

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

LUCIENE NATALI

**Utilização dos produtos obtidos por sensoriamento remoto na
caracterização da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo**

**SÃO PAULO
2008**

Luciene Natali

**Utilização dos produtos obtidos por sensoriamento remoto na caracterização da
qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como condição parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências, Área de Concentração: Meteorologia.
Orientador: Prof. Dr. Edmilson Dias de Freitas

São Paulo

2008

*Aos meus queridos pais,
Joaquim e Paulina*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Edmilson pela orientação e amizade.

Ao Professor Paulo Artaxo pela ajuda com o projeto e incentivo.

Em especial à Andrea Castanho, pela concessão do modelo, pelas inúmeras discussões e sugestões para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, onde realizei este trabalho, aos seus funcionários e docentes, em especial a professora Maria de Fátima pelas sugestões para a finalização deste trabalho.

Ao pessoal do LFA-IF, pela acolhida no início desse trabalho.

Ao professor Eduardo Landulfo pelas imagens do LIDAR e pelas discussões e ao seu aluno Fabio Lopes que tanto me ajudou com as análises.

À CETESB pelas medidas de qualidade do ar.

Aos meus amigos e colegas de pós-graduação do IAG, em especial ao André.

À amiga mais que especial que ganhei nessa fase da minha vida, Angélica.

Aos meus velhos amigos de graduação do IF-USP em especial à Adriana, ao João Luiz e ao Luiz Blanes.

À Vanessa e ao Alessandro pela amizade e ajuda com a revisão do texto.

Ao Carlos Molina pela ajuda inicial com o abstract.

Ao Carlos Pires pelas discussões, sugestões e pela amizade desenvolvida ao longo desse trabalho.

A todos os meus amigos e amigas que tanto tiveram paciência e me apoiaram.

À minha prima Patrícia pelo apoio incondicional.

Ao meu pai, à minha mãe, ao meu irmão Robson, à Sueli, ao Willian e à Giovanna presentes em todos os momentos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. Introdução	12
1.1. O aerossol atmosférico.	13
1.2. As Megacidades e a Região Metropolitana de São Paulo	14
1.3. O monitoramento da qualidade do ar em São Paulo	16
1.3.1 O Monitoramento e a caracterização do Material Particulado na RMSP.....	18
1.4. O monitoramento de aerossóis pelo MODIS, CIMEL e LIDAR	24
1.4.1. Sensores Passivos	24
1.4.2. Sensores Ativos	26
1.5. Enfoques e objetivos desse trabalho	26
2. Fundamentação Teórica.....	28
2.1. Características do aerossol atmosférico.....	30
2.2. Processos radiativos na atmosfera	33
2.2.1. Absorção e espalhamento de radiação por partículas de aerossol e gases.....	35
2.3. A transferência radiativa e o monitoramento por satélite.....	37
2.3.1. A Lei de Beer-Lambert-Bouguer.....	38
2.3.2. A Equação da Transferência Radiativa	39
2.3.3. A radiação recebida pelo Satélite	42
3. Material e Métodos.....	44
3.1. O sensor MODIS e seus produtos.....	45
3.1.1. Imagens de AOD geradas pela NASA e pelo Modelo Dinâmico.....	47
3.2. Medidas de Material Particulado em São Paulo pela CETESB.	49
3.3. O radiômetro CIMEL	50
4. Análise de Dados.....	52
4.1. Correlações entre concentrações de MP ₁₀ e AOD.....	52
4.2. Validação com o radiômetro CIMEL	68
4.3. Correlação AOD CIMEL com MP ₁₀ e com MP _{2,5}	70
4.4. Análise de cluster entre as estações para o MP ₁₀ e a AOD	74
4.5. Análise da Correlação entre MP ₁₀ e AOD por faixas de concentração	76

