, sendo um problema chave da sociedade contemporânea. No que toca as regiões urbanas, a questão é ainda mais sensível pela alta exposição da população aos poluentes, número elevado de veículos em circulação, condições meteorológicas específicas desfavoráveis à dispersão de poluentes, entre outros. Esse estudo visou medir com o laboratório CONSOLIDAR as concentrações dos poluentes monóxido de carbono, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, ozônio e materiais particulados no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em São José dos Campos (SP) e analisar o comportamento dos poluentes durante o período de monitoramento. Dados da estação de monitoramento da qualidade do ar da CETESB situada no Jardim Paulista, região central da cidade, também foram analisados e foi possível realizar uma comparação entre as duas regiões. A região do INPE, caracterizada pela presença considerável de vegetação e maior distância de circulação de automóveis apresentou, em média, concentrações menores do que na região da CETESB, caracterizada pela pavimentação com asfalto e ao lado da circulação de automóveis. As exceções foram o CO e o O₃, os quais apresentaram concentrações maiores na região do INPE. Para explicar tal comportamento uma hipótese em relação à oxidação do NO a partir do acúmulo de CO foi formulada. Em relação à dispersão dos poluentes, foi constatado que episódios de vento moderados constantes por longos períodos de tempo foram mais eficientes do que rajadas para diminuir a concentração dos poluentes. A presença de precipitação somente foi eficiente apenas para diminuir a concentração dos materiais particulados. A região pavimentada apresentou temperaturas muito superiores às apresentadas na região com vegetação. Conclui-se desse estudo que a forma de ocupação urbana vigente de priorizar a pavimentação de ruas para a circulação de automóveis compromete a qualidade do ar e conforto térmico da região. A partir dos resultados das comparações realizadas no estudo, é de se esperar que uma ocupação urbana que harmonize presença de vegetação; meios de locomoção alternativos que não envolvam alta emissão de poluentes; e vias exclusivas para automóveis, afastados da circulação de pedestres e habitações; contribua para um melhor cenário no que toca a qualidade do ar e conforto térmico da cidade.

AIR QUALITY MONITORING IN SÃO JOSÉ DOS CAMPOS: ANALYSIS IN TWO REGIONS WITH DISTINCTIVE CHARACTERISTICS OF URBAN OCCUPANCY

ABSTRACT

Atmospheric pollution harms adversely the living creatures, being a key problem of the contemporary society. In the urbanized regions the matter is even more sensitive due to the high exposure of the population to pollutants, high number of vehicles in circulation, specific meteorological conditions unfavorable to pollutant dispersion, and others. This study aimed to measure with the CONSOLIDAR laboratory the concentration of the pollutants such as carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen oxides, ozone and particulate matter at the National Institute of Space Research (INPE) in São José dos Campos (SP – Brazil) and to analyze the pollutants behavior during the monitoring period. Data from the air quality monitoring station of CETESB located in Jardim Paulista, central region of the city, was also analyzed so the comparison between the two regions could be carried out. The INPE region, which is characterized by the substantial presence of vegetation and greater distance from the vehicle circulation, had on average smaller concentrations than in the CETESB region, characterized by asphalt pavement and proximity to the vehicle circulation. The exceptions were CO e O₃, which had bigger concentration at INPE region. To explain that behavior a hypothesis linked to the oxidation of NO induced by CO accumulation was formulated. On pollutant dispersion events, it was verified that episodes where wind flowed with moderate velocity but constant for long periods of time were more efficient than bursts to decrease the pollutants concentrations. The presence of precipitation only was efficient to decrease just the particulate matter concentrations. The paved region showed much higher temperatures than the vegetated region. This study concludes that the current way of urban occupancy, that prioritizes the paving of streets for vehicles circulation, hazards the air quality and thermal comfort of the region. From the results of the comparisons performed in this study, it's expected that an urban occupancy harmonizing presence of vegetation, alternative means of transportation with no high pollutants emission, and exclusive lanes for cars, away from pedestrian circulation and housing; contribute to a better scenario concerning air quality and thermal comfort of the city.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Figura 2.1: Localização da maiores indústrias de São José dos Campos..... | 17 |
| Figura 2.2: Vista aérea da região onde está instalado o laboratório CONSOLIDAR..... | 21 |
| Figura 2.3: Análise de frequência anual da concentração de O ₃ | 22 |
| Figura 3.1: Localização da CETESB e do CONSOLIDAR..... | 27 |
| Figura 3.2: Vista da rua da estação da CETESB..... | 28 |
| Figura 4.1. Comparação entre temperatura média, máxima e mínima mensal medida e climatológica..... | 32 |
| Figura 4.2. Comparação entre precipitação acumulada mensal medida e climatológica; e número de dias com chuva mensal medido e climatológico.... | 32 |
| Figura 4.3. Legenda da escala de cores utilizada nas imagens de satélite realçadas..... | 35 |
| Figura 4.4: Perfil da semana 1 do NO _x e O ₃ | 36 |
| Figura 4.5: Imagem de satélite do dia 19 de setembro..... | 37 |
| Figura 4.6: Perfil da semana 2 do CO..... | 38 |
| Figura 4.7: Perfil da semana 2 do NO _x | 38 |
| Figura 4.8: Perfil da semana 2 do O ₃ | 39 |
| Figura 4.9: Imagem de satélite do dia 25 de setembro..... | 40 |
| Figura 4.10: Perfil da semana 3 do CO..... | 41 |
| Figura 4.11: Perfil da semana 3 do NO _x | 41 |
| Figura 4.12: Perfil da semana 3 do O ₃ | 42 |
| Figura 4.13: Perfil da semana 3 do MP10..... | 42 |
| Figura 4.14: Imagem de satélite do dia 10 de outubro..... | 43 |
| Figura 4.15: Perfil da semana 5 do CO..... | 44 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.16: Perfil da semana 5 do NO _x | 44 |
| Figura 4.17: Perfil da semana 5 do O ₃ | 45 |
| Figura 4.18: Perfil da semana 5 do MP10..... | 45 |
| Figura 4.19: Imagem de satélite do dia 24 de outubro..... | 47 |
| Figura 4.20: Perfil da semana 7 do NO _x | 48 |
| Figura 4.21: Perfil da semana 8 do CO..... | 49 |
| Figura 4.22: Perfil da semana 8 do NO _x | 49 |
| Figura 4.23: Perfil da semana 8 do O ₃ | 50 |
| Figura 4.24: Perfil da semana 8 do SO ₂ | 50 |
| Figura 4.25: Perfil da semana 8 do MP10 e MP2,5..... | 51 |
| Figura 4.26: Imagem de satélite do dia 9 de novembro..... | 52 |
| Figura 4.27: Perfil da semana 9 do MP10 e MP2,5..... | 53 |
| Figura 4.28: Imagem de satélite do dia 12 de novembro..... | 54 |
| Figura 4.29: Perfil da semana 10 do O ₃ e NO _x | 55 |
| Figura 4.30: Perfil da semana 10 do CO..... | 55 |
| Figura 4.31: Perfil da semana 10 do SO ₂ | 56 |
| Figura 4.32: Perfil da semana 10 do MP10 e MP2,5..... | 56 |
| Figura 4.33: Imagem de satélite do dia 19 de novembro..... | 57 |
| Figura 4.34: Foto do banhado no dia 23 de novembro..... | 58 |
| Figura 4.35: Imagem de satélite do dia 30 de novembro..... | 59 |
| Figura 4.36: Perfil da semana 13 da temperatura..... | 60 |
| Figura 4.37: Perfil da semana 13 do O ₃ e NO _x | 61 |
| Figura 4.38: Perfil da semana 13 do MP10 e MP2,5..... | 61 |
| Figura 4.39: Imagem de satélite do dia 15 de dezembro..... | 63 |
| Figura 4.40: Perfil da semana 14 do MP10 e MP2,5..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.41: Imagem de satélite do dia 1 de janeiro..... | 65 |
| Figura 4.42: Perfil da semana 17 do O ₃ e NO _x | 66 |
| Figura 4.43: Perfil da semana 17 do MP10 e MP2,5..... | 66 |
| Figura 4.44: Médias semanais e finais de semana do CO..... | 70 |
| Figura 4.45: Médias semanais e finais de semana do NO..... | 71 |
| Figura 4.46: Médias semanais e finais de semana do NO ₂ | 72 |
| Figura 4.47: Médias semanais e finais de semana do SO ₂ | 73 |
| Figura 4.48: Médias semanais e finais de semana do O ₃ | 74 |
| Figura 4.49: Médias semanais e finais de semana do MP10..... | 75 |
| Figura 4.50: Médias semanais e finais de semana do MP2,5..... | 76 |
| Figura 4.51: Ciclo diurno do O ₃ | 77 |
| Figura 4.52: Ciclo diurno do CO..... | 78 |
| Figura 4.53: Ciclo diurno dos NO _x | 79 |
| Figura 4.54: Ciclo diurno do SO ₂ | 80 |
| Figura 4.55: Ciclo diurno do MP10 e MP2,5..... | 81 |
| Figura 4.56: Ciclo diurno da temperatura e umidade..... | 81 |
| Figura 4.57: Rosa dos ventos..... | 84 |
| Figura 4.58: Topografia do Vale do Rio Paraíba do Sul..... | 85 |
| Figura 4.59: Distribuição percentual da direção do vento..... | 85 |
| Figura 4.60: Distribuição percentual da categoria de velocidade do vento..... | 86 |
| Figura 4.61: Vista aérea da região da estação da CETESB..... | 87 |
| Figura 4.62: Comparação CONSOLIDAR x CETESB do O ₃ | 88 |
| Figura 4.63: Ciclos de formação e consumo do O ₃ | 89 |
| Figura 4.64: Comparação CONSOLIDAR x CETESB do NO _x | 90 |
| Figura 4.65: Comparação CONSOLIDAR x CETESB do CO..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.66: Fluxograma efeito de acúmulo de O ₃ pela oxidação do CO..... | 93 |
| Figura 4.67: Comparação CONSOLIDAR x CETESB do SO ₂ | 94 |
| Figura 4.68: Comparação CONSOLIDAR x CETESB do MP10..... | 95 |
| Figura 4.69: Comparação CONSOLIDAR x CETESB da temperatura..... | 96 |
| Figura 4.70: Comparação de temperatura nos dias 30 e 31 de outubro..... | 97 |
| Figura 4.71: Comparação de temperatura no dia 7 de novembro..... | 98 |
| Figura 4.72: Comparação de temperatura no dia 13 de dezembro..... | 98 |
| Figura 4.73: Comparação CONSOLIDAR x CETESB da vel. do vento..... | 100 |
| Figura 4.74: Variação entre dias úteis e finais de semana para O ₃ e NO _x | 103 |
| Figura 4.75: Variação entre dias úteis e finais de semana para CO, SO ₂ e MP10..... | 104 |
| Figura 4.76: Médias horárias da concentração do O ₃ no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento..... | 107 |
| Figura 4.77: Médias horárias da concentração do O ₃ na CETESB para todo o período de monitoramento..... | 108 |
| Figura 4.78: Médias horárias da concentração do SO ₂ no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento..... | 110 |
| Figura 4.79: Médias horárias da concentração do SO ₂ na CETESB para todo o período de monitoramento..... | 110 |
| Figura 4.80: Médias horárias da concentração do MP10 no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento..... | 111 |
| Figura 4.81: Médias horárias da concentração do MP10 na CETESB para todo o período de monitoramento..... | 112 |
| Figura 4.82: Médias horárias da concentração do CO no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento..... | 115 |
| Figura 4.83: Médias horárias da concentração do CO na CETESB para todo o período de monitoramento..... | 115 |
| Figura 4.84: Médias horárias da concentração do NO ₂ no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento..... | 116 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.85: Médias horárias da concentração do NO ₂ na CETESB para todo o período de monitoramento..... | 116 |
| Figura A.1: Precipitação acumulada por dia em setembro/12..... | 133 |
| Figura A.2: Média diária da velocidade do vento para setembro/12..... | 133 |
| Figura A.3: Média diária da temperatura para setembro/12..... | 134 |
| Figura A.4: Média diária da umidade relativa para setembro/12..... | 134 |
| Figura A.5: Precipitação acumulada por dia em outubro/12..... | 135 |
| Figura A.6: Média diária da velocidade do vento para outubro /12..... | 135 |
| Figura A.7: Média diária da temperatura para outubro /12..... | 136 |
| Figura A.8: Média diária da umidade relativa para outubro /12..... | 136 |
| Figura A.9: Precipitação acumulada por dia em novembro/12..... | 137 |
| Figura A.10: Média diária da velocidade do vento para novembro /12..... | 137 |
| Figura A.11: Média diária da temperatura para novembro /12..... | 138 |
| Figura A.12: Média diária da umidade relativa para novembro /12..... | 138 |
| Figura A.13: Precipitação acumulada por dia em dezembro/12..... | 139 |
| Figura A.14: Média diária da velocidade do vento para dezembro /12..... | 139 |
| Figura A.15: Média diária da temperatura para dezembro /12..... | 140 |
| Figura A.16: Média diária da umidade relativa para dezembro /12..... | 140 |

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Tabela 2.1: Concentrações máximas de poluentes segundo a OMC..... | 9 |
| Tabela 2.2: Padrões estaduais de qualidade..... | 10 |
| Tabela 2.3: Estimativa de emissão por poluente e fontes de emissão para São José dos Campos nos anos 2010 a 2012..... | 18 |
| Tabela 2.4: Estimativa de emissão por fontes móveis em São José dos Campos no ano de 2009..... | 18 |
| Tabela 2.5: Estimativa de emissão por indústrias em São José dos Campos no ano de 2009..... | 19 |
| Tabela 4.1: Concentração média, máxima e mínima, com desvio padrão e número de medidas por poluente..... | 34 |
| Tabela 4.2: Período de cada semana do monitoramento..... | 67 |
| Tabela 4.3: Média total, dias úteis e finais de semana..... | 69 |
| Tabela 4.4: Índices de correlação entre concentração dos poluentes e parâmetros meteorológicos..... | 82 |
| Tabela 4.5: Porcentagens de medições válidas em que a medida do CONSOLIDAR foi superior à medida da CETESB..... | 87 |
| Tabela 4.6: Diferença de temperatura entre CETESB e CONSOLIDAR..... | 99 |
| Tabela 4.7: Média total, somente dias úteis e somente fins de semana para os dados da CETESB..... | 101 |
| Tabela 4.8: Comparação na variação dias úteis / fim de semana..... | 101 |
| Tabela 4.9: Número de ocorrência de altas concentrações do O ₃ | 106 |
| Tabela 4.10: Número de ultrapassagens dos padrões de qualidade para o O ₃ | 108 |
| Tabela 4.11: Dias com pelo menos uma média móvel do O ₃ superior a 100 µg/m ³ | 109 |
| Tabela 4.12: Número de ultrapassagens dos padrões de qualidade para o MP10..... | 112 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.13: Dias com pelo menos uma média móvel do MP10 superior a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | 113 |
|---|-----|

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

| | |
|-------------------------------|--|
| C ₅ H ₈ | Isopreno |
| CETESB | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| CH ₄ | Metano |
| CO | Monóxido de carbono |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| CONAMA | Conselho Nacional de Meio Ambiente |
| COV | Compostos orgânicos voláteis |
| EPA | Environmental Protection Agency |
| EPI | Environmental Performance Index |
| H ₂ S | Sulfeto de hidrogênio |
| IBAMA | Instituto Brasileiro de Meio Ambiente |
| INPE | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais |
| N ₂ | Nitrogênio |
| NO | Óxido de nitrogênio |
| NO ₂ | Dióxido de nitrogênio |
| NO ₂ [*] | Dióxido de nitrogênio excitado |
| NO _x | Óxidos de nitrogênio |
| O ₂ | Oxigênio |
| O ₃ | Ozônio |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |
| PM ₁₀ | Material particulado menor que 10 µm |
| PM _{2,5} | Material particulado menor que 2,5 µm |
| REVAP | Refinaria do Vale do Paraíba - PETROBRAS |
| SO ₂ | Dióxido de enxofre |

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivo..... | 2 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 3 |
| 2.1 Poluição Atmosférica..... | 3 |
| 2.1.1 Material Particulado..... | 3 |
| 2.1.2 Dióxido de Enxofre..... | 4 |
| 2.1.3 Monóxido de Carbono..... | 5 |
| 2.1.4 Ozônio..... | 6 |
| 2.1.5 Óxidos de Nitrogênio..... | 7 |
| 2.1.6 Hidrocarbonetos..... | 8 |
| 2.2 Padrões de qualidade do ar..... | 9 |
| 2.3 Monitoramento do ar..... | 11 |
| 2.4 Dispersão de poluentes..... | 14 |
| 2.5 Área de estudo..... | 15 |
| 2.5.1 São José dos Campos..... | 15 |
| 2.5.2 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais..... | 20 |
| 2.6 Estação da CETESB..... | 21 |
| 3. METODOLOGIA..... | 23 |

| | |
|---|-----------|
| 3.1 Descrição do laboratório CONSOLIDAR..... | 23 |
| 3.1.1 Analisador de ozônio..... | 24 |
| 3.1.2 Analisador de monóxido de carbono..... | 24 |
| 3.1.3 Analisador de óxidos de nitrogênio..... | 25 |
| 3.1.4 Analisador de dióxido de enxofre..... | 26 |
| 3.1.5 Monitor de material particulado MP ₁₀ | 26 |
| 3.1.6 Monitor de material particulado MP _{2,5} | 27 |
| 3.2 Dados da CETESB..... | 27 |
| 3.3 Tratamento dos dados..... | 28 |
| 3.4 Eixos principais do estudo..... | 29 |
| 4. RESULTADOS..... | 31 |
| 4.1 Período de monitoramento em relação à climatologia local..... | 31 |
| 4.2 Análise do comportamento geral dos poluentes..... | 33 |
| 4.2.1 Fenômenos atmosféricos de escala sinótica..... | 34 |
| 4.2.1.1 Setembro..... | 35 |
| 4.2.1.2 Outubro..... | 43 |
| 4.2.1.3 Novembro..... | 48 |
| 4.2.1.4 Dezembro..... | 59 |
| 4.2.1.5 Janeiro..... | 64 |
| 4.2.2 Médias semanais e variações dias úteis / fim de semana..... | 67 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.3 Comportamento dos gases no ciclo diurno..... | 76 |
| 4.2.4 Correlação com parâmetros meteorológicos..... | 82 |
| 4.2.5 Análise do vento..... | 83 |
| 4.3 Comparação entre dados do CONSOLIDAR e da CETESB..... | 86 |
| 4.3.1 Comportamento médio..... | 87 |
| 4.3.2 Variação dias úteis / fim de semana..... | 100 |
| 4.3.3 Ultrapassagens do padrão..... | 106 |
| 4.3.3.1 Ozônio..... | 106 |
| 4.3.3.2 Dióxido de Enxofre..... | 109 |
| 4.3.3.3 MP10..... | 111 |
| 4.3.3.4 Monóxido de Carbono e Dióxido de Nitrogênio..... | 113 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 117 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 123 |
| Apêndice A..... | 131 |
| Anexo A..... | 133 |

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica em centros urbanos provém de diversas fontes, destacando-se os motores de combustão interna de automóveis e demais dispositivos. A qualidade do ar urbano tem papel crucial no que se refere à saúde pública, induzindo diversos tipos de patologias à população. Existe, portanto, um interesse social em reverter esse quadro, tanto com alternativas energéticas limpas para a alimentação dos automóveis como maneiras de ocupação e mobilidade urbana que diminuam a exposição de pessoas à gases danosos à saúde.

Um dos fatores que amenizam esse cenário é a presença de vegetação na cidade, que absorvem certos poluentes e diminuem a temperatura do ar através da transpiração (NOWAK et al., 2006). No entanto a emissão de compostos orgânicos voláteis pelas plantas pode aumentar a concentração de ozônio através de reações fotoquímicas (CHAMEIDES et al., 1988), fornecendo uma contra argumentação que merece ser investigada, já que sobre diferentes condições de temperatura os mesmos compostos podem ao invés disso diminuir a concentração de ozônio (JACOB, 1988).

Um estudo realizado por Silva Júnior et al. (2008) na cidade de São Paulo constatou que uma alta concentração de ozônio no parque do Ibirapuera, região com presença significativa de vegetação, foi mais frequente que na região de Pinheiros, região altamente asfaltada e com poucas plantas espalhadas.

A concentração de diferentes gases poluentes é afetada por diversos fatores tanto atmosféricos como antropogênicos, formando um sistema complexo altamente dependente de condições locais. Assim é interessante investigar em localidades diferentes que possuam condições e peculiaridades próprias comportamentos da resposta da qualidade do ar à presença de vegetação no intuito de determinar diferentes mecanismos que afetam no quadro geral.

A resposta inversa, ou seja, o efeito dos gases poluentes na vegetação também já é alvo de pesquisas. Em geral a interação é negativa para as plantas, sendo que gases como dióxido de enxofre podem diminuir a atividade de fotossíntese e transpiração e o dióxido de nitrogênio suprimir o crescimento da planta (CETESB, 2012 a).

São José dos Campos é um centro urbano com alto potencial de apresentar poluição atmosférica por possuir um grande parque industrial, extensa frota de veículos e situar-se num vale, cujas condições meteorológicas não são favoráveis à dispersão dos poluentes. Além disso, duas grandes rodovias cruzam a cidade trazendo alta circulação de veículos por todo o dia: a rodovia Presidente Dutra, principal ligação entre São Paulo e Rio de Janeiro, atravessando a cidade ao meio; e a rodovia Carvalho Pinto, na zonal sul da cidade.

1.1 OBJETIVO

Este estudo teve como objetivo principal analisar o comportamento dos poluentes regulamentados ozônio, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre e materiais particulados, a partir dos dados de concentração obtidos com o laboratório CONSOLIDAR situado no campus do INPE em São José dos Campos. Como objetivo complementar, a análise dos poluentes também na região central da cidade a partir dos dados da estação de monitoramento da qualidade do ar da CETESB, situada no bairro Jardim Paulista, e assim possibilitando uma comparação entre as duas regiões no comportamento dos poluentes, e como as características distintas de ocupação do espaço influenciaram em suas concentrações.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Poluição atmosférica

Considera-se poluente qualquer substância presente no ar e que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando inconveniente ao bem estar público, danos aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade. O nível de poluição atmosférica é medido pela quantidade de poluentes presentes no ar. A variedade das substâncias que podem ser encontradas na atmosfera é muito grande, o que torna difícil a tarefa de estabelecer uma classificação. Para facilitar esta classificação, os poluentes são divididos entre primários (aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão) e secundários (aqueles formados na atmosfera através de reações químicas entre poluentes primários e componentes naturais da atmosfera) (CETESB, 2012 b). A seguir serão descritos os principais poluentes regulamentados pela legislação.

2.1.1 Material particulado

Sob a denominação geral de Material Particulado se encontra um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. As principais fontes de emissão de material particulado para a atmosfera são: veículos automotores, processos industriais, queima de biomassa, ressuspensão de poeira do solo, entre outros. O material particulado pode também se formar na atmosfera a partir de gases como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs), que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar (CETESB, 2012 b).

O tamanho das partículas está diretamente associado ao seu potencial para causar problemas à saúde, sendo que quanto menores maiores os efeitos

provocados. Para partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 10 μm dá-se a denominação de partículas inaláveis. Podendo ainda ser divididas entre partículas inaláveis grossas (2,5 μm a 10 μm), identificadas como PM_{10} , e partículas inaláveis finas (menores que 2,5 μm), identificadas como $\text{PM}_{2,5}$. As finas apresentam maior risco à saúde por poder atingir os alvéolos pulmonares, enquanto que as grossas ficam retidas na parte superior do sistema respiratório (CETESB, 2012 b).

Segundo a OMS não foram identificados valores de concentração para materiais particulados abaixo dos quais não há danos a saúde observados, de forma que o valor padrão de concentração que é prescrito como limite pela OMS representa um valor aceitável e alcançável para que haja minimização dos efeitos à saúde no contexto das capacidades e prioridades de saúde pública. A tabela 2.1 mostra o valor da concentração máxima recomendado pela OMS para todos os poluentes abordados neste trabalho (World Health Organization, 2011).

2.1.2 Dióxido de enxofre

As principais fontes de dióxido de enxofre (SO_2) num ambiente urbano são as atividades de queima de combustíveis fósseis estacionárias, particularmente indústrias e usinas de energia que queimam óleo combustível e carvão. A alta emissão de dióxido de enxofre foi uma das características responsáveis pelos episódios de extrema poluição atmosférica que ocorreram em Nova Iorque, Londres e outras grandes cidades do mundo na década de 50 e começo da década de 60 (BRIDGMAN, 1990).

Aproximadamente metade do dióxido de enxofre global provém da oxidação do sulfeto de hidrogênio (H_2S) (OECD, 1985). A maior fonte natural de SO_2 são as erupções vulcânicas, que no entanto são esporádicas e não chegam perto da emissão anual antropogênica (BRIDGMAN, 1990).

O SO_2 no contexto urbano aumenta a chance de prevalência de doenças respiratórias crônicas e também o risco de doenças respiratórias agudas.

Admissões hospitalares por conta de doenças cardíacas e mortalidade aumentam em dias com altos níveis de SO_2 (WHO, 2011). Em plantas o SO_2 entra através dos estômatos competindo com o CO_2 e, indo ao mesófilo, reage com a água formando o íon sulfito. Quando em excesso o íon acumula-se nas folhas sendo tóxico para as células mesofílicas. Os efeitos no metabolismo são a depressão da fotossíntese, transpiração e respiração, sendo as folhas adultas as mais sensíveis (CETESB, 2012 a).

2.1.3 Monóxido de carbono

Uma importante fonte natural de monóxido de carbono provém de reações fotoquímicas na formação de metano (CH_4), além da oxidação de outros hidrocarbonetos emitidos pela vegetação. Como fontes antropogênicas, as maiores são a queima de combustíveis fósseis e biomassa (BRIDGMAN, 1990).

O monóxido de carbono no sistema respiratório causa uma grande perturbação. Numa interação normal entre os sistemas respiratório e circulatório, oxigênio (O_2) é transportado dentro do corpo para oxidações bioquímicas enquanto que o dióxido de carbono (CO_2), um produto, é removido. A hemoglobina desempenha então um importante papel em ambos processos. Ela se associa ao O_2 e ao CO_2 para transportá-los entre o pulmão e as células. A estabilidade das associações hemoglobina- O_2 e hemoglobina- CO_2 é forte o bastante para transportar esses gases pelo sistema circulatório mas fraco para permitir o desligamento do CO_2 no pulmão e do O_2 nas células onde é necessário. O CO interfere nessa interação formando um complexo muito mais estável com a hemoglobina. Esse processo diminui a quantidade de hemoglobinas disponíveis para manter o transporte necessário de O_2 e CO_2 e tem consequências diversas no sistema cardiovascular e diminuição de resistência física (STERN et al., 1984).

2.1.4 Ozônio

O ozônio cumpre um papel dual em sua relação com a vida. Enquanto na estratosfera é responsável pela proteção de toda a biosfera por sua alta capacidade de absorver raios ultravioletas, na troposfera a sua presença é tóxica à vida.

Há na troposfera um ciclo fotoquímico formado pelo O_3 , NO e NO_2 sem formação e destruição significativa de nenhum dos componentes. O ciclo pode ser visualizado com as seguintes equações:



Onde $h\nu$ é a radiação solar e M um terceiro corpo molecular (principalmente N_2 e O_2). A equação 2.1 mostra a dissociação fotoquímica do NO_2 . A equação 2.2 a formação do ozônio pela combinação do O com O_2 . A equação 2.3 mostra a oxidação do NO pelo O_3 que dá forma ao NO_2 e O_2 . Essas três reações formam um caminho cíclico dirigido pela radiação solar. Embora o fluxo de radiação mude de acordo com a rotação da Terra pode-se considerar que em curtos períodos de tempo (~10 min) ele se mantém constante. Utilizando-se dessa consideração, além de assumir que o ciclo atinge um estado de equilíbrio, ou seja, não ocorre mudança nas concentrações, pode-se escrever a concentração do O_3 como:

$$[O_3] = k_1[NO_2]/k_2[NO] \quad (2.4)$$

A Equação 2.4 é chamada de expressão de equilíbrio foto estacionário para o ozônio, onde k_1 e k_2 são funções do tempo de um dado dia. De forma que sob inspeção nota-se que a concentração de O_3 é dependente da razão NO_2/NO para qualquer valor de k_1 e k_2 . No entanto é observado que, sem a presença de outros oxidantes, o NO não é convertido em NO_2 de maneira suficientemente

eficiente para justificar o acúmulo de O_3 como observado em áreas urbanas. Para que haja acúmulo de O_3 outros oxidantes devem participar da oxidação do NO para o NO_2 . Entre os outros oxidantes presentes na atmosfera estão os radicais livres. Radicais livres são derivados da participação de hidrocarbonetos em reações químicas atmosféricas (STERN et al., 1984).

Entre os danos causados a humanos pode-se citar a diminuição de funções pulmonares, tosse, desconforto no tórax e aumento de ataque de asma, com sintomas secundários de dores de cabeça, diminuição de pressão sanguínea, fadiga extrema, entre outros (STERN et al., 1984). Há aumento em admissões hospitalares por doenças respiratórias em períodos de exposição à concentrações características de verão (BURNETT et al., 2000). Em plantas o O_3 penetra nos espaços intercelulares e reage com compostos bioquímicos da parede celular e da membrana plasmática, desencadeando a formação de lesões necróticas foliares em casos de exposição aguda ou a senescência acelerada em casos de exposição crônica ao poluente. Em nível celular, segundo o conceito de interação célula-célula dentro da folha, a morte da célula conduz, rapidamente, a morte de muitas células vizinhas (efeito amplificado). Tal fato deve-se ao desbalanço ion-água. O rombo produzido pelo ozônio em uma célula, com perda de água e de pressão, pode "sugar" a água das células vizinhas, através do plasmodesmo, causando injúrias em efeito cascata (CETESB, 2012 a).

2.1.5 Óxidos de nitrogênio

Designam-se comumente como NO_x os óxidos NO e NO_2 . Dos dois gases, o de maior emissão primária é o NO que, no entanto, se oxida rapidamente dando origem ao NO_2 , o mais comum dentre eles na atmosfera. Esses gases têm suma importância na formação do ozônio, tanto na troposfera quanto na estratosfera (BRIDGMAN, 1990). Como não há emissão antropogênica primária em grande escala do O_3 , pode-se relacionar as emissões de NO_x indiretamente com a presença de O_3 em áreas urbanas. Estima-se que 60% do NO_x provém de queima de combustíveis fósseis e de biomassa. Fontes naturais incluem liberação do gás pelo solo e dissociação termal do N_2 por

raios, que aquecem rapidamente o ar à sua volta (BRIDGMAN, 1990). Entre os malefícios causados à saúde está o aumento da suscetibilidade a doenças respiratórias, podendo causar morte rápida em altas concentrações (150-300 ppm). Nas plantas os NO_x causam injúrias foliares e supressão do crescimento da planta inclusive em concentrações baixas (0,25 ppm) (STERN et al, 1984).

2.1.6 Hidrocarbonetos

Hidrocarbonetos são moléculas formadas por átomos de hidrogênio e carbono. O mais abundante e importante hidrocarboneto é também o de mais simples estrutura química, o metano (CH_4). Ele é liberado na atmosfera pela atividade de metabolismos anaeróbicos e processos de decaimento na superfície da Terra, além da liberação pelas plantas, como parte de sua interação com o ambiente. Fontes antropogênicas incluem os processos que envolvem petróleo e seus derivados e demais produtos orgânicos voláteis (CETESB, 2012 b). Denominam-se hidrocarbonetos não-metano todos os outros hidrocarbonetos mais complexos. Sua presença é fundamental na formação do ozônio. Diversos hidrocarbonetos como o benzeno são cancerígenos e mutagênicos, não havendo uma concentração ambiente totalmente segura (CETESB, 2012 b).

Segundo a EPA denominam-se compostos orgânicos voláteis (COV) quaisquer compostos químicos de carbono que participam de reações fotoquímicas, excluindo o monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido carbônico, carbonatos e carbeto metálicos e carbonato de amônio. Podendo-se classificar portanto uma grande gama de hidrocarbonetos como COV, que são em sua maioria produzidos pelas plantas, sendo o mais comum o isopreno (C_5H_8), e desempenham um papel importante na comunicação entre elas, sendo emitidos quando percebem a presença de herbívoros, entre outras situações (SUTHERLAND, 2010).

Na Tabela 2.1, visualizam-se os valores de concentração máxima recomendado pela OMS para todos os poluentes, com exceção dos hidrocarbonetos, já que nas publicações da OMS eles não são agrupados e o valor padrão é dado para cada substância separada.

Tabela 2.1 – Valor da concentração máxima dos poluentes recomendado pela OMS

| Poluente | Tempo de amostragem | Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|--|---------------------|---|
| MP ₁₀ | Anual | 20 |
| | 24 horas | 50 |
| MP _{2,5} | Anual | 10 |
| | 24 horas | 25 |
| Dióxido de enxofre (SO ₂) | 24 horas | 20 |
| | 10 minutos | 500 |
| Monóxido de carbono (CO) | 8 horas | 10.000 (9 ppm) |
| | 1 hora | 30.000 (26 ppm) |
| | 20 minutos | 60.000 (52 ppm) |
| | 15 minutos | 100.000 (87 ppm) |
| Ozônio (O ₃) | 8 horas | 100 |
| Dióxido de nitrogênio (NO ₂) | Anual | 40 |
| | 1 hora | 200 |

Fonte: World Health Organization (2011).

2.2 Padrões de qualidade do ar

Os padrões de qualidade do ar definem legalmente o limite máximo para a concentração de um poluente na atmosfera, que garanta a proteção da saúde e do meio ambiente. Os padrões de qualidade do ar são baseados em estudos científicos dos efeitos produzidos por poluentes específicos e são fixados em níveis que possam propiciar uma margem de segurança adequada. Os padrões nacionais foram estabelecidos pelo IBAMA - Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e aprovados pelo CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente, por meio da Resolução CONAMA 03/90.

Em 2008 o Estado de São Paulo iniciou um processo de revisão dos padrões da qualidade do ar, baseando-se nas diretrizes propostas pela OMS. Este processo culminou na publicação de um decreto estadual em 2013 (ALESP, 2013) que atualiza os padrões a partir de um conjunto de metas gradativas e progressivas que visam diminuir a poluição atmosférica ao longo do tempo. O

decreto cria então três metas intermediárias e posteriormente o padrão final, que se equaliza com os padrões sugeridos pela OMS. Os poluentes regulamentados são os seguintes: partículas inaláveis (MP10), partículas inaláveis finas (MP2,5), dióxido de enxofre, ozônio, monóxido de carbono, fumaça, partículas totais em suspensão e chumbo. O padrão estadual de qualidade do ar é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Padrões estaduais de qualidade do ar em São Paulo (Decreto Estadual n° 59113 de 23/04/2013)

| Poluente | Tempo de Amostragem | MI1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | MI2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | MI3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) |
|---------------------------------------|----------------------------|--|--|--|---|
| Partículas inaláveis (MP10) | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 20 |
| | MAA ¹ | 40 | 35 | 30 | 50 |
| Partículas inaláveis finas (MP2,5) | 24 horas | 60 | 50 | 37 | 25 |
| | MAA ¹ | 20 | 17 | 15 | 10 |
| Dióxido de enxofre (SO ₂) | 24 horas | 60 | 40 | 30 | 20 |
| | MAA ¹ | 40 | 30 | 20 | - |
| Ozônio (O ₃) | 8 horas | 140 | 130 | 120 | 100 |
| Monóxido de carbono (CO) | 8 horas | - | - | - | 9 ppm |
| Fumaça* (FMC) | 24 horas | 120 | 100 | 75 | 50 |
| | MAA ¹ | 40 | 35 | 30 | 20 |
| Partículas totais em suspensão* | 24 horas | - | - | - | 240 |
| | MGA ² | - | - | - | 80 |
| Chumbo** (Pb) | MAA ¹ | - | - | - | 0,5 |

1 - Média aritmética anual. 2 - Média geométrica anual. * - Parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da CETESB. ** - a ser monitorado apenas em áreas específicas, a critério da CETESB. MI – Meta Intermediária. PF – Padrão Final.

Fonte: CETESB (2013).

Na primeira fase os padrões vigentes são os da meta intermediária etapa 1, válidos a partir de 24/04/2013, sendo que para os poluentes monóxido de carbono, partículas totais em suspensão e chumbo não foram estabelecidas metas intermediárias e já valem para eles os padrões finais. Cabe ao Conselho Estadual do Meio Ambiente a estipulação do prazo das etapas intermediárias.

Embora o monitoramento tenha sido realizado num período anterior à publicação do decreto, este estudo utilizará os novos padrões estaduais para uma maior contextualização na realidade atual do Estado de São Paulo.

2.3 Monitoramento do ar

Campanhas de monitoramento de ar possuem as importantes funções de informar à sociedade a qualidade do ar a que está exposta e formar substrato científico, providenciando dados e gerando resultados que ampliam o entendimento geral quanto à poluição atmosférica. Diversos estudos em todo o mundo investigam a concentração e interação dos poluentes em diferentes cenários geográficos e sociais.

O relatório da CETESB (2012) apresenta as atividades de monitoramento no Estado de São Paulo para o ano de 2011. A campanha contou com uma rede de 42 estações fixas e 2 móveis e 41 pontos de monitoramento manual, formando uma malha por todo o estado, incluindo São José dos Campos. Nesta campanha foram medidos os parâmetros: material particulado, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e ozônio. Uma das conclusões foi de que as emissões veiculares desempenham um papel de destaque nos níveis de poluição do ar dos grandes centros urbanos, ao passo que as emissões industriais afetam significativamente a qualidade do ar em regiões mais específicas. De maneira geral notaram que as concentrações mais altas dos poluentes, à exceção do ozônio, ocorreram no período compreendido entre os meses de maio a setembro, devido à maior ocorrência de inversões térmicas em baixos níveis, alta porcentagem de calmaria, ventos fracos e baixos índices pluviométricos. Já o ozônio apresentou, ao longo dos meses, uma distribuição de episódios totalmente distinta da dos poluentes

primários, uma vez que este poluente é formado na atmosfera por reações fotoquímicas que dependem da radiação solar, dentre outros fatores. Desta forma, o ozônio ocorreu com maior frequência no período compreendido entre setembro e março (primavera e verão), meses mais quentes e com maior incidência de radiação solar na atmosfera. Além disso, o ozônio foi o poluente que mais ultrapassou o padrão de qualidade do ar, contabilizando todo o estado de São Paulo. Ao apresentar os resultados o relatório sugere que a alta complexidade nas condições de formação do ozônio alimenta a necessidade de estudos complementares para a compreensão do fenômeno (CETESB, 2012, d).

No mundo, muitos países apresentam sérios problemas com a qualidade do ar. A Índia enfrenta graves problemas com questões ambientais, dentre elas a poluição no ar. No último EPI (Environmental Performance Index) realizado pela Yale University juntamente com a Columbia University em 2012, que cria um ranking dos países que mais avançam em soluções e políticas para manutenção de um bem estar ambiental, acoplada à situação atual de cada um, coloca a Índia entre os dez piores no ranking, na posição 125° (YALE, 2012). Segundo o Programa Nacional de Monitoramento de Ar da Índia em seu relatório para o ano de 2009, 241 (68%) das localidades estudadas excederam o padrão da média anual para materiais particulados e 39 (11%) delas para o NO₂. Enquanto que para a média diária 11 (3%) localidades excederam o limite padrão para o SO₂, 57 (16%) para o NO₂ e 307 (85%) para o MP₁₀ (CENTRAL POLLUTION CONTROL BOARD, 2011). O Brasil permaneceu no 30° lugar. Os primeiros do ranking foram Suíça, Letônia e Noruega.

Um estudo conduzido por Fioravante et al. (2003) numa campanha de monitoramento da qualidade do ar em Belo Horizonte procurou observar a relação entre temperatura máxima alcançada e concentração máxima de ozônio medida. Uma estação localizada numa praça mediu por 4 anos as concentrações dos poluentes indicadores, mas apenas o parâmetro ozônio foi comparado aos dados de temperatura, devido à sua formação ser fortemente relacionada com a presença de radiação solar. A conclusão do grupo foi de que

a concentração máxima do ozônio foi mais frequente entre duas horas antes e uma hora a mais do que a ocorrência da temperatura máxima, sendo que 20% das concentrações máximas do ozônio ocorreram às 15:00. No artigo os autores confessam que dados de temperatura foram utilizados pela falta de dados de radiação, mais adequados para esse estudo.

Andrade et al. (2012) analisaram dados de concentração de MP_{2,5} medidos em seis capitais brasileiras entre o inverno de 2007 e o de 2008, buscando quantificar a contribuição de emissões veiculares na concentração dos particulados finos. Como resultado determinaram a porcentagem de contribuição desse tipo de emissão para a concentração do MP_{2,5} para as cidades: São Paulo (40%), Rio de Janeiro (50%), Belo Horizonte (17%), Recife (37%).

Um estudo realizado por Mavroidis e Iliá (2012) mostra os resultados da rede de monitoramento do ar em Atenas, na Grécia. O alvo do trabalho foi compilar as variações horárias, diárias, mensais, sazonais e anuais na concentração dos óxidos de nitrogênio e do ozônio em três estações diferentes na cidade, cada uma localizada em regiões com diferentes características urbanas, uma dominada pelo tráfego de veículos no centro da cidade, uma segunda localizada afastada do centro, e a última numa zona suburbana. Para a composição das tendências foram utilizadas médias horárias de concentração no período entre 2007 e 2009 juntamente com dados meteorológicos. Entre os resultados e conclusões dos autores, destacam-se a confirmação da emissão veicular como principal fonte de NO, com níveis de NO_x na estação do centro muito superiores às demais estações; as variações sazonais e mensais sugerem que as concentrações mais altas de NO_x ocorrem no inverno, devido a uma maior emissão de poluentes e condições meteorológicas desfavoráveis, enquanto que o O₃ apresenta concentrações maiores no verão, devido a uma maior atividade fotoquímica; um resultado interessante foi a constatação de que a tendência anual de longo termo (1988 - 2009) da concentração do NO foi negativa a partir do começo dos anos 90, quando houve a introdução de veículos equipados com catalisadores na Grécia, juntamente com uma política

de remoção de veículos antigos. Segundo os autores os catalisadores diminuem de 3 a 6 vezes a emissão de NO_x pelos veículos, e que com o passar do tempo a tecnologia vem sendo aprimorada. A mesma tendência é observada para o NO_2 , embora de maneira não tão distinta como a do NO . Já o O_3 apresentou uma tendência negativa até 2000 e posteriormente não apresenta nenhuma tendência definida, variando amplamente de ano a ano.

Um trabalho parecido, mas com poluente medido diferente, o SO_2 , foi realizado na Coreia do Sul (NGUYEN, KIM, 2006). Os autores juntaram os dados de 220 estações de monitoramento de ar espalhadas por todo o país, no período de 1998 a 2003, e criaram quatro categorias de estação: urbana de tráfego, urbana de fundo, suburbana de fundo e rural. O trabalho então visou explorar os padrões de distribuição espacial e temporal do SO_2 em relação com um ambiente e condições de fontes variáveis. Um resultado imediato mostrou que em média a concentração na região urbana de tráfego foi 18% superior à região urbana de fundo, e na suburbana de fundo aproximadamente o dobro da rural. Segundo os autores a concentração atinge valores mais elevados no inverno, enquanto os valores mínimos são alcançados no verão. O estudo afirma que nas regiões altamente urbanizadas a concentração média do SO_2 diminuiu constantemente no período monitorado, já as regiões rurais não mostraram uma tendência clara.

2.4 Dispersão de poluentes

Fatores atmosféricos são responsáveis pela dispersão dos poluentes a partir de suas fontes. Embora o vento seja o responsável imediato pelo transporte dos gases, todo o comportamento físico da atmosfera influencia o fenômeno de dispersão. Em termos de circulação regional, um centro de baixa pressão conduz uma circulação que se direciona ao seu centro, causando uma corrente vertical ascendente na região de convergência, e embora os ventos sejam fracos quando muito perto do centro da baixa, nos pontos mais distantes ocorrem velocidades moderadas, aumentando as taxas de ventilação. Um centro de alta pressão causa efeitos opostos, como os ventos estão direcionados para fora do centro da alta uma corrente vertical descendente é

induzida para compensar o transporte horizontal de massa, isso faz com que o céu fique claro, sem presença de nuvens, permitindo assim uma atividade máxima de radiação, incidindo durante o dia e emitindo durante a noite, o que causa extremos opostos de estabilidade atmosférica: instabilidade no dia e estabilidade na noite. Centros de alta pressão geralmente ocupam grandes áreas, e embora sejam transientes, movem-se lentamente. Têm-se então que as taxas de ventilação em sistemas de alta pressão são muito menores do que em sistemas de baixa (STERN, 1984).

Inversões térmicas, ou camadas de inversão, caracterizam-se por apresentarem o comportamento anômalo para a troposfera de a temperatura do ar aumentar com a altura. Essa configuração permite que o ar frio e mais denso fique abaixo do ar quente menos denso, causando uma situação altamente estável (ausência de transporte vertical de massa), e, portanto, desfavorável à dispersão de poluentes (TURCO, 1997).

2.5 Área de estudo

A caracterização da qualidade do ar foi realizada através da análise de dados medidos entre 10 de setembro de 2012 e 6 de janeiro de 2013 no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, situado na região sudeste de São José dos Campos e na estação da CETESB, situada na região central da cidade.

2.5.1 São José dos Campos

A cidade de São José dos Campos foi primitivamente uma aldeia de índios guaianases, emigrados de Piratininga, no ano de 1585, estabelecida às margens do rio Comprido, hoje divisa natural entre São José e Jacareí. Anos mais tarde uma missão jesuíta se instalou onde hoje é o centro da cidade. Após a expulsão dos jesuítas do Brasil, em 1759 a aldeia foi oficialmente promovida a Vila, que no entanto, permaneceu estagnada economicamente, só vindo a apresentar algum progresso econômico no final do século 19, quando a

produção de algodão e café se desenvolveu e uma estrada de ferro servia a cidade (PMSJC, 2012).

O processo de industrialização tomou impulso com a instalação do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) e do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) em 1950, além da inauguração da rodovia Presidente Dutra, em 1951. O processo de industrialização fez com que São José dos Campos experimentasse intenso crescimento demográfico, acelerando a urbanização (PMSJC, 2012).

Segundo o Censo 2010 a população de São José dos Campos é de 629.921 habitantes, com uma taxa de crescimento médio anual de 1,57%, superior à do Brasil (1,17%) e do estado de São Paulo (1,09%) (PMSJC, 2012).

Em julho de 2011 a cidade possuía uma frota cadastrada composta de 343.203 veículos, sendo 239.548 automóveis, 1.580 ônibus, 7.913 caminhões e 55.057 motos, além de outros 39.105 classificados como “outros” pela prefeitura municipal (PMSJC, 2012). O total de resíduos sólidos recebidos calculado para o primeiro semestre de 2011 foi de 686,5 toneladas por dia, além de 46 toneladas por dia de material reciclável e 3 toneladas por dia de material hospitalar (PMSJC, 2012). Estão presentes em São José dos Campos segundo a prefeitura municipal 1450 indústrias, destacando-se grandes fábricas como General Motors, Embraer, Monsanto, Johnson & Johnson, além da Refinaria Henrique Lages (REVAP) da PETROBRAS com capacidade instalada de 251 mil barris por dia e com os principais produtos sendo gasolina, óleo diesel, querosene de aviação, gás liquefeito de petróleo, asfalto e enxofre. Na Figura 2.1 pode ser vista a área urbana e a localização das maiores indústrias de São José dos Campos, destacando-se em amarelo as rodovias Presidente Dutra, Tamoios e Carvalho Pinto.

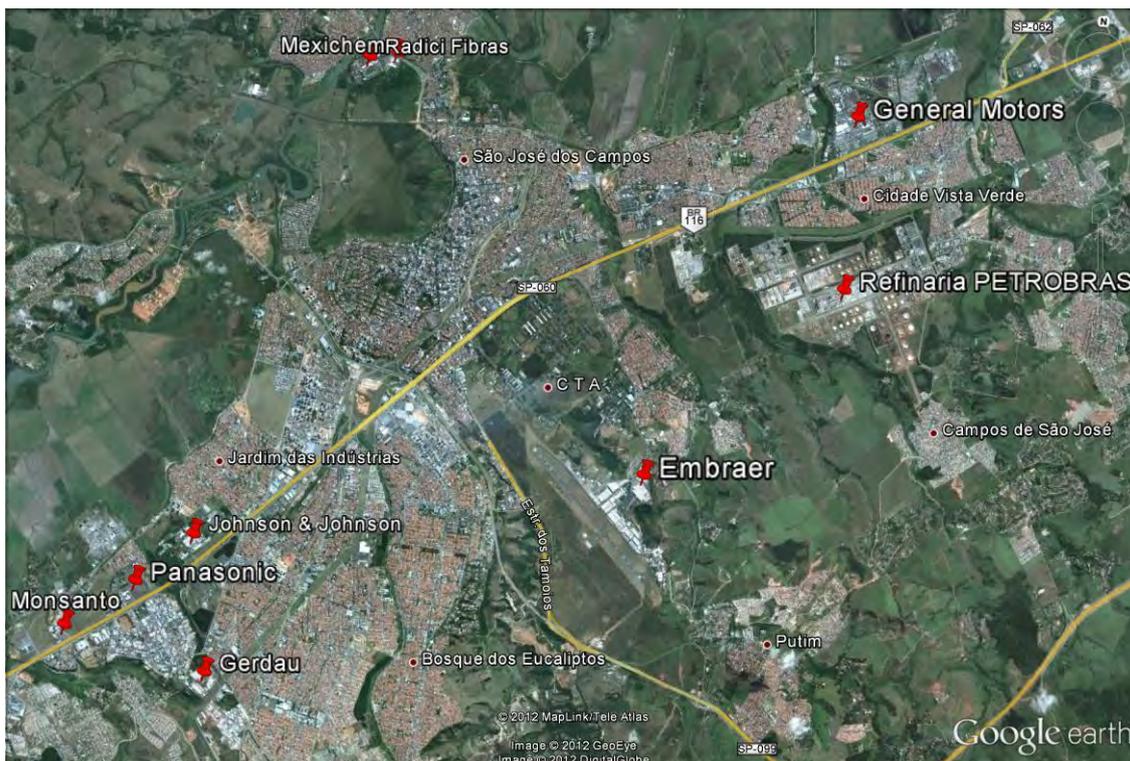


Figura 2.1: Localização das maiores indústrias de São José dos Campos.

Fonte: Google Earth (2012).

A CETESB apresenta no Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo uma estimativa de emissão proveniente de fontes móveis (veículos) e fixas (indústrias) para os locais que possuem monitoramento automático da qualidade do ar. Na Tabela 2.3 são apresentadas tais estimativas para a cidade de São José dos Campos nos anos de 2010 a 2012. A partir de 2010 a CETESB adotou uma nova metodologia para o inventário de emissões veiculares, de forma que a própria companhia adverte a não se realizar comparações diretas entre as novas estimativas e as anteriores a 2010.

A Tabela 2.4 apresenta detalhadamente as fontes móveis de emissão para o ano de 2009 e a Tabela 2.5 detalha as emissões por indústrias inventariadas também para 2009 (último ano em que tais informações foram publicadas no relatório).

Tabela 2.3 – Estimativa de emissão por poluente e fontes de emissão para São José dos Campos nos anos 2010 a 2012.

| Ano | Fontes de emissão | Emissão (1000 t/ano) | | | | |
|-------------|-------------------|----------------------|------|------|------|-------|
| | | CO | HC | NOx | MP | SOx |
| 2010 / 2011 | Fixa (5 ind.) | 1,02 | 4,77 | 5,26 | 0,38 | 10,25 |
| | Móvel | 6,92 | 1,11 | 3,49 | 0,08 | nd |
| 2012 | Fixa (5 ind.) | 1,30 | 5,76 | 5,22 | 0,40 | 6,83 |
| | Móvel | 6,12 | 1,16 | 2,38 | 0,05 | nd |

nd: Não disponível.

Fonte: CETESB (2010, 2011, 2012).

As estimativas publicadas para os anos 2010 e 2011 foram as mesmas. Pela estimativa percebe-se que emissões veiculares respondem pela maior parte da emissão de monóxido de carbono, enquanto os hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e materiais particulados provêm majoritariamente das indústrias.

Tabela 2.4 – Estimativa de emissão por fontes móveis em São José dos Campos no ano de 2009.

| Fontes de emissão | | | Emissão (1000 t/ano) | | | | |
|-------------------|---------------------------------|-------------------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| | | | CO | HC | NOx | SOx | MP |
| MÓVEIS | Tubo de escapamento de veículos | Gasolina C | 18,93 | 1,94 | 1,24 | 0,11 | 0,13 |
| | | Álcool + Flex | 6,57 | 0,72 | 0,45 | -- | -- |
| | | Diesel | 11,54 | 1,77 | 8,46 | 0,12 | 0,41 |
| | | Motocicleta e similares | 10,19 | 1,38 | 0,12 | 0,02 | 0,05 |
| | Cárter e Evaporativa | Gasolina C | -- | 3,32 | -- | -- | -- |
| | | Álcool | -- | 0,64 | -- | -- | -- |
| | | Motocicleta e similares | -- | 1,17 | -- | -- | -- |
| | Pneus | Todos os tipos | -- | -- | -- | -- | 0,35 |
| | TOTAL | | | 47,23 | 10,94 | 10,27 | 0,25 |

1 - Gasolina C: gasolina contendo 22% de álcool anidro e 350 ppm de enxofre (massa). 2 - Diesel com 350 ppm de enxofre (massa).

Fonte: CETESB (2009).

Pela estimativa detalhada das fontes móveis percebe-se que veículos abastecidos com diesel emitem mais óxidos de nitrogênio e materiais particulados do que os abastecidos com gasolina e álcool.

Tabela 2.5 – Estimativa de emissão por indústrias em São José dos Campos no ano de 2009.

| Empresa | Emissão dos poluentes (t/ano) | | | | |
|--|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | CO | HC | NOx | SOx | MP |
| Embraer | 1,1 | 21,8 | 4,14 | 0,98 | 2,83 |
| General Motors do Brasil | 12,16 | 1.264,95 | 45,59 | 0,28 | 1,72 |
| Monsanto do Brasil Ltda. | -- | 0,12 | 32,76 | 1,3 | 3,89 |
| Petrobrás Distribuidora S/A - Br - TEVAP | -- | 437,2 | -- | -- | -- |
| Petróleo Brasileiro S.A. - Petrobrás/REVAP | 882,7 | 2.861,40 | 5.551,91 | 10.396,91 | 419,27 |
| RadiciFibras Ind. E Com. Ltda. | -- | -- | 54,05 | -- | 5,69 |
| TOTAL (1000 t/ano) | 0,9 | 4,59 | 5,69 | 10,4 | 0,43 |

Fonte: CETESB (2009).

Em relação às indústrias inventariadas pela CETESB em São José dos Campos pode-se destacar a Refinaria do Vale do Paraíba da Petrobrás (REVAP), com alto potencial poluidor por apresentar valores elevados de emissões. Também a General Motors do Brasil apresenta emissão elevada de hidrocarbonetos.

Segundo a classificação climática de Köppen São José dos Campos possui um clima tipo Cwa (úmido subtropical), possuindo temperaturas mínimas no mês mais frio entre 0°C e 18°C e temperatura máxima no mês mais quente acima de 22°C, além de um inverno seco. A cidade possui uma temperatura média mínima anual de 14,9°C e máxima de 27,6°C e com mínima média mensal alcançando 10,4°C em julho e máxima 29,9°C em fevereiro. A precipitação anual média é de 1304,9 mm, chegando a mínima mensal média de 32,4 mm em julho e máxima de 216,3 mm em janeiro (CEPAGRI, 2012).

Um estudo conduzido por Carvalho et al. (1998) em São José dos Campos se utilizou de dados de superfície registrados no aeroporto da cidade desde 1973 até 1989 para estimar a variação nas condições de dispersão de poluentes, averiguando o comportamento médio do vento, precipitação e altura média da camada de mistura. A conclusão do estudo foi de que há predomínio de ventos fracos e moderados vindos das direções nordeste e leste, enquanto ventos fortes têm direção predominante sul. Segundo os autores o mês mais favorável à dispersão de poluentes é outubro, quando a camada média de mistura se

encontra não muito baixa, há menor ocorrência de situações de calmaria e um valor próximo à média anual de precipitações, que retiram da atmosfera grande parte da poluição suspensa. E o menos favorável à dispersão é o mês de junho, com uma grande ocorrência de calmaria, pouca precipitação e a camada de mistura baixa, o que potencializa ainda mais a poluição.

No estudo conduzido por Canavesi e Mauro (2009), foi caracterizado por imagens de satélite que 13% da área total dos bairros de São José dos Campos está ocupada por vegetação de porte arbóreo, sendo que a região mais arborizada é a sudeste com 18% de sua área, e a menos arborizada a região norte, com 10%.

Além disso a zona urbana possui presença mais significativa de vegetação principalmente no Parque Municipal Roberto Burle Marx, situado na zona norte e também nos Parques Santos Dumont e Vicentina Aranha, ambos no centro da cidade. Fora dos limites da área urbana há o Parque Natural Municipal Augusto Ruschi, uma unidade de conservação de proteção integral situada 17 km ao norte da cidade com área de 2,5 milhões de metros quadrados, onde há conservação de espécies nativas e remanescentes da mata atlântica. Mais ao norte há o distrito de São Francisco Xavier com 322 km² e com 97% de seu território sendo área de proteção ambiental, também remanescente de mata atlântica.

2.5.2 Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

O INPE situa-se ao lado do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial (DCTA), e embora ambos possuam pavimentações e construções em seu interior, contam com presença significativa de vegetação e constituem uma mancha verde em São José dos Campos, estendendo-se do extremo sudeste da cidade até a rodovia Presidente Dutra.

A Avenida dos Astronautas, com alta circulação de veículos, circunda as faces norte e leste do INPE, que, no entanto, possui uma barreira vegetal com mais de 6 metros de altura por quase toda a extensão nesse lado. Os bairros

vizinhos somam uma população de 20.153 habitantes (PMSJC, 2012) gerando um acréscimo na circulação de veículos além do fluxo habitual da Avenida dos Astronautas. Ao oeste do INPE há uma área de cerrado pertencente ao DCTA. Ao sul, encontram-se algumas instalações térreas do DCTA, dois lagos e mais adiante a Embraer e o Aeroporto. Na Figura 2.2 é possível visualizar a região.

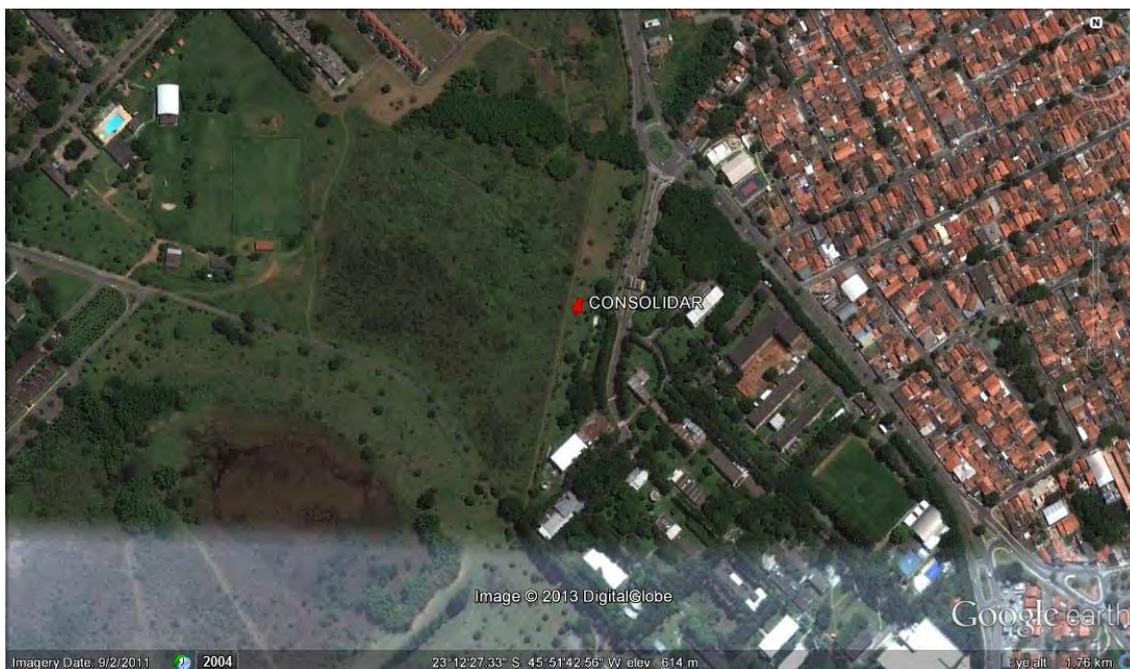
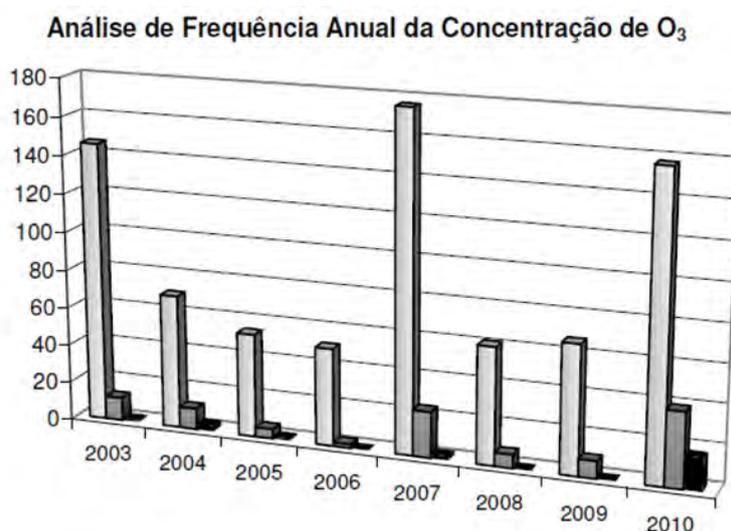


Figura 2.2. Vista aérea da região onde está instalado o laboratório CONSOLIDAR. Fonte: Google Earth.

2.6 Estação da CETESB

Dados de concentração de ozônio coletados entre 2003 e 2010 na estação de monitoramento da qualidade do ar da CETESB em São José dos Campos sugeriram uma exposição crônica da população aos seus efeitos deletérios (CASTRO et al, 2011). Na Figura 2.3, retirada do trabalho citado, pode-se observar a distribuição de frequência do número de ocorrências de concentração de ozônio nas faixas entre 120 e 160 $\mu\text{g.m}^{-3}$, entre 161 e 220 e valores acima de 220 $\mu\text{g.m}^{-3}$ para cada ano. Constatou-se então que o número de ultrapassagens do valor 160 $\mu\text{g.m}^{-3}$, que não deveria ser excedido mais de uma vez ao ano variou de 2 a 39 ocorrências considerando o período de 2003 a 2010. E tomando o valor de 120 $\mu\text{g.m}^{-3}$ observou-se uma variação de 13 a 48% dos dias do ano com valores acima desse limite. Embora o estudo não

enumerar os dados com concentrações abaixo de $120 \mu\text{g.m}^{-3}$, é esperado e razoável afirmar que o valor atual recomendado pela OMS de $100 \mu\text{g.m}^{-3}$ foi ultrapassado de maneira mais frequente ainda, caracterizando um cenário altamente desfavorável de poluição por ozônio em São José dos Campos.



| | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 120-160 | 146 | 70 | 54 | 51 | 176 | 61 | 67 | 157 |
| 161-200 | 12 | 11 | 5 | 2 | 24 | 7 | 9 | 39 |
| >200 | 1 | 3 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 17 |

Figura 2.3. Número de medidas contabilizadas para cada ano situadas entre os valores $120-160 \mu\text{g.m}^{-3}$; $161-200 \mu\text{g.m}^{-3}$; e maior que $200 \mu\text{g.m}^{-3}$. Fonte: CASTRO et al., (2011).

Além disso, foi sugerido pelo estudo que a pouca diferença entre os dados coletados em dias de semana com os de finais de semana indicam que as emissões veiculares podem não ser as principais fontes dos precursores do ozônio na cidade, apresentando como alternativa as emissões provenientes da refinaria Henrique Lage, uma significativa fonte de COV.

3. METODOLOGIA

Os dados de concentração dos poluentes e variáveis meteorológicas foram obtidos pelo laboratório de qualidade do ar “CONSOLIDAR”, pela estação da CETESB, e pela estação meteorológica do INPE. O CONSOLIDAR foi instalado e os monitores calibrados no início de setembro e o período de medição abrangeu de 10 de setembro de 2012 até 6 de janeiro de 2013, contabilizando 17 semanas de monitoramento. O monitor de SO₂ e os medidores de temperatura, pressão, e vento precisaram de manutenção e seus dados começaram a ser obtidos no dia 24 de outubro. Os dados de umidade obtidos no INPE apresentaram inconsistência e não puderam ser comparados aos da CETESB. A estação da CETESB está funcionando desde 2002, e a estação meteorológica do INPE desde 1999.

3.1 Descrição do laboratório CONSOLIDAR

A concentração dos gases ozônio, monóxido de carbono, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio, óxido nítrico, materiais particulados menores que 2,5 e 10 µm foram medidos pelo Laboratório CONSOLIDAR, que consiste num sistema de monitoramento da qualidade do ar instalado em um contêiner com 4,00 m de comprimento, 2,40 m de largura e 2,85m de altura. Há também no Laboratório um medidor de hidrocarbonetos, no entanto o aparelho apresentou problemas durante o monitoramento e seus dados foram excluídos por não apresentarem consistência. Na parte superior externa do contêiner se encontram os coletores de amostra de ar e partículas e sensores meteorológicos que medem velocidade e direção do vento, temperatura e umidade relativa do ar. No interior do contêiner se encontram os analisadores de gases e os monitores de partículas, além de um sensor de pressão barométrica. A temperatura no interior é mantida na faixa adequada por um sistema de refrigeração. A campanha de monitoramento com o laboratório CONSOLIDAR contou com os seguintes analisadores:

- Analisador de ozônio (O₃);

- Analisador de monóxido de carbono (CO);
- Analisador de óxidos de nitrogênio (NO e NO₂);
- Analisador de dióxido de enxofre (SO₂);
- Monitores de material particulado menor que 10 µm (MP₁₀) e 2,5 µm (MP_{2,5})

A seguir a descrição das características de funcionamento dos analisadores e monitores, fabricados pela empresa australiana ECOTECH.

3.1.1 Analisador de ozônio

Consiste no modelo EC 9810B, que se utiliza da absorção de radiação ultravioleta realizada pelo ozônio para determinar sua concentração.

No interior do equipamento uma lâmpada de mercúrio emite uma determinada quantidade de radiação no comprimento de onda de aproximadamente 254 nm, que corresponde ao centro da banda de absorção do ozônio no espectro do ultravioleta. Essa radiação então atravessa alternadamente duas amostras de ar armazenadas em tubos de vidro. Uma diretamente coletada do ambiente, possivelmente com ozônio, e outra com adição de dióxido de manganês, que destrói o ozônio presente. Ao atravessar as amostras e incidir num detector de radiação ultravioleta, o equipamento é capaz de determinar a concentração de ozônio no ar comparando as diferentes intensidades de radiação que atravessam cada amostra, já que a diferença desses valores é proporcional à concentração do ozônio presente na amostra intacta. O analisador tem escala de detecção automática de 0-50 ppb ou 0-20 ppm, com precisão de 1 ppb e limite mínimo de detecção de 0,5 ppb (ECOTECH, 2009 a).

3.1.2 Analisador de monóxido de carbono

Consiste no modelo EC 9830B, que se utiliza da absorção de radiação infravermelha (comprimento de onda 4,7 µm) pelo CO para efetuar a medição de sua concentração.

Seu funcionamento é análogo ao do analisador de ozônio, com a única diferença de que nas duas amostras de gases, uma contém o ar coletado, para ser medida a concentração de CO, e na outra apenas nitrogênio, o que permite que a radiação infravermelha atravesse-a sem absorvê-la. Portanto, a diferença de radiação no comprimento de onda 4,7 μm detectada no sensor após atravessar cada amostra é proporcional à concentração de CO no ar coletado. O analisador tem escala de detecção automática de 0-100 ppb ou 0-200 ppm, podendo-se alterar manualmente para 0-1000 ppm, com precisão de 0,1 ppm ou 1% da medida (o que for maior) e limite mínimo de detecção de 50 ppb (ECOTECH, 2009b).

3.1.3 Analisador de óxidos de nitrogênio

Consiste no modelo EC 9841B, que utiliza o fenômeno de quimiluminescência de fase gasosa para efetuar a medida da concentração dos óxidos de nitrogênio.

O analisador possui dois canais que conduzem a amostra de ar alternadamente na câmara onde ocorre a medição. Primeiramente a amostra segue diretamente a essa câmara, onde ocorre uma injeção de O_3 . As moléculas de NO reagem com o O_3 e geram moléculas de NO_2 excitadas (Equação 3.1). As moléculas de NO_2 não reagem com o O_3 .



Essas moléculas de NO_2 excitadas emitem então radiação ao retornarem ao seu estado natural (Equação 3.2).



Essa radiação é medida e seu valor é proporcional à concentração de NO, que é determinada nessa etapa. Após essa primeira etapa a amostra é direcionada ao outro canal, que a leva a um conversor $\text{NO}_2 - \text{NO}$, onde todo o NO_2 presente se transforma em NO. A seguir a amostra segue novamente à câmara de medição e a mesma rotina é efetuada, dando agora como medição a

concentração total de ambos os óxidos, NO e NO₂. A concentração de NO₂ pode ser calculada fazendo a diferença entre a segunda e a primeira medida. O analisador tem escala de detecção de 0-20 ppm, com precisão de 0,5 ppb e limite mínimo de detecção de 0,5 ppb (ECOTECH, 2009c).

3.1.4 Analisador de dióxido de enxofre

Consiste no modelo EC9850B, que mede a concentração do SO₂ baseado em princípios de espectroscopia de fluorescência.

O SO₂ possui uma banda de absorção forte no espectro ultravioleta, entre 200 e 240 nm. A amostra de ar coletada passa por uma câmara que diminui a concentração de hidrocarbonetos presentes, e uma fonte emite radiação que filtrada para que apenas o comprimento de onda de 214 nm incida sobre a amostra. As moléculas de SO₂ absorvem essa radiação e se tornam excitadas, emitindo fótons de comprimentos de onda de 300 a 400 nm. Essa energia emitida, que é proporcional à concentração de SO₂ no ar, é então medida. O analisador possui escala de detecção de 0-20 ppm, com precisão de 0,5 ppb e limite mínimo de detecção de 0,5 ppb (ECOTECH, 2009 d).

3.1.5 Monitor de material particulado MP₁₀

Consiste no modelo Beta Met One BAM-1020, que utiliza medição de radiação beta para determinar a concentração do MP₁₀. Uma fonte contendo Carbono 14 (C¹⁴) emite constantemente elétrons de alta energia, conhecidos como raios beta, através de um ponto numa fita. Esses raios são detectados do outro lado e mensurados por um detector de cintilação sensível que determina uma leitura de referência (zero). O aparelho então avança esse ponto na fita para a região em que uma bomba de vácuo puxou uma quantidade medida e controlada de ar ambiente, contendo material particulado filtrado para apenas partículas menores que 10 µm. A emissão e detecção de raios beta se repete, agora atravessando a fita contendo os particulados do ar, e uma atenuação em relação à primeira medida é notada. Essa atenuação é então usada para calcular a massa de partículas contida na fita e a sua concentração volumétrica

no ar ambiente coletado. O monitor possui escala de detecção de 0-1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, com limite mínimo de detecção de 4,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e uma precisão de 8% (ECOTECH, 2009e).

3.1.6 Monitor de material particulado $\text{MP}_{2,5}$

Consiste no mesmo modelo Beta Met One BAM-1020, mas equipado com um adaptador que filtra o ar coletado para partículas menores que 2,5 μm .

3.2 Dados da CETESB

A CETESB mantém em São José dos Campos uma estação automática desde 2002 que faz medições da concentração de dióxido de enxofre, ozônio e material particulado menor que 10 μm , além das variáveis meteorológicas umidade relativa, temperatura do ar e velocidade e direção do vento. A partir de outubro começaram também medições da concentração dos óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono.

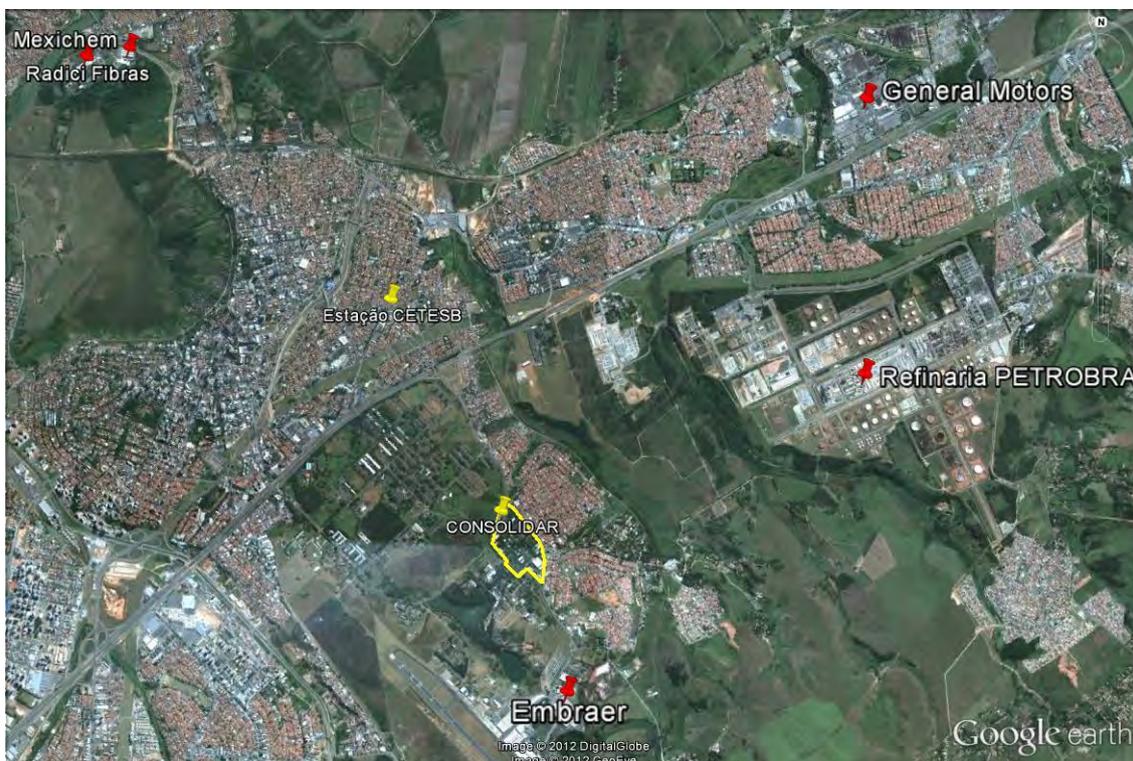


Figura 3.1. Localização da estação da CETESB e do Laboratório CONSOLIDAR.

Fonte: Google Earth (2012).

A estação se encontra no bairro Jardim Paulista, ao lado do Estádio Municipal, na região central da cidade, e determina a média horária da concentração dos poluentes, realizando medidas de amostragens a cada 5 segundos. Na Figura 3.1 estão destacadas as localizações da estação da CETESB e o laboratório CONSOLIDAR. A distância entre as duas estações é de 2,4 km.

Na Figura 3.2 têm-se a vista da rua onde está instalada a estação.



Figura 3.2. Vista da rua onde está localizada a estação da CETESB. A estação pode ser vista à esquerda da foto, atrás do muro branco.

Fonte: Google Street View (2012).

3.3 Tratamento dos dados

O período total de monitoramento foi dividido em 17 semanas, utilizando segundas-feiras como primeiro dia. Para cada semana os dados eram separados e analisados, levando em conta quais os sistemas atmosféricos atuantes no período. Para essa finalidade foram obtidas imagens da América do Sul do satélite GOES 12, que foram analisadas com a ajuda da síntese sinótica mensal elaborada pelo CPTEC. Tomando então nota do comportamento da atmosfera naquele período foi analisado o comportamento de cada um dos gases em relação aos fenômenos ocorridos e com o decorrer do dia.

Os dados do CONSOLIDAR tinham quatro resoluções diferentes. Médias de 1 min, 5 min, 10 min e 60 min. Para análise geral da semana foram utilizadas as médias horárias e para uma eventual inspeção mais detalhada num determinado período menor as médias de maior resolução foram analisadas.

Para a comparação com os dados da CETESB os dados de ozônio do CONSOLIDAR precisaram ser transformados de ppb para $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para tal as médias horárias de temperatura e pressão foram utilizadas para a seguinte equação de conversão:

$$C_{\mu\text{g}/\text{m}^3} = M \times C_{\text{ppb}} \times \frac{P}{T} \times \frac{1}{83,1} \quad (3.3)$$

Onde M representa a massa molar do poluente em questão, P a média horária da pressão em milibares, T a média horária da temperatura ambiente na escala Kelvin, e C a média horária da concentração do poluente. A Equação 3.3 deriva da equação de estado de um gás ideal. A dedução completa é apresentada no Apêndice A.

Além das concentrações dos gases, as variáveis meteorológicas temperatura e umidade relativa também foram comparadas entre os dados do CONSOLIDAR e da CETESB para uma inspeção mais completa da situação de cada localidade. Sublinhando que todos os dados que foram comparados entre CONSOLIDAR e CETESB foram médias horárias.

3.4 Eixos principais do estudo

Os dados foram analisados sob dois eixos principais de investigação, sendo eles:

- Análise do comportamento geral dos poluentes no período do monitoramento no CONSOLIDAR, com intuito de determinar a influência dos fenômenos atmosféricos de escala sinótica, parâmetros físicos do local (temperatura, umidade e vento); evolução no ciclo diário; e variação entre dias úteis e finais de semana.

- Comparação CONSOLIDAR x CETESB, acompanhando o perfil dos poluentes de cada localidade com relação ao ciclo diário; determinando as médias diárias e semanais de cada poluente e parâmetro físico; contabilizando as diferenças entre as duas localidades; e em especial foram comparados os ciclos do ozônio e óxidos de nitrogênio, no intuito de investigar influências de parâmetros físicos e químicos induzidos pela presença de vegetação e maior distância das fontes de emissão na área do CONSOLIDAR.

4. RESULTADOS

Uma primeira seção compara a situação geral meteorológica encarada durante o período de monitoramento (Setembro/2012 – Janeiro/2013) com a climatologia de São José dos Campos. A partir daí os resultados são apresentados dividindo-os nos dois eixos citados.

Pertinente ressaltar que, por falha dos monitores e consequente manutenção, os dados de concentração de SO₂ e MP2,5 só começaram a ser produzidos em 24 de outubro. O analisador de óxidos de nitrogênio precisou de calibragem e os dados de NO e NO₂ separadamente começaram a ser válidos também após 24 de outubro, ocasião em que uma equipe esteve presente no CONSOLIDAR. Os dados da concentração dos dois juntos permaneceram válidos por todo o monitoramento pois a medição era feita em dois passos (ver funcionamento do analisador de NO₂ na seção 3.1), e o processo de medição do NO apenas estava descalibrado, não comprometendo as medidas de NO_x.

4.1 Período de monitoramento em relação à climatologia local

Nas figuras 4.1 e 4.2 estão comparações feitas entre os dados meteorológicos medidos no período de monitoramento com as informações retiradas do trabalho realizado por Scofield et al. em 2000, em que uma climatologia da cidade de São José dos Campos foi elaborada utilizando dados do aeroporto da cidade no período entre 1974 e 1998.

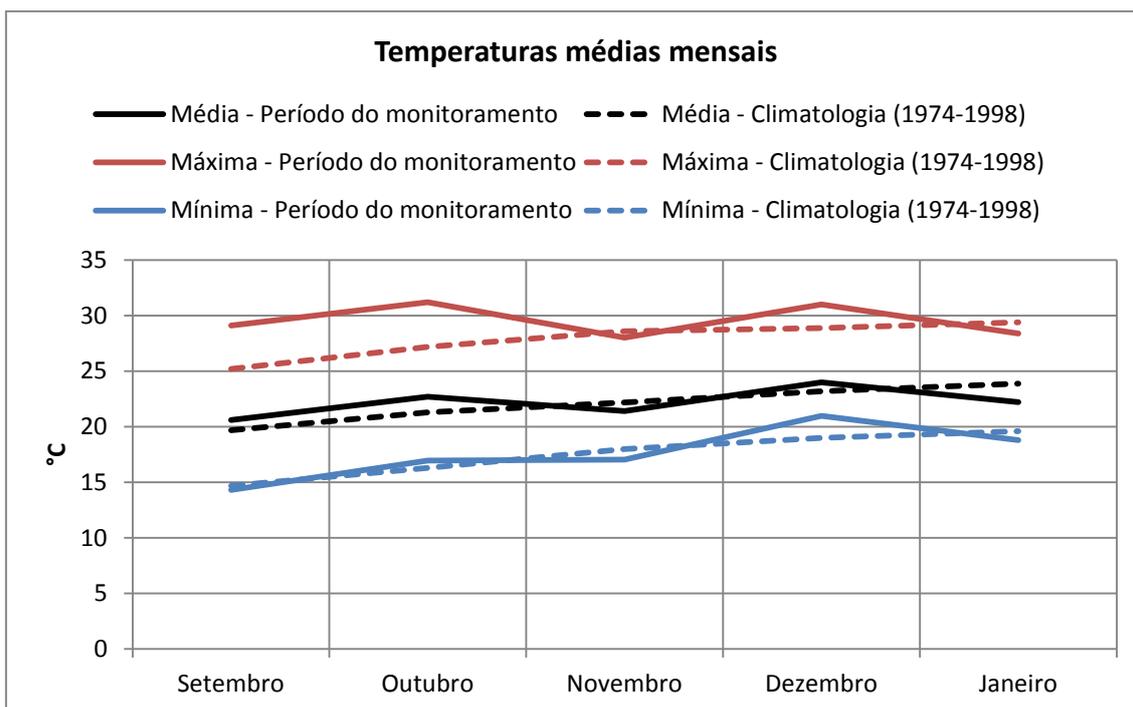


Figura 4.1. Comparação entre temperatura média, máxima e mínima mensal medida e climatológica.

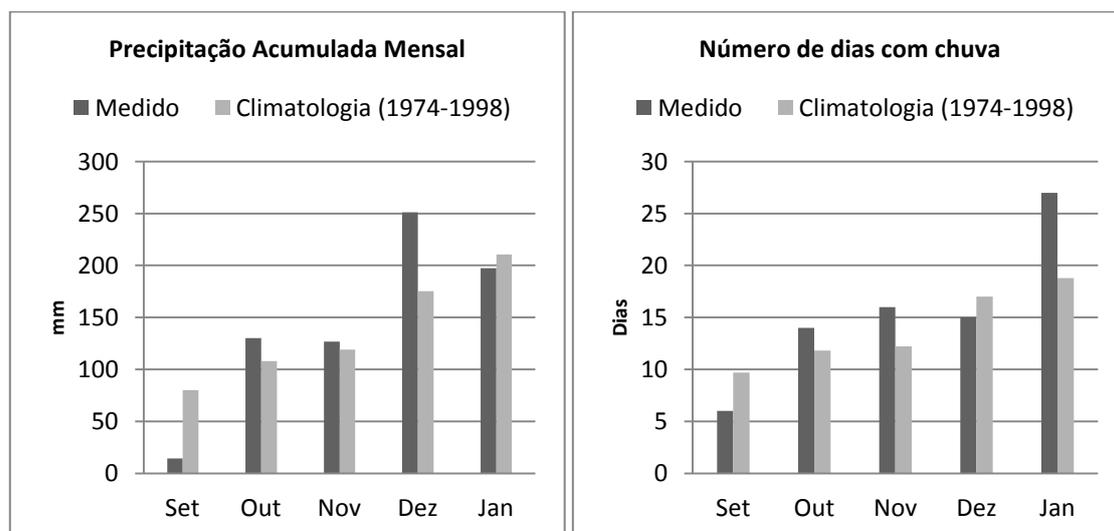


Figura 4.2. Comparação entre precipitação acumulada mensal medida e climatológica; e número de dias com chuva mensal medido e climatológico.

Analisando as diferenças entre a climatologia local e as medições, percebe-se que o mês de Setembro foi mais seco que o normal, com precipitação acumulada (14,4 mm) muito abaixo da média climatológica (80 mm) e menor número de dias com chuva. Essa configuração assegurou maior insolação e permitiu que a temperatura subisse acima da média para esse mês.

Em Outubro a temperatura média também foi superior, particularmente a temperatura máxima. Já o perfil de precipitação esteve próximo à média climatológica.

A temperatura no mês de Novembro permaneceu muito próximo do valor climatológico. No entanto com uma tendência atípica de apresentar um valor médio menor que Outubro. Tal comportamento pode sugerir que as configurações atmosféricas que propiciaram um aquecimento maior da região nos meses de Setembro e Outubro cessaram sua influência entre Outubro e Novembro.

Para Dezembro a temperatura média foi ligeiramente maior que a média climatológica. A precipitação acumulada (251 mm) foi maior que a média climatológica (175 mm) e o número de dias com chuva menor, o que significa que as chuvas foram mais intensas nesse mês do que de costume.

Para Janeiro novamente há um decréscimo atípico na temperatura média, sendo o único mês a apresentar temperatura média inferior à média climatológica. Tal resultado pode ser associado com o número elevado de dias com chuva (27), e conseqüentemente uma menor temperatura média.

4.2 Análise do comportamento geral dos poluentes

Nesta seção são apresentados os resultados das análises dos dados obtidos pelo laboratório CONSOLIDAR e complementados com dados meteorológicos da estação do INPE, situada 100 metros do CONSOLIDAR. Primeiramente é apresentado o impacto dos fenômenos atmosféricos de escala sinótica na concentração e comportamento geral dos poluentes. Na segunda parte são apresentadas as médias semanais calculadas assim como a variação entre dias úteis e finais de semana. Na terceira parte é apresentado o comportamento dos poluentes no ciclo diário. A seguir há a análise dos coeficientes de correlação entre a concentração dos poluentes e parâmetros meteorológicos. Na quinta parte é apresentado o comportamento médio do vento durante o período de monitoramento.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo estatístico da concentração dos poluentes monitorados na campanha do laboratório CONSOLIDAR, juntamente com o desvio padrão e o número de medidas. Na estatística foram utilizadas médias de uma hora.

Tabela 4.1 – Concentração média, máxima e mínima, com desvio padrão e número de medidas por poluente.

| Poluente | Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | | | σ | N |
|----------|---|--------|--------|----------|------|
| | Média | Máxima | Mínima | | |
| O3 | 53,2 | 192,8 | 2,0 | 32,1 | 2676 |
| CO (ppm) | 0,5 | 4,8 | 0,0 | 0,3 | 2664 |
| NO | 1,7 | 41,1 | 0,0 | 3,3 | 1696 |
| NO2 | 12,5 | 60,0 | 0,7 | 9,8 | 1724 |
| SO2 | 4,1 | 87,6 | 0,0 | 7,3 | 1708 |
| MP10 | 24,0 | 122,0 | 0,0 | 14,5 | 2306 |
| MP2,5 | 6,6 | 58,0 | 0,0 | 7,2 | 1721 |

4.2.1 Fenômenos atmosféricos de escala sinótica

Frentes frias que passaram sobre a região do Vale do Paraíba influenciaram a concentração dos poluentes monitorados por causarem instabilidade atmosférica, nebulosidade, precipitação e ventos. A seguir uma descrição dos principais eventos ocorridos no período do monitoramento e seus respectivos resultados nos perfis dos poluentes. Imagens de satélite realçadas obtidas no site da DSA/INPE foram utilizadas para ilustrar os episódios. A escala de cores utilizada nas imagens corresponde aos intervalos de temperatura indicados na Figura 4.3.

| Cor | Temperatura do topo da nuvem (°C) |
|--------|-----------------------------------|
| Orange | $-40 < T < -30$ |
| Yellow | $-50 < T < -40$ |
| Cyan | $-60 < T < -50$ |
| Blue | $-70 < T < -60$ |
| Pink | $-80 < T < -70$ |

Figura 4.3. Legenda da escala de cores utilizada nas imagens de satélite realçadas.

4.2.1.1 Setembro

No dia 11 um cavado passou pelo sul do estado e posteriormente avançou pelo oceano, havendo uma pequena ocorrência de nebulosidade no período da manhã e da tarde, e ocorrência de ventos fortes pela noite. Notou-se também uma queda na pressão e menos radiação incidente. Manteve-se nos dias 12 e 13 uma situação de instabilidade com nuvens de porte significativo e nebulosidade intensa, além de umidade alta no dia 13, o que contribuiu para que a partir da tarde do dia 13 e no dia 14 houvesse uma queda substancial na concentração dos NO_x e O_3 . Os perfis dos poluentes podem ser visualizados na Figura 4.4.

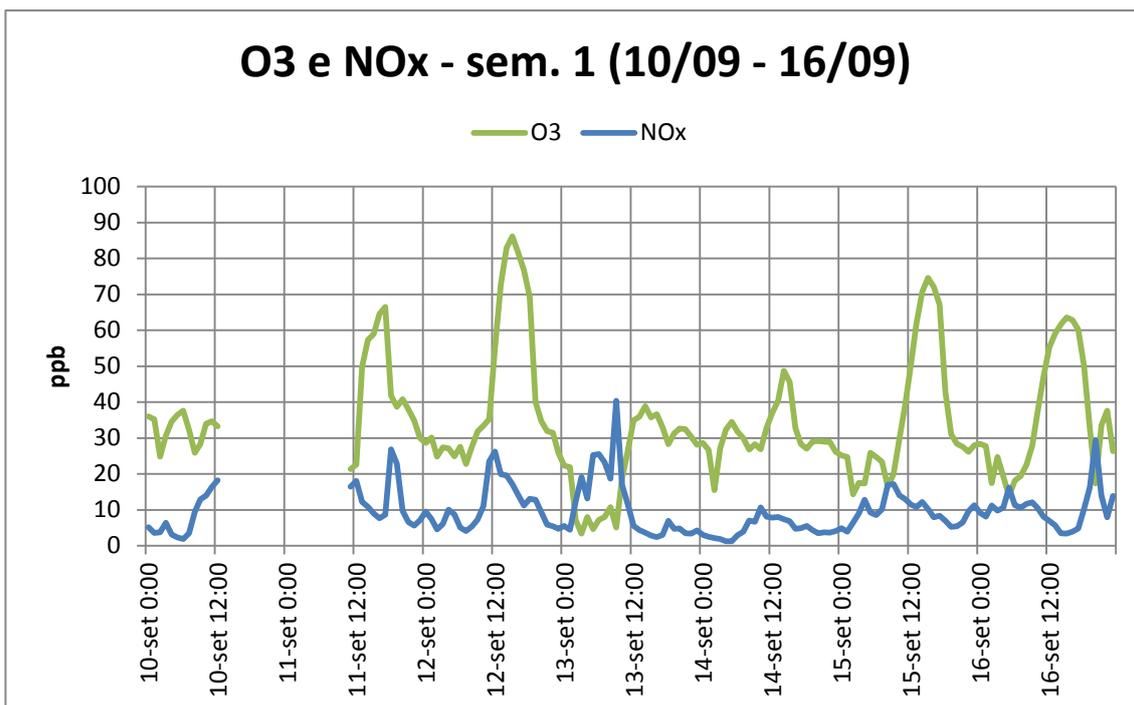


Figura 4.4. Perfil semanal da concentração do NO_x e O₃ para a semana 1. Dados em médias horárias.

Na noite do dia 19 de setembro uma frente fria alcançou a cidade, mantendo o dia 20 nublado e com presença de precipitação (5,2 mm) - a primeira desde 18 de julho, o que totaliza 64 dias sem chuva - tornando a temperatura mais amena durante o dia e anunciando o fim da temporada seca. Enquanto os dias 17, 18 e 19 alcançaram mais de 35°C durante a tarde, o dia 20 teve temperatura máxima de 28°C e recebeu 20% a menos de radiação do que os anteriores.

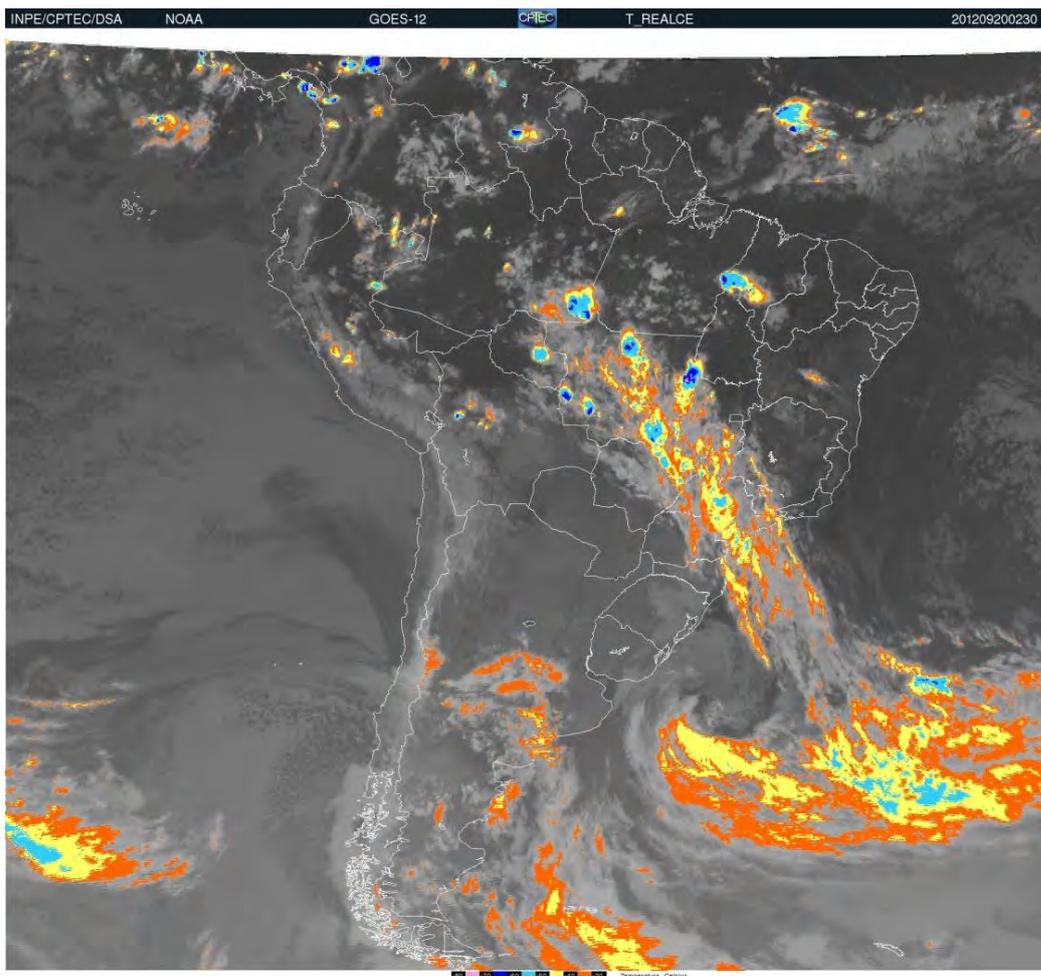


Figura 4.5. Imagem de satélite realçada de frente fria sobre o SP, GO e MT na noite do dia 19 de setembro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

No dia 21 um cavado se formou entre SP, MS e PR e pela noite uma nova frente fria se formou, contribuindo para a instabilidade na área e causando precipitação. A precipitação total do evento foi de 11 mm, distribuídos entre os dias 20, 21 e 22 de setembro. Pode-se avaliar pelo perfil dos gases nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8 que a partir do dia 20 as concentrações foram significativamente menores.

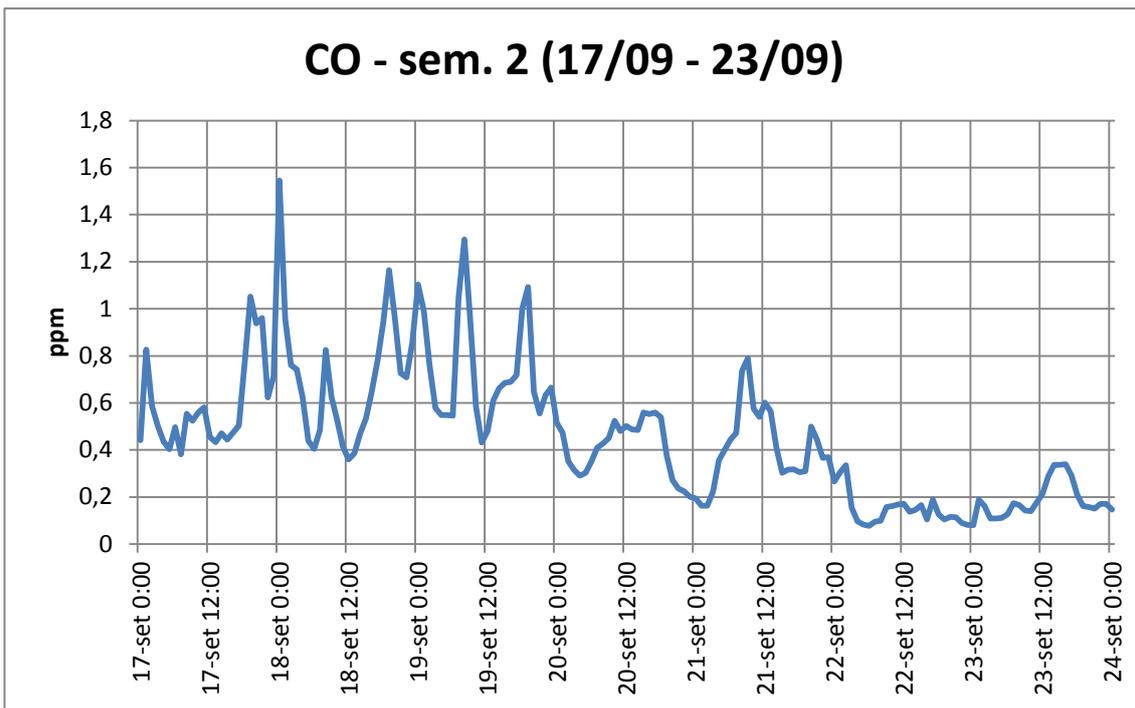


Figura 4.6. Perfil semanal da concentração do CO para a semana 2. Dados em médias horárias.

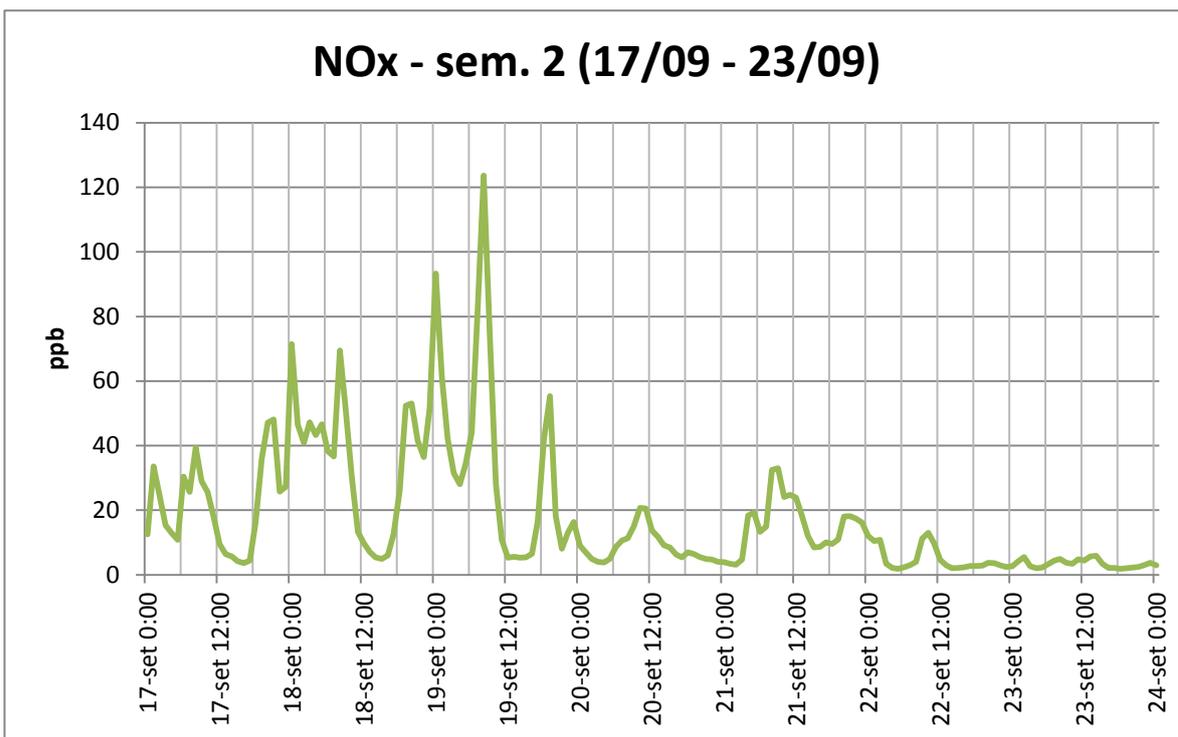


Figura 4.7. Perfil semanal da concentração do NO_x para a semana 2. Dados em médias horárias.

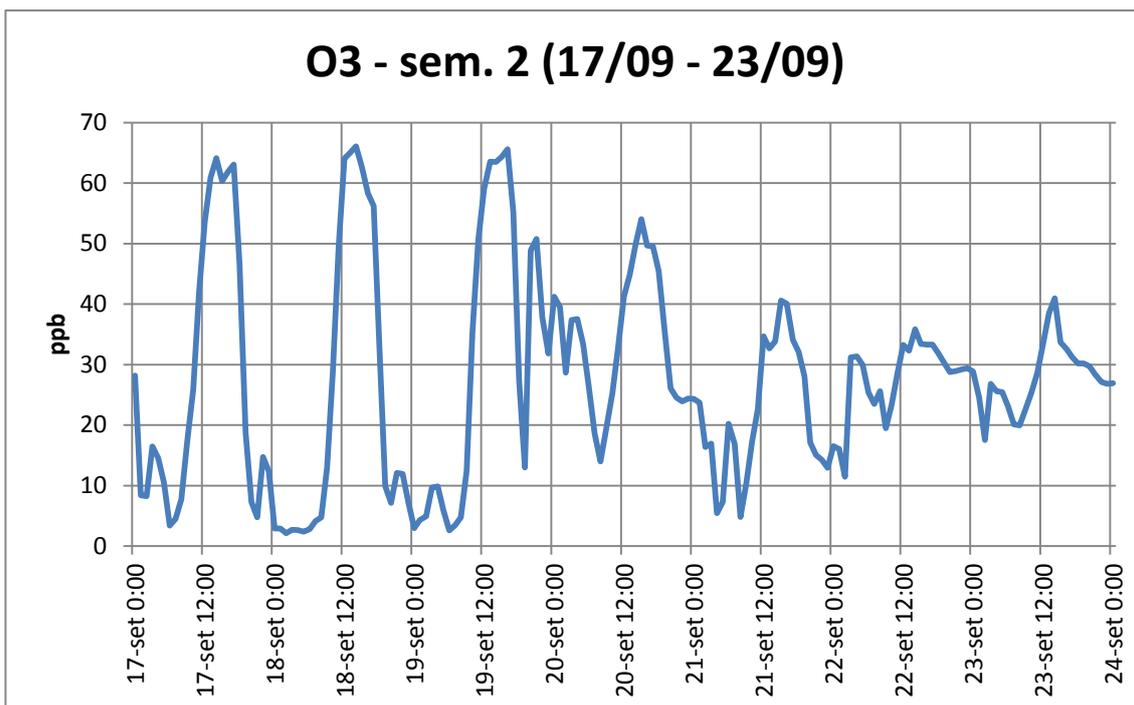


Figura 4.8. Perfil semanal da concentração do O₃ para a semana 2. Dados em médias horárias.

No caso do O₃ a queda em sua concentração a partir do dia 20 se deve principalmente pela diminuição de radiação incidente por efeito da nebulosidade presente nesses dias, assim como de maneira indireta, pela queda na concentração de seus precursores.

No dia 24 um cavado propiciou a formação de nuvens tipo Cumulus que passaram pelo Vale do Paraíba pela tarde, diminuindo a quantidade de radiação recebida, mas mantendo a temperatura alta e sem muitos ventos.

Uma intensa massa de ar frio contendo uma forte massa de ar polar alcançou São José dos Campos nos dias 25 e 26, havendo no episódio espessa cobertura de nuvens com presença de precipitação e queda acentuada da temperatura, tornando os dias posteriores os mais frios do período monitorado (médias diárias de 12 e 13°C e mínimas abaixo de 8°C pelas manhãs), além de ventos constantes e moderados (de 2 a 4 m/s) pela tarde do dia 25, entre 13:40 e 19:00. Ainda no dia 27 houve pequena precipitação e cobertura moderada de nuvens. A frente pode ser vista na imagem de satélite realçada da noite do dia 25 (Figura 4.9). Importante citar que a precipitação total do evento foi a menor

de todas comparando com outros eventos de precipitação induzidas por passagem de frentes: 3,4 mm divididos em três dias.

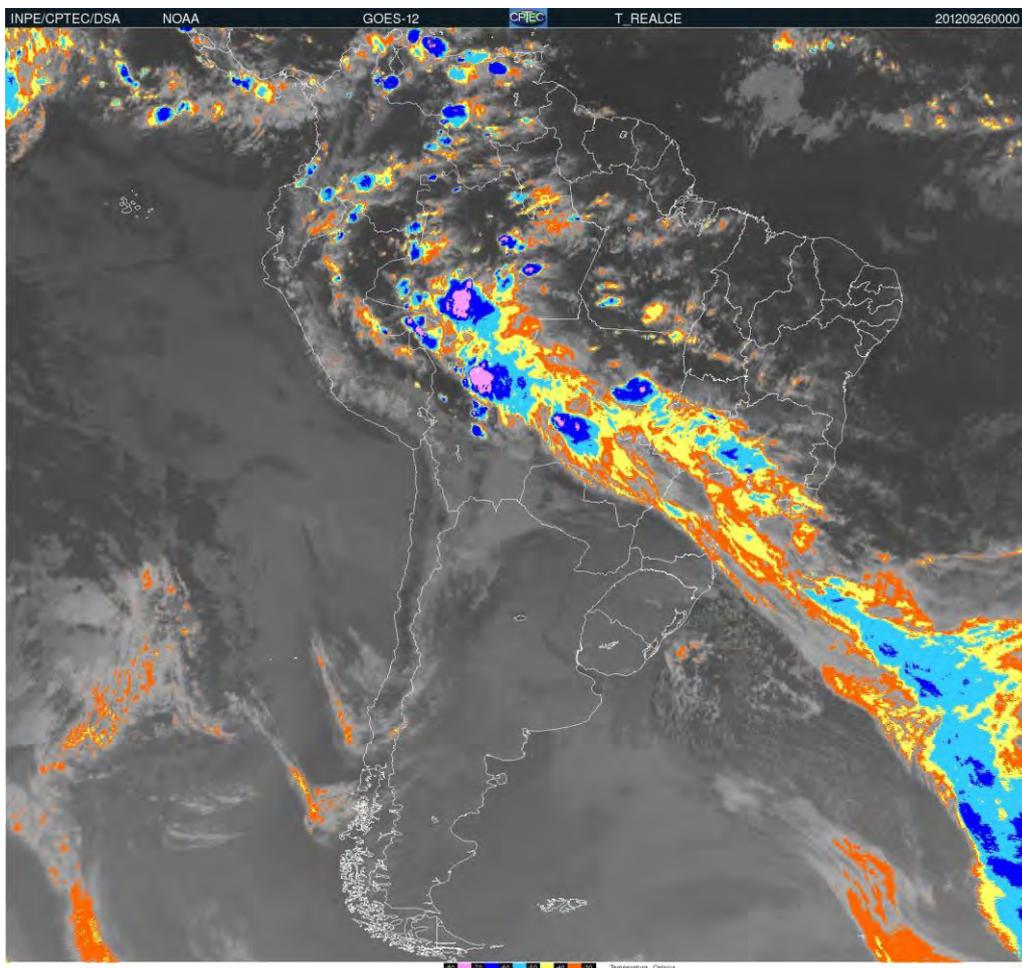


Figura 4.9. Imagem de satélite realçada de frente fria sobre o sudeste e centro-oeste do Brasil na noite do dia 25 de setembro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

Pode-se notar um comportamento geral de todos os poluentes monitorados de que no dia 26 os valores se mantiveram mínimos, seguidos de concentrações também baixas até o dia 30. De todos os poluentes, o que retomou mais rápido a sua concentração média de antes do evento de dispersão foi o ozônio, chegando a apresentar um valor alto já no dia 30 ($113 \mu\text{g}/\text{m}^3$). O CO apresentou a menor média semanal de todo o período de monitoramento na semana que contém esse evento (Semana 3, de 24/09 a 30/09), com média de 0,25 ppm. Os efeitos desse evento são ilustrados nos perfis dos poluentes nas figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13.

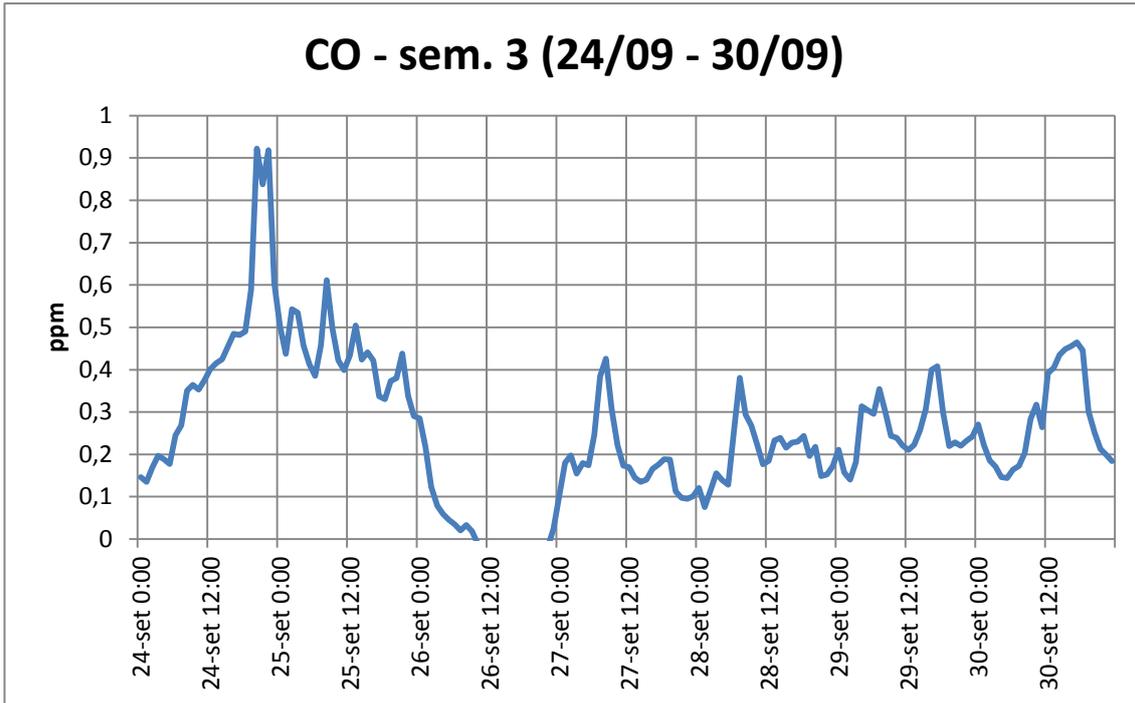


Figura 4.10. Perfil semanal da concentração do CO para a semana 3. Dados em médias horárias.

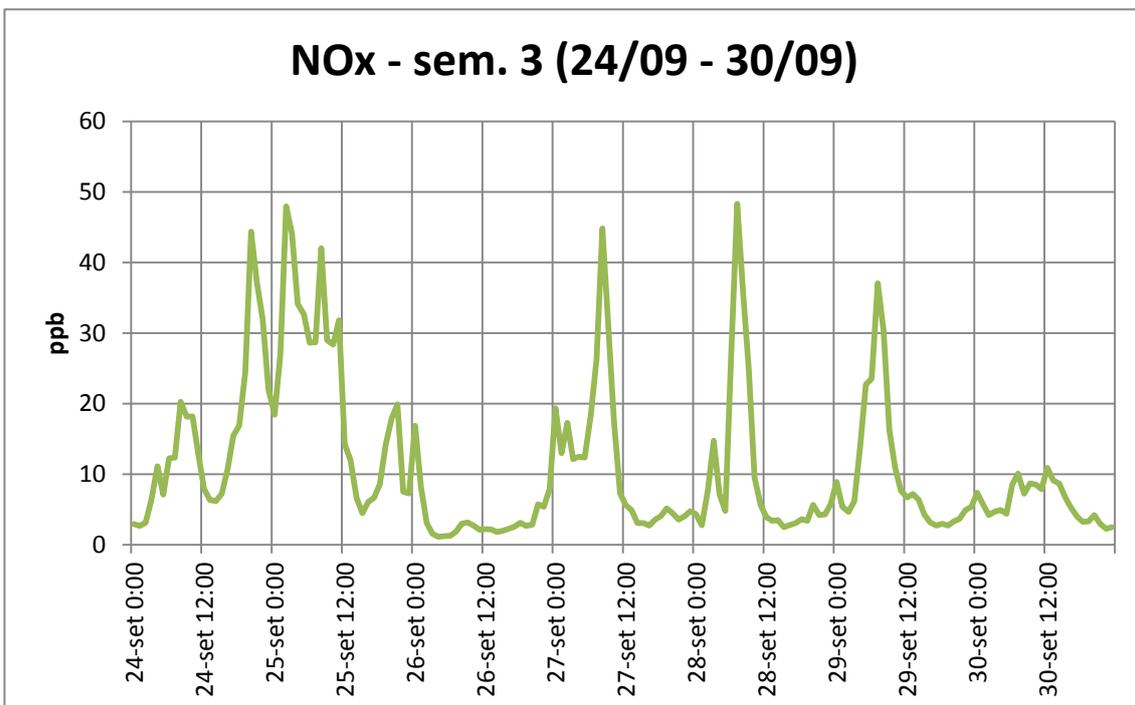


Figura 4.11. Perfil semanal da concentração do NO_x para a semana 3. Dados em médias horárias.

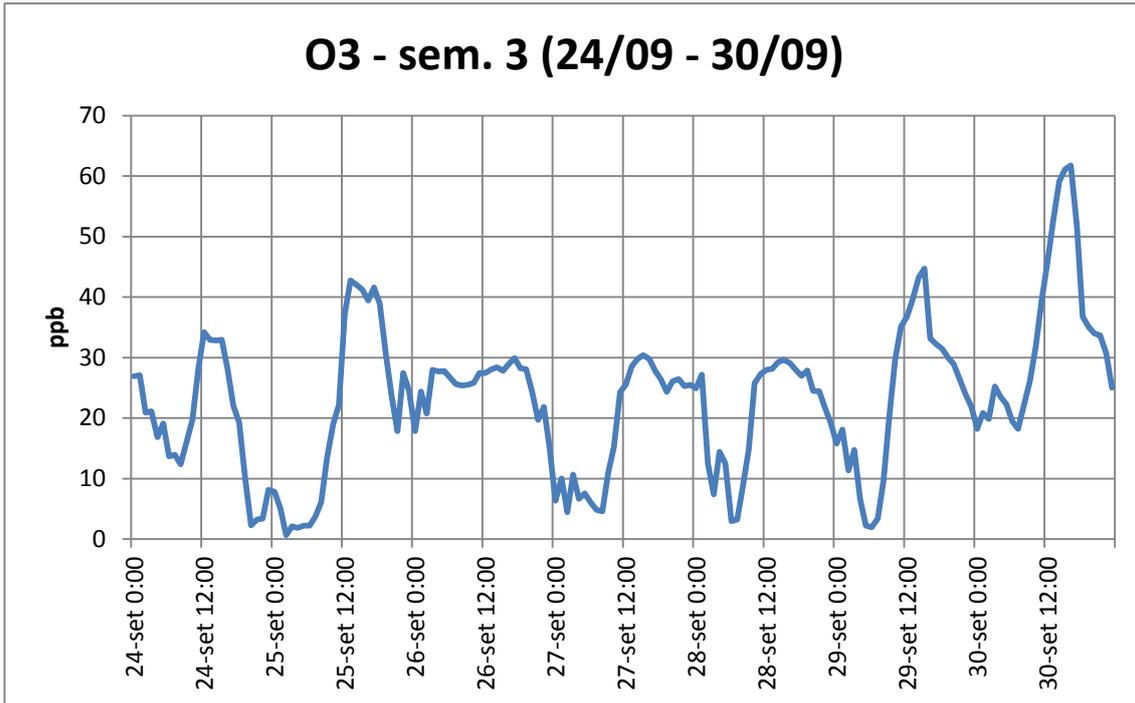


Figura 4.12. Perfil semanal da concentração do O₃ para a semana 3. Dados em médias horárias.

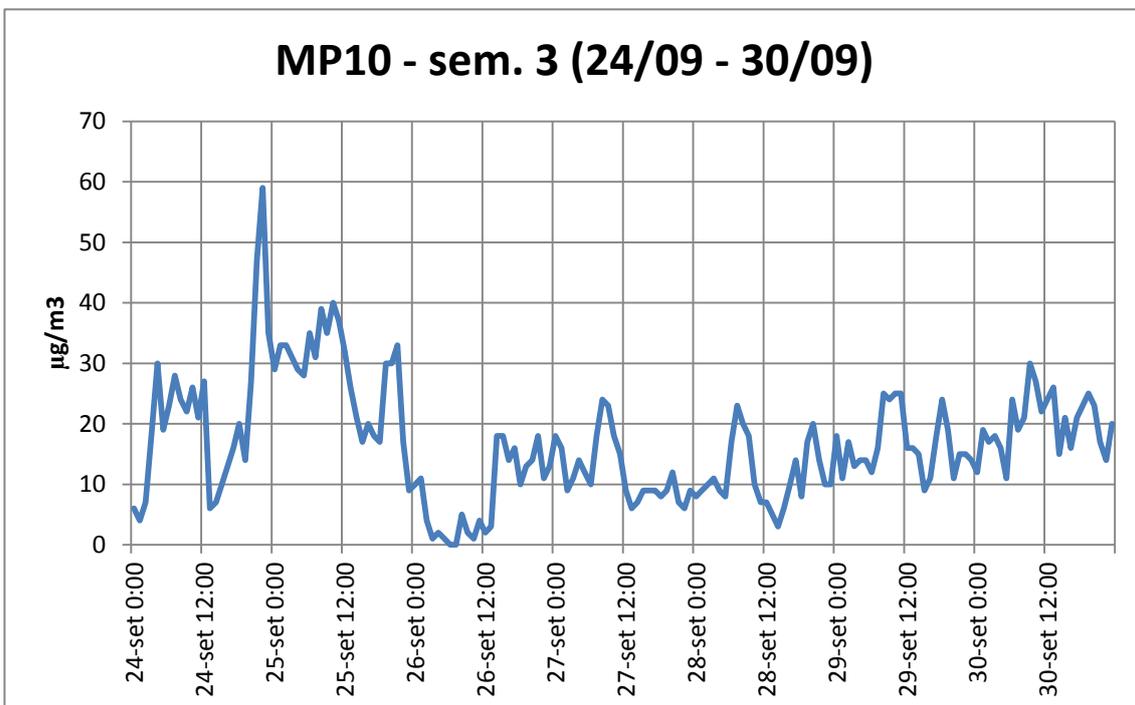


Figura 4.13. Perfil semanal da concentração de material particulado menor que 10 µm para a semana 3. Dados em médias horárias.

4.2.1.2 Outubro

Na noite do dia 10 e madrugada do dia 11 de outubro uma frente fria alcançou São José dos Campos, trazendo a primeira chuva significativa da primavera (21,6 mm, principalmente concentrados na tarde do dia 12), marcando definitivamente o final da temporada seca e deixando os dias 11, 12 e 13 nublados. Ventos moderados mantiveram constância nos dias 10, 11 e 14, já os dias 12 e 13 contaram com ventos fortes (maiores que 10 m/s) por todo o dia. Uma imagem de satélite realçada da noite do dia 10 mostra a dianteira da frente fria alcançando a área do Vale do Paraíba (Figura 4.14).

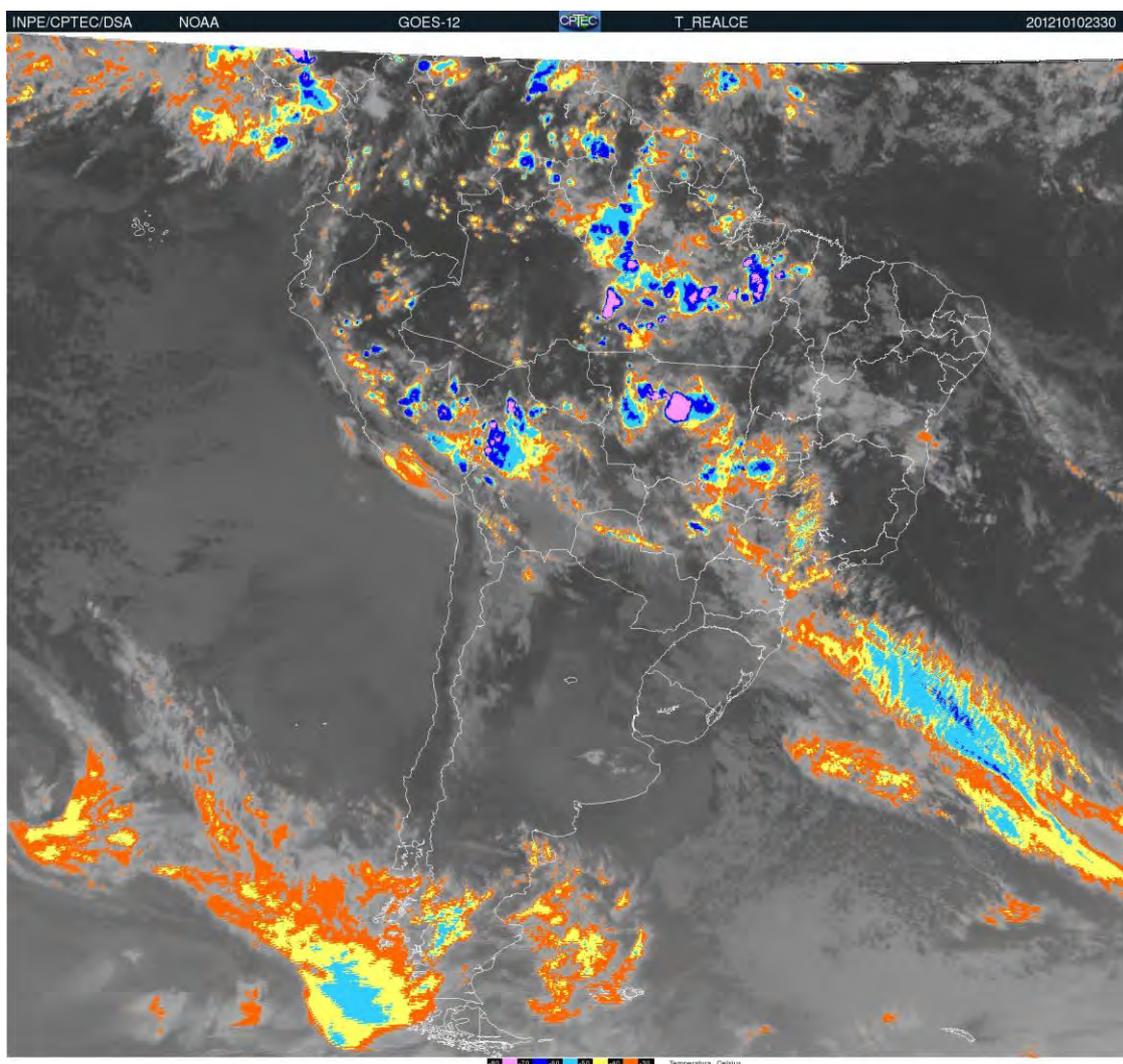


Figura 4.14. Imagem de satélite realçada de frente fria sobre o sudeste e centro-oeste do Brasil na noite do dia 10 de outubro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

Pode-se notar pelos dados que as concentrações de todos os gases diminuíram significativamente a partir do dia 11. Os perfis do CO, NO_x, O₃ e MP10 podem ser visualizados nas figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18.

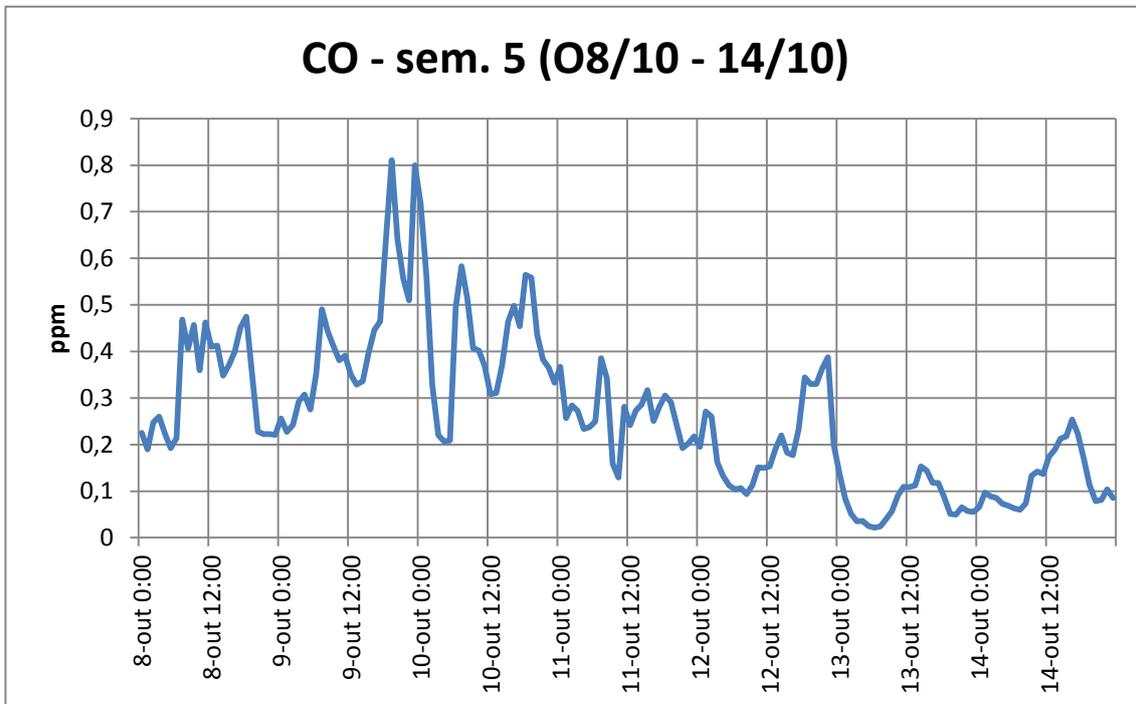


Figura 4.15. Perfil semanal da concentração do CO para a semana 5. Dados em médias horárias.

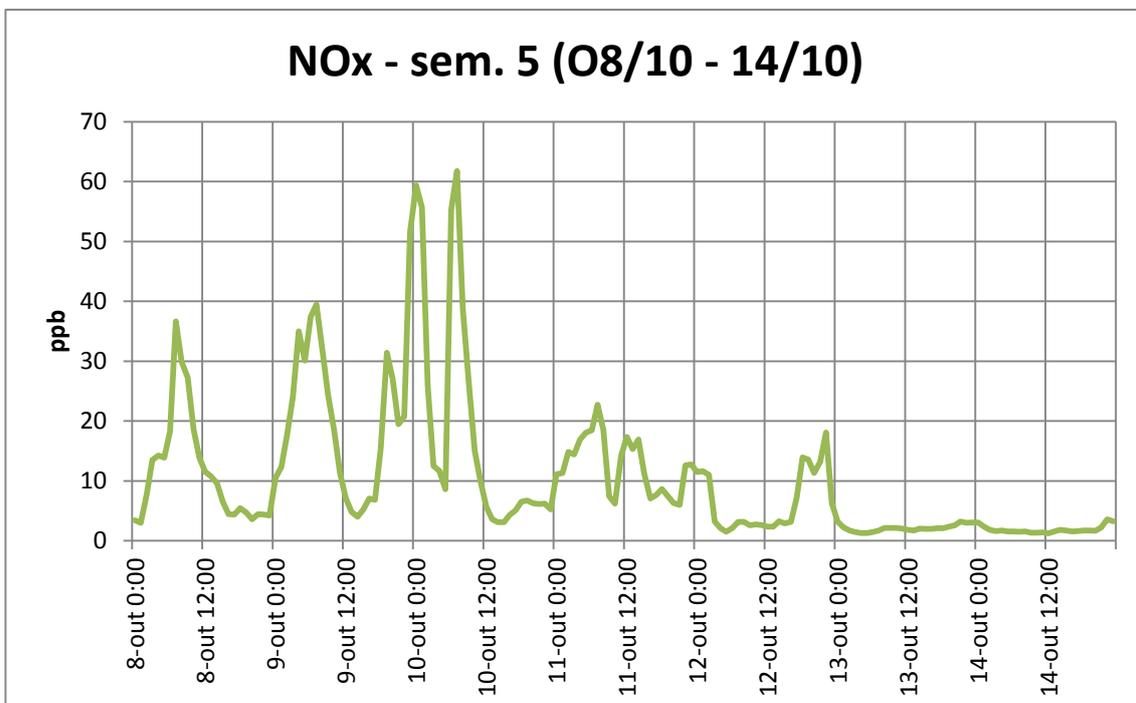


Figura 4.16. Perfil semanal da concentração do NO_x para a semana 5. Dados em médias horárias.

Como diferencial esse evento de dispersão apresentou ventos muito mais fortes dos que então observados, concentrados principalmente entre o fim da tarde do dia 12 até a manhã do dia 13, mantendo médias de 10 min maiores que 8 m/s, e direção predominante de sudoeste.

Na tarde do dia 16 de outubro uma nova frente fria alcançou São José dos Campos, deixando o dia 17 nublado e com ocorrência de precipitação (9,2 mm), o que deixou o dia bem úmido. No entanto grandes mudanças na concentração dos poluentes não foram visualizadas, talvez pelos valores já baixos que vinham apresentando desde a semana anterior e a frente do dia 10. Vale a menção de que o O₃ apresentou níveis baixos de concentração no dia 17, no entanto creditado mais à ausência de radiação disponível para ativação de seu ciclo fotoquímico do que dispersão de seus precursores.

Um ciclone extratropical se formou no Uruguai no dia 22 e deu origem a uma frente fria que atuou até o dia 24, quando alcançou o litoral do sudeste (Figura 4.19). Esse ciclone atingiu o valor de 975 hPa no Atlântico a leste do Uruguai, um dos mais intensos das últimas duas décadas (INPE.CPTEC, 2012 a). No entanto, entre as manhãs dos dias 22 e 24 o CONSOLIDAR estava desativado para que uma equipe de manutenção pudesse instalar o monitor de SO₂ e os sensores meteorológicos, além de recalibrar os demais monitores. De forma que os dados dessa semana (7) estão incompletos.

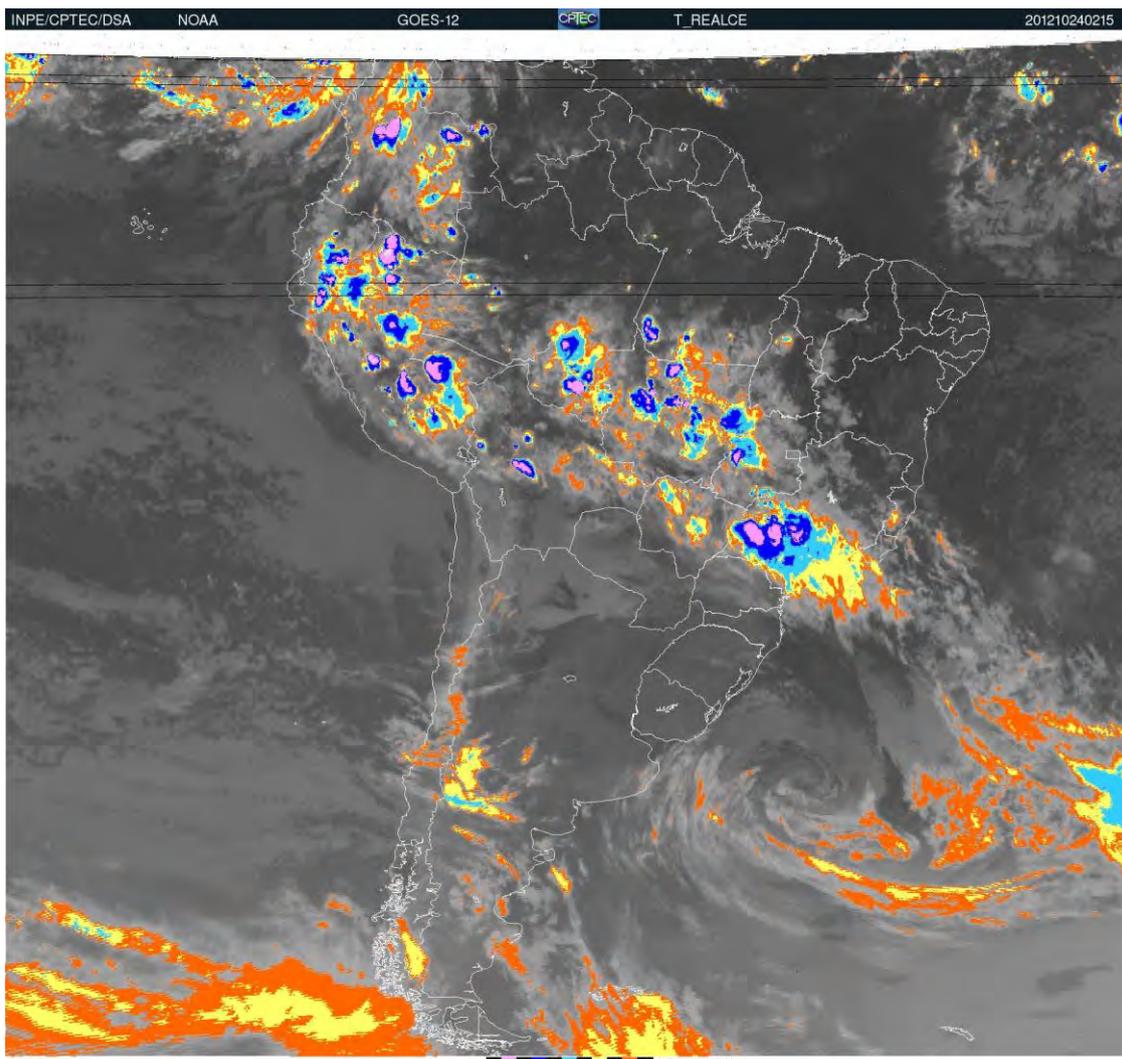


Figura 4.19. Imagem de satélite realçada de frente fria na noite do dia 24 de outubro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

Embora tenha havido precipitação significativa no dia 23 (36 mm) não houve presença de ventos fortes durante esse evento, o que contribuiu para que não houvesse grandes mudanças nas concentrações dos poluentes, com exceção dos NO_x , que mantiveram concentrações baixas (menores que 15 ppb) excluindo alguns picos nos dias 26 e 28 (Figura 4.20).

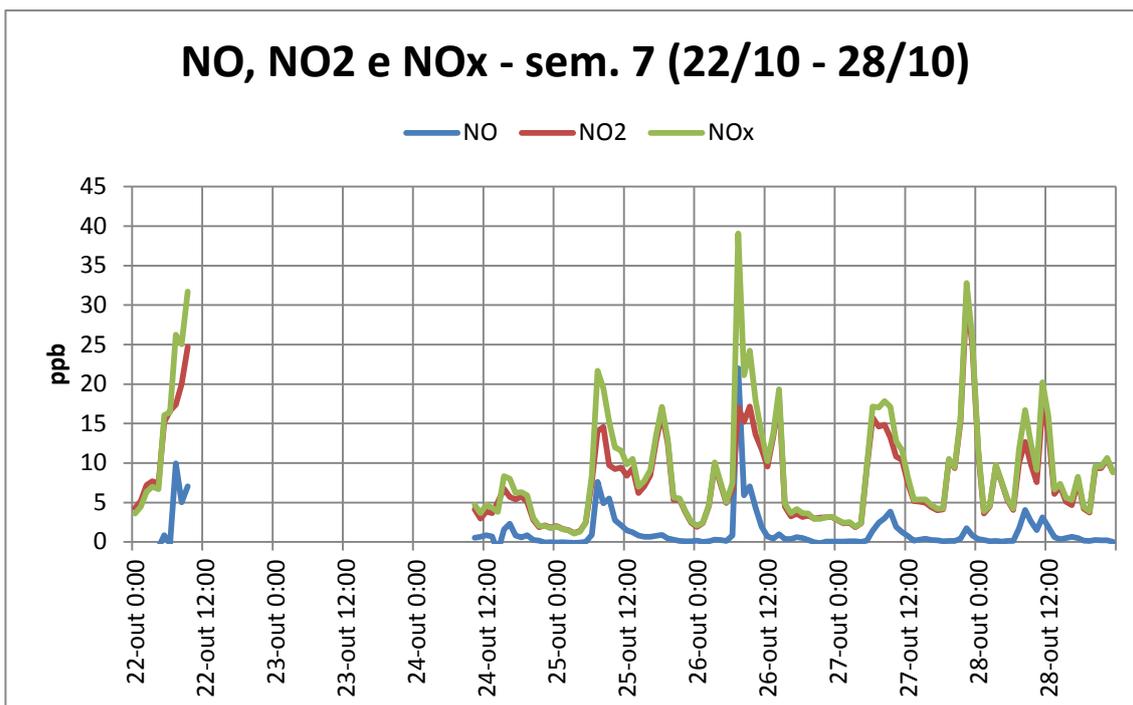


Figura 4.20. Perfil semanal da concentração dos NO_x para a semana 7. Dados em médias horárias. O CONSOLIDAR estava desativado entre os dias 22 e 24.

No dia 28 também houve ocorrência de precipitação forte (40,8 mm), decorrente de convergência de umidade. Entretanto não houve ocorrência de ventos fortes e a influência nos poluentes foi pequena, apenas diminuindo um pouco no dia 29 a concentração dos NO_x e dos materiais particulados.

4.2.1.3 Novembro

A presença da Alta da Bolívia e um canal de umidade entre o Atlântico e o centro-oeste brasileiro deixaram os primeiros dias de novembro instáveis, havendo precipitação acumulada de 11 mm entre os dias 31 de outubro e 1 de novembro. Embora não houvesse rajadas fortes nesse episódio, a velocidade do vento se manteve numa velocidade moderada (entre 2 e 4 m/s) por um longo período de tempo (períodos de 11:00 - 16:00 e 21:00 - 24:00 do dia 31 e 13:00 - 20:00 do dia 1). Ainda o dia 2 permaneceu bastante nublado e os dias 3, 4 e 5 com presença intensa de nuvens. As concentrações dos gases que vinham atingindo altos valores diminuíram bastante depois desse episódio. Os perfis dos poluentes CO, NO_x, O₃, SO₂ e materiais particulados podem ser visualizados nas figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24 e 4.25 respectivamente.

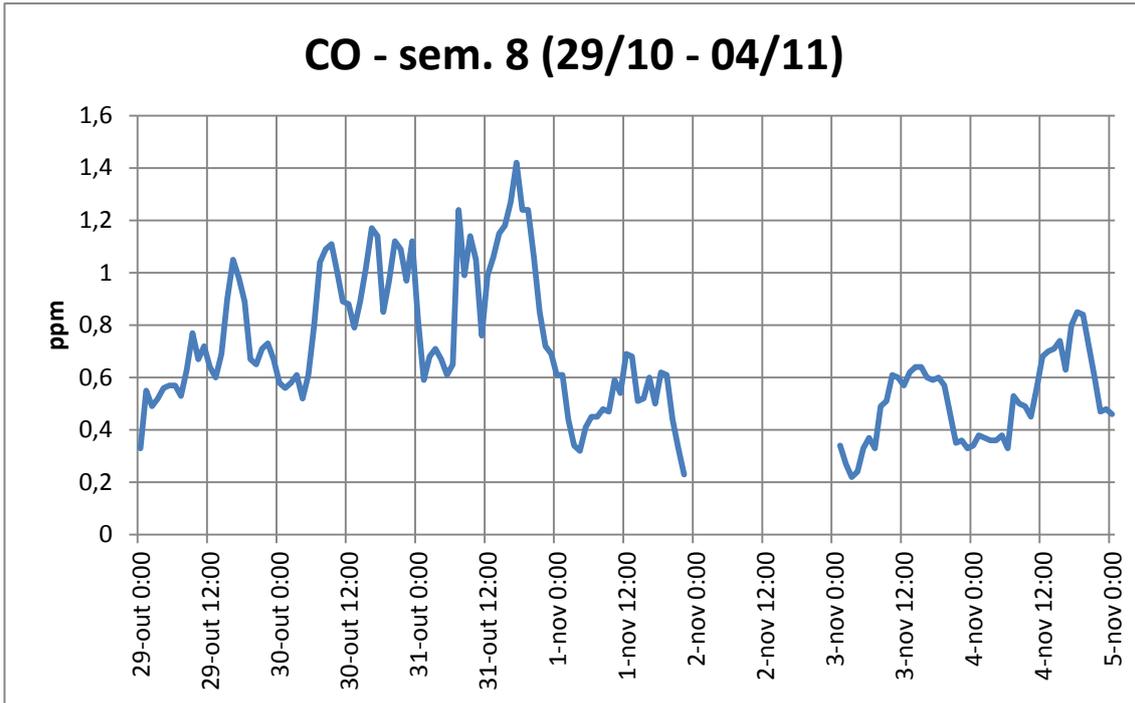


Figura 4.21. Perfil semanal da concentração do CO para a semana 8. Dados em médias horárias. Lacunas representam dados inválidos.

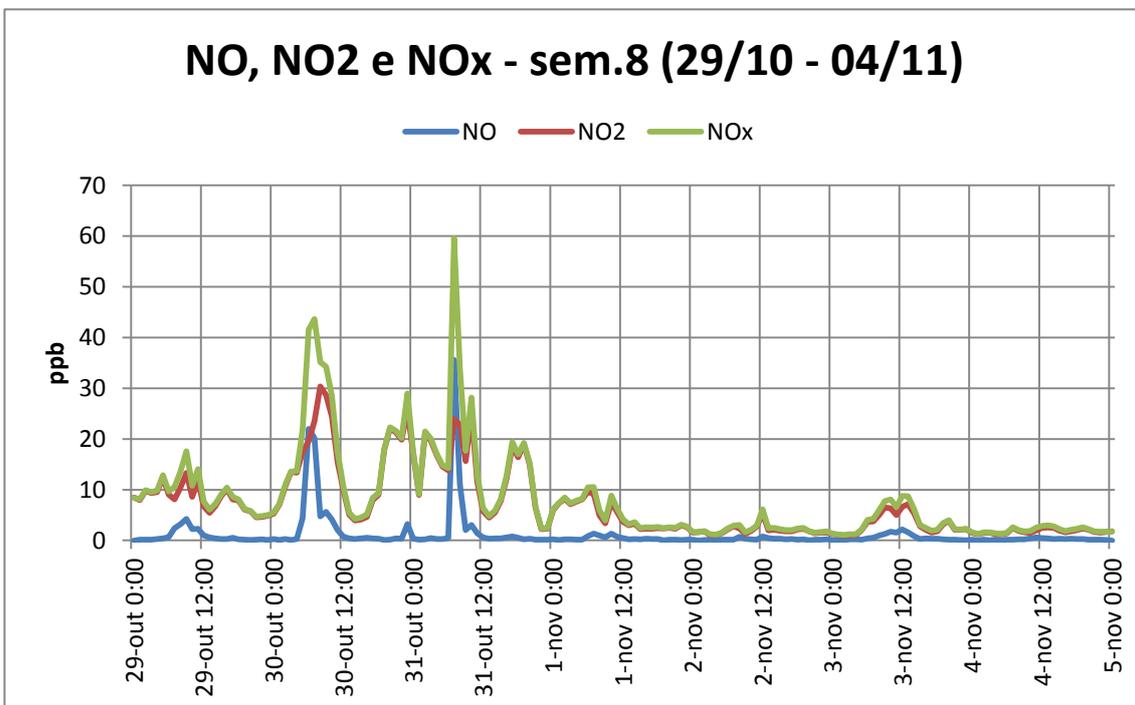


Figura 4.22. Perfil semanal da concentração dos NO_x para a semana 8. Dados em médias horárias.

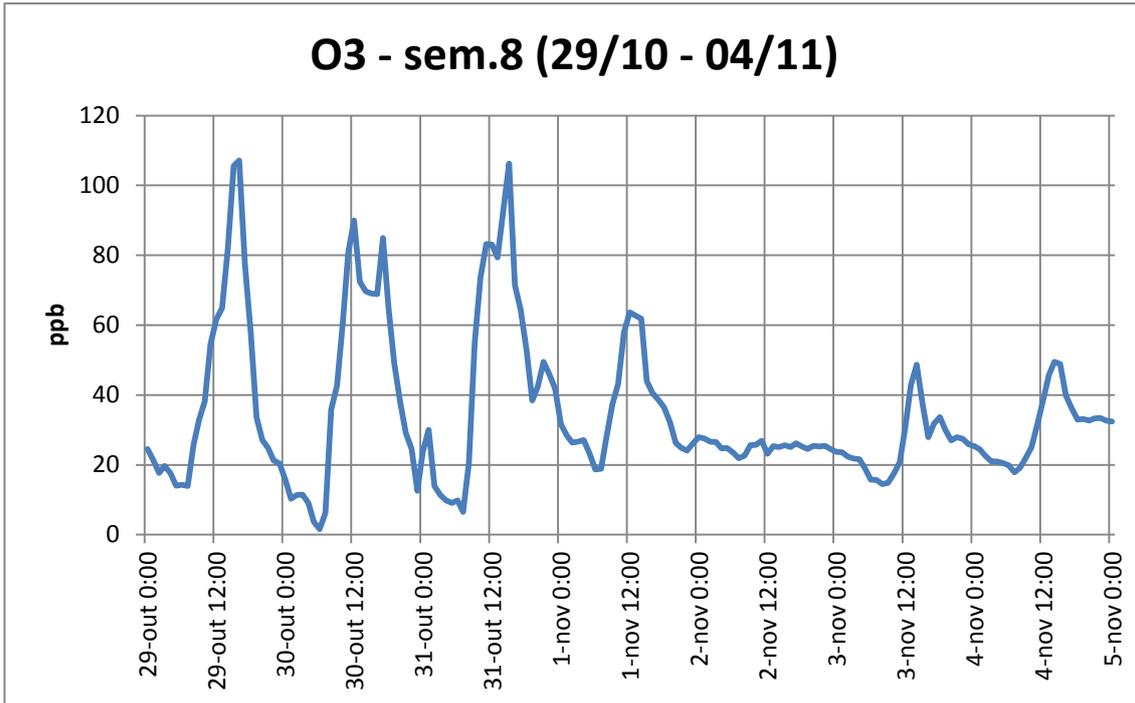


Figura 4.23. Perfil semanal da concentração do O₃ para a semana 8. Dados em médias horárias.

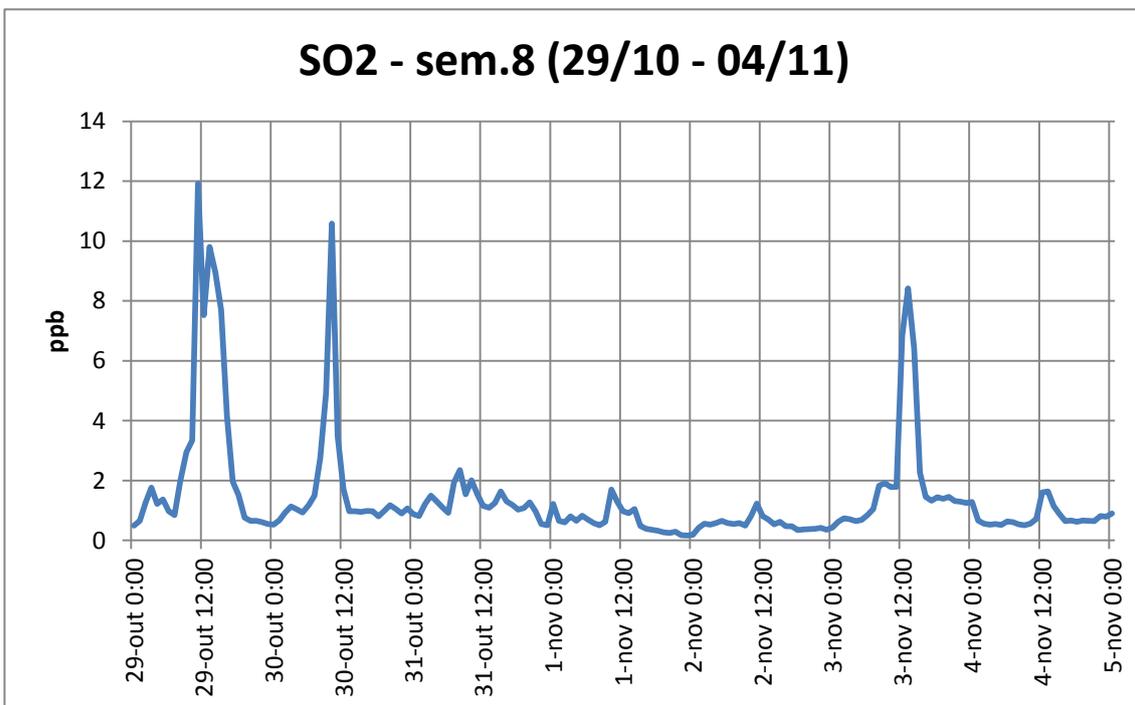


Figura 4.24. Perfil semanal da concentração do SO₂ para a semana 8. Dados em médias horárias.

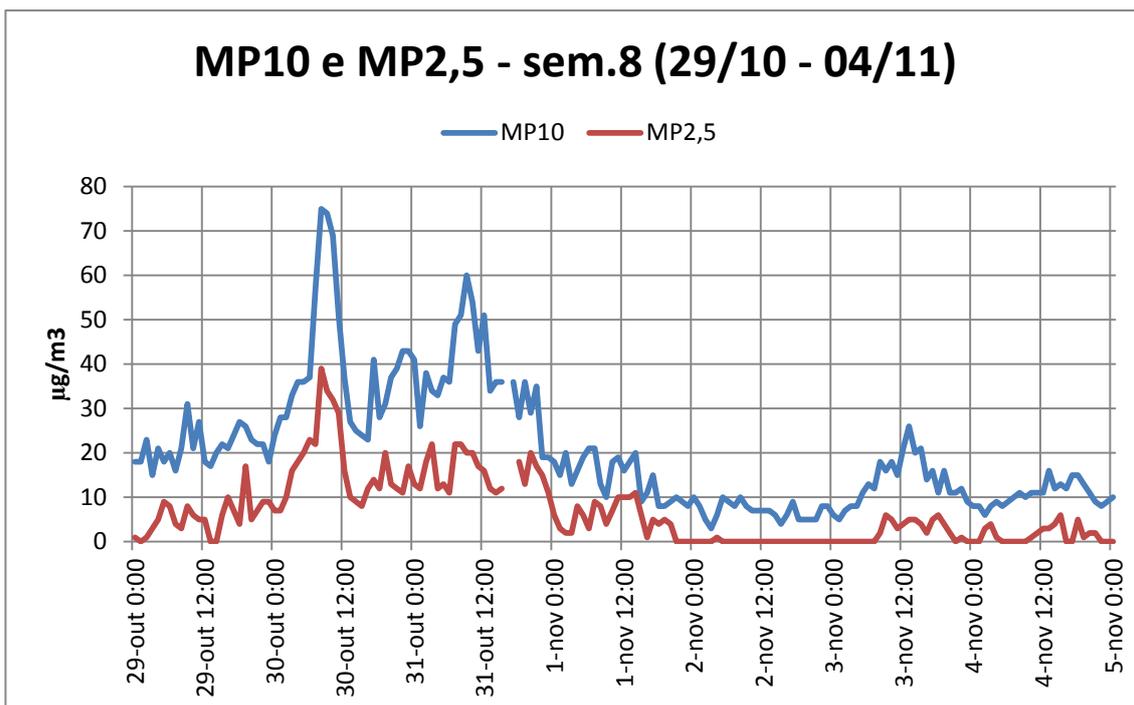


Figura 4.25. Perfil semanal da concentração dos materiais particulados menores que 10 e 2,5 µm para a semana 8. Dados em médias horárias.

Analisando as imagens de satélite é possível ver que houve circulação forte e frequente sobre o Vale do Paraíba a partir do dia 1 de outubro.

No dia 9 a precipitação acumulada foi de 53,2 mm, produto de um cavado que se propagou desde o norte da Argentina até o centro-oeste e sudeste brasileiros (INPE.CPTEC, 2012 c). Uma imagem de satélite realçada mostra a situação na Figura 4.26. Foi a chuva mais forte do mês. Ventos fortes foram ausentes, mas principalmente no dia 10 um vento moderado (entre 2 e 3 m/s) mas constante ajudou a dispersar os poluentes.

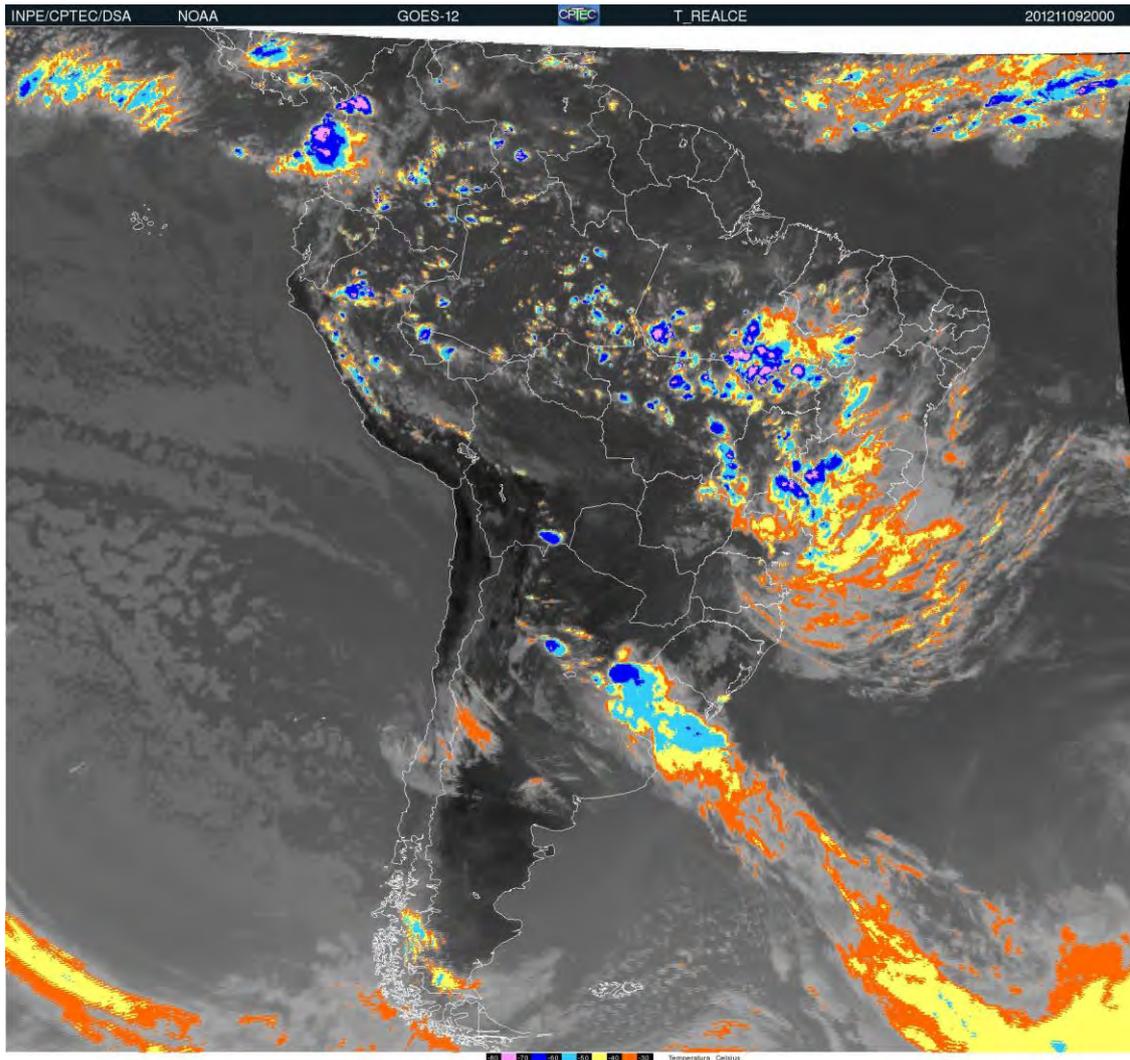


Figura 4.26. Imagem de satélite realçada de cavado se dissipando no sudeste brasileiro no dia 9 de novembro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

De maneira mais visível apenas os materiais particulados foram alterados, como pode ser visualizado na Figura 4.27, embora de maneira geral os outros também tenham baixado seus níveis nos dias 10 e 11.

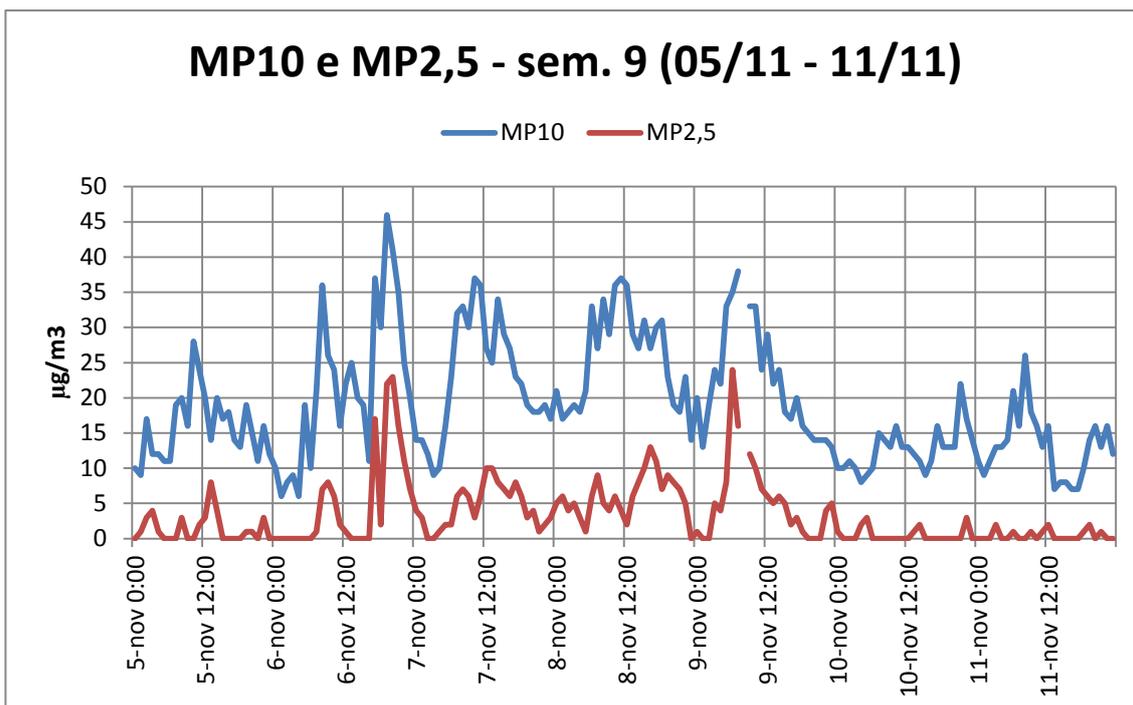


Figura 4.27. Perfil semanal da concentração dos materiais particulados menores que 10 e 2,5 µm para a semana 9. Dados em médias horárias.

Uma frente fria passou pela região do Vale do Paraíba entre os dias 12 e 13 de novembro (Figura 4.28), causando nebulosidade nos dias 13, 14 e 15, e precipitação total de 16 mm entre os dias 12 e 15. A nebulosidade prolongada resultou numa queda de radiação recebida e manteve esses dias úmidos e com temperatura mais amena, com médias abaixo de 20°C e máximas abaixo de 25°C. Ventos moderados e constantes por longos períodos ocorreram nos dias 12, 13 e 16. Considerando as médias semanais calculadas, a semana 10 (12/11 a 18/11) que contém esse episódio apresentou a menor média semanal para todos os poluentes com exceção do CO, que teve sua menor média na semana 3. A isso se associa não somente a frente fria do dia 12, mas também as duas semanas anteriores que contaram com eventos de dispersão potentes - principalmente o do dia 1 - o que impediu o acúmulo do que era emitido pelas fontes e favoreceu uma diminuição gradual na concentração dos poluentes.

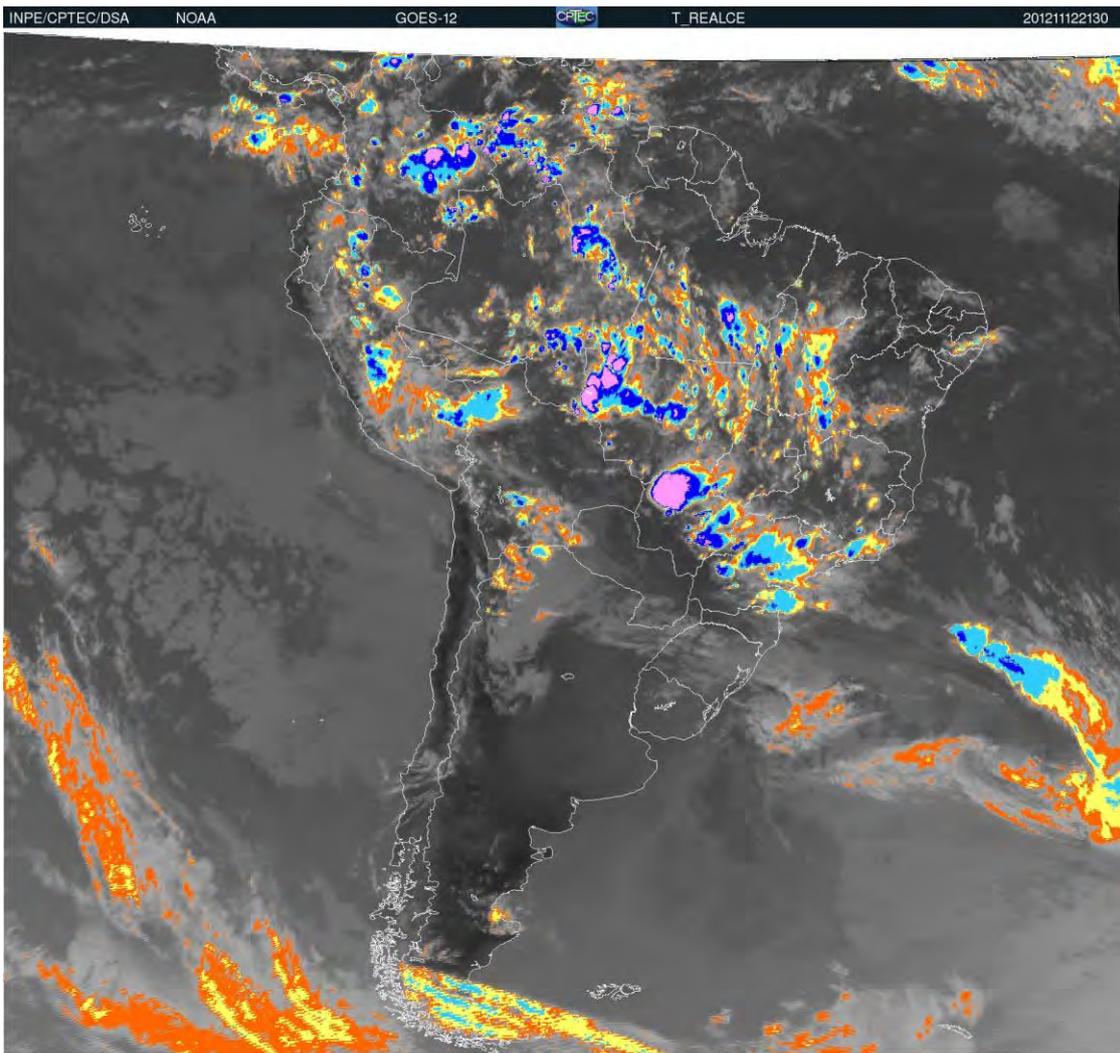


Figura 4.28. Imagem de satélite realçada de frente fria sobre sul e sudeste brasileiro na noite do dia 12 de novembro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

Os perfis semanais do O_3 e NO_x , CO , SO_2 e materiais particulados são apresentados nas figuras 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32 respectivamente.

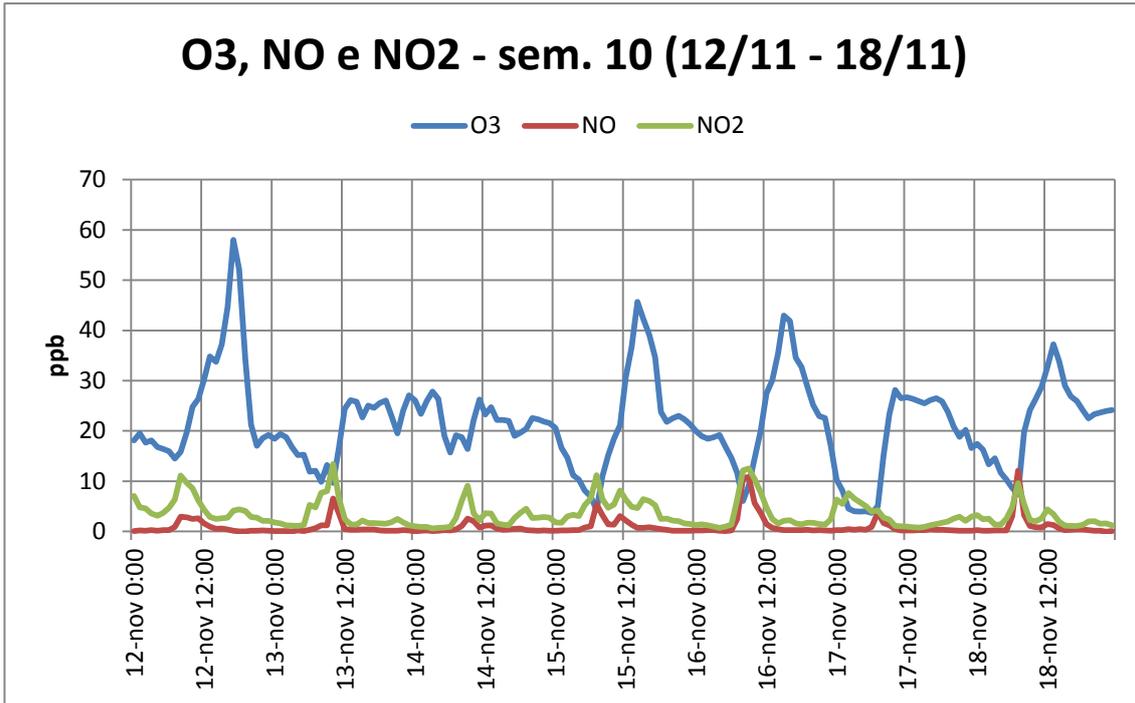


Figura 4.29. Perfil semanal da concentração do O3 e dos NO_x para a semana 10. Dados em médias horárias.

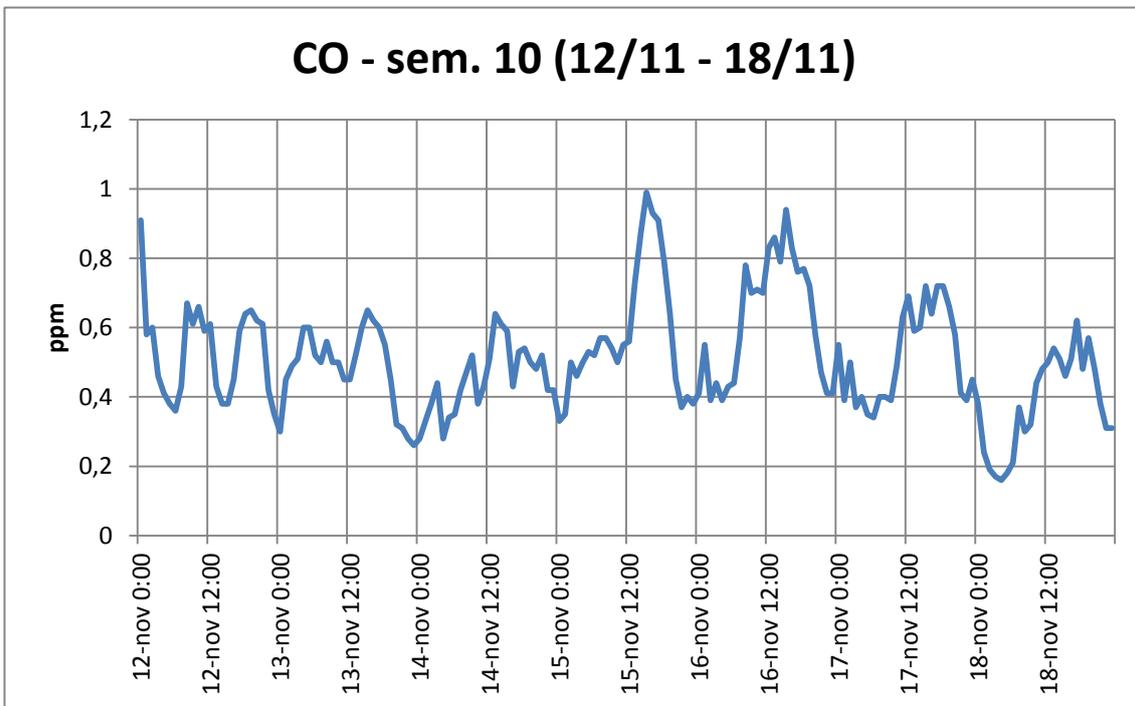


Figura 4.30. Perfil semanal da concentração do CO para a semana 10. Dados em médias horárias.

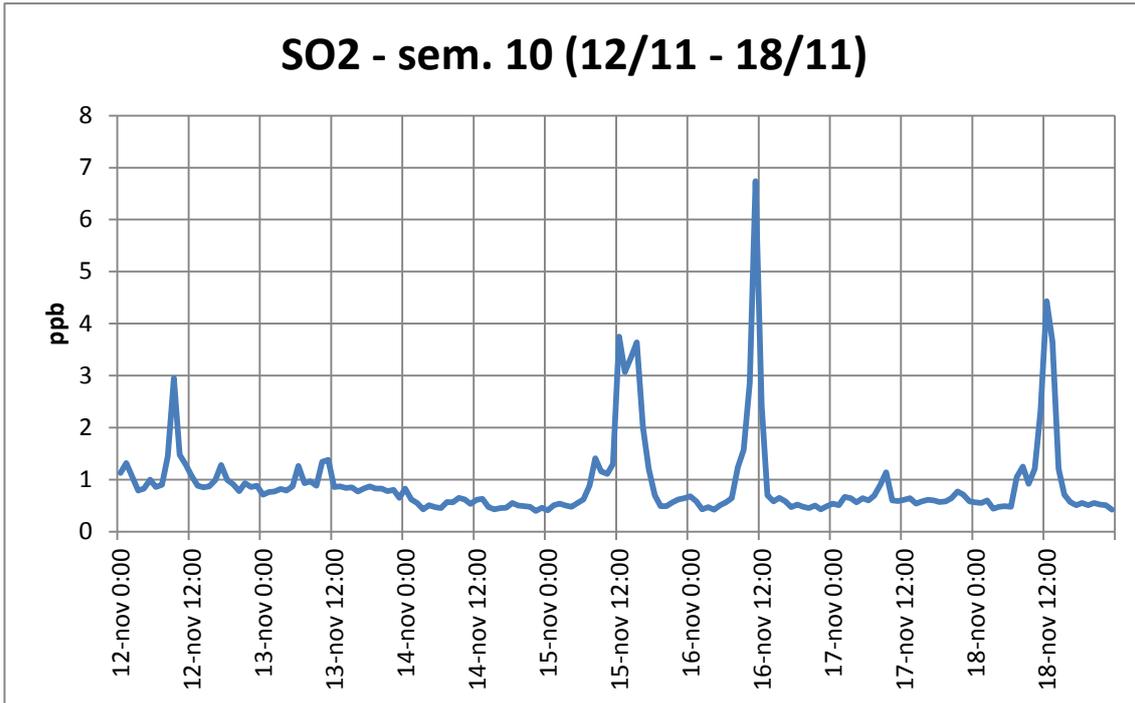


Figura 4.31. Perfil semanal da concentração do SO₂ para a semana 10. Dados em médias horárias.

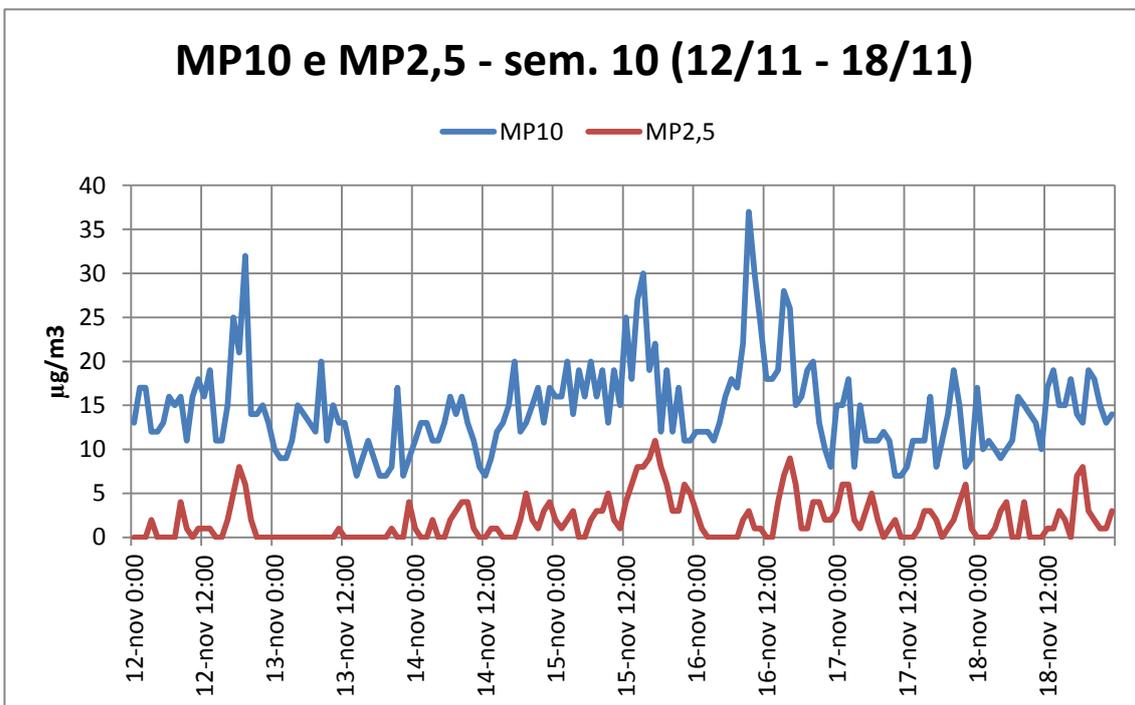


Figura 4.32. Perfil semanal da concentração dos materiais particulados menores que 10 e 2,5 µm para a semana 10. Dados em médias horárias.

Essa mesma frente do dia 12 reforçou o canal de umidade entre o Espírito Santo, Bahia e sudeste do Amazonas formando o primeiro episódio de ZCAS

(Zona de Convergência do Atlântico Sul) da estação nos dias 13/14 e 17/18. Na mesma região continuou havendo convergência de umidade, agora na forma de ZCOU (Zona de Convergência de Umidade), que durou do dia 19 até o dia 23 (INPE.CPTEC, 2012, c). Certa umidade chegou na região norte do estado de São Paulo e nos dias 19 e 20 houve nebulosidade e precipitação total de 10 mm em São José dos Campos. Uma imagem de satélite realçada mostra a situação na noite do dia 19 na Figura 4.33.

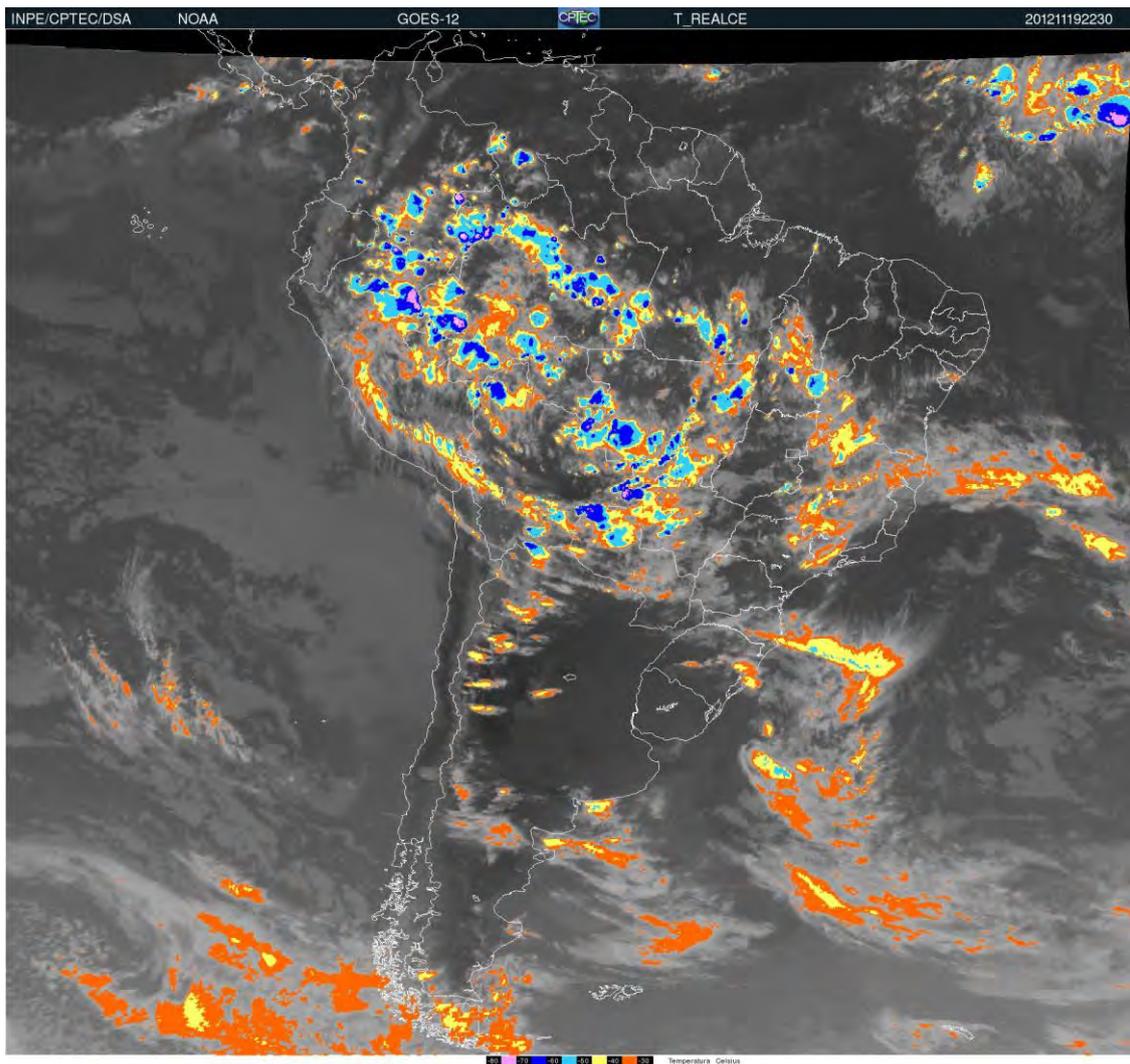


Figura 4.33. Imagem de satélite realçada de um episódio de ZCOU na noite do dia 19 de novembro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

Ventos fracos (menores que 2 m/s) dominaram esse período e a concentração dos poluentes não se alterou de maneira significativa em relação à esse episódio.

Entre os dias 21 e 23 é possível visualizar pelas imagens de satélite que a região do Vale do Rio Paraíba do Sul teve pouca circulação de umidade, tornando os dias 22 e 23 os mais secos do mês, alcançando umidade mínima de 24% e 18% respectivamente e apresentando temperaturas acima de 35°C no dia 23. Como consequência houve uma degradação do quadro anterior, com a média de todos os poluentes subindo em relação à da semana anterior. No dia 23 era possível visualizar uma camada de particulados sobre a cidade. A Figura 4.34 ilustra essa situação.

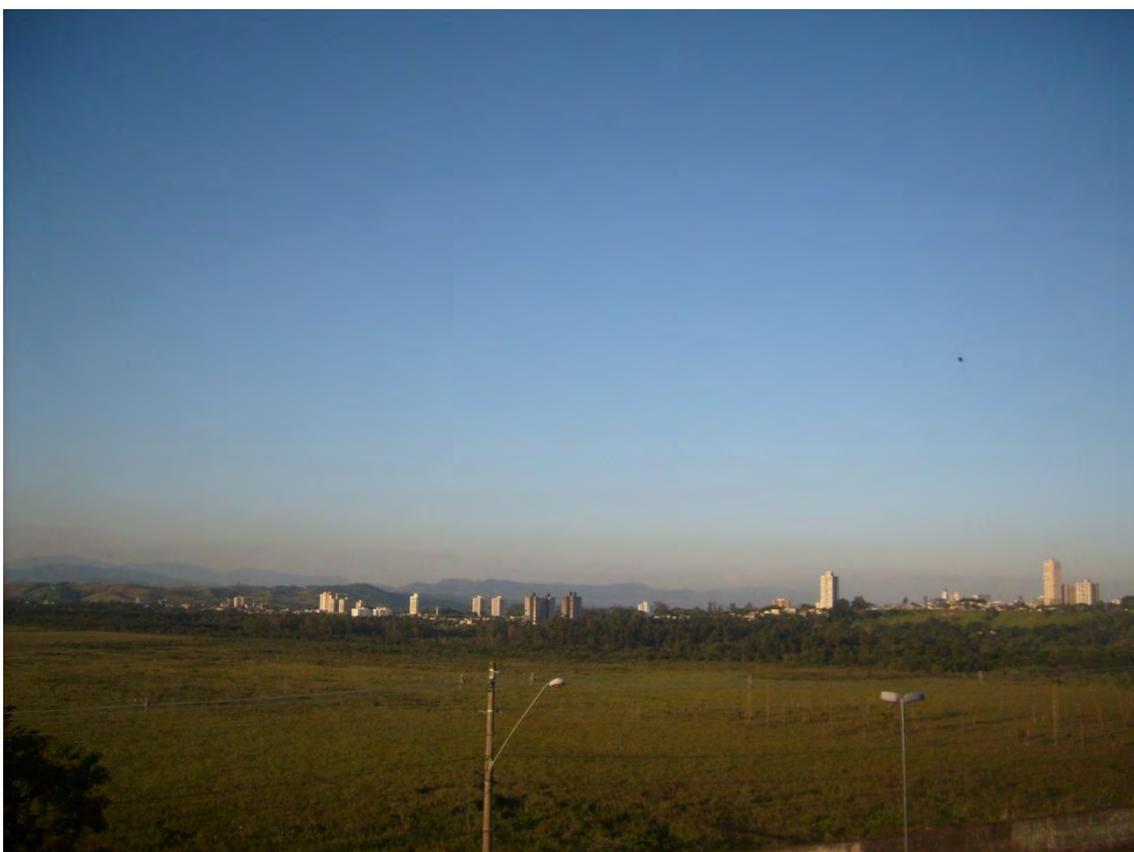


Figura 4.34. Foto tirada no final da tarde do dia 23 de novembro da Av. Anchieta, ao lado do Banhado. É possível visualizar uma camada de particulados próxima à superfície sobre a cidade. À direita da foto o centro da cidade, à esquerda a zona norte.

Uma nova frente fria alcançou São José dos Campos no dia 24, no entanto problemas com o abastecimento de energia do container que abriga o laboratório indisponibilizaram os dados entre o dia 24 e o dia 26.

Na madrugada do dia 29 um Complexo Convectivo de Mesoescala se formou no norte da Argentina e se deslocou para o Paraguai ainda pela manhã. A

dissipação desse complexo trouxe umidade para o centro-oeste e sudeste brasileiro, trazendo nuvens de grande porte ao Vale do Rio Paraíba do Sul e litoral norte de São Paulo na madrugada do dia 30 (Figura 4.35). O vento permaneceu fraco nesse período.

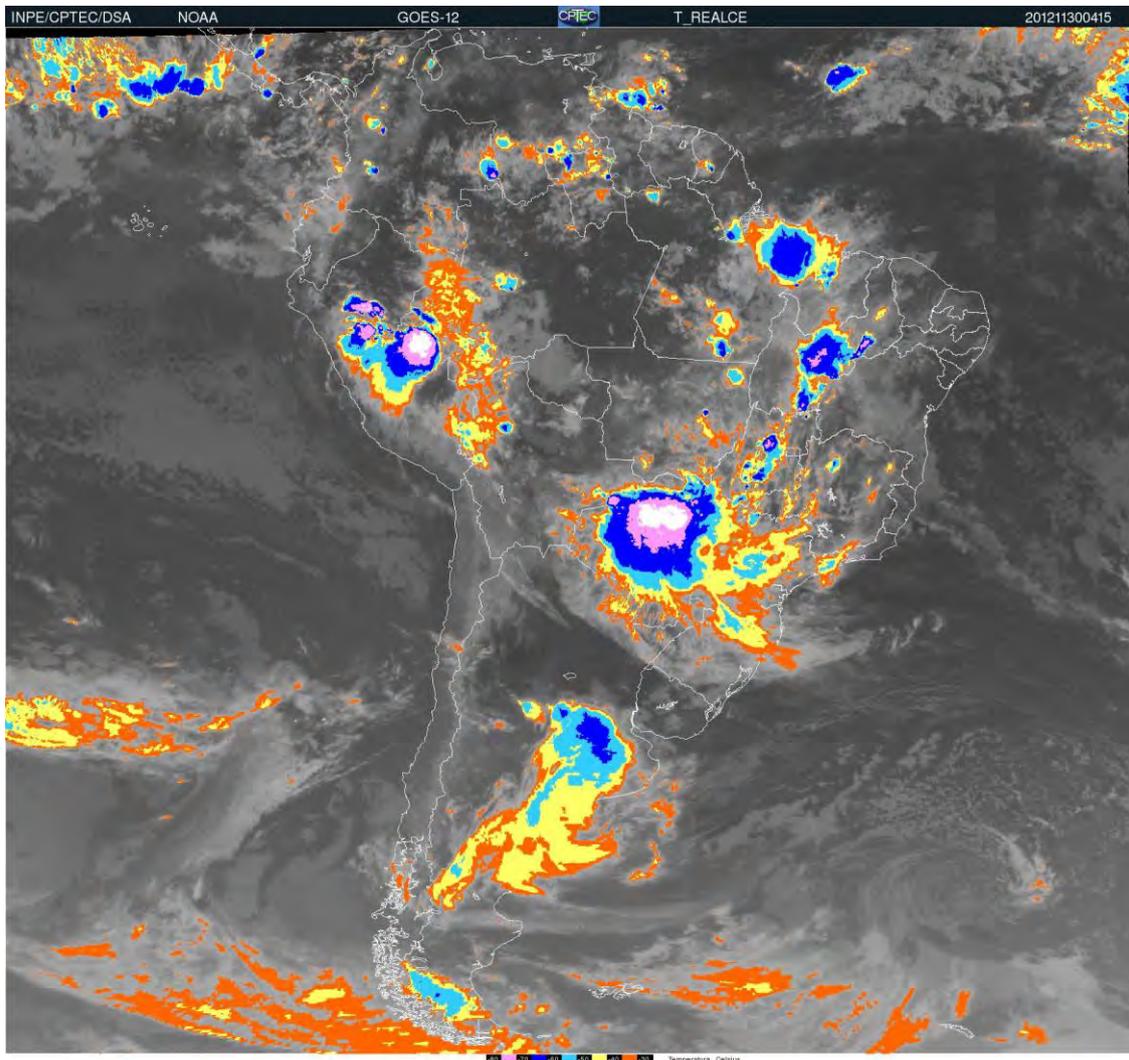


Figura 4.35. Imagem de satélite realçada de um complexo convectivo de mesoescala já se dissipando na madrugada do dia 30 de novembro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

4.2.1.4 Dezembro

A situação dos poluentes se manteve boa na semana 12 (27/11 – 02/12), ainda mais com a passagem de mais uma frente fria sobre o litoral norte de São Paulo na noite do dia 2 de dezembro, com exceção do CO, que apresentou médias horárias acima de 4 ppm na tarde do dia 1 de dezembro.

Uma frente fria que se formou entre o Uruguai e Argentina no dia 7 se deslocou rapidamente para o sul do Brasil no fim do dia. Esse sistema aumentou a convergência de umidade entre o Atlântico, Paraná e Paraguai e juntamente com a passagem de um cavado em 500 hPa contribuíram para pancadas de chuva em áreas do centro-oeste, sul e sudeste brasileiros no dia 9 (INPE.CPTEC, 2012, d), no entanto não foi registrada precipitação nem ventos consideráveis na estação meteorológica. A semana 13 (03/12 – 09/12) apresentou a maior média semanal de temperatura de todo o monitoramento (24,2 °C), sendo que todas as noites estiveram acima de 20 °C e do dia 4 ao dia 7 todas as tardes permaneceram acima de 30 °C. O perfil de temperatura pode ser visto na Figura 4.36.

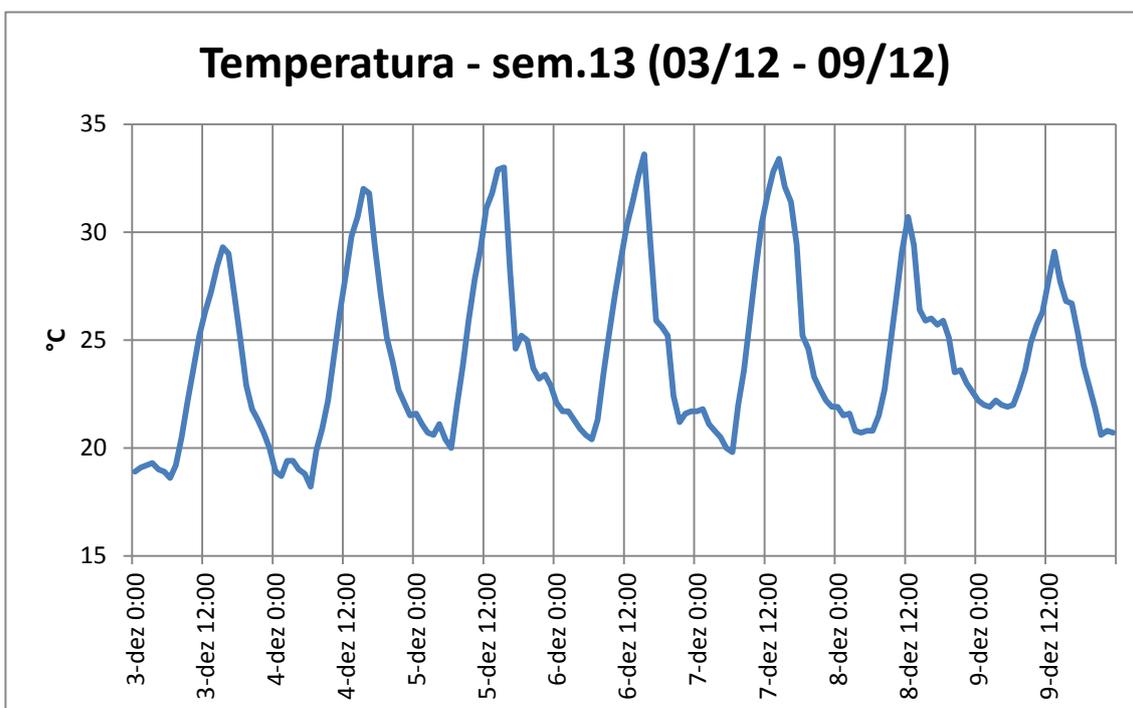


Figura 4.36. Perfil semanal da temperatura para a semana 13. Dados em médias horárias.

Embora houvesse certa nebulosidade presente nesse período o O₃ atingiu valores altos. De forma geral, a frente do dia 2 induziu dispersão dos poluentes nos dias 2 e 3, enquanto que o episódio do dia 9 contribuiu para menores concentrações nos dias 9 e 10. O perfil do O₃, NO_x e materiais particulados, nos quais os efeitos foram mais visíveis, são apresentados nas figuras 4.37 e 4.38.

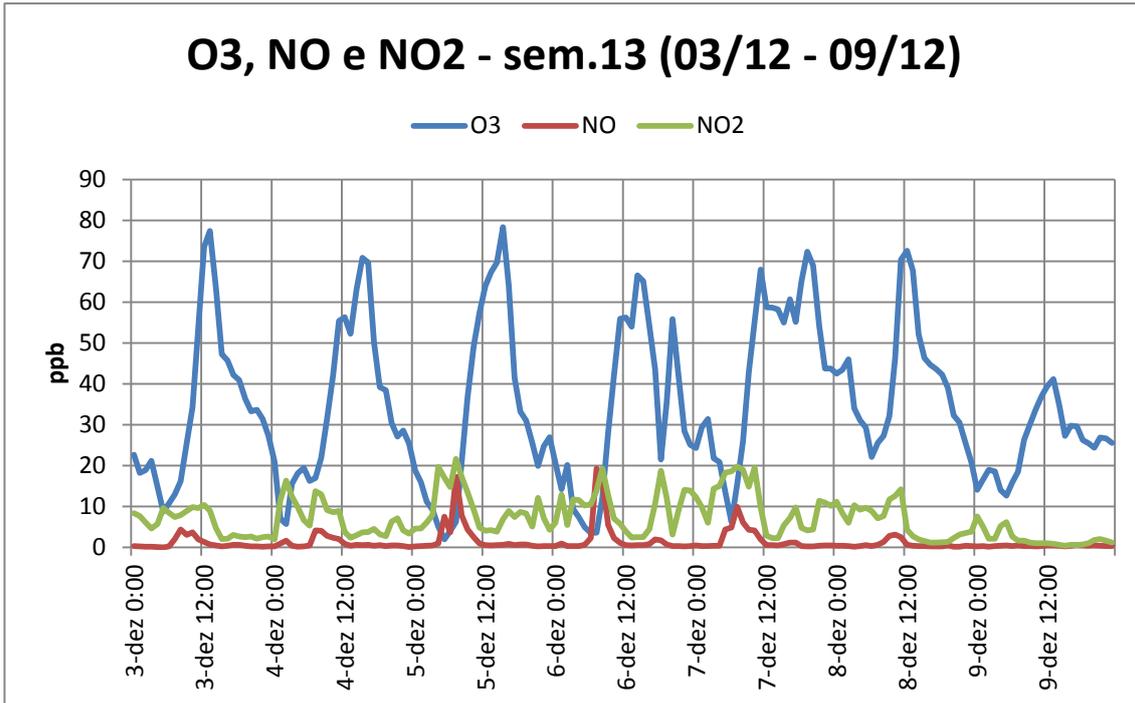


Figura 4.37. Perfil semanal do O₃, NO e NO₂ para a semana 13. Dados em médias horárias.

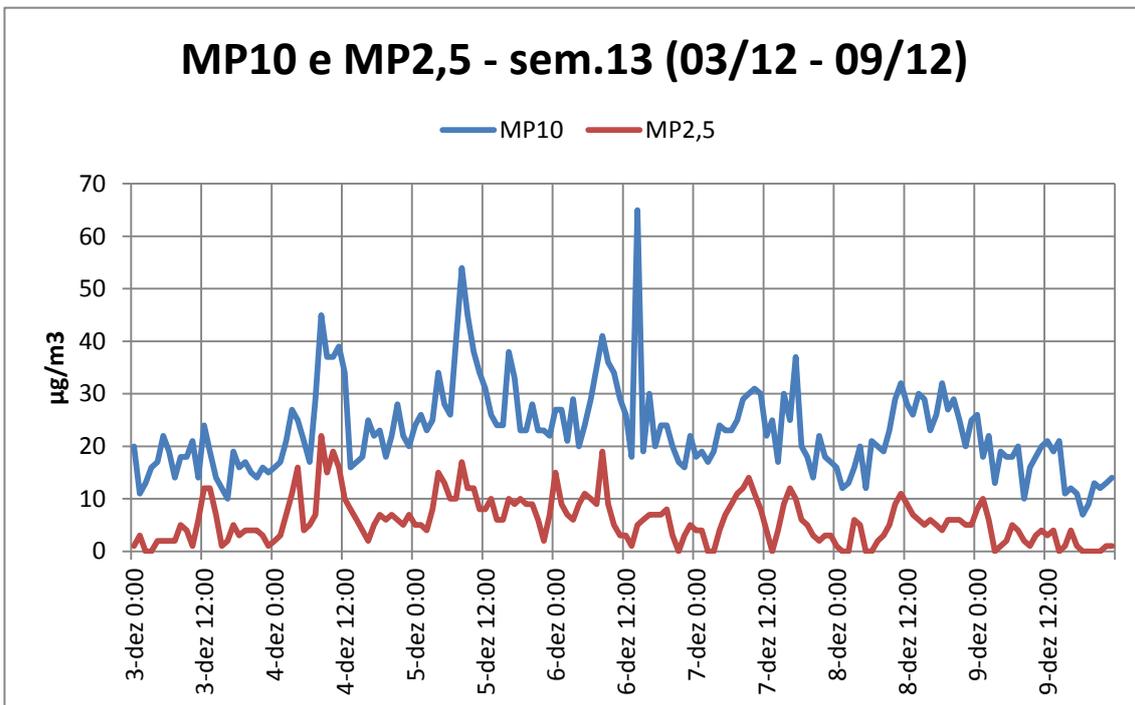


Figura 4.38. Perfil semanal dos materiais particulados menores que 10 e 2,5 µm para a semana 13. Dados em médias horárias.

Atividades pré-frontais de uma frente fria que avançou até Santa Catarina no dia 11 causaram convecção de umidade em todo o estado de São Paulo e induziu formação de nuvens com presença de pequena precipitação (2,4 mm).

No dia 12 o calor e a elevada umidade contribuíram para temporais em grande parte do Brasil. A precipitação registrada no CONSOLIDAR foi de 39,6 mm.

No dia 14 um novo episódio de ZCAS se formou, o segundo da estação, durando até o dia 17 e dessa vez posicionado entre os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul, sul de Goiás, Mato Grosso e Rondônia (Figura 4.39). Em São José dos Campos houve precipitação todos os dias do episódio, somando 52,8 mm, concentrados principalmente no dia 14 (32,6 mm). Ventos constantes acima de 2 m/s foram registrados apenas na manhã do dia 16 e por um período curto (menor que 3 horas).

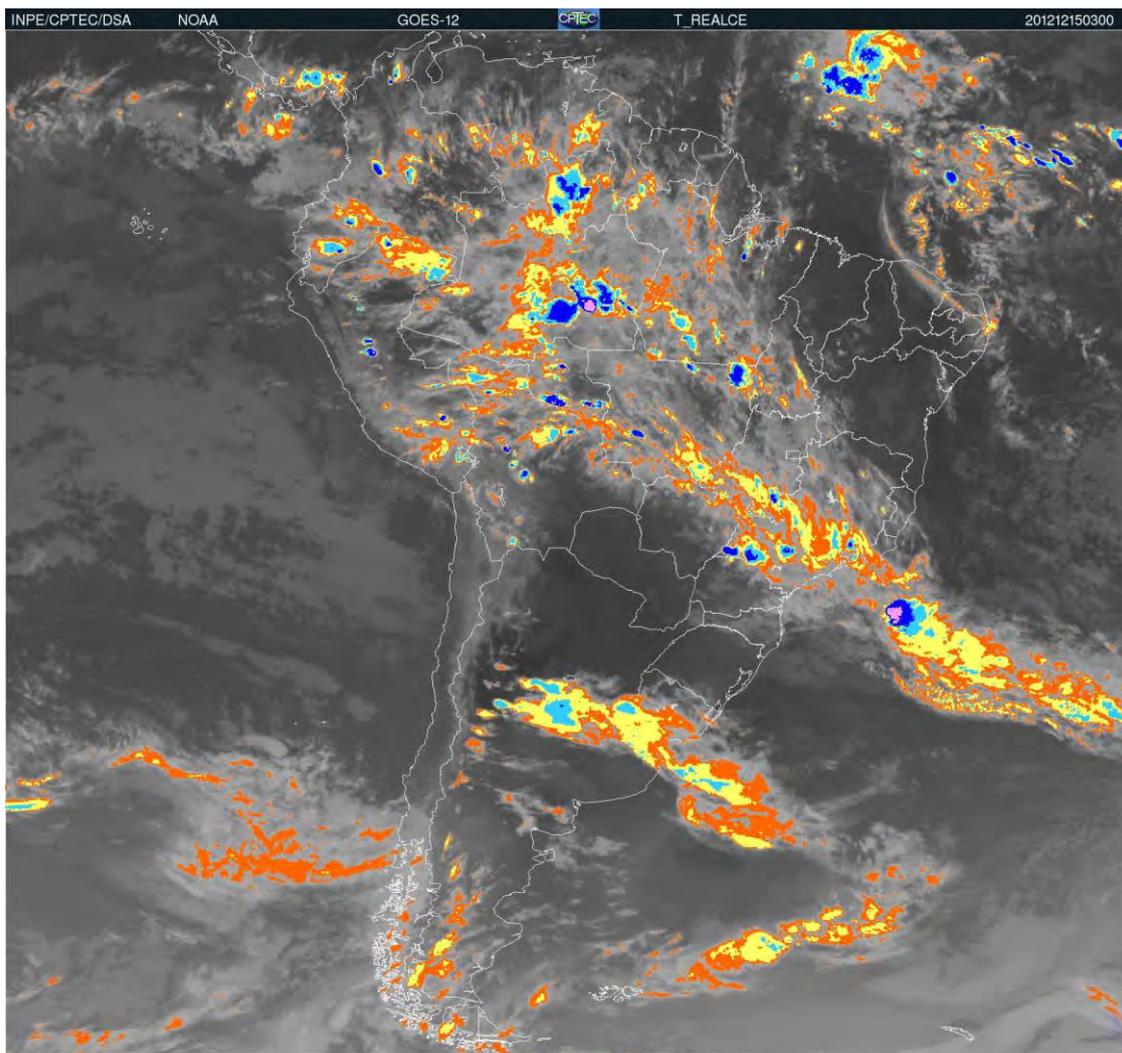


Figura 4.39. Imagem de satélite realçada de um episódio de ZCAS posicionado sobre SP, GO, MT e RO na madrugada do dia 15 de dezembro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

Mesmo com a persistência de oito dias seguidos com registro de precipitação e dias úmidos, a situação dos poluentes não foi muito alterada por esses episódios (provavelmente pela pequena incidência de ventos), com exceção dos materiais particulados, que por serem depositados no solo pela chuva, mantiveram concentrações mais baixas a partir do dia 14 (Figura 4.40).

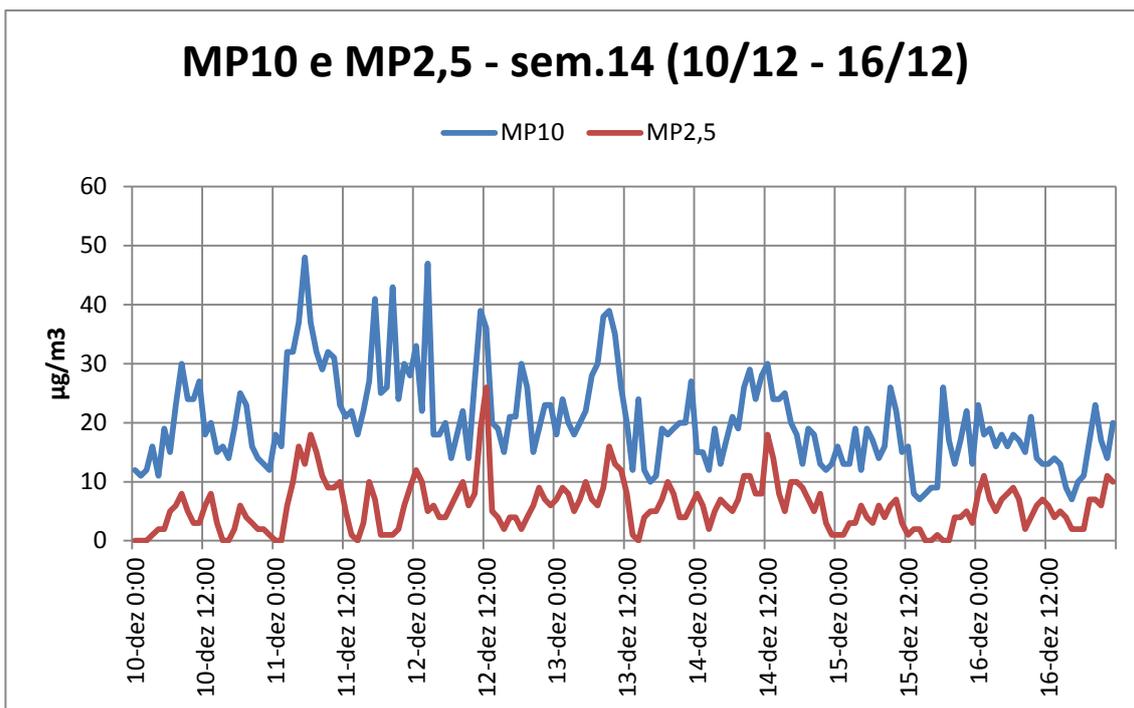


Figura 4.40. Perfil semanal dos materiais particulados menores que 10 e 2,5 μm para a semana 14. Dados em médias horárias.

4.2.1.5 Janeiro

A chegada de uma frente fria no dia 1 de janeiro causou uma precipitação de 14,4mm (Figura 4.41), ainda no dia 2 houve ventos moderados por toda a tarde, e a situação geral dos poluentes melhorou consideravelmente. Os perfis do O_3 , NO_x e MP10 são apresentados nas figuras 4.42 e 4.43.

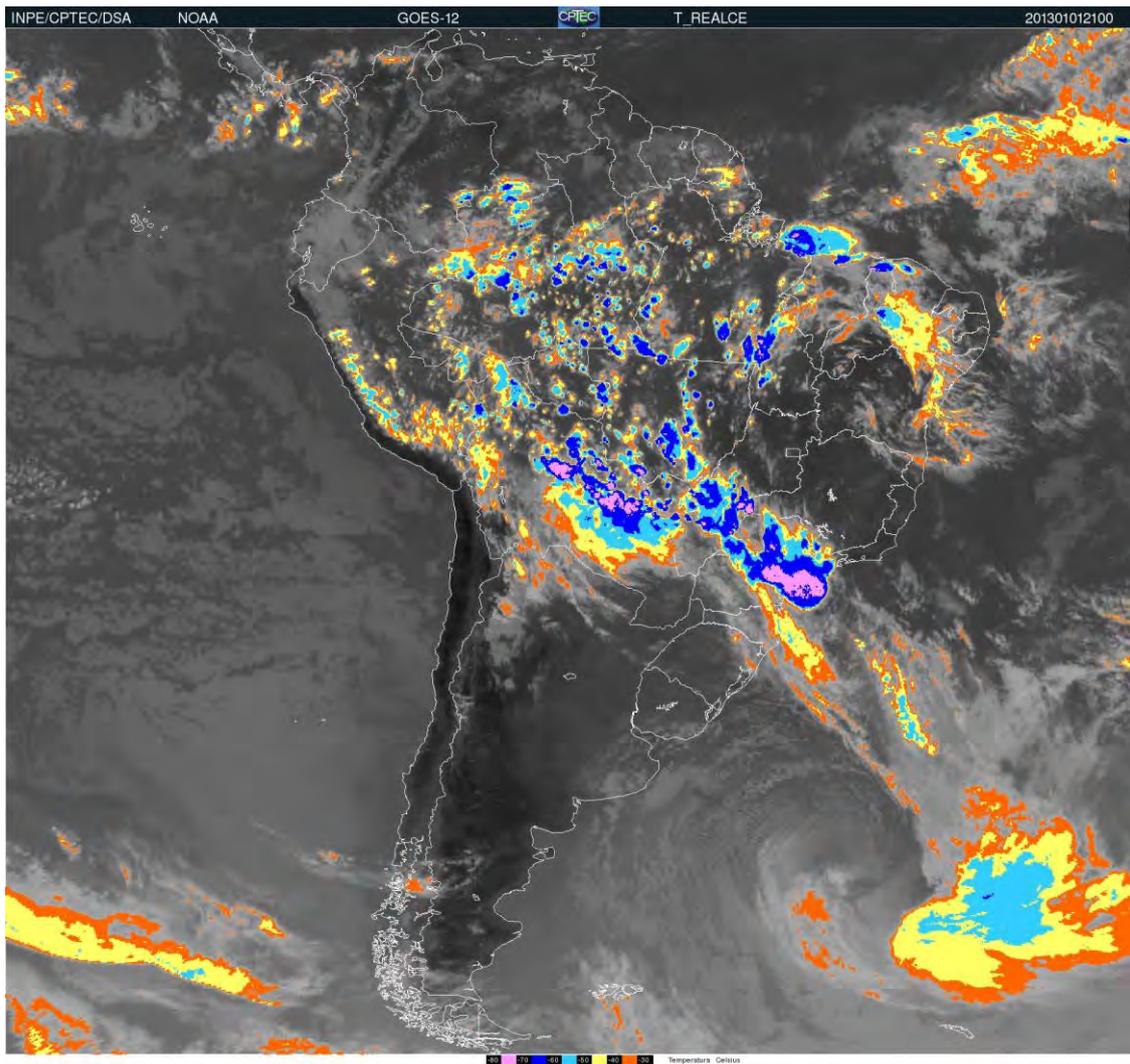


Figura 4.41. Imagem de satélite realçada de uma frente fria sobre o sul e sudeste brasileiro no dia primeiro de janeiro. Fonte: GOES-12, INPE.CPTEC.DSA.

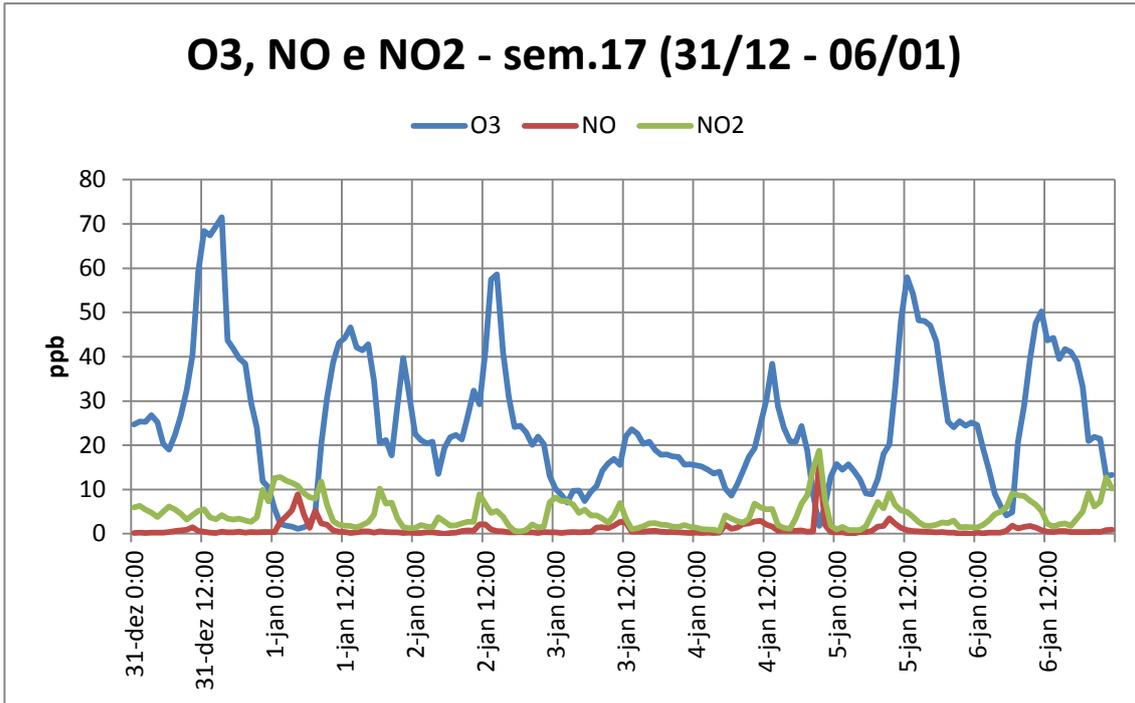


Figura 4.42. Perfil semanal do O₃, NO e NO₂ para a semana 17. Dados em médias horárias.

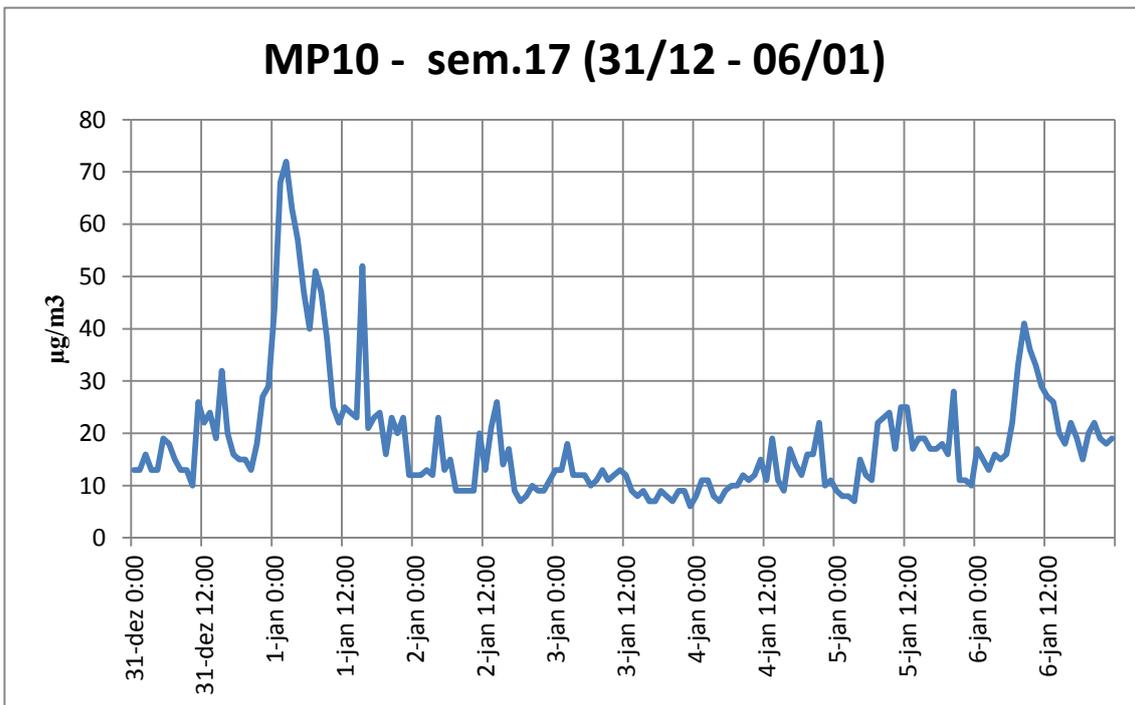


Figura 4.43. Perfil semanal do material particulado menor que 10 µm para a semana 17. Dados em médias horárias.

4.2.2 Médias semanais e variações dias úteis / fim de semana

Para cada semana foi calculada a média semanal de cada poluente, além da temperatura e umidade. No intuito de investigar se a emissão de automóveis é decisiva para aumentar a concentração dos poluentes, calcularam-se também as médias separadas dos dias úteis (de segunda a sexta-feira) e fins de semana (sábado e domingo) para cada semana.

Na Tabela 4.2 há a indicação do número de cada semana e o período correspondente:

Tabela 4.2 – Período de cada semana do monitoramento

| Semana | Período |
|--------|---------------|
| 1 | 10/09 - 16/09 |
| 2 | 17/09 - 23/09 |
| 3 | 24/09 - 30/09 |
| 4 | 01/10 - 07/10 |
| 5 | 08/10 - 14/10 |
| 6 | 15/10 - 21/10 |
| 7 | 22/10 - 28/10 |
| 8 | 29/10 - 04/11 |
| 9 | 05/11 - 11/11 |
| 10 | 12/11 - 18/11 |
| 11 | 19/11 - 25/11 |
| 12 | 26/11 - 02/12 |
| 13 | 03/12 - 09/12 |
| 14 | 10/12 - 16/12 |
| 15 | 17/12 - 23/12 |
| 16 | 24/12 - 30/12 |
| 17 | 31/12 - 06/01 |

Na Tabela 4.2 são apresentadas as estatísticas finais realizadas. Para cada poluente foi calculada a média total de todo o monitoramento, a média de todos os dias úteis e de todos os finais de semana. Ao analisar os gráficos de cada poluente foi possível notar um comportamento comum a todos de que nas semanas 2, 5, 8 e 13 a diferença entre final de semana e dias úteis foi maior

que o restante, isso ocorreu porque houve episódios de dispersão que afetaram as médias nos finais de semana.

Na semana 2 a concentração se manteve particularmente baixa no final de semana por ação da frente fria do dia 21 de setembro, uma sexta-feira. Na semana 5 também houve ação de uma frente que chegou em São José dos Campos na noite do dia 10 de outubro, uma quarta-feira, mas cujos efeitos se entenderam nos dois dias posteriores e contou com fortes ventos ainda na noite de sexta-feira e manhã de sábado. Também na semana 8 houve um episódio de dispersão forte no dia 1, uma quinta-feira, mas cujos efeitos se estenderam nos dias seguintes. Da mesma forma a semana 13 contou com pancadas de chuva no domingo que diminuíram a média do final de semana.

Na semana 11 o CONSOLIDAR sofreu de falta de energia no sábado, voltando a ser ativado apenas na segunda, o que impossibilitou o cálculo da média do fim de semana.

Foi calculada a porcentagem de semanas que apresentaram médias inferiores nos finais de semana, e depois as porcentagens corrigidas, excluindo da conta as quatro semanas citadas. Da mesma forma foi feita a média de todos os finais de semana, inicialmente incluindo todas, e posteriormente corrigindo e retirando as quatro semanas citadas. Feito isso foi calculada a diferença percentual entre a média dos finais de semana corrigida e a média dos dias úteis. Os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Média total, dias úteis e fins de semana

| Poluente | % de Semanas DU>FdS | % Corrigida | Média Total | Média D.U. | Média FdS | Md. FdS Corrigida | % diferença |
|------------------|---------------------|-------------|-------------|------------|-----------|-------------------|-------------|
| CO (ppm) | 50 | 33 | 0,54 | 0,54 | 0,51 | 0,58 | 6,03 |
| NO (ppb) | 100 | 100 | 1,45 | 1,56 | 0,90 | 1,02 | -34,67 |
| NO2 (ppb) | 70 | 63 | 7,12 | 7,31 | 5,81 | 5,81 | -20,63 |
| NOx (ppb) | 81 | 75 | 9,97 | 10,91 | 7,21 | 8,48 | -22,28 |
| SO2 (ppb) | 90 | 88 | 1,63 | 1,83 | 1,10 | 1,11 | -39,56 |
| O3 (ppb) | 56 | 43 | 28,94 | 28,95 | 27,83 | 27,67 | -4,41 |
| MP10 (µg/m3) | 62 | 50 | 23,72 | 24,48 | 18,68 | 20,06 | -18,03 |
| MP2,5 (µg/m3) | 50 | 33 | 7,02 | 5,91 | 4,56 | 5,17 | -12,53 |
| Temperatura (°C) | 50 | X | 22,04 | 22,17 | 21,75 | X | -1,92 |

DU=Dias úteis; FdS=Final de Semana; Md.=Média

Vale sublinhar que, embora com período pequeno, as médias totais de todos os poluentes, com exceção do ozônio, foram inferiores a médias anuais encontradas em regiões metropolitanas de cidades como Curitiba (SEMA, 2010) e Belo Horizonte (FEAM, 2011). No entanto tal comparação deve levar em conta o fato de o monitoramento ter sido efetuado no período chuvoso, onde as concentrações de todos os poluentes, com exceção ao ozônio, tendem a ser menores que no período seco (CARVALHO et al., 1998), e por consequência, que as médias anuais dos poluentes primários em São José dos Campos tendem a serem maiores que as médias apresentadas na Tabela 4.2.

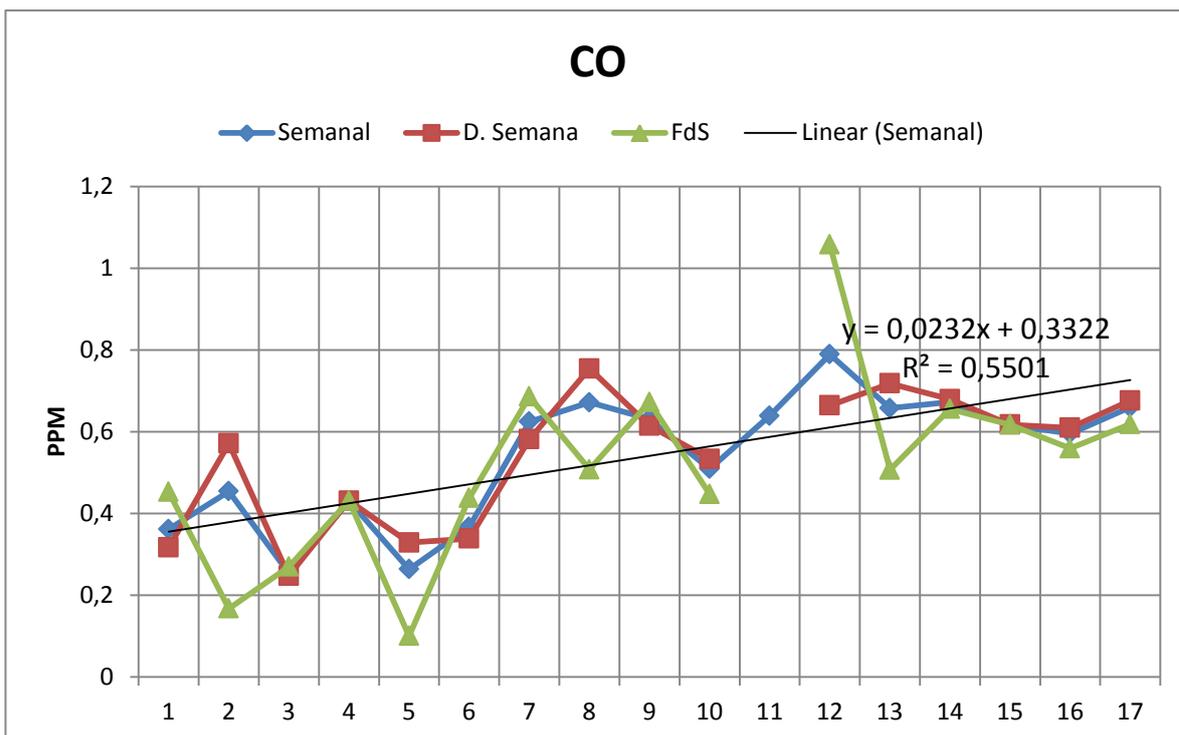


Figura 4.44. Média semanal, somente dias úteis e somente finais de semana para o CO com linha de tendência das médias semanais.

O CO apresentou uma diferença percentual positiva (6,03%) particularmente pela alta concentração que apresentou no dia primeiro de dezembro, um sábado, em que passou dos 4 ppm e com isso aumentou consideravelmente a média do final de semana da semana 12. Evidenciando também as semanas citadas pelos eventos de dispersão, percebe-se que houve uma situação de equilíbrio entre finais de semana e dias úteis, e que um período maior de monitoramento seria necessário para conclusões concretas quanto a emissões veiculares e a concentração do CO a partir desse tipo de análise.

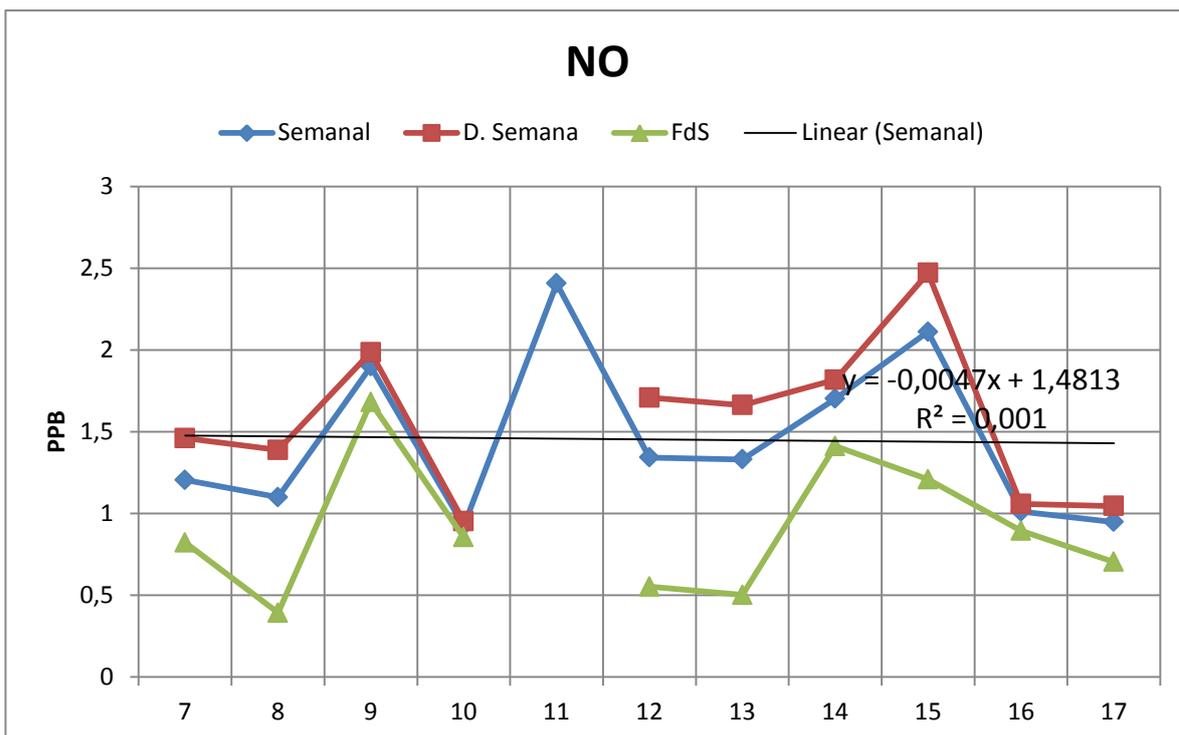


Figura 4.45. Média semanal, somente dias úteis e somente final de semana para o NO com linha de tendência das médias semanais.

O NO foi o único poluente que apresentou todas as médias dos finais de semana inferiores (Figura 4.45). A isso pode-se intuir com algum argumento, embora com um número pequeno de semanas para uma análise estatística verdadeiramente profunda, de que automóveis são fontes importantes de NO na cidade de São José dos Campos. A diferença percentual foi alta, 34,67%. Existe na literatura já bem documentada a relação do NO com veículos movidos a diesel (SILVA JÚNIOR et al., 2008)

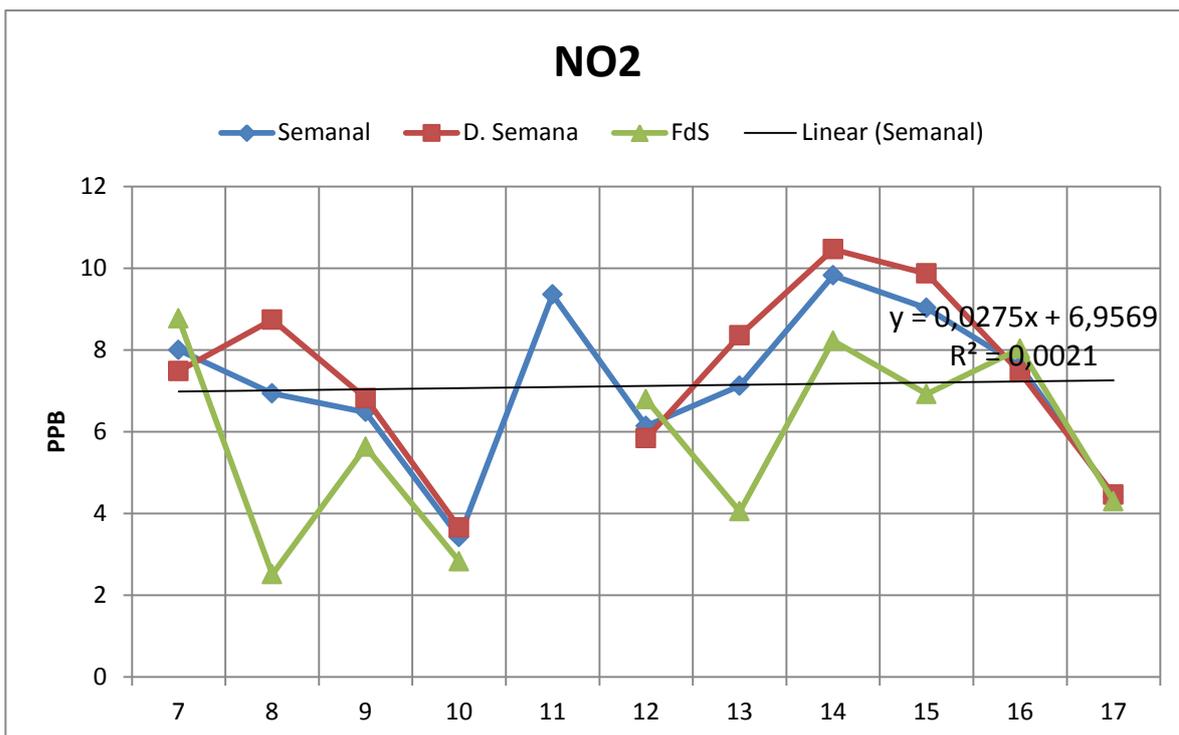


Figura 4.46. Média semanal, somente dias úteis e somente final de semana para o NO₂ com linha de tendência das médias semanais.

Para o NO₂, 5 semanas de 8 apresentaram médias de finais de semana inferiores à médias de dias úteis e uma variação percentual considerável de 20,63%. O resultado indica uma relação também do NO₂ com emissões veiculares, o que é razoável, já que uma concentração maior de NO implica numa maior taxa de formação de NO₂ por oxidação.

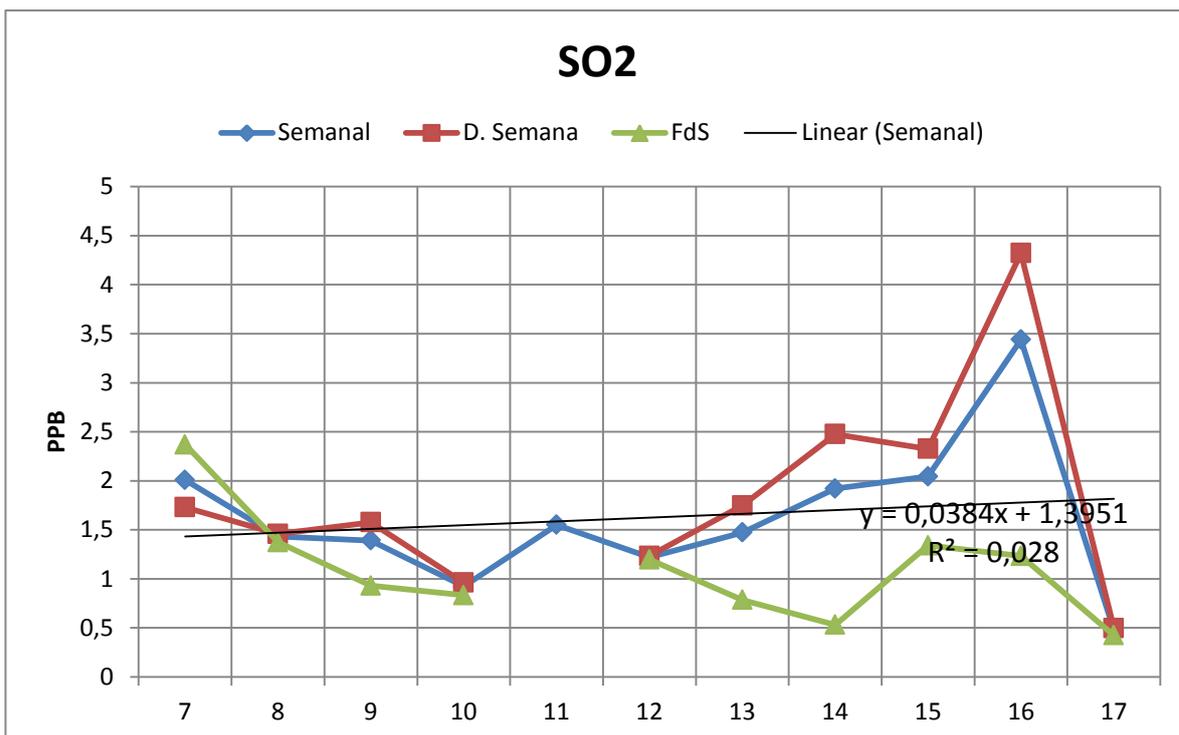


Figura 4.47. Média semanal, somente dias de semana e somente final de semana para o SO₂ com linha de tendência das médias semanais.

O SO₂ teve porcentagem maior (7 semanas de 8 válidas apresentaram médias de finais de semana inferiores) e a diferença teve um valor significativo de 39% (a maior entre todos os poluentes). Novamente, embora com um número pequeno de amostras, pode-se afirmar com algum argumento que a emissão veicular do SO₂ é significativa em São José dos Campos.

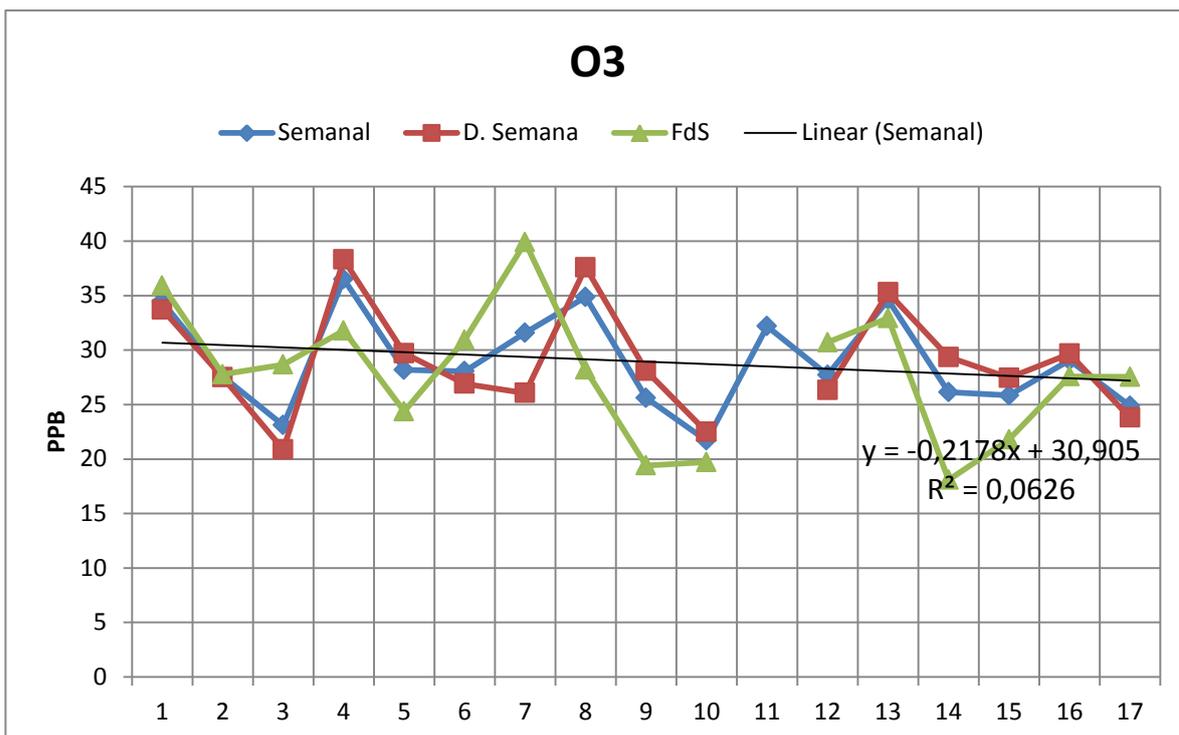


Figura 4.48. Média semanal, somente dias de semana e somente final de semana para o O₃ com linha de tendência das médias semanais.

O O₃ apresentou uma situação de equilíbrio (9 semanas de 16 válidas apresentaram média do final de semana inferior), e a variação porcentual mais baixa observada, 4,41%.

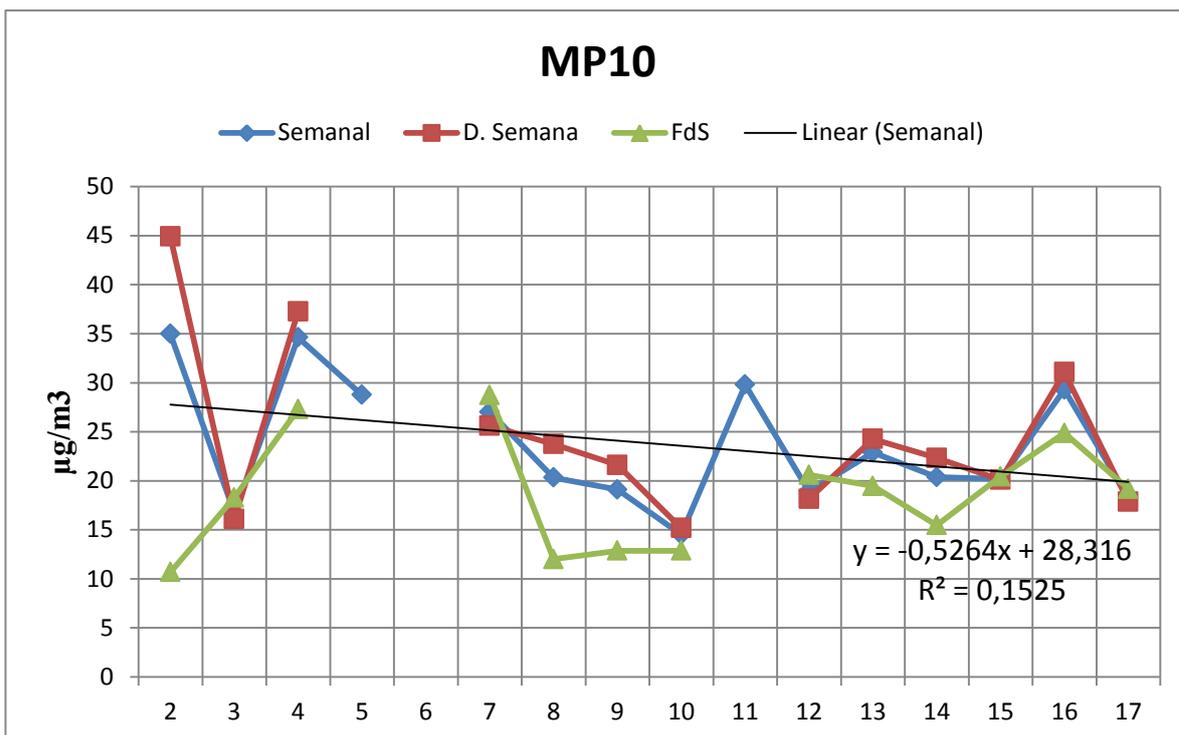


Figura 4.49. Média semanal, somente dias de semana e somente final de semana para o material particulado menor que 10 µm com linha de tendência das médias semanais.

Os materiais particulados menores que 10 µm apresentaram média inferiores em apenas 5 semanas de 10 válidas mas sua redução foi considerável (6,38%). Pelo número pequeno de semanas válidas para esse poluente, prefere-se não atribuir hipóteses à sua dependência com emissão veicular.

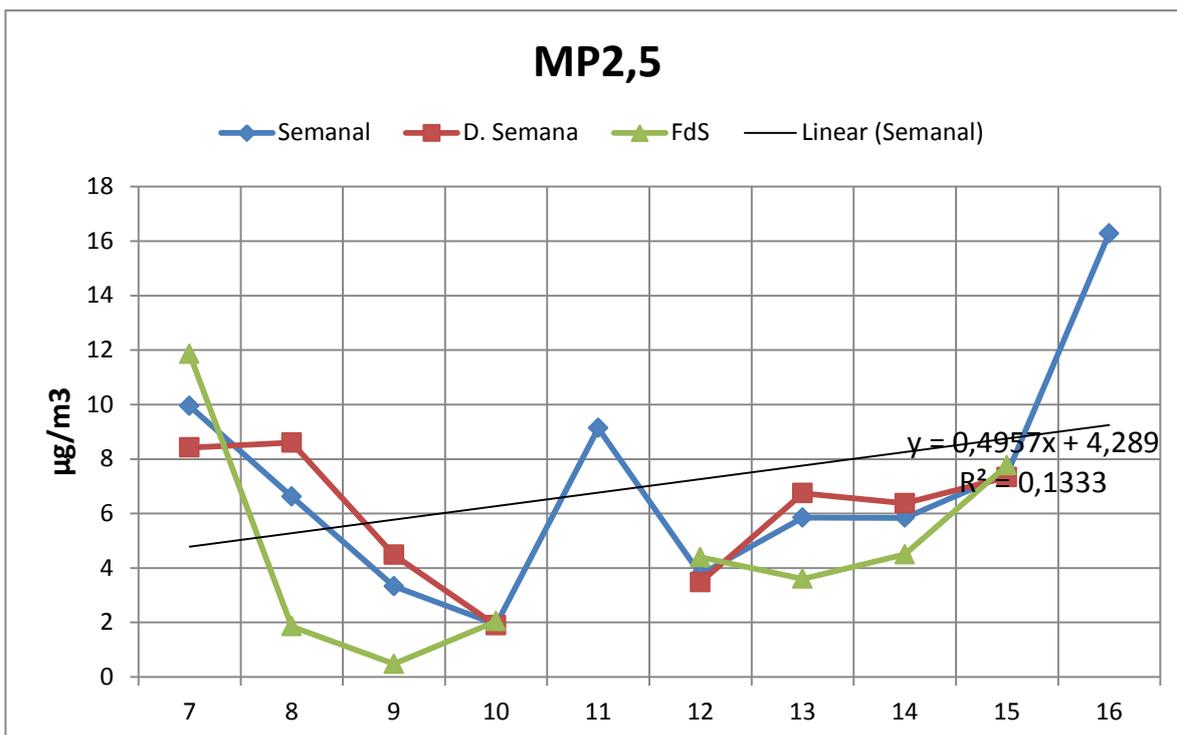


Figura 4.50. Média semanal, somente dias de semana e somente final de semana para o material particulado menor que 2,5 µm com linha de tendência das médias semanais.

O material particulado foi o poluente com menos semanas válidas de monitoramento, apenas 6 das 17 totais, e em duas delas teve média do final de semana inferior. Quanto ao valor das médias, a dos finais de semana foi 12,53% menor que a dos dias úteis. No entanto o número muito pequeno de semanas é insuficiente para uma afirmação de relação forte ou não com emissão de automóveis.

A variação dias úteis / final de semana será explorada novamente, na seção que trata da comparação entre os dados do laboratório CONSOLIDAR e da estação da CETESB, no entanto com abordagem estatística diferente.

4.2.3 Comportamento dos gases no ciclo diurno

Na intenção de analisar o comportamento geral dos poluentes em relação ao ciclo diurno foi calculada, para cada poluente, a média da concentração em cada hora do dia, levando em conta todos os 119 dias de monitoramento (no caso do SO₂, MP_{2,5}, NO e NO₂ aproximadamente 70 dias). Nos gráficos foram inclusos o desvio padrão de cada média. Pode-se verificar então o

comportamento médio de cada poluente (além da temperatura, umidade e velocidade do vento) durante o período de monitoramento nas figuras a seguir.

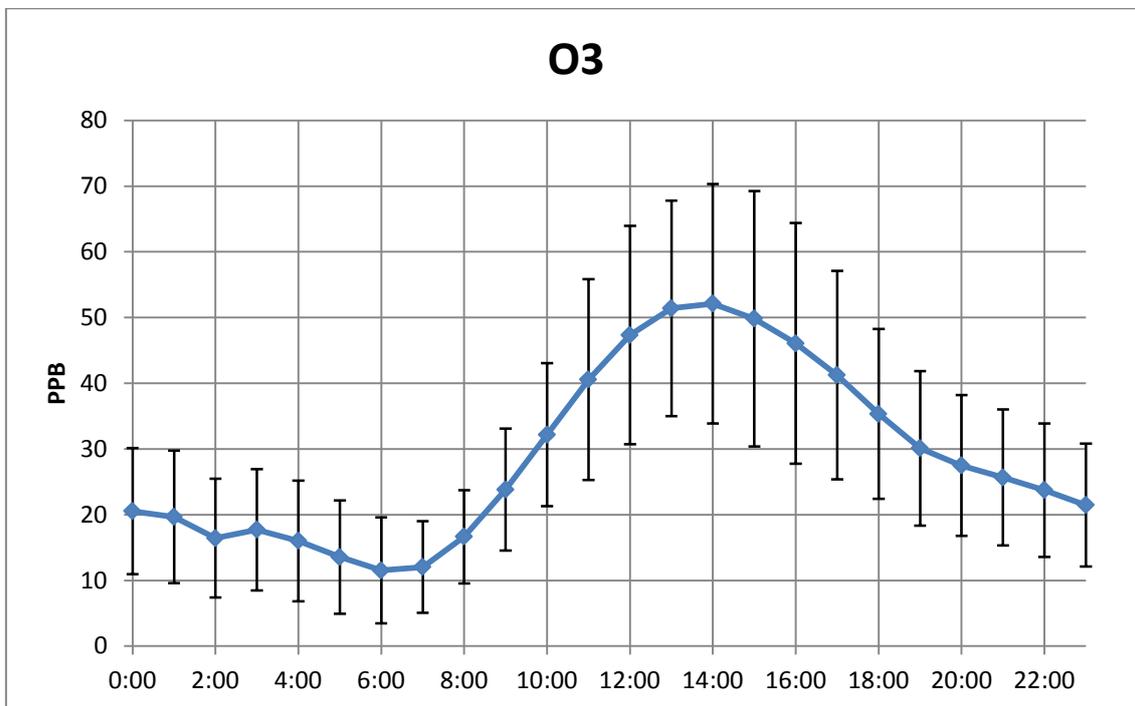


Figura 4.51. Médias de todas as médias horárias do período de monitoramento para cada hora do dia. O₃.

Foi citado que a produção de O₃ requer radiação para a ativação de suas reações. O resultado das médias ilustra bem a situação (Figura 4.51) do ozônio como poluente secundário: o máximo da concentração é observado entre 13:00 e 15:00 após ascender desde o momento do nascer do sol (aproximadamente 6:00 para o período de monitoramento). Isto é consequência da quantidade crescente de radiação disponível para a fotólise de seus percussores e elevação de sua taxa de produção. A quantidade de radiação começa a diminuir com o entardecer e junto a atividade de formação do O₃, o que causa uma virada em seu ciclo químico, tornando a taxa de consumo maior que a de produção e consequentemente baixando a concentração até um mínimo entre 5:00 e 7:00, quando então a radiação do sol novamente engatilha a sua produção.

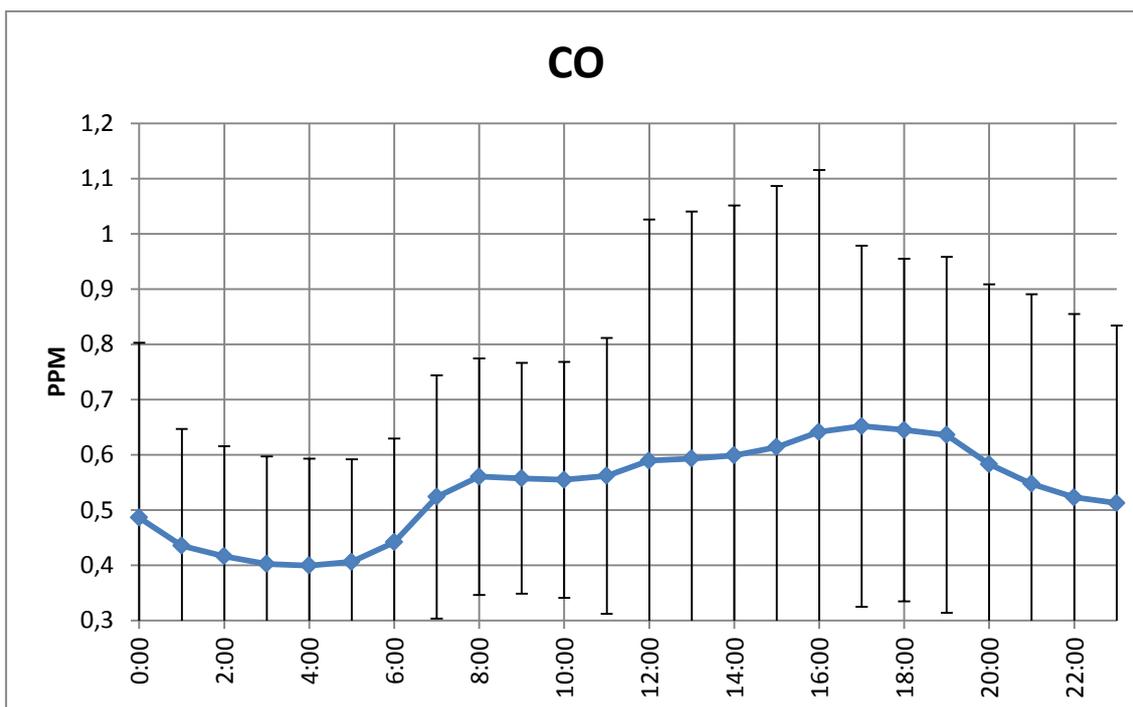


Figura 4.52. Médias de todas as médias horárias do período de monitoramento para cada hora do dia e o desvio padrão. CO.

O CO apresentou um resultado interessante que pode complementar a análise dia de semana / fim de semana e emissões veiculares, no sentido de que seu comportamento médio indica uma elevação de concentração a partir das 5:00, horário em que começam as primeiras circulações de automóveis pela cidade, principalmente ônibus, e já a partir das 6:00 um crescimento mais acentuado, horário de movimento forte de automóveis na Av. dos Astronautas, ao lado do CONSOLIDAR. O aumento prossegue por toda a manhã e tarde e a concentração média alcança um pico máximo entre 17:00 e 18:00, período esse o de maior movimento na Av. dos Astronautas em todo o dia. As médias só começam a diminuir consideravelmente após as 19:00, quando o movimento de automóveis começa a diminuir, e acabam por atingir um mínimo às 4:00.

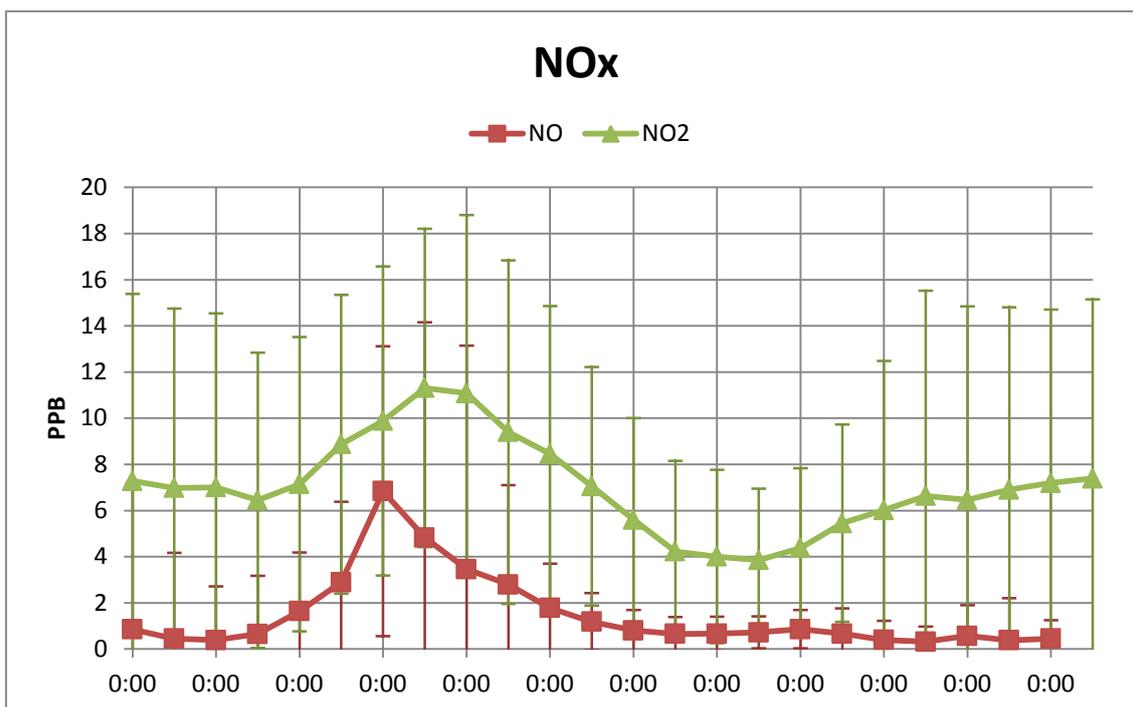


Figura 4.53. Médias de todas as médias horárias do período de monitoramento para cada hora do dia e o desvio padrão. NO e NO₂.

Os óxidos de nitrogênio apresentam, cada um, comportamentos distintos. Importante notar que os seus perfis exigem análise mais profunda, já que além das condições de emissão e dispersão que cada poluente é submetido, os dióxidos de nitrogênio também estão envolvidos em ciclos fotoquímicos complexos que dependem de muitas variáveis, entre elas radiação incidente, temperatura do ar - que interfere na velocidade da fotólise do NO₂ (ROEHL et al., 1994) – e concentração do O₃.

A média do NO ilustrou bem a situação comum durante todo o monitoramento de que entre 6:00 e 8:00 haviam picos de concentração, por vezes valores maiores que os do NO₂, e depois baixavam quase que totalmente pelo resto do dia. A esse comportamento pode-se formular a hipótese de que com o aumento de circulação de automóveis no começo da manhã o NO aumenta consideravelmente de concentração, mas por sua vez o aumento da concentração de O₃ após as 9:00 faz reagir a maior parte do NO, criando assim uma taxa de consumo maior que de emissão por todo o resto do dia.

O NO₂ apresenta elevação similar na manhã (entre 6:00 e 9:00), provavelmente também produto de emissão veicular na Av. dos Astronautas,

no entanto sua concentração baixa decorrente da radiação incidente, que aumenta enquanto o sol alcança ângulos zenitais menores, e causa a fotólise de suas moléculas. O mínimo é atingido entre 14:00 e 15:00, período que coincide com o máximo do O₃, e confirma a dependência da concentração do NO₂ com a radiação incidente. Pela noite a falta de radiação incidente encerra a fotólise do NO₂ e é registrado um ligeiro aumento de concentração.

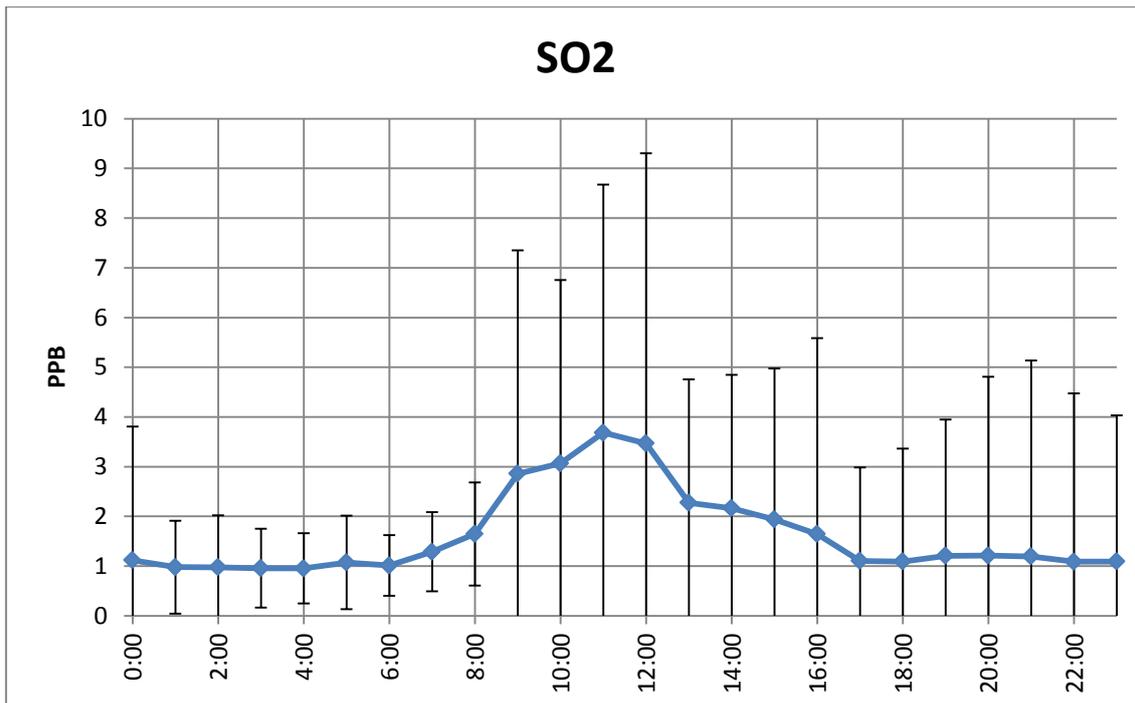


Figura 4.54. Médias de todas as médias horárias do período de monitoramento para cada hora do dia e o desvio padrão. SO₂.

O SO₂ e os materiais particulados também apresentam a característica elevação de concentração no começo da manhã. O SO₂ vindo apresentar seu máximo entre 10:00 e 12:00 e os materiais particulados entre 8:00 e 9:00. A maior concentração de SO₂ apresentada durante o dia pode estar associada com a oxidação de espécies sulfurosas reduzidas por OH e NO₃ (TYNDALL, RAVISHANKARA, 1991). Uma outra possível explicação pode estar associada com uma maior emissão de óxidos de enxofre pela REVAP no período citado.

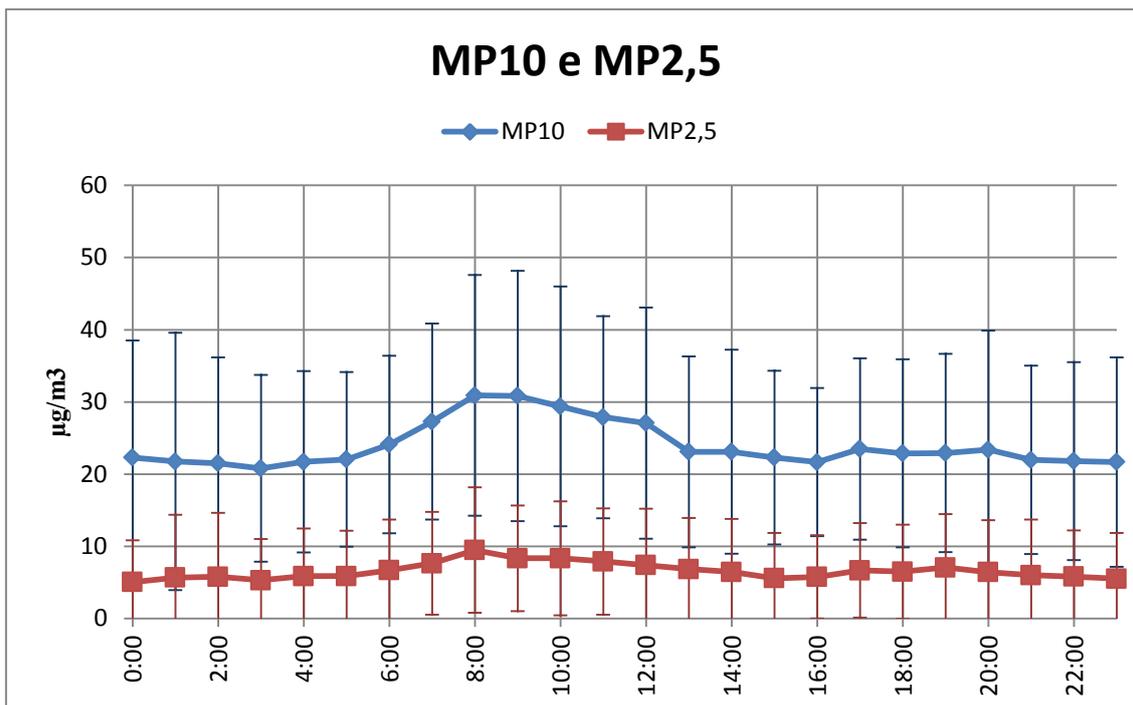


Figura 4.55. Médias de todas as médias horárias do período de monitoramento para cada hora do dia. MP10 e MP2,5.

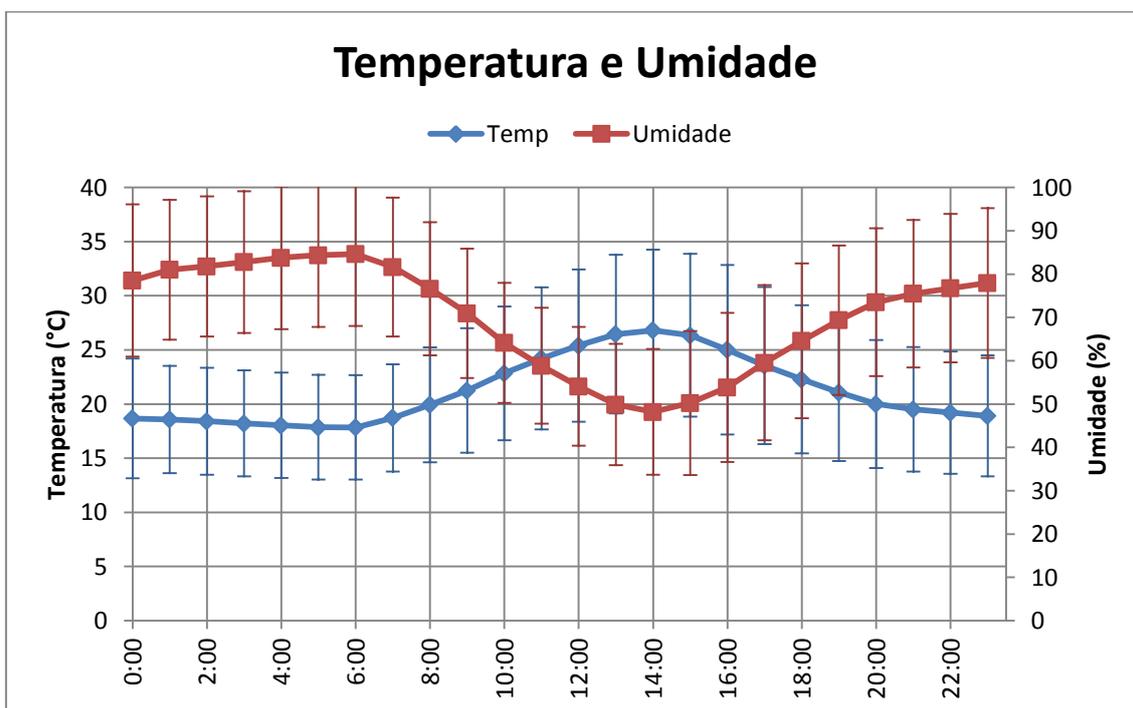


Figura 4.56. Médias de todas as médias horárias do período de monitoramento para cada hora do dia. Temperatura e umidade.

As médias de temperatura e umidade apresentaram comportamentos já esperados e refletem bem a situação comum durante o período de monitoramento: período mais quente e seco do dia entre 13:00 e 15:00 e

período mais frio e úmido entre 5:00 e 6:00. A média da temperatura apresentou máximo de 26,8°C às 14:00 e mínimo de 17,8°C às 6:00. A média da umidade apresentou máximo de 84,6% às 6:00 e mínimo de 48,2% às 14:00.

4.2.4 Correlação com parâmetros meteorológicos

Foi calculado para cada poluente o índice de correlação entre sua concentração e os parâmetros meteorológicos temperatura, umidade, velocidade do vento, precipitação e radiação incidente. Os dados utilizados para fazer esse cálculo foram médias horárias. Os valores são apresentados na Tabela 4.4. Os coeficientes que não obtiveram significância foram excluídos.

Tabela 4.4 - Coeficientes de correlação entre concentração dos poluentes e parâmetros meteorológicos

| | O₃ | CO | NO | NO₂ | SO₂ | MP10 | MP2,5 |
|--------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------------------|-----------------------|-------------|--------------|
| Temperatura | 0,5109 | 0,2689 | - | 0,1972 | 0,2373 | 0,4143 | -0,0936 |
| Umidade | -0,6260 | -0,2958 | 0,2035 | 0,2376 | -0,1248 | -0,3387 | -0,3225 |
| Vel. Vento | - | -0,1491 | - | -0,1567 | - | - | - |
| Chuva | - | 0,0869 | - | - | - | - | - |
| Radiação | 0,4945 | 0,2042 | 0,1766 | - | 0,3811 | 0,1710 | 0,1234 |

Em relação à temperatura apenas o MP2,5 apresentou índice negativo, e os maiores índices em módulo foram do O₃ (0,51) e do MP10 (0,41), já o menor o do dióxido de nitrogênio (0,20). Esse resultado é razoável já que o comportamento mais recorrente entre todos os poluentes foi apresentar valores de concentração mais elevados durante o dia, quando a temperatura também está mais alta. O valor mais alto do índice do O₃ se justifica pelo valor da temperatura acompanhar a quantidade de radiação incidente, e consequentemente acompanhar o crescimento de sua concentração.

Em relação à umidade apenas os óxidos de nitrogênio apresentaram índice positivo. Novamente O₃ e MP10 apresentaram maiores valores em módulo, -0,63 e -0,34 respectivamente. Esse resultado também é razoável, já que umidade e temperatura têm crescimento inverso.

Em relação à velocidade do vento os índices apresentaram valores baixos para todos os poluentes. Na análise de eventos de dispersão foi constatado que os episódios que mais diminuíram a concentração dos poluentes foram os que mantiveram por um longo período valores moderados da velocidade do vento, de forma que aumentos na velocidade nem sempre significaram menor concentração de poluentes.

Quanto à precipitação, apenas o CO apresentou coeficiente de correlação com significância, embora com valor baixo.

Todos os poluentes apresentaram índice positivo de correlação à radiação. Aqui o mesmo raciocínio utilizado para a temperatura é válido. O comportamento comum dos poluentes foi de apresentar níveis mais altos durante o dia. Como esperado, o maior índice foi o do O₃ (0,49), poluente secundário que necessita de radiação para o desencadeamento de sua produção.

4.2.5 Análise do vento

Foi feita uma estatística com os dados de vento no intuito de determinar direções e velocidades mais frequentes durante o período de monitoramento. Para tal foram utilizadas médias de 10 minutos da velocidade e direção do vento. Foi criada uma rosa dos ventos com 16 direções e 6 categorias de velocidade: menor que 1 m/s, entre 1 e 2 m/s, entre 2 e 4 m/s, entre 6 e 8 m/s e maior que 8 m/s.

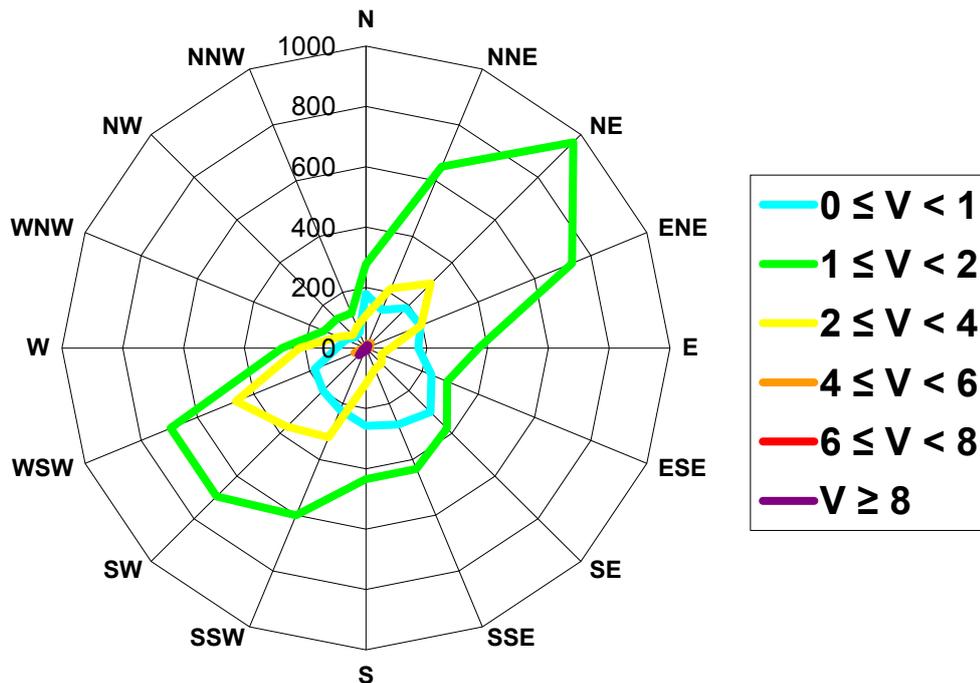


Figura 4.57. Rosa dos ventos com dados de todo o período de monitoramento. Os círculos concêntricos indicam a frequência de ocorrência de cada direção (quanto mais longe do centro, mais frequente foi).

A rosa dos ventos deixa claro que o eixo predominante em que ocorrem os ventos é o sudoeste-nordeste. Embora seja difícil a visualização desse comportamento nas categorias de velocidade mais elevada, o mesmo ocorre com elas. Também é notória a quantidade muito pequena de ventos vindos das direções entre norte-nordeste e oeste-nordeste. Pode-se associar essa configuração ao posicionamento de São José dos Campos em relação ao Vale do Paraíba, onde a Serra da Mantiqueira forma um canal de escoamento da circulação vinda tanto do sul como do norte. A presença de ventos vindo do sudeste pode ser associada com a brisa marítima que alcança São José dos Campos.

A topografia do Vale do Paraíba é apresentado na Figura 4.58.

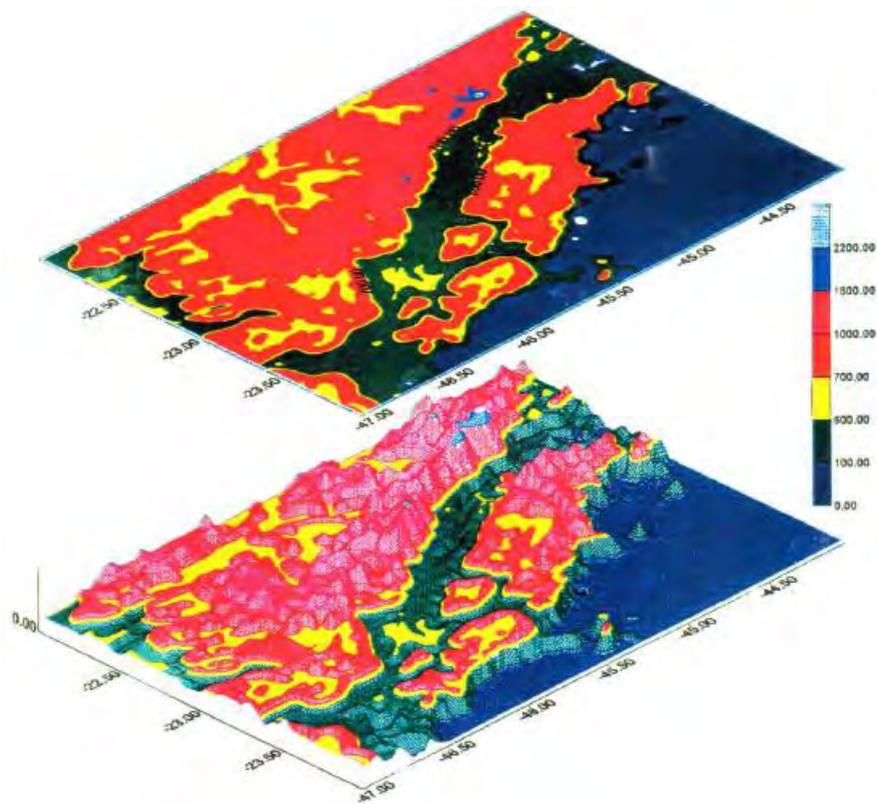


Figura 4.58. Topografia do Vale do Rio Paraíba do Sul. A oeste a Serra da Mantiqueira, a leste a Serra do Mar. São José dos Campos está alinhado à fenda observada na Serra do Mar.

A rosa dos ventos é complementada com os gráficos de distribuição da direção e categoria de velocidade que podem ser visualizados nas figuras 4.59 e 4.60.

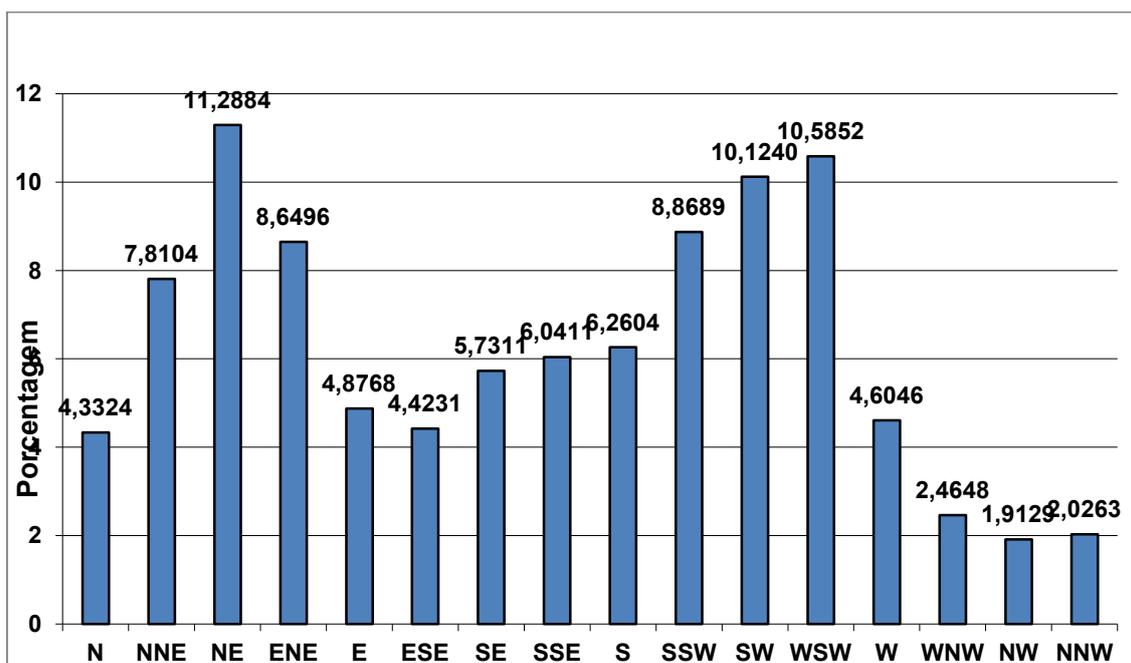


Figura 4.59. Distribuição percentual da direção do vento.

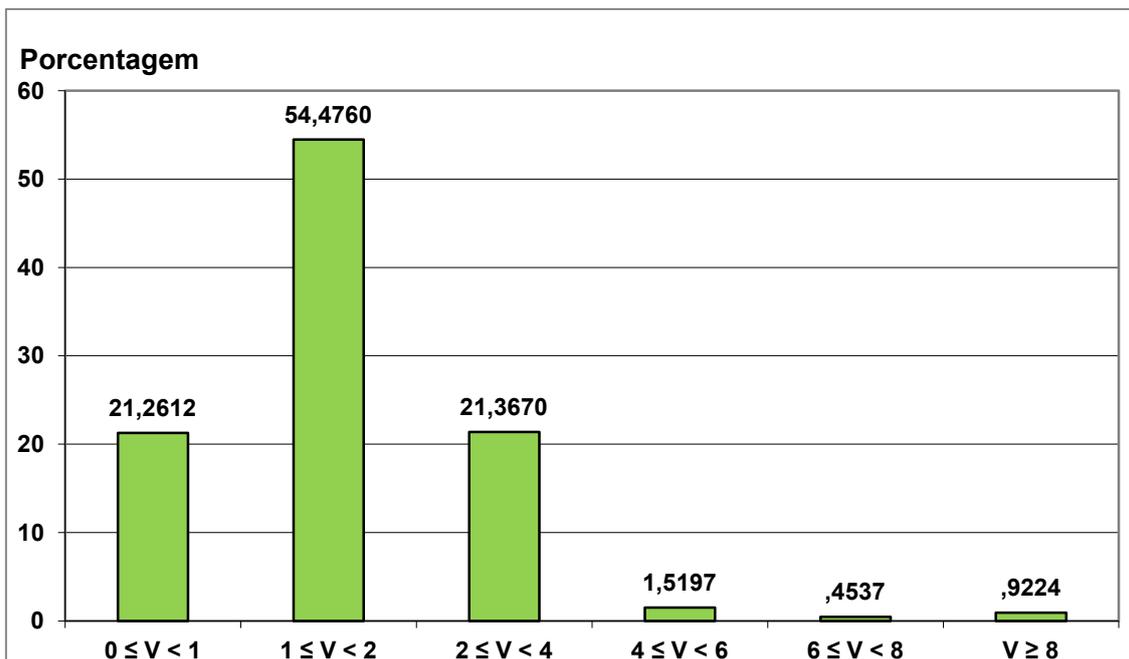


Figura 4.60. Distribuição percentual da categoria de velocidade do vento.

Como é possível verificar, o período de monitoramento foi dominado por ventos fracos (menores que 2 m/s). Ventos mais fortes, principalmente maiores que 4 m/s, foram mais frequentes em ocasiões de chegadas de frentes e anteriores a episódios de precipitação, no entanto sem se manterem ativos por períodos significativos de tempo.

4.3 Comparação entre dados do CONSOLIDAR e da CETESB

No intuito de identificar as diferenças nas condições locais (tanto físicas, ocupacionais e de emissão) e suas consequências nas concentrações dos poluentes nesta seção são apresentados os resultados das comparações entre os dados obtidos no CONSOLIDAR, localidade caracterizada pela presença significativa de vegetação e presença de edifícios mais afastados entre si, intercalados por áreas verdes, e os obtidos na estação de monitoramento de qualidade do ar de São José dos Campos da CETESB, localidade caracterizada pela presença de ruas asfaltadas e circulação mais intensa de automóveis (Figuras 4.61).



Figura 4.61. Vista aérea da região onde está localizada a estação da CETESB. Fonte: Google Earth.

Os poluentes comparados foram O_3 , CO, NO, NO_2 , SO_2 e MP10. Também foram comparados a temperatura, umidade e velocidade do vento.

4.3.1 Comportamento médio

Para uma noção geral da situação foi calculada qual a porcentagem de medições válidas em que o valor medido no CONSOLIDAR foi maior que o medido na CETESB no mesmo horário. O resultado é apresentado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5. – Porcentagens de medições válidas em que medida do CONSOLIDAR foi superior à medida da CETESB

| | % |
|--------------------------|------|
| O_3 | 81,1 |
| NO | 11,9 |
| NO_2 | 16,5 |
| CO | 60,8 |
| SO_2 | 67,0 |
| MP10 | 64,5 |
| Temperatura | 1,9 |
| Umidade | 23,4 |
| Vel. Vento | 47,5 |

Uma rápida análise deixa claro, por apresentarem porcentagens extremas, que o O_3 tende a ser maior na localidade do CONSOLIDAR, enquanto os NO_x tendem a serem maiores na localidade da CETESB. Quanto à temperatura o valor retrata bem a situação durante o período de monitoramento: a localidade com vegetação do CONSOLIDAR é muito menos quente que a localidade pavimentada da CETESB.

Para uma análise mais detalhada do comportamento médio, o mesmo procedimento utilizado na análise do ciclo diurno com os dados do CONSOLIDAR foi utilizado nos dados da CETESB. Nos gráficos é possível observar as diferenças entre as duas localidades.

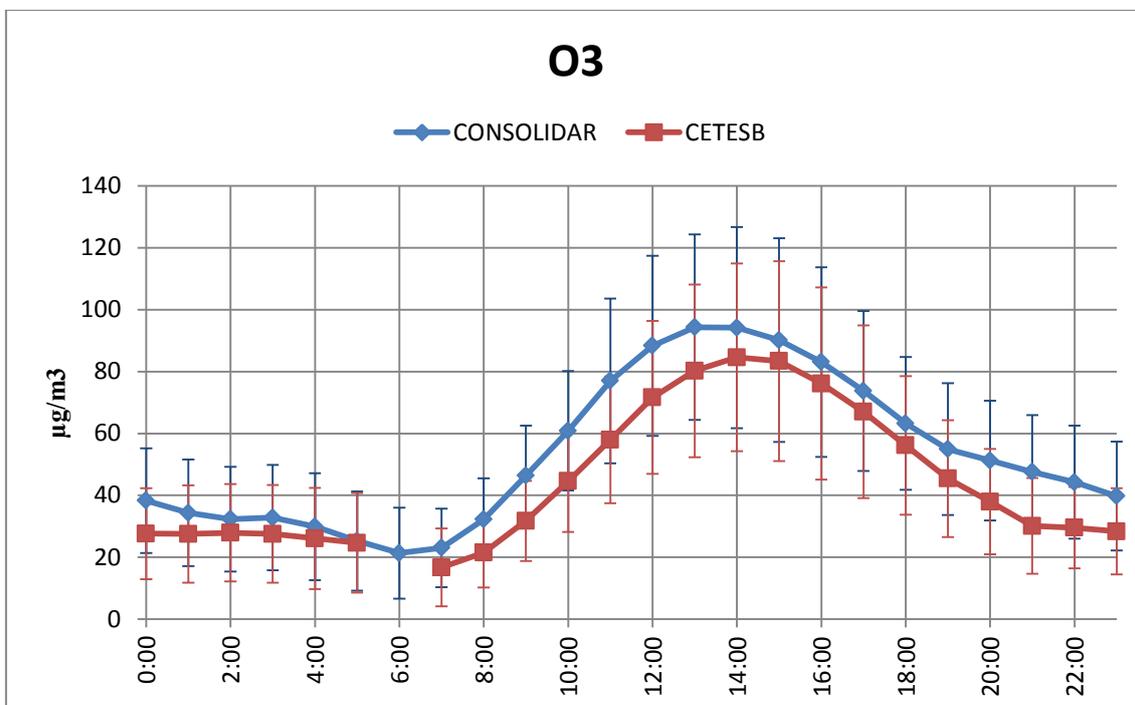


Figura 4.62. Comparação do comportamento médio do O_3 entre as duas localidades estudadas. As medidas de concentração do O_3 às 6:00 na estação da CETESB geralmente eram inválidas e o número de medições válidas resultou-se insuficiente para calcular uma média representativa. As barras representam o desvio padrão.

Reafirmando a porcentagem de medições válidas, o comportamento médio do O_3 na localidade sem vegetação segue uma tendência similar à apresentada na localidade com vegetação, mas com valores inferiores. Esse resultado pode ser associado à diversos motivos e duas hipóteses são apresentadas aqui. Uma delas é que na região do CONSOLIDAR há uma maior concentração de

compostos orgânicos voláteis, cujo produto de sua degradação produz radicais que oxidam o NO e conseqüentemente aumentam a quantidade de NO₂ (Figura 4.63). Esse NO₂ excedente sofre fotólise e aumenta a concentração do O₃.

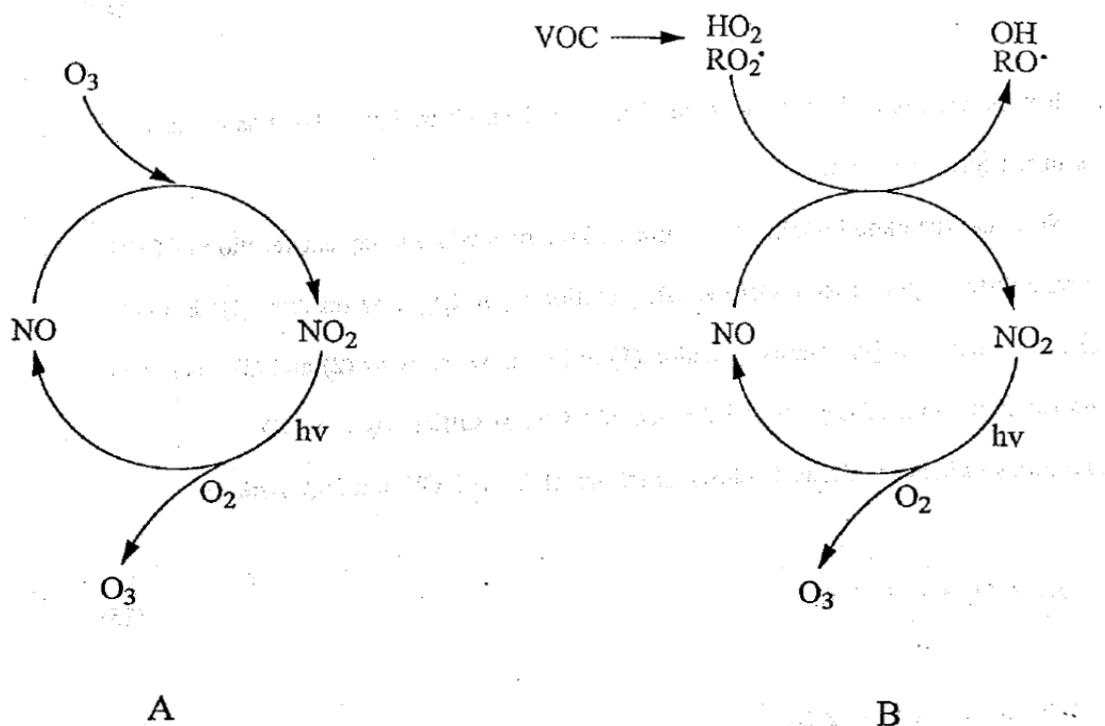


Figura 4.63. Ciclos do O₃. A) A fotólise do NO₂ gera átomos de O(³P) e moléculas de NO, esses átomos de O reagem com o O₂ do ar e produzem O₃. Por sua vez o NO reage com o O₃ e produz NO₂ e O₂, fechando o ciclo. B) Com a presença de compostos orgânicos voláteis (VOC, na sigla em inglês) no ciclo, os produtos de sua degradação (HO₂ e RO₂, o último sendo radicais alcoxílicos) reagem com o NO e formam NO₂. Fonte: Atkinson, 2000.

Uma possível explicação para uma alta concentração de COV's na região do CONSOLIDAR é a presença de vegetação, que emite tais compostos como parte de sua interação com o ambiente. Uma outra explicação seria uma proximidade maior da REVAP, que está posicionada na direção leste-nordeste do laboratório, direção essa em que o vento soprou com muita frequência na região. Para a CETESB, a REVAP encontra-se na direção leste-sudeste, direção bem menos frequente no espectro de direções do vento da região.

No entanto a concentração de COV's não foi medida e portanto a hipótese da emissão pela vegetação baseia-se não nos dados obtidos no monitoramento mas em argumentos encontrados na literatura de que determinados tipos de

plantas emitem quantidades de COV's suficientes para ocorrência desse efeito (CHAMEIDES et al., 1988). Uma outra explicação para essa diferença nas medidas do O₃, que não convoca alta concentração de COV's, é apresentada ao discutir o comportamento do CO.

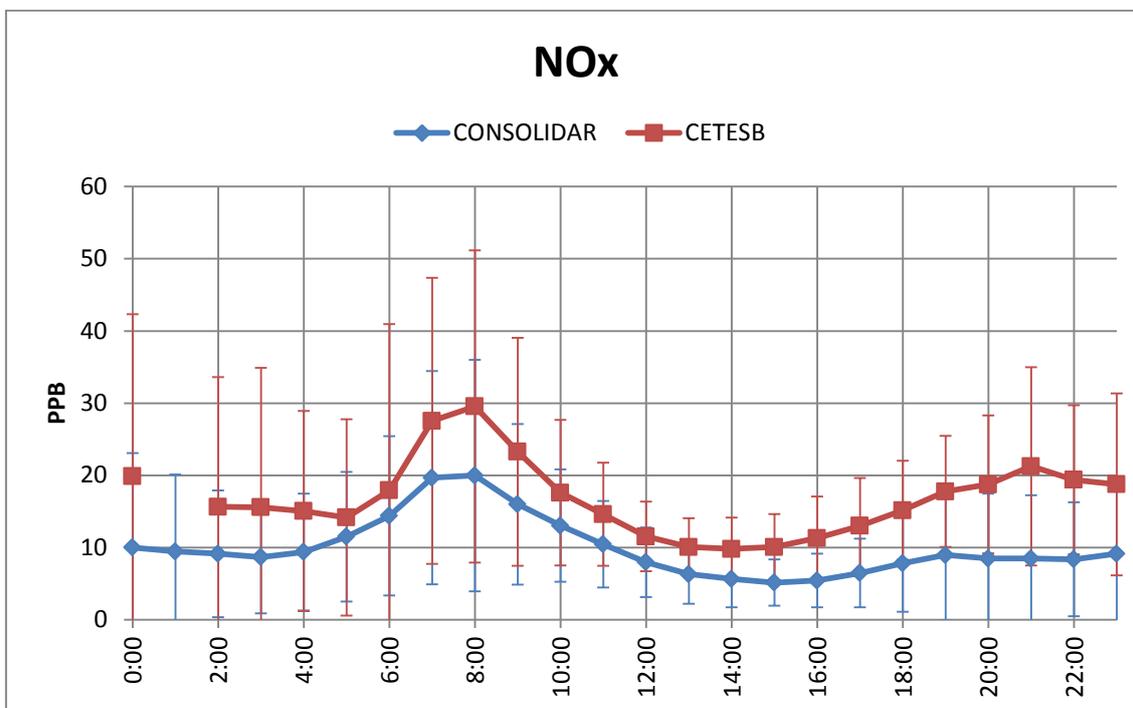


Figura 4.64. Comparação do comportamento médio dos NO_x entre as duas localidades estudadas. As barras representam o desvio padrão.

O comportamento médio dos NO_x nas duas localidades se mostrou bastante parecido. Como complemento à comparação do comportamento do O₃ é interessante notar que uma maior concentração de NO_x não levou a localidade da CETESB a apresentar níveis mais altos de O₃, confirmando que o ciclo de formação desse poluente não é linear em relação à concentração de seus precursores.

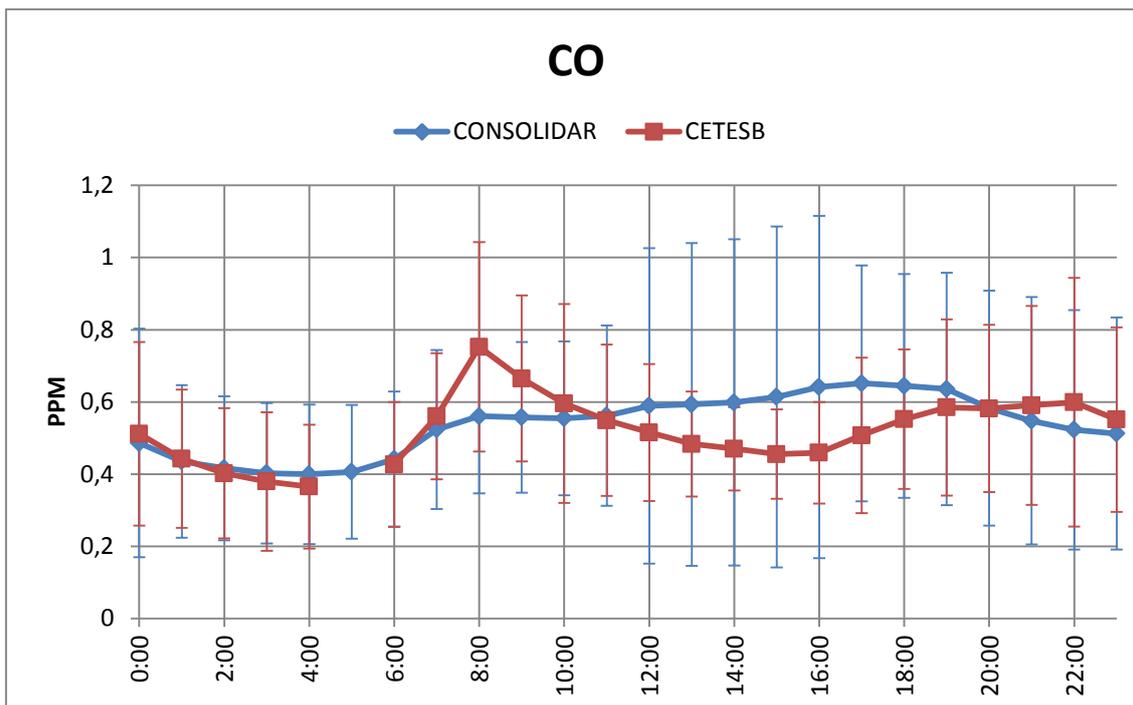


Figura 4.65. Comparação do comportamento médio do CO entre as duas localidades estudadas. As barras representam o desvio padrão.

O comportamento médio do CO na estação da CETESB se mostrou diferente do observado no CONSOLIDAR (Figura 4.61). Pela manhã a elevação da concentração se mostrou no mesmo horário, porém mais intensa, provavelmente por uma proximidade maior dos automóveis e maior fluxo no local. No entanto a partir das 8:00 uma queda na concentração mantém os valores baixos até as 17:00 quando o nível volta a subir. Durante a tarde os valores permaneceram maiores no CONSOLIDAR. Uma explicação para esse comportamento deriva do fato que o CO sofre oxidação pela hidroxila (radical OH) (Equação 4.1), cuja concentração é influenciada pela concentração do NO (Equação 4.3).



As equações 4.1, 4.2 e 4.3 representam a oxidação do CO e sua consequência nos NO_x. O balanço final das reações resume-se à Equação 4.4.



Dessa forma, a concentração mais alta de CO apresentada pela tarde no CONSOLIDAR pode ser associada com as concentrações baixas de NO encontrados ali: menos NO diminui a quantidade de hidroxilas e conseqüentemente diminui a taxa de oxidação do CO, criando um acúmulo desse poluente e aumentando sua concentração.

Essa hipótese pode também fornecer uma explicação para a maior concentração de O₃ no CONSOLIDAR. Considerando que essas reações são proporcionais à concentração de seus reagentes, a sugestão é que haja uma configuração tal que o NO permaneça numa concentração baixa o bastante (concentração crítica do NO) para induzir um acúmulo de CO e que o CO alcance uma concentração alta o suficiente (concentração crítica do CO) para que, mesmo com um número reduzido de hidroxilas, eleve sua taxa de oxidação e induza a formação do radical OH₂, aumentando assim a taxa de oxidação do NO, que por sua vez terá como produto o NO₂ e conseqüentemente uma elevação na concentração do O₃. O esquema é representado num fluxograma na Figura 4.66.

Esse ciclo no entanto ocorreria apenas em regiões em que há baixa emissão de hidrocarbonetos e conseqüentemente menor concentração de hidroxilas, permitindo assim o acúmulo de CO num cenário de baixa taxa de oxidação do NO. As concentrações críticas do NO e do CO dependeriam portanto da quantidade de hidroxilas na região. Quanto menor a concentração de hidroxilas, menor seria a concentração crítica do NO e maior a concentração crítica do CO. Para uma região com alta concentração de hidroxilas o efeito não ocorreria.

A região do centro, portanto, apresentaria níveis mais baixos de O₃ pelo fato de que a concentração do NO é maior que a concentração crítica para o local e portanto não há acúmulo de CO, que por sua vez não alcança a concentração crítica e sua baixa taxa de oxidação não altera de forma substancial a oxidação do NO.

Há na literatura estudos que preveem um aumento na concentração do O_3 derivado de aumentos na concentração de CO e que colocam a oxidação do CO como indutores de O_3 (JENKIN, CLEMITSHAW, 2002; CRUTZEN, ZIMMERMANN, 1991). No entanto os trabalhos são teóricos e não citam o quesito crucial para a hipótese apresentada aqui: de que o acúmulo de CO é consequência de uma diminuição de NO em relação às hidroxilas presentes.

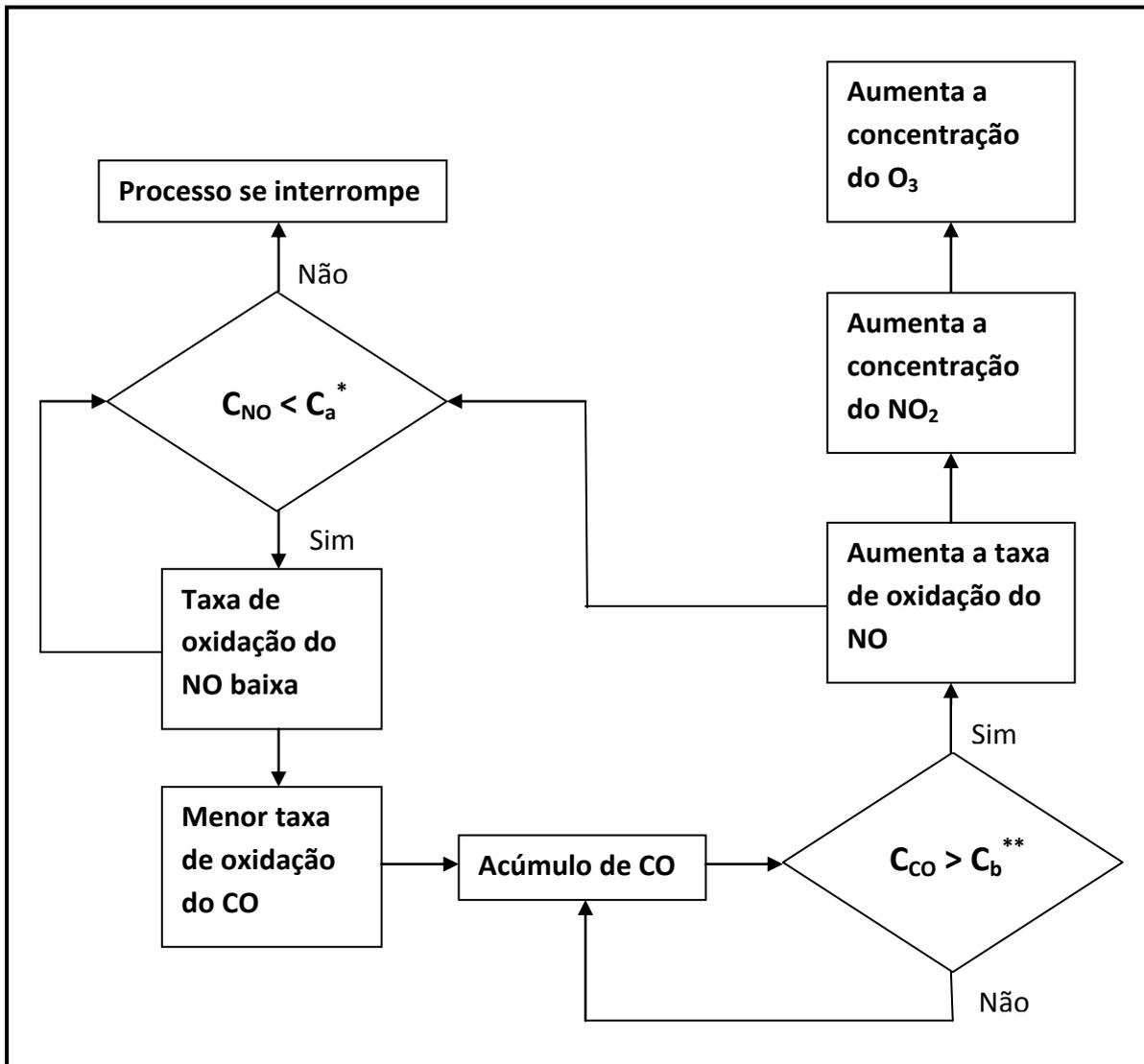


Figura 4.66. Fluxograma para representação do efeito de acúmulo de O_3 pela oxidação do CO. * - concentração crítica do NO, no qual acima desse valor o processo de acúmulo de CO não ocorre. ** - concentração crítica do CO, no qual abaixo desse valor não há aumento na taxa de oxidação do NO.

Num trabalho de 1973, Paul Crutzen cita as reações descritas nas equações 4.1, 4.2, 4.3, 2.1 e 2.2 como uma cadeia química de formação do ozônio na

atmosfera e fornece a taxa de produção de ozônio decorrente de sua ocorrência:

$$\frac{\partial}{\partial t} [O_3] = k[NO][HO_2] \quad (\text{Equação 4.5})$$

Onde $k = 5 \times 10^{-13} \text{ molécula}^{-1} \text{ s}^{-1}$ é a constante da reação da equação 4.3. A concentração do radical HO_2 é proporcional à concentração do CO (Equações 4.1 e 4.2).

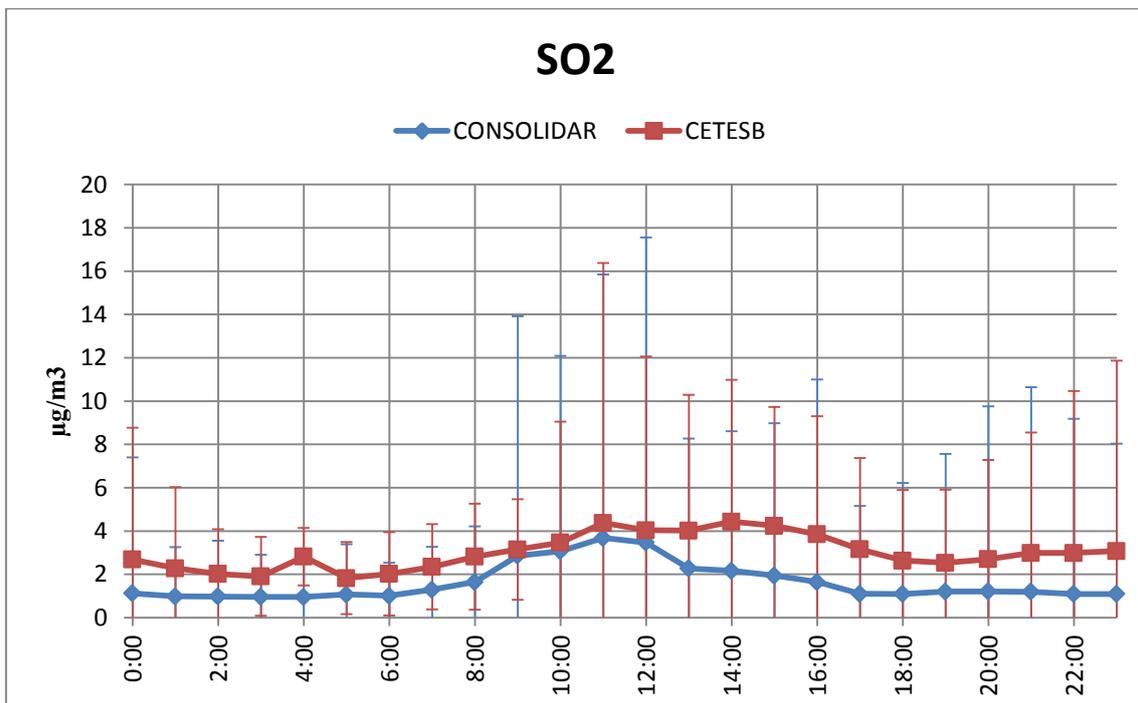


Figura 4.67. Comparação do comportamento médio do SO_2 entre as duas localidades estudadas. As barras representam o desvio padrão.

O SO_2 apresenta comportamento médio bastante similar entre as duas localidades, com a CETESB apresentando valores superiores. É notável que em ambas as localidades a concentração começa a se elevar no começo da manhã, alcança um máximo entre 11:00 e 12:00 e desce pela tarde, chegando a níveis baixos no cair da noite. Embora de maneira não tão clara como o CO, pode-se associar esse comportamento médio também à emissão veicular, como reforça a análise de dia de semana / fim de semana, observando que os níveis altos ocorrem durante o dia.

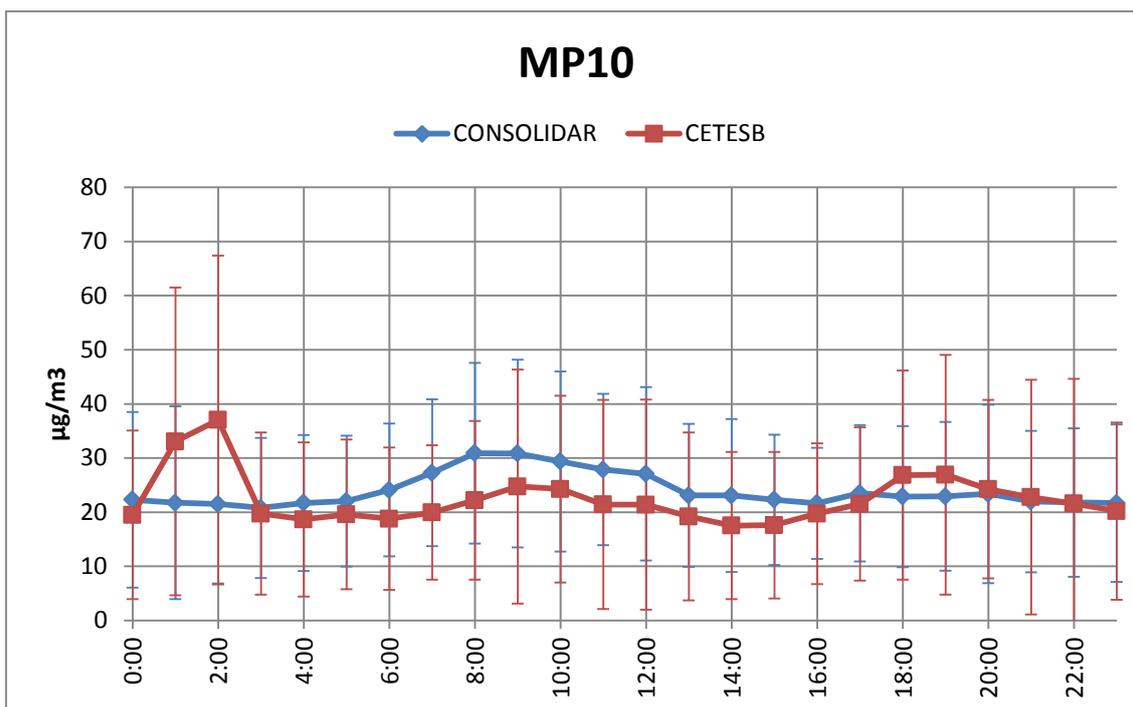


Figura 4.68. Comparação do comportamento médio do material particulado menor que 10 μm entre as duas localidades estudadas. As barras representam o desvio padrão.

Nota-se imediatamente o pico de máximo entre 1:00 e 2:00 do MP10 na estação da CETESB (Figura 4.68). Por todo o período de monitoramento foi muito comum valores altíssimos de concentração nesse período da madrugada serem medidos ali. Segundo a validação automática da estação esses dados eram válidos, no entanto existe uma alta desconfiança quanto a esse resultado. Excluindo esse período o comportamento médio foi similar entre as duas localidades. Entre 17:00 e 20:00 a média da CETESB ultrapassa a do CONSOLIDAR, provavelmente fruto de uma circulação de automóveis mais intensa nesse horário na região central. Os valores mais altos do CONSOLIDAR por todo o resto do dia podem ser associados a materiais particulados provenientes da vegetação presente ali, especialmente pólen e restos orgânicos das plantas.

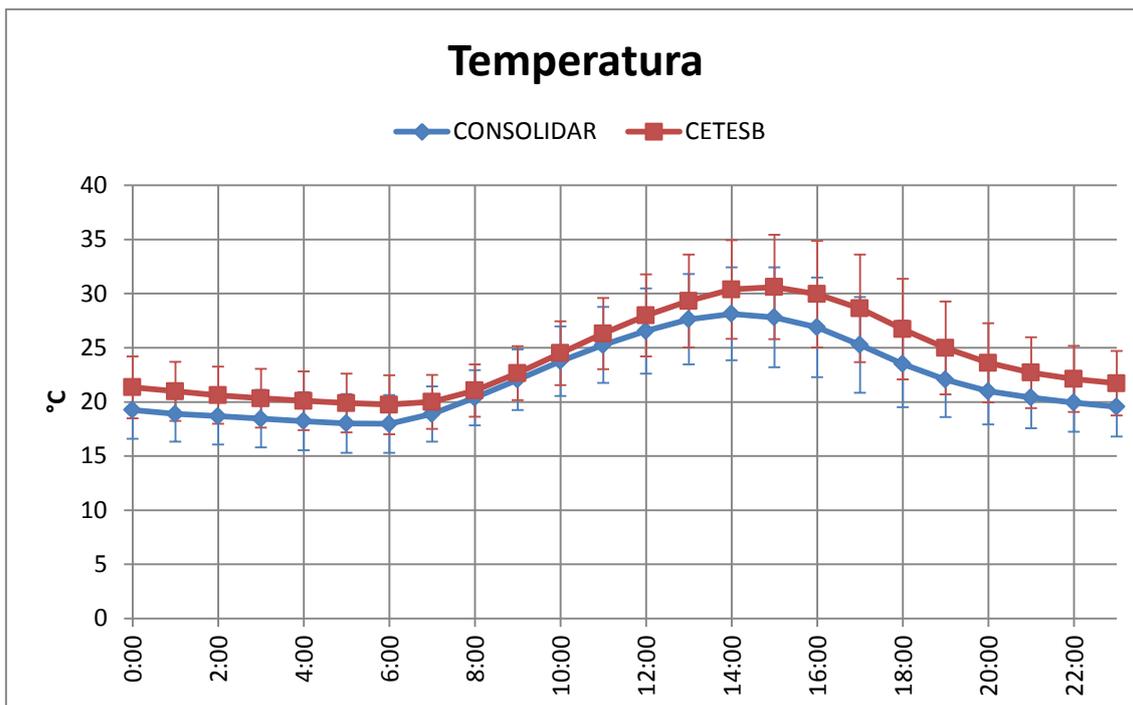


Figura 4.69. Comparação do comportamento médio da temperatura entre as duas localidades estudadas. As barras representam o desvio padrão.

Em relação a temperatura ficou claro que a presença de vegetação mantém valores mais baixos por todo o dia e em todas as situações atmosféricas observadas (dias de céu limpo, nublados ou com chuva). Pelo gráfico apresentado na Figura 4.69 é possível verificar que a temperatura na região com vegetação, em média, alcança seu máximo às 14:00 e a partir daí começa a diminuir, enquanto que na região sem vegetação ela continua a subir até as 15:00, quando então começa a diminuir, embora em ritmo menor que na outra localidade. A diferença entre as duas vai então diminuindo até que a radiação do sol volta a atingir o solo. Durante a manhã os valores se aproximam.

Esse comportamento é associado à presença massiva de asfalto e concreto na pavimentação e estrutura da rua. O asfalto e os muros de concreto se aquecem enquanto absorvem durante todo o dia a radiação do sol e durante a noite emitem em forma de calor a radiação absorvida, não permitindo assim que a região se resfrie. A presença de sombras de construções não é equivalente à sombra de uma árvore, já que enquanto a radiação que incide nas folhas da árvore é absorvida e transformada em energia química pelo processo de

fotossíntese, a radiação que é absorvida numa construção será transformada posteriormente em energia térmica.

Diferenças extremas foram apresentadas durante o período de monitoramento. Foi recorrente o horário entre 15:00 e 17:00 apresentar diferenças maiores que 8°C entre as duas estações, chegando em vários dias a superar 10°C. A seguir alguns casos são apresentados para ilustrar essa situação.

Na Figura 4.70 é possível visualizar o perfil da temperatura de ambas as localidades para os dias 30 e 31 de outubro. Nos dois dias houve diferença superior a 10°C às 17:00. No dia 10 enquanto a CETESB registrou 37,7°C nesse horário o CONSOLIDAR registrou 27,3°C. Já no dia 11 os valores foram de 34,6 e 24,5°C.

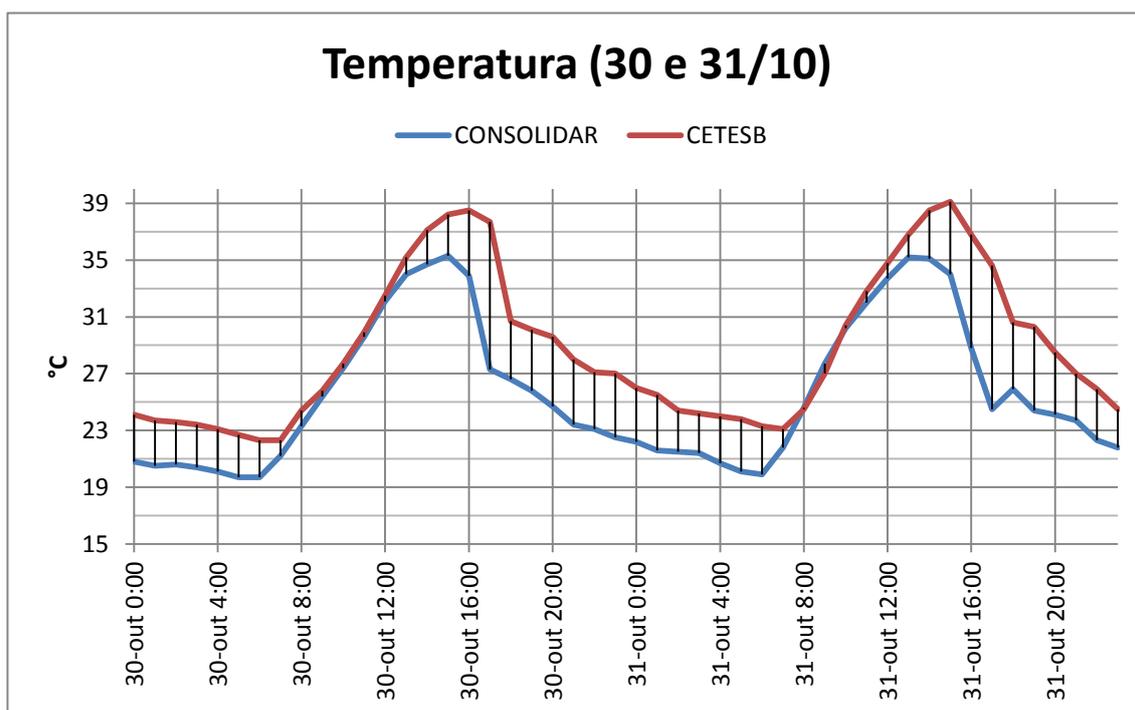


Figura 4.70. Comparação da temperatura entre as duas estações para os dias 30 e 31 de outubro. Dados em médias horárias.

O dia 7 de novembro apresentou a maior diferença entre as médias horárias em todo o período de monitoramento quando às 15:00 a CETESB apresentou temperatura de 31,7°C enquanto que no CONSOLIDAR no mesmo horário a temperatura era de 19°C, uma diferença de 12,7°C (Figura 4.71).

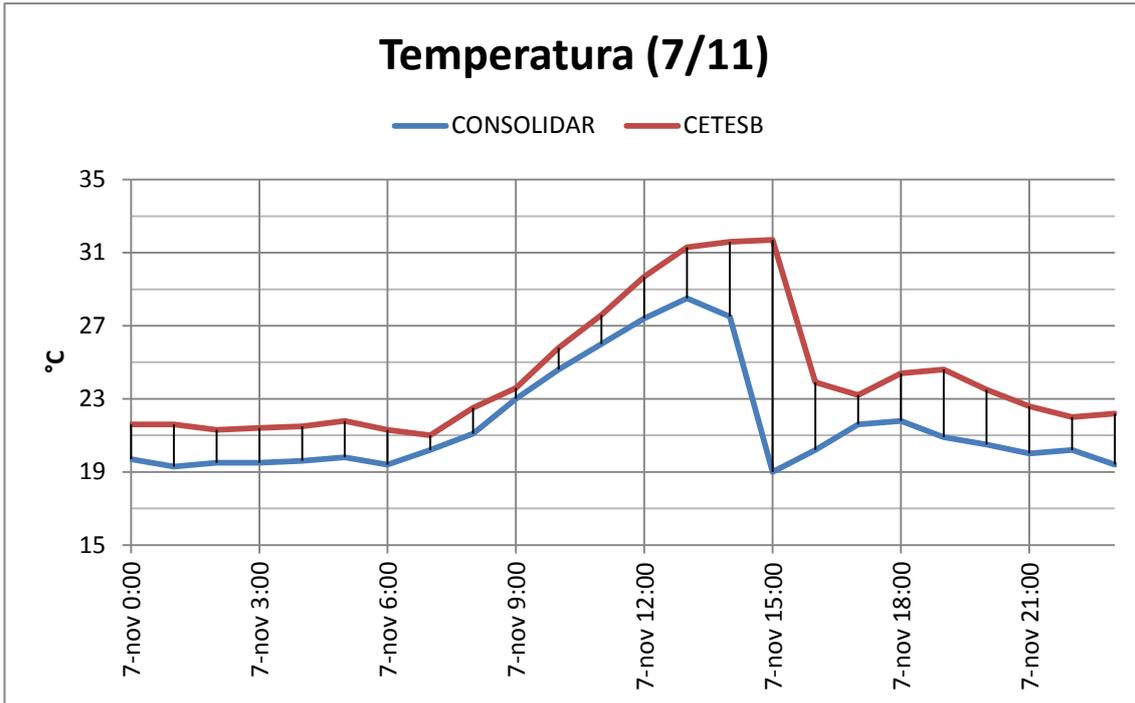


Figura 4.71. Comparação da temperatura entre as duas estações para o dia 7 de novembro. Dados em médias horárias.

Às 14:00 do dia 13 de dezembro a diferença foi de 10,3°C, com a estação da CETESB apresentando 34,7°C e o laboratório CONSOLIDAR 24,4°C (Figura 4.72).

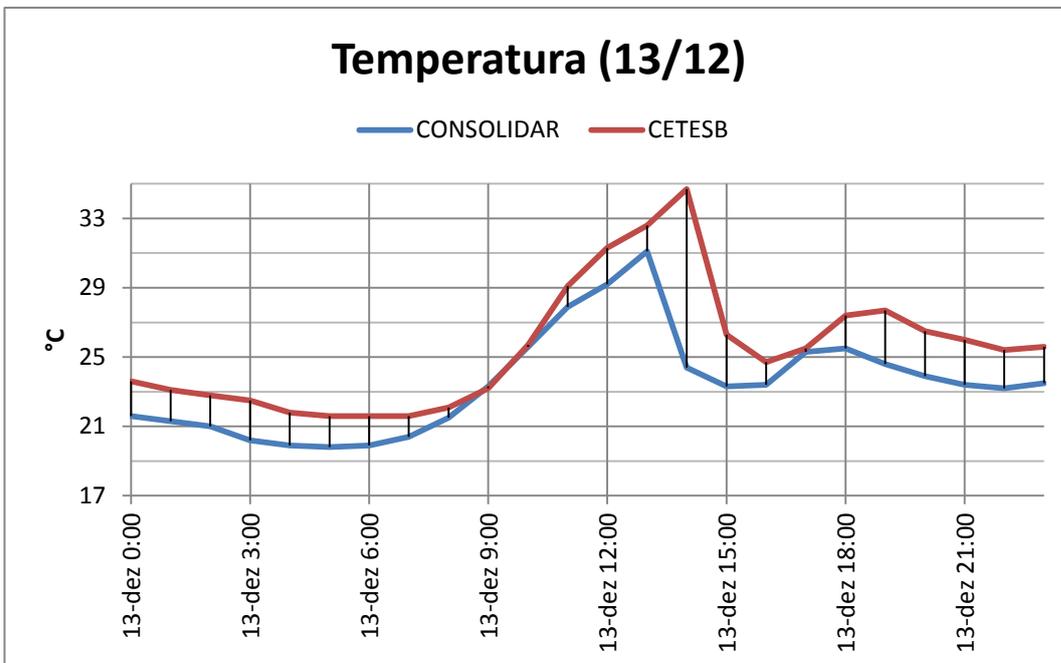


Figura 4.72. Comparação da temperatura entre as duas estações para o dia 13 de dezembro. Dados em médias horárias.

Ao reparar nas curvas de temperatura pode-se notar um comportamento característico que contribui para esses grandes valores na diferença entre as duas regiões. Enquanto que na região do CONSOLIDAR a temperatura começa a se elevar junto com o nascer do sol por volta das 6:00, na região da estação da CETESB essa elevação só começa uma hora depois, às 7:00. Isso pode ser associado a presença de construções próximas da estação que bloqueiam a radiação enquanto o sol se mantém baixo no horizonte. Isso faz com que a temperatura nas duas regiões se mantenham próximas pela manhã. A partir da tarde no entanto, a região do CONSOLIDAR rapidamente alcança seu máximo - normalmente por volta das 14:00, produto da radiação incidente mais intensa no período de 12:00 a 14:00 – e começa a diminuir, já a região da CETESB continua a se aquecer, alguns dias até as 16:00, o que aumenta a amplitude da diferença entre as duas regiões. Esse comportamento deve-se, como dito anteriormente, à absorção de radiação pelo solo pavimentado e sua consequente emissão em forma de energia térmica.

No intuito de avaliar o quanto a diferença de temperatura entre as duas estações mudou em relação a dias quentes e frios uma estatística foi elaborada. Foi calculada a média diária de temperatura para todos os dias em cada uma das estações. Foi então calculada a média das diferenças, primeiramente de todos os dias, posteriormente os dias considerados quentes (em que ambas as estações apresentaram média diária maior que 23°C), assim como dias considerados normais (médias diárias entre 20 e 23°C) e dias considerados frios (com ambas as estações apresentando médias diárias menores que 20°C).

Tabela 4.6 – Diferença de Temperatura entre CETESB e CONSOLIDAR

| | Total | >23°C | 20<T<23°C | <20°C |
|----------------------|-------|-------|-----------|-------|
| Diferença Média (°C) | 2,08 | 2,15 | 1,52 | 1,37 |

Pelo resultado é possível visualizar que em dias quentes a diferença é maior que a média, enquanto que em dias considerados normais e frios a diferença entre as duas estações foi menor. Pode-se associar a esse resultado o fato de

que os dias mais quentes são consequência de maior incidência de radiação, o que causa um maior aquecimento no asfalto da região da CETESB, sendo superior ao aquecimento equivalente na região do CONSOLIDAR. Concluindo, em dias mais quentes a diferença tende a aumentar entre as duas regiões.

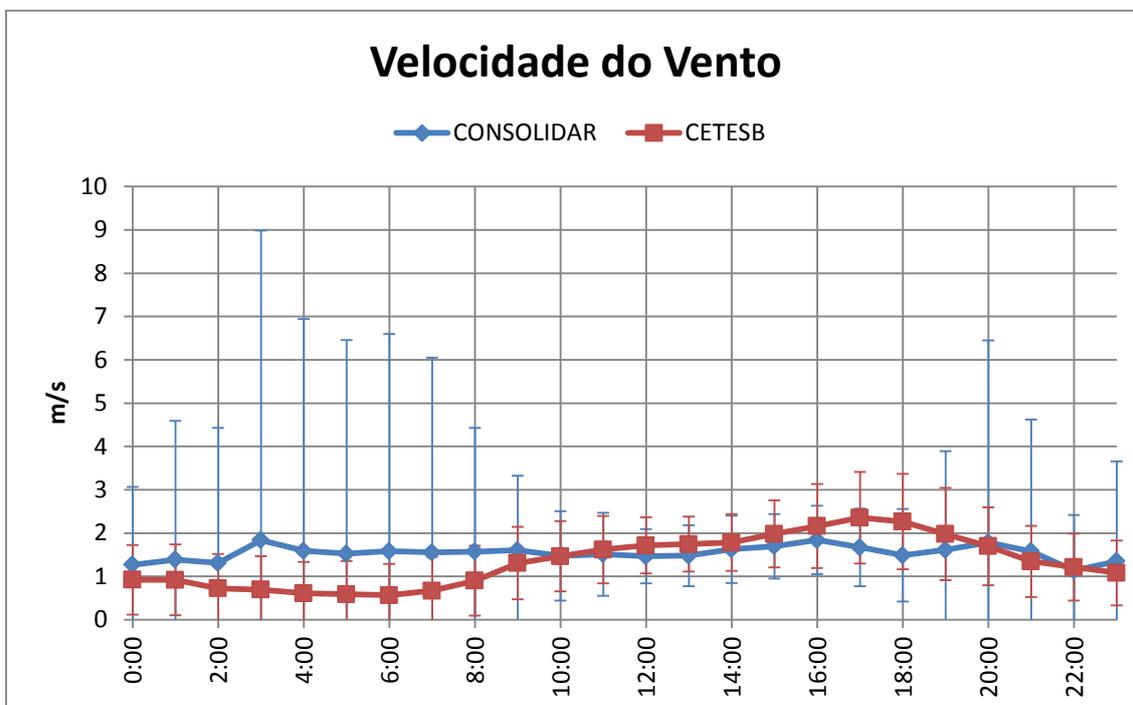


Figura 4.73. Comparação entre as duas localidades estudadas do comportamento médio da velocidade do vento. As barras representam o desvio padrão.

Em relação à velocidade média do vento, as duas regiões tiveram valores e comportamentos próximos, com exceção do período da madrugada, quando em alguns dias a circulação na região do CONSOLIDAR se intensificava, possivelmente pela inexistência de construções altas em boa parte da redondeza.

4.3.2 Variação dias úteis / fim de semana

Para efeito de comparação o mesmo procedimento efetuado com os dados do laboratório CONSOLIDAR em relação a variação dias úteis / fim de semana foi repetido com os dados da CETESB. Os resultados são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Média total, somente dias úteis e somente fins de semana para os dados da CETESB

| Poluente | % de Semanas DS>FdS | % Corrigida | Média Total | Média D.U. | Média FdS | Md. FdS Corrigida | % diferença |
|--------------|---------------------|-------------|-------------|------------|-----------|-------------------|-------------|
| CO (ppm) | 57 | 45 | 0,52 | 0,52 | 0,52 | 0,56 | 6,87 |
| NOx (ppb) | 93 | 92 | 16,81 | 18,35 | 12,86 | 13,24 | -27,85 |
| SO2 (µg/m3) | 75 | 70 | 2,79 | 3,07 | 2,11 | 2,25 | -26,82 |
| O3 (µg/m3) | 47 | 40 | 44,57 | 44,65 | 44,50 | 46,19 | 3,44 |
| MP10 (µg/m3) | 63 | 54 | 21,12 | 22,73 | 17,46 | 19,23 | -15,41 |

DS=Dias úteis; FdS=Final de Semana; Md.=Média

Para uma fácil comparação foram colocadas na Tabela 4.8 a porcentagem de semanas válidas em que a média dos dias úteis foi superior à média do fim de semana para as duas estações, além da diferença percentual entre a média de todos os finais de semana com a média de todos os dias úteis, também para ambas as estações.

Tabela 4.8 – Comparação na variação dias úteis / fim de semana

| Poluente | % Corrigida | | Diferença Percentual | |
|-----------------|-------------|--------|----------------------|--------|
| | CONSOLIDAR | CETESB | CONSOLIDAR | CETESB |
| CO | 33 | 45 | 6,0 | 6,9 |
| NO _x | 75 | 92 | -22,3 | -27,8 |
| SO ₂ | 88 | 70 | -39,6 | -26,8 |
| O ₃ | 43 | 40 | -4,4 | 3,4 |
| MP10 | 50 | 54 | -18,0 | -15,4 |

É possível visualizar que as duas localidades apresentaram comportamentos parecidos em relação à variação dia de semana / fim de semana. A informação mais preciosa dessa comparação reside na comparação do NO_x. Como dito anteriormente, pela análise dos dados do CONSOLIDAR, os dióxidos de nitrogênio foram o que mais indicaram forte ligação com emissão veicular, principalmente o NO. A maior porcentagem de semanas e maior diferença percentual apresentados na CETESB vêm de encontro a essa conclusão, considerando que essa região é mais suscetível a emissões veiculares. Por sua vez, o SO₂, que havia apresentado porcentagem alta e grande diferença percentual nos dados do CONSOLIDAR, apresentou porcentagem e diferença

menores na CETESB, embora ainda com valores elevados, o que diminui a força da hipótese apresentada anteriormente.

Para complementar essa análise e tentar abordar essa questão de uma maneira diferente uma estatística alternativa foi efetuada com os dados tanto da estação da CETESB como do laboratório CONSOLIDAR.

O mesmo procedimento para a produção dos gráficos do ciclo diurno foi repetido, porém, nessa ocasião, separando dias úteis de sábados e domingos. A média de cada hora do dia, portanto, leva em conta todas as médias horárias referentes àquele horário nos dias úteis ou nos finais de semana. Ao todo foram 85 dias úteis e 34 sábados e domingos. O resultado é apresentado nos gráficos a seguir. Ressaltando que os finais de semana excluídos na análise anterior foram mantidos nessa vez, já que a influência dos eventos de dispersão nessa nova análise se torna muito mais diluída.

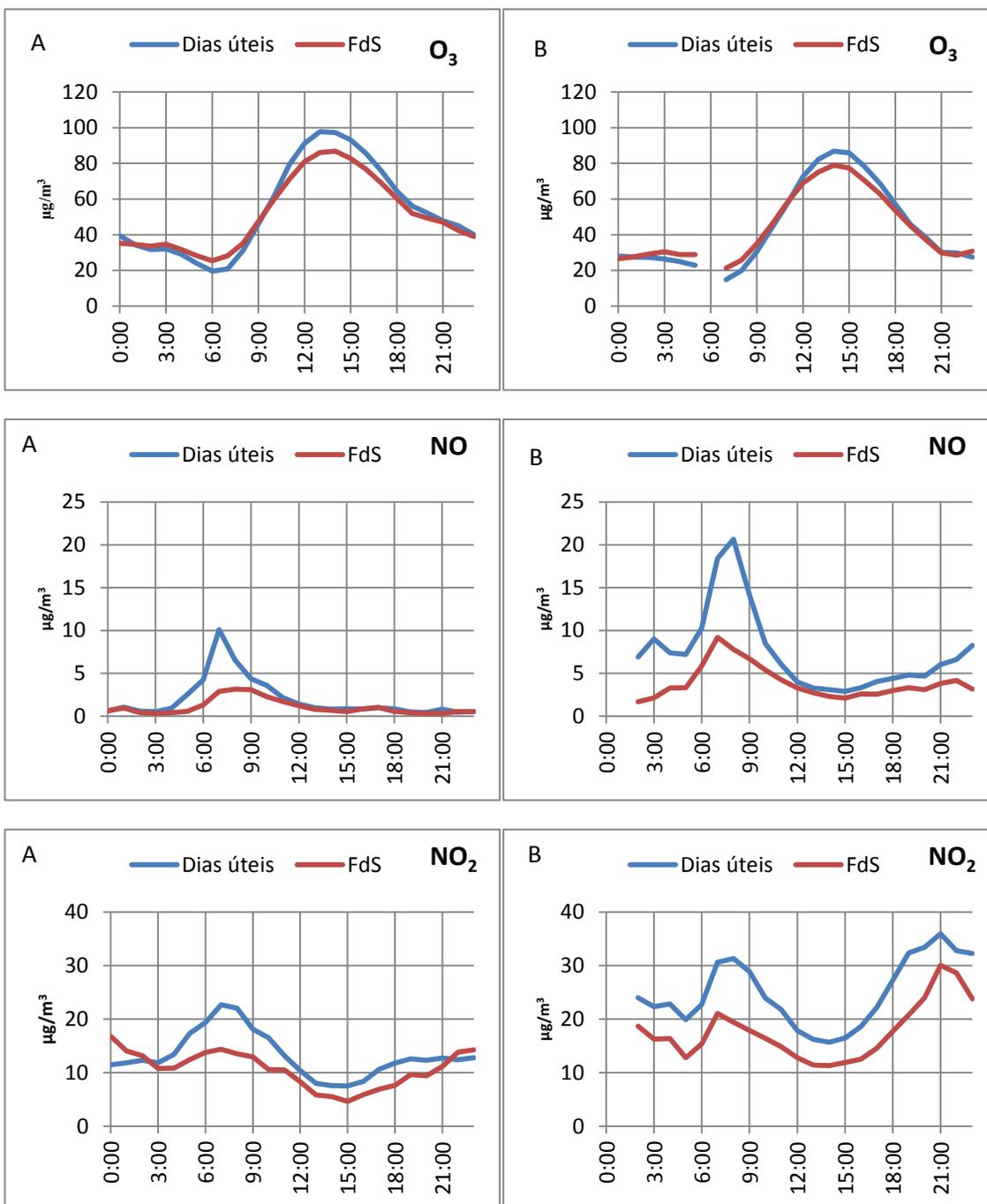


Figura 4.74. Variação entre dias úteis e finais de semana para o O_3 , NO e NO_2 . A: CONSOLIDAR. B: CETESB. Fds: Finais de semana.

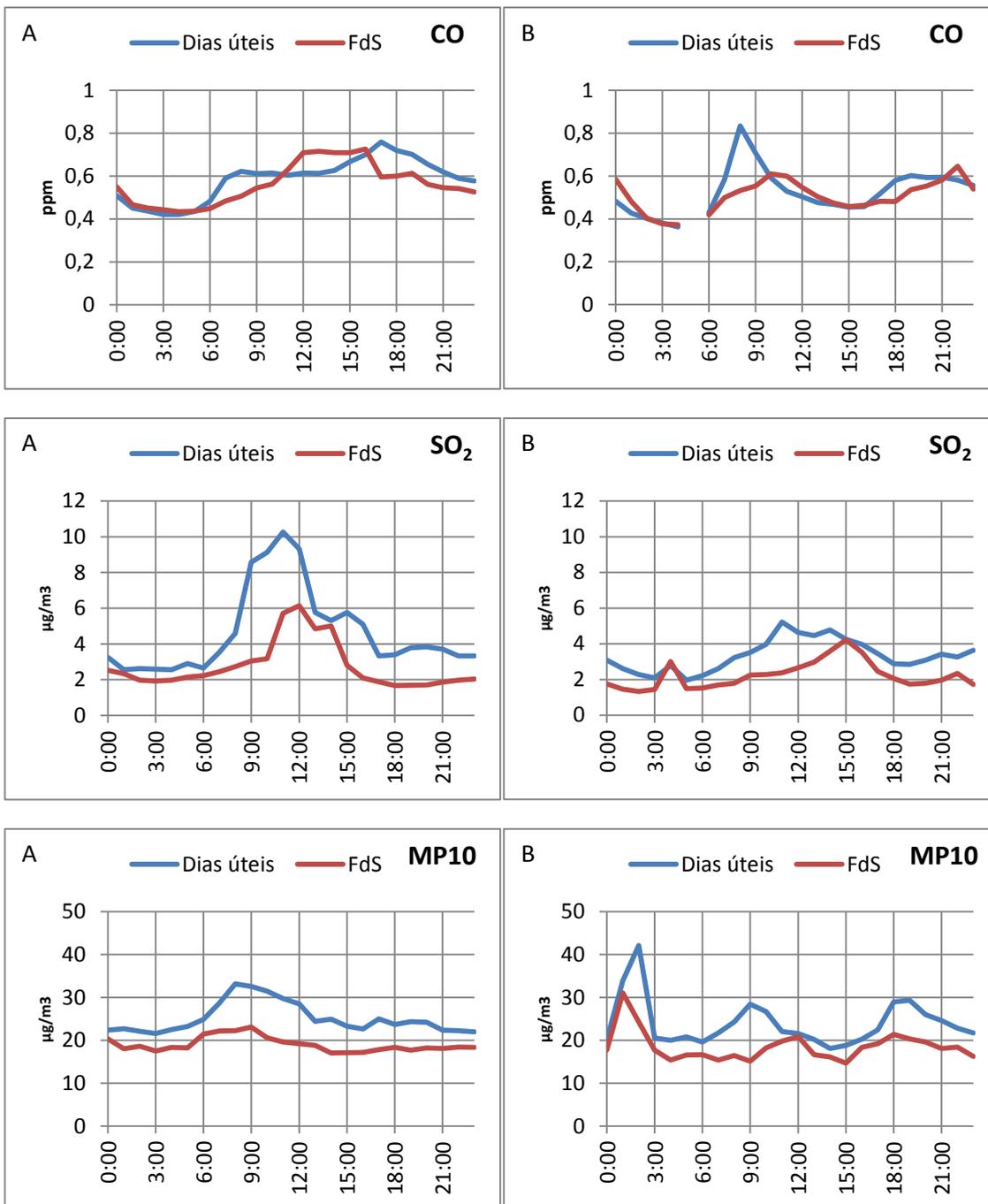


Figura 4.75. Variação entre dias úteis e finais de semana para o CO, SO₂ e MP10. A:CONSOLIDAR. B:CETESB. Fds: Finais de semana.

Excluindo o CO, nota-se que em ambas as regiões, a diminuição de circulação de automóveis foi o suficiente para baixar a concentração de todos os poluentes.

Analisando o comportamento do CO em ambas as estações nos dias úteis percebe-se que a concentração aumenta a partir das 6:00 decorrente da

emissão de automóveis que começam a circular. A média dos finais de semana confirma essa hipótese apresentando um crescimento mais suave. No entanto a região do CONSOLIDAR apresenta um aumento de concentração pela tarde nos finais de semana em comparação com os dias úteis. Esse comportamento está de acordo com a hipótese sugerida anteriormente: uma diminuição na concentração do NO diminui ainda mais a quantidade de hidroxilas e há um acúmulo maior de CO.

A mesma redução não ocorre na região da CETESB porque mesmo menor que nos dias úteis, o nível de NO continua alto o bastante durante os finais de semana para manutenção de um nível de hidroxilas no ar suficiente para causar uma taxa de oxidação do CO maior do que a sua taxa de emissão.

Considerando as concentrações críticas citadas anteriormente, pode-se estimar que para a região do CONSOLIDAR elas são de aproximadamente $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o NO e 0,6 ppm para o CO. Deve-se sublinhar que são concentrações bastante baixas para ambos os poluentes.

Existem diversos estudos na literatura que documentam a elevação da concentração do O_3 durante os finais de semana em diferentes regiões do planeta, rurais e urbanas, em diferentes estações do ano (SEGUEL et al., 2012; DEBAJE, KAKADE, 2006; SILVA JÚNIOR et al., 2009; ATKINSON-PALOMBO et al., 2006; MARR E HARLEY, 2002) e a explicação convocada por eles está numa pequena redução de NO_x nos finais de semana e aumento da razão VOC/NO_x . No entanto a situação no presente estudo foi inversa, com o ozônio apresentando valores inferiores durante os finais de semana em ambas as estações. Essa situação é um exemplo da complexidade da formação do O_3 . Há na literatura a formulação de dois regimes fotoquímicos da formação do O_3 (SILLMAN, 1999): o *NO_x -sensitive*, quando os valores de NO_x são baixos e um aumento em sua concentração produz um aumento na concentração do O_3 ; e o *VOC -sensitive* (ou *NO_x -saturated*), quando a concentração do O_3 aumenta com aumentos na concentração dos compostos orgânicos voláteis e diminui com aumentos na concentração dos NO_x . A partir dessa definição percebe-se que as duas regiões monitoradas enquadram-se

num regime *NO_x-sensitive* de formação de O₃, devido às baixas concentrações de NO_x presentes ali. Um trabalho de 2009 realizado em São José dos Campos por Sales comparou as medições de concentração de O₃ tomadas em três regiões da cidade no ano de 2007: no INPE, na estação da CETESB e na UNIVAP. Contrariamente ao que foi constatado durante o período de monitoramento do presente estudo, em 2008 a concentração no INPE era a menor e na CETESB a maior. Além disso, que nos meses setembro, outubro, novembro e dezembro foi constatado que a concentração do ozônio era maior durante os finais de semana, assim como a estatística anual. Percebe-se então que o perfil de formação do ozônio em São José dos Campos alterou-se comparando com a situação a 5 anos atrás. No entanto os percussores do ozônio não foram monitorados no estudo citado e portanto uma discussão qualitativa é inviável, mesmo assim, qualitativamente, é possível relacionar essa mudança de comportamento à diminuição na emissão de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio pela REVAP.

Os poluentes SO₂ e MP10 mantiveram comportamentos semelhantes entre dias úteis e finais de semana, havendo apenas um decréscimo na concentração fruto da diminuição da circulação de automóveis.

4.3.3 Ultrapassagens do padrão

4.3.3.1 Ozônio

Para comparar a diferença na frequência de ocorrência de altas concentrações do O₃ entre as duas localidades foi contado quantas medições determinaram médias horárias maiores que 100 µg/m³. Foram criadas três categorias: entre 100 e 120 µg/m³; entre 120 e 160 µg/m³; e maior que 160 µg/m³. O resultado é apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Número de ocorrência de altas concentrações do O₃

| Local | Número de ocorrências | | | |
|------------|-----------------------|-----------|------|--------------|
| | 100<x≤120 | 120<x≤160 | >160 | Total (>100) |
| CONSOLIDAR | 160 | 101 | 11 | 272 |
| CETESB | 110 | 54 | 4 | 168 |

Como era esperado, na região do CONSOLIDAR foi mais numerosa a ocorrência de altas concentrações do que na estação da CETESB. Nenhuma das duas estações registrou concentrações acima de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Segundo o padrão estadual de qualidade do ar para o ozônio a média móvel das últimas oito horas não deve ultrapassar o valor $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Já pelas recomendações de 2011 da OMS esse valor é de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nas figuras 4.76 e 4.77 estão os perfis de média horária da concentração do O_3 para todo o período de monitoramento em ambas as localidades, juntamente com a média móvel das últimas oito horas (linha preta) e os padrões de qualidade para esse poluente: o padrão estadual (verde), e o padrão da OMS (vermelho), ambos referentes à média móvel de 8 horas.

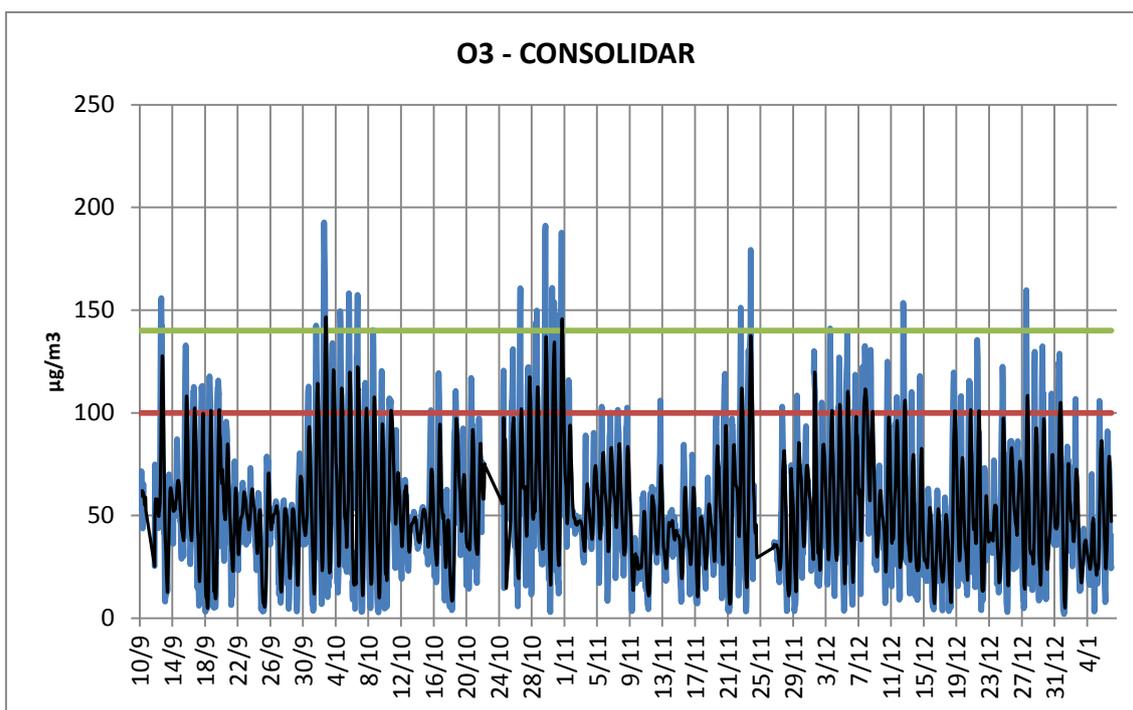


Figura 4.76. Médias horárias da concentração do O_3 no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento. A linha preta é a média móvel com período de 8 horas. A linha vermelha representa o padrão da OMS e a linha verde de padrão estadual.

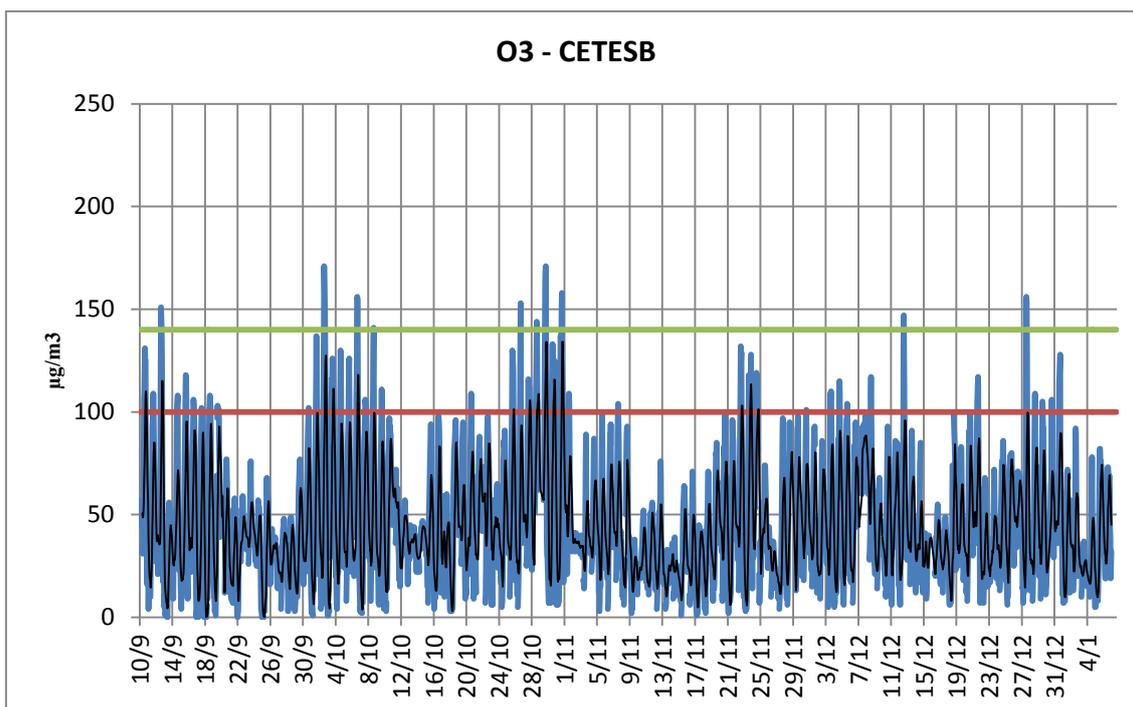


Figura 4.77. Médias horárias da concentração do O₃ na CETESB para todo o período de monitoramento. A linha preta é a média móvel com período de 8 horas. A linha vermelha representa o padrão da OMS e a linha verde o padrão estadual.

O número total de ultrapassagens é indicado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Número de ultrapassagens dos padrões de qualidade para o O₃

| Local | Número de ultrapassagens | |
|------------|--------------------------|------------|
| | Padrão Estadual | Padrão OMS |
| CONSOLIDAR | 6 | 149 |
| CETESB | 0 | 63 |

O padrão estadual foi ultrapassado apenas na região do CONSOLIDAR, nos dias 3 e 31 de Outubro de 2013. O padrão da OMS foi ultrapassado pelo menos uma vez no dia em:

- CONSOLIDAR: 34 dias (29% da quantidade total de dias do monitoramento)
- CETESB: 14 (12%)

Para uma análise mais detalhada foram selecionados os dias que apresentaram pelo menos uma ultrapassagem ao padrão da OMS. O resultado é apresentado nas Tabelas 4.11.

Tabela 4.11 – Dias com pelo menos uma média móvel do O₃ superior a 100 µg/m³ (Padrão OMS)

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10-Sep | 11-Sep | 12-Sep | 13-Sep | 14-Sep | 15-Sep | 16-Sep | 17-Sep | 18-Sep | 19-Sep |
| 20-Sep | 21-Sep | 22-Sep | 23-Sep | 24-Sep | 25-Sep | 26-Sep | 27-Sep | 28-Sep | 29-Sep |
| 30-Sep | 1-Oct | 2-Oct | 3-Oct | 4-Oct | 5-Oct | 6-Oct | 7-Oct | 8-Oct | 9-Oct |
| 10-Oct | 11-Oct | 12-Oct | 13-Oct | 14-Oct | 15-Oct | 16-Oct | 17-Oct | 18-Oct | 19-Oct |
| 20-Oct | 21-Oct | 22-Oct | 23-Oct | 24-Oct | 25-Oct | 26-Oct | 27-Oct | 28-Oct | 29-Oct |
| 30-Oct | 31-Oct | 1-Nov | 2-Nov | 3-Nov | 4-Nov | 5-Nov | 6-Nov | 7-Nov | 8-Nov |
| 9-Nov | 10-Nov | 11-Nov | 12-Nov | 13-Nov | 14-Nov | 15-Nov | 16-Nov | 17-Nov | 18-Nov |
| 19-Nov | 20-Nov | 21-Nov | 22-Nov | 23-Nov | 24-Nov | 25-Nov | 26-Nov | 27-Nov | 28-Nov |
| 29-Nov | 30-Nov | 1-Dec | 2-Dec | 3-Dec | 4-Dec | 5-Dec | 6-Dec | 7-Dec | 8-Dec |
| 9-Dec | 10-Dec | 11-Dec | 12-Dec | 13-Dec | 14-Dec | 15-Dec | 16-Dec | 17-Dec | 18-Dec |
| 19-Dec | 20-Dec | 21-Dec | 22-Dec | 23-Dec | 24-Dec | 25-Dec | 26-Dec | 27-Dec | 28-Dec |
| 29-Dec | 30-Dec | 31-Dec | 1-Jan | 2-Jan | 3-Jan | 4-Jan | 5-Jan | 6-Jan | |

BRANCO: Não houve ultrapassagem; AZUL: Apenas CETESB apresentou ultrapassagem; VERDE: Apenas CONSOLIDAR apresentou ultrapassagem; VERMELHO: As duas estações apresentaram ultrapassagem.

Percebe-se que no começo e no final de Outubro houveram períodos de mais de uma semana ultrapassando o padrão da OMS.

4.3.3.2 Dióxido de Enxofre

Para o dióxido de enxofre o padrão estadual de qualidade do ar estabelece que a média móvel da concentração nas últimas 24 horas não deve ultrapassar o valor de 60 µg/m³. Já pelas recomendações de 2011 da OMS esse valor é de 20 µg/m³. O padrão nacional não foi ultrapassado. O padrão da OMS foi ultrapassado no dia 26 de dezembro de 2012 em ambas as localidades.

Nas figuras 4.78 e 4.79 estão os perfis de média horária da concentração do SO₂ para todo o período de monitoramento em ambas as localidades, juntamente com a média móvel das últimas 24 horas (linha preta) e os padrões de qualidade para esse poluente: o estadual (linha verde) e o da OMS (linha vermelha), ambos referentes à média móvel de 24 horas.

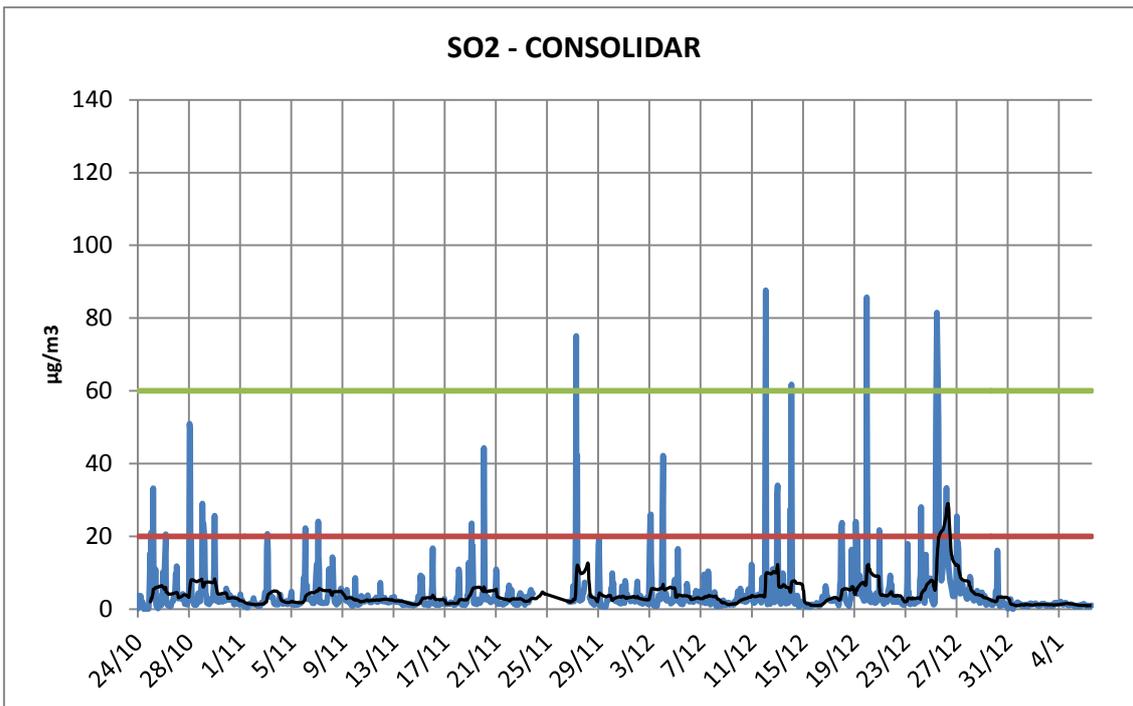


Figura 4.78 . Médias horárias da concentração do SO₂ no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento. A linha preta é a média móvel com período de 24 horas. A linha vermelha representa o padrão da OMS e a linha verde o padrão estadual.

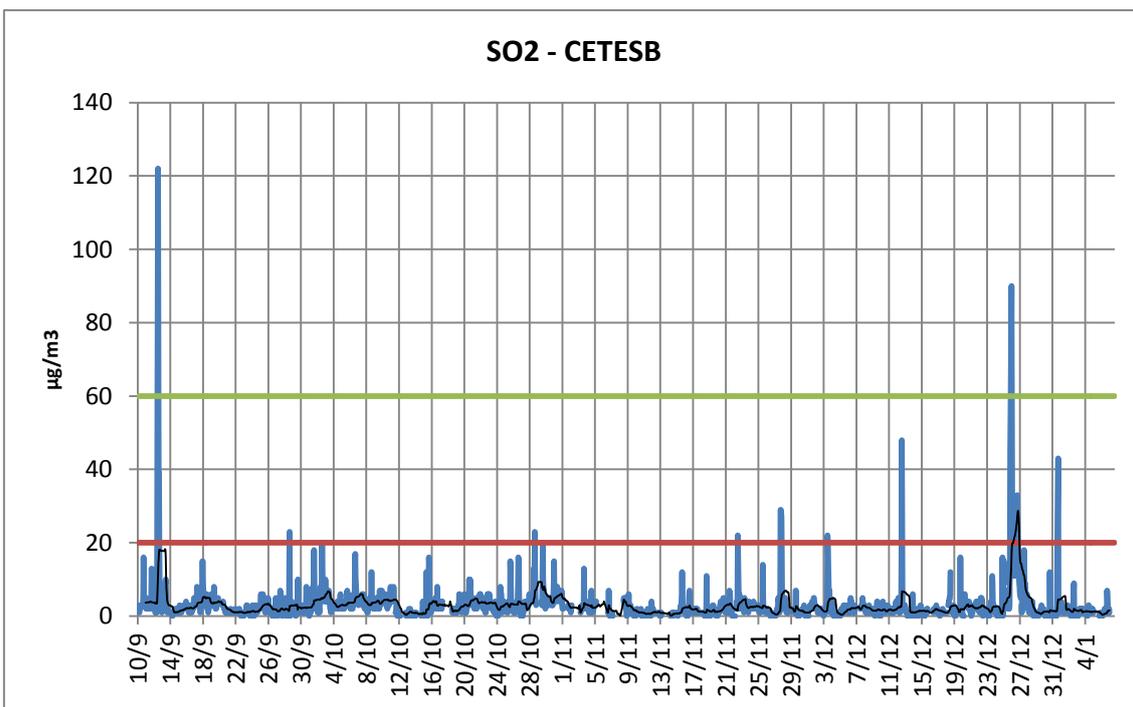


Figura 4.79. Médias horárias da concentração do SO₂ na CETESB para todo o período de monitoramento. A linha preta é a média móvel com período de 24 horas. A linha vermelha representa o padrão da OMS e a verde o padrão estadual.

4.3.3.3 MP10

Para o MP10 o padrão estadual de qualidade do ar estabelece que a média móvel de 24 horas da concentração não deve ultrapassar o valor de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Já pelas recomendações de 2011 da OMS esse valor é de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nas figuras 4.80 e 4.81 estão os perfis de média horária da concentração do MP10 para todo o período de monitoramento em ambas as localidades, juntamente com a média móvel das últimas 24 horas (linha preta) e os padrões de qualidade para esse poluente: o estadual (linha verde) e o da OMS (linha vermelha), ambos referentes à média móvel de 24 horas.

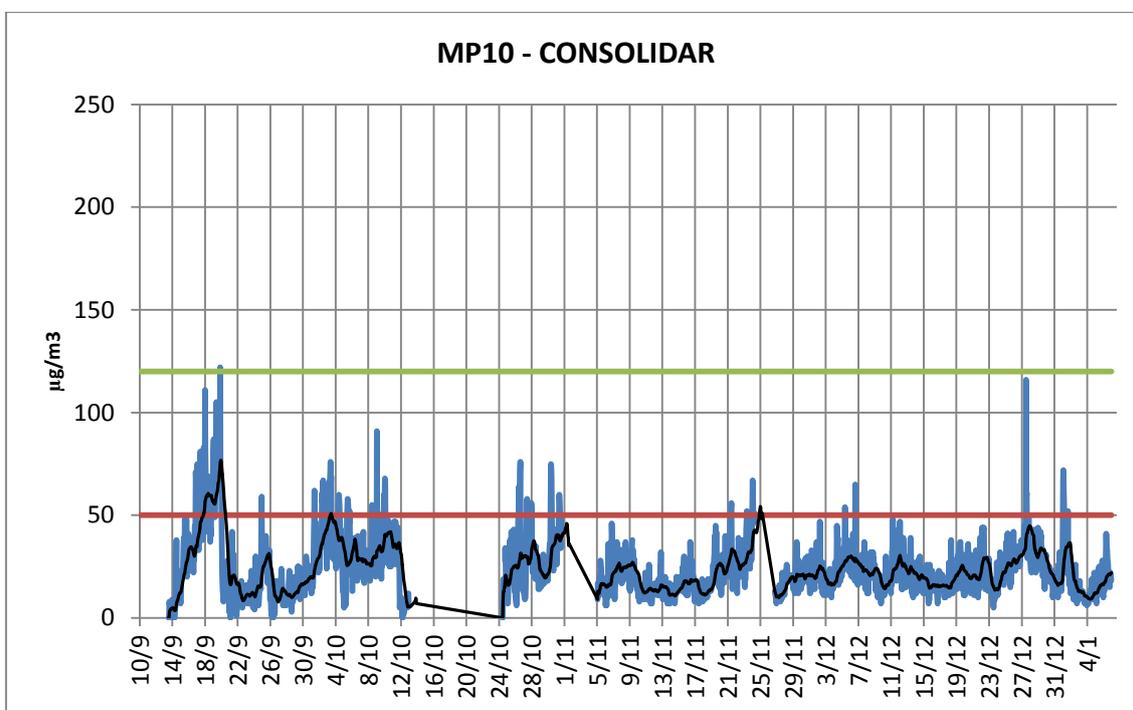


Figura 4.80. Médias horárias da concentração do MP10 no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento. A linha preta é a média móvel com período de 24 horas. A linha vermelha representa o padrão da OMS e a linha verde de padrão estadual.

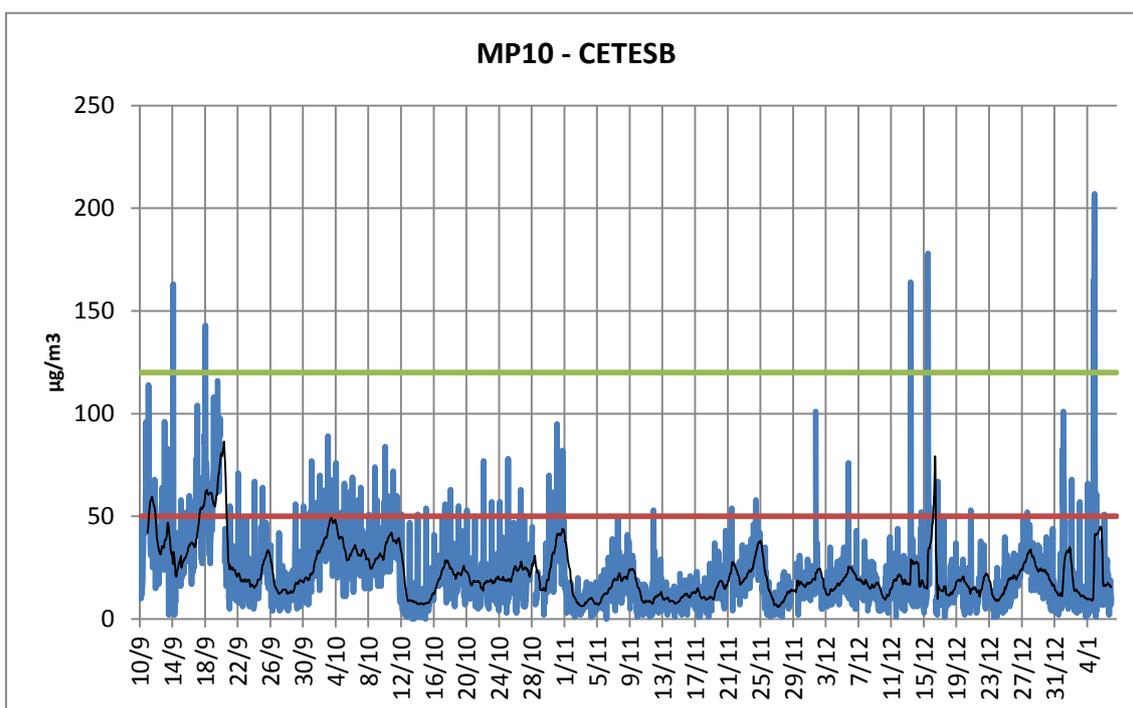


Figura 4.81. Médias horárias da concentração do MP10 na CETESB para todo o período de monitoramento. A linha preta é a média móvel com período de 24 horas. A linha vermelha representa o padrão da OMS e a linha verde o padrão estadual.

O número total de ultrapassagens é indicado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Número de ultrapassagens dos padrões de qualidade para o MP10

| Local | Número de ultrapassagens | |
|------------|--------------------------|------------|
| | Padrão Estadual | Padrão OMS |
| CONSOLIDAR | 0 | 75 |
| CETESB | 0 | 107 |

Para uma análise mais detalhada foram selecionados os dias que apresentaram pelo menos uma ultrapassagem ao padrão da OMS. O resultado é apresentado nas Tabelas 4.13.

Tabela 4.13 – Dias com pelo menos uma média móvel do MP10 superior a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Padrão da OMS)

| | | | | | | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10-Sep | 11-Sep | 12-Sep | 13-Sep | 14-Sep | 15-Sep | 16-Sep | 17-Sep | 18-Sep | 19-Sep |
| 20-Sep | 21-Sep | 22-Sep | 23-Sep | 24-Sep | 25-Sep | 26-Sep | 27-Sep | 28-Sep | 29-Sep |
| 30-Sep | 1-Oct | 2-Oct | 3-Oct | 4-Oct | 5-Oct | 6-Oct | 7-Oct | 8-Oct | 9-Oct |
| 10-Oct | 11-Oct | 12-Oct | 13-Oct | 14-Oct | 15-Oct | 16-Oct | 17-Oct | 18-Oct | 19-Oct |
| 20-Oct | 21-Oct | 22-Oct | 23-Oct | 24-Oct | 25-Oct | 26-Oct | 27-Oct | 28-Oct | 29-Oct |
| 30-Oct | 31-Oct | 1-Nov | 2-Nov | 3-Nov | 4-Nov | 5-Nov | 6-Nov | 7-Nov | 8-Nov |
| 9-Nov | 10-Nov | 11-Nov | 12-Nov | 13-Nov | 14-Nov | 15-Nov | 16-Nov | 17-Nov | 18-Nov |
| 19-Nov | 20-Nov | 21-Nov | 22-Nov | 23-Nov | 24-Nov | 25-Nov | 26-Nov | 27-Nov | 28-Nov |
| 29-Nov | 30-Nov | 1-Dec | 2-Dec | 3-Dec | 4-Dec | 5-Dec | 6-Dec | 7-Dec | 8-Dec |
| 9-Dec | 10-Dec | 11-Dec | 12-Dec | 13-Dec | 14-Dec | 15-Dec | 16-Dec | 17-Dec | 18-Dec |
| 19-Dec | 20-Dec | 21-Dec | 22-Dec | 23-Dec | 24-Dec | 25-Dec | 26-Dec | 27-Dec | 28-Dec |
| 29-Dec | 30-Dec | 31-Dec | 1-Jan | 2-Jan | 3-Jan | 4-Jan | 5-Jan | 6-Jan | |

BRANCO: Não houve ultrapassagem; AZUL: Apenas CETESB apresentou ultrapassagem; VERDE: Apenas CONSOLIDAR apresentou ultrapassagem; VERMELHO: As duas estações apresentaram ultrapassagem.

Analisando os dados obtidos percebe-se que a probabilidade dos padrões serem ultrapassados é maior na região da CETESB, sendo ela mais suscetível às emissões veiculares.

4.3.3.4 Monóxido de Carbono e Dióxido de Nitrogênio

Os poluentes CO e NO₂ mantiveram valores bastante abaixo dos padrões de qualidade, tanto do estadual quanto da OMS.

Para o monóxido de carbono o padrão estadual se igualou ao recomendado pela OMS: a média móvel da concentração nas últimas 24 horas deve ser inferior a 9 ppm.

Nas figuras 4.82 e 4.83 estão os perfis de média horária da concentração do CO para todo o período de monitoramento em ambas as localidades, juntamente com a média móvel das últimas 24 horas (linha preta) e o padrão de qualidade para esse poluente (linha vermelha). Para o dióxido de nitrogênio o padrão estadual de qualidade do ar estabelece que a média horária da concentração não deve ultrapassar o valor de 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Já pelas recomendações de 2011 da OMS esse valor é de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nas figuras 4.84 e 4.85 estão os perfis de média horária da concentração do NO_2 para todo o período de monitoramento em ambas as localidades e o padrão da OMS para esse poluente (linha vermelha).

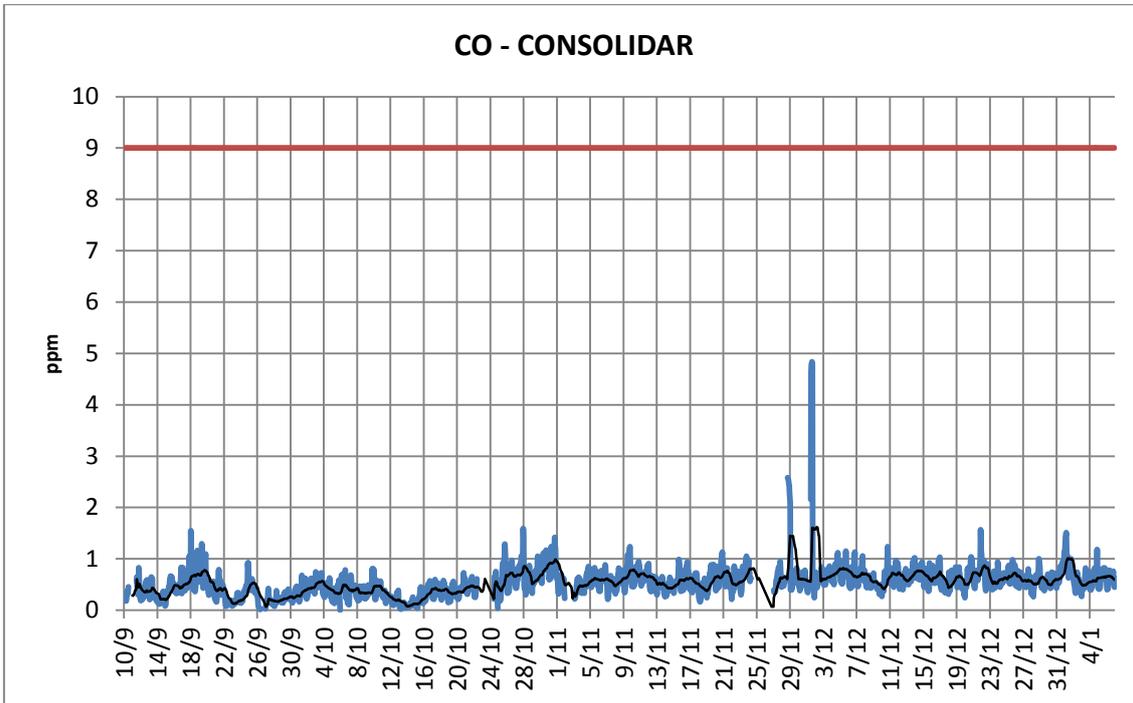


Figura 4.82. Médias horárias da concentração do CO no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento. A linha preta é a média móvel com período de 24 horas. A linha vermelha representa o padrão da OMS e o estadual.

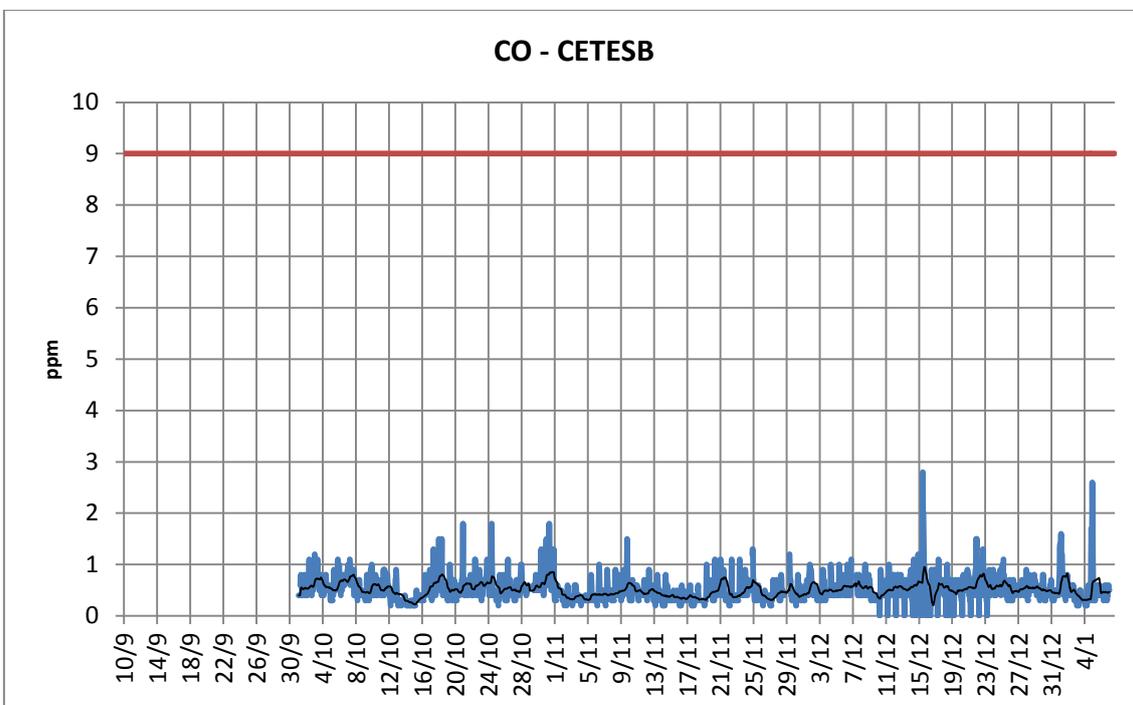


Figura 4.83. Médias horárias da concentração do CO na CETESB para todo o período de monitoramento. A linha preta é a média móvel com período de 24 horas. A linha vermelha representa o padrão da OMS e o estadual.

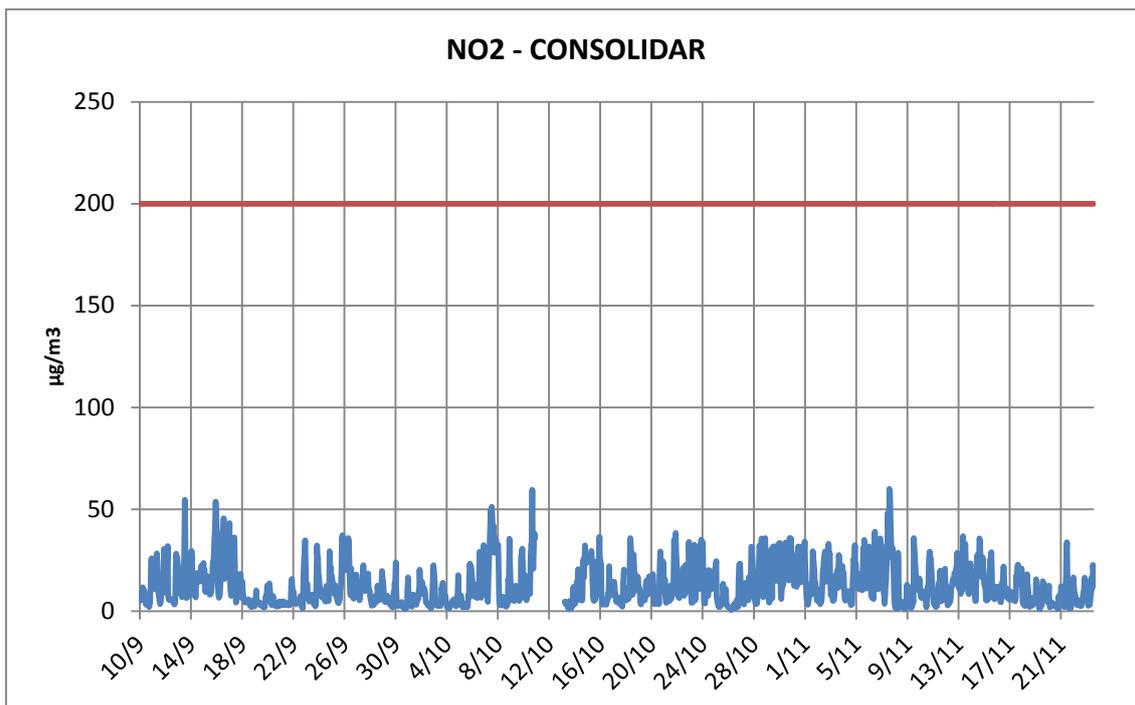


Figura 4.84. Médias horárias da concentração do NO₂ no CONSOLIDAR para todo o período de monitoramento. A linha vermelha representa o padrão da OMS.

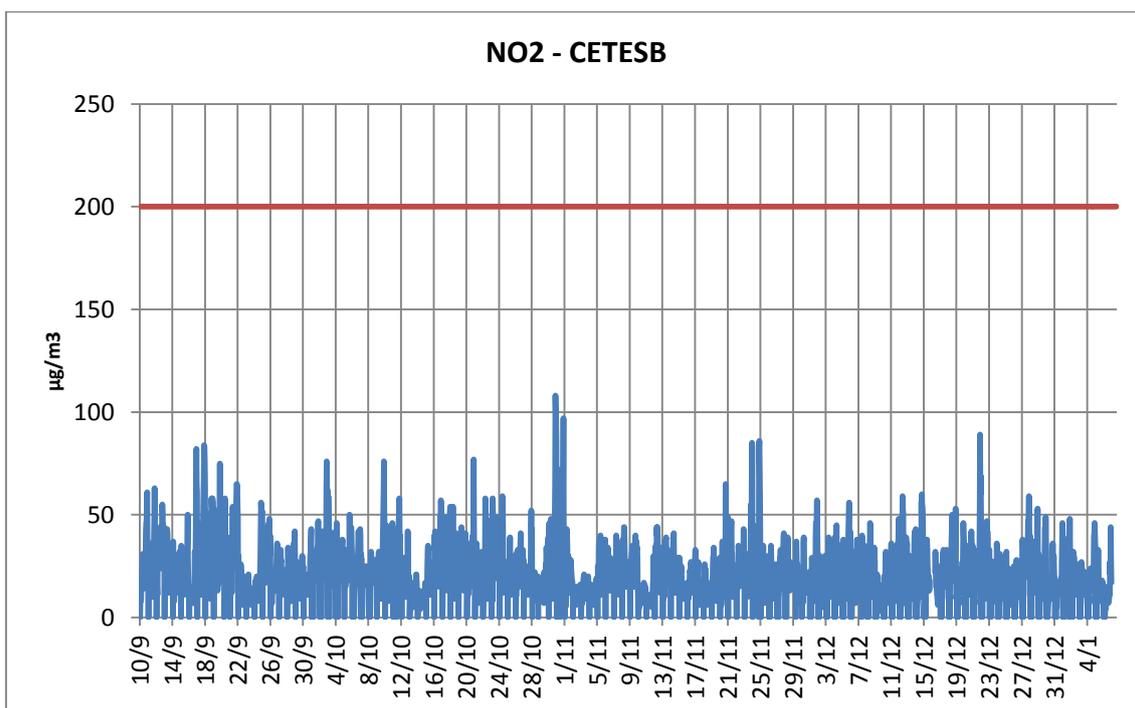


Figura 4.85. Médias horárias da concentração do NO₂ na CETESB para todo o período de monitoramento. A linha vermelha representa o padrão da OMS.

5. CONCLUSÕES

Em relação às frentes, cavados e demais fenômenos atmosféricos que influenciaram a concentração dos gases durante o período de monitoramento pode-se concluir as seguintes situações:

A presença de ventos moderados em velocidade (entre 2 e 4 m/s) por períodos longos de tempo (mais de 3 horas) foi muito mais eficiente para a dispersão dos poluentes monitorados do que a ocorrência de ventos fortes (acima de 4 m/s) mas com período de ocorrência curtos (rajadas). Tal comportamento, de ventos constantes por longos períodos de tempo, ocorreu tanto na chegada de algumas frentes como em episódios de convergência local de umidade.

A presença de precipitação somente não foi o bastante para uma diminuição considerável nas concentrações dos poluentes monitorados, com exceção dos materiais particulados, esses sim altamente suscetíveis à deposição ao solo pelas gotas de chuva.

A presença de nebulosidade influenciou particularmente a concentração do O₃, baixando consideravelmente o nível desse poluente por diminuir a radiação incidente necessária para a ativação de seu ciclo fotoquímico.

Períodos de pouca circulação atmosférica sobre São José dos Campos agravaram a concentração dos poluentes e aumentaram significativamente a temperatura e conseqüentemente baixaram bastante a umidade.

A ocorrência dos dois episódios de ZCAS durante o período de monitoramento não causaram alteração substancial na concentração dos poluentes, possivelmente porque tais episódios não produziram circulação troposférica ativa o bastante para operar tal mudança na região de São José dos Campos.

A análise estatística de calcular uma média de concentração para dias úteis e uma para finais de semana se mostrou útil para uma análise geral, no entanto um número grande de semanas é necessário para que esse método apresente resultados mais significativos. De qualquer forma, comparando as duas

estatísticas diferentes utilizadas, os resultados foram consistentes entre si: todos os poluentes apresentaram, em média, concentrações menores durante os finais de semana, com exceção do CO, que pela tarde apresentou uma elevação de concentração, consequência da diminuição de NO nesse período, que por sua vez manteve os níveis de hidroxila mais baixos, diminuindo a taxa de oxidação do CO e permitindo um maior acúmulo desse poluente.

Pela análise do comportamento das médias de cada poluente no ciclo diário percebe-se que, para fortalecer o argumento das comparações entre dias úteis e dias de semana, os horários de maior circulação de automóveis coincidem com os períodos de elevação da concentração de todos os poluentes primários. Tal resultado indica que São José dos Campos está vulnerável às emissões veiculares.

A análise dos coeficientes de correlação não apresentou por si só resultados definitivos em razão dos valores baixos encontrados, salvo algumas exceções. No entanto os sinais dos coeficientes foram consistentes com as outras análises e serviram para reforçar as hipóteses sugeridas.

Pela análise do vento foi concluído que a circulação em São José dos Campos é predominante no eixo sudoeste – nordeste, em ambos os sentidos, e que tal configuração deve-se ao alinhamento da cidade com o Vale do Paraíba e a Serra da Mantiqueira.

A comparação entre a região “verde” do INPE onde está localizado o laboratório CONSOLIDAR e a região pavimentada onde fica a estação da CETESB mostrou que: embora as concentrações dos poluentes não permaneceram por todo o tempo menores no CONSOLIDAR, em média os poluentes tiveram concentrações mais baixas ali, com exceção do O₃ e do CO. Esse comportamento pode ser associado com uma maior distância das fontes de emissão na região do INPE.

Quanto aos valores mais altos nas concentrações do O₃ e do CO encontrados na região do CONSOLIDAR, este estudo sugere que tal comportamento é

consequência da baixa concentração de NO presente ali. A hipótese considera que a concentração de hidroxilas naquela região é baixa, e que uma concentração baixa de NO induz um acúmulo de CO que por sua vez catalisa a oxidação do pouco NO disponível e aumenta a quantidade de O₃ ao aumentar a quantidade de NO₂. A hipótese é reforçada pelo comportamento das concentrações desses poluentes nos finais de semana, quando concentrações mais baixas de NO induzem um acúmulo maior de CO do que o apresentado durante os dias úteis.

A hipótese foi formulada apoiando-se nos dados medidos e encontra embasamentos teóricos plausíveis. Na formulação foi criada a nomenclatura de “concentração crítica” para o CO e o NO, concentrações tais que permitiriam a ativação desse processo. Tais concentrações dependeriam da concentração de hidroxilas na região. Sugere-se que tal comportamento não ocorre na CETESB por uma quantidade de NO maior presente ali (no caso da formulação, uma concentração de NO maior que a concentração crítica para aquele local).

Outra hipótese pode ser lançada para explicar as maiores concentrações de O₃ na região do CONSOLIDAR: a de que uma concentração alta de compostos orgânicos voláteis na região aumentam a quantidade de NO₂ disponível para fotólise. Uma possível fonte de COV's que influenciaria na região do CONSOLIDAR é a Refinaria Henrique Lage (REVAP), que está na direção leste-nordeste do laboratório, direção essa que coincide com a direção da circulação troposférica média da região, como mostrado na rosa dos ventos na Figura 4.57. Uma outra possível fonte de COV's seria a vegetação presente ao lado do CONSOLIDAR. No entanto tal hipótese tem base teórica apenas (concentração de compostos orgânicos voláteis não foram medidos nesse estudo) e antagoniza com a primeira apresentada: assumindo que a concentração de compostos orgânicos voláteis seja maior na região do CONSOLIDAR do que na região da CETESB, a quantidade de hidroxilas ali será também maior, o que vai contra a consideração formulada na hipótese anterior de que a concentração de hidroxilas ali é pequena.

Pelos dados de temperatura foi possível verificar que a região mais pavimentada é consideravelmente mais quente do que a região “verde”, com média total 2,1°C superior. A diferença máxima de média diária foi 7,2°C (no dia 28/10/12) e a diferença máxima de média horária de 12,7°C (às 15:00 de 7/11/12). Análises estatísticas mostraram que em dias mais quentes a diferença tende a aumentar, enquanto que em dias mais frios as temperaturas nas duas regiões tendem a se aproximar. Pode-se concluir que a maneira como ocorre a ocupação urbana agrava as condições físicas locais, e expõe a população a temperaturas altas. O resultado é um desconforto térmico nas regiões mais pavimentadas e com maior circulação de automóveis.

Em relação a ultrapassagens de concentração padrão, pode-se dizer que São José dos Campos está vulnerável a poluição por ozônio e materiais particulados inaláveis, já que tais poluentes, principalmente o ozônio, ultrapassaram diversas vezes os padrões estabelecidos pela OMS. A primeira etapa do novo padrão estadual ainda permite altos valores de concentração de poluentes, mas já identifica a fragilidade da qualidade do ar em relação ao ozônio na cidade. Os níveis de monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio apresentaram-se bastante baixos.

Assim, conclui-se desse estudo que a forma de ocupação urbana vigente de priorizar a pavimentação de ruas para a circulação de automóveis compromete a qualidade do ar e conforto térmico da região. A partir dos resultados das comparações realizadas no estudo, é de se esperar que uma ocupação urbana que harmonize presença de vegetação; meios de locomoção alternativos que não envolvam alta emissão de poluentes; e vias exclusivas para automóveis, afastados da circulação de pedestres e habitações; contribua para um melhor cenário no que toca a qualidade do ar e conforto térmico da cidade. Cabe à população cobrar ao poder público ações que amenizem a atual situação, à curto e longo prazo: criação de sombras com o plantio substancial de árvores, construções de ciclovias para a locomoção segura com bicicletas e aprimoramento do sistema de transporte público para redução de circulação de automóveis seriam algumas medidas eficientes.

Como sugestão para trabalhos futuros propõe-se a realização de uma campanha de monitoramento de duração anual que permitisse identificar a sazonalidade dos comportamentos discutidos aqui e assim criar uma comparação mais completa entre as duas regiões, particularmente se ocorre mudanças no domínio fotoquímico da formação do ozônio (*NO_x-sensitive* ou *VOC-sensitive*) durante diferentes épocas do ano, além de adicionar aos gases monitorados os hidrocarbonetos, para estimar a quantidade de compostos orgânicos voláteis nas duas regiões e testar as duas hipóteses aqui lançadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO - ALESP. **Decreto nº 59113, de 23 de Abril de 2013**. São Paulo, 2013.

ANDRADE, M.F.; MIRANDA, R.M.; FORNARO, A.; KERR, A.; OYAMA, B.; ANDRE, P.A.; SALDIVA, P. Vehicle emissions and PM_{2,5} mass concentrations in six Brazilian cities. **Air Quality Atmosphere & Health**. v.5, n.1, p.79-88, mar 2012.

ATKINSON, R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. **Atmospheric Environment**. V.34, n.12-14, p.2063-2101, 2000.

ATKINSON-PALOMBO, C.M.; MILLER, J.A.; BALLING JR., R.C. Quantifying the ozone “weekend effect” at various locations in Phoenix, Arizona. **Atmospheric Environment**. V.40, n.39, p.7644–7658, dez 2006.

BURNETT, R.T.; SMITH-DOIRON, M.; STIEB, D; RAIZENNE, M.E.; BROOK, J.R.; DALES, R.E.; LEECH, J.A.; CAKMAK, S.; KREWSKI, D. Association between ozone and hospitalization for acute respiratory diseases in children less than 2 years of age. **American Journal of Epidemiology**. Vol. 153, No. 5. 2010.

BRIDGMAN, H. **Global Air Pollution**. London: Bellhaven Press, United Kingdom. 1990.

CANAVESI, V.; MAURO, A. C. C. Mapeamento da vegetação de porte arbóreo no município de São José dos Campos SP utilizando imagens orbitais do satélite Quickbird. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 623-629. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15843-PRE/10453). Disponível em:
<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.11.59>>. Acesso em: 17 maio 2013.

CARVALHO, W. F.; BERARDO, J. L.; ASSIS, J. P.; GUEDES, R. L.; ARAI, N. Dispersão dos poluentes na cidade de São Jose dos Campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10. (CBM), 1998, Brasilia. **Anais...** 1998. p. 6. CD-ROM. (INPE-10816-PRE/6272).

CASTRO, S. G.; MOREIRA, R. H. M.; MARIANI, R. L. N. C. Concentrações de ozônio troposférico – análise da base de dados em São José dos Campos de 2003 A 2010. In: IX CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE DE POÇOS DE CALDAS, 2011, Poços de Caldas, MG. **Anais...** 2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Efeitos da poluição**. Disponível em <www.cetesb.sp.gov.br/solo/Informações-Básicas/Vegetação/9-Efeitos-da-Poluição> , acesso em 18/05/12. a

_____. **Poluentes**. Disponível em: www.cetesb.gov.sp.br/ar/Informações-Básicas/21-Poluentes, acesso em 22 mai. 2012. b

_____. **Padrões, índices**. Disponível em: www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informações-Básicas/22-Padrões-e-Índices, acesso em 28 mai. 2012. c

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo: 2009**. São Paulo. 2010

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo: 2010**. São Paulo. 2011

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo: 2011**. São Paulo. 2012. d.

_____. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo: 2012**. São Paulo. 2013

CENTRAL POLLUTION CONTROL BOARD. **National Ambient Air Quality Status 2009**. India. Ministry of Environment and Forests. 2011.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS À AGRICULTURA - CEPAGRI. **Clima dos municípios paulistas**. Campinas, UNICAMP, 2012. Disponível em: http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_560.html

CHAMEIDES, W.L. et al. The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study. **Science**, v.241, n.4872, p.1473-1475, 1988.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS (INPE.CPTEC). **Síntese sinótica mensal, setembro de 2012**. 2012, a. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/22480>.

_____. **Síntese sinótica mensal, outubro de 2012**. 2012, b. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/22681>.

_____. **Síntese sinótica mensal, novembro de 2012**. 2012, c. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/22834>.

_____. **Síntese sinótica mensal, dezembro de 2012**. 2012, d. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/22972>.

_____. **Síntese sinótica mensal, janeiro de 2013**. 2012, e. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/noticias/noticia/23138>.

CRUTZEN, P.J. Photochemical reactions initiated by and influencing ozone in unpolluted tropospheric air. **Tellus**, v.26, n.1-2, p.47-57, fev 1974.

CRUTZEN, P.J.; ZIMMERMANN, P.H. The changing photochemistry of the troposphere. **Tellus**, v.43A-B, n.4, p.136-151, ago 1991.

DEBAJE, S.B.; KAKADE, A.D.; Weekend Ozone Effect over Rural and Urban Site in India. **Aerosol and Air Quality Research**, v.6, n.3, p.322-333, 2006.

ECOTECH. **EC9810B UV Absorption Ozone Analyzer**. 2009, a. Folder. Disponível em: www.ecotech.com.au/gas-analyzers/ozone-analyzer. Acesso em 19 mai. 2012.

_____. **EC9830B Carbon Monoxide Analyzer**. 2009, b. Folder. Disponível em: www.ecotech.com.au/gas-analyzers/co-analyzer. Acesso em 19 mai. 2012.

_____. **EC9841B Oxides of Nitrogen Analyzer**. 2009, c. Folder. Disponível em: www.ecotech.com.au/gas-analyzers/nox-analyzer. Acesso em 19 mai. 2012.

_____. **EC9850B Sulfur Dioxide Analyzer**. 2009, d. Folder. Disponível em: www.ecotech.com.au/gas-analyzers/so2-analyzer. Acesso em 19 mai. 2012.

_____. **Met One BAM1020 Beta Attenuation Monitor**. 2009, e. Folder. Disponível em: <www.ecotech.com.au/particulates/particulates-air-quality>. Acesso em 19 mai. 2012.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Monitoramento da qualidade do ar na região metropolitana de Belo Horizonte em 2010**. Belo Horizonte. 2011.

FIORANTE, E. F.; BRESCIA, C. A.; LIU, B. W. Y. **Ocorrências de concentrações máximas de ozônio e temperatura no município de Belo Horizonte, Minas Gerais**. Divisão de Qualidade do Ar – Fundação Estadual do Meio Ambiente / FEAM. 2003.

JACOB, D.J.; WOFSY, S.C. Photochemistry of biogenic emissions over the amazon forest. **Journal of geophysical research**, v.93, n.D2, p.1477-1486, 1988.

JENKIN, M.E.; CLEMITSHAW, K.C. Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. **Air pollution science for the 21 century**. Chapter 11. 2002.

MARR, L.C.; HARLEY, R.A. Spectral analysis of weekday–weekend differences in ambient ozone, nitrogen oxide, and non-methane hydrocarbon time series in California. **Atmospheric Environment**. v.36, n.14, p.2327–2335, maio 2002.

MAVROIDIS, I.; ILIA, M. Trends of NO_x, NO and O₃ concentrations at three different types of air quality monitoring stations in Athens, Greece. **Atmospheric Environment**, v.63, p.135-147, 2012.

NGUYEN, H.T.; KIM, K.H. Evaluation of SO₂ pollution levels between four different types of air quality monitoring stations. **Atmospheric Environment**, v.40, p.7066-7081, 2006.

NOWAK, D.J.; CRANE, D.E.; STEVENS J.C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United State. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.4, p.115-123, 2006.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CORPORATION AND DEVELOPEMENT - OECD. **The State of the Environment**, capítulo 1, Air., Paris, p 17-46, 1985.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS - PMSJC. **São José em dados: 2012**. Folheto. Secretaria de Planejamento Urbano. 2012.

ROEHL, M.C.; ORLANDO, J.J; TYNDALL, G.S.; SHETTER, R.E.; VÁSQUEZ, G.J.; CANTRELL, C.A.; CALVERT, J.G.. Temperature dependence of the quantum yields for the photolysis of NO₂ near the dissociation limit. **J. Phys. Chem.**, v.98, n.32, p.7837-7843, 1994.

SALES, A. B. **Caracterização do ozônio próximo à superfície em são José dos campos**. 2008. 114 p. (INPE-15663-TDI/1439). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGPBW/3246SLH>>. Acesso em: 17 maio 2013.

SCOFIELD, G. B.; SANTOS, C. C.; FERREIRA, N. J.; JORGE, M. P. P. M. Caracterização do clima da cidade de São José dos Campos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...** 2000. p. 724-729. CD-ROM, Papel. (INPE-10624-PRE/6086).

SEGUEL, R.J.; MORALES S., R.G.E.; LEIVA G., M.A. Ozone weekend effect in Santiago, Chile. **Environmental Pollution**, v.162, p.72-79, 2012.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS - SEMA. **Relatório da qualidade do ar na região metropolitana de Curitiba**

ano de 2009. Governo do Estado do Paraná. Instituto Ambiental do Paraná. 2010.

SILLMAN, S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. **Atmospheric Environment**, v.33, p.1821-1845, 1999.

SILVA JÚNIOR, R.S.; OLIVEIRA, M.G.L.; ANDRADE, M.F., Weekend/weekday differences in concentrations of ozone, NO_x, and non-methane hydrocarbon in the metropolitan area of São Paulo. São Paulo, Brasil, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.1, p.100-110, 2009.

STERN, A.C.; BOUBEL, W.R.; TURNER, D.B.; FOX, D.L. **Fundamentals of Air Pollution**. Second Edition. Orlando, United States of America, Academic Press, 1984.

SUTHERLAND, W. **Plants: A Different Perspective**. E-book. Disponível em: <<http://content.yudu.com/Library/A1og25/PlantsADifferentPers/resources/73.htm>>

SYNSPEC. **Synspec ALPHA 115 – Methane/Total Nonmethane Analyzer**. 2011. Folder. Disponível em: www.synspec.nl/pdf/alpha_115MTNMHC.pdf. Acesso em 22 mai. 2012.

TURCO, R. P. **Earth under siege – From air pollution to global change**. Oxford University Press. 1997.

TYNDALL, G.S.; RAVISHANKARA, A.R. Atmospheric oxidation of reduced sulfur species. **International Journal of Chemical Kinetics**. v.23, n.6, p.483-527, 1991.

WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO. **Air quality and health**. Fact Sheet n° 313. Atualizado em Setembro de 2011. Disponível em: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/index.html>>. Acesso em 6 jun, 2012.

_____. **Air Quality Guidelines for Europe**. Segunda edição. Copenhagen, World Health Organization Regional Office for Europe. (WHO Regional Publications, European Series, No. 91). 2000.

Yale Center for Environmental Law & Policy. **Environmental Performance Index 2012**. United States of America, Yale University. 2012.

APÊNDICE A – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DE TRANSFORMAÇÃO DE UNIDADES DA CONCENTRAÇÃO DOS POLUENTES

Considerando que o ar está sob uma pressão que não ultrapassa 1 atm, é possível utilizar a equação de estado de um gás ideal sem perda significativa de exatidão para a descrição de seu comportamento geral. Sendo assim, partindo da lei dos gases ideais:

$$PV = nRT \quad (\text{A.1})$$

Onde P, V, n, R e T representam pressão, volume, número de mols, constante universal dos gases e temperatura respectivamente. Todos em referência ao ar.

Isolando o número de mols temos:

$$n = \frac{PV}{RT} \quad (\text{A.2})$$

Considerando um volume de 1 m³ e substituindo o valor da constante universal dos gases nas unidades hPa.m³.(mol.K)⁻¹:

$$n = \frac{P}{T} \times \frac{1}{8,31 \times 10^{-2}} \quad (\text{A.3})$$

A concentração do poluente dada em ppb é a razão do volume ocupado por ele pelo volume total do ar multiplicado por um bilhão. Desde que todos os gases constituintes do ar estejam na mesma temperatura e pressão essa razão é simplificada ao número de mols:

$$C_{ppm} = \frac{n_p}{n} \times 10^9 \quad (\text{A.4})$$

Onde C_{ppb} é a concentração em ppb, n_p o número de mols do poluente e n o número total de mols no ar.

Considerando que a massa total do poluente é o seu número de mols multiplicado pela sua massa molecular, pode-se substituir n por uma expressão

da massa do poluente. Como foi estabelecido anteriormente um volume de 1 m³, a concentração será dada em g.m⁻³:

$$C_{g.m^{-3}} = M_p \times C_{ppb} \times \frac{P}{T} \times \frac{1}{8,31 \times 10^7} \quad (A.5)$$

Onde M_p é a massa molar do poluente.

Multiplicando por 106 obtêm-se a expressão para a concentração em $\mu\text{g}/\text{m}^3$:

$$C_{\mu\text{g.m}^{-3}} = M \times C_{ppb} \times \frac{P}{T} \times \frac{1}{83,1} \quad (A.6)$$

ANEXO A – MÉDIAS DIÁRIAS DE PRECIPITAÇÃO ACUMULADA, TEMPERATURA, UMIDADE E VELOCIDADE DO VENTO.

Seguem-se os registros da estação meteorológica do INPE para o período de setembro de 2012 a dezembro de 2012. A partir de 18 de dezembro os dados não foram disponibilizados.

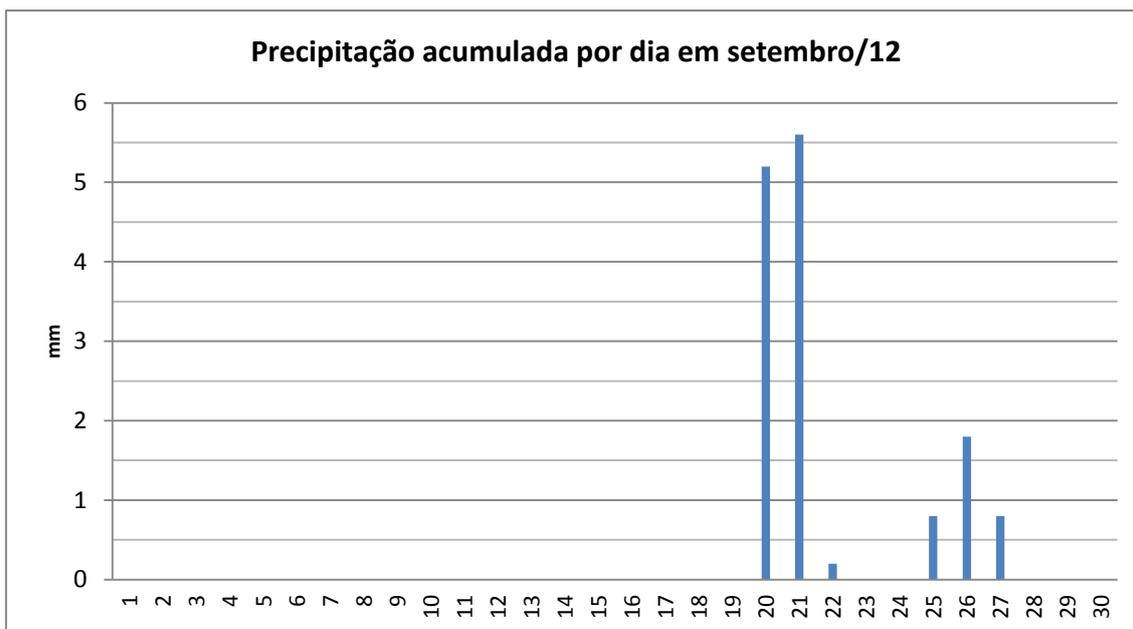


Figura A.1.

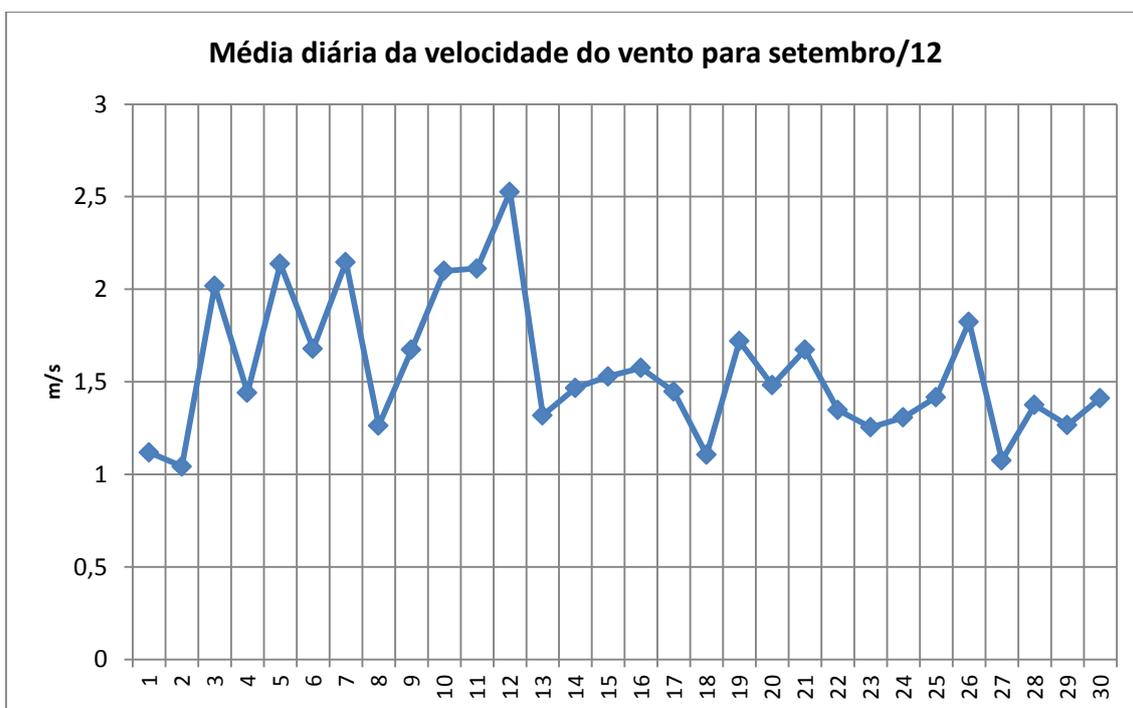


Figura A.2.

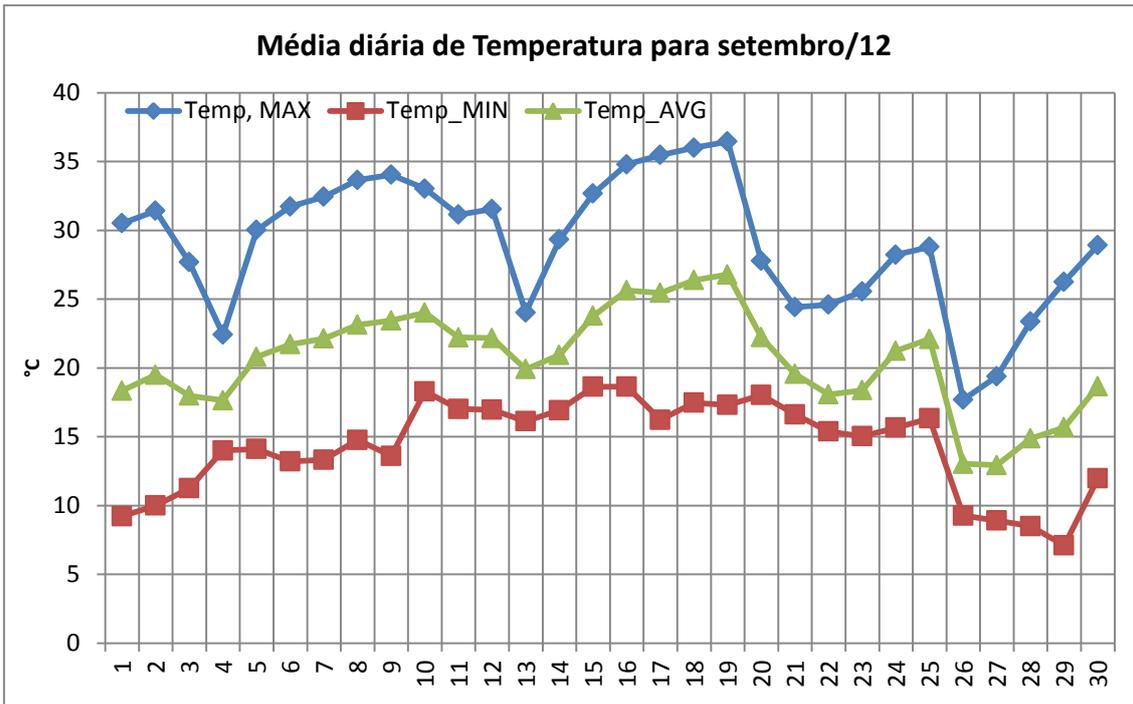


Figura A.3.

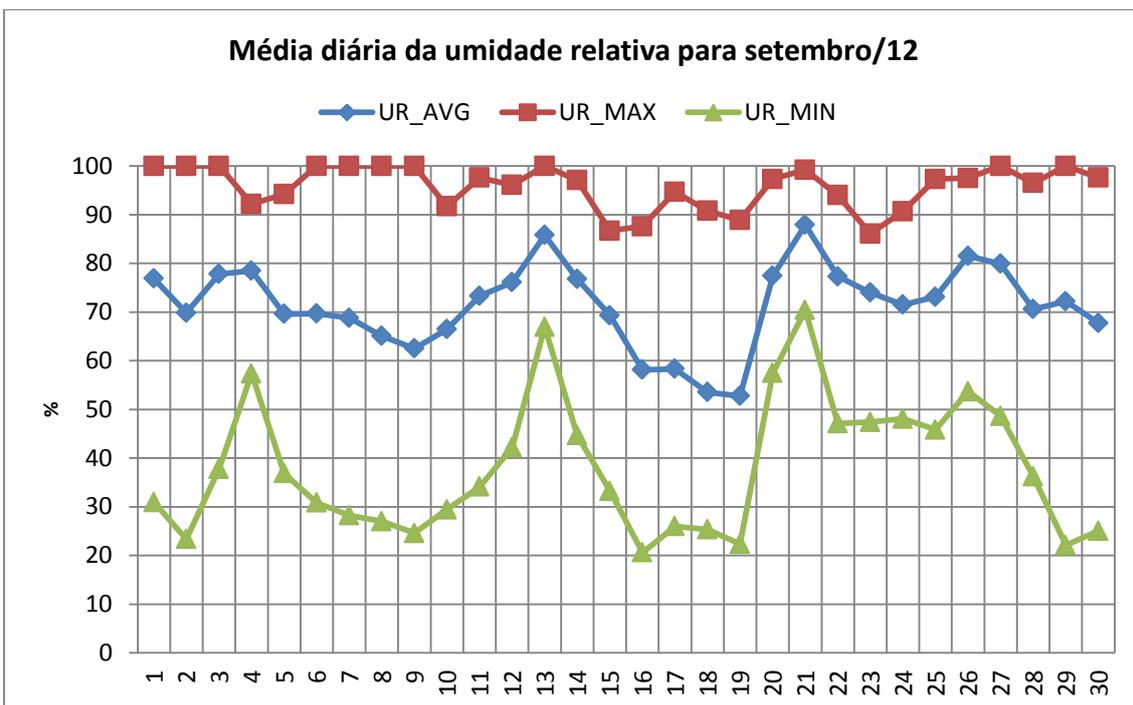


Figura A.4.

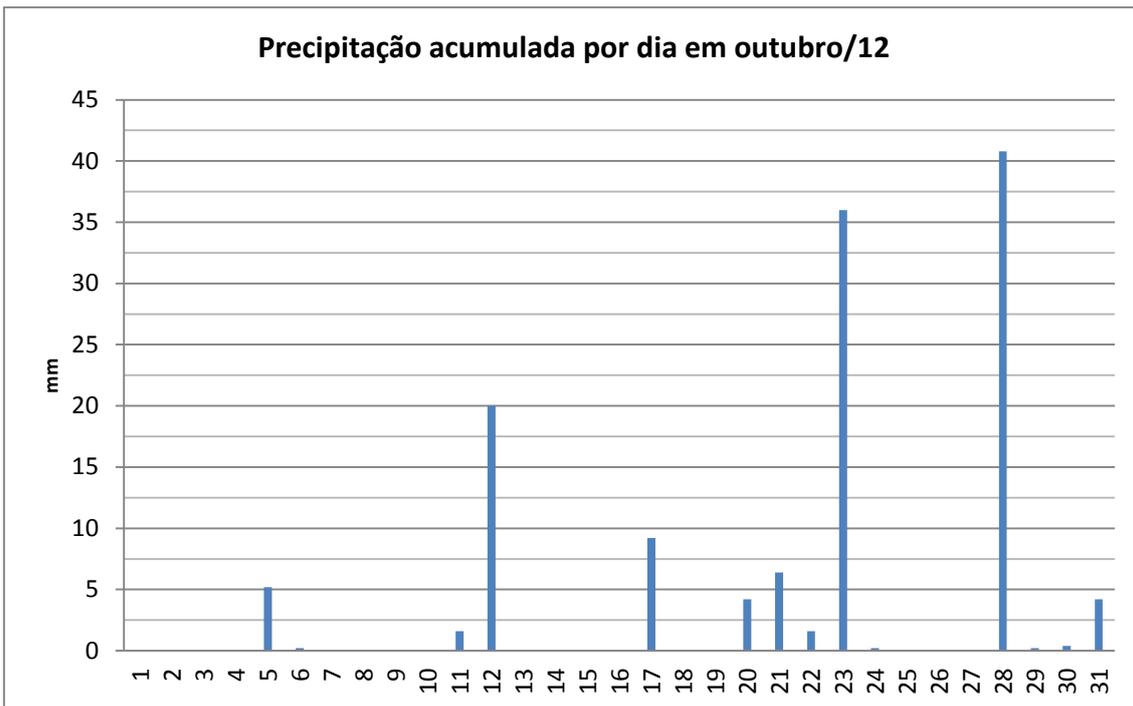


Figura A.5.

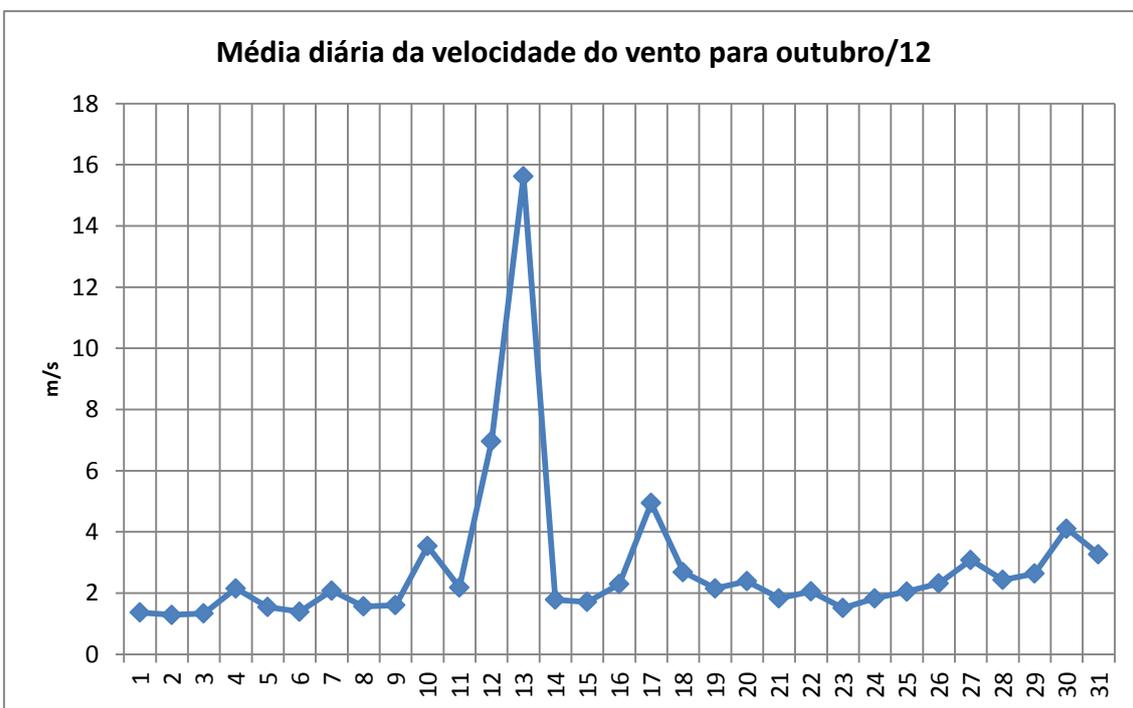


Figura A.6.

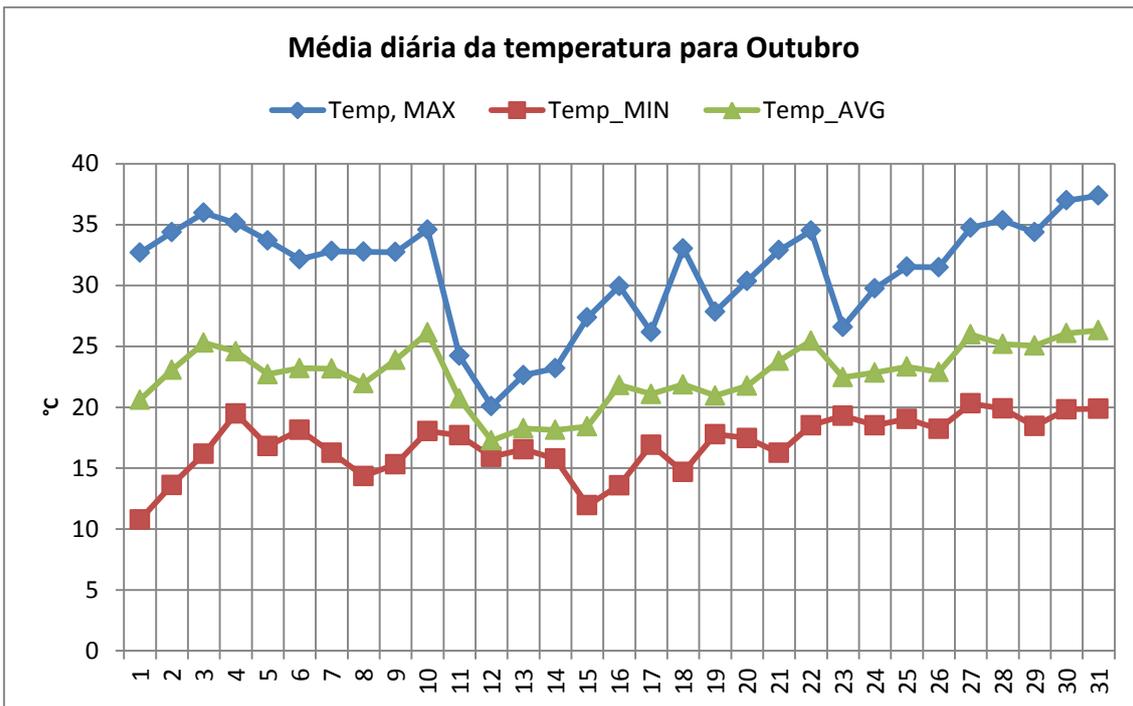


Figura A.7.

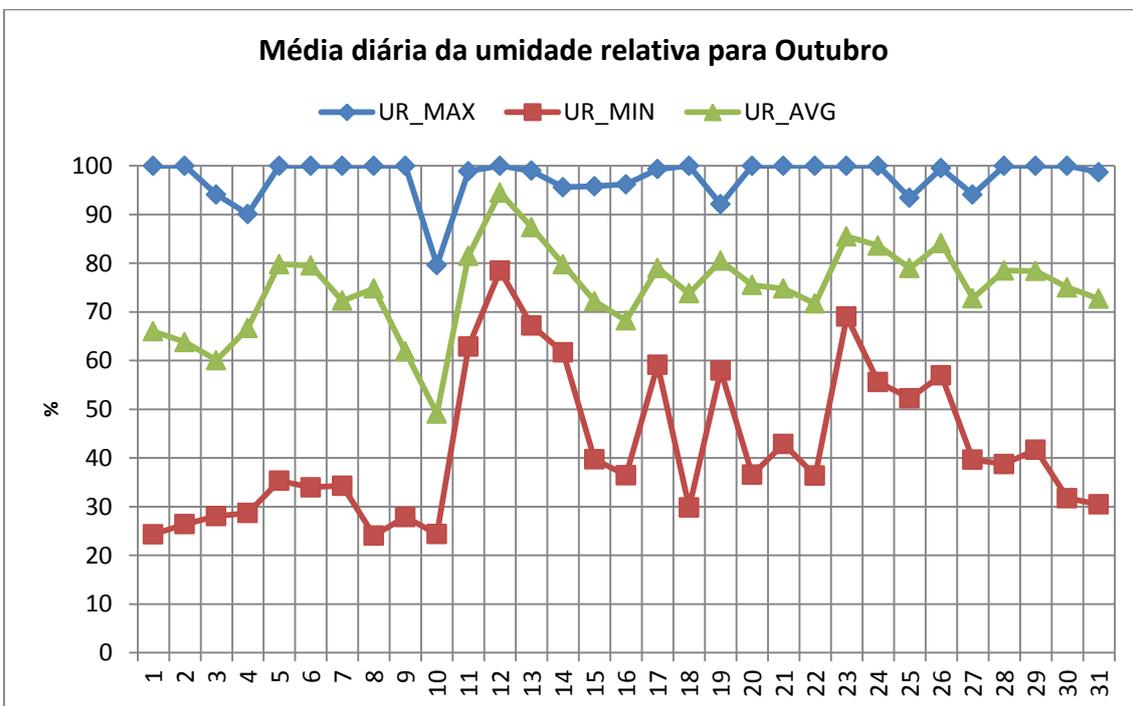


Figura A.8.

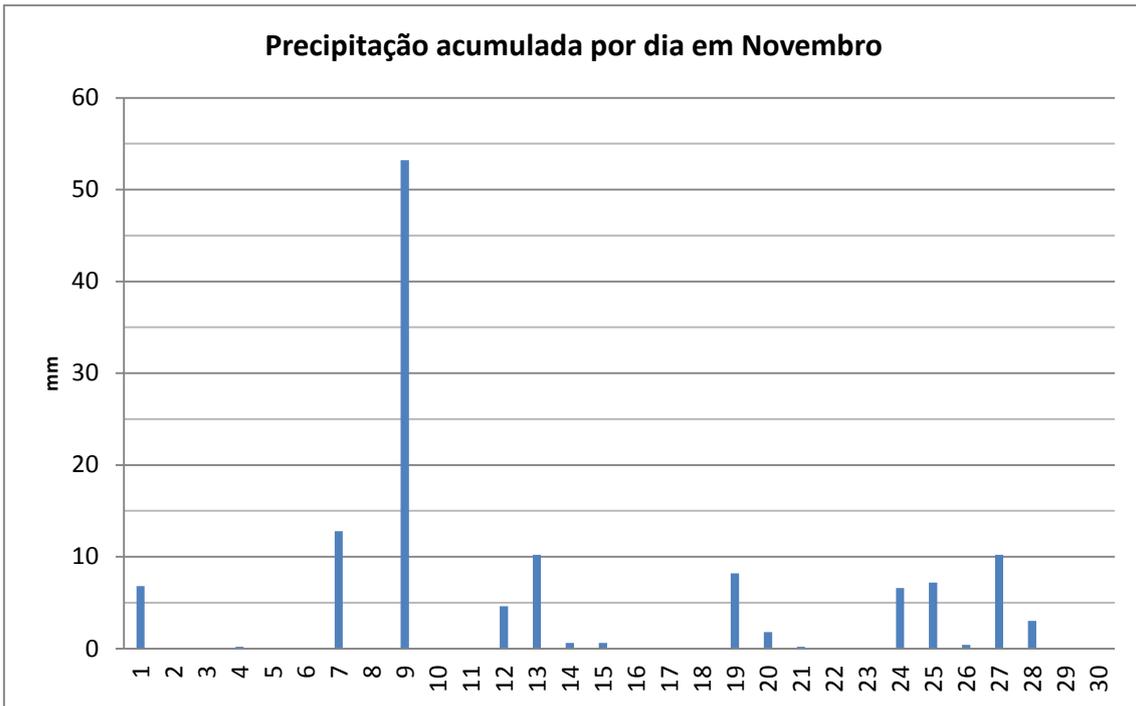


Figura A.9.



Figura A.10.

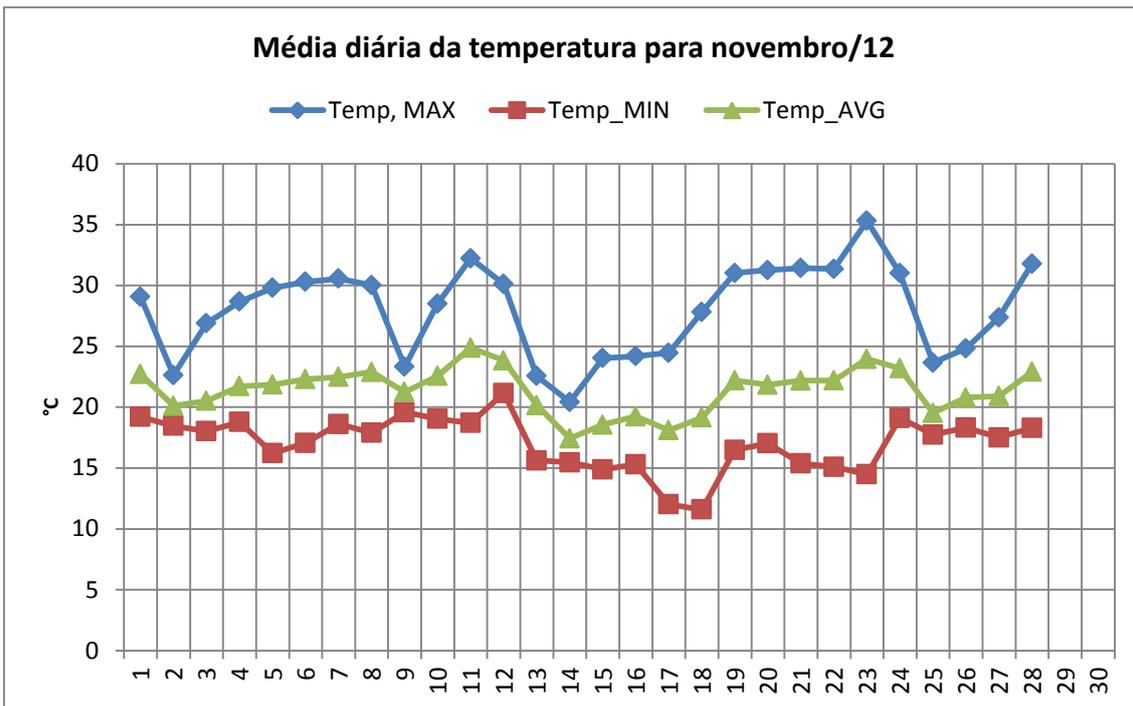


Figura A.11.

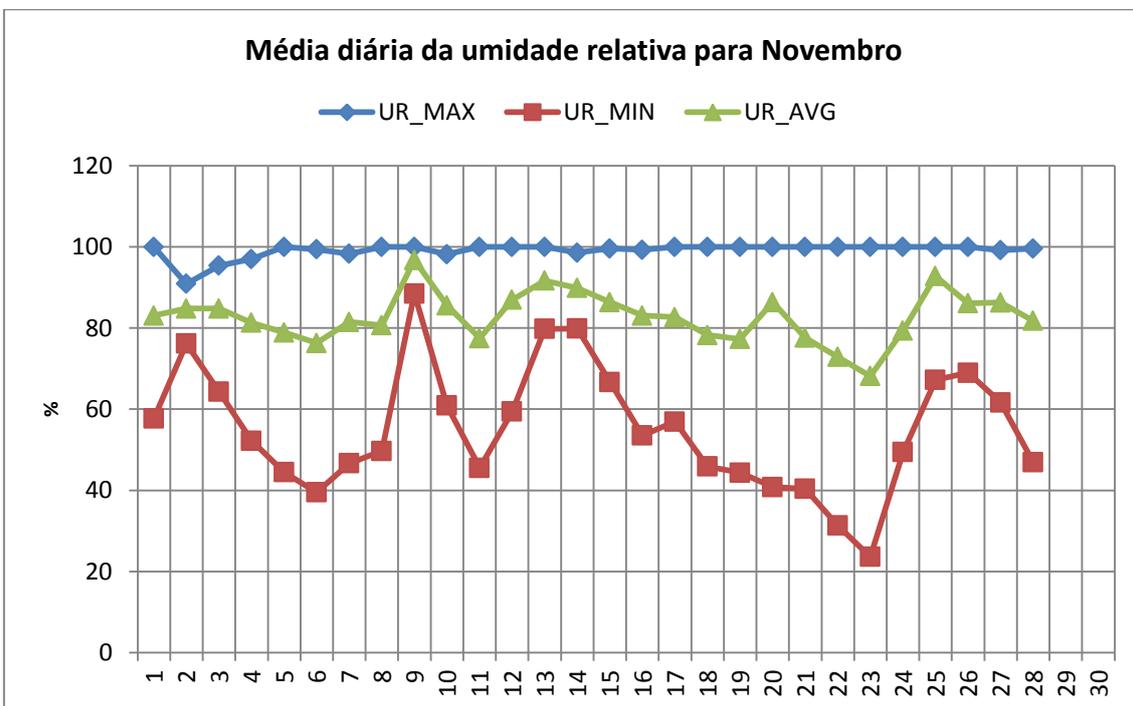


Figura A.12.

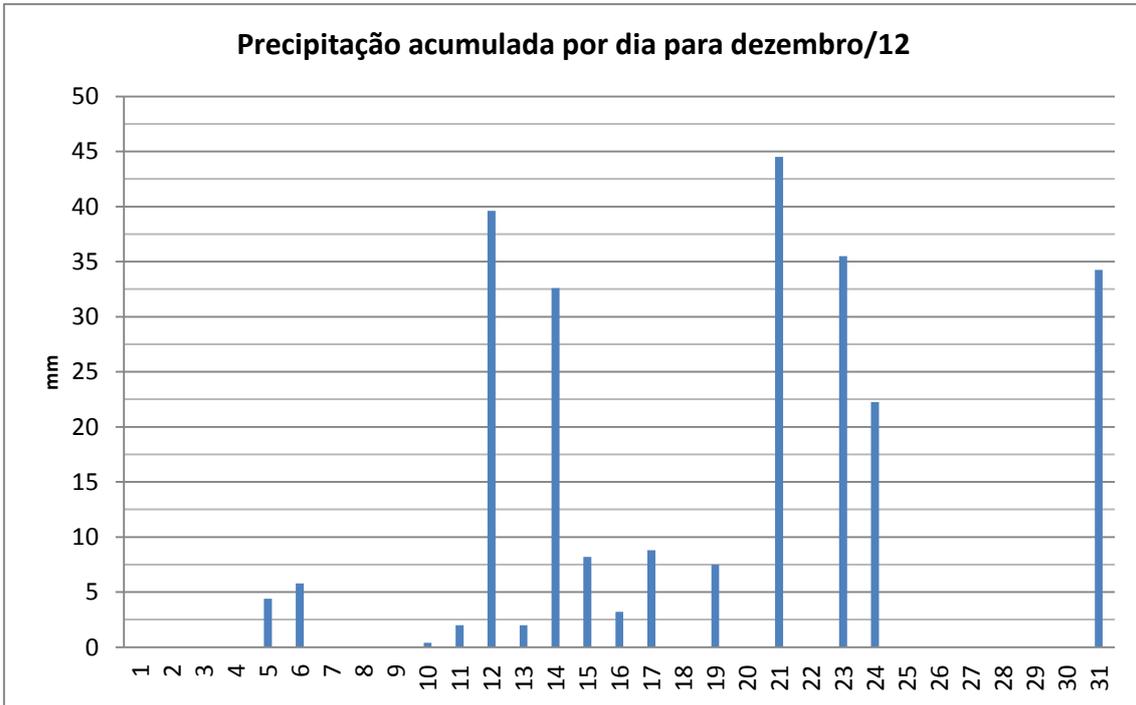


Figura A.13.

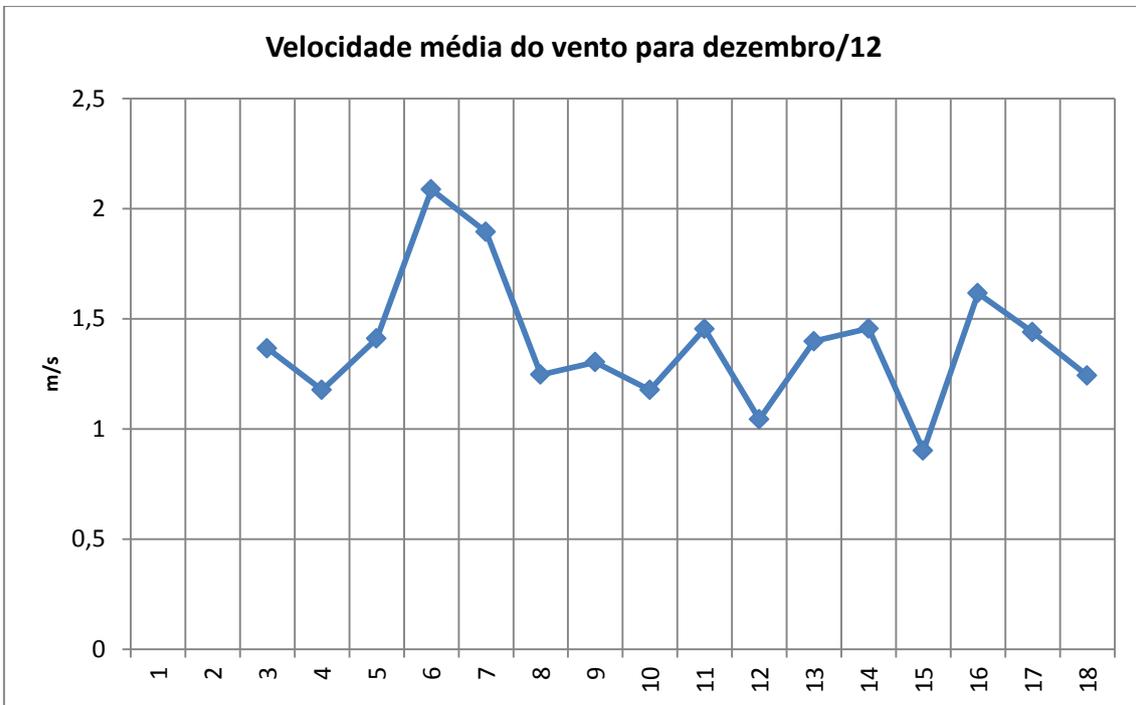


Figura A.14.

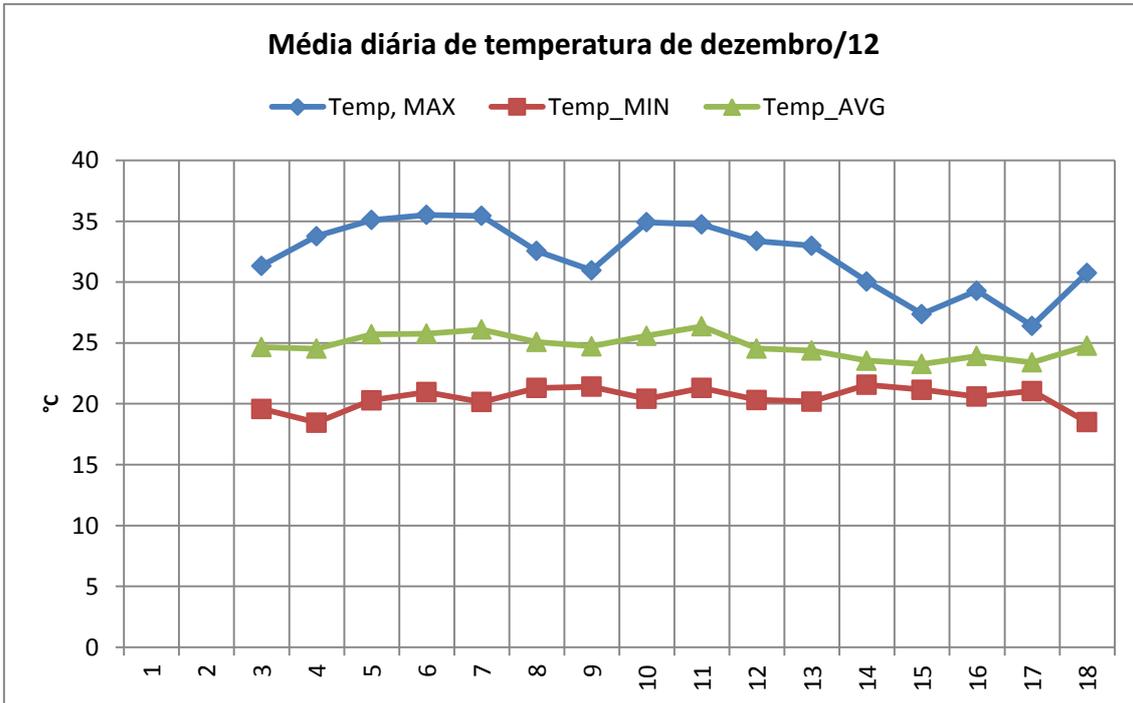


Figura A.15.

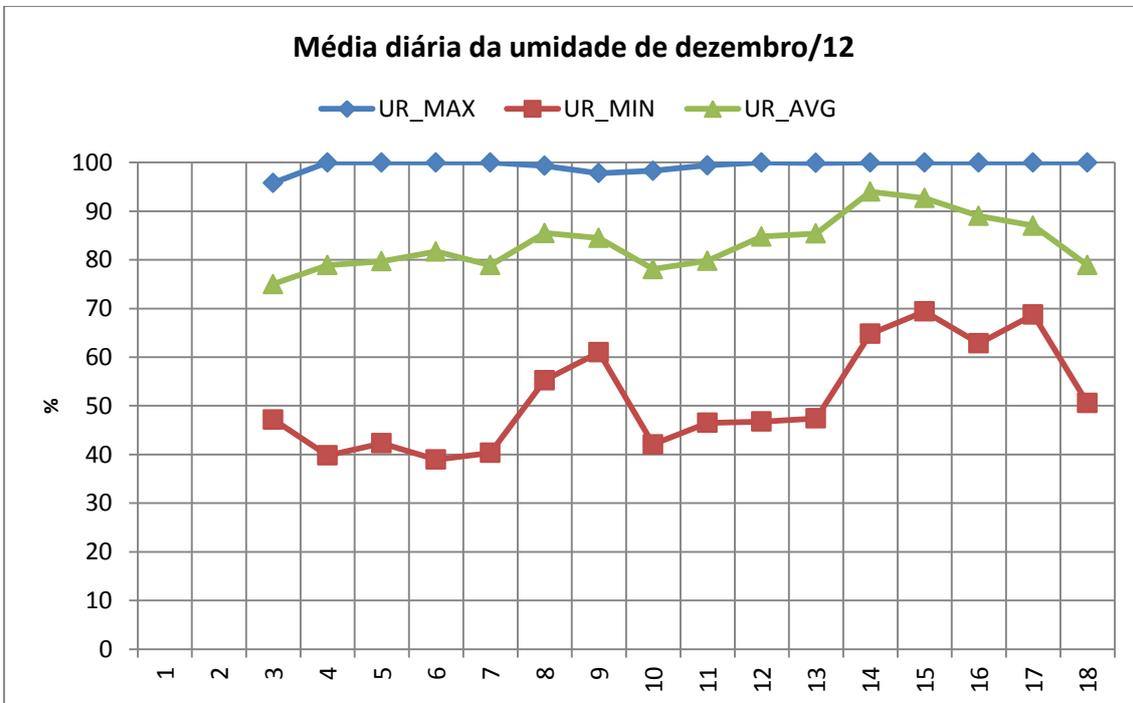


Figura A.16.