

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

**POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS AUTOMOTORES E TIPOS DE
TEMPO EM ÁREAS METROPOLITANAS: A ELABORAÇÃO DE UM
ROTEIRO METODOLÓGICO.**

Rafael Figueiredo Duarte Heiber

Orientador: Prof. Dr. João Afonso Zavattini

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao
Programa de Pós-Graduação em Geografia
– Área de Concentração em Organização
do Espaço, para obtenção do Título de
Mestre em Geografia.

Rio Claro (SP)

2006

FOLHA DE APROVAÇÃO

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Afonso Zavattini

Prof. Dr. José Bueno Conti

Prof^a. Dr^a. Lúcia Helena de Oliveira Gerardi

Resultado: APROVADO

Rio Claro, 28 de março de 2006.

Àquelas que nasceram, cresceram e não sucumbem...
Continuam a existir e são os palcos principais da
vida pós-moderna, com seus desafios e
contradições...
Cidades...

AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO a todas as pessoas que, direta e indiretamente, participaram e contribuíram para a presente pesquisa;

Ao Prof. Dr. João Afonso Zavattini pela fundamental orientação,

À Prof^a Dr^a Lúcia Helena Oliveira Gerardi, que além de participar das bancas de qualificação e de defesa, prestou orientação de grande importância;

Ao Prof. Dr. José Bueno Conti pela participação na banca de defesa, com ricos argumentos e indicações;

À Prof^a. Dr^a. Magda Adelaide Lombardo, componente da banca de qualificação que trouxe bons conselhos e idéias;

Aos Professores e aos colegas com os quais passei boas horas no decorrer de disciplinas, momentos de ricas discussões e aprendizado, sementes que ainda brotarão: Dr. Helmut Troppmair (IGCE/UNESP), Dr. Archimedes Perez Filho (IG/UNICAMP), Dr. Wagner da Costa Ribeiro (FFLCH/USP), Dr. João Carlos Ronca (FAU/USP), Dr. Roberto Righi (FAU/USP), Dr. João Whitaker (FAU/USP) e Dr. Zahn (FAU/USP);

Aos funcionários da biblioteca do prédio de Pós-Graduação em Geografia: Ina, Dê, Rosana e Maíca;

Aos importantes amigos que participaram de minha vida durante este importante período e sobremaneira aqueles que viveram e conviveram comigo em Rio Claro;

Flávia, Janaína, Cláudia, Carla e Jane, que me receberam muito bem em suas casas no período da defesa;

Aos amigos do grupo de estudos “Reflexões Contemporâneas”, representados aqui por Michel Calis e pelo Prof. Dr. Romualdo Dias (IB/UNESP);

Aos amigos que estiveram presentes no laboratório, criando um ambiente de amizade nos momentos mais árduos da pesquisa: Pedro Henrique Ferreira Costa, Dante Reis e Márcia Corrêa;

À minha família e à minha namorada Kerstin, que acompanharam, incentivaram e estiveram sempre dispostos a ajudar no que fosse necessário.



OS DOMOS DE POLUIÇÃO: dinâmica de gases e particulados interagem com clima das metrópoles.

Toda grande cidade do mundo urbano-industrial – com maior ou menor intensidade – sofre as conseqüências da poluição aérea. As variações no volume e nos impactos negativos da emissão de gases e particulados para a atmosfera ficam sempre dependentes de três conjuntos de fatores: a localização do sítio urbano no espaço total do território, a climatologia dinâmica regional e a sucessão habitual do tempo na área, além do fato essencial que é mosaico dos fatores responsáveis pelos fluxos ascendentes de gases particulados (oriundos da circulação de veículos e indústrias).

Todos esses fatores refletem o chamado metabolismo urbano regional e, por fim, a atenção e providências que os órgãos de saneamento básico dedicam à mitigação dos fatores e processos poluidores. Nesse sentido, é lamentável que algumas instituições de saneamento não procurem entender a conformação e a dinâmica do domo de poluição do espaço aéreo da cidade ou metrópole sob sua responsabilidade.

Na era da aviação comercial tem sido possível observar fatos que dizem respeito à base da troposfera onde se inclui o domo de poluição. Na realidade, o processo de formação do domo ocorre sob a forma de um enorme cogumelo, que se espalha a partir de uma certa altura para os lados, perdendo um pouco sua densidade inicial.

Nas grandes cidades em geral existem vários fluxos ascendentes. No caso de São Paulo, esses fluxos se iniciam em Cubatão e na região do ABCD, envolvendo depois o grande corpo ascendente de gases particulados da metrópole central. Tudo isso deriva de sul-sudeste para norte-noroeste, indo afetar as florestas da serra da Cantareira. No caso, existem vários domos interligados, sujeitos a um envergamento para as periferias norte e nordeste da gigantesca cidade que é São Paulo. Os bordos do grande domo terminam nas periferias de tal forma que nem mesmo os bairros mais verdes estão a escape de sua ação.

A cimeira do domo de poluição é um limite aproximado da troposfera em relação à atmosfera. Esse é o motivo pelo qual as aeronaves modernas ultrapassam o domo e transitam por alturas outrora inconcebíveis. Prateleiras elevadas de nuvens esparsas podem flutuar acima da abóbada do domo, enquanto nuvens negras preches de umidade atravessam o corpo negro particulado. Na região de São Paulo, grossas nuvens provindas dos altos da serra do Mar se alteram no espaço aéreo, despejando chuvas fortes em áreas sincopadas do território. Alguns paulistanos dizem que no verão, as chuvas “passeiam pelo corpo total da metrópole”.

Nesses casos pode-se saber que, ao contrário do formato geral do domo de poluição, os setores sujeitos a grandes chuvas têm o aspecto de uma escura “bigorna”. Chuvas fortes e prolongadas evanescem o domo poluído, diluindo gases e fazendo assentar partículas finas. Daí decorrendo que no dia seguinte o espaço aéreo fica claro e límpido, fato que os paulistanos de um modo em geral prevêem. Imediatamente após dias e horas de céu aberto, os fluxos ascendentes de poluição recompõem o domo. Pelo contrário, dias de chuvas finas nem sempre assentam ou dissolvem os gases e particulados, sem deixar de registrar os efeitos da inversão térmica no estado geral do ar.

Um fato importante, conhecido na rotina da aviação civil, diz respeito à zona de turbulência que desestabiliza a aproximação e aterrissagem de aviões. E a interferência se repete na hora do levantamento de vôo das aeronaves, exigindo grande perícia dos pilotos. Por muitas razões, convém saber sempre mais sobre o domo de poluição e a bigorna das grandes chuvas, levando em conta que cada caso é um caso no espaço aéreo das grandes cidades do mundo urbano-industrial, sobretudo nos trópicos úmidos. Seja São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte ou Curitiba.

AZIZ N. AB'SÁBER

RESUMO

A sociedade contemporânea sofre intensos efeitos negativos e degradantes causados pela emissão de substâncias diversas na atmosfera. Doenças, redução das aptidões físicas, desconforto térmico, transformação de paisagens e mudanças climáticas que envolvem escalas do nível local ao global são apenas alguns exemplos da ação dos poluentes atmosféricos.

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), expoente maior das áreas metropolitanas na América do Sul, o uso intenso dos veículos, congestionamentos e grandes percursos no espaço intra-urbano induzem episódios de grande poluição do ar.

Nesta pesquisa é desenvolvido e apresentado um roteiro metodológico, baseado no paradigma do ritmo climático, para o estudo da poluição do ar causada por veículos automotores em áreas metropolitanas, confrontando episódios de intensa poluição e os tipos de tempo reinantes com uso da técnica de análise rítmica.

O roteiro metodológico, aplicado à Região Metropolitana de São Paulo, com dados da estação Ibirapuera (CETESB) nos invernos de 2001, 2002, 2003 e 2004, mostrou que os episódios representativos de intensa poluição por monóxido de carbono (CO), material particulado (MP10) e dióxido de nitrogênio (NO₂) foram caracterizados por ação anticiclônica que impediu as invasões frontais, com dias de calmaria que não dispersaram a poluição produzida dentro da RMSP. Os processos de tropicalização da MPA e de continentalização MPV, que influenciaram o aumento das temperaturas e a queda da umidade, representaram os dias de aumento de poluição do ar. Já os episódios de intensa poluição por ozônio (O₃) foram caracterizados principalmente pela influência de massas tropicais atlânticas e massas tropicais continentalizadas, com dias bastante ensolarados e com ventos que tiveram grande influência no transporte do ozônio e de seus precursores, trazidos das áreas industriais do ABCD e de Cubatão para a área central da RMSP.

Palavras-chave: poluição do ar, áreas metropolitanas, análise rítmica, monóxido de carbono, veículos automotores.

ABSTRACT

The cotemporary society suffers many negative effects caused by the emission of substances in the atmosphere. Illnesses, reduction of the physical aptitudes, thermal discomfort, climatic transformation of landscapes and changes that involve scales of the local level to the global one are only some examples of the atmospheric pollutants action.

At São Paulo Metropolitan Region (RMSP), the most important exponent of South American metropolitan areas, the intense use of motor vehicles, traffic jam and long distances in the urban space induce air pollution episodes.

In this research it is developed and presented a methodology, based on the climate rhythm paradigm, for the study of the air pollution caused vehicles in metropolitan areas, collating episodes of intense pollution and types of weather using rhythmic analysis technique.

The methodology was applied to the RMSP with the Ibirapuera station data (CETESB) in the 2001, 2002, 2003 and 2004 winters, showing that the representative episodes of intense pollution for carbon monoxide (CO), particulate matter (MP10) and nitrogen dioxide (NO₂) had been characterized by stagnating anticyclones action that hindered the frontal invasions, with days of calmnesses that had not exhausted the produced pollution of the RMSP. The processes of tropicalization of the Atlantic Polar Air Mass (MPA), that had influenced the increase of the temperatures and the decrease of the humidity, had represented the days with high level of pollutants in the air. Already the episodes of intense pollution for ozone (O₃) had been characterized mainly by the influence of Atlantic Tropical Air Mass (MTA) and Continental Tropical Air Mass (MTC) masses, with sufficiently sunny and hot days, winds that had great influence in the transport of ozone and its precursors from the industrial areas of ABCD region and Cubatão into the central area of the RMSP.

Key-words: air pollution, metropolitan areas, rhythmic analysis technique, carbon monoxide, São Paulo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama dos elementos do tripé para o estudo da poluição por fontes móveis.	4
Figura 2. Queima real e queima ideal da gasolina em processo de combustão nos automóveis.	4
Figura 3. Participação de fontes na emissão de poluentes na RMSP.	6
Figura 4. Tendências dos níveis de emissão de poluentes pelas fontes móveis na RMSP.	9
Figura 5. Localização das estações de monitoramento da CETESB.	12
Figura 6. Esquematização das propostas de Monteiro (1976) para estudos na RMSP.	19
Figura 7. Mapa de localização da área de estudo.	34
Figura 8. A área de estudo em diferentes escalas: do geral ao particular.	39
Figura 9. A estação Ibirapuera e seu entorno.	42
Figura 10. Trecho de arquivo em extensão .txt fornecido pela CETESB.	46
Figura 11. Trecho da tabela de dados horários dos quatro poluentes no inverno de 2001.	46
Figura 12. Gráficos de dados horários de CO, MP10, NO ₂ e O ₃ do inverno 2001 com identificação dos finais de semana.	47
Figura 13. Gráficos de dados médios diários padronizados dos quatro poluentes em cada inverno (2001, 2002, 2003 e 2004).	54
Figura 14. Gráfico de análise rítmica do episódio 1.	60
Figura 15. Imagens do Satélite GOES de 27/06/2001 a 06/07/2001.	61
Figura 16. Gráfico de análise rítmica do episódio 2.	65
Figura 17. Imagens do Satélite GOES de 26/08/2001 a 06/09/2001.	66
Figura 18. Gráfico de análise rítmica do episódio 3.	70
Figura 19. Imagens do Satélite GOES de 22/06/2002 a 03/07/2002.	71
Figura 20. Gráfico de análise rítmica do episódio 4.	74

Figura 21. Imagens do Satélite GOES de 20/07/2002 a 29/07/2002.....	75
Figura 22. Gráfico de análise rítmica do episódio 5.....	79
Figura 23. Imagens do Satélite GOES de 18/08/2002 a 30/08/2002.....	80
Figura 24. Gráfico de análise rítmica do episódio 6.....	84
Figura 25. Imagens do Satélite GOES de 16/08/2003 a 26/08/2003.....	85
Figura 26. Gráfico de análise rítmica do episódio 7.....	88
Figura 27. Imagens do Satélite GOES de 17/09/2003 a 23/09/2003.....	89
Figura 28. Gráfico de análise rítmica do episódio 8.....	92
Figura 29. Imagens do Satélite GOES de 20/06/2004 a 26/06/2004.....	93
Figura 30. Gráfico de análise rítmica do episódio 9.....	97
Figura 31. Imagens do Satélite GOES de 14/08/2004 a 25/08/2004.....	98
Figura 32. Gráfico de análise rítmica do episódio 10.....	102
Figura 33. Imagens do Satélite GOES de 01/09/2004 a 13/09/2004.....	103
Figura 34. Proposta metodológica adequada ao estudo do CO na RMSP.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Poluentes emitidos pelas fontes móveis: características, efeitos e emissões.....	6
Tabela 2. Rede de monitoramento da CETESB e dados coletados.....	11
Tabela 3. SCU–Articulações dos subsistemas/canais de percepção (MONTEIRO, 1976 p.127)	17
Tabela 4. As escalas espaciais mais representativas para os poluentes medidos pela estação Ibirapuera.....	44
Tabela 5. Episódios de intensa poluição selecionados e desconsiderados nos invernos 2001, 2002, 2003 e 2004.	56
Tabela 6. Valores diários máximos de poluição nos episódios de intensa poluição por CO, MP10, NO ₂ e O ₃ e suas variações nos invernos de 20001 a 2004.....	105

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	III
AGRADECIMENTOS.....	IV
EPÍGRAFE.....	V
RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURA.....	VIII
LISTA DE TABELAS	X
APRESENTAÇÃO	1
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	33
3. TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS: RESULTADOS ALCANÇADOS.....	45
4. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS.	104
5. CONCLUSÕES.....	106
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO	1
1. INTRODUÇÃO	3
1.1 A proposição do problema.....	3
1.2. Justificativas	14
1.3. Objetivos.....	15
1.4. Revisão bibliográfica	15
1.5. Bases teórico-metodológicas.	25
1.6. Material e técnicas.	30
1.7. Roteiro metodológico.	31
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	33
2.1. A RMSP e o município de São Paulo.....	33
2.2. A estação Ibirapuera e seu entorno.....	38
3. TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS: RESULTADOS ALCANÇADOS.....	45
3.1. A organização dos dados.	45
3.2. As variações rítmicas dos dados de poluentes.	48
3.2.1. <i>As variações rítmicas do monóxido de carbono nos invernos de 2001 a 2004.</i>	48
3.2.2. <i>As variações rítmicas do material particulado nos invernos de 2001 a 2004.</i>	49
3.2.3. <i>As variações rítmicas do dióxido de nitrogênio nos invernos de 2001 a 2004.</i>	50
3.2.4. <i>As variações rítmicas do ozônio nos invernos de 2001 a 2004.</i>	50
3.2.5. <i>Sínteses do ritmo dos poluentes.</i>	51
3.3. A seleção dos episódios de intensa poluição: o uso da padronização estatística.	52
3.4. A análise rítmica dos episódios de intensa poluição.....	57
3.4.1. <i>Episódio 1 (30/06 a 06/07/2001): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – bloqueio de passagem frontal e ação de Frente Polar Atlântica em processo de dissipação.</i>	58
3.4.2. <i>Episódio 2 (29/08 a 06/09/2001): Massa Polar Velha em processo de tropicalização e atuação de Massa Tropical Atlântica – ausência de nebulosidade, aumento da radiação solar e incursão de Frente Polar Atlântica.</i>	62
3.4.3. <i>Episódio 3 (30/06 a 03/07/2001): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – bloqueio de passagem frontal e repercussão de Frente Polar Atlântica.</i>	67
3.4.4. <i>Episódio 4 (23/07 a 28/07/2002): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – curta estabilização das condições atmosféricas e atuação de Frente Polar Atlântica.</i>	72

3.4.5. <i>Episódio 5 (20/08 a 30/08/2002): Massa Polar Velha em processo de continentalização – ausência de nebulosidade e ação da Frente Polar Atlântica.</i>	76
3.4.6. <i>Episódio 1 (17/08 a 26/08/2003): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – bloqueio de passagem frontal e ação de Frente Polar Atlântica.</i>	81
3.4.7. <i>Episódio 7 (18/09 a 23/09/2003): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização: aumento da radiação solar e ação da Massa Tropical Continental.</i>	86
3.4.8. <i>Episódio 8 (22/06 a 25/06/2004): Massa Polar Atlântica Velha - estabilidade atmosférica e repercussão, incursão e dispersão de Frente Polar Atlântica.</i>	90
3.4.9. <i>Episódio 9 (16/08 a 24/08/2004): Massa Tropical Atlântica em processo de continentalização: bloqueio de passagem frontal, pouca nebulosidade e repercussão, ação e dissipação da Frente Polar Atlântica.</i>	94
3.4.10. <i>Episódio 10 (04/09 a 12/09/2004): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – bloqueio de passagem frontal e repercussão de Frente Polar Atlântica.</i>	99
4. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS	104
5. CONCLUSÕES	106
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

APRESENTAÇÃO

A presente Dissertação de Mestrado é parte de um projeto pessoal definido no Trabalho de Conclusão do Curso de Bacharelado em Geografia, apresentado ao Departamento de Geografia da Unesp - Rio Claro, no ano de 2004, cujo título é “Base epistemológica e questões ambientais urbanas: o sistema clima urbano e o monóxido de carbono na Região Metropolitana de São Paulo”, onde expusemos algumas problemáticas a respeito do uso dos automóveis. Assim, achamos de bom grado iniciar o estudo buscando um direcionamento epistemológico - que foi feito naquele momento - para então estudar a poluição por automóveis leves, de uso individual.

O desejo inicial para a realização da atual pesquisa era o estudo das dinâmicas da atmosfera e do monóxido de carbono (CO) por toda a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). O CO é um poluente que possui cerca de 95% de suas emissões pelos veículos automotores (80% apenas por veículos leves) e a RMSP é uma área que concentra 20% da frota nacional de carros. Pretendíamos, dentro desta temática, adotar o paradigma do ritmo climático como fio condutor.

Os obstáculos, as dificuldades encontradas no decorrer da pesquisa e a revisão bibliográfica em torno do tema, fizeram-nos adotar outros rumos. Ao constatarmos a escassez de pesquisas, com bases no paradigma do ritmo climático, sobre poluição do ar por veículos automotores, percebemos que a pesquisa outrora idealizada se mostrava impraticável em um período curto. Assim, pensando na melhor contribuição que poderíamos dar, decidimos concentrar os esforços na definição de um roteiro metodológico para o estudo da poluição do ar por veículos automotores em áreas metropolitanas, aplicando-o simultaneamente à RMSP, a partir de dados de uma das estações de medição da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Paulo – CETESB.

Além da demora e da burocracia, a CETESB aceitou fornecer gratuitamente apenas curta série temporal de dados, obrigando-nos a escolher apenas os invernos de 2001 a 2004. Assim, para os poluentes, forneceram-nos dados de monóxido de carbono (CO), material particulado (MP10), dióxido de nitrogênio (NO₂) e ozônio (O₃). Ficaram faltando dados de hidrocarbonetos (HC) e de monóxido de nitrogênio (NO), que juntamente com o NO₂, formam o grupo dos óxidos de nitrogênio (NO_x). Desprezamos os dados de óxidos de enxofre (SO₂) porque este grupo de poluentes é emitido principalmente por indústrias.

Assim, com a utilização de dados dos quatro poluentes (CO, MP10, NO₂ e O₃) e de dados atmosféricos, disponibilizados pela CETESB (estação Ibirapuera), pelo Serviço Regional de Proteção ao Vô da Aeronáutica (Aeroporto de Congonhas) e pelo Inpe (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), procuramos nas páginas seguintes desenvolver o roteiro metodológico, cuja construção e validação foram feitas com bases no estudo da influência dos tipos de tempo sobre a poluição produzida por veículos automotores na RMSP, nos invernos de 2001 a 2004, submetendo episódios de intensa poluição à técnica de análise rítmica.

No Capítulo 1, apresentamos o tripé fundamental da pesquisa: a poluição, os veículos automotores e a dinâmica atmosférica na perspectiva geográfica de identificação da sucessão de tipos de tempo e da análise rítmica. Nesse capítulo também estão contidos os objetivos, a metodologia, os materiais utilizados, as justificativas e a revisão bibliográfica. O capítulo é encerrado com o roteiro metodológico aplicado à pesquisa.

O Capítulo 2 é uma contextualização da área de estudo e representa parte importante do trabalho porque discute as diferentes escalas de abordagem e a validade espacial dos dados, desde a estação Ibirapuera até a Região Metropolitana de São Paulo.

A aplicação da análise rítmica no estudo da poluição por veículos automotores e a sucessão de tipos de tempo na RMSP compõe o Capítulo 3 dessa dissertação. Nele, o comportamento dos poluentes foi estudado nas escalas horária e diária. Depois foram selecionados episódios de intensa poluição. Por fim os episódios foram submetidos à análise rítmica.

Uma síntese dos resultados obtidos e as conclusões alcançadas encontram-se, respectivamente, apresentadas nos capítulos 4 e 5, encerrando a dissertação evidenciando a validade, as inconsistências e a aplicabilidade do roteiro proposto e desenvolvido.

1. INTRODUÇÃO

1.1 A proposição do problema.

A sociedade contemporânea sofre intensos efeitos negativos e degradantes causados pela emissão de substâncias diversas na atmosfera. Doenças, redução das aptidões físicas, desconforto térmico, transformação de paisagens e mudanças climáticas que envolvem escalas do nível local ao global são apenas alguns exemplos da ação dos poluentes atmosféricos.

No Brasil de 180 milhões de habitantes mal distribuídos espacialmente, as poucas regiões metropolitanas, pequenas em comparação ao território nacional, concentram grande parte da população e apresentam inúmeros problemas de cunho ambiental, dentre os quais a má qualidade do ar.

O estado de São Paulo, o mais urbanizado e industrializado do país, vive realidade complexa quanto à poluição do ar. Nele estão presentes práticas agrícolas, vários complexos industriais e muitos aglomerados urbanos, cada qual repercutindo negativamente na qualidade do ar.

Gestores ambientais de 22% dos municípios brasileiros apontam que a poluição do ar é um problema real que afeta os respectivos municípios. As fontes e os tipos de poluição são diversos: queimadas, falta de pavimentação de vias, atividades industriais, atividades agropecuárias, veículos automotores, lixo, mineração, termelétricas e outros. As queimadas são a causa primeira de poluição em cidades com menos de 100 mil habitantes. Em cidades médias, com população entre 100 mil e 500 mil habitantes, as atividades industriais são a maior fonte poluidora, seguidas em segundo lugar pelos automóveis. Para as cidades com mais de 500 mil habitantes e conseqüente alto grau de urbanização, os veículos automotores representam a maior fonte poluidora do ar (IBGE, 2005).

Da perspectiva acima assinalada, os automóveis são o maior problema na geração de resíduos e substâncias na troposfera inferior, ou camada de mistura, que envolve a vida e o cotidiano dos cidadãos.

Na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), expoente maior da concentração demográfica sul-americana, o uso intenso dos veículos, congestionamentos e grandes percursos no espaço intra-urbano induzem episódios de grande poluição do ar. De

maneira geral, a poluição do ar na RMSP por fontes móveis pode ser analisada pela integração de três elementos: veículos automotores, poluentes e dinâmica atmosférica (Fig. 1).

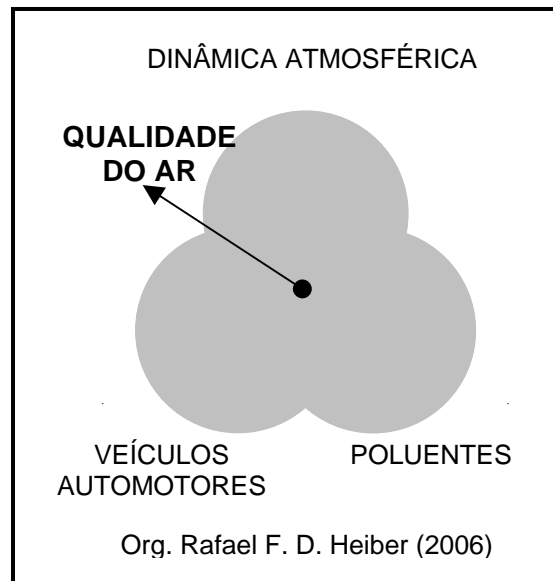


Figura 1. Diagrama dos elementos do tripé para o estudo da poluição por fontes móveis.

O primeiro elemento do tripé é a existência e o uso dos veículos automotores. Na Região Metropolitana de São Paulo, o arranjo urbano, a necessidade de locomoção e acesso aos equipamentos urbanos, a ineficiência do transporte público e a renda média da população superior à média nacional, levaram ao aumento contínuo da frota veicular ao longo das últimas décadas (VASCONCELOS, 2001). A RMSP ocupa 0,1% do território brasileiro e possui 10% da população, 20% do PIB e 20% dos automóveis de uso individual (8 milhões). A queima incompleta do combustível durante a circulação destes veículos é responsável pela emissão de poluentes, substâncias que, em abundância na atmosfera, prejudicam a qualidade de vida das pessoas, danificam estruturas e peças urbanas e perturbam a flora e a fauna. A figura 2 ilustra a diferença entre a queima ideal e a queima incompleta real de gasolina:

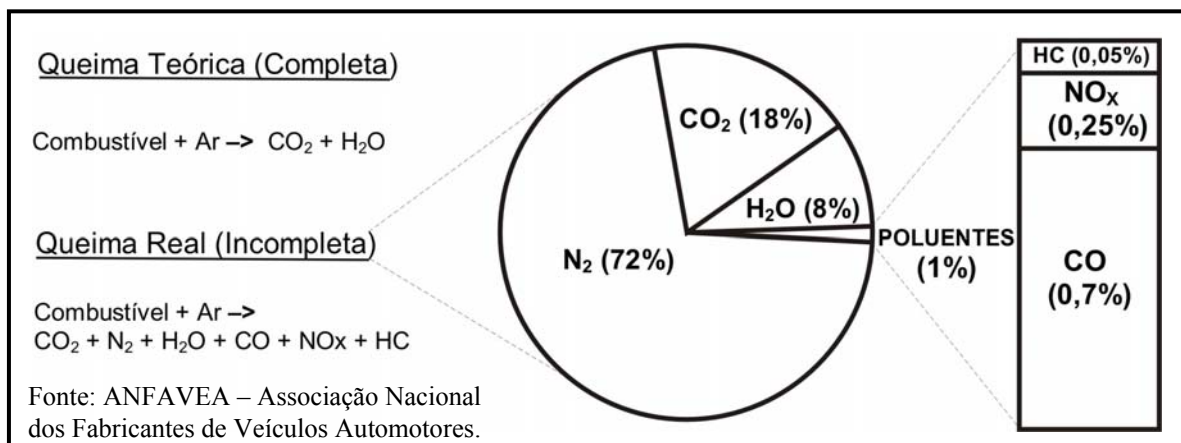
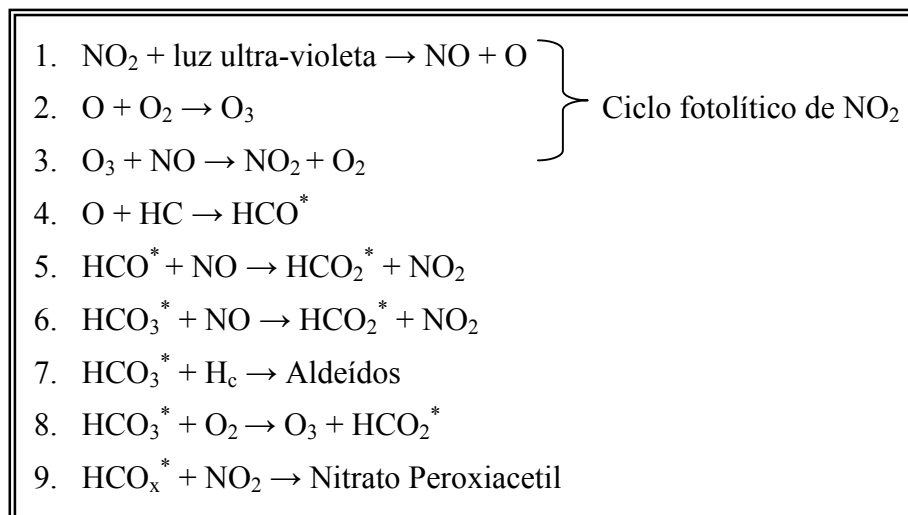


Figura 2. Queima real e queima ideal da gasolina em processo de combustão nos automóveis.

Os poluentes representam o segundo elemento do tripé. Eles são encontrados na atmosfera, concentrados na troposfera inferior e são caracterizados como primários e secundários. Os poluentes primários são emitidos diretamente pela fonte, ao contrário dos secundários, que são resultado de reações químicas na atmosfera. Os veículos automotores são os principais emissores de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos (HC). Os dois últimos são precursores do ozônio troposférico, poluente formado por fotólise, reação química ativada por raios UV. O ciclo fotolítico de dióxido de nitrogênio é o maior responsável pelo ozônio troposférico em áreas urbanas (CARDOSO 1998). Segundo Oke (1987), o ciclo do ozônio troposférico ocorre de acordo com as seguintes reações químicas:



As reações do ciclo fotolítico do dióxido de nitrogênio representam o ciclo básico de produção e consumo de ozônio na troposfera, onde o O₃ é formado pela disponibilidade de oxigênio molecular proveniente da fotólise do NO₂ e é consumido pela reação com o NO (CARDOSO, 1998).

A figura 3 ilustra a contribuição de diferentes fontes para a poluição do ar na Região Metropolitana de São Paulo. Além dos poluentes anteriormente citados, constata-se que óxidos de enxofre (SO_x) são emitidos em grande parte por fontes fixas em processos industriais. O material particulado de até 10µm¹ (MP10) possui fontes variadas, incluindo processos de ressuspensão por parte da circulação de automóveis, vento, entre outros.

¹ µm: micrômetro. 1 µm = 0,0001 m

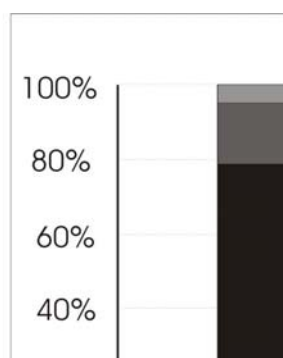


Figura 3. Participação de fontes na emissão de poluentes na RMSP.

A seguir, a tabela 1 mostra os poluentes emitidos principalmente pelas fontes móveis, seus efeitos, características e estimativas de emissão. Eles correspondem aos poluentes que serão estudados nos capítulos posteriores.

Os hidrocarbonetos, cujas emissões ocorrem principalmente pelos veículos automotores, não foram incluídos na tabela porque seus dados não foram disponibilizados.

O CO é o poluente mais ligado ao uso dos veículos leves, sendo o que melhor representa os danos causados pela falta de um sistema de transporte público eficiente. Além do CO causar prejuízos de reflexos, de aprendizado, de visão e de trabalho, está sendo associado à hipertensão. Em dias poluídos, os atendimentos hospitalares em decorrência da hipertensão aumentam em até 200%² na cidade de São Paulo.

Tabela 1. Poluentes emitidos pelas fontes móveis: características, efeitos e emissões.

Poluentes	Características	Efeitos	Emissões Discriminadas das Fontes Móveis	1000 t/ano	%
CO	Gás incolor, inodoro e insípido.	Altos níveis de CO estão associados a prejuízo dos reflexos, da capacidade de estimar intervalos de tempo, de aprendizado, de trabalho e das aptidões visuais.	Gasolina	1072,6	61,5
			Álcool	217,8	12,5
			Diesel	413,5	23,7
MP10	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar em forma de poeira ou neblina com tamanho	Aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras. Danos à vegetação deterioração da	Gasolina	6,1	10,8
			Álcool	-	-
			Diesel	16,4	29,0

² LOPES, A. D. Estudo alerta que poluição pode causar hipertensão. **O ESTADO DE SÃO PAULO**. São Paulo, 30 de setembro de 2005, Vida &, p.A22.

	inferior a 10 micra	visibilidade e deterioração do solo.			
NOx	Gás marrom avermelhado, com odor forte e irritante. Pode formar compostos orgânicos tóxicos e aumenta quantidade de partículas inaláveis na atmosfera.	Aumento da sensibilidade à asma e à bronquite e queda da resistência fisiológica a doenças. Formação de chuva ácida e danos à vegetação	Gasolina Álcool Diesel	41,1 13,1 295,7	12,8 3,5 79,8
O3*	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e principal componente da névoa química.	Irritação nos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar, causando inclusive interações. Danos às colheitas, à vegetação natural, vegetação ornamental etc.	Gasolina Álcool Diesel	0* 0* 0*	0* 0* 0*

* poluente secundário: não é emitido diretamente. Dados: CETESB (2005) Org. Rafael F. D. Heiber (2006)

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), pela Portaria Normativa n.º 348 de 14/03/90, estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar, ampliando o número de parâmetros anteriormente regulamentados pela Portaria GM 0231 de 27/04/76. Os padrões estabelecidos através dessa portaria foram submetidos ao Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) em 28/06/90 e transformados na Resolução CONAMA n.º 03/90 (CETESB, 2004).

Os objetivos dessa resolução eram reduzir os níveis de emissão de poluentes dos veículos automotores, promover o desenvolvimento tecnológico nacional, criar programas de inspeção dos veículos em uso, promover a conscientização popular quanto à poluição veicular, estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados e promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis.

Como resultado desse processo, foi elaborado o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE. Para promover a aplicação do programa, o IBAMA se conveniou à CETESB para operacionalizar as homologações dos

veículos dentro de novos padrões. Trata-se de um longo programa com várias etapas de implementação, reduzindo em até 94% o nível de poluição provocada pelos veículos novos em relação aos veículos utilizados na década de 80. No entanto, a partir do ano 2001 observou-se estabilização dos níveis de poluição pelos veículos automotores, havendo a necessidade da criação de programa semelhante aplicado apenas às motocicletas, visto que as montadoras destes veículos ainda não tinham sido atingidas por metas de redução na emissão poluentes. Com o aumento de motocicletas, principalmente na Região Metropolitana de São Paulo, ficou evidente a poluição por elas causada.

A figura 4 aponta para a estabilização da emissão média de poluentes por veículos leves e pesados na RMSP, a partir do ano 2000. Mesmo com a redução dessa emissão média por veículos leves durante os anos 90, resultado da renovação da frota, atualmente três vezes maior que no final dos anos 80, o aumento contínuo de automóveis e motocicletas nas ruas tem elevado sutilmente, desde o ano 2001, os níveis de poluição total emitida na RMSP.

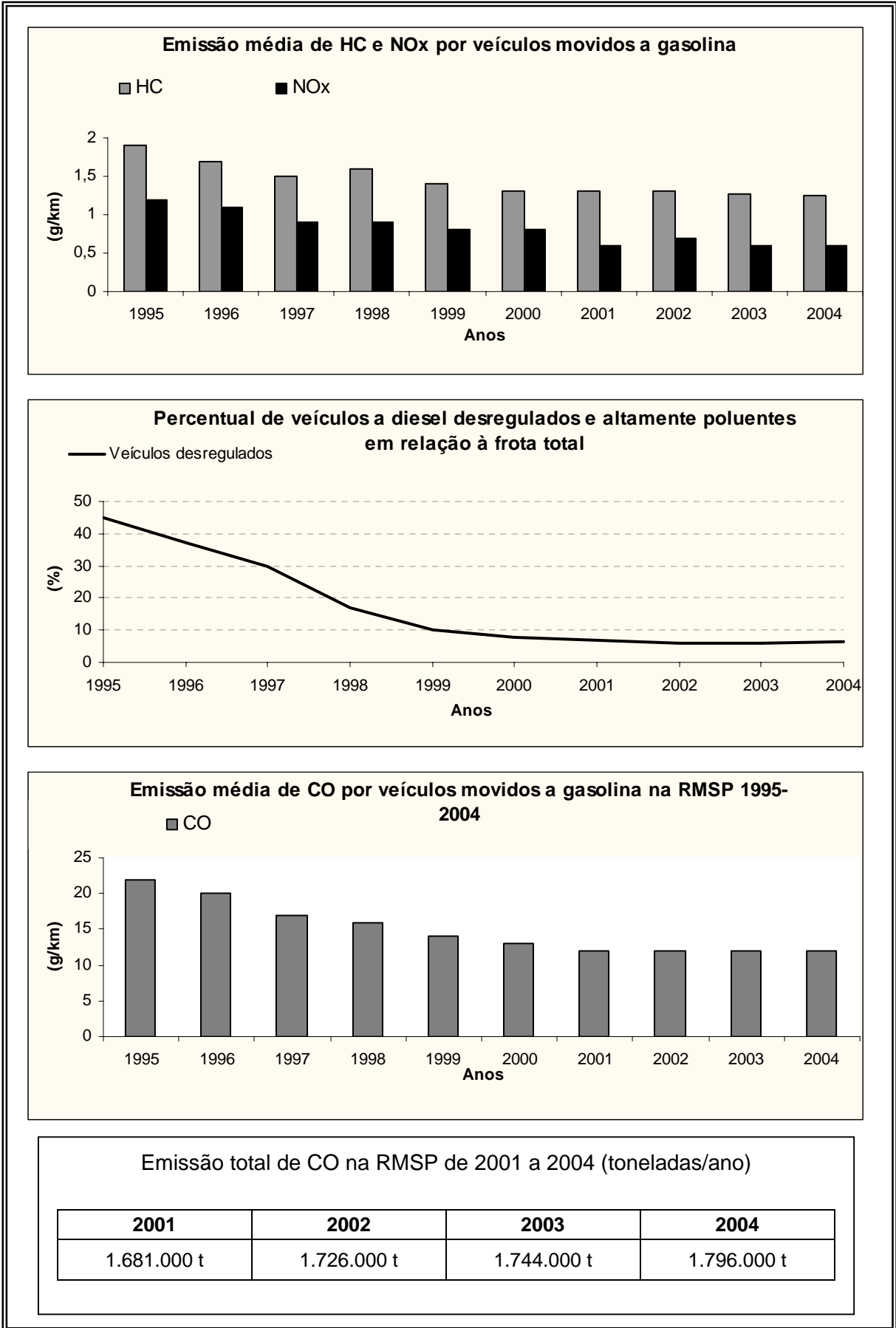


Figura 4. Tendências dos níveis de emissão de poluentes pelas fontes móveis na RMSP

Desde a década de 1970 a CETESB mantém uma rede de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo. O objetivo desta rede é, além de coletar dados do comportamento dos poluentes, auxiliar na elaboração de planos para controle da poluição na Região Metropolitana de São Paulo.

Vinte e três estações compõem a rede automática de monitoramento na RMSP e foram distribuídas para cobrir a região de maneira satisfatória. Contudo, esse planejamento se deu entre as décadas de 70 e 80, e com a expansão espacial e maior adensamento demográfico em áreas antes vazias da RMSP, a rede da CETESB não atende com precisão e qualidade o monitoramento da grande metrópole. As estações e os elementos por elas medidos aparecem na tabela 2, e suas localizações dentro da RMSP na figura 5.

Das vinte e três estações apenas as do Parque do Ibirapuera, de São Caetano do Sul e do Parque Dom Pedro II medem a maioria dos elementos disponíveis na rede. No entanto, atos de vandalismo no início de 2004 fizeram com que a estação do Parque Dom Pedro II fosse desativada. Era uma importante estação, pois além dos parâmetros que media, estava instalada na área central da mancha urbana. A estação, que ficava muito próxima a ruas e avenidas, captava muito bem as emissões de poluentes por parte dos veículos automotores que tanto afetam a qualidade do ar naquele local de grande circulação.

Por razões metodológicas, de ajuste aos objetivos do estudo e de base de dados, a estação Ibirapuera se tornou o local ideal de coleta de dados. Tanto a estação São Caetano do Sul quanto a estação Ibirapuera, fornecem satisfatória base de dados, visto que medem quase todos os parâmetros de qualidade do ar. Contudo, a estação São Caetano do Sul está instalada em uma área que recebe grande influência de poluição industrial: a fábrica da General Motors do Brasil fica a poucas centenas de metros. Já a estação Ibirapuera está distante de indústrias, medindo basicamente a poluição do ar emitida pelos automóveis. Por estar instalada em um parque verde no meio da mancha urbana, essa estação tem ainda a vantagem de medir a poluição já dissolvida no ar, aproximando as medições da realidade para toda região, ao invés de detectar altas concentrações de poluentes junto às vias de tráfego, os lugares de emissão.

Tabela 2. Rede de monitoramento da CETESB e dados coletados.

ESTAÇÕES CETESB	MP	SO ₂	RAD	NO ₂	CO	O ₃	UR	TM	VV	DV
Cambucí	X									
Centro	X	X		X	X					
Cerqueira César	X	X		X	X					
Congonhas	X	X		X	X	X				X
Ibirapuera	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Santana	X					X			X	X
Lapa	X			X	X	X			X	
Moóca	X					X			X	X
Nossa Senhora do Ó	X									
Parque D. Pedro II	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Penha	X									
Pinheiros	X	X		X		X				
Santo Amaro	X				X				X	X
São Miguel Paulista	X					X	X	X	X	X
Diadema	X					X				
Guarulhos	X								X	X
Mauá	X			X		X				
Santo André - Centro	X				X				X	X
Santo André - Capuava	X								X	X
São Bernardo do Campo	X								X	X
São Caetano do Sul	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Osasco	X	X		X	X	X			X	X
Taboão da Serra	X									

<input checked="" type="checkbox"/>	- Monitorados
<input type="checkbox"/>	- Não Monitorados

MP – Material Particulado
NO ₂ – Dióxido de Nitrogênio
CO – Monóxido de Carbono
O ₃ – Ozônio
SO ₂ – Dióxido de Enxofre

TM – Temperatura
VV – Velocidade dos Ventos
VV – Velocidade dos Ventos
UR – Umidade Relativa
RAD – Radiação

Fontes: CETESB (2005)

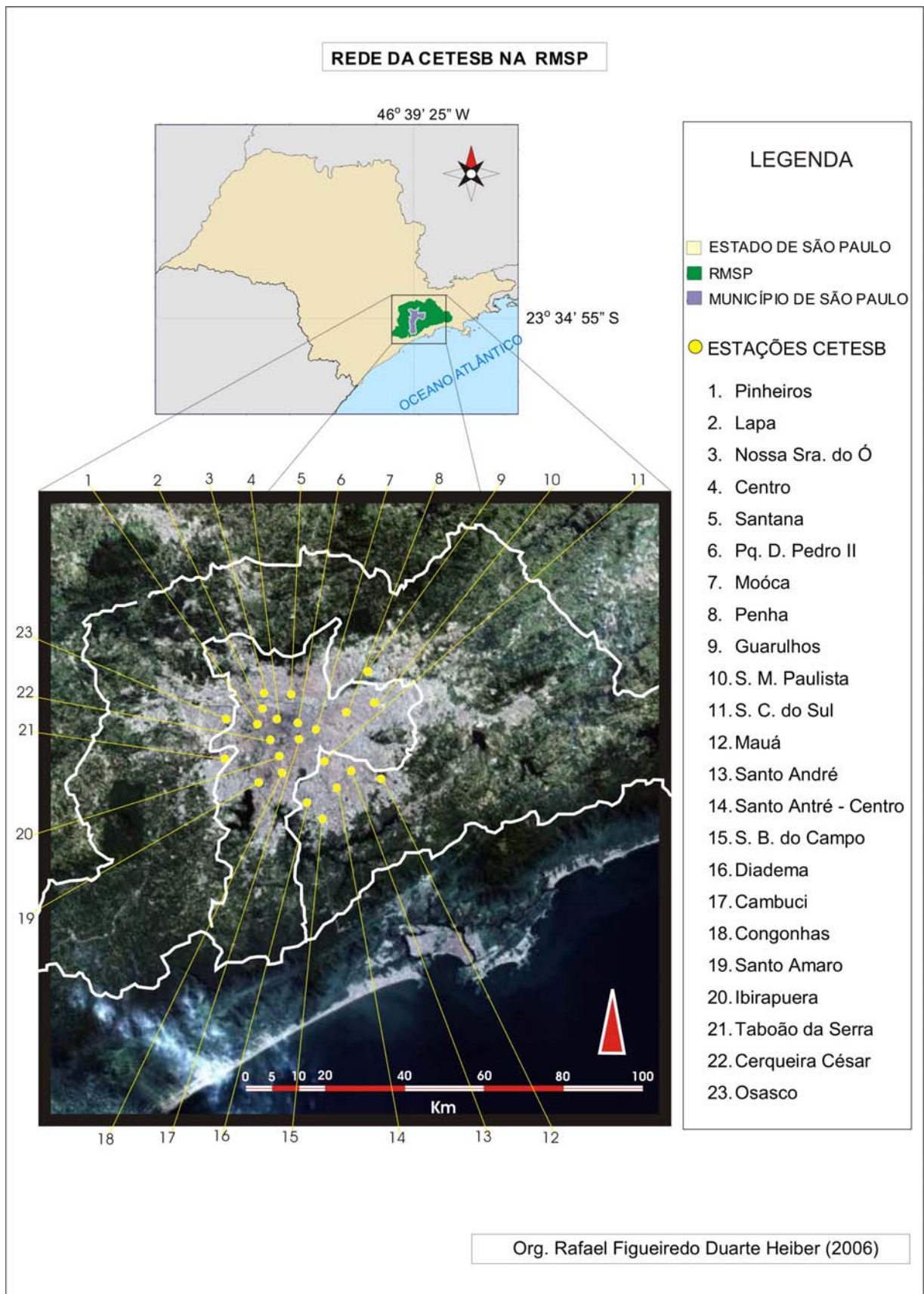


Figura 5. Localização das estações de monitoramento da CETESB.

O terceiro elemento do tripé básico do estudo proposto é a dinâmica atmosférica, na perspectiva geográfica da identificação de sucessão de tipos de tempo e da análise rítmica.

Segundo Monteiro (1991) a geografia precisa integrar as diferentes esferas terrestres para compreender a organização e a transformação dos espaços terrestres, sob um prisma antropocêntrico. Por essa razão, nos estudos geográficos, as observações meteorológicas devem centralizar sua preocupação naquela camada mais complexa e turbulenta da atmosfera representada pela troposfera inferior, a qual os meteorologistas chamam de “camada de mistura”.

O que importa aos geógrafos é o tratamento que se dá à grande massa atmosférica, não em sua totalidade nem isoladamente, mas na medida em que seu comportamento se individualiza com as outras grandes massas (litosfera, hidrosfera e biosfera). O conceito geográfico de clima desenvolvido por Sorre (1951) se adequa perfeitamente a essas condições, nas quais o verdadeiro sentido do fenômeno climático é obtido não em função do estado médio dos seus elementos em séries temporais de trinta anos, mas em função de suas combinações expressas pelo ritmo habitual de sucessão de tipos de tempo em escalas diárias ou horárias das combinações próprias aos fatos geográficos individualizados sobre um dado lugar na superfície terrestre (MONTEIRO, 1963).

A seqüência contínua de tipos de tempo, avaliada em diversas escalas têmpero-espaciais, ou seja, desde fenômenos episódicos locais a análises de diversos anos sobre uma grande região, é responsável pela abordagem em nível geográfico, chegando-se pois, a conclusões a respeito da interação entre os diversos elementos climáticos e suas relações com os outros componentes do espaço geográfico. Neste viés de abordagem – o ritmo da sucessão de tipos de tempo – alcança-se a análise rítmica (MONTEIRO, 1969). Monteiro (1976) afirma que:

O ritmo climático só poderá ser compreendido por meio da representação, dos elementos fundamentais do clima em unidade de tempo cronológico pelo menos diárias, compatíveis com a representação da circulação atmosférica regional, geradora de estados atmosféricos que se sucedem e constituem o fundamento do ritmo. [...] Só a análise rítmica detalhada ao nível de “tempo”, revelando a gênese dos fenômenos climáticos pela interação dos elementos e fatores, dentro de uma

realidade regional, é capaz de oferecer parâmetros válidos à consideração dos diferentes e variados problemas geográficos dessa região. [...] Na análise rítmica, as expressões quantitativas dos elementos climáticos estão indissolúvelmente ligadas à gênese ou sua qualidade, e os parâmetros resultantes dessa análise devem ser considerados, levando em conta a posição no espaço geográfico em que se define (MONTEIRO, 1971 apud ZAVATTINI, 2004, p.23).

Os mecanismos de sucessão característicos do ritmo habitual de tipos de tempo são extremamente importantes à previsão e avaliação da gravidade do fenômeno de poluição do ar (MONTEIRO 1976). A partir da técnica de análise rítmica pode-se reconstituir os tipos de tempo atuantes em escala diária e classificá-los de acordo com sua gênese e dinâmica, incluindo os poluentes como uma variável integrada aos elementos meteorológicos e à situação geográfica do lugar estudado.

Finalizada a proposição do problema da poluição atmosférica por veículos automotores na RMSP, passamos aos próximos tópicos do capítulo.

1.2. Justificativas

A poluição atmosférica, desde a década de 70, é um dos maiores impactos ambientais causados pela urbanização e pela industrialização na Região Metropolitana de São Paulo. A relação entre a dinâmica atmosférica e a área urbana onde ocorrem as emissões é importante tema a ser estudado, pois envolve complexidade ainda pouco compreendida e explorada.

O presente estudo é justificado pela escassez de pesquisas que tratam da grande problemática da poluição do ar gerada por veículos automotores, tendo como base de análise o paradigma do ritmo climático, que permite avaliar a influência da sucessão de tipos de tempo no comportamento da dispersão dos poluentes.

1.3. Objetivos

É objetivo desta pesquisa desenvolver um roteiro metodológico para o estudo da poluição do ar causada por veículos automotores que circulam na Região Metropolitana de São Paulo, confrontando episódios de intensa poluição com os tipos de tempo reinantes em tais ocasiões.

Pretendemos mostrar os rumos para a definição da estação fornecedora de dados da qualidade do ar, a seleção do período do estudo, a escolha dos tipos de dados utilizados e suas fontes, os dilemas enfrentados, a aplicação de técnicas, a confecção de gráficos de análise rítmica e finalmente um diagrama final do roteiro metodológico.

É também objetivo deste trabalho discutir as questões de escalas que envolvem o estudo da poluição gerada pelos veículos automotores na RMSP, procurando alcançar, com o uso da análise rítmica, uma maior segurança na discussão da abrangência dos dados da estação Ibirapuera em relação à RMSP.

Assim, havendo a validade do roteiro metodológico apresentado, esperamos também abrir a possibilidade para aplicação do mesmo em outras áreas na RMSP, ou locais que possuam uma rede de monitoramento de qualidade do ar, para que o complexo tema continue a ser desenvolvido e estudado na perspectiva da geografia, que privilegia a relação mútua dos elementos antrópicos e naturais.

1.4. Revisão bibliográfica

Com a intenção de iniciar o arcabouço teórico e definir o estado de arte dos estudos de poluição atmosférica, apresentamos a revisão bibliográfica, mostrando o início do interesse pela temática, passando pela definição do Sistema Climático Urbano e por estudos efetuados em grandes cidades, estrangeiras e brasileiras, sendo possível identificar as principais linhas metodológicas que nortearam os mesmos.

No século XVII já existia o interesse em se estudar as modificações climáticas e a qualidade do ar nas cidades. Motivado pela dicotomia cidade/campo em Londres, Evelyn (1661) publicou *Fumugium*, provavelmente a primeira obra que demonstrava a vulnerabilidade da atmosfera próxima à superfície. Logo após a Revolução Industrial no

século XVIII, Howard (1833) escreveu o primeiro estudo sobre a qualidade do ar, também em Londres. Estudos de mesma natureza se espalharam pelo globo seguindo os caminhos da industrialização. A pesquisa de Thomas (1956), *Man's hole in changing the face of Earth*, que traz os artigos de Mumford, sobre a história natural da urbanização, e de Landsberg, sobre o clima das cidades, tornou-se uma referência na época. A única monografia sobre o clima urbano só foi escrita por Chandler (1965), sobre a capital inglesa, cuja abordagem climatológica separativa demonstrava grande influência do campo de estudos meteorológicos (MONTEIRO, 1976).

No Brasil, atribui-se a Monteiro (1976) a primeira e mais importante sistematização do clima urbano, que deu origem a diversos planos de ação em cidades brasileiras: Plano Diretor de Teresina (1973), Plano de Desenvolvimento Urbano de Marabá (1973) etc. Através da evolução da abordagem ambiental em geografia, destacou-se a importância de uma teoria geográfica válida, baseada nas regularidades e universalidades, para aplicação às consequências da urbanização e degradação ambiental, dando importância às formas perceptivas da qualidade ambiente, mais especificamente em relação à atmosfera urbana.

O Sistema Clima Urbano (SCU) de Monteiro (1976), tem seu alicerce teórico calcado na Teoria Geral de Sistemas de Berthalanffy, na Cibernética de Wiener e no Geossistema de Bertrand. O SCU é dividido em três subsistemas: termodinâmico, físico-químico e hidrometeorológico. Estes subsistemas são representados por canais de percepção, canais abstratos que se iniciam na essência da atmosfera e desembocam na percepção humana, estando sempre em conjunto de afinidade e de interação. Para os subsistemas termodinâmico, físico-químico e hidrometeorológico, os canais de percepção são respectivamente o conforto térmico, a qualidade do ar e o impacto meteorológico. A seguir o autor esclarece:

[Canais de Percepção] podem atravessar toda a organização desde o nível insumidor, pelo transformador ao produtor; possibilitam a orientação no sentido contrário, como é o caso do Canal II [qualidade do ar]; procuram definir, através do nível de resolução dos fenômenos climáticos, os subsistemas fundamentais ao Sistema Clima Urbano; deixam margem à avaliação de suas transformações em sua passagem pelo interior da estrutura interna do sistema; possibilitam, por fim, a avaliação das relações entre o núcleo e o ambiente do sistema (MONTEIRO, 1976. p.1.25).

A tabela 3 traz a caracterização de cada um dos canais ou subsistemas, mostrando as diferentes articulações entre eles no Sistema Clima Urbano.

Tabela 3. SCU–Articulações dos subsistemas/canais de percepção (MONTEIRO, 1976 p.127)

Caracterização	SUB-SISTEMA	TERMODINÂMICO	FÍSICO QUÍMICO	HIDRO-METEÓRICO
	CANAIS	CONFORTO TÉRMICO	QUALIDADE DO AR	IMPACTO METEÓRICO
Fonte		Atmosfera Radiação Circulação horizontal	Atividade urbana, obras, veículos automotores, indústria, limpeza	Atmosfera Estados especiais (desvios do ritmo)
Trânsito no sistema		Intercâmbio de operando e operando	De operando ao operando	Do operando ao operando
Mecanismo de ação		Transformação no sistema	Difusão através do sistema	Concentração no sistema
Projeção		Interação núcleo ambiente	Do núcleo ao ambiente	Do ambiente ao núcleo
Desenvolvimento		Contínuo (permanente)	Cumulativo (renovável)	Episódico (eventual)
Observação		Meteórica especial (trabalho de campo)	Sanitária e Meteorológica especial	Meteorológica Hidrológica (trabalho de campo)
Correlações Disciplinares e Tecnológicas		Bioclimatologia Arquitetura Urbanismo	Engenharia sanitária	Engenharia sanitária e Infra-estrutura urbana
Produtos		“Ilha de calor”; Ventilação; Aumento de precipitação.	Poluição do ar	Ataques à integridade urbana
Efeitos diretos		Desconforto e redução do desempenho humano	Problemas sanitários e doenças – perturbações	Problemas de circulação e comunicação urbana
Reciclagem adaptativa		Controle do uso de solo e tecnologia de conforto habitacional	Vigilância e controle dos agentes de poluição	Aperfeiçoamento da infra- estrutura urbana, uso do solo regularização fluvial.
Responsabilidade		Natureza e Homem	Homem	Natureza

Nas Considerações Finais da obra *Teoria e Clima Urbano*, Monteiro (1976) demonstra sua preocupação em relação à metrópole paulista, onde o processo de antropização já afetava negativamente a qualidade do ar. Elaboramos um diagrama contendo as propostas contidas na obra (Figura 6), resumindo a idéia do autor para os estudos na RMSP a partir da sistematização do clima urbano.

Do rol das propostas feitas, a primeira citada dentro do canal de qualidade do ar (Figura 5), cujo conteúdo remete ao conceito do ritmo climático e a poluição do ar, até os dias atuais não se mostra amplamente desenvolvida nos moldes teóricos da análise rítmica e da sucessão dos tipos de tempo. Dentre os poucos trabalhos que se enquadram, ao menos parcialmente, na categoria de estudos citada, destaca-se a pesquisa de Gallego (1972), pioneira no Brasil, que teve como tema os tipos de tempo e a poluição atmosférica no Rio de Janeiro.

Outras pesquisas também estão relacionadas às propostas de Monteiro (1976). Ferreira (1980) estudou a poluição em Cubatão com o uso de líquens, sendo esta uma das primeiras pesquisas sobre poluição naquela área. Posteriormente, Baldini (1994) estudou a região de Cubatão a partir das contradições entre ação antrópica e meio ambiente. São Paulo foi área de estudo de Sobral (1988), com uma pesquisa fundamentalmente da Geografia Médica, Castro (1993), que tratou do problema da chuva ácida e Fruehauf (1998), que pesquisou a deterioração da qualidade do ar na cidade paulistana. Danni-Oliveira (1999) se empenhou em definir as influências de atributos geocológicos sobre a dispersão de poluentes em Curitiba. Das pesquisas citadas, nenhuma tratou diretamente da poluição por automóveis e do entendimento de sua dinâmica desde a escala horária até a escala diária e sazonal, embora adotem o conceito do ritmo climático desenvolvido por Monteiro (Zavattini, 2004).

As pesquisas sobre poluição atmosférica têm sido praticadas em sua maioria, tanto no Brasil quanto em outros países, como tentativa de validar modelos e sistemas numéricos de dispersão dos poluentes.

Na Europa e nos Estados Unidos, a modelagem tem sido amplamente utilizada para gerar previsões a respeito do comportamento de poluentes em grandes adensamentos urbanos.

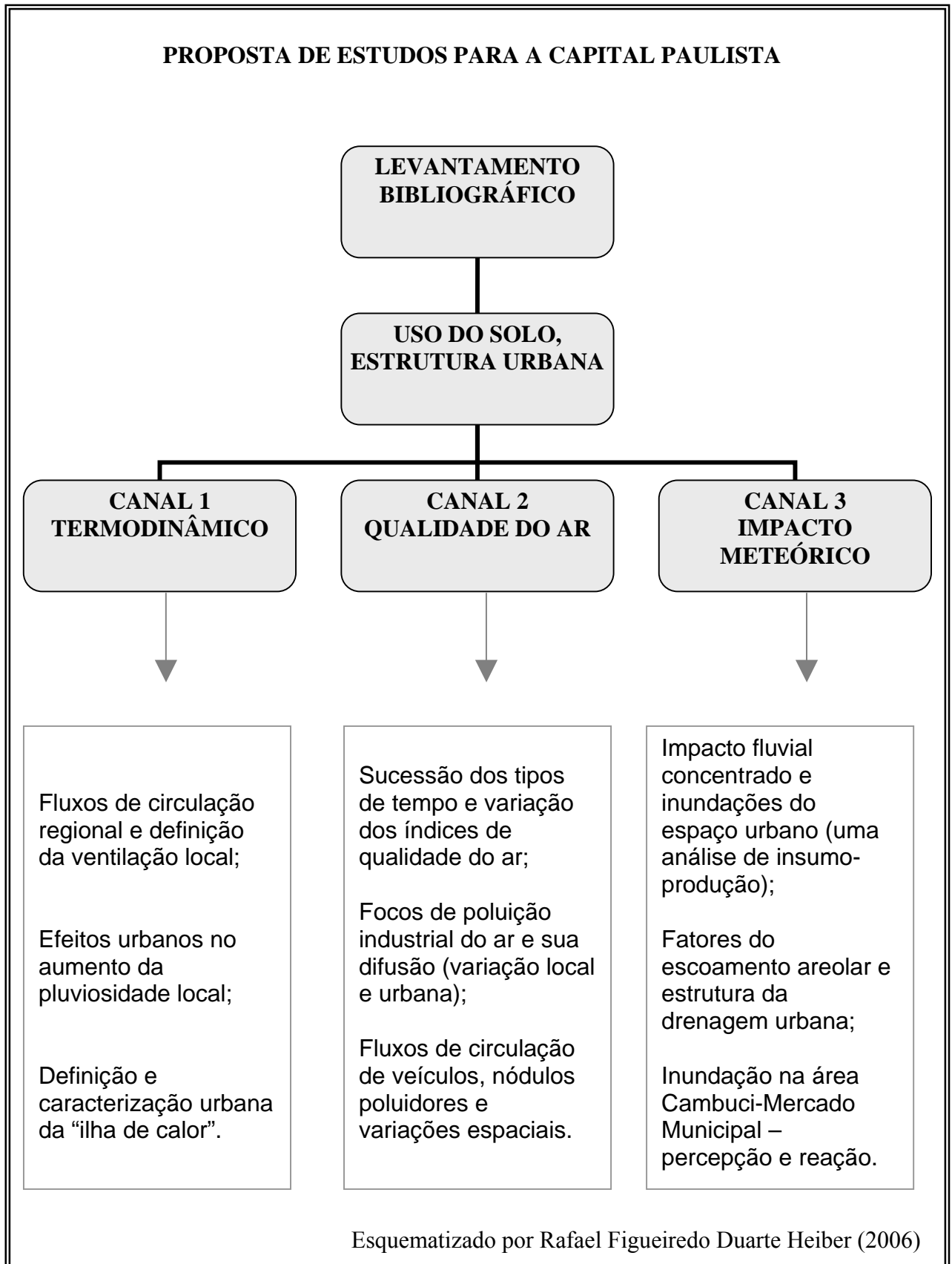


Figura 6. Esquematização das propostas de Monteiro (1976) para estudos na RMSF.

Moussipoulos (1996) afirma que o uso de modelagem pelos países europeus pretende alcançar a proposta de espacializar a distribuição de poluentes tanto no contexto episódico quanto na escala temporal com longa duração de altas concentrações, para comparação com os limites de manutenção da qualidade de ar definidos por análises toxicológicas. A aplicação de modelos em áreas urbanas deve levar em consideração as diretrizes político-ambientais locais para diminuição do *input* de poluentes na atmosfera, além de considerar os modelos matemáticos para os dados meteorológicos, topográficos e de poluentes. Por fim, há que se verificar os resultados do modelo tanto pela perspectiva quantitativa quanto pela perspectiva qualitativa.

Analyzing the potential for the practical use of air pollution models implies investigating what kind of statements can be made by the aid of models (qualitative approach) and what is the accuracy of these statements (quantitative approach). Apparently, the former approach is easier, because it does not require more than understanding the characteristics and the range of application of a model. For quantifying the accuracy of model results, insight is also needed into (i) input data accuracy and how the latter affects the accuracy of model results, (ii) uncertainties in model assumptions and parameterizations and (iii) methodologies for judging to what extent model results represent reality. (MOUSSIOPOULOS, 1996. p.47)

Dois estudos foram motivadores para a presente dissertação e embora as metodologias e as técnicas sejam diferentes daquelas aqui propostas, os resultados alcançados acentuaram o interesse pelo tema da poluição dos automóveis nas cidades. Um deles se refere ao transporte de poluentes sobre Lisboa, de Borrego et al (1994). O outro, analisa o comportamento do monóxido de carbono na cidade de Barcelona e é de autoria de Calbó et al (1996), que compararam os dados coletados em campo com os dados projetados pelo modelo meteorológico PROMETEO e pelo modelo de emissão de CO chamado EMITEMA-EIM. Três fatores importantes relacionados ao CO foram apontados por Calbó et al (1996): a principal fonte de emissão é o tráfego de veículos (99%); possui longa vida na atmosfera (não é fotoquímico nem secundário); serve como *tracer* da circulação regional, apontando a importância do padrão de circulação atmosférica para a poluição urbana.

Para o modelo PROMETEO dois dados foram imprescindíveis: a velocidade do vento geostrófico no nível atmosférico médio de 5000m e o perfil vertical (seco/úmido), ambos obtidos nas cartas sinóticas e sondagens verticais. Posteriormente, foram inseridos os

dados do EMITEMA-EIM e os resultados obtidos com a modelagem foram comparados aos outros, coletados em nove estações meteorológicas e em duas estações medidoras de CO, configurando uma distribuição insatisfatória tendo em vista a extensão da área de estudo (80km X 80km). A modelagem, próxima das condições reais verificadas, revelou, dentre outras coisas, a evolução temporal e as difusões vertical e horizontal do CO, mostrando, por exemplo, que a brisa marítima matinal ao adentrar o continente possui elevados níveis de CO, pois se trata de ar poluído levado do continente para o mar durante o período noturno anterior.

Além desses estudos citados, outros também são de amplo interesse e tratam da poluição de automóveis. Na Itália, Cernuschi et al (1996) utilizaram dados horários de concentração de monóxido de carbono no período de cinco anos em vinte e dois pontos de monitoramento da Região Metropolitana de Milão.

Sobre os poluentes secundários, Fast (1999) estudou o transporte de ozônio troposférico na bacia da Cidade do México em um período de quatro semanas do ano de 1997, tentando entender os fatores que provocavam altas quantidades de ozônio no ar. Utilizou modelagem que contemplava a característica química do ozônio, ou seja, quantidade de óxidos de nitrogênio no ar e condições térmicas e radiativas. Mediu perfis verticais de vento, temperatura e umidade em diversas localidades da bacia. Suas conclusões indicaram que padrões de recirculação são responsáveis pela alta poluição por ozônio.

Interestingly, layers of ozone are predicted to occur over the city on some days because of recirculation patterns within the basin. Early morning emissions advected to the south and west of the city by upslope flows are vented into the free atmosphere, advected back over the city by winds aloft, and entrained into the growing convective boundary layer during the afternoon. (FAST, 1999 p. 831)

Em São Paulo, Cardoso (1998) realizou estudo sobre a formação e transporte de ozônio em área que compreende a RMSP, Serra do Mar e Cubatão, utilizando modelagem euleriana para dispersão de poluentes desenvolvida no Carnegie Institute of Technology (CIT), comparando dados modelados aos dados reais medidos no período de 16 a 19 de fevereiro de 1989. Como resultado, constatou que as fontes localizadas em Cubatão influenciam a qualidade do ar na RMSP (Cardoso, 1998).

Borges (2003) considera que a dinâmica do ozônio tem sido explorada mais pelo viés da dispersão do que pelo viés físico-químico, que leva em conta formação e remoção dos

reagentes. Isto se deve à ausência ou raridade de dados tanto para os poluentes quanto para as fontes poluidoras. O autor ainda destaca o pouco conhecimento de circulações locais de ar como fator limitante na precisão de diagnósticos. Borges (2003) utilizou o modelo CIT em sua pesquisa, mesmo padrão de modelagem utilizado anteriormente no território paulista por Cardoso (1998), Ynoue (1999) e Martins (2002) e concluiu que os modelos ainda são comprometidos pelas imprecisões dos inventários de emissão e pela ausência de uma boa rede de medições.

O estudo de Alves (1996) traz a comparação entre dois diferentes modelos de dispersão de poluentes, sendo um deles gaussiano e outro não-gaussiano, aplicados à emissão de SO₂ pela usina termelétrica de Candiota-RS. Os resultados demonstraram que havia diferenças de resultados entre os dois modelos, principalmente quando as condições atmosféricas eram instáveis. Contudo, a ausência de redes de medições vertical e horizontal na área de estudo não permitiu à autora definir qual seria o modelo mais preciso. Posteriormente, Alves (2000), dispondo de dados de medição em campo para dados meteorológicos e toxicológicos, realizou novos estudos comparativos ampliando a gama de modelos a serem testados, concluindo que o modelo denominado RAMS (Regional Atmospheric Model System) mostrou resultados bastante próximos daqueles coletados em campo para as condições meteorológicas. Considerando os resultados de ambos estudos sobre fontes fixas de poluição, que não envolvem as variações e complexidades de registro de dados das fontes móveis, percebe-se a flexibilidade inerente dos diversos modelos de dispersão de poluentes atmosféricos, ao passo que suas utilizações podem trazer diagnósticos bastante imprecisos caso não passem por longo período de testes e comparações com os dados reais.

Os estudos de Carvalho (1996, 1999) também são exemplos de validação de modelos para dispersão de poluentes, agregando modelagem meteorológica em mesoescala ou escala regional a modelos de difusão e transporte de poluentes. Assim como no estudo de Alves (2000), o modelo RAMS produziu resultados satisfatórios para caracterizar as condições atmosféricas às quais o transporte dos poluentes é submetido.

Manfredini (1988), Sanchez-Ccoyllo (1998), Conde (2001) e Freitas (2003) estudaram a relação de sistemas sinóticos e altas concentrações de poluentes na RMSP. As maiores concentrações de poluentes atmosféricos foram detectadas sob domínio de sistemas anticiclônicos polares ou subtropicais continental e oceânico. Já os sistemas frontais favorecem situações de baixas concentrações de poluentes (Manfredini, 1988; Sanchez-Ccoyllo, 1998). Doenças respiratórias tendem a aumentar em dias com elevados índices de poluição do ar,

ausência de precipitação, diminuição da umidade do ar e diminuição da temperatura (Conde, 2001). Tais resultados corroboram estudos de Oke (1987), que afirma que condições favoráveis à dispersão de poluentes são normalmente intensos movimentos convectivos e advectivos, ampla camada de mistura (grande espessura da troposfera inferior), dia ensolarado, período diurno e verão. As condições adversas são encontradas na maioria das vezes no inverno e no período noturno, com fina camada de mistura, inversão e estabilidade associados à subsidência de ar frio quando há presença de um anticiclone, além de fracas dinâmicas horizontal e vertical na troposfera inferior (pouca turbulência de movimentos advectivos e convectivos).

Segundo Freitas (2003), sistemas de modelagem para qualidade do ar aplicados na RMSP não possuem grande precisão devido à complexidade da área com diversidade de fontes de poluição, grande influência das fontes móveis, heterogeneidade no uso do solo, topografia, presença de grandes reservatórios de água, entorno formado por montanhas, proximidade com o mar e formação de ilhas de calor.

A formação de ilhas de calor, apesar de ser produto do sub-sistema termodinâmico do SCU, influencia os sistemas físico-químico e hidrometeorológico. Assim, embora a poluição atmosférica pertença ao subsistema físico-químico (qualidade do ar), os outros subsistemas estão integrados na formação do grande sistema climático urbano, influenciando-se mutuamente.

O estudo de Lombardo (1985) sobre ilhas de calor na RMSP é referência substancial no estudo de clima urbano. A autora diz que:

A ilha de calor configura-se como fenômeno que associa os condicionantes derivados das ações antrópicas sobre o ambiente urbano, em termos de uso do solo e os condicionantes do meio físico e seus atributos geoecológicos. (LOMBARDO, 1985. p. 77)

Tanto o fenômeno de ilhas de calor como de poluição do ar, são causados por processos antropogênicos. Por um lado têm-se as construções e as modificações sobre a superfície urbana que aumentam a absorção de radiação e emissão de ondas em infravermelho. Por outro lado há a utilização de máquinas e equipamentos diversos que contribuem ora para aumentar o calor produzido nas cidades (condicionadores de ar,

aparelhos elétricos e eletrônicos, computadores etc), ora para emitir poluentes (construções, lixões etc), ora para ambos (indústrias e automóveis). Joseph (2005) estima que em média apenas 15% da gasolina serve para mover os carros e o restante produz calor, se perde na queima incompleta do combustível ou é utilizado de maneira não otimizada em momentos em que o carro está parado ou em processos de frenagens, situações constantes no trânsito urbano (informação verbal)³.

Fisicamente, *a poluição pode influir na absorção e reemissão da radiação na área ocupada pela cidade, ocasionando também um excedente de temperatura* (LOMBARDO, 1985. p.24), o que significa reemissão radiativa de ondas infravermelhas.

Algumas reações químicas de poluentes ativadas através de raios ultravioletas iniciam uma cadeia de reações que são potencializadas com aumento da radiação infravermelha:

Anthropogenic activity also causes chemical emissions (hydrocarbons, sulfur compounds, NO_x compounds, aerosols, etc.) in the atmosphere. Solar ultraviolet (UV) radiation dissociates and ionizes air pollutants. The resulting radicals and ions undergo chemical reactions in the atmosphere, producing many new species and enhancing naturally existing species (H₂O, CH₄, CO₂ etc.). The rates of chemical reactions with low activation energy barriers and the formation of aerosols absorb and re-emit radiation in the IR. Thus, heat radiation is trapped by urban air and creates a positive feedback on the heat island effect and on chemical pollution. (BOICE, HUEBNER e KILLEN, 1995. p 267).

Para poluentes primários, que não dependem de reações químicas, Freitas (2003) tentou encontrar correlações entre ilhas de calor e MP10 e CO na RMSP. Apesar dos resultados encontrados terem indicado que dias com intensa ocorrência das ilhas de calor foram dias bastante poluídos por MP10 e CO, as correlações estatísticas não foram suficientes para considerar a correlação direta entre ambos fenômenos: ilhas de calor e altos índices de poluição por MP10 e CO.

³ Henry Joseph, presidente da Comissão de Energia e Meio Ambiente em palestra no Seminário “Qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo” promovido pelo Idesa (Instituto de estudos sócio-ambientais) na FIESP, em São Paulo, no dia 07/04/2005.

1.5. Bases teórico-metodológicas.

O presente estudo possui suas bases teórico-metodológicas estabelecidas sobre três pilares principais: o paradigma do ritmo climático (MONTEIRO, 1969), o sistema climático urbano (MONTEIRO, 1976) e as escalas espaciais dos poluentes (BOUBEL et al, 1994)

Ao propormos um roteiro para o estudo da relação entre a poluição do ar e a sucessão de tipos de tempo, adotamos o conceito de Sorre (1951), para qual o clima é “a série de estados da atmosfera sobre um lugar, em sua sucessão habitual”. A partir desse conceito surge o paradigma do ritmo climático no Brasil. Monteiro (1969) explica, a seguir, a relação da sucessão de tipos de tempo e ritmo climático:

Acreditamos que a abordagem alcança o nível geográfico quando colocarmos a análise dos tipos de tempo em seqüência contínua. Apesar das diferentes escalas de tempo ou espaço - desde a análise comparativa de vários anos tomados como padrões representativos da circulação de um continente, nas variações sazonais, dentro de um ou alguns anos numa região, até a análise episódica de um fenômeno local - será necessária a continuidade da seqüência. Por coerência com a noção de “sucessão” de que se reveste o caráter geográfico do clima. Porque só o encadeamento dos estados atmosféricos mostra os “tipos” esquematizados na análise meteorológica precedente, em suas perspectivas reais, revestidos de suas infinitas gradações e facetas. Também é pela sucessão que se percebem as diferentes combinações dos elementos climáticos entre si e suas relações com os demais elementos do quadro geográfico. É a seqüência que conduz ao ritmo, e o ritmo é a essência da análise rítmica (MONTEIRO, 1969 apud ZAVATTINI, 2004 p.22)

A prática da análise rítmica acaba por privilegiar estudo dos picos temporais de má qualidade do ar (ZAVATTINI, 2004. p.161-162) quando os mesmos são vistos em seqüência contínua com os períodos que se encadeiam e propiciam o ápice e a queda da poluição. A dinâmica da poluição se dá em escalas horária e diária, observando-se determinados horários e dias em que ela é maior ou menor. Com o uso do paradigma rítmico deve-se respeitar tal dinâmica, até que sejam compreendidos os encadeamentos dos tipos de tempo diários relacionados à dinâmica da poluição.

Além do conceito do ritmo e da prática da análise rítmica como o fio condutor da pesquisa, não é menos importante a perspectiva sistêmica adotada por Monteiro (1976) no estudo do clima urbano.

De acordo com o SCU, no subsistema físico-químico, a atmosfera recebe *input* de substâncias – os poluentes – de fontes fixas ou móveis das atividades antrópicas. Estes, por sua vez, transitam no sistema aberto do clima urbano, onde há troca de matéria e energia, no sentido de operando a operador, difundindo-se do núcleo ao ambiente, misturando-se na troposfera inferior sobre a área urbana, onde se localizam as fontes poluidoras. A remoção dos poluentes acumulados depende dos estados atmosféricos, que podem ser favoráveis à dispersão da poluição quando há intensos movimentos advectivos (dinâmica horizontal) e convectivos (dinâmica vertical), ou desfavoráveis quando há estabilidade atmosférica. Além da remoção dos poluentes, a qualidade do ar é beneficiada ou prejudicada por situações em que há expansão ou retração da troposfera inferior, um processo no SCU que envolve basicamente trocas de energia e não de matéria.

Assim, em dado lugar, episódios de altos índices de poluição podem ocorrer com duas condições: uma seria aquela em que a emissão de poluentes seja excepcionalmente elevada, e a outra em que a sucessão de tipos de tempo seja excepcionalmente prejudicial à dispersão da poluição produzida na metrópole. Ambas situações remetem ao conceito de ritmo, na climatologia e nas atividades antrópicas, em que o excepcional representa uma anomalia ou disformidade.

Os invernos de 2001 a 2004 na RMSP, foram propositadamente escolhidos porque o inverno representa o período do ano em que os estados atmosféricos são os mais prejudiciais à qualidade do ar e porque os referidos anos tiveram volume semelhante de emissões dos poluentes, segundo a CETESB (2005). Nesta perspectiva, os episódios de elevada poluição por fontes móveis na RMSP estão mais associados às sucessões de tipos de tempo do que a excepcionais emissões por parte dos veículos automotores.

O fator do ritmo antrópico foi considerado nas análises dos gráficos de poluentes construídos com dados horários nos quatro invernos, identificando-se os finais de semana e os dias comerciais, com o intuito de verificar o comportamento nas escalas horária e diária dos poluentes ao longo do período. Em seguida, foram definidos os episódios de grande poluição com uso de gráficos padronizados, compostos por dados diários dos poluentes, alcançados pelo cálculo da média dos dados horários em cada um dos dias.

Os episódios selecionados foram compostos por dias que antecedem e que sucedem os dias em que pelo menos um dos poluentes tenha atingido valor máximo no gráfico padronizado de cada inverno para os quatro poluentes, ou seja, cada episódio abarca o período de elevação, ápice e queda dos poluentes. Quando houve falta de dados para algum dos poluentes, o episódio foi descartado. O mesmo não aconteceu nos casos em que dois ou três poluentes atingiram a escala de valor máximo no gráfico padronizado.

Apenas após o prévio estudo dos poluentes, seleção de episódios e de considerações a respeito da área de estudo e de seu clima urbano, a análise rítmica em escala diária foi efetuada, a partir da construção e leitura dos gráficos de análise rítmica e articulação com a revisão bibliográfica e com o arcabouço teórico adquirido.

Tratando-se de uma grande área urbana e as condições climáticas sobre ela estabelecidas, ao estudo a poluição atmosférica dentro Região Metropolitana de São Paulo é necessário considerar a influência dos poluentes no sistema climático urbano em diferentes escalas espaciais, desde a escala do ponto de medição até a escala que extravasa a mancha urbana, a escala regional.

Tome-se um “clima urbano” por exemplo, uma antropização considerável de um clima local, e encontrar-se-á, nele embutidas (como a bonequinha russa ou o copo-de-escoteiro) todas as escalas que lhe são superiores. Mesmo em uma sondagem “episódica” que se lhe aplique, será necessário levar em conta as componentes locais alteradas pelas variáveis da urbanização, bem como aquelas componentes da circulação (regional) e aquelas específicas de sua situação no globo (zonal). (MONTEIRO, 1991. p. 131)

A citação anterior explicita o caráter complexo do estudo do clima urbano e indica a necessidade da flexibilidade e variação de escalas para entendimento do fenômeno. Segundo Boubel et al (1994), o estudo de poluição atmosférica envolve cinco escalas espaciais: local, urbana, regional, continental e global.

A escala local tem raio de abrangência de 5km e é caracterizada por uma ou mais fontes fixas de poluição no nível do solo, ou vários pequenos emissores móveis (veículos automotores, por exemplo). Um dos fenômenos percebidos nessa escala é a concentração de monóxido de carbono nas vias de trânsito. Condições meteorológicas desfavoráveis podem fazer com que indústrias que emitem seus poluentes através de altas chaminés sejam responsáveis por poluição também no nível local.

A escala urbana se estende até 50km de raio e está relacionada a poluentes primários e poluentes secundários. Poluentes como CO e MP10 que relativamente não reagem quimicamente são favorecidos ao alcance de altos níveis de concentração, principalmente em cruzamentos de grandes e movimentadas avenidas cercadas por altos prédios. Em áreas metropolitanas, poluentes secundários como ozônio costumam ser o maior problema enfrentado. As reações catalisadas pela radiação solar ultravioleta entre hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio formam esse poluente, o ozônio em nível troposférico, causando distúrbios à vida e prejuízos à saúde da população.

O nível regional possui escala que vai de 50km a 500km de raio e seus problemas são basicamente o transporte de poluentes das áreas metropolitanas para o entorno, ou pior, a agregação de poluição em uma área metropolitana que recebe a poluição de outra área metropolitana quando vizinhas. Os poluentes secundários, como ozônio, são as principais preocupações também nesses casos. Os poluentes primários que podem ser considerados mais relevantes nessa escala são os emitidos por indústrias, principalmente óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio. Normalmente esses poluentes são extraídos da atmosfera na formação de nuvens, sendo eles os núcleos de condensação, ou mesmo através das gotas de chuva ao caírem. Esse processo resulta em chuvas ácidas, que traz prejuízos à população e às estruturas urbanas. O dióxido de enxofre é uma substância muito comum na causa desse tipo de chuvas.

Outro problema no nível regional é a formação de nevoeiros graças aos elementos químicos e o material particulado que constituem poluição quando em excesso. Além de problemas à saúde há também prejuízos quanto à perspectiva cênica, principalmente quando se trata de um lugar turístico.

As escalas continental (>500km) e global são focalizadas principalmente quando os problemas de poluição dizem respeito ao transporte de poluentes causadores de chuvas ácidas (fato famoso na Europa) ou emissão de clorofluorcarbonos que fragilizam a camada protetora de ozônio.

O caso da poluição por veículos automotores na RMSP, com os dados diários do Ibirapuera, envolve diretamente as escalas local, urbana e regional. A escala local é referente à estação de coleta de dados, seu entorno e sua situação geográfica dentro da área metropolitana. A escala urbana é aquela da metrópole como grande espaço modificador do clima, seja pelas emissões de poluentes, seja pela urbanização que transforma o balanço de energia. Tanto as escalas local e urbana são condizentes aos poluentes primários gerados

pelos veículos automotores. A escala regional, por fim, é a escala necessária para identificar o transporte de poluentes de outras áreas densamente urbanizadas e/ou industrializadas. Corresponde a Cubatão e a Baixada Santista em relação à RMSP quanto ao transporte de poluentes precursores do O₃, emitidos por complexos industriais.

Segundo estudos de caracterização da estação Ibirapuera⁴ (CETESB, 2004b), a representatividade de suas medições do monóxido de carbono estão mais relacionadas às condições meteorológicas sobre a RMSP do que em relação à proximidade das fontes de poluição. Tal conclusão foi resultado da comparação do episódio mais agudo de poluição do ano de 2002, nos dias 24 e 25 de julho⁵, medido na estação Ibirapuera, com os dados da estação São Caetano do Sul, que possui características bastante diferentes da primeira, constatando-se que em ambas o comportamento da poluição foi bastante semelhante. Da mesma maneira o NO₂ também foi considerado poluente de escala urbana, de acordo com Boubel et al (1994), contudo suas concentrações não são exclusivamente relacionadas às condições meteorológicas por causa de sua participação no ciclo fotolítico do ozônio, o que altera suas concentrações na atmosfera. O ozônio, por sua vez, é transportado de áreas afastadas da estação e, em dias quentes e com bastante radiação solar, alcança altas concentrações. No caso do MP10, constatou-se que tanto as condições atmosféricas adversas à dispersão de poluentes quanto o aumento das atividades de lazer dentro do Parque do Ibirapuera elevam as concentrações do poluente nas medições da estação, tratando-se de um poluente cujos dados sofrem interferências locais e urbanas.

Assim, apesar da presente metodologia não contemplar a espacialização ou o mapeamento da poluição por veículos automotores dentro da área metropolitana porque só utiliza um ponto de medição, a análise da poluição não se restringe apenas à pequena área da estação Ibirapuera, visto que seus dados diários⁶ refletem a poluição produzida ao longo do dia nas vias e diluída no ar do ambiente urbano, cujas concentrações aumentam ou diminuem de acordo com os tipos de tempo atuantes sobre a RMSP. A partir dos resultados alcançados com a aplicação do roteiro metodológico, poderemos ainda compará-los às informações que constituem o relatório de caracterização da estação Ibirapuera, reforçando a validade desse roteiro e mostrando, também, as suas deficiências.

⁴ Com médias horárias da série completa dos dados de 1997 a 2002, a CETESB identificou os comportamentos horário e diário dos poluentes medidos pela estação.

⁵ Episódio também analisado com a aplicação de nosso roteiro metodológico.

⁶ Dados horários por nós tratados estatisticamente e transformados em dados diários.

1.6. Material e técnicas.

Os materiais utilizados para a presente pesquisa fornecem subsídios para o entendimento da poluição pelas fontes móveis medidas na estação Ibirapuera, no centro da RMSP e a influência da sucessão dos tipos de tempo nos episódios de maior poluição na escala diária nos invernos de 2001 a 2004.

Para análise da poluição do ar causada por veículos automotores, foram utilizados dados horários de concentração dos poluentes CO, NO₂, MP10 e O₃ da estação Ibirapuera para os invernos de 2001, 2002, 2003 e 2004. Esses dados permitem analisar o comportamento de cada poluente em escalas temporais diversas: horária, diária, semanal, mensal e sazonal (do inverno). A validação espacial dos dados depende de três fatores principais: características do local em que a estação está instalada, as fontes emissoras e as peculiaridades de cada poluente. Por essa razão, observações de campo acompanhadas por fotografias também fazem parte do rol de materiais utilizados.

Após a análise do comportamento horário dos poluentes, os dados horários receberam tratamento estatístico e foram transformados em dados diários, o que possibilitou a inserção dos mesmos nos gráficos de análise rítmica, técnica utilizada para analisar a sucessão dos tipos de tempo e a poluição em episódios de má qualidade do ar.

Os dados meteorológicos de superfície para definição de tipos de tempo são provenientes do Aeroporto de Congonhas, cuja estação respeita todos os critérios para medição, e foram fornecidos pelo Comando da Aeronáutica (Diretoria de Proteção ao Voo - Divisão de Meteorologia da Aeronáutica). Os seguintes dados diários foram coletados: temperatura (média de bulbo seco, máxima e mínima), umidade relativa média, pressão (média, máxima e mínima), velocidade máxima e direção de vento e precipitação (total e duração). Como complemento à série de Congonhas, a estação Ibirapuera foi fonte dos seguintes dados em escala horária: radiação, direção de ventos, umidade relativa e temperatura. Os dados horários de direção de ventos foram trabalhados estatisticamente e se tornaram complementares aos dados de Congonhas, indicando a representatividade de cada direção na escala diária. Os outros dados meteorológicos do Ibirapuera também receberam tratamentos estatísticos e geraram dados diários para a composição dos gráficos de análise rítmica. Embora a estação do Ibirapuera não seja fonte adequada à coleta dos dados meteorológicos por causa das árvores nas proximidades dos aparelhos medidores, suas

informações contribuíram para a análise rítmica, na tentativa de reduzir a falta de dados não fornecidos pela Divisão de Meteorologia da Aeronáutica.

Além dos dados meteorológicos supracitados, os gráficos de análise rítmica dos episódios de grande poluição indicam a condição sinótica na RMSP a partir da leitura de duas imagens diárias dos satélites GOES ou Meteosat, 00:00GMT e 12:00GMT, da América do Sul, que permitiram observar a dinâmica de massas de ar sobre a área e são essenciais à definição de tipos de tempo.

Por fim, a base cartográfica foi feita a partir de imagens do LANDSAT de 2001, associadas às imagens disponibilizadas pelo Google Earth⁷. Os produtos cartográficos ilustram a situação da estação Ibirapuera tanto em relação ao Parque Ibirapuera e seu entorno quanto em relação à grande mancha urbana.

Finalizada a descrição dos materiais utilizados, passamos ao roteiro metodológico.

1.7. Roteiro metodológico.

O roteiro metodológico que apresentamos para o estudo da relação entre poluição atmosférica por veículos automotores e sucessão de tipos de tempo em áreas metropolitanas, iniciou-se com a definição do problema da poluição.

Depois de definido o problema, foi feito o levantamento bibliográfico para analisar as fontes de dados e a rede de medição, caracterizar os poluentes e avaliar a produção científica no campo de estudo. A partir da revisão bibliográfica pôde-se determinar o arcabouço teórico-metodológico, baseado em Monteiro (1969, 1976a, 1991), autor que propôs o paradigma do ritmo e o Sistema Clima Urbano, e em Boubel et al (1994), cuja fundamentação sobre poluição do ar e suas escalas de influência foi adotada. Nesta fase de estruturação do arcabouço teórico-metodológico, tem-se a oportunidade de hipotetização factual, caso seja de interesse dos pesquisadores que venham a adotar o roteiro.

⁷ Acesso ao software Google Earth em setembro de 2005.

As escolhas do período a ser estudado e da estação de medição deram seqüência ao roteiro. Estas escolhas estão diretamente ligadas à revisão bibliográfica e ao arcabouço teórico e são os últimos passos que precedem a coleta dos dados.

A coleta de dados é a parte mais delicada da pesquisa, pois a burocracia no fornecimento dos mesmos pelas instituições responsáveis pelas medições podem atrasar e até mesmo inviabilizar toda a pesquisa. No caso dos dados dos invernos de 2001 a 2004, a liberação gratuita pela CETESB foi concretizada apenas oito meses após o primeiro pedido.

O roteiro seguiu com a caracterização da área de estudo, o que inclui trabalhos de campo, levantamento de base cartográfica, identificação das fontes de emissão de poluentes e qualidade das medições na estação de coleta de dados. Trata-se de uma fase em que uma das maiores preocupações é a validação de escalas espaciais em relação às medições dos poluentes.

Na etapa seguinte já iniciamos trabalho com os dados. Primeiramente foram analisados os dados horários dos poluentes com a finalidade de identificar, principalmente, os seus ritmos horário e diário. Logo após iniciamos o tratamento dos dados horários, transformando-os em dados diários por média estatística e submetendo-os à técnica de padronização estatística para que os episódios de grande poluição fossem selecionados.

Com a definição dos episódios, elaboramos os gráficos de análise rítmica para os mesmos. Tais gráficos foram compostos tanto pelos dados de poluentes quanto de dados meteorológicos, todos em escala diária. Para a RMSP, nos invernos de 2001 a 2004, selecionamos dez episódios que foram analisados com os gráficos de análise rítmica, o que permitiu a definição dos tipos de tempo atmosféricos e suas influências sobre a concentração dos poluentes CO, MP10, NO₂ e O₃.

Ao final do roteiro, consideramos importante a avaliação dos resultados em relação ao arcabouço teórico adotado, verificando a validação da técnica e a consistência das análises. Assim, as etapas ficaram organizadas da seguinte forma: a) definição do problema; b) levantamento bibliográfico; c) arcabouço teórico-metodológico; d) escolha do período; e) escolha da estação; f) coleta de dados; g) caracterização da área de estudo; h) análise do ritmo dos poluentes; i) tratamento dos dados; j) escolha dos episódios; l) análise rítmica; m) definição dos tipos de tempo e influência sobre a poluição por veículos automotores; n) validação dos resultados de acordo com arcabouço teórico e/ou alguma hipótese estabelecida após a etapa “c”.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. A RMSP e o município de São Paulo.

A Região Metropolitana de São Paulo está localizada na latitude do Trópico de Capricórnio, na porção oriental do Estado de São Paulo (Figura 7). Possui área de 8.051km² (0,1% do território nacional), população de aproximadamente 18 milhões de habitantes (10% da população brasileira) e PIB superior a U\$ 100 bilhões (aproximadamente 20% do PIB nacional).

No centro-sul da grande mancha urbana metropolitana, encontra-se o município de São Paulo, o mais importante da RMSP, com maior extensão e maior densidade de urbanização. No município paulistano estão os locais de maior circulação de pessoas e veículos de toda RMSP, resultado de variáveis econômicas, demográficas, históricas e urbanas que exercem força de atração à população que vive nas periferias. A população do município se aproxima dos 11 milhões habitantes, segundo dados do SEADE⁸.

O sítio urbano da RMSP se encontra na Bacia Sedimentar de São Paulo e no Planalto Paulistano, cujo principal vale é o do Rio Tietê, orientado no sentido leste-oeste, com altitudes que variam entre 720m a 850m e uma extensa planície de inundação. O entorno da bacia tem a Serra da Cantareira ao norte, cujas altitudes atingem 1.200m, e o reverso da Serra do Mar ao leste e ao sul, com altitudes que, em geral, são superiores a 800 metros. O oceano Atlântico fica a sudeste, distante 45km em linha reta, tendo como obstáculo natural exatamente a Serra do Mar.

As feições geomorfológicas da área mais verticalizada e urbanizada, que corresponde à cidade de São Paulo, são destacadas a seguir:

É, sobretudo entre as várzeas do Tietê e do Pinheiros que se assenta a cidade, em terraços, patamares e colinas de altitudes variadas, cujo espigão divisor corresponde à Avenida Paulista, prolongando-se até a Vila Mariana-Jabaquara. (AB'SABER, 1956 apud TARIFA 1977).

⁸ www.seade.gov.br > Acesso em maio de 2005.

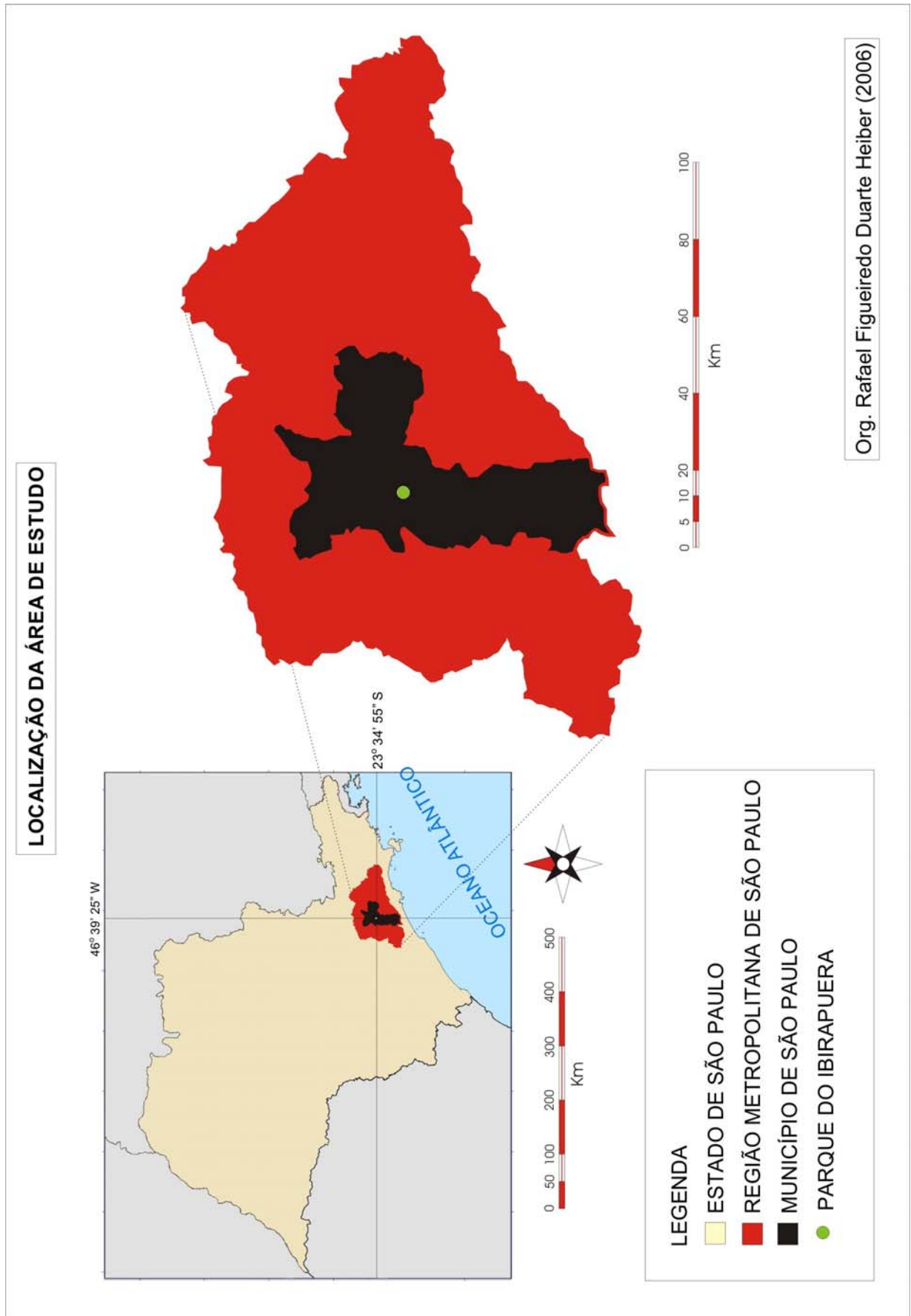


Figura 7. Mapa de localização da área de estudo.

No Estado de São Paulo, o clima depende primeiramente da dinâmica atmosférica, ou mecanismos de circulação regional. Tais mecanismos são diretamente responsáveis pelo regime pluviométrico e pelo balanço de energia solar incidente na superfície, identificando-se na relação entre nebulosidade e insolação efetiva. A definição de diferentes áreas climáticas em nível regional dentro do Estado de São Paulo se dá principalmente pelo cruzamento da dinâmica atmosférica e compartimentos geomorfológicos, o que se expressa em valores concretos de intensidade e frequência dos atributos climáticos. Entretanto, em graus inferiores de taxonomia, como a RMSP, por exemplo, a definição exige a compreensão dos graus superiores (continental, zonal e regional) associados a elementos ecológicos e antrópicos locais, urbanos e regionais (MONTEIRO, 1976b). Segue-se que:

O problema paulista avulta especialmente ao nível metropolitano, já que a cidade de São Paulo passou a se destacar, nos últimos anos, pela crescente intensidade de seus índices de poluição ambiente, notadamente atmosférica. Seu sítio de bacia intraplanáltica é de modo a anexar os componentes urbanos ao quadro geoecológico peculiar, definindo condições bem expressivas de um clima urbano. Não obstante a relativa variabilidade dos ventos, consoante a mutabilidade dos estados atmosféricos (aspectos positivos do seu enquadramento regional), a definição do clima urbano paulistano vem se caracterizando, sobretudo, pelos aspectos negativos da qualidade do ar (MONTEIRO, 1976b. p.40).

A localização latitudinal da RMSP, na linha do Trópico de Capricórnio, e a situação topográfica da Bacia Paulistana junto ao Planalto Atlântico, climatologicamente identificada por diminuição da pluviosidade na bacia em relação ao planalto, é um cenário de transição entre dominância das massas Tropicais (Atlântica e Continental) e Polar Atlântica (MONTEIRO, 2000). Duas estações predominantes podem ser definidas nessa área transicional: uma estação chuvosa que compreende, normalmente, o período de outubro a março, e uma estação seca, de abril a setembro.

A estação chuvosa é influenciada pelo aquecimento continental associado à convecção tropical, sistemas extratropicais formadores de frentes frias e áreas de instabilidade continental, favorecendo a ocorrência de chuvas abundantes.

Na estação seca, o clima é predominantemente influenciado pela passagem rápida de frentes frias geradas pelo avanço dos sistemas anticiclônicos polares. Essa estação é

caracterizada não só pela diminuição da precipitação, mas também pela diminuição das temperaturas no continente e no oceano que propiciam a ocorrência de períodos de grande estabilidade atmosférica, condições prejudiciais à dispersão de poluentes na RMSP.

A topografia e a brisa marítima, intrinsecamente associada à temperatura da superfície do mar na região costeira, influenciam diretamente a circulação local do ar na área metropolitana (OLIVEIRA-CARDOSO, 2001). Freitas (2003) inclui ainda o fenômeno metropolitano das transformações espaciais como influência na circulação local. Além das condições naturais, o clima da RMSP é influenciado pela enorme área urbanizada.

Imagens Landsat 7 permitiram aferir que as áreas altamente verticalizadas passaram a produzir efeitos contrários àqueles definidos pelo desenvolvimento de ilhas de calor em centros urbanos. Isso porque grandes áreas sombreadas foram formadas pelo grande conjunto de arranha-céus, a ponto de “compensar” a grande absorção de radiação e emissão de calor em ondas de infravermelho pelo concreto urbano (TARIFA; AZEVEDO, 2001).

O fenômeno metropolitano extravasa o nível local abrangendo o sub-regional, envolvendo e transportando energia e poluentes de sua atmosfera urbana para outras áreas da Bacia do Alto Tietê. Climas urbanos, como o da metrópole paulistana, por exemplo, não são vistos somente como processos físicos, mas como interações existentes nas práticas sociais vigentes no cotidiano da sociedade urbana instalada sobre o compartimento geocológico, definido pela associação das características geológicas, geomorfológicas, climáticas e ecológicas (TARIFA; ARMANI, 2000).

Assim, a circulação local é caracterizada por brisas marítimas lacustres e terrestres, por sotaventos e barlaventos resultantes da topografia, e por ilhas de calor geradas pela diversidade de tipos de uso e ocupação do solo (FREITAS, 2003). As brisas ocorrem por causa da diferença de albedo e da capacidade térmica das superfícies atingidas pela radiação solar. As grandes superfícies cobertas de água possuem resposta mais lenta quanto ao processo de absorção de radiação e emissão de infravermelho, ocorrendo o contrário nas áreas urbanizadas. Dessa maneira, durante os períodos matutino e vespertino, as superfícies cobertas pelo tecido urbano tendem a ser mais quentes, provocando movimentos convectivos, que por sua vez, iniciam processos de advecção de ar, chamados de brisas, que representam o deslocamento do ar que estava sobre as superfícies cobertas por água, mais frias. Durante o período noturno, o inverso ocorre, dando origem às brisas de terra. No caso da RMSP, a brisa marítima tem papel importante na dispersão de poluentes. Localizada próxima do Oceano

Atlântico, as brisas marítimas de leste e sudeste removem parte do ar poluído da RMSP, dispersando-o para áreas vizinhas.

A topografia da RMSP intensifica a atuação da brisa marítima. A presença da escarpa da Serra do Mar agiliza em cerca de três horas a chegada de tal brisa à área metropolitana. Da mesma maneira, a presença da Serra da Cantareira facilita a penetração da brisa. Porém, a grande área urbanizada na área central da cidade de São Paulo gera grandes ilhas de calor que se tornam obstáculos para que brisa marítima alcance a porção norte da RMSP (Freitas, 2003).

Segundo Oliveira-Cardoso (2001), o inverno na RMSP é diretamente influenciado pela intensidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul⁹, sistemas frontais, ciclogêneses, temperatura da superfície do mar, El Niño e bloqueios atmosféricos¹⁰. Estes elementos e fenômenos dinâmicos de grande escala causam reflexos urbanos e locais, favorecendo ou desfavorecendo a manutenção da qualidade do ar e evidenciando a importância da climatologia dinâmica nos estudos urbanos de poluição do ar.

De acordo com Manfredini (1989), frente fria ou semi-estacionária no Sul do Brasil, anticiclone subtropical sobre o Atlântico com subsidência influenciando a RMSP, ausência de precipitação, ventos fracos predominantemente de noroeste e cerca de 70% de calmarias, costumam ser prenúncio de episódios críticos de poluição que ocorrem em até 24 horas após as condições atmosféricas relatadas.

Além das condições que prejudicam a dispersão dos poluentes na RMSP, há o problema da poluição causada pelo transporte de poluentes de outras áreas. Sanchez-Ccoyllo (2002) afirma que poluentes industriais emitidos em Cubatão e São Caetano do Sul podem ser transportados para o centro da RMSP sob influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul. A RMSP pode também ser afetada pelos poluentes derivados das queimadas do interior do Estado de São Paulo quando as trajetórias de parcelas de ar são de noroeste. Os ventos de norte ou noroeste, predominantes nos invernos da Região Metropolitana de São Paulo, influenciam a importação de poluentes atmosféricos produzidos por queimadas de biomassa no interior do Estado de São Paulo (OLIVEIRA-CARDOSO, 2001).

⁹ Referente ao Anticiclone Polar e a ação da Massa Polar Atlântica, na linguagem empregada pela climatologia geográfica.

¹⁰ Bloqueios atmosféricos definidos como sistemas dinâmicos, porém estacionários, que duram alguns dias, ocorrendo desvios da corrente de vento de oeste com sua própria estrutura incluída.

Para a poluição produzida pelos veículos automotores dentro da RMSP, em alguns períodos a qualidade do ar é afetada negativamente com maior intensidade em razão do ritmo antrópico e do balanço de energia diário. Os grandes congestionamentos de automóveis na RMSP que ocorrem nas manhãs e noites coincidem com momentos em que a troposfera inferior não está expandida devido à perda de calor e energia, o que concentra mais os poluentes. Desse modo, é comum verificar más condições da qualidade do ar nestes períodos. A espessura da troposfera inferior pode variar de 100 metros, durante madrugadas, até 3000 metros, geralmente durante o período vespertino, sendo que durante os invernos, esta camada de ar não se expande nas mesmas proporções de primavera-verão (FREITAS, 2003).

Maia (2003) afirma que na RMSP, os poluentes primários atingem seus mais altos índices durante o inverno. O ozônio não possui um padrão sazonal que defina claramente quando ocorrem as maiores concentrações, pois, enquanto no período de primavera-verão há maior abundância de incidência radiativa solar potencializando a formação do poluente secundário, no outono-inverno as inversões térmicas e a diminuição da troposfera inferior concentram os poluentes precursores do mesmo.

Considerando a complexidade apresentada, a área de estudo é vista não apenas sob a perspectiva da grande mancha urbana da RMSP, mas também da variação de escalas de acordo com a localização dos sensores de medição dos poluentes. Contudo, a realidade urbana não possui rigidez na delimitação de escalas e suas respectivas áreas. Para Monteiro (1976), a flexibilidade espacial é um dos principais critérios a serem praticados no estudo do SCU.

2.2. A estação Ibirapuera e seu entorno.

A estação Ibirapuera, ponto de medição dos poluentes, está localizada no Parque do Ibirapuera, que por sua vez se encontra na área mais urbanizada da capital paulista (Figura 8), caracterizada pelo grande volume de automóveis que circulam por grandes avenidas (dos Bandeirantes, do Estado, Marginais etc.): um volume diário de aproximadamente 1.200.000 veículos. As vias internas e avenidas costumam apresentar tráfego intenso e lento. Outra característica dessa área altamente urbanizada é a presença de bairros verdes (Pacaembu, Alto da Lapa, Pinheiros, Jardins, Moema, Parque do Ibirapuera e Brooklin) e bairros extremamente verticalizados (Centro, Liberdade, Vergueiro, Consolação, Santa Cecília, Perdizes, Vila Mariana, Jabaquara, parte de Moema etc.).

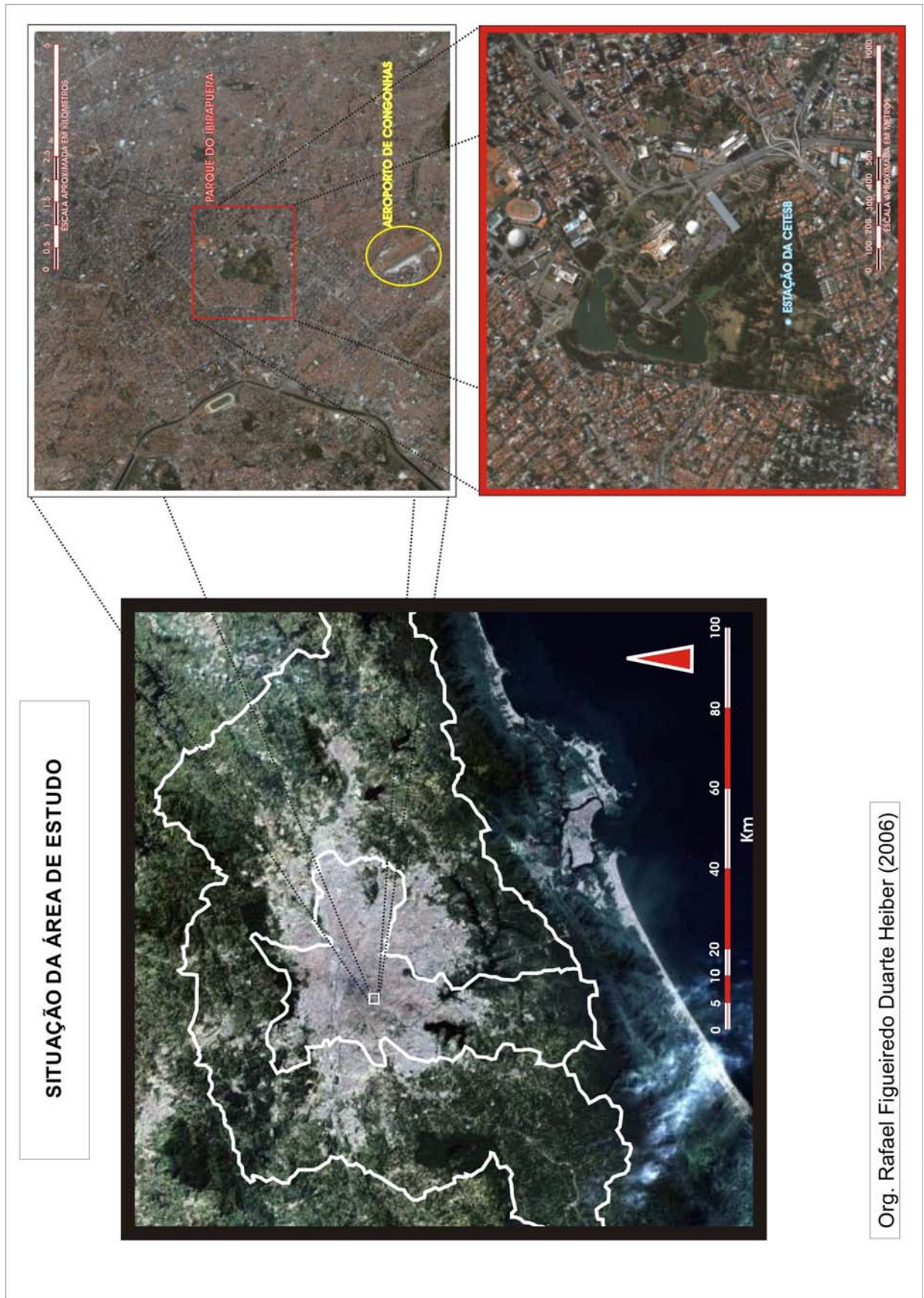


Figura 8. A área de estudo em diferentes escalas: do geral ao particular.

A estação Ibirapuera possui as seguintes características:

- Endereço: Av. Manoel da Nóbrega, n. 1985, Parque do Ibirapuera – Setor 25
- Coordenadas: Lat. 23° 34' 55" S UTM (23K) 330 592
Long. 46° 39' 25" W UTM (23K) 7 390 026
- Altitude: 750m
- Altura de captação da amostra: 3,5m
- Altura do anemômetro: 10m
- Está localizada no centro da mancha urbana da RMSP, ponto privilegiado para inferências não apenas locais, mas urbanas;
- Não sofre influência direta de poluição industrial pois fontes fixas emissoras de poluentes estão instaladas em outras partes da região metropolitana. Assim, sua medição é primordialmente dos elementos emitidos por automóveis;
- A estação não está localizada ao lado de nenhuma via de circulação, o que refletiria um padrão de comportamento em escala local dos poluentes emitidos na via (rua ou avenida).
- É uma das duas estações completas para monitoramento de qualidade do ar pela CETESB. A outra é a estação São Caetano do Sul, que, no entanto, recebe maior influência de poluição industrial;
- Está próxima ao Aeroporto de Congonhas, local de coleta dos dados meteorológicos mais precisos para a área de estudo. Ressalta-se a boa localização do aeroporto em relação à mancha urbana. Além de estar no centro da área em estudo, encontra-se em lugar alto (boa visibilidade para análise de nuvens, ausência de obstáculos aos ventos etc.), satisfazendo amplamente as necessidades de dados de superfície para definição de tipos de tempo na RMSP.

A figura 9 ilustra a situação da estação de medição em relação ao seu entorno imediato (fotografias 1 a 5) e ao entorno do Parque do Ibirapuera (fotografias 6 a 8).

A coleta de dados meteorológicos é prejudicada por árvores próximas à estação (fotografias 1 a 5). Elas impedem a passagem livre dos ventos e produzem sombras em alguns períodos do dia. Na face norte esse problema é mais intenso, pois há um conjunto de árvores

com menos de 10 metros de distância da sonda de amostragem. Na face oeste há árvores de copas mais densas, com 5 metros de altura, a 40 metros da estação, e árvores menores, com 2 metros de altura, a 15 metros da estação. Na face sul há um campo de futebol com piso de terra batida, a menos de 30 metros de distância e árvores pequenas próximas ao campo de futebol. Estas condições impedem o uso exclusivo dos dados meteorológicos desta estação, comprometidos principalmente pela situação da face norte, havendo a necessidade de uso dos dados do Aeroporto de Congonhas. A CETESB também constata que:

A análise feita com base na localização das fontes, da direção e velocidade do vento e das concentrações observadas na estação mostrou que o vento é um parâmetro útil para identificação das fontes responsáveis pela poluição medida. No entanto, observou-se, sobretudo nas faces norte e oeste da estação, a existência de árvores que devem comprometer em parte os dados de vento medidos a 10m e de poluição quando o vento sopra dessas direções. Os demais parâmetros meteorológicos medidos, exceto radiação, não são muito influenciados por anteparos, estando o local atual adequado ao seu monitoramento. (CETESB, 2004b, p.65)

Considerada a localização e a situação da estação, percebe-se que suas medições de poluentes não refletem a emissão em tempo real nas vias. A poluição é detectada com momentos de atraso, com os poluentes já misturados na troposfera inferior, sendo estes momentos condicionados às sucessões de tipos de tempo. Seguindo-se que:

Devem ser destacadas as diferenças observadas para cada um dos poluentes, que se traduzem muitas vezes em casos particulares em termos de abrangência espacial. Portanto, as concentrações de CO [...] detectadas na estação, que provêm de fontes localizadas nas proximidades, e a significativa redução nas concentrações com o aumento de velocidade dos ventos, denotam que a escala espacial de representatividade desta estação [...] é de bairro [local]. Entretanto, também há que se citar o fato de que as máximas concentrações ocorrem na madrugada, quando as emissões das fontes são reduzidas, indicando a preponderância da meteorologia, e portanto a possibilidade de registro de eventos em escala urbana para estes poluentes. Com um comportamento diferente, as concentrações de NO₂, O₃ e MP10 se mantêm relativamente homogêneas independentemente de direção e velocidade dos ventos, sugerindo que para esses poluentes a estação Ibirapuera apresenta característica urbana¹¹. (CETESB, 2004b, p. 64).

¹¹ Tanto a escala urbana da CETESB quanto a escala urbana que adotamos segundo Boubel et al (1994) se assemelham nas definições. A escala local por nós adotada é correspondente à escala de bairro adotada pela CETESB.

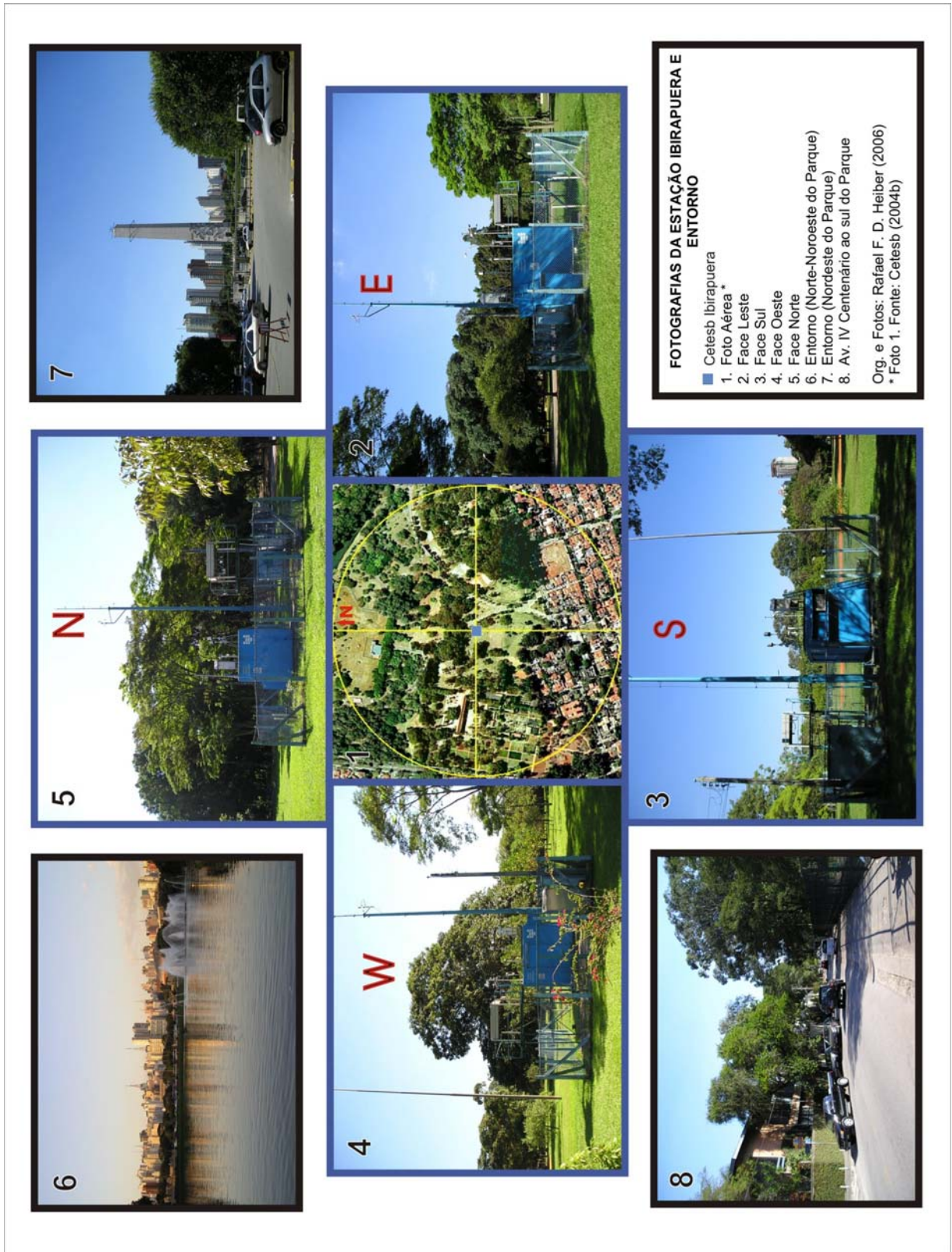


Figura 9. A estação Ibirapuera e seu entorno.

Com o intuito de evitar análises apenas de cunho local ou de escala inferior, a análise rítmica foi baseada em dados diários. A escala temporal horária se mostraria ideal na comparação entre diferentes estações de medições e suas imediações. Uma estação próxima a uma via de circulação, por exemplo, responde imediatamente à frequência de veículos que por ela passam, enquanto uma estação afastada de vias registra o aumento e a diminuição da emissão de poluentes com maior retardo, quando estes já se misturaram na atmosfera. Com o uso da escala diária, trabalha-se com dados que refletem o ritmo das atividades antrópicas por toda a área urbana, cujas emissões de poluentes está associada ao ritmo antrópico que é diário.

Assim, a estação Ibirapuera e o uso de dados diários não privilegiam as pequenas áreas onde ocorrem as emissões, mas sim os poluentes já diluídos no ar, cujas emissões e misturas na atmosfera ocorreram ao longo de todo dia a partir da rede de vias urbanas, sobremaneira nas grandes avenidas por onde há sempre a presença de muitos veículos: Marginais, avenida dos Bandeirantes, avenida 23 de Maio etc, que são os eixos de maior trânsito da grande área central metropolitana da RMSP em que se situa o Parque do Ibirapuera com a respectiva estação.

Altos índices de ozônio registrados no Ibirapuera, por exemplo, corroboram a questão da influência das escalas superiores à escala local nas medições da estação Ibirapuera. O parque e seu entorno não produzem insumos suficientes para formação de ozônio nas proporções em que o mesmo se apresenta no ar medido pela estação Ibirapuera. O fenômeno de altas concentrações de ozônio, portanto, é de escala urbana (áreas diversas da RMSP) e regional (Cubatão e Baixada Santista).

No caso dos poluentes primários, as escalas local e urbana estão diretamente envolvidas. O material particulado, devido a diversos fatores, tais como a construção civil e a presença de um campo de futebol de terra batida ao lado sul da estação, pode ter seu nível elevado graças a ventos ou simplesmente pessoas praticando recreação, uma situação de escala local. Embora a CETESB indique a escala urbana como a mais representativa para o Mp10, como expusemos anteriormente, seu relatório se contradiz:

Observa-se que com o aumento da velocidade dos ventos ocorre um aumento das concentrações médias de MP10 refletindo a ocorrência de ressuspensão de poeira proveniente de fontes localizadas nas proximidades da estação. A ressuspensão é mais intensa durante o dia, em razão das atividades que se desenvolvem no parque neste período. (CETESB, 2004b p.60)

Quanto ao monóxido de carbono e o dióxido de nitrogênio, não há passagem de veículos ao lado da estação, não havendo, portanto, emissão. A via de tráfego intenso mais próxima da estação é a Avenida República do Líbano, a cerca de 400 metros de distância. A Avenida IV Centenário, que fica a cerca de 250 metros da estação, comumente apresenta tráfego reduzido de veículos. Como a estação fica localizada na porção sul do Parque do Ibirapuera, há uma distância de cerca de 1 km com relação à via mais movimentada do entorno, que é a Avenida 23 de Maio, ao norte do parque, mesmo setor em que estão presentes os maiores estacionamentos para os veículos dos frequentadores do Parque do Ibirapuera. Dessa maneira, para o CO, as escalas local e urbana são as mais importantes no estudo de episódios de grande poluição, enquanto a limpeza da atmosfera sobre a área urbana se dá pela atuação de sistemas atmosféricos geradores de determinados tipos de tempo que fazem a troca de ar entre a área urbana e seu entorno em escala regional. Para o NO₂, as condições se diferenciam um pouco, pois o mesmo participa das reações químicas que formam o ozônio, estando submetido mais a condições urbanas que locais.

Em resumo, o a tabela 4 indica as escalas espaciais mais importantes para o estudo dos poluentes CO, MP10, NO₂ e O₃, de acordo com Boubel et al (1994) e a situação da estação medidora, observada em trabalho de campo.

POLUENTES	CO	MP10	NO₂	O₃
1ª ESCALA	Urbana	Local	Urbana	Regional
2ª ESCALA	Local	Urbana	Regional	Urbana

Tabela 4. As escalas espaciais mais representativas para os poluentes medidos pela estação Ibirapuera.

3. TRATAMENTO DOS DADOS OBTIDOS: RESULTADOS ALCANÇADOS

3.1. A organização dos dados.

Iniciamos o tratamento dos dados de poluentes fornecidos pela CETESB a partir da organização dos mesmos, originalmente em formato.txt. A Figura 10 contém um trecho de um dos arquivos.txt, relativo aos dados horários de CO no inverno de 2001 coletados pela estação Ibirapuera.

Depois de separar os dados dos códigos diversos que os acompanhavam, com o uso do software Microsoft Access 2003, os dados horários dos quatro poluentes formaram uma grande tabela para cada inverno, com o uso do Microsoft Excel 2003. A figura 11 mostra uma parte dos dados organizados para o inverno de 2001. Cada tabela de inverno possui quase 2300 linhas com dados horários e quatro colunas dos diferentes elementos, totalizando cerca de 10.000 dados horários de poluentes analisados em cada inverno, ou 40.000 dados de poluentes em todo período estudado.

Para facilitar a identificação dos dados e dos poluentes, as cores verde, azul, amarelo e rosa foram respectivamente atribuídas aos poluentes CO, MP10, NO₂ e O₃. A partir das tabelas foram feitos os gráficos dos poluentes nos referidos invernos. A figura 12 mostra os gráficos para 2001, cuja impressão para análise foi feita em ploter, totalizando 90 cm de comprimento para permitir a leitura.

A confecção e a leitura dos dezesseis gráficos (quatro poluentes em quatro invernos) se justifica pela necessidade de observação das variações dos valores médios horários, permitindo-nos inferir o ritmo diário, semanal, mensal e de cada um dos invernos estudados, além de obter uma primeira noção do que é habitual e daquilo que seriam as excepcionalidades desse ritmo.

Após a análise qualitativa do ritmo dos poluentes, feita por meio da leitura dos gráficos, pudemos comparar os resultados ao estudo de caracterização da estação Ibirapuera (CETESB, 2004b), cujo conteúdo contempla o ritmo dos poluentes por meio de análise quantitativa, com cálculo da média de concentrações dos poluentes em cada uma das vinte e quatro horas diárias nos anos de 1997 a 2002.

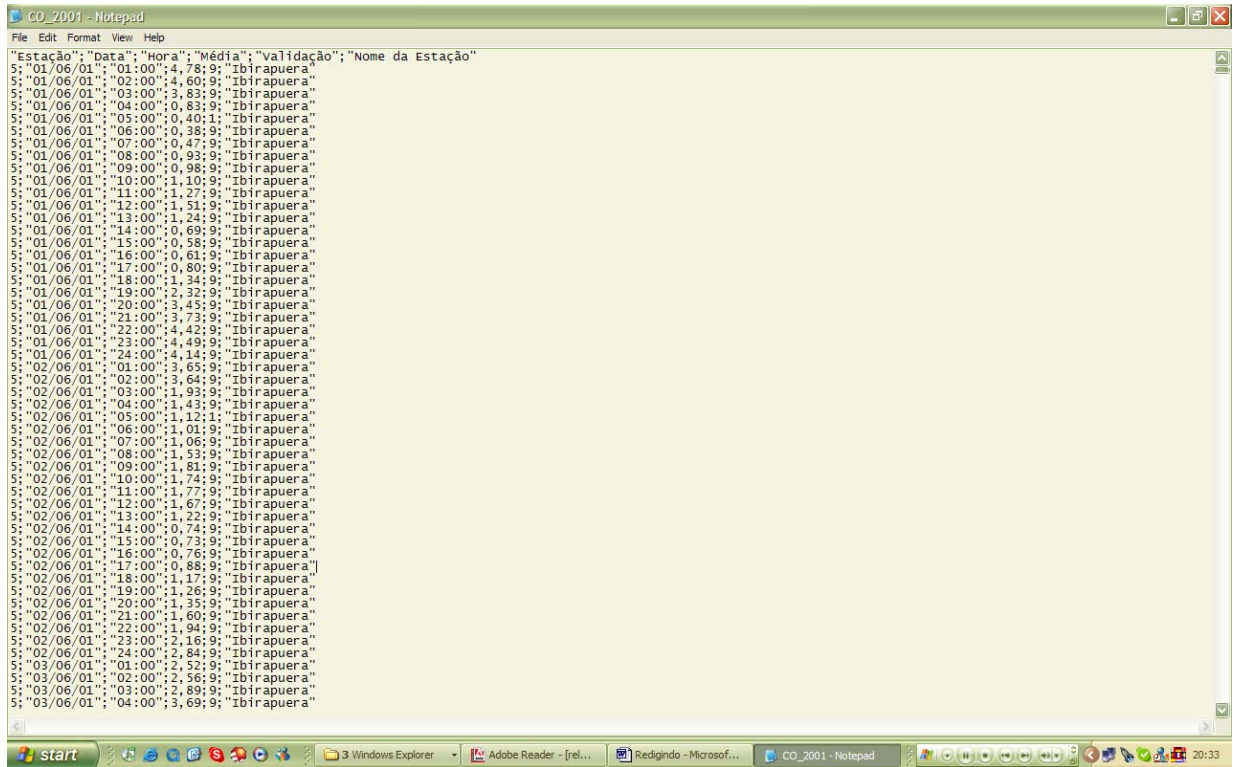


Figura 10. Trecho de arquivo em extensão .txt fornecido pela CETESB

	A	B	C	D	E
	Hora & Data	CO Média Horária (ppm)	MP10 Média Horária (µg/m3)	NO2 Média Horária (µg/m3)	O3 Média Horária (µg/m3)
1	00:00 (22/06/2001)	0,5	24	34	19
2	01:00	0,4	58		22
3	02:00	0,5		33	9
4	03:00	0,4	31	31	11
5	04:00	0,4	26	43	2
6	05:00		30	41	2
7	06:00	0,4	44	36	
8	07:00	0,5	28	43	10
9	08:00	1	26	46	7
10	09:00	1,1	17	47	9
11	10:00	1	24	52	14
12	11:00	0,7	32	41	30
13	12:00	0,5	22	30	39
14	13:00	0,5	28	28	45
15	14:00	0,4	27	26	47
16	15:00	0,5	20	33	42
17	16:00	0,7	38	45	24
18	17:00	0,9	80	53	5
19	18:00	0,9	51	51	2
20	19:00	0,9	50	52	2
21	20:00	1	32	53	0
22	21:00	0,9	30	51	1
23	22:00				

Figura 11. Trecho da tabela de dados horários dos quatro poluentes no inverno de 2001.

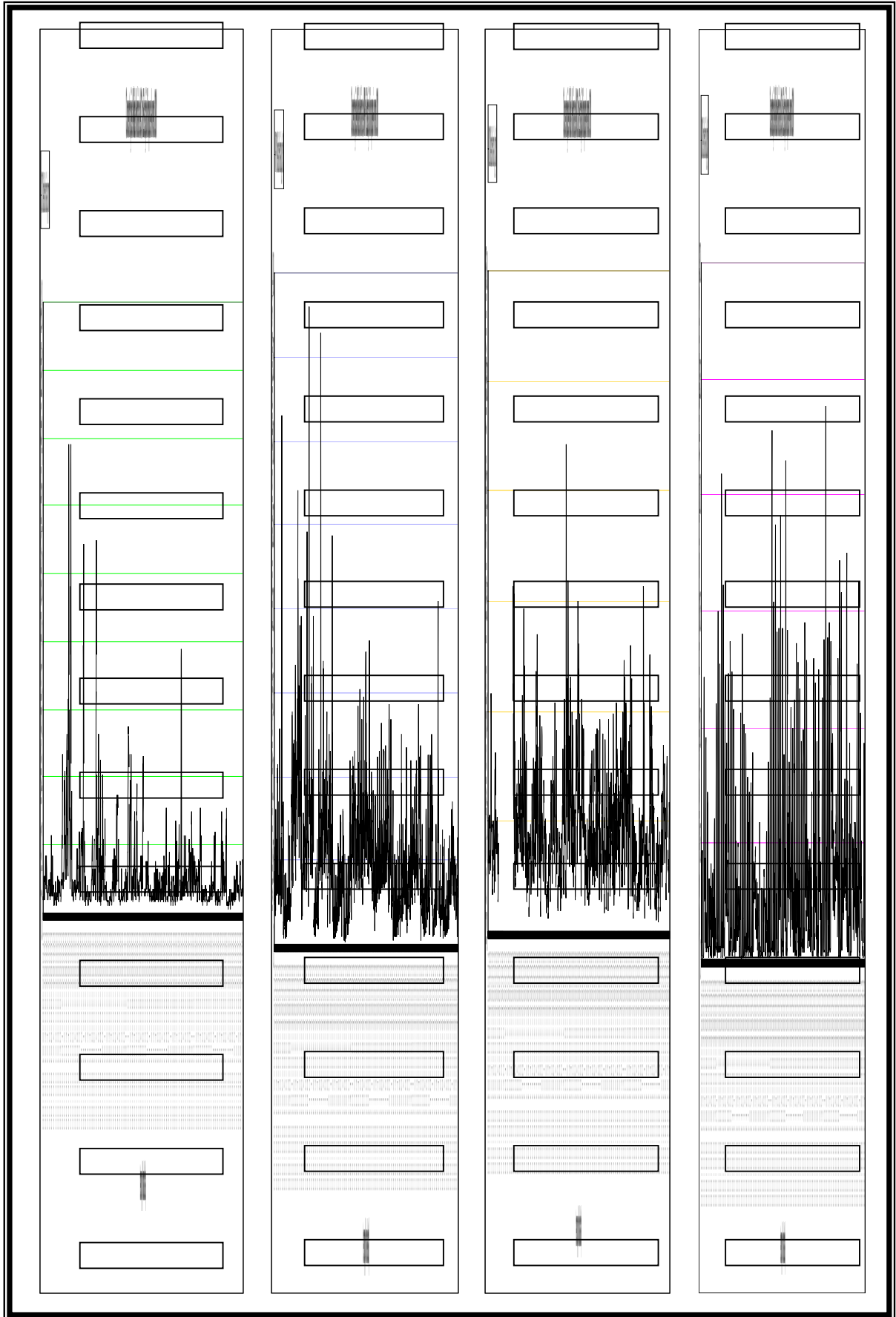


Figura 12. Gráficos de dados horários de CO, MP10, NO₂ e O₃ do inverno 2001 com identificação dos finais de semana.

3.2. As variações rítmicas dos dados de poluentes.

A análise dos dezesseis gráficos confeccionados (CO, MP10, NO₂ e O₃ / 2001, 2002, 2003 e 2004), cujos valores de emissão já estavam estabilizados desde o ano 2000, conforme o demonstrado nas páginas 8 a 10, permitiu a compreensão do/das:

- 1º) Ritmo diário dos poluentes através dos dados horários, a fim de encontrar o padrão de comportamento dentro dos dias, ou seja, os horários de maior e menor poluição.
- 2º) Ritmo semanal dos poluentes, identificando-se manualmente nos gráficos os finais de semana e eventuais feriados. Normalmente estes dias são um pouco menos poluídos devido à queda nas emissões pela diminuição das atividades antrópicas na escala urbana. No caso da estação Ibirapuera, o aumento da frequência de pessoas nesses dias poderia representar uma condição inversa.
- 3º) Semelhanças e diferenças do ritmo entre os poluentes.

A seguir é apresentada uma descrição sucinta dos das variações rítmicas observadas nos dezesseis gráficos mencionados, composta também da comparação com os resultados obtidos pela CETESB por tratamentos estatísticos sobre a série completa de dados dos anos de 1997 a 2002.

3.2.1. As variações rítmicas do monóxido de carbono nos invernos de 2001 a 2004.

O ritmo diário do monóxido de carbono nos quatro invernos caracteriza-se por picos de altas concentrações durante os períodos matutinos e noturnos, com os picos nas madrugadas. As baixas concentrações foram observadas durante o período vespertino.

O ritmo semanal mostrou que, no geral, durante os finais de semana, houve queda de CO presente no ar, em comparação aos dias úteis. Contudo, dias bastante poluídos também ocorreram em sábados ou domingos, evidenciando a importância da dinâmica atmosférica.

Segundo a CETESB (2004b), o ritmo do CO se caracteriza por:

[...] dois máximos preferenciais de concentração, um no período entre 7h e 11h da manhã e outro no período noturno, entre 19h e 3h [...] Com relação às variações por dia da semana, observa-se que os perfis de segunda a sexta-feira são bastante semelhantes, e que as concentrações de CO caem bastante no sábado e domingo, quando não se observa o pico matutino. (CETESB, 2004b. p.36)

Em relação ao ritmo do monóxido de carbono, concluímos que houve semelhança nos resultados de nossas análises qualitativas e nos resultados das análises quantitativas da CETESB, cuja série de dados é muito mais completa, o que dá maior confiabilidade aos nossos resultados.

3.2.2. As variações rítmicas do material particulado nos invernos de 2001 a 2004.

O material particulado, ao longo de cada dia sofreu diversas variações de aumento e diminuição de concentração ao longo de poucas horas, formando-se vários picos ao longo de um mesmo dia. As maiores concentrações aconteceram no período noturno e as menores durante manhãs e tardes.

Os gráficos não mostraram nitidamente que os finais de semana foram menos poluídos que os dias úteis. A grande quantidade de aumentos e diminuições de MP10 em intervalos de poucas horas dificultou bastante a análise do comportamento semanal desse poluente.

Segundo a CETESB (2004b), o ritmo do MP10 se caracteriza por:

[...] as concentrações apresentam um aumento às 18h, e que o período do inverno é em média bem mais alto do que o período de verão [e] bem mais altas nos finais de semana em virtude das atividades desenvolvidas no parque. (CETESB, 2004b. p. 58-59)

Em relação ao MP10, nossas análises não alcançaram os resultados da CETESB quanto ao ritmo semanal, cujo relatório mostra que nos horários de pouca atividade no parque, os dias de semana são mais poluídos que os finais de semana, mas nos horários em que o poluente tem seu pico, próximo às 18h, os finais de semana são normalmente mais

poluídos. Assim, reforça-se a validade de nosso roteiro para a definição do ritmo diário, mas evidencia-se a fraqueza para definir o ritmo semanal do MP10.

3.2.3. As variações rítmicas do dióxido de nitrogênio nos invernos de 2001 a 2004.

O ritmo diário do NO₂ caracteriza-se por dois picos de maior concentração ao longo de um dia, sendo o maior deles entre o período matutino e vespertino e o outro, freqüentemente menor, no período noturno. As quedas de concentração nos períodos da madrugada e da tarde também foram bastante explícitas.

O ritmo semanal possui pequena diminuição de NO₂ no ar durante os finais de semana, quando comparado aos níveis dos dias úteis.

O ritmo mensal e sazonal tem padrão igual nos quatro invernos. Nos invernos de 2001 e 2004 a primeira metade do inverno foi sutilmente mais poluída, ocorrendo o contrário nos outros dois invernos.

A CETESB (2004b p.47) afirma que *observam-se picos tanto no período diurno quanto noturno e concentrações em média mais baixas no final de semana, efeito este que se estende à madrugada de segunda-feira*. O mesmo relatório expõe a condição do NO₂ na fotólise do ozônio como elemento que o diferencia dos outros poluentes primários que não tem potencial de reação química na atmosfera (CO, MP10).

Concluimos que para o NO₂, nossas análises definiram bem seus ritmos nas escalas diária e semanal.

3.2.4. As variações rítmicas do ozônio nos invernos de 2001 a 2004

O ritmo diário do ozônio caracteriza-se por um grande pico no período vespertino. No geral, quedas acentuadas de concentração do ozônio acontecem durante as madrugadas e os valores permanecem baixos até o período matutino.

O comportamento semanal do ozônio teve, na maioria das vezes, leves quedas de sua concentração no ar em sábados e domingos.

O comportamento sazonal de inverno desse poluente foi caracterizado pelas altas concentrações ocorrendo com maior frequência nos meses de agosto e setembro.

O relatório da CETESB (2004b), informa que:

O ozônio possui um perfil de concentrações médias ao longo do dia bastante diferente dos demais poluentes, pois apresenta um máximo de concentração no período da tarde, entre 12h e 17h, [...] na média [horária dos anos de 1997 a 2002], as concentrações no domingo são discretamente mais elevadas. Isto ocorre provavelmente pela diminuição da emissão de NO, que consome parte do O₃ formado. (CETESB 2004b, p. 51-52)

Com relação ao ozônio, os gráficos por nós construídos para os invernos de 2001 a 2004 foram bastante eficientes na definição do ritmo diário, mas em comparação às informações da CETESB (2004b), o ritmo semanal não se confirmou, embora ambas análises caracterizem-no pela leve ou discreta diferença entre dias úteis e finais de semana.

3.2.5. Sínteses do ritmo dos poluentes.

Das observações feitas sobre os gráficos de poluentes nos invernos de 2001 a 2004, e da comparação de seus resultados com o relatório da CETESB (2004b), consideramos que nossas análises permitem concluir que:

- 1º) Os poluentes primários possuem ritmos horários semelhantes. O material particulado se diferencia por apresentar muitas variações dentro de um mesmo dia, enquanto o monóxido de carbono e o dióxido de nitrogênio possuem dois picos diários mais definidos. Na escala horária, o material particulado teve sua variação condicionada pela diversidade de fontes a que está sujeito quanto a sua produção, emissão e ressuspensão. O CO teve maiores concentrações em dias úteis e durante manhãs e noites, decorrência da grande quantidade de automóveis em circulação e pela perda de calor na troposfera inferior, causando diminuição de sua espessura e maior concentração da poluição.

- 2º) O ozônio, único poluente estritamente secundário analisado, é o poluente que possui maior regularidade rítmica diária, pois suas altas concentrações dependem efetivamente dos horários de maior radiação solar. A segunda metade de cada um dos invernos foi mais poluída pelo ozônio, influência do posicionamento astronômico do Sol, aumentando a radiação nos meses de agosto e setembro em relação a junho e julho.
- 3º) Os poluentes primários tiveram maiores concentrações na primeira metade dos invernos. Porém, em 2004, isso não se concretizou com clareza, possivelmente por causa dos tipos de tempo que se sucederam nesse período. Ao longo da leitura dos gráficos, não percebemos importantes diferenças entre primeira ou segunda metades do inverno
- 4º) Pôde-se perceber algumas semelhanças de ritmo entre os quatro poluentes. Enquanto os poluentes primários se assemelharam entre si, o ozônio esteve mais associado ao dióxido de nitrogênio, que participa das reações químicas para formação do O₃.
- 5º) De todos os poluentes, os resultados para CO são os que mais se assemelham aos resultados obtidos pela CETESB (2004b).

Finalizada a análise do ritmo dos poluentes, passamos à fase de escolha dos episódios de grande poluição que serão submetidos à análise rítmica,

3.3. A seleção dos episódios de intensa poluição: o uso da padronização estatística.

Para escolher os episódios de grande poluição em cada inverno, os dados de CO, MP10, NO₂ e O₃ foram transformados da escala horária para escala diária, que também será utilizada posteriormente na construção dos gráficos de análise rítmica.

Depois de transformar os dados horários de cada poluente em médias diárias¹², foi aplicada a seguinte fórmula de padronização aos dados diários, de cada poluente, em cada um dos invernos:

$$P_i = \frac{X_i - m}{M - m}$$

Onde:

P_i = o valor já padronizado;

X_i = valor original da variável;

m = menor valor da variável;

M = maior valor da variável;

O software Microsoft Excel 2003 foi usado na obtenção das médias diárias, na localização das maiores e menores médias diárias de cada inverno para cada poluente e na aplicação da fórmula de padronização. Posteriormente, os gráficos foram gerados a partir dos resultados obtidos (Figura 13). Cada inverno foi contemplado com um gráfico contendo os dados padronizados de CO, MP10, NO₂ e O₃.

Os episódios foram escolhidos representando o período de grande poluição e compreendem os dias anteriores ao pico de poluição com o aumento das concentrações, e os dias posteriores aos picos, com a diminuição das concentrações. A escolha dos episódios se baseou na identificação dos dias em que algum dos poluentes atingiu a escala do valor 1 nos gráficos padronizados. Porém, com ausência de dados para algum dos poluentes no mesmo período, o episódio foi descartado, como aconteceu em 07/08/01, 13/08/02, 17/09/02 e 05/07/03. Contudo, se no mesmo período dois ou três poluentes alcançaram a escala do valor 1 no gráfico, falhas de outro poluente foram desconsideradas, como aconteceu nos episódios que compreendem os dias 30/06/01 a 06/07/01, 18/09/03 a 23/09/03 e 04/09/04 a 12/09/04.

¹² Cada poluente possui vinte e três dados horários por dia, pois há um determinado horário de manutenção diária em que os sensores não registram as medições. Por este motivo, cada dado diário que produzimos é resultado da soma dos dados horários divididos por vinte e três e não por vinte e quatro.

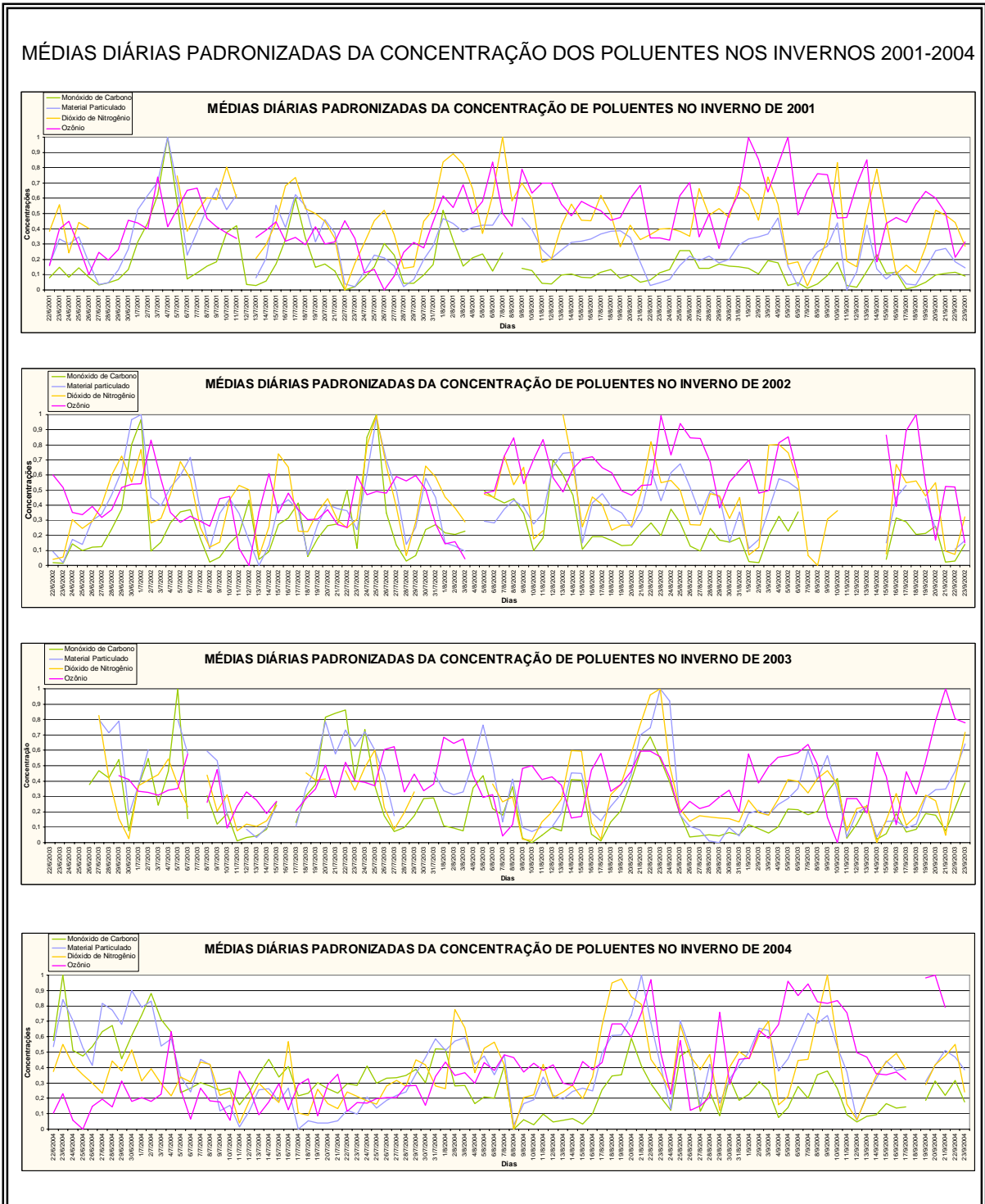


Figura 13. Gráficos de dados médios diários padronizados dos quatro poluentes em cada inverno (2001, 2002, 2003 e 2004).

A ausência de dados nos gráficos padronizados é consequência de falhas nas medições horárias da estação Ibirapuera. Assim, nos dias em que houve alguma falha na coleta de dados horários, o tratamento estatístico que transformou dados horários em médias diárias não foi executado.

No inverno de 2001, foi selecionado o período de 30 de junho a 6 de julho, que abarca a evolução do aumento e da queda da poluição, que alcançou o pico de concentração de CO e MP10 de todo o inverno no dia 4 de julho. A concentração de O₃ também esteve alta nestes dias. O período de 29 de agosto até 06 de setembro também foi selecionado, quando grande poluição foi causada, sobretudo, pelo ozônio.

Para o inverno de 2002, foram selecionados três episódios. O primeiro deles, do dia 23 de junho a 3 de julho, teve altos níveis dos quatro poluentes. O segundo, do dia 23 a 28 de julho, teve os mais altos níveis de poluentes primários do inverno de 2002, cujo ápice aconteceu em 25 de julho. O terceiro episódio se inicia em 20 de agosto e termina em 30 de agosto, e foi escolhido porque teve altas concentrações dos quatro poluentes, principalmente do ozônio.

No inverno de 2003 houve muitas falhas de dados, mesmo assim dois episódios puderam ser encontrados. No período de 17 a 26 de agosto houve grandes concentrações dos poluentes primários, principalmente de NO₂ e MP10. O segundo episódio desse inverno foi de 18 a 23 de setembro, quando houve grande poluição por ozônio.

Em 2004 houve altas concentrações de CO e MP10 já no início da série, cujo episódio compreende os dias 22, 23, 24 e 25 de junho. Entre 16 e 24 de agosto MP10, NO₂ e O₃ foram os causadores de grande poluição no inverno de 2004. O último episódio encontrado foi nos dias 4 a 12 de setembro, quando houve grande poluição por NO₂ e O₃.

A tabela 5 precede a análise rítmica dos episódios, ilustrando os episódios selecionados e os descartados por falhas de dados.

Tabela 5. Episódios de intensa poluição selecionados e desconsiderados nos invernos 2001, 2002, 2003 e 2004.

EPISÓDIOS SELECIONADOS	ANO	PERÍODO	POLUENTE EM ALTAS CONCENTRAÇÕES
1	2001	30 de junho – 06 de julho	CO e MP10
2	2001	29 de agosto – 06 de setembro	O ₃
3	2002	23 de junho – 03 de julho	CO e MP10
4	2002	23 – 28 de julho	CO, MP10, NO ₂
5	2002	20 – 30 de agosto	O ₃
6	2003	17 – 26 de agosto	MP10 e NO ₂
7	2003	18 – 23 de setembro	O ₃
8	2004	22 – 25 de junho	CO
9	2004	16 – 24 de agosto	MP10, NO ₂ e O ₃
10	2004	4 – 12 de setembro	NO ₂ e O ₃
EPISÓDIOS DESCARTADOS	ANO	PERÍODO	POLUENTE EM ALTAS CONCENTRAÇÕES
1	2001	07 de agosto	NO ₂
2	2002	13 de agosto	NO ₂
3	2002	17 de setembro	O ₃
4	2003	05 de julho	CO

3.4. A análise rítmica dos episódios de intensa poluição.

Depois de selecionar os dez episódios, iniciamos o processo de confecção dos respectivos gráficos de análise rítmica para cada um dos dez episódios. Cada um deles contém as seguintes informações diárias:

- Poluentes: valores padronizados e não padronizados, respectivamente usados para comparação entre os poluentes num mesmo inverno e para possibilitar comparações entre invernos e/ou dados de estações diferentes ;
- Pressão do ar: valores máximos e mínimos do Aeroporto de Congonhas;
- Temperatura do ar: valores máximos, médios e mínimos registrados no Aeroporto de Congonhas;
- Umidade relativa do ar: valores máximos e mínimos registrados na estação Ibirapuera, e valores médios registrados no Aeroporto de Congonhas
- Pluviosidade: totais acumulados e períodos de ocorrência registrados no Aeroporto de Congonhas;
- Radiação solar: valores médios registrados na estação Ibirapuera.
- Ventos: velocidade e direção do vento mais forte registrado no Aeroporto de Congonhas e duração das três direções de ventos predominantes da estação Ibirapuera.
- Sistemas atmosféricos atuantes, identificados pela análise de imagens de satélite das 00:00Z e 12:00Z, e nas variações rítmicas dos elementos do clima registrados no Aeroporto de Congonhas e na estação Ibirapuera.

As análises rítmicas dos dez episódios são apresentadas a seguir. Elas foram efetuadas com o intuito de identificar os tipos de tempo que atuaram sobre a área de estudo nos períodos em que houve intensa poluição do ar. Assim, a construção dos gráficos serviu para contemplar a análise rítmica dos elementos do clima e dos poluentes nos dias em que a poluição alcançou o ápice, e os dias que precedem e sucedem esses os picos da poluição, permitindo-nos avaliar o encadeamento sucessivo dos tipos de tempo nesses períodos e a influência sobre a poluição do ar por veículos automotores.

3.4.1. Episódio 1 (30/06 a 06/07/2001): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – bloqueio de passagem frontal e ação de Frente Polar Atlântica em processo de dissipação.

O primeiro episódio analisado representa o período de maior poluição por monóxido de carbono e material particulado no inverno de 2001.

Dia 30/06/2001 - O episódio se iniciou com domínio recente de Anticiclone Polar Atlântico. As imagens de satélite das 9h e das 21h (horário de Brasília) mostram a Massa Polar Atlântica sobre todo o estado de São Paulo e a existência de duas frentes: a primeira nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná e a segunda frente na região de Buenos Aires. A pressão máxima de 934 hPa confirma a atuação do anticiclone, bem como os ventos de sudeste e leste que tiveram parcela importante de atuação durante este dia, segundo os dados de Congonhas e do Ibirapuera. A radiação média diária global de aproximadamente 150W/m^2 e as imagens do satélite GOES indicam a existência de nebulosidade que bloqueou uma parcela da radiação solar incidente sobre a RMSP. A temperatura teve amplitude de 11°C , com mínima de 12°C e máxima de 23°C .

A concentração de poluentes primários e secundários foi baixa nesse dia em que se estabeleceu a atuação da MPA.

Dias 01/06/2001 e 02/07/2001 – O sistema anticiclônico continuou atuante sobre a RMSP e desviou a primeira frente para o oceano, mas o aumento da temperatura e a queda de pressões indicam que a MPA envelheceu e perdeu força, a ponto de permitir pequena repercussão (REP) da segunda FPA na noite do dia 02, contudo, sem alterar as condições de tempo e dos elementos climáticos.

O encadeamento dos tipos de tempo associados à MPA e à MPV com aumento das calmarias propiciaram elevação contínua dos níveis de concentração dos poluentes primários no ar da RMSP. Devido a quedas de pressão, aumentos da temperatura e das calmarias, pode-se afirmar que a elevação das concentrações se deu principalmente por causa das calmarias (movimentos horizontais), estando apenas em segundo plano o papel da expansão e da retração da troposfera inferior (movimento vertical). Os fracos ventos foram predominantemente de sudeste, sul e leste.

Dias 03/07/2001 e 04/07/2001 – Domínio da MPV que se renovou com a repercussão da FPA na noite anterior. Uma terceira frente se organizou na Argentina e penetrou o território paraguaio no dia 03, chegando ao Paraná no dia 04. A umidade do ar alcançou os níveis mínimos do episódio, inferiores a 40%, enquanto as temperaturas foram as mais altas, com mínimas de 15° e máximas de 28°. Os ventos enfraqueceram e as direções predominantes foram de sudeste e leste.

Os poluentes primários (CO e MP) tiveram o ápice das concentrações do inverno de 2001 no dia 04, após quatro dias de domínio anticiclônico com poucos ventos. O CO teve média diária superior a 5ppm e o MP foi superior a 130 µg/m³.

Dias 05/07/2001 e 06/07/2001 – A FPA conseguiu alcançar a RMSP na noite do dia 5, embora já em processo de dissipação rumo ao oceano. Houve aumento da umidade do ar, provocando inclusive chuva de duas horas no dia 5. Os ventos de sul, leste e sudeste se intensificaram e superaram 5m/s.

O tipo de tempo frontal dissipativo provocou limpeza da atmosfera sobre a RMSP, com a conseqüente remoção de poluentes, diminuindo suas concentrações em até 40%.

Esse episódio evidencia a influência do sistema anticiclônico polar atlântico, que mesmo enfraquecido, impediu a passagem de uma FPA, bloqueando o seu avanço durante alguns dias sucessivos, provocando estabilidade da atmosfera sobre a RMSP, diminuição da umidade e grandes períodos de calmarias; como era de se esperar, houve o aumento da poluição aérea pelas substâncias primárias.

A imprecisão dos dados de ventos – visto que a fonte mais adequada, o Aeroporto de Congonhas, forneceu apenas a velocidade e direção do vento mais forte – não permite análises mais profundas a respeito da circulação atmosférica local na RMSP, o que impede a identificação de sotaventos, barlaventos, brisas terra-mar, brisas mar-terra e trocas entre a área central densamente urbanizada, e os mananciais da zona sul e a serra da Cantareira na zona norte, por exemplo.

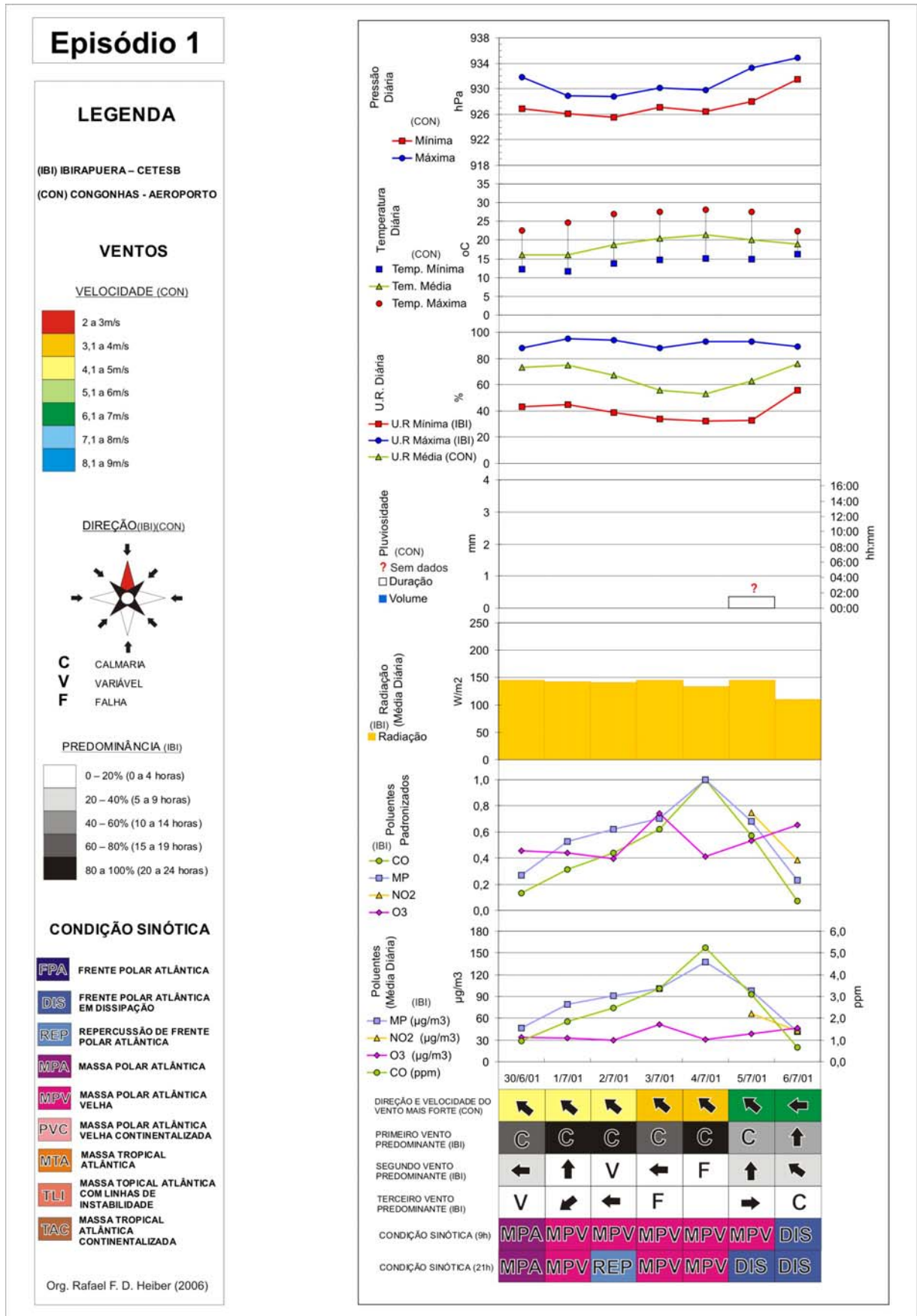


Figura 14. Gráfico de análise rítmica do episódio 1.

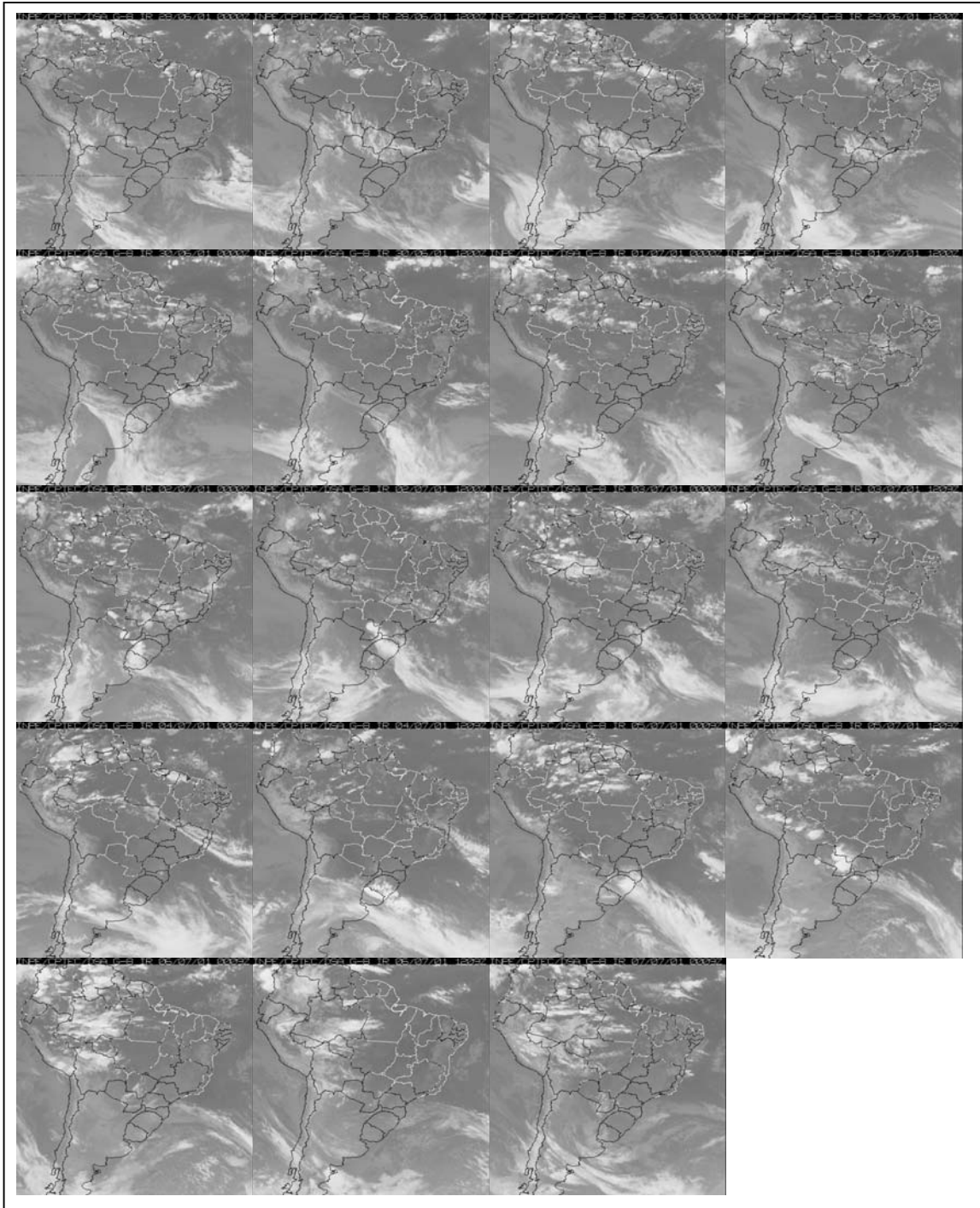


Figura 15. Imagens do Satélite GOES de 27/06/2001 a 06/07/2001.

3.4.2. Episódio 2 (29/08 a 06/09/2001): Massa Polar Velha em processo de tropicalização e atuação de Massa Tropical Atlântica – ausência de nebulosidade, aumento da radiação solar e incursão de Frente Polar Atlântica.

O segundo episódio representa altas concentrações diárias de ozônio, que praticamente alcançaram o valor 1 do gráfico padronizado por duas vezes, significando que, dentro do episódio, por duas vezes o poluente teve as mais altas concentrações de todo o inverno de 2001. Os poluentes primários tiveram baixas concentrações durante o período, exceto o dióxido de nitrogênio, que alcançou a níveis médios. Por ser um dos precursores do ozônio, sua presença ajudou o O₃ a alcançar os níveis tão altos.

Em relação aos dados sinóticos, os satélites GOES e Meteosat não captaram imagens dos dias 30 e 31 de agosto, porém as imagens dos dias anteriores e posteriores, associadas aos dados de superfície, permitiram a definição dos sistemas atmosféricos.

Dia 29/08/2001 – A passagem de uma FPA provocou baixas temperaturas (17°C), alta umidade do ar (97%), fraca chuva (1,2mm), e pequena incidência de radiação solar (50W/m²) sobre a RMSP. Outra FPA estava formada no norte da Argentina. Os ventos mais fortes registrados no Aeroporto de Congonhas vieram de nordeste e tiveram velocidade próxima de 5m/s. Os dados da estação Ibirapuera apontam para ampla participação de calmarias, possivelmente influenciadas pelas árvores ao norte da estação do Ibirapuera

Sob as condições do tipo de tempo frontal chuvoso, os níveis de todos os poluentes foram baixos.

Dia 30/08/2001 – A FPA deixou o território paulista, que ficou sob domínio de uma Massa Polar Velha Continentalizada (PVC). Houve o mesmo volume de chuvas do dia anterior, que provavelmente ocorreram durante a madrugada. Durante o dia, o céu claro permitiu que a temperatura máxima alcançasse 30°C. As calmarias diminuíram e houve variação de direção de ventos. A presença de médias concentrações de NO₂, constatadas desde o dia anterior, aliada à radiação global superior aos 210 W/m², influenciaram a elevação das concentrações de ozônio troposférico, que no entanto ainda não atingia altos valores.

Dias 31/08/2001 e 01/09/2001 – Esses dias foram caracterizado por aumento de pressão (máxima de 931hPa) e permanência da PVC. Um sistema frontal em oclusão se localizou sobre Santa Catarina e Rio Grande do Sul. O avanço do setor mais frio de oeste para leste manteve o céu da RMSP com pouca nebulosidade. Assim, mantiveram-se as condições do dia anterior, com muita radiação global (superior a 200W/m^2) e média presença de dióxido de nitrogênio, fazendo com que o ozônio alcançasse concentrações ainda maiores, com ápice no dia 1. Ventos dos quadrantes sul e sudoeste foram mais freqüentes em Congonhas, enquanto no Ibirapuera as calmarias dominaram cerca de 60% das horas, o que não foi suficiente para elevar o conjunto dos poluentes primários.

Dias 02/09/2001 a 04/09/2001 – Período em que atuou a Massa Tropical Atlântica, que impediu o avanço da FPA que permaneceu estacionária no Rio Grande do Sul.

No dia 3, a pequena atuação de ventos e diminuição da intensidade dos ventos de sul, impediram a melhor dispersão de poluentes primários. A maior alta foi do dióxido de nitrogênio, possivelmente motivada pela diminuição das concentrações de ozônio.

Dia 05/09/2001 e 06/09/2001 – A FPA avançou lentamente e repercutiu na RMSP na tarde do dia 5, elevando a pressão e a umidade, diminuindo a temperatura e a radiação global, que ainda se manteve superior a 180W/m^2 . Os ventos de sul foram acentuados e mantiveram a atmosfera limpa dos poluentes primários. A alta média diária de ozônio no dia 5 sob tais condições foi contraditória, considerando-se a dispersão de dióxido de nitrogênio pelos ventos intensos e a queda de radiação. Recorrendo aos gráficos de dados horários dos poluentes, utilizados na etapa I, pôde-se verificar que ao contrário do dia 1, as concentrações não foram altas, porém a dinâmica do poluente no dia 5 foi diferente, com médias concentrações durante a madrugada, quando as mesmas deveriam ser próximas de 0. Apenas no dia 6 houve grande queda do ozônio, dia em que a umidade subiu ainda mais, a radiação caiu e houve registro de chuva por duas horas, resultados de repercussão e dissipação da FPA.

Neste episódio, o ozônio alcançou cerca de $60\text{ }\mu\text{g/m}^3$ de média diária por duas vezes. Na primeira, houve bastante calmaria fraca e presença média de dióxido de nitrogênio, além de alta radiação global. Os dados horários de ozônio, utilizados nas análises do capítulo

3.3, indicam que neste dia o ozônio teve um comportamento habitual, com um pico de alta concentração bem definido e baixíssimos valores durante a madrugada. No dia 5, segunda vez em que o O_3 chegou bem próximo ao valor 1 do gráfico padronizado, as condições atmosféricas estavam favoráveis à dispersão de poluentes, com repercussão de FPA que ocasionou intensos ventos de sul. Considerando a proximidade da RMSP à região de Cubatão, ao sul da RMSP, bem como a produção bibliográfica sobre a poluição e dispersão de poluentes sobre essa área, é possível que a poluição registrada no Ibirapuera tenha sido transportada de Cubatão pelos ventos de sul. Sanchez-Ccoyllo (2002) afirma que poluentes industriais emitidos em Cubatão e São Caetano do Sul podem ser transportados para o centro da RMSP sob influência da atuação de anticiclones polares.

Esse episódio demonstra a dificuldade em se aplicar o presente roteiro metodológico ao ozônio, e mesmo ao dióxido de nitrogênio, que apesar de primário, envolve-se na reação química de formação do O_3 , além de não possuir uma fonte quase exclusiva: veículos automotores, indústrias e reações químicas fotolíticas.

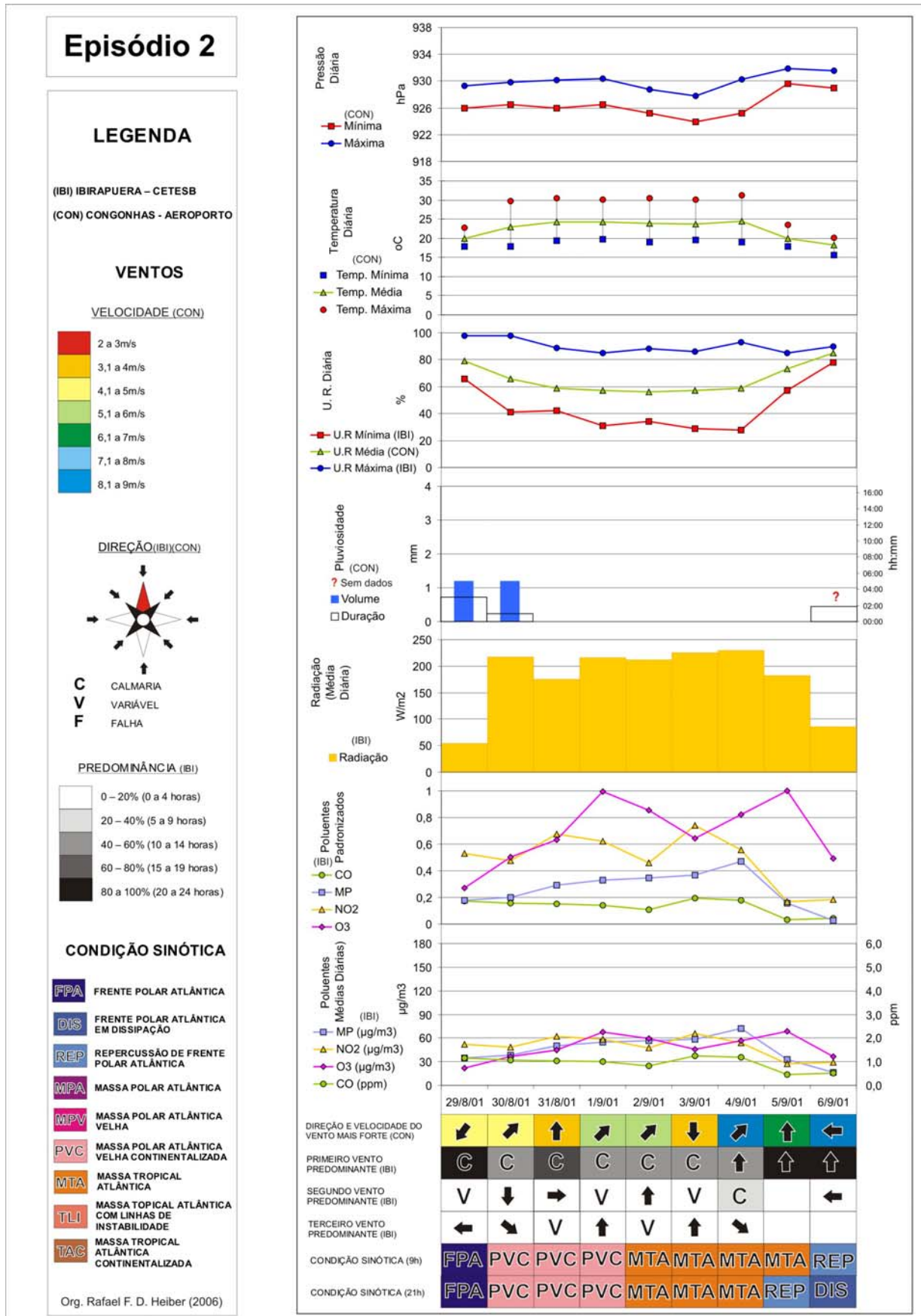


Figura 16. Gráfico de análise rítmica do episódio 2.

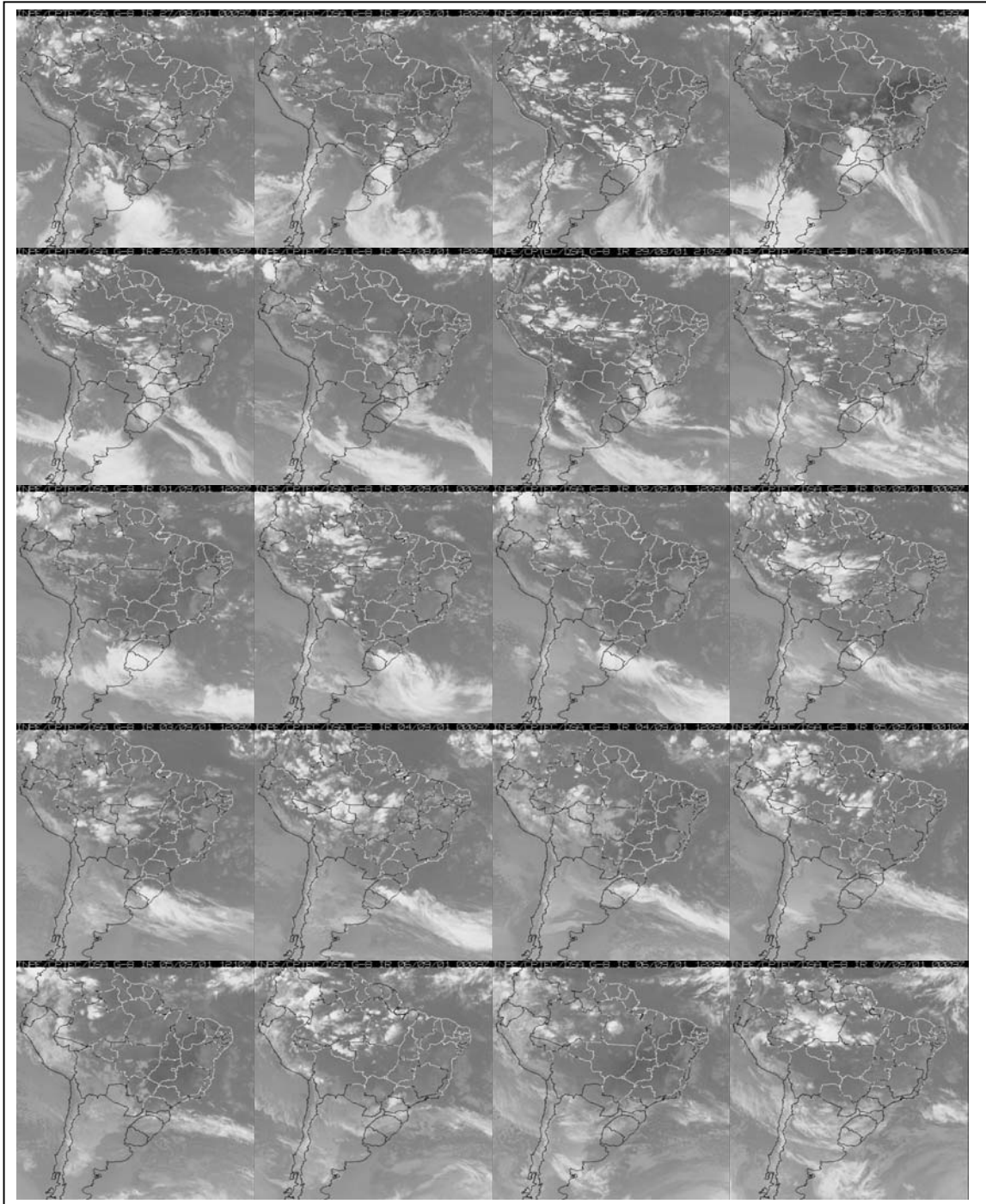


Figura 17. Imagens do Satélite GOES de 26/08/2001 a 06/09/2001.

3.4.3. Episódio 3 (30/06 a 03/07/2001): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – bloqueio de passagem frontal e repercussão de Frente Polar Atlântica.

Este episódio se caracteriza pelos altos níveis diários de CO e MP10 nos dias 30/06 e 01/07/2002, após sete dias de pouca poluição e pequenos aumentos sucessivos dos poluentes primários. Na análise sinótica houve dificuldades na identificação da repercussão de FPA no dia 02/07/2002 com o uso das imagens de infravermelho dos satélites GOES e Meteosat da América do Sul. As imagens da banda visível auxiliariam a análise, porém os satélites não produziram tais imagens no período. Cartas sinóticas seriam o material mais apropriado, principalmente nesta situação, mas a ausência de um banco de dados digitalizado das mesmas e a demora para aquisição deste tipo de material dificultaram tais consultas.

Dia 23/06/2002 – Muita nebulosidade cobriu a maior parte do território brasileiro. Na RMSP houve repercussão de uma frente fria que deixou as temperaturas bastante baixas (entre 13°C e 17°C) e a umidade alta (entre 90% e 100%). No Aeroporto de Congonhas foram registradas cerca de 5 horas de chuva fraca.

Ventos fortes de sul com 6 m/s sopraram com frequência, fazendo com que os poluentes primários tivessem baixíssimas concentrações.

Dia 24/06/2002 – Formação de um sistema anticiclônico no litoral sul brasileiro e atuação da MPV sobre a RMSP, causando diminuição de ventos e aumento das calmarias. A umidade teve abrupta queda, com mínima de quase 50%, e a temperatura chegou a 25°C. Os poluentes, sob tais condições, tiveram pequeno aumento de concentração na RMSP.

Dia 25/06/2002 – Incursão de um sistema frontal (FPA), com grande frequência de ventos de sul, queda de temperatura e aumento da umidade do ar, com chuva registrada durante poucos minutos. Os poluentes primários tiveram pequena queda e o ozônio se manteve estável em pequenas concentrações.

Dias 26/06/2002 e 27/06/2001– Após a passagem da FPA houve atuação da MPA sobre a RMSP. A umidade teve pequena queda em comparação ao dia anterior com sistema frontal. Ocorreu também queda de umidade e aumento da temperatura máxima, que no entanto não ultrapassou 20°C. As imagens de satélite mostram que a nebulosidade continuou presente, desde o início do episódio. Os ventos sul representaram cerca de 30% da frequência total de ventos, sendo superados pelas calmarias. Os poluentes primários tiveram pequenas concentrações, mas pequenas altas em relação ao dia 25. O ozônio permaneceu estável

Dias 28/06/2002 a 01/07/2002 – As imagens de satélite permitem observar condições de estabilidade na RMSP, com presença de nebulosidade. O centro do sistema ciclônico extratropical, que era visível próximo ao litoral sul brasileiro desde o dia 24 e impulsionou a passagem da FPA no dia 25, se deslocou a oeste, não aparecendo mais na imagem do satélite GOES. O acentuado aumento da temperatura e queda da umidade são características da MPV sobre São Paulo. Os ventos mudaram de direção e vieram de leste com velocidades baixas. No dia 30 os ventos de norte foram mais predominantes, exceto em comparação com as calmarias, que foram registradas por mais de 50% do período.

Os poluentes não sofreram efetivo processo de dispersão e suas concentrações aumentaram sob influência de tempo anticiclônico polar tropicalizado. A sucessão de tipos de tempo associados à MPV com poucos ventos que bloqueou o avanço de sistemas frontais, fez com que as concentrações diárias de MP e CO alcançassem valores máximos no dia 01/07/2002.

Dias 02/07/2002 e 03/07/2002 – Repercussão da FPA (REP) no dia 2 mudou as condições do tempo na RMSP, trazendo quedas na temperatura e aumento da umidade do ar. Na manhã do dia 2 houve repercussão da frente fria, mas logo no período da tarde e da noite a MPV voltou a exercer influência direta sobre a RMSP.

Os poluentes primários, depois de alcançarem quase 130µg/m³ (MP) e 2,8ppm (CO), iniciaram movimento descendente nas concentrações, caindo abruptamente entre os dias 1 e 2, como influência direta dos constantes ventos de sul no dia 2. O episódio teria tido seu último dia representado pelo dia 2, mas o aumento repentino de ozônio neste dia induziu a definição do dia 3 como fim do episódio de alta poluição. Entretanto, recorrendo mais uma vez

à análise dos dados horários de ozônio, constatou-se que neste dia não houve altos índices, mas concentrações médias que se estenderam ao longo do fim da tarde e da noite, assim como ocorrido no episódio 2, quando se apontou o forte e constante vento de sul como responsável por imissão de ozônio. Esses dois dias tiveram tipos de tempo influenciados pela MPV, que recuou ao longo do período com a queda nas pressões, e o avanço da frente de sul-sudoeste, que repercutiu nas condições de tempo na e na dispersão de poluentes primários emitidos na RMSP.

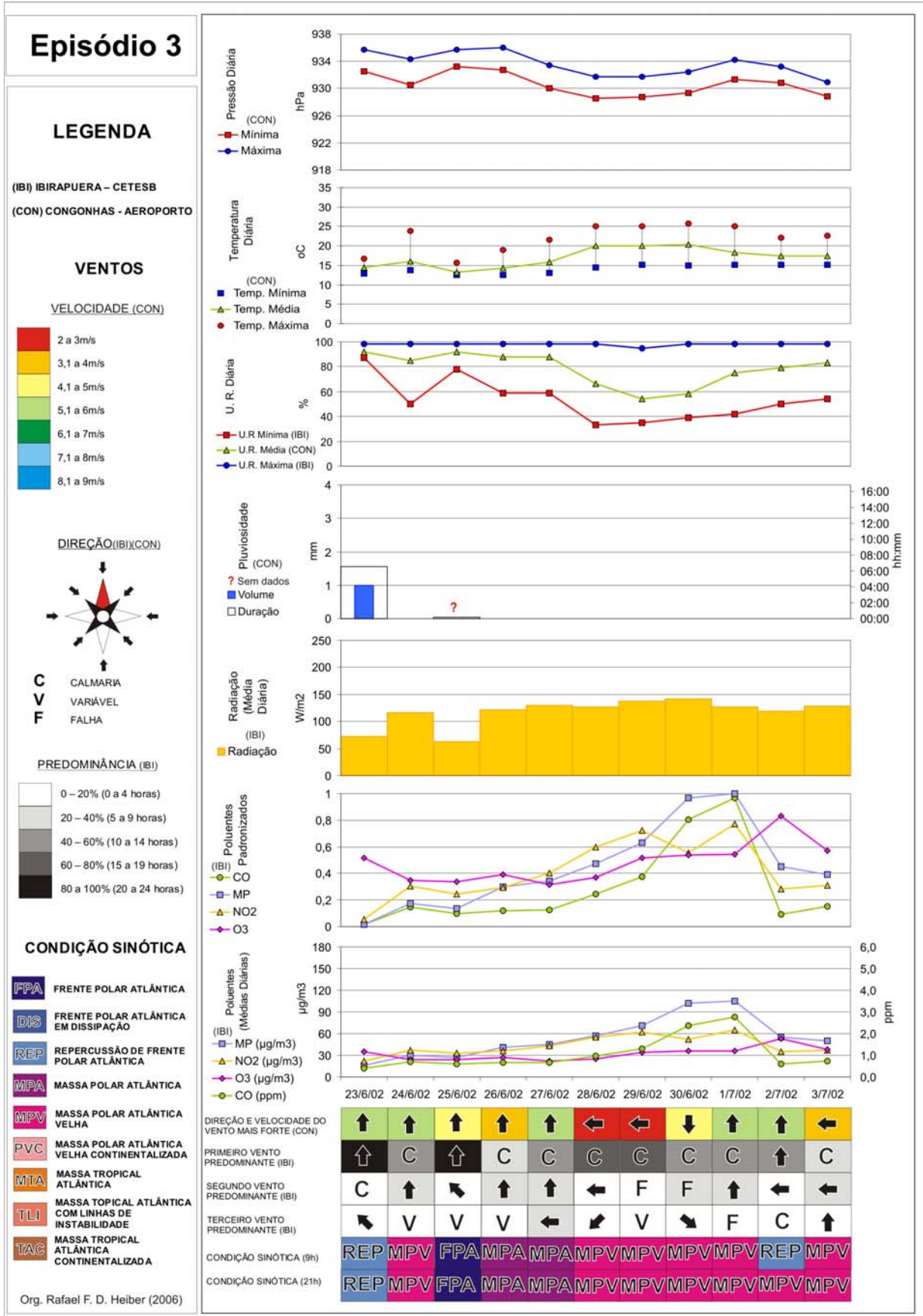


Figura 18. Gráfico de análise rítmica do episódio 3.

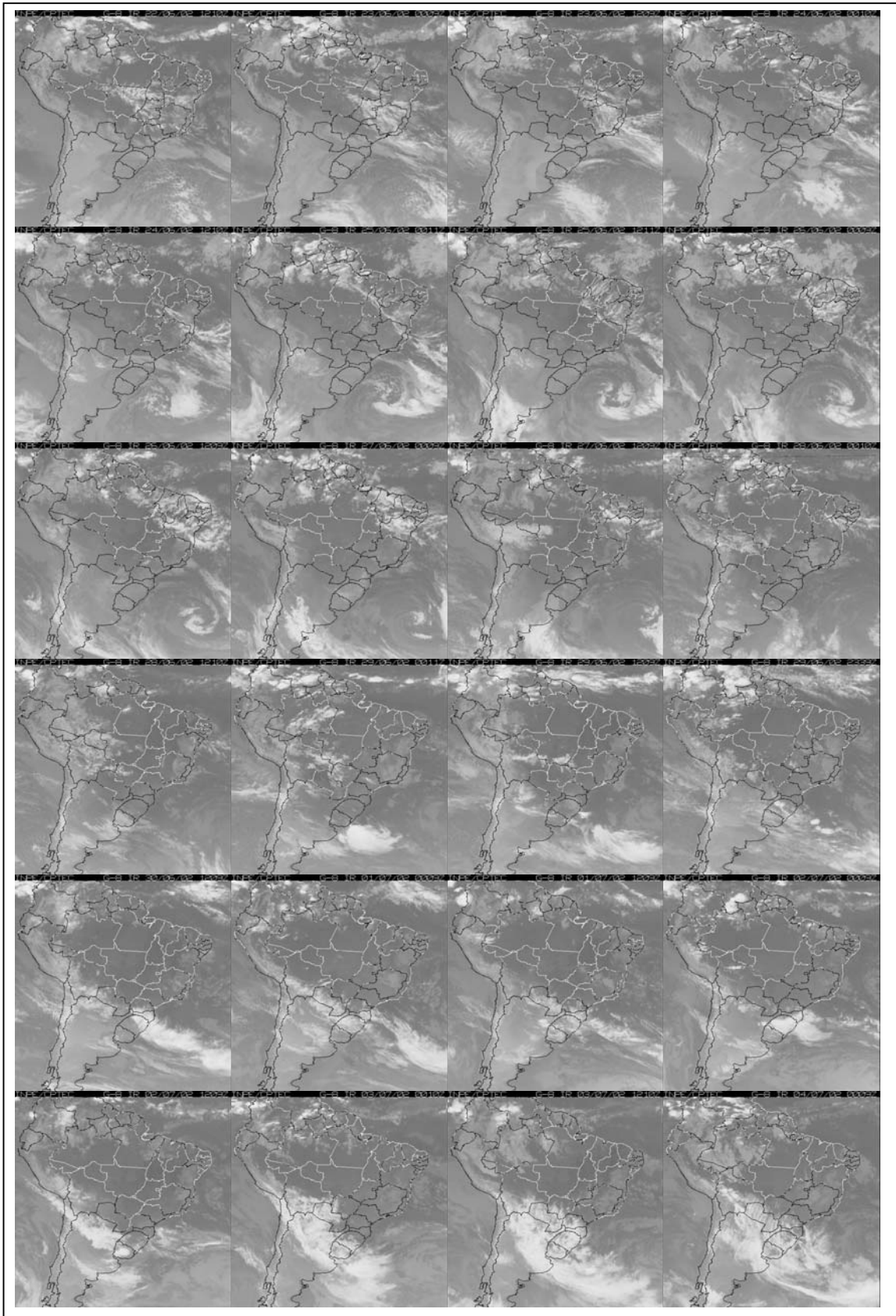


Figura 19. Imagens do Satélite GOES de 22/06/2002 a 03/07/2002.

3.4.4. Episódio 4 (23/07 a 28/07/2002): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – curta estabilização das condições atmosféricas e atuação de Frente Polar Atlântica.

O episódio 4 foi selecionado porque representa pequeno período em que os poluentes primários (MP10, CO e NO₂) tiveram altos valores médios diários. Em apenas dois dias, saltaram de pequenas concentrações a níveis que foram dos mais altos no inverno de 2002.

Dia 23/07/2002 – Um sistema frontal polar de sudoeste que deixou o Estado de São Paulo e alcançou o Rio de Janeiro, Espírito Santo, Minas Gerais e Goiás. A situação pós-frontal teve domínio da MPA, com temperaturas máximas inferiores a 25°C e fracos ventos de norte.

Não houve altas concentrações de poluentes primários ou secundários.

Dia 24/07/2002 25/07/2002 – Dias em que os poluentes primários tiveram as altas mais expressivas, atingindo níveis máximos no dia 25. O CO teve quase 3ppm de média diária, o MP10 teve cerca de 100µg/m³ e o NO₂ 80µg/m³. A MPA atuou sobre a RMSP até o dia 24. No dia 25, com aumento da temperatura e queda da umidade, identificou-se a atuação da MPV. Os ventos foram bastante fracos, com predomínio das direções leste e norte. Estas condições associadas às emissões dos poluentes fizeram com que as concentrações de poluentes primários atingissem os altos níveis supracitados.

Dia 26/07/2002 – Um sistema frontal se formou no Rio Grande do Sul e em São Paulo houve atuação do Anticiclone Polar Atlântico através da MPV. Os ventos de sul foram freqüentes com velocidade inferior a 5m/s e a radiação foi semelhante aos dias anteriores, com cerca de 150W/m².

Sob tais condições as concentrações dos poluentes primários diminuíram bastante suas concentrações.

Dia 27/07/2003 – A FPA alcançou o sul de São Paulo. Na RMSP, com a grande queda da pressão atmosférica, evidenciou-se a situação pré-frontal.

Os ventos de sul ficaram mais fortes, chegando a quase 7m/s e provocando dispersão dos poluentes primários, que tiveram concentrações mais baixas que no dia anterior. As condições pré-frontais, com domínio da MPV e posteriormente repercussão da frente, se mostraram bastante eficientes na limpeza do ar na área central da RMSP.

Dia 28/07/2002 – O sistema frontal passou pela RMSP no período da manhã e a MPA teve domínio sobre o território paulistano nos períodos vespertino e noturno, o que causou aumento de umidade e nebulosidade, além de diminuição das temperaturas.

Os ventos de sul continuaram predominantes e fortes. O tipo de tempo anticiclonal polar oceânico associado a sistemas frontais com bastantes ventos de sul, em sucessão por praticamente três dias, trouxe grande limpeza do ar na área de estudo.

Neste episódio foi possível observar o comportamento semelhante de todos os poluentes primários, que tiveram as mesmas tendências durante todos os dias do período: elevaram-se nas seqüências de dias em que o Anticiclone Polar Atlântico atuou através da massa polar em tropicalização, com períodos de calmarias e ventos fracos de direções pouco definidas, mas com registros importantes de ventos de norte e leste.

O ozônio teve comportamento bastante homogêneo, com níveis médios de concentração, em todo período, diferente dos poluentes primários.

Episódio 4

LEGENDA

(IBI) IBIRAPUERA – CETESB
(CON) CONGONHAS - AEROPORTO

VENTOS

VELOCIDADE (CON)

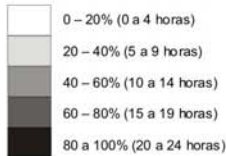


DIREÇÃO (IBI)(CON)



C CALMARIÁ
V VARIÁVEL
F FALHA

PREDOMINÂNCIA (IBI)



CONDIÇÃO SINÓTICA

- FPA** FRENTE POLAR ATLÂNTICA
- DIS** FRENTE POLAR ATLÂNTICA EM DISSIPAÇÃO
- REP** REPERCUSSÃO DE FRENTE POLAR ATLÂNTICA
- MPA** MASSA POLAR ATLÂNTICA
- MPV** MASSA POLAR ATLÂNTICA VELHA
- PVC** MASSA POLAR ATLÂNTICA VELHA CONTINENTALIZADA
- MTA** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA
- TLI** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA COM LINHAS DE INSTABILIDADE
- TAC** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA CONTINENTALIZADA

Org. Rafael F. D. Heiber (2006)

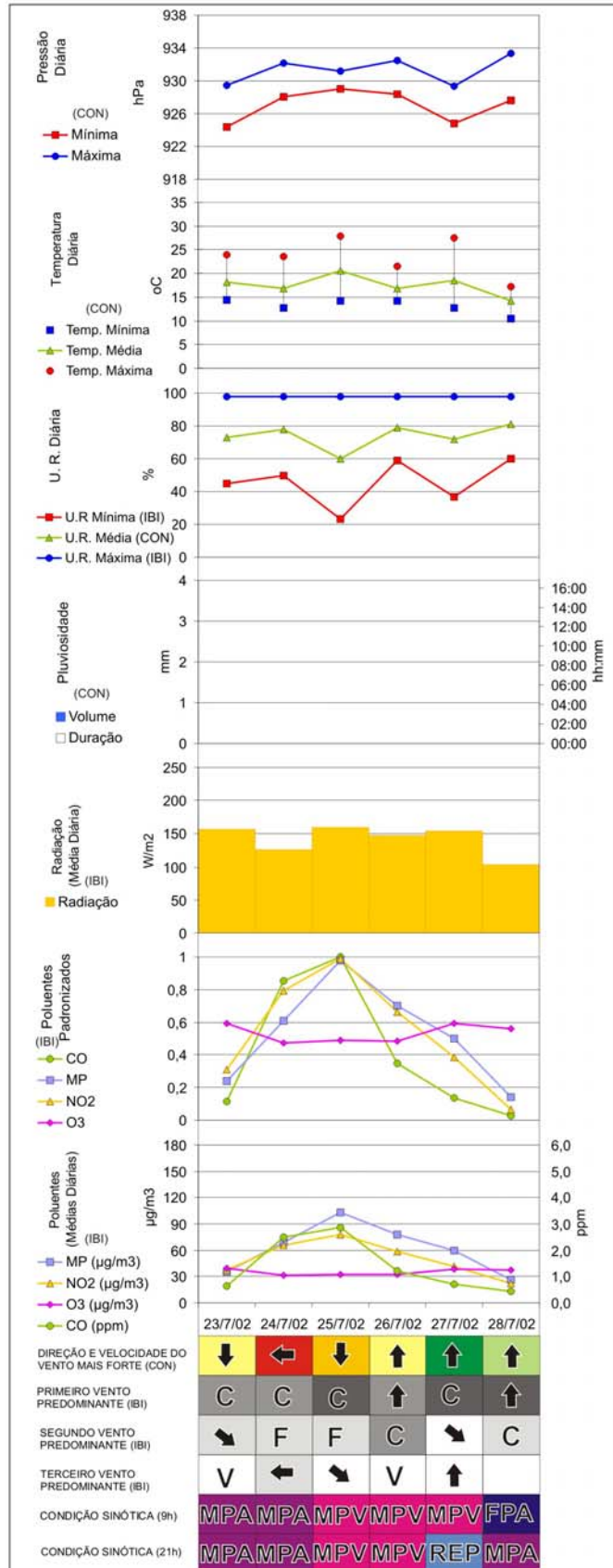


Figura 20. Gráfico de análise rítmica do episódio 4.

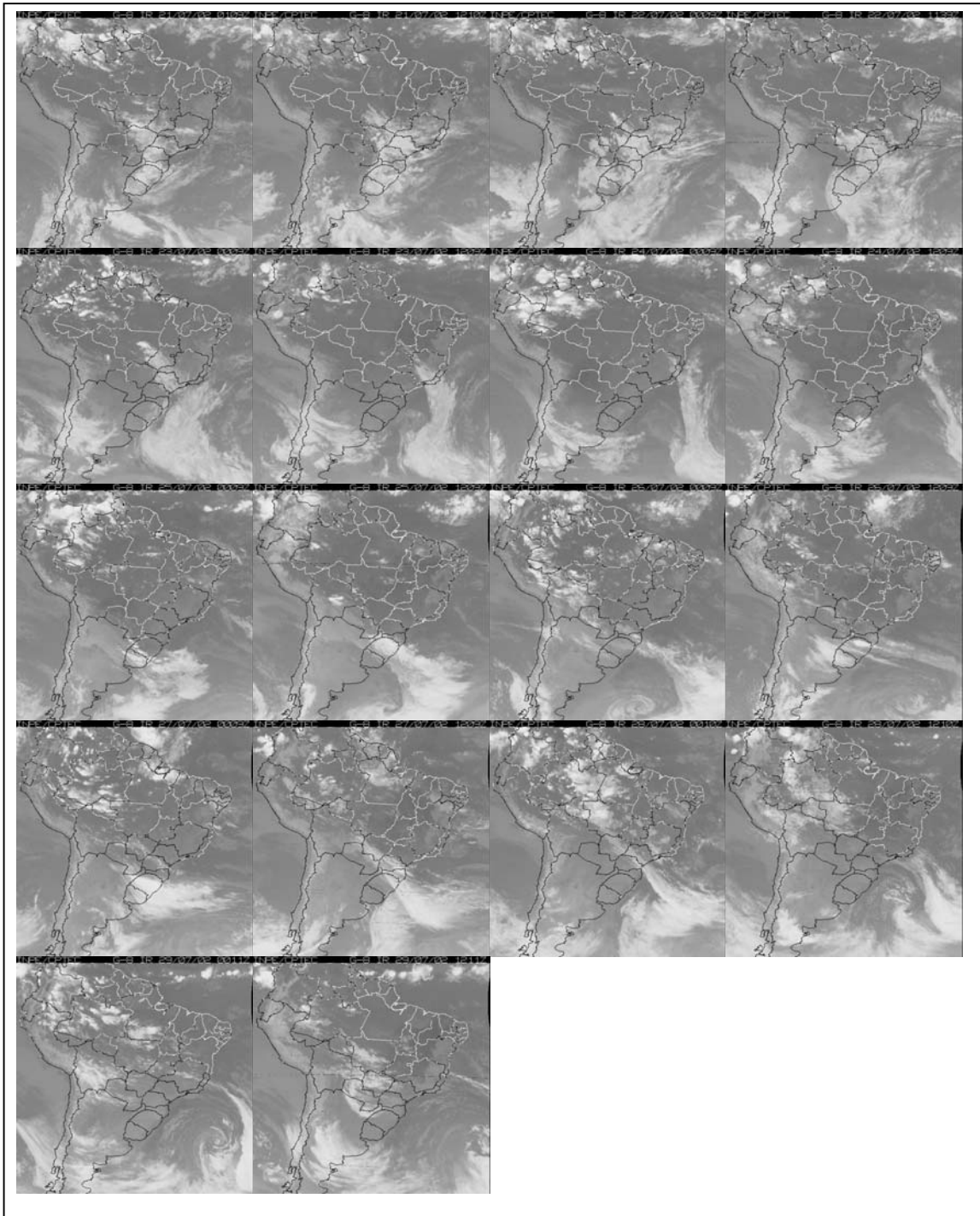


Figura 21. Imagens do Satélite GOES de 20/07/2002 a 29/07/2002.

3.4.5. Episódio 5 (20/08 a 30/08/2002): Massa Polar Velha em processo de continentalização – ausência de nebulosidade e ação da Frente Polar Atlântica.

Neste episódio, o último do inverno de 2002, o ozônio se destacou pelas altas concentrações diárias. Os poluentes primários, de maneira geral, tiveram concentrações baixas (CO) e médias (MP e NO₂), sendo que o primeiro é o melhor indicador da poluição por carros e os outros possuem maior variabilidade de fontes, além de, no caso do dióxido de nitrogênio, haver participação na formação de ozônio. Portanto, trata-se de um episódio que não identifica prioritariamente a sucessão de tipos de tempo e a poluição por automóveis.

Dias 20/08/2002 e 21/08/2002 – Período de atuação da Massa Tropical Atlântica Continentalizada (TAC), com temperaturas mínimas superiores a 15°C e máximas de 27°C e quedas na umidade do ar do primeiro para o segundo dia, cuja média foi inferior a 50%. A TAC atuou em grande parte do Brasil. Ao sul do Uruguai houve grande nebulosidade em decorrência de um sistema frontal em formação, que passou pela RMSP na noite do dia 21, sem modificar substancialmente os elementos atmosféricos. Na RMSP, o céu claro permitiu que a radiação fosse de 200 W/m² no dia 20.

Os dados do Aeroporto de Congonhas e da estação Ibirapuera mostram que não houve definição de um vento predominante no dia 20, mas no dia seguinte os ventos do quadrante norte foram presentes.

Os dois primeiros dias do episódio, sob ação de tempo anticiclônico tropical, tiveram boa qualidade do ar.

Dia 22/08/2002 – Passagem da FPA provocou pequenos aumentos na umidade e na pressão, e leve queda de temperatura. A formação de nebulosidade reduziu a incidência da radiação solar e não induziu a formação de ozônio. Já a frequência de calmarias por quase 80% do tempo, mesmo com registro de ventos sul com até 5m/s, elevou as concentrações de poluentes primários a níveis médios. O ozônio se manteve em pequenas concentrações.

Dia 23/08/2002 a 27/08/2002 – Domínio da MPV com ventos predominantes de sul, muitas horas de calmaria, umidade média superior a 60% e temperaturas com grande

amplitude térmica diária, causadas pela pequena quantidade de nebulosidade, gerando diferenças diárias maiores que 10°C, com mínimas em torno de 16°C e máximas pouco inferiores a 30°C. A pressão se manteve constante, com máximas próximas a 932hPa.

Nesse cenário de atuação da MPV, ventos de sul tiveram velocidades máximas de até 7m/s, não permitindo grandes quantidades de poluentes primários na atmosfera sobre a RMSP. Contudo, os altos níveis de radiação, sempre próximos a 200W/m², fizeram com que o ozônio atingisse sua maior concentração no dia 23 (cerca de 70µg/m³), e apesar de pequenas diminuições nos dias posteriores, que tiveram aumento da força dos ventos, o ozônio permaneceu alto até o dia 27, dia em que se identificou a transição da MPV para PVC. Os poluentes primários tiveram poucas oscilações e estiveram em concentrações baixas a médias na atmosfera. Além da ação da radiação e presença de NO₂, pode ter havido transporte de O₃ de Cubatão para a RMSP, ou da região do ABCD para a área do Ibirapuera.

Dia 28/08/2002 – O centro do anticiclone que atuava sobre São Paulo se afastou e as pressões caíram. Os ventos de nordeste e leste superaram os ventos de sul, até então predominantes. Houve aumento da temperatura e leve queda de umidade. A insolação permaneceu alta, mas na estação Ibirapuera foi registrada queda do ozônio nesse dia de condições pré-frontais de oeste-sudoeste. Houve domínio da PVC.

Dia 29/08/2002 – Grande queda de pressão e passagem de FPA que provocou chuvas de quase 3mm durante duas horas. Nebulosidade e conseqüente queda da radiação não permitiram a ocorrência de reações químicas para a manutenção das altas concentrações de ozônio. Fortes ventos de oeste reduziram um pouco os níveis dos poluentes primários.

Dia 30/08/2002 – Sistema anticlinal iniciou atuação no território paulista com a MPA, quando se estabeleceram quedas acentuadas na temperatura e aumento da umidade. No Aeroporto de Congonhas o vento mais forte foi norte e na estação Ibirapuera várias horas de calmaria foram detectadas. Mesmo com as árvores nos quadrantes NW-N-NW da estação Ibirapuera, ventos noroeste foram registrados pelo anemômetro instalado a 10m de altura da superfície, assim como ocorrera no dia anterior. Os poluentes permaneceram em baixas concentrações.

A comparação deste episódio com o anterior, episódio 4, ilustra a diferença entre tipos de tempo que atenuam e incentivam altos níveis diários de poluição por poluentes primários e secundários. Neste episódio, os movimentos vertical e horizontal na troposfera inferior foram acentuados pelos ventos e pela amplitude térmica. Mesmo assim, na RMSP, o ozônio teve altas concentrações. Este episódio corrobora o que foi afirmado no episódio 2 a respeito da presença da área industrial de Cubatão e do ABCD, que têm suas emissões transportadas para a RMSP e para a área do Ibirapuera sob influência dos ventos de sul causados pelo Anticiclone Polar Atlântico.

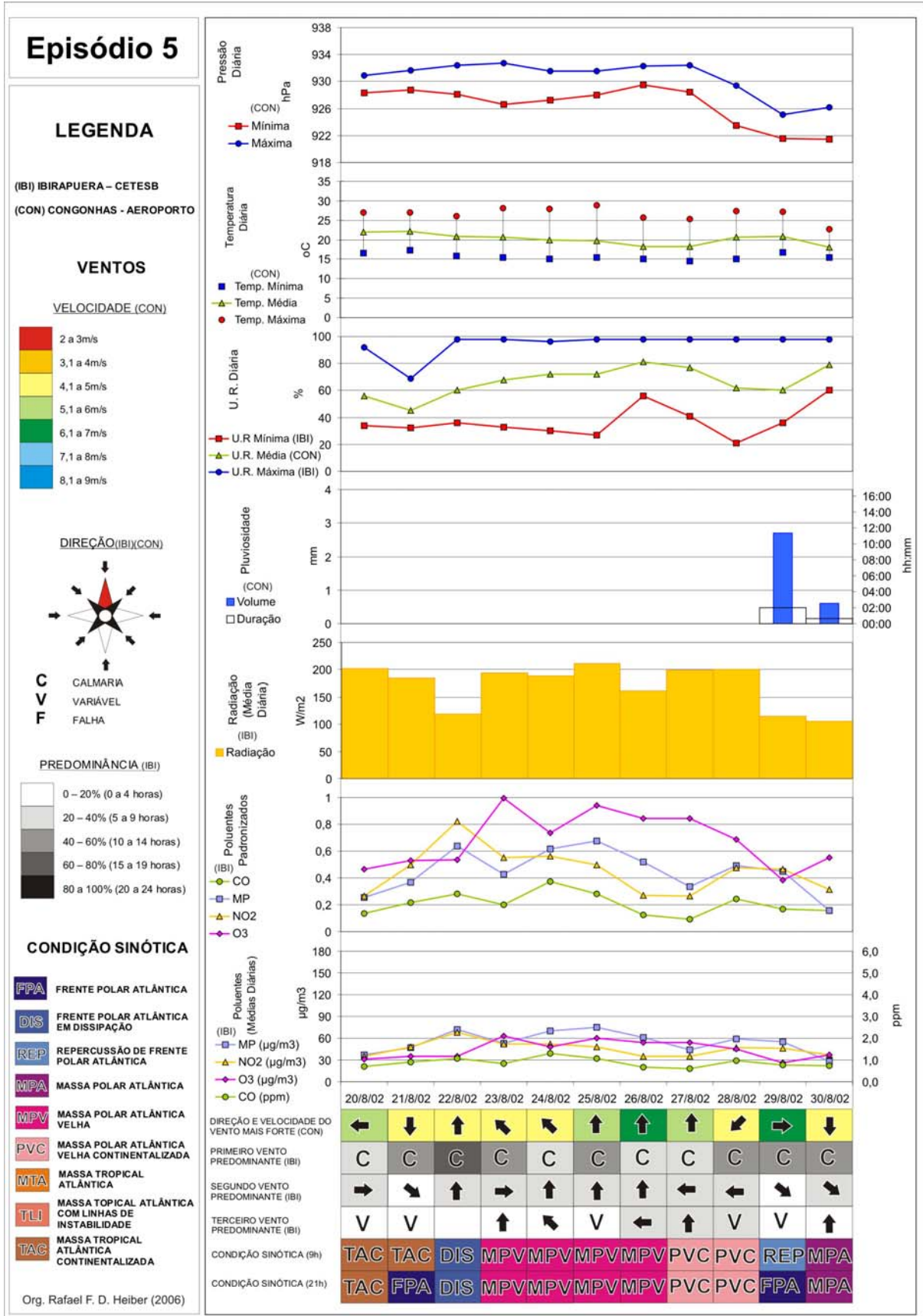


Figura 22. Gráfico de análise rítmica do episódio 5.

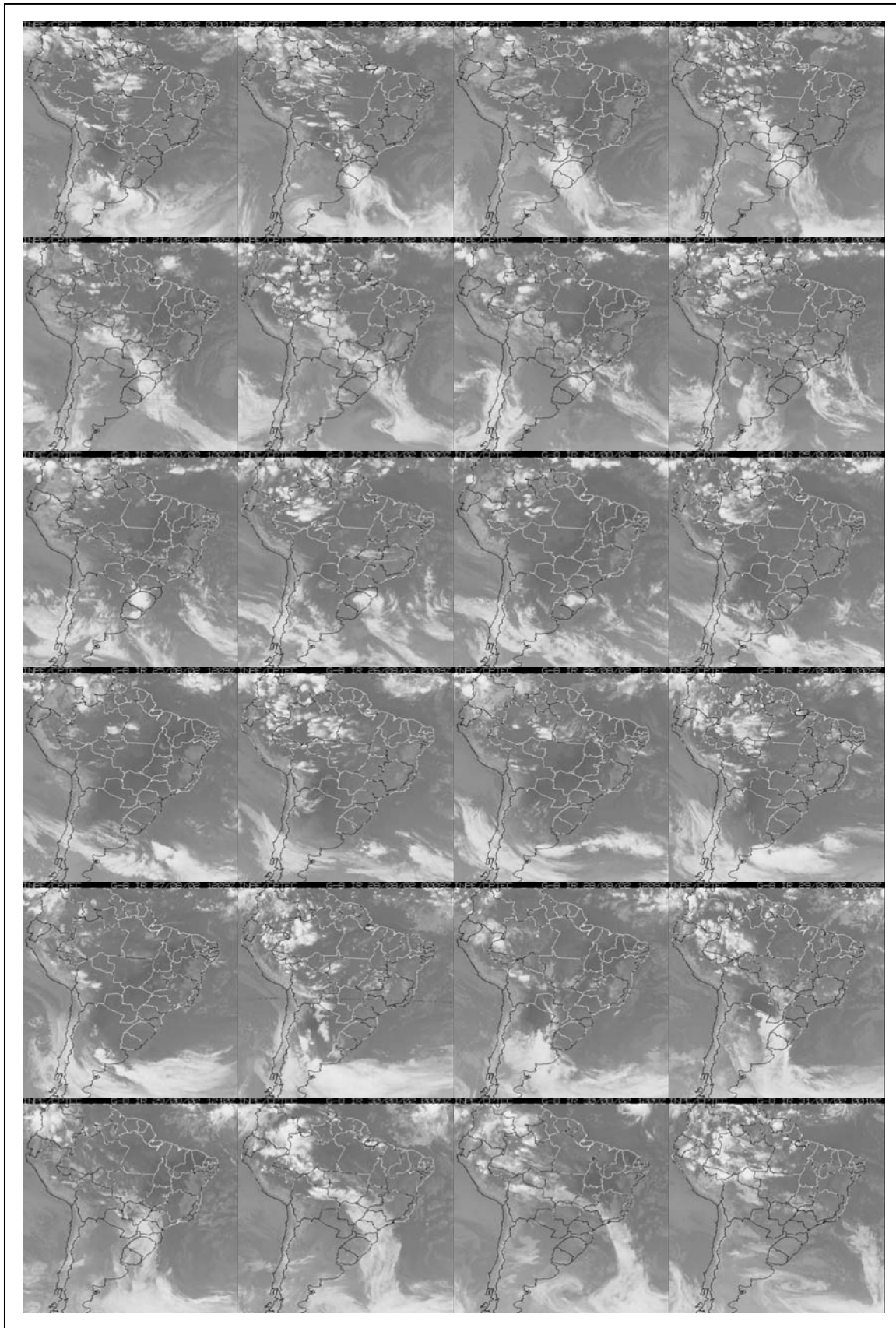


Figura 23. Imagens do Satélite GOES de 18/08/2002 a 30/08/2002.

3.4.6. Episódio 1 (17/08 a 26/08/2003): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – bloqueio de passagem frontal e ação de Frente Polar Atlântica.

Este foi o único episódio de intensa poluição por poluentes primários selecionado em 2003. Nele, o dióxido de nitrogênio e o material particulado chegaram aos níveis máximos do inverno de 2003. Em outros dias o CO teve sua maior concentração do inverno, um pouco inferiores às medidas dentro do episódio 6, mas falhas de dados de outros poluentes e elementos atmosféricos fizeram com que o período fosse descartado, de acordo com a metodologia para seleção dos episódios descrita no capítulo 3.3.

Dia 17/08/2003 – Grande área central da América do Sul teve estabilidade e pouca nebulosidade, enquanto um sistema frontal se organizava no Uruguai e na Argentina. O início deste episódio foi marcado por uma situação pós-frontal na RMSP, com domínio da MPA, alta umidade do ar e temperaturas baixas com pequena amplitude. Fortes ventos de sul sopraram na RMSP. A estação Ibirapuera registrou bastante ventilação, embora seus dados tenham sido falhos na identificação da direção dos ventos. A radiação foi pouco inferior a 200W/m^2 e o ozônio teve concentrações médias.

Os poluentes primários estiveram em pequeno teor de concentrações no ar sob a influência de tempo anticiclônico polar atlântico pós-frontal.

Dia 18/08/2003 a 20/08/2003 – A FPA que havia passado por São Paulo um dia antes do início do episódio ficou estacionária por três dias entre o sul da Bahia e norte de Minas Gerais. Simultaneamente, a nova frente fria ao sul permaneceu atuante em processo de dispersão entre o Uruguai e Santa Catarina. Durante esses três dias, a MPA foi envelhecendo mas manteve sua influência sobre o tempo na RMSP. Os ventos foram moderados, predominantemente de sudoeste-leste, com aumento das calmarias no dia 20. A radiação permaneceu alta, próxima de 200W/m^2 , contudo o ozônio esteve em baixas concentrações.

Os poluentes primários se concentraram mais dia a dia, mas não foram causadores de grande poluição até o dia 20.

Dia 21/08/2003 a 24/08/2003 – As pressões mínima e máxima permaneceram entre 930hPa e 925hPa durante esses quatro dias, menores que nos dias anteriores, com leves quedas na umidade do ar e aumento das temperaturas, que ultrapassaram 30°C. Durante este período a FPA que estava estacionária no Uruguai avançou pelo Rio Grande de Sul, Santa Catarina, Paraná e chegou ao sudoeste de São Paulo no dia 24.

A MPV teve domínio sobre a RMSP durante os dois primeiros dias e a MTA durante os dois últimos, em um conjunto de dias com bastante calma e ventos predominantes de norte. Os poluentes primários sofreram as maiores altas de concentração do episódio sob essas condições de sucessões de dias com tempos de enfraquecimento do anticiclone polar e conseqüente influência do anticiclone tropical: CO, NO₂ e MP tiveram, sucessivamente, cerca de 2,5ppm, 160 µg/m³ e 110µg/m³ de concentração média diária no dia 23.

Dia 25/08/2005 – Incursão da FPA que trouxe cerca de 15 horas de chuva, totalizando quase 4mm no dia.

Ventos de sul e a chuva removeram os poluentes da atmosfera, O tempo frontal polar atlântico instável foi bastante positivo no que tange a redução de poluentes no ar.

Dia 26/08/2003 - A FPA deixou território paulista e foi para Minas Gerais. A MPA atuou sobre a RMSP, mantendo a alta umidade do ar e reduzindo a temperatura para 9°C. Os ventos de sul continuaram constantes e com velocidades próximas a 5m/s, o que manteve o ar limpo.

A análise deste episódio evidencia o caráter prejudicial à qualidade do ar por ação dos tipos de tempo associados a sistemas anticlonais estáveis, sejam sistemas anticlonais polares em enfraquecimento, sejam sistemas anticlonais tropicais que sucedem os anteriores. O presente episódio também evidencia outro fator importante: o comportamento do ozônio. Baseando-se na revisão bibliográfica sobre a formação fotoquímica do mesmo, houve situação favorável a reações químicas: abundância de radiação e de dióxidos de nitrogênio. No entanto, as médias diárias ficaram em níveis médios, não atingindo níveis muito altos. Revela-se aos poucos que o presente roteiro metodológico não se mostra preciso

para o estudo do ozônio troposférico dentro do sistema climático urbano, ao menos na RMSP, que possui complexidade peculiar apresentada no capítulo 2. Possivelmente a disponibilidade de dados de radiação ultravioleta, diretamente responsáveis pela fotólise, e de monóxido de nitrogênio, trouxesse maior precisão às considerações, visto que os raios UV, embora incorporados à radiação global, podem sofrer variações particulares.

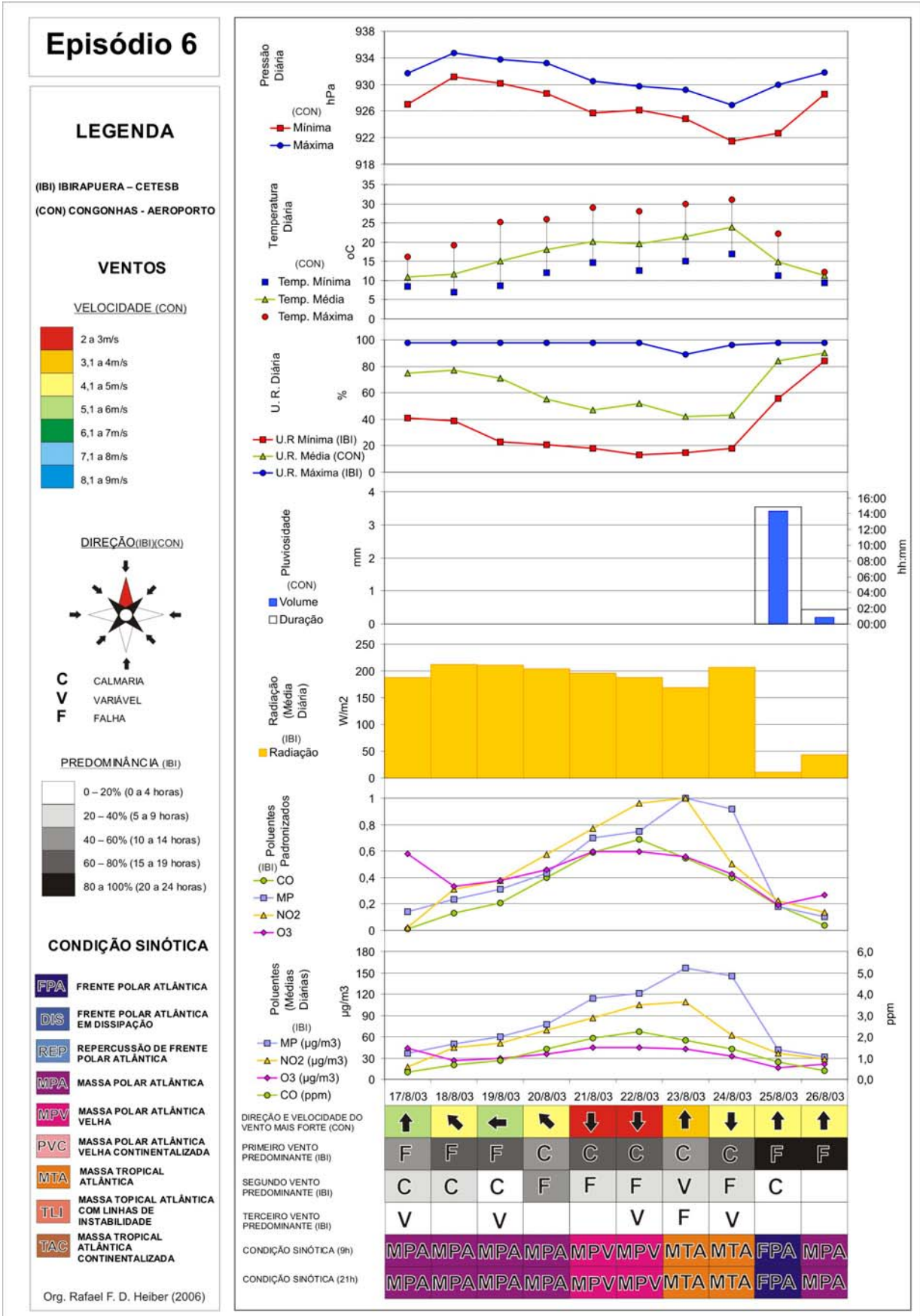


Figura 24. Gráfico de análise rítmica do episódio 6.

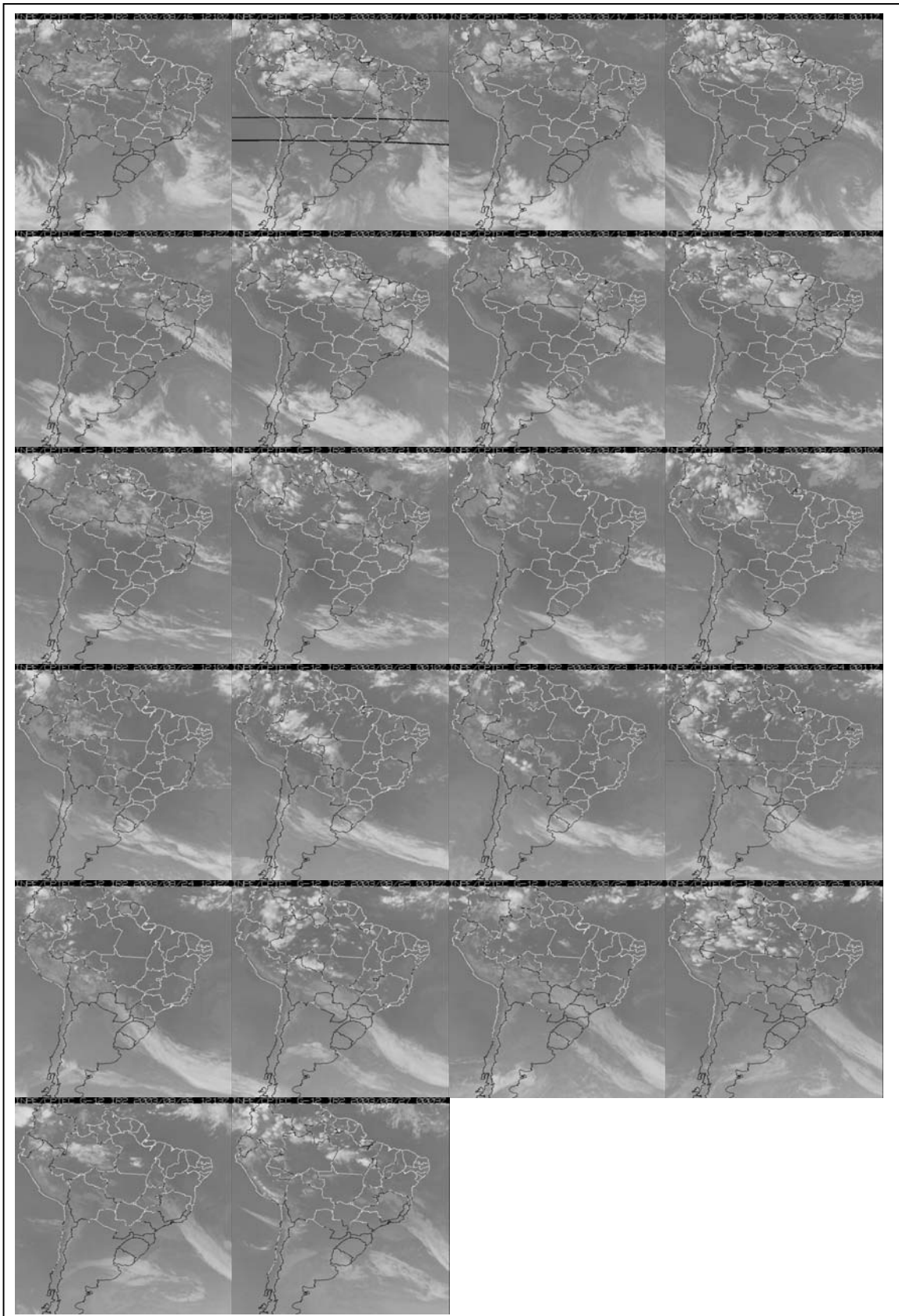


Figura 25. Imagens do Satélite GOES de 16/08/2003 a 26/08/2003.

3.4.7. Episódio 7 (18/09 a 23/09/2003): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização: aumento da radiação solar e ação da Massa Tropical Continental.

Neste episódio todos os poluentes primários, inclusive o dióxido de nitrogênio, tiveram teores pequenos de concentração, enquanto o ozônio teve suas concentrações aumentadas dia-a-dia. No final do episódio, limitado pelo final do inverno – período estipulado para análise – os poluentes primários começaram a ter seus teores de concentração elevados. A análise dos dois episódios de 2003 (6 e 7), foi muito dificultada por falhas na coleta de dados da direção de ventos da estação Ibirapuera, cuja medição já havia tido bastantes falhas no mesmo inverno.

Dia 18/09/2003 – Situação pós-frontal com domínio de MPA. A alta pressão e grande umidade, associadas às baixas temperaturas (13°C – 19°C), são resultados de sua atuação. O sistema anticiclônico atuou entre o norte do Uruguai e sul de Minas Gerais, Goiás e Espírito Santo, entre duas FPA, uma das quais já havia atravessado o território paulista.

Ventos de sul foram registrados no Aeroporto de Congonhas com quase 5m/s. A estação Ibirapuera não mediu a direção dos ventos. A concentração dos poluentes foi pequena.

Dia 19/09/2003 e 20/09/2003 – Transição de domínio da MPA para MPV, com aumento da temperatura máxima (25°C), queda da umidade, diminuição de nebulosidade e alta radiação, que chegou a 250W/m².

O ozônio teve as primeiras altas de concentrações. A análise dos ventos ficou comprometida pelas falhas do Ibirapuera, mas os dados de Congonhas indicam redução de velocidade dos ventos, com direções de leste e nordeste.

Dia 21/09/2003 – Aumento de nebulosidade e da umidade do ar, com quedas de quase 10°C na temperatura do ar. As imagens de satélite permitiram identificar atuação da MTA com linhas de instabilidade. A pequena queda de radiação (de 250 a 200 W/m²) não impediu que o ozônio tivesse a mais alta concentração diária de todo o inverno de 2003 (cerca de 75µg/m³). Os poluentes primários tiveram as menores concentrações do episódio.

Dia 22/09/2003 – Influência da MTA sobre a área de estudo, com pequena queda de pressão e umidade e aumento das temperaturas. No Aeroporto de Congonhas foram registrados fortes ventos de sudeste. A radiação de quase 250W/m^2 manteve os dados diários de ozônio em níveis elevados. Os poluentes primários também tiveram altas.

Dia 23/09/2003 – As imagens de satélite, as baixas pressões e altas temperaturas (34°C) evidenciam a atuação de tempo depressionário da Baixa do Chaco e domínio da TAC. Neste dia, que representa o final do período de estudo no ano de 2003, os dados diários de poluentes primários se elevaram. Foi um dia com radiação global sutilmente superior ao dia anterior, com quase 250W/m^2 . Houve aumento de calmarias e ventos pouco superiores a 5m/s foram os mais fortes e sopraram de noroeste.

Este episódio encerra o estudo do inverno de 2003, cujos dados obtidos tiveram qualidade inferior aos dos outros invernos estudados. A estação Ibirapuera operou com bastantes falhas na medição dos poluentes e de dados atmosféricos. Problemas na coleta de dados para direção de ventos continuaram ocorrendo em alguns episódios do ano seguinte (2004), com melhora na série de dados dos poluentes.

As grandes concentrações de ozônio ocorreram em seqüência de dias com grande radiação global. Já os poluentes primários tiveram comportamento muito semelhante à curva inversa da umidade e da pressão, ou seja, aumentaram exatamente no dia em que a umidade e pressão caíram e vice-versa. Já em comparação com a temperatura, as curvas dos poluentes primários se encaixam na mesma variação. Enfim, ao passo que sistemas anticiclônicos foram atuantes e as massas de ar foram se continentalizando, houve aumento de concentração dos poluentes primários. Quando houve incremento de ar frio e úmido à massa de ar do sistema anticiclônico, aumentando sua atuação através do aumento de pressão, os poluentes primários tiveram redução de concentração.

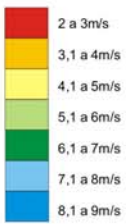
Episódio 7

LEGENDA

(IBI) IBIRAPUERA – CETESB
(CON) CONGONHAS - AEROPORTO

VENTOS

VELOCIDADE (CON)



DIREÇÃO (IBI)(CON)



C CALMARIAS
V VARIÁVEL
F FALHA

PREDOMINÂNCIA (IBI)



CONDIÇÃO SINÓTICA

- FPA** FRENTE POLAR ATLÂNTICA
- DIS** FRENTE POLAR ATLÂNTICA EM DISSIPACÃO
- REP** REPERCUSSÃO DE FRENTE POLAR ATLÂNTICA
- MPA** MASSA POLAR ATLÂNTICA
- MPV** MASSA POLAR ATLÂNTICA VELHA
- PVC** MASSA POLAR ATLÂNTICA VELHA CONTINENTALIZADA
- MTA** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA
- TLI** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA COM LINHAS DE INSTABILIDADE
- TAC** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA CONTINENTALIZADA

Org. Rafael F. D. Heiber (2006)

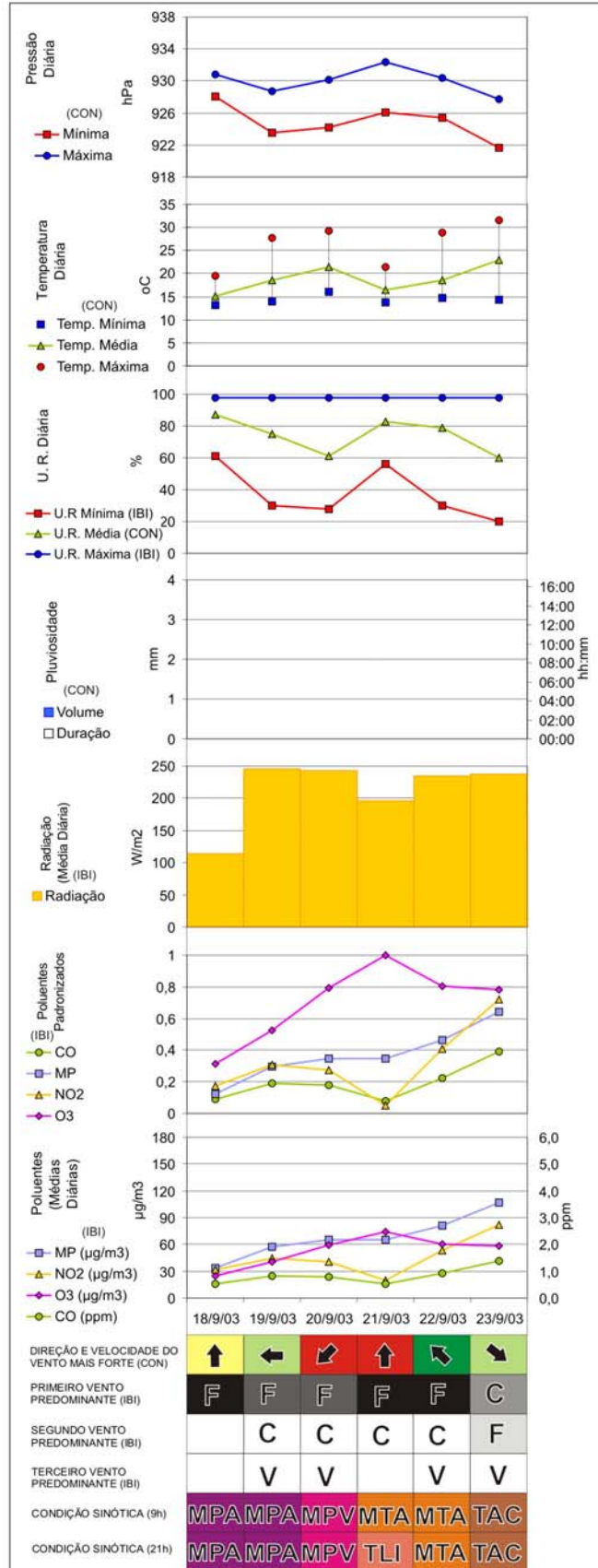


Figura 26. Gráfico de análise rítmica do episódio 7.

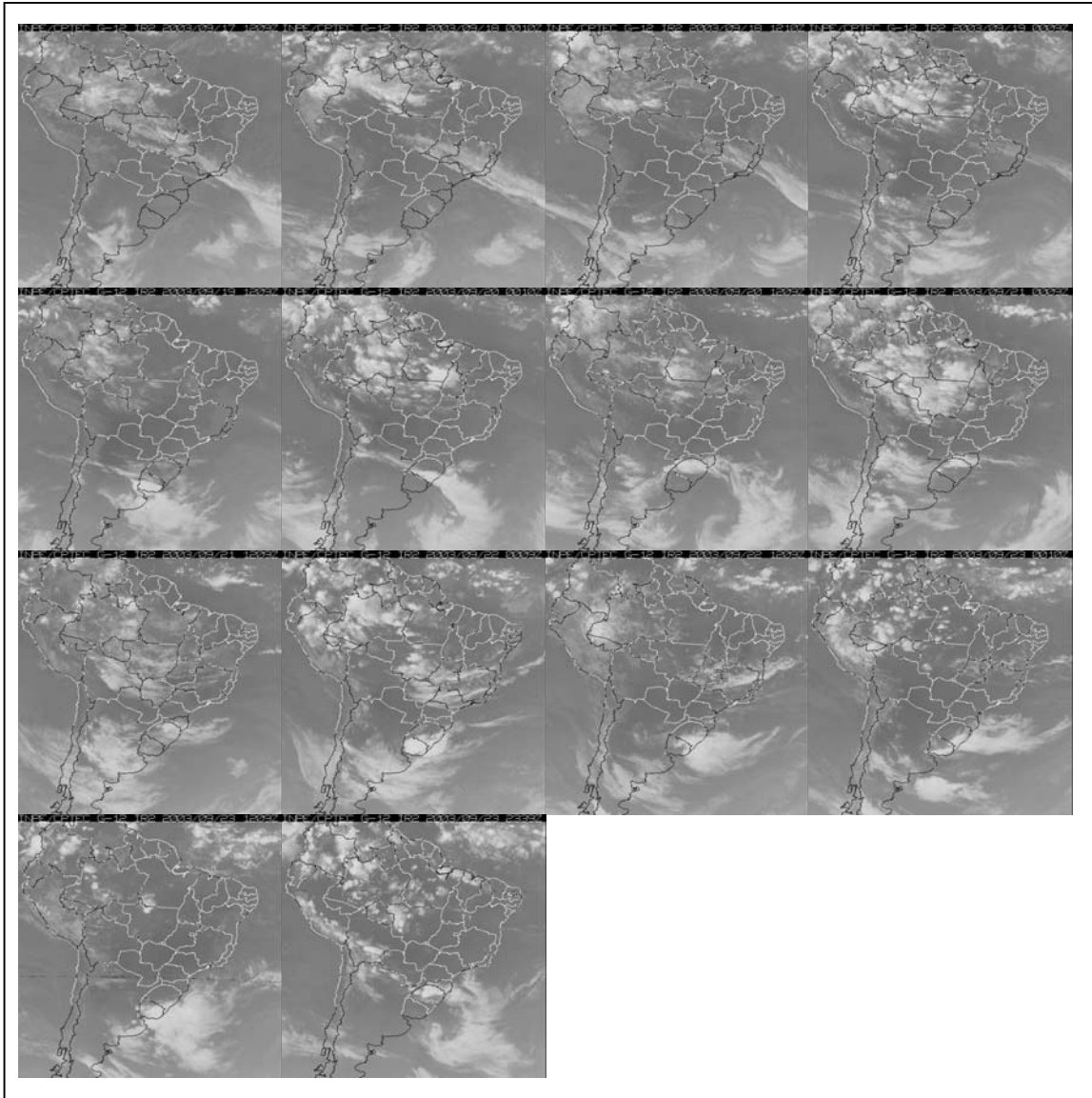


Figura 27. Imagens do Satélite GOES de 17/09/2003 a 23/09/2003.

3.4.8. Episódio 8 (22/06 a 25/06/2004): Massa Polar Atlântica Velha - estabilidade atmosférica e repercussão, incursão e dispersão de Frente Polar Atlântica.

No primeiro dia do inverno de 2004 os poluentes primários, principalmente o CO, já estavam com concentração média na atmosfera. O ozônio teve baixíssimas concentrações ao longo do período de quatro dias do episódio. O dia 23/07/2004 foi o mais poluído por CO no inverno desse ano, com quase 3,5ppm.

Dia 22/06/2004 – Havia nebulosidade no sudeste do país, e um grande sistema frontal se organizava na Patagônia.

As imagens de satélite e os dados de superfície que marcaram pressões superiores a 931hPa, temperaturas entre 14°C e 24°C e umidade acima de 50%, mostram a ação de uma MPV sobre a RMSP. No Aeroporto de Congonhas o vento mais forte registrado foi de noroeste, com menos de 5m/s, enquanto muitas horas de calmarias foram detectadas na estação Ibirapuera.

Os poluentes primários já estavam com médias concentrações na baixa troposfera. O ozônio teve pequenos teores de concentração.

Dia 23/06/2004 – Durante o período diurno a MPV esteve atuante sobre a RMSP, mantendo condições desfavoráveis à dispersão de poluentes, com muitas horas de calmaria. No Aeroporto de Congonhas a força dos ventos mais fortes foram semelhantes ao dia anterior, apenas com mudança de direção, soprando de leste. Foi o dia mais poluído por poluentes primários, ao passo que o ozônio permaneceu em pequenas concentrações.

Dia 24/06/2004 e 25/06/2003 – A Frente Polar Atlântica que havia se formado no dia 22, chegou rapidamente ao Estado de São Paulo, repercutindo na manhã do dia 24 e atuando com maior intensidade no período vespertino até a primeira metade do dia 25, quando se iniciou o processo de dispersão da frente. O cenário frontal trouxe ainda mais nebulosidade à RMSP, reduziu as temperaturas, além de elevar a umidade do ar, ocasionando fraca chuva por cerca de meia hora. Os ventos mais fortes foram de norte e com velocidade máxima

próxima a 4m/s, com bastantes calmarias medidas na estação Ibirapuera, que ainda apresentava problemas técnicos na identificação horária da direção dos ventos.

Os dois dias com tipos de tempo associados ao sistema frontal e bastante nebulosidade reduziu as concentrações dos poluentes primários e secundário, porém, a atuação da frente com fraca dinâmica horizontal, comparada a outros episódios, não reduziu substancialmente os níveis de poluição, fazendo-os apenas retornar aos teores médios do início do episódio.

Este episódio é mais um exemplo da ação de sucessão de tipos de tempo anticiclônicos polares trazendo adversidades à dispersão dos poluentes emitidos na área de estudo. A fraca radiação e a ausência de ventos fortes de sul, responsáveis pelo transporte de poluentes produzidos em Cubatão, não permitiram altas concentrações de ozônio sobre a RMSP.

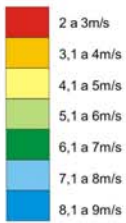
Episódio 8

LEGENDA

(IBI) IBIRAPUERA – CETESB
(CON) CONGONHAS - AEROPORTO

VENTOS

VELOCIDADE (CON)



DIREÇÃO (IBI)(CON)



PREDOMINÂNCIA (IBI)



CONDIÇÃO SINÓTICA

- FPA** FRENTE POLAR ATLÂNTICA
- DIS** FRENTE POLAR ATLÂNTICA EM DISSIPACÃO
- REP** REPERCUSSÃO DE FRENTE POLAR ATLÂNTICA
- MPA** MASSA POLAR ATLÂNTICA
- MPV** MASSA POLAR ATLÂNTICA VELHA
- PVC** MASSA POLAR ATLÂNTICA VELHA CONTINENTALIZADA
- MTA** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA
- TLI** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA COM LINHAS DE INSTABILIDADE
- TAC** MASSA TROPICAL ATLÂNTICA CONTINENTALIZADA

Org. Rafael F. D. Heiber (2006)

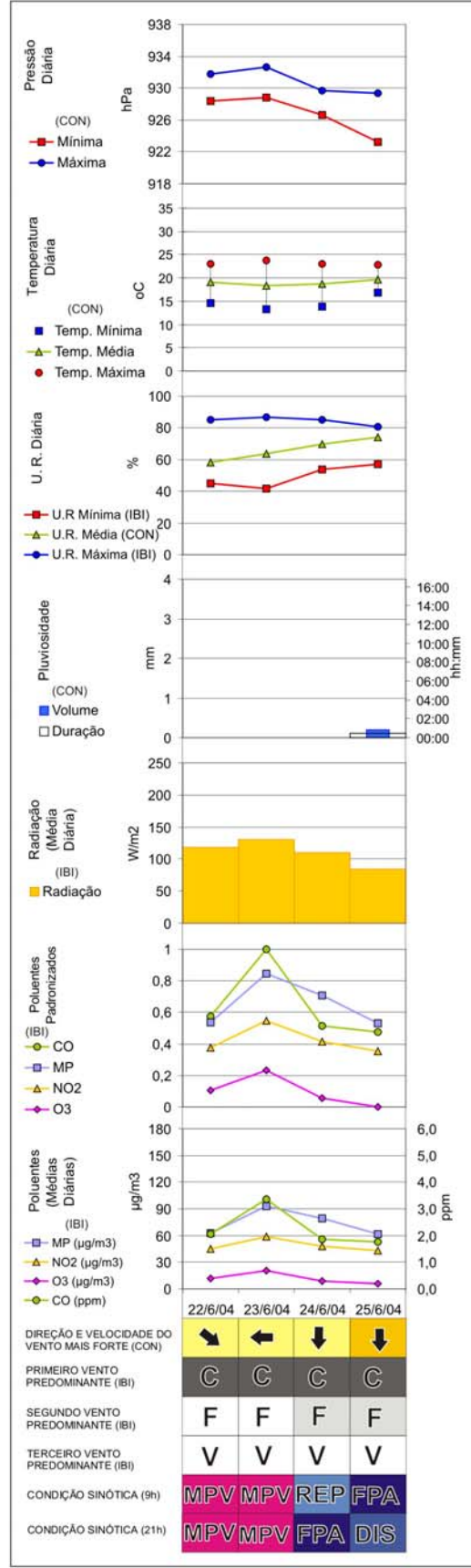


Figura 28. Gráfico de análise rítmica do episódio 8.

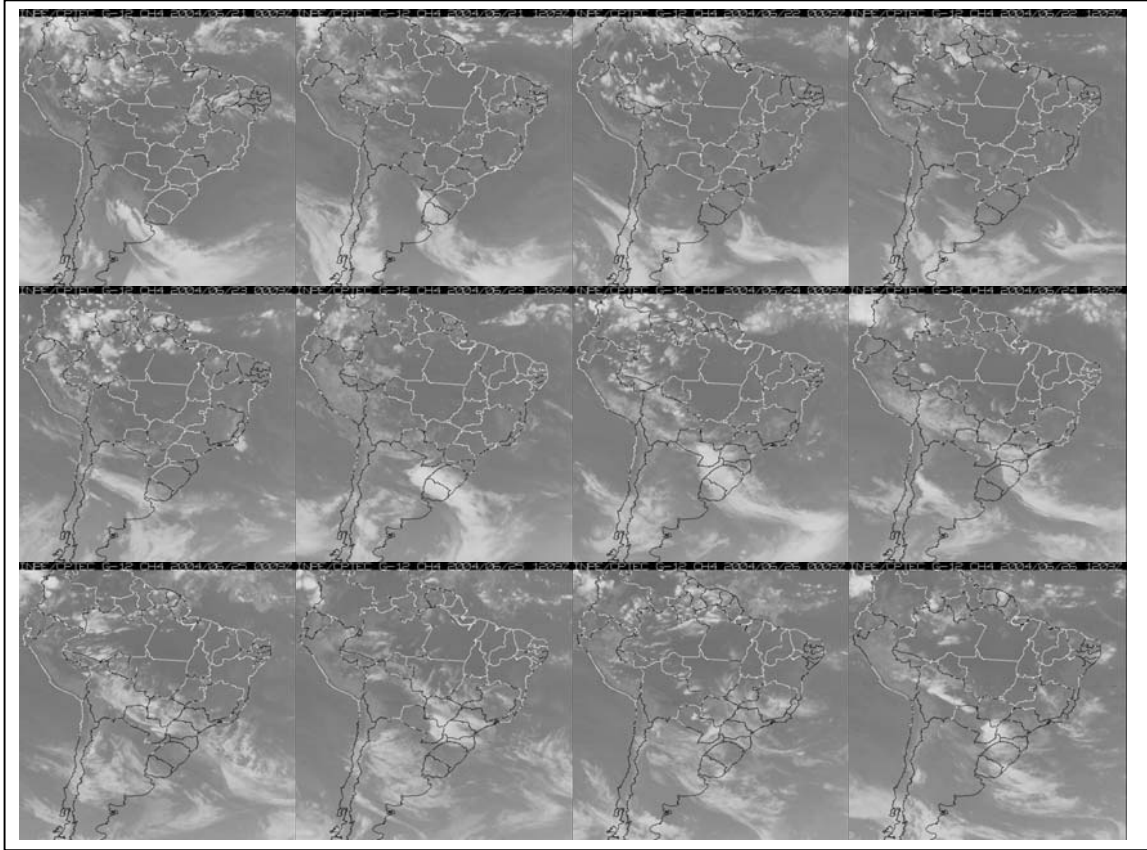


Figura 29. Imagens do Satélite GOES de 20/06/2004 a 26/06/2004.

3.4.9. Episódio 9 (16/08 a 24/08/2004): Massa Tropical Atlântica em processo de continentalização: bloqueio de passagem frontal, pouca nebulosidade e repercussão, ação e dissipação da Frente Polar Atlântica.

Entre os dias 16/08/2004 e 24/08/2004 todos os poluentes analisados partiram de concentrações baixas e atingiram altos níveis ao longo do período, retornando a níveis baixos nos últimos dias do episódio. Com exceção do CO, todos os poluentes tiveram praticamente os mais elevados níveis diários do inverno de 2004. O ozônio teve concentrações um pouco maiores em outra ocasião, no final do inverno, mas falhas de dados descartaram a análise do eventual episódio.

Os dados de direção de ventos horários do Ibirapuera continuaram incompletos, embora as falhas tenham sido menores que aquelas do inverno de 2003.

A ausência de cartas sinóticas e o conseqüente uso de imagens de satélite trouxe dificuldades especiais nos dias 18, 19 e 20/08, quanto à identificação dos sistemas atmosféricos. A solução que satisfez as necessidades foi a utilização de imagens da banda visível do satélite Meteosat como complemento às imagens da banda 4 (infravermelho).

Dia 16/08/2004 – Domínio de MPA nas regiões sudeste e centro-oeste do Brasil e presença de FPA, com sistema frontal orientado de sudeste a noroeste, cobrindo Uruguai, Rio Grande do Sul, norte da Argentina, Paraguai e sul da Bolívia. No início da noite a FPA teve pequena repercussão na RMSP pelo sudeste do estado de São Paulo, onde o sistema anticiclônico perdeu predominância por poucas horas. Na RMSP as temperaturas variaram entre 14°C e 24°C e os ventos mais fortes (até 5m/s) e predominantes vieram da direção sul, com calmarias registradas no Ibirapuera por mais de 60% das horas. Houve pouca nebulosidade e alta radiação global. Os poluentes tiveram pequena concentração no ar.

Dia 17/08/2004 – Dispersão da frente quando a mesma chegou ao sudeste do estado de São Paulo e novo domínio do anticiclone subtropical com a MPV. Os ventos sul não foram participativos como no dia anterior enquanto no Aeroporto de Congonhas, ventos de aproximadamente 5m/s de nordeste foram registrados. Na estação Ibirapuera as calmarias

se mantiveram nos níveis do dia anterior. Em decorrência da mudança dos ventos e permanência de horas de calmaria, o ar ficou mais poluído.

Dia 18/08/2004 e 19/08/2004 – Domínio da Massa Tropical Atlântica que manteve a FPA em processo de dissipação nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Com pequeno aumento da umidade relativa do ar e ventos de sudeste com mais de 6m/s, do dia 18 para o dia 19 houve estabilização na evolução da concentração dos poluentes. O NO_2 foi a substância que mais evoluiu em concentrações entre os dias 17, 18 e 19, alcançando as maiores concentrações do episódio ($95\mu\text{g}/\text{m}^3$) em 19/08.

Dias 20/08/2004 e 21/08/2004 – Processo de continentalização da MTA, que adquiriu características de TAC: queda de pressão, queda de umidade e temperaturas máximas próximas de 30°C .

A sucessão de tempos anticiclônicos, polares e tropicais, desde os dias anteriores, causou o manutenção dos altos valores de NO_2 e elevação de CO e MP, cuja concentração foi a maior do inverno de 2004 (cerca de $110\mu\text{g}/\text{m}^3$). O ozônio teve pequena queda, mas se manteve em concentrações médias e altas. A radiação global média ficou próxima de $200\text{ W}/\text{m}^2$.

Dia 22/08/2004 – Repercussão e atuação de FPA sobre a RMSF e ventos de até 7m/s de sudeste auxiliaram na dispersão dos poluentes primários. No Ibirapuera, os ventos sul sopraram por cerca de 40% do tempo. Houve aumento da umidade do ar, porém os dados da estação Ibirapuera demonstraram anomalia, pois seus dados máximos foram inferiores ou bem próximos aos dados da média diária de umidade do Aeroporto de Congonhas. O fato ocorreu desde o dia 22 até o final do episódio, enquanto os dados de mínimas diárias de umidade da estação Ibirapuera acompanharam as variações das médias diárias do Aeroporto de Congonhas.

O ozônio teve altas concentrações registradas ($70\mu\text{g}/\text{m}^3$), mesmo com a queda da radiação ($170\text{ W}/\text{m}^2$) e do dióxido de nitrogênio.

Dia 23/08/2004 – Dissipação da FPA com ventos moderados de noroeste. Na estação Ibirapuera, além de calmarias, ventos sul e noroeste tiveram, cada um, quase 20% de participação ao longo do dia. Houve queda acentuada da poluição.

Dia 24/08/2004 – Situação pós-frontal com domínio da MPA e definição de ventos de sul e sudeste que sopraram forte e intensamente. Houve aumento de nebulosidade, de umidade e de pressão. A temperatura caiu para cerca de 15°C, com reduzida amplitude térmica.

Os poluentes primários e o ozônio tiveram baixíssimos níveis de concentração no ar sob as condições pós-frontais.

Neste episódio, mais uma vez os poluentes primários tiveram suas concentrações elevadas ao longo da atuação de sistemas anticiclônicos, tanto o polar quanto o tropical, que bloquearam a ação de frentes polares. O ozônio teve condições favoráveis a sua grande presença no ar, com grande presença de dióxido de nitrogênio e radiação solar.

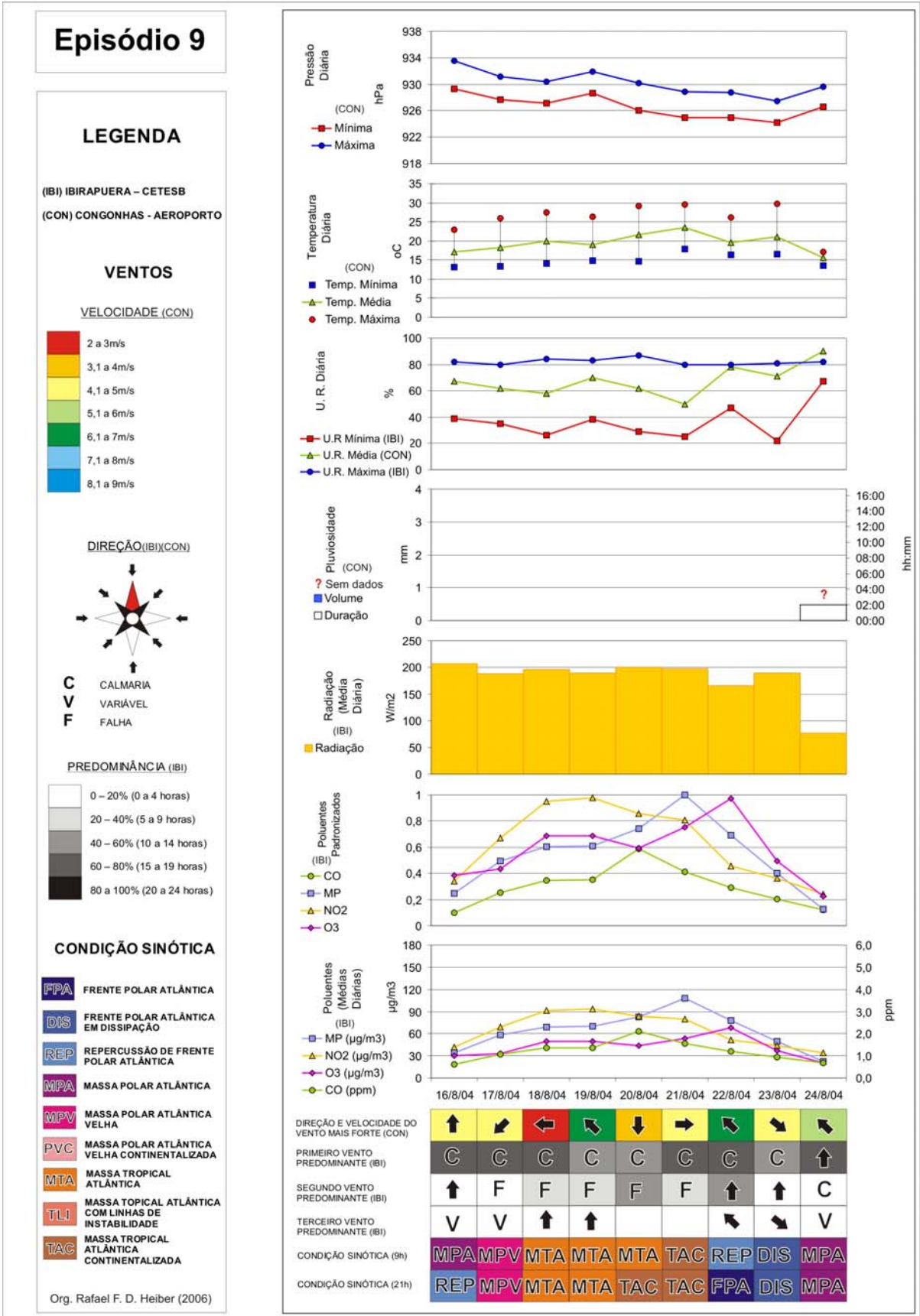


Figura 30. Gráfico de análise rítmica do episódio 9.

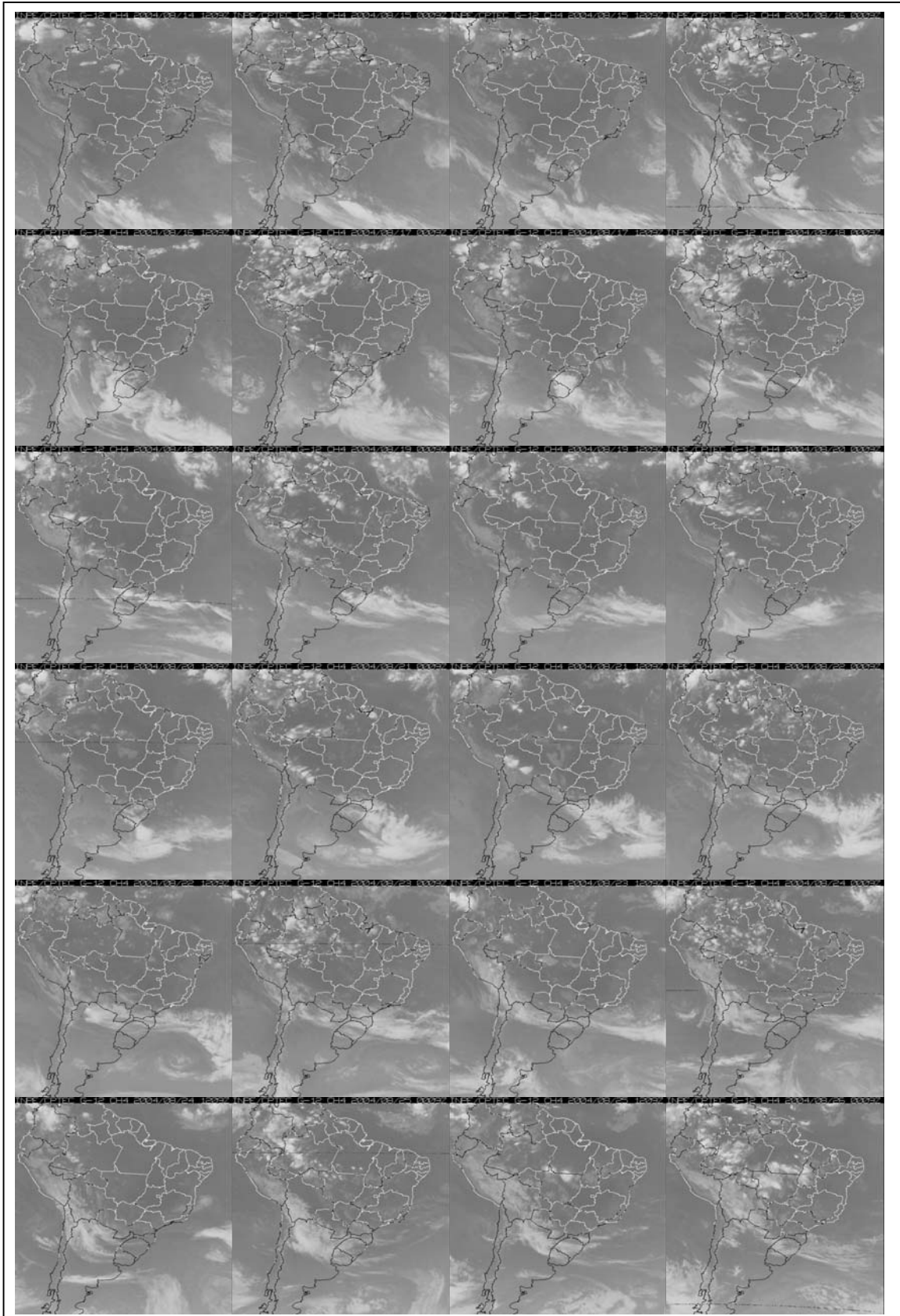


Figura 31. Imagens do Satélite GOES de 14/08/2004 a 25/08/2004.

3.4.10. Episódio 10 (04/09 a 12/09/2004): Massa Polar Atlântica em processo de tropicalização – bloqueio de passagem frontal e repercussão de Frente Polar Atlântica.

O último episódio analisado guarda importantes semelhanças com o episódio anterior no que diz respeito ao comportamento dos poluentes. O CO foi o poluente que teve os menores valores, o MP10 teve teores médios-altos e o NO₂, juntamente com o O₃, tiveram altas concentrações. De modo geral, ainda em comparação ao episódio anterior, os poluentes primários estiveram em menores concentrações, principalmente o MP e o CO.

As imagens de satélite da banda visível também foram utilizadas para auxiliar na identificação dos sistemas atmosféricos. Os dados de direção dos ventos do Ibirapuera tiveram menos falhas. A série de dados de umidade relativa do ar (máximas e mínimas diárias) desta estação também esteve comprometida, tomando-se apenas os dados da estação de Congonhas (médias diárias) como parâmetros de análise.

Dia 04/09/2004 – Repercussão de FPA na RMSP, com temperaturas entre 16°C e 22 °C associadas a nebulosidades e alta umidade do ar. Ventos de sul e sudeste constantes e velocidades máximas de aproximadamente 6m/s. Poluentes primários não estiveram em altas concentrações, mas o ozônio já estava com níveis médios, em dia com radiação global média de 150W/m². No quadro sul-americano não houve organização de sistemas frontais ao sul do Brasil.

Dias 05/09/2004 e 06/09/2004 – Quedas acentuadas de pressão (inferiores a 923hPa), grande diminuição de umidade e aumentos das temperaturas máximas, que se aproximaram de 29 °C (mínima de 16°C), caracterizando-se um período de transição entre MPA e MPV. A radiação foi superior a 200W/m². Durante esse período houve ventos de até 5m/s provenientes dos quadrantes sul e sudeste. Na estação Ibirapuera as calmarias atuaram cerca de 70% e os ventos sul tiveram representatividade em cerca de 20% do tempo.

O monóxido de carbono, principal poluente emitido por veículos automotores, não teve condições para que altas concentrações fossem atingidas. O dióxido de nitrogênio também apresentou modestos teores de concentração, enquanto material particulado chegou a níveis médios. O ozônio alcançou um dos maiores níveis do inverno em 2004 no dia 5 (70µg/m³). No dia seguinte, suas concentrações foram um pouco menores, apesar de maior ação da radiação global medida no Ibirapuera.

Dias 07/09/2004 a 09/09/2004 – Período de bastante estabilidade, pouca nebulosidade, quedas sucessivas de umidade, sucessivos aumentos de temperatura e diminuição da pressão. O sistema frontal conseguiu chegar a território brasileiro, mas as condições de bloqueio pelo sistema anticiclônico foram evidentes nas imagens do GOES. Apesar do aumento de força dos ventos de sul, as horas de calmaria foram superiores às dos dias precedentes, superando 60% das horas. A radiação continuou superior a 200W/m^2 , como consequência da fraca nebulosidade ao longo do período.

Sob tais condições, os poluentes primários tiveram as maiores concentrações, destacando-se o NO_2 , cuja concentração média diária foi a maior de 2004, com cerca de $100\mu\text{g/m}^3$. O ozônio se estabilizou em níveis altos ao longo dos três dias.

Dia 10/09/2004 – Aproximação da FPA do estado de São Paulo que repercutiu no período vespertino, provocando aumento da umidade do ar e diminuição da temperatura. Os ventos sul foram fortes (quase 8m/s) e na estação Ibirapuera foram predominantes. Os poluentes primários tiveram quedas bastante sensíveis. O ozônio teve os mesmos níveis dos dias anteriores.

Dia 11/09/2004 e 12/09/2004 – A FPA continuou repercutindo durante os dois dias. Através das imagens de satélite utilizadas não foi possível identificar penetração patente da FPA na RMSP, contudo, os dados de superfície apontam para sua influência, seja por completa incursão, seja por repercussão. Houve aumento de umidade, chuva fraca e quedas acentuadas da temperatura máxima. Os ventos continuaram em situação semelhante ao dia anterior e a qualidade do ar melhorou.

No último episódio analisado, reforçam-se as informações adquiridas a partir dos episódios anteriores. Os poluentes primários se concentraram com o aumento das calmarias. O CO , principal poluente emitido pelos automóveis, não teve grandes concentrações neste episódio em que houve boa movimentação advectiva de sul, mesmo considerando as calmarias registradas pela estação Ibirapuera, cujas medições sempre foram

prejudicadas por árvores nas imediações. Os outros poluentes tiveram concentrações maiores, o que demonstra suas complexidades: o MP10 com suas múltiplas fontes de produção e ressuspensão, o NO₂ de fontes diversas (indústrias, automóveis e reações químicas) e o O₃. Mesmo assim foi possível reconhecer a necessidade de alta radiação global e a atuação do sistema anticiclônico subtropical como motor que transporta ozônio emitido pelas chaminés industriais de Cubatão, principalmente nos dias de freqüentes ventos de sul, que de início trazem os poluentes concentrados em Cubatão e, tão logo não haja grandes quantidades de poluentes a transportar, passa a limpar a atmosfera sobre a RMSP da poluição produzida localmente. Quanto aos tipos de tempo prejudiciais à dispersão dos poluentes primários, repetem-se as condições sucessivas de tropicalização de sistemas anticiclônicos, com conseqüente continentalização das massas de ar (aquecimento, perda de umidade e calmarias).

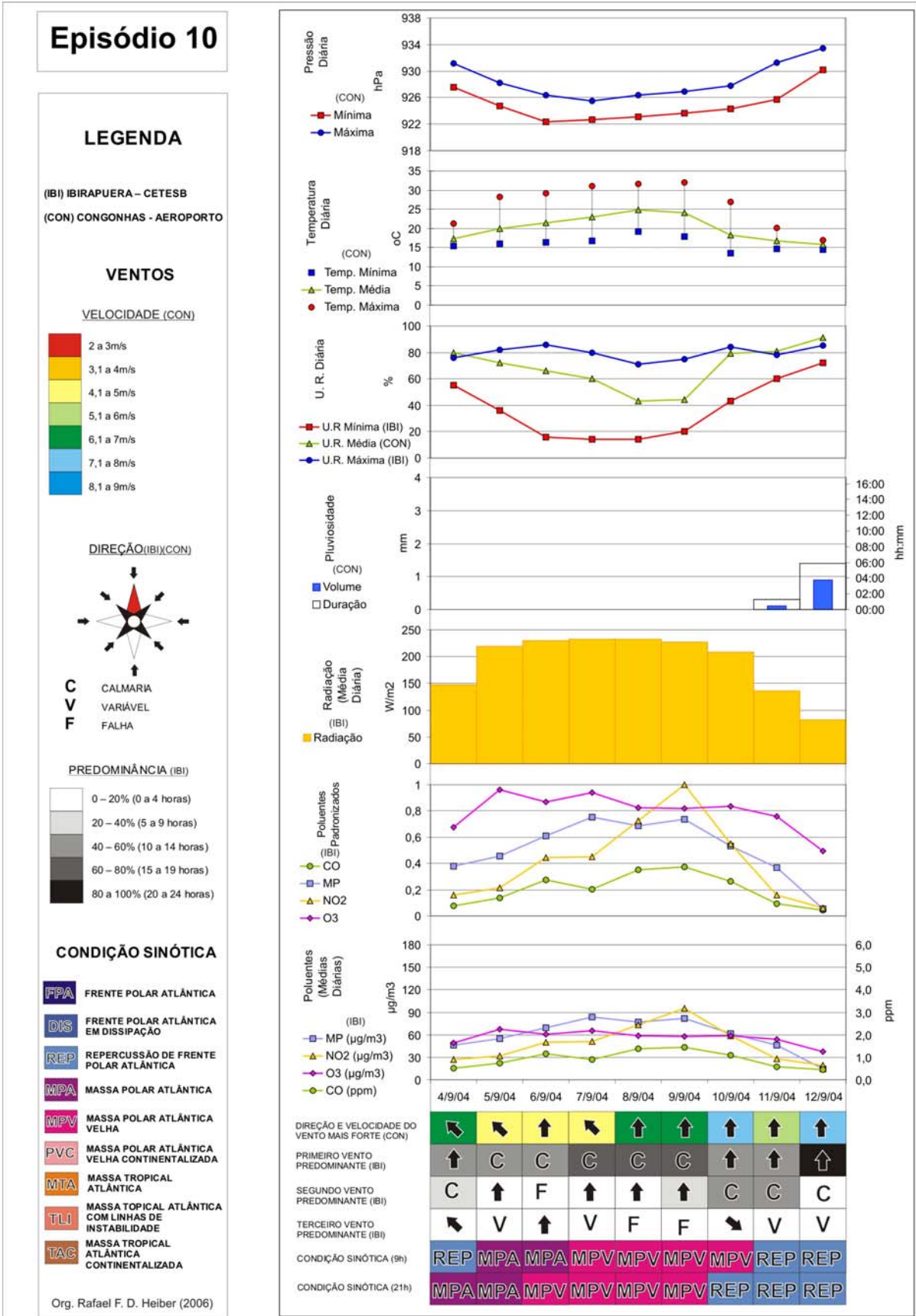


Figura 32. Gráfico de análise rítmica do episódio 10.

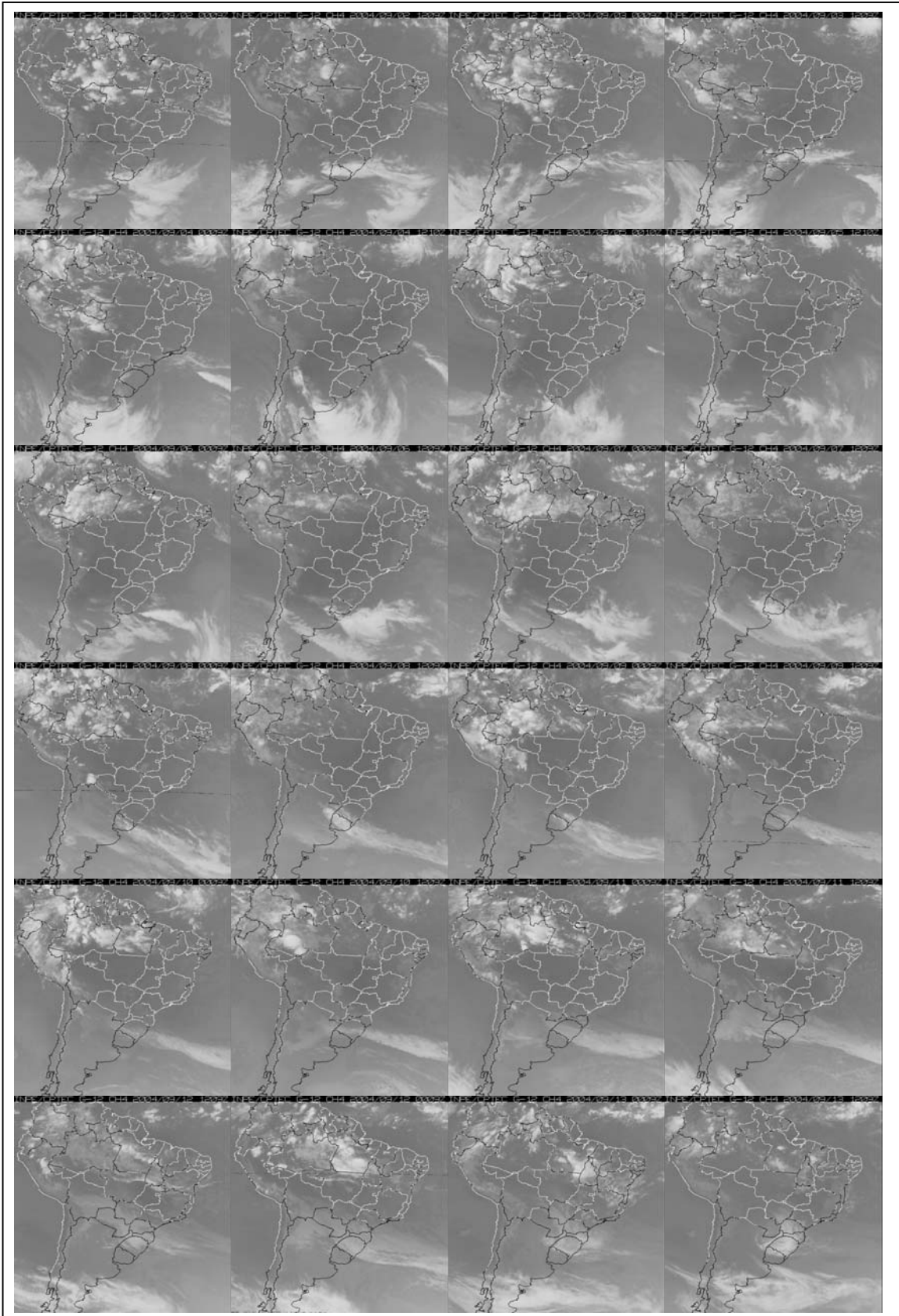


Figura 33. Imagens do Satélite GOES de 01/09/2004 a 13/09/2004.

4. SÍNTESE DOS RESULTADOS OBTIDOS.

Os dez episódios analisados revelaram dois perfis diferentes: episódios de intensa poluição por poluentes primários e episódios de intensa poluição por ozônio.

Os períodos representativos de intensa poluição por monóxido de carbono, material particulado e dióxido de nitrogênio foram caracterizados por longo período de calmarias por causa de forte ação anticiclônica que impediu as invasões frontais. Os processos de tropicalização da MPA e de continentalização MPV, que influenciaram o aumento das temperaturas e a queda da umidade, representaram os dias de aumento de poluição do ar.

Os mais altos níveis diários de poluição por ozônio foram caracterizados por ação de massas tropicais atlânticas, massas tropicais continentalizadas, massas polares velhas continentalizadas e massas polares em processos de tropicalização, com dias bastante ensolarados e quentes em que as calmarias não foram responsáveis pelo aumento das concentrações de ozônio, ao contrário dos episódios de poluentes primários. Os ventos tiveram grande importância no transporte do ozônio e seus precursores, entre eles o NO_2 . Constatou-se, principalmente a influência de ventos sul e sudeste nos dias mais poluídos, associados a alto nível de radiação solar. Contudo, a série de dados de ventos não permite análises mais profundas a respeito da circulação regional, pois os dados da fonte adequada às coletas, o Aeroporto de Congonhas, apenas indicam a velocidade e a direção do vento mais forte no dia. Apesar das deficiências, ficou claro que as calmarias não são causadoras de elevado nível de concentração de ozônio nas medições da estação Ibirapuera, presumindo-se a influência das áreas industriais do ABCD e de Cubatão na qualidade do ar na área central da RMSP.

Todos os episódios analisados, contemplando a evolução da concentração dos poluentes, se iniciaram com dias em situação pós-frontal e terminaram com a ação de FPA, seja por dissipação, repercussão ou ação patente da frente. Observa-se, pois, a limpeza do ar pelos sistemas frontais atuantes na RMSP.

A comparação entre episódios de mesmos poluentes para invernos diferentes, a partir dos dados não padronizados de poluição nos gráficos de análise rítmica, mostra que o ozônio teve concentrações máximas diárias muito semelhantes nos quatro invernos analisados. O mesmo não ocorreu com os outros poluentes. A tabela 6 ilustra a situação:

Tabela 6. Valores diários máximos de poluição nos episódios de intensa poluição por CO, MP10, NO₂ e O₃ e suas variações nos invernos de 20001 a 2004

	CO (ppm)	MP10(µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)
2001	5,25	137,8	*	68,3
2002	2,86	104,7	78,1	63,2
2003	*	156,2	108,5	73,8
2004	3,35	108,1	95,4	68,2
VARIAÇÃO %	83,5%	49,1%	39%	16,7%

Episódios de poluição por CO e NO₂ não foram analisados nos anos de 2003 e 2001 respectivamente, como fora assinalado no capítulo 3.3, devido a falhas na série de dados. Porém, é possível verificar que seus valores diários máximos, nos episódios estudados, possuem grande amplitude de variação, o que ocorre também com o MP10. Já o O₃ se diferencia dos outros, pois seus valores máximos dos episódios foram semelhantes.

Apesar da regularidade dos valores máximos de O₃ e de seu ritmo diário bem definido, este poluente foi o que apresentou maiores dificuldades de análise nos episódios devido à sua complexidade de poluente secundário cujas altas concentrações estão suscetíveis aos ventos que transportam seus precursores emitidos em áreas industriais, como é o caso do NO₂. Além do O₃ e do NO₂, que dependem de fontes industriais de condições para ocorrência de reações químicas, o MP10 também apresentou dificuldades por se tratar de um poluente com diversas fontes de emissão e ressuspensão.

Contudo, em relação ao CO, atribuímos as diferenças de concentrações à ação de intensos sistemas anticiclônicos bloqueadores de sistemas frontais, com tipos de tempo em que atuaram a MPA e a MPV, num cenário de muita calmaria ao longo dos dias, finalizado apenas pelas incursões da FPA, causadora de instabilidade na atmosfera, resultando na remoção dos poluentes do ar da RMSP.

5. CONCLUSÕES

Consideramos que o desenvolvimento e a simultânea aplicação do roteiro metodológico cumpriram os objetivos desta pesquisa, que eram justamente o de elaborar um roteiro para o estudo da poluição do ar causada por veículos automotores que circulam na Região Metropolitana de São Paulo, confrontando a poluição com os tipos de tempo atuantes.

Constatamos que a análise episódica do MP10, O₃ e NO₂ baseada no roteiro elaborado não foi satisfatória, ao contrário daquela aplicada ao CO, que é maior representante do grupo dos poluentes emitidos por veículos automotores leves de uso individual. Isto se deu por causa da complexidade que envolve os outros poluentes, que, ou possuem fontes variadas de emissão e não exclusivamente os veículos automotores, caso do MP10 e do NO₂, ou estão envolvidos em reações químicas na troposfera, caso do NO₂ e principalmente do O₃. Estas condições de variabilidade de tipos de fontes e participação em reações químicas não foram satisfatoriamente abrangidas pelo roteiro. Assim, o roteiro metodológico foi mais preciso para o CO, o poluente que se apresenta diretamente como o reflexo da ineficiência de programas de transporte coletivo e do cotidiano baseado no uso do que é privado e individual, cujo exemplo maior é o carro.

Os resultados da análise rítmica confirmaram as bases teóricas a respeito das escalas espaciais local e, principalmente, urbana, para a análise dos poluentes gerados por veículos automotores, além da importância escala regional no caso do ozônio e do NO₂. Os tipos de tempo atuantes em toda a RMSP, foram os responsáveis pela não dispersão dos poluentes, aumentando-se assim a poluição. No caso de invalidação do embasamento teórico, esperávamos resultados em que os tipos de tempo sobre a RMSP não seriam os grandes responsáveis pelo aumento da poluição, sendo necessária a busca de causas locais para as devidas explicações. Por este motivo foi importante o estudo prévio de cada poluente e da área de estudo, o que norteou a leitura dos dados e das informações deles extraídas.

Após efetuadas as análises, cremos que a mais importante adequação que o roteiro deve sofrer, se aplicado futuramente, diz respeito aos poluentes. Apesar de resultados alcançados para os quatro poluentes, consideramos que o monóxido de carbono é o que mais se adequa à proposta de trabalho, tanto pelas suas características de estabilidade, funcionando como *tracer* atmosférico, quanto pela sua intrínseca relação com os carros.

Apresentamos na figura 34 uma esquematização final do roteiro metodológico:

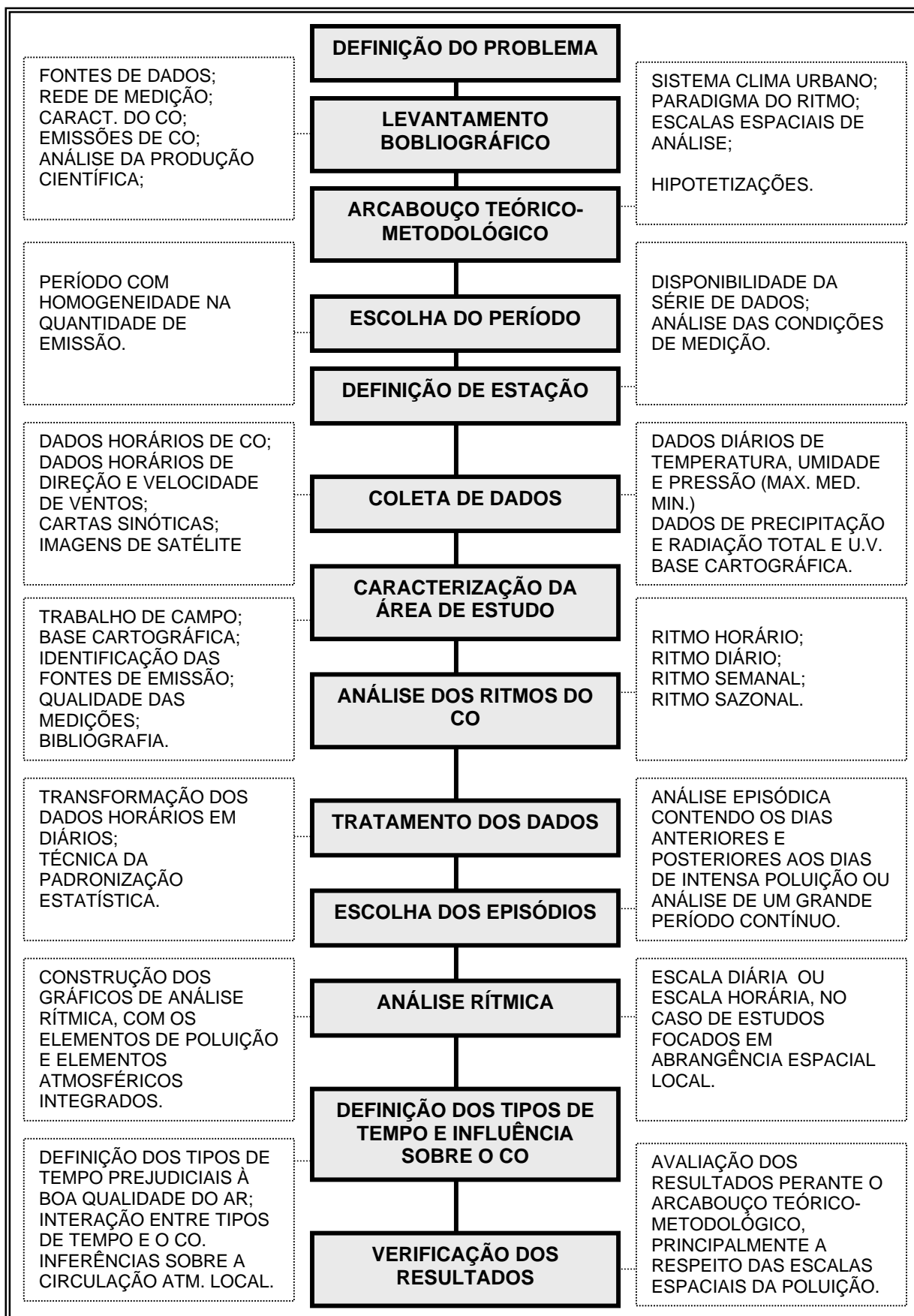


Figura 34. Proposta metodológica adequada ao estudo do CO na RMSP.

Assim, finalizamos nossa proposta de oferecer um roteiro aplicável aos estudos de poluição atmosférica com foco nos danos ambientais causados por veículos automotores de uso individual, com o uso do paradigma do ritmo climático e a identificação de tipos de tempo.

Acreditamos que o roteiro pode ser mais uma demonstração, aos geógrafos, da possibilidade dos estudos de poluição atmosférica sem a necessidade da utilização de caros recursos computacionais e sistemas de modelagem numérica. No entanto, reconhecemos a importância dos estudos que tentam melhorar estes instrumentos, que em breve poderão representar uma precisa e acessível ferramenta de trabalho, contudo, sem abolir a importância da perspectiva geográfica contemplada pelas observações de campo e pelo entendimento das inter-relações dos elementos antrópicos e geocológicos, formadores e transformadores do espaço geográfico.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. L. **Previsores Sinóticos-Meteorológicos para dispersão de Poluentes na Região da Grande São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1993. 131p.

ALVES, R. C. M. **Descrição das circulações locais na Região de Candiota-RS e seus efeitos no transporte de poluentes**. 2000. 128f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ALVES, R. C. M. **Estudo da dispersão do SO₂ emitido pela usina termelétrica de Candiota-RS**. 1996, 130f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

BALDINI, M. D. A. **Cubatão: um exemplo de relação conflituosa entre o homem e o meio**. 1994. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

BOICE, D. C., HUEBNER, W.F., KILLEN, R. M. Reciprocity between the urban heat island effect and air pollution. In: **URBAN air pollution**. Inglaterra: Computational Mechanics Publications. 1995. v.1, p. 267-294.

BORGES, Alessandro Santos. **Impacto do refinamento da grade horizontal do modelo fotoquímico CIT nas estimativas de concentração de poluentes atmosféricos**. 2003, 95f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BORREGO, C.; COUTINHO, M.; BARROS, N. Atmospheric pollution in the Lisbon airshed. In: POWER, H.; MOUSSIOPOULOS, N.; BREBBIA, C. A. **Urban air pollution**. Southampton: Computational Mechanics. 1994. v.1, p.100-136.

BOUBEL, R. et al. **Fundamentals of air pollution**. 3rd ed. Academic Press. 1994. 498p.

BRAGA, A. L. F. **Quantificação dos efeitos da poluição do ar sobre a saúde da população pediátrica de São Paulo e proposta de monitorização**. 1998. 225f. Tese (Doutorado em Medicina) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CALBÓ, J.; BALDASANO J. M.; COSTA, M. Importance of atmospheric transport processes in the urban air quality: the case of Barcelona. In: POWER, H. MOUSSIOPOULOS, N. **Urban air pollution**. Southampton: Computational Mechanics, 1996. v.2, p. 41-68

CARDOSO, M. F. **Produção e transporte de ozônio troposférico em Cubatão/ SP.** 1998. 163f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CARVALHO, J. C. **Estudo numérico da dispersão de poluentes na camada limite convectiva.** 1995. 95f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

CASTRO, M. G. da S. **A chuva ácida na cidade de São Paulo.** 1993. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1993.

CERNUSCHI, S. et al. Statistical models of CO concentration in a large urban area. In. BREBBIA C. A.; CAUSSADE, B.; POWER, H. **Air pollution IV: monitoring, simulation and control.** Inglaterra. Computational Mechanics Publications, 1996. p.697-706.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2000.** São Paulo, 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2001.** São Paulo, 2002.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2002.** São Paulo, 2003.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2003.** São Paulo, 2004.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, **Caracterização das Estações da Rede Automática de Monitoramento da Qualidade do Ar na RMSP: Estação Ibirapuera.** São Paulo, 2004 b.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, **Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo – 2004.** São Paulo, 2005.

CONDE, F. C. **Uma análise de componentes principais de efeitos ambientais sobre a morbidade de doenças respiratórias em São Paulo.** 2001. 122f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001

DANNI-OLIVEIRA, I. M. **A cidade de Curitiba/PR e a poluição do ar-implicações de seus atributos urbanos e geocológicos na dispersão de poluentes em período de inverno.** 1999. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1999.

EVELYN, J. **Fumifugium**: on the inconvenience of the air, and smoke of London dissipated. Oxford, 1661. reprinted Manchester: National Smoke abatement Society, 1933.

FAST, J. D. Air pollutant transport within the México City Basin. In. BREBBIA C. A., JACOBSON M.; POWER H. **Air pollution VII**. Inglaterra: WIT Press, 1999. p. 822-832.

FERREIRA, M. **Estudo biogeográfico de líquens como indicadores de poluição do ar em Cubatão.** 1980. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

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

FRUEHAUF, G. L. C. **A deterioração da qualidade do ar e do clima na região metropolitana de São Paulo.** 1998. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade FLCH -USP, São Paulo.1998.

GALLEGO, L. P. **Tipos de tempo e poluição atmosférica no Rio de Janeiro (um ensaio em climatologia urbana).** 1972. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972.

GERARDI, L.H. de O.; SILVA, B.C.N. **Quantificação em Geografia.** São Paulo: DIFEL, 1981.

GOES-08. **Imagens bandas IR e Visível 20 jun. 2001 – 20 set. 2004.** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. Disponíveis em <http://satelite.cptec.inpe.br>. Acesso em 20 abr 2005.

HOWARD, L. **The climate of London deduced from meteorological observations made in the metropolis and at various places around it.** London: J & A Arcch, Cornhill, Longman & Co., 1833.

IBGE. **Perfil dos municípios brasileiros: meio ambiente 2002.** Rio de Janeiro, 2005. 394p.

KERR, A. A. F. S. **Parametrização da dispersão de poluentes e sua associação com modelos receptores em Cubatão.** 1995. 127f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo.** São Paulo, Hucitec, 1985.

LOPES, A. D. Estudo alerta que poluição pode causar hipertensão. **O Estado de São Paulo.** São Paulo, 30 set. 2005, Vida &, p.A22.

MACHADO, A. J. **Circulações locais associadas a formação de nevoeiro na grande São Paulo.** 1993. 149f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

MAIA, J. A. **Uma análise do conforto térmico e suas relações meteorológicas na cidade de São Paulo.** 2003. 136f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

MANFREDINI, L. M. **Condições meteorológicas para a precisão de situações críticas de poluição na grande São Paulo.** 1989. 137f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

MIRANDA, R. M. **Caracterização físico-química e propriedades óticas do aerossol urbano na Região Metropolitana de São Paulo.** 2001. 188p. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MONTEIRO, C. A. F. **Sobre a análise geográfica de seqüências de cartas de tempo.** Rio Claro, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras. 1963. 7p. (Publicação didática, Série A, nº1).

_____. **A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada sul-oriental do Brasil.** São Paulo: IG-USP, 1969. 68p. (Série Teses e Monografias nº1)

_____. **A análise ritmica em climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e e achegas para um panorama de trabalho.** Climatologia 1, São Paulo: IG-USP, 1971. 21p.

_____. **Teoria e Clima Urbano.** São Paulo: IGEOG-USP, 1976a (Série Teses e Monografias n. 25).

_____. **O clima e a organização do espaço no Estado de São Paulo:** problemas e perspectiva. São Paulo: IGEOG-USP, 1976b. 54p. (Série Teses e Monografias, n. 28).

_____. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico.** Florianópolis: UFSC, 1991. 241p.

_____. **A Dinâmica Climática e as chuvas no Estado de São Paulo.** Rio Claro, Unesp – Grupo de Pesquisa Climatologia Geográfica, 2000. v. 1. 1cd.

MONTEIRO, C. A.; MENDONÇA, F. **Clima Urbano.** São Paulo: Contexto. 2001.

MOUSSIOPOULOS, N. State of the art of air pollution modelling – needs and trends. In. BREBBIA C. A.; CAUSSADE, B.; POWER, H. **Air pollution IV:** monitoring, simulation and control. Inglaterra. Computational Mechanics Publications, 1996. p.47-56.

NAKAEMA, Walter M. **Modelagem da deposição úmida de poluentes atmosféricos na Grande São Paulo durante os meses de inverno.** 2001. 210f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

OLIVEIRA-CARDOSO, Andréa de Oliveira. **A Influência da temperatura da superfície do mar no clima de inverno na cidade de São Paulo.** 2001. 167f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PÉDELABORDE, P. **Introduction a l'étude scientifique du climat.** Paris: SEDES, 1970.

SANCHEZ-CCOYLLO, O. R. **Identificação da contribuição das fontes locais e remotas de poluentes na região meropolitana de São Paulo.** 2002. 170f. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SETZER, A et al. **Influências Meteorológicas na Poluição Atmosférica em São Paulo.** São José dos Campos: INPE, 1980. 36p.

SOBRAL, H. R. W. **Poluição do ar e doenças respiratórias em crianças da grande São Paulo:** um estudo de geografia médica. 1988. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

SORRE, M. **Les fondements de la Geographhie Humaine**. Paris: Libr. Armand Colin. 1951. (les fondemensts biologiques – le climat).

TARIFA, J. R.; MORAES, A. C. R.; COSTA, W. M. **Tipos de tempo e balanço de energia na cidade de São Paulo**. São Paulo: IG-USP, 1977. (Climatologia, n. 8).

TARIFA, J. R.; ARMANI, G. Unidades Climáticas Urbanas da Cidade de São Paulo. In **ATLAS Ambiental do Município de São Paulo**. São Paulo: SVMA e SEMPLA da PMSP, 2000.

TARIFA, J. R.; AZEVEDO, T. R. de (Org). **Os Climas na Cidade de São Paulo: teoria e prática**. São Paulo: GEOUSP, 2001 (Novos Caminhos 4).

THOMAS, W. E. **Man's hole in changing the face of Earth**. Chicago: The Wennergren Foundation for Antropological Research and National Science Foundation University Press, 1956.

YNOUE R. Y. **O impacto do uso de campos meteorológicos, diagnósticos e prognósticos na produção e dispersão de oxidantes fotoquímicos em São Paulo**. 2003. 96f. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ZAVATTINI, J. A. **Estudos do clima no Brasil**. Campinas: Alínea, 2004.