4.6. Influência do Vapor d'água na correlação entre a AOD e o MP_{10}	80
4.7. Correlações entre a concentração de $MP_{2,5}$ e a AOD	86
4.8. Influência do Vapor d'água na correlação entre a AOD e o $MP_{2,5}$	92
4.9. Limitando a Geometria do Sensor	93
4.10. Imagens sem nuvens	96
4.11. Estudos de Casos a partir de imagens do LIDAR	99
4.11.1. Análise por característica de dias	102
5. Conclusões	106
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	108
Referências Bibliográficas.....	110
Anexo A – Metodologia para o Cálculo de AOD	116
A.1. Refletância Crítica – Metodologia para determinação do modelo de aerossol	116
A.2. Descrição do algoritmo para cálculo da AOD.....	119
A.3. Cálculo da Refletância Crítica – RC para cada modelo de aerossol.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Imagem do sensor MODIS AQUA sobre parte do estado de São Paulo, em destaque a mancha urbana da RMSP.....	15
Figura 1.2: Emissões relativas de poluentes por tipos de fontes – (Adaptado de CETESB 2006).....	16
Figura 1.3: Distribuição espacial das estações de monitoramento automático da CETESB em alguns dos municípios da RMSP (extraído de CETESB, 2006).	17
Figura 1.4: a) Amostrador de grande volume acoplado a um separador inercial de partículas para determinação da concentração de partículas inaláveis (MP_{10}) em suspensão na atmosfera, b) Amostrador dicotômico para determinação da concentração de partículas inaláveis finas e partículas inaláveis grossas (Disponível em www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_automatica.asp . Último acesso em 21/03/2008).....	19
Figura 1.5: Concentrações Médias Mensais de MP_{10} de 2002 a 2006 na RMSP (CETESB, 2007).....	19
Figura 1.6: Médias aritméticas anuais de MP_{10} em 2002 na RMSP (Fonte CETESB, 2003)..	21
Figura 1.7: Médias aritméticas anuais de MP_{10} em 2006 na RMSP – Rede automática (Fonte CETESB, 2007).....	21
Figura 1.8: Evolução das Concentrações médias anuais na RMSP e Cubatão – Rede Automática (Fonte: CETESB, 2007).....	22
Figura 1.9: Evolução da frota de veículos leves na RMSP (Fonte: CETESB, 2007).....	22
Figura 1.10: $MP_{2,5}$ - Médias Aritméticas anuais na RMSP em 2006. (Fonte: CETESB, 2007)	23
Figura 1.11: $MP_{2,5}$ - Evolução das concentrações médias anuais na RMSP. (Fonte: CETESB, 2007).....	23
Figura 1.12: a) Imagem do sensor MODIS, no visível, a bordo do satélite TERRA para o dia 04 de dezembro de 2004 sobre a RMSP, b) Imagem da mesma área, mostrando o produto de AOD utilizado pela NASA.	25
Figura 2.1: Estimativas da média global do forçamento radiativo (FR), para 2005 e faixas de incertezas para o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) antrópicos. A extensão geográfica típica (escala espacial) do FR e o nível de compreensão científico avaliado (NCC). O forçamento radiativo antrópico líquido e sua faixa de incerteza também são mostrados. (Adaptado de IPCC, 2007).	29
Figura 2.2: Função de Distribuição de Tamanho do aerossol atmosférico (adaptada de SEINFELD & PANDIS, 1998 e baseada em WHITBY & CANTRELL, 1976).....	31

- Figura 2.3: Deposição de um aerossol polidisperso com diâmetro aerodinâmico de 2,5 μm no aparelho respiratório, calculada para várias regiões do pulmão (extraída de ANDRADE, 2006 e adaptada de YEH et al., 1996). 32
- Figura 2.4: Ilustração esquemática das regiões do espectro eletromagnético em função do comprimento de onda da radiação (λ), em destaque a região do espectro visível..... 33
- Figura 2.5: Espectro da Irradiância solar no topo da atmosfera e ao nível do mar. A linha tracejada representa a curva de um corpo negro a 6000 K e as regiões hachuradas indicam as regiões de absorção da radiação pelos constituintes da atmosfera (Figura adaptada de SEINFELD & PANDIS, 1998). 34
- Figura 2.6: Atmosfera plano-paralela com camadas verticais e homogêneas horizontalmente. 38
- Figura 2.7: Esquema ilustrativo da atenuação sofrida por um feixe de radiação caracterizado pela radiação espectral L_λ ao atravessar um volume de matéria de comprimento ds 38
- Figura 2.8: Representação esquemática da atenuação da radiação incidente, da adição devido ao espalhamento múltiplo, do feixe transmitido e da refletância da superfície. (figura adaptada de CASTANHO, 2005). 40
- Figura 3.1: Imagem para o dia 242 do ano de 2004 do TERRA: a) Imagem do MODIS no visível, b) Produto de AOD 10 km do MODIS, c) Produto de AOD 10 km do MODIS na RMSP, d) Produto do Modelo Dinâmico na RMSP com resolução de 1,5 km x 1,5 km – Refletância Crítica, e) Produto do Modelo Dinâmico na RMSP com resolução de 1,5 km x 1,5 km – Modelo 3 de aerossol..... 47
- Figura 4.1: Diagramas de Dispersão e correlações entre a concentração de material particulado $\text{MP}_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ nas estações da CETESB e a AOD média (10 km x 10 km). À esquerda é mostrada a dispersão para todo o período e a direita somente médias no período de inverno. Curva do TERRA média horária das 11 h e do AQUA das 13 h, para o MP_{10} 54
- Figura 4.2: Diagramas de Dispersão e correlações entre a concentração de material particulado $\text{MP}_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ nas estações da CETESB e da AOD média (10 km x 10 km). À esquerda é mostrada a dispersão para médias diárias de concentração de MP_{10} e a direita para médias diurnas (6h às 18 h). 60
- Figura 4.3: Diagramas de Dispersão e correlações entre a média diurna da concentração de material particulado $\text{MP}_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ nas estações da CETESB e a AOD média (10 km x 10 km), para os meses de junho, julho e agosto. 65

- Figura 4.4: Correlação entre a AOD do Modelo Dinâmico e a AOD do CIMEL; a) AOD MODELO – calculada pela refletância crítica, b) AOD MODELO – calculada pelo MODELO 3. 69
- Figura 4.5: Gráfico de correlação entre o produto de AOD do MODIS com resolução de 10 km e a AOD CIMEL. 69
- Figura 4.6: a) Séries temporais de profundidade óptica de aerossol em 500 nm, b) Séries temporais da concentração de material particulado, em $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 71
- Figura 4.7: Diagrama de dispersão entre AOD (500nm) e MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). a) série temporal completa, b) série temporal sem os meses de setembro e outubro e só com os horários entre 11 e 14 h. 72
- Figura 4.8: Diagrama de dispersão para os meses de julho e agosto de 2004; a) com todos os horários do dia, b) medidas nos horários entre 11 e 14 h. 72
- Figura 4.9: Diagrama de dispersão para as medidas de AOD-CIMEL e $\text{MP}_{2,5}$. Em (a) série temporal completa e em (b) excluindo-se os meses de agosto e setembro. 73
- Figura 4.10: Análise de Cluster entre as estações da CETESB. (a) Degraus com as distâncias entre as estações para o MP_{10} (b) Divisões dos grupos de estações para o MP_{10} 75
- Figura 4.11: Correlações entre MP_{10} e a AOD (média 10 km) para os 3 grupos de estações. 76
- Figura 4.12: Correlação entre a concentração de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD Média (10 km x 10 km). As curvas são divididas por faixas de concentração de MP_{10} 77
- Figura 4.13 (a): Diagrama de dispersão entre o Material Particulado Fino e a AOD Média de 10 km x o Vapor d'água (cm)- barra de cores. No topo para o satélite AQUA e na base para o satélite TERRA. Estação de Cubatão V. Parisi 81
- Figura 4.14: Histograma da distribuição de pontos em função das medidas de quantidade de vapor d'água na coluna, à esquerda a distribuição do pontos do AQUA e a direita do TERRA. 85
- Figura 4.15: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de MP_{10} e a AOD média de 10 km x 10 km para dias que possuem valor de quantidade de água na coluna até 3,0 cm. 86
- Figura 4.16: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de material particulado fino $\text{MP}_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD's na estação Cerqueira Cesar. 89
- Figura 4.17: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de material particulado fino $\text{MP}_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD's na estação de Pinheiros. 90
- Figura 4.18: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de material particulado fino $\text{MP}_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD1 para os meses de junho, julho e agosto. 91

- Figura 4.19: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de material particulado fino $MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD1 sem os meses de setembro e outubro..... 91
- Figura 4.20: Diagramas de dispersão entre o Material Particulado Fino e a AOD Média (10 km x 10 km) x o Vapor d'água (cm)- barra de cores 92
- Figura 4.21: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de $MP_{2,5}$ e a AOD para dias com valor de quantidade de água na coluna até 2,1 cm. 93
- Figura 4.22: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de MP_{10} (médias diurnas) e a AOD (média 10 km x 10 km) para as estações de monitoramento da CETESB, somente para dias com ângulo de espalhamento menor que 140° 94
- Figura 4.23: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de MP_{10} (médias diurnas) e a AOD (média 10 km x 10 km) para as estações de monitoramento da CETESB, somente dias com ângulos de espalhamento menores que 140° e sem nuvens. 97
- Figura 4.24: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – média diurna e AOD média 10 km x 10 km. À esquerda todos os dias disponíveis para cada estação e à direita somente dias sem a presença de nuvens e sem a observação de aerossol acima da CM..... 100
- Figura 4.25: À esquerda – Diagrama de dispersão e correlação entre a concentração de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD média 10 km x 10 km e à direita - imagem do LIDAR. Em (a) dia 16/08/2005, (b) 14/07/2004 e (c)15/07/2004..... 102
- Figura 4.26: À esquerda – Diagrama de dispersão e correlação entre a concentração de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD média 10 km x 10 km e à direita - imagem do LIDAR. Em (a) dia 27/07/2004, (b) 24/11/2004 e (c)23/08/2005..... 104
- Figura A- 1: Resultados da simulação no SBDART para dois modelos de aerossol, com albedo de 0,76 e 0,96. (Figura extraída de CASTANHO, 2005). 117
- Figura A- 2: Relação entre albedo simples de aerossol e refletância crítica para São Paulo. (Figura extraída de CASTANHO, 2005)..... 118
- Figura A- 3: Exemplo de determinação da refletância crítica para um dia de estudo. (Figura extraída de CASTANHO, 2005). 118
- Figura A- 4: Equações de inversão da refletância no TOA em profundidade óptica (AOD), definidas para uma condição específica de posições angulares do Sol e do sensor, para o modelo de aerossol 3 e algumas refletâncias de superfície ($\rho_{\text{sup}}(650) = 0,002; 0,05; 0,1; 0,15$). Os cálculos das refletâncias no topo da atmosfera (650 nm) para diferentes τ_a (550

nm) foram realizados com o código de transferência radiativa SBDART. Fonte:
Castanho (2005)..... 122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Padrões de Qualidade do Ar. (adaptado de CETESB, 2004) 18

Tabela 3.1: Tabela da Estações de Monitoramento da CETESB com posição geográfica 50

Tabela 4.1: Padrões de qualidade do ar utilizados pela CETESB para o MP₁₀..... 77

Tabela 4.2: Parâmetros variados na entrada do Modelo Dinâmico usado para calcular os valores de AOD. 88

LISTA DE ABREVIATURAS

AERONET	A Erosol R obotic N ETwork
AOD	Aerosol Optical Depth
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal
CERES	California Environmental Resources Evaluation System
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CLP	Camada Limite Planetária
CM	Camada de Mistura
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EOS	Earth Observing System
ETR	Equação de Transferência Radiativa
FR	Forçamento Radiativo ou Forçante Radiativa
HDF	Hierarchical Data File
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LIDAR	Light Detection and Ranging
MP	Material Particulado
MISR	Multi-angle Imaging Spectroradiometer
MODIS	Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT	Measurements of Pollution in the Troposphere
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NCC	Nível de Compreensão Científica
PNQA	Padrões Nacionais de Qualidade do Ar
REM	Radiação Eletromagnética
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
SBDART	Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer
SDS	Scientific Data Set
TOA	Topo da Atmosfera
USP	Universidade de São Paulo
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

RESUMO

NATALI, L. **Utilização dos produtos obtidos por sensoriamento remoto na caracterização da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo, 2008**, 122 f. Dissertação de Mestrado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, 2008.

O objetivo desse trabalho foi estudar a relação entre profundidade óptica de aerossóis (AOD), obtida por sensoriamento remoto, e a concentração de material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}) medida próximo à superfície sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). A profundidade óptica foi derivada a partir de medidas de radiâncias fornecidas pelos sensores MODIS. Estes sensores estão posicionados a bordo dos satélites EOS-TERRA e EOS-AQUA, operados pela NASA. As concentrações de MP₁₀ e MP_{2,5} foram obtidas nas estações da rede operacional da CETESB. Foram feitos alguns estudos de caso considerando diferentes situações atmosféricas, aos quais se aplicou a metodologia proposta por Castanho (2005) que busca reduzir as incertezas na determinação da profundidade óptica derivada do MODIS e identificar qual o modelo de aerossol é mais adequado para aplicação em estudos de qualidade do ar. Os valores de AOD calculados para as diferentes situações foram comparados com aqueles obtidos pela AERONET e com as concentrações anteriormente citadas, buscando uma validação dos mesmos. Valores médios de AOD foram calculados para áreas de 10 km x 10 km ao redor das estações de monitoramento do MP. Testes foram realizados para verificar os efeitos de sazonalidade, da quantidade de água na coluna atmosférica, da resposta da AOD por faixas de concentração de MP₁₀, da geometria do sensor, da presença de nuvens e da presença de aerossol acima da Camada de Mistura (CM). Os resultados foram apresentados por estações com o objetivo de se visualizar diferentes condições sobre a região estudada. Alguns dos fatores relevantes observados durante a comparação entre a concentração de MP₁₀ e a AOD foram: a influência do período do ano e da quantidade de água na coluna atmosférica. A geometria do sensor foi fator determinante para melhora das correlações, quando limitado o ângulo de espalhamento em 140°. Situações em que há ausência de nuvens, identificadas através de imagens do MODIS no visível, também apresentaram melhores resultados. Outro fator de extrema importância foi a estrutura vertical da CM. Através de medidas obtidas de um LIDAR foi verificado que a presença de aerossóis acima da CM, a qual é determinada principalmente pelas condições atmosféricas, é determinante para as correlações entre AOD e o MP.

Palavras Chave: Aerossol Atmosférico, MODIS, Profundidade Óptica de Aerossol.

ABSTRACT

NATALI, L. Use of remote sensing derived products in the air quality characterization over the Metropolitan Area of São Paulo, 2008, 122 p. Master Dissertation – Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences, University of São Paulo, São Paulo, 2008.

The main purpose of this work was to study the relationship between the Aerosol Optical Depth (AOD), obtained by remote sensing, and the particulate material concentration (PM_{10} and $PM_{2.5}$), near to the surface over the Metropolitan Area of Sao Paulo (MASP). The Aerosol Optical Depth was retrieved based on reflectance measurements provided by MODIS sensors. These sensors are carried aboard EOS-TERRA and EOS-AQUA satellites, which are operated by NASA. The PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations were obtained in the CETESB operational network. Case studies were performed, considering several atmospheric conditions, applying the methodology proposed by CASTANHO (2005), designed both to reduce the uncertainty in the determination of the MODIS derived Optical Depth and to identify which aerosol model is more appropriated for air quality studies. Some derived results were compared with AERONET data and with the previously mentioned concentrations as a cross-check test. Mean AOD values were calculated using 10 km x 10 km area ground around PM monitoring stations. Tests were performed to estimate the effects of seasonality, atmospheric column water content, AOD response to PM_{10} concentration, sensor geometry, clouds and aerosol concentration above the Mixing Layer (ML). To stress the different conditions of the studied region, the results were presented considering each station. Some of the relevant observed factors in the PM_{10} concentration and AOD comparison were the year period influence and the atmospheric column water content. The sensor geometry was an important factor to the improvement of the obtained correlations when the scattering angle was bounded to 140° . Cloudless situations, identified by MODIS true color images, also improved the results. Another important factor was the Mixing Layer vertical structure. Using LIDAR measurements it was verified that the presence of aerosols above the ML, which is determined mainly by atmospheric conditions, is crucial for the correlations between AOD and PM.

Keywords: Atmospheric Aerosol, MODIS, Aerosol Optical Depth.

1. Introdução

O aerossol é um importante componente da atmosfera que interage direta e indiretamente com a radiação solar incidente na Terra. Apresenta alta variabilidade espacial e temporal e é de grande importância nos processos de formação de nuvens e de transferência radiativa. Chama-se de aerossol atmosférico as partículas sólidas ou líquidas em suspensão na atmosfera, caracterizadas principalmente pelo seu diâmetro, que pode variar desde alguns nanômetros a dezenas de micrômetros. Além do diâmetro, outras características importantes na sua classificação são a composição química e a concentração.

Em altas concentrações o aerossol é considerado um poluente da atmosfera, podendo causar problemas à saúde da população e diminuição da visibilidade, além de afetar as condições meteorológicas e o clima. O estudo do aquecimento global e das mudanças climáticas tem se tornado cada vez mais importante e imprescindível à população e às políticas mundiais. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), apresentou em seu último relatório em 2007 resultados importantes de estudos sobre o aquecimento global e as mudanças climáticas. Um dos aspectos mais importantes do relatório refere-se à busca pela descrição e compreensão das forçantes humanas e naturais nos processos de mudanças climáticas (IPCC, 2007). O processo de urbanização, a produção de aerossóis por queimadas, a poluição produzida por processos industriais e o aumento do número de veículos em circulação nas cidades, são alguns fatores antropogênicos de importante contribuição à degradação do meio ambiente.

Várias pesquisas têm sido feitas sobre os efeitos e a caracterização do aerossol, seja por modelagem, por monitoramentos próximos à superfície ou via satélite. No monitoramento via satélite podemos citar o trabalho de Engel-Cox et al. (2004), que mostrou um estudo de comparação entre a profundidade óptica de aerossol derivada do sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) e medidas de material particulado próximas à superfície para os Estados Unidos, o trabalho de Chu et al. (2003), que apresentou um estudo de monitoramento da qualidade do ar para o norte da Itália, Los Angeles e Beijing, analisando a capacidade de monitoramento global, regional e local do MODIS, e um trabalho mais recente, realizado por Donkelaar et al. (2006), que mostrou uma estimativa de $MP_{2,5}$ a partir de medidas de AOD dos sensores MODIS e MISR. No Brasil podemos destacar o trabalho de Procópio (2005), que discutiu a questão do forçamento radiativo dos aerossóis. Numa outra linha de estudo, Martins (2006), através de modelagem, estudou em detalhes os efeitos de

núcleos de condensação e a formação de precipitação na Região Amazônica. Outro trabalho importante, envolvendo observações próximas à superfície e modelagem numérica, foi o de Andrade (2006) que tratou sobre a caracterização de material particulado e ozônio troposférico na RMSP.

O monitoramento da qualidade do ar em grandes áreas urbanas como a RMSP é de extrema importância para avaliação e controle da emissão e dos impactos causados pela poluição. Porém, esta é uma tarefa extremamente complexa em virtude da extensa área envolvida, do grande número de poluentes e por um complexo sistema de fontes móveis (veículos automotores) e fixas (indústrias).

1.1. O aerossol atmosférico.

As partículas de aerossol na troposfera se originam de fontes antropogênicas como processos urbanos ou industriais, queima de biomassa, uso da terra, poeira do solo e de fontes naturais. A interação do aerossol com a radiação solar e seu efeito na microfísica de nuvens tem grande influência na incerteza das previsões de possíveis mudanças climáticas. O seu curto tempo de vida, que pode ser de apenas alguns dias, resultando numa alta variabilidade temporal, e a alta variabilidade espacial, observada pelas suas propriedades ópticas e radiativas, são fatores que enfatizam a necessidade de uma cobertura global do aerossol (KING et al., 1999).

Os aerossóis atmosféricos possuem diâmetro que podem variar entre 0,001 e 100 μm . Sua caracterização depende ainda da sua composição, forma, concentração e fase (líquida ou sólida), fatores estes que estão associados basicamente a sua fonte de emissão e ao seu processo de evolução na atmosfera.

Os aerossóis podem ser transportados e transformados durante sua permanência em suspensão na atmosfera, podendo sofrer alterações através dos processos de condensação ou evaporação, coagulação entre partículas, reação química e ativação na ocorrência de supersaturação, transformando-o em névoa ou nuvem. O aerossol pode ainda sofrer diferentes tipos de processos de remoção na atmosfera, que podem ser por deposição no solo (deposição seca), por incorporação em gotas de nuvens durante o processo de formação da precipitação (deposição úmida), ou ainda remoção pela chuva. Os diferentes processos de remoção do aerossol influenciam o seu tempo de residência na atmosfera, desde alguns dias a semanas, e, em virtude da distribuição geográfica das partículas e das diversas fontes, apresenta alta heterogeneidade em sua concentração e composição na Terra (SEINFELD & PANDIS, 1998).

O aerossol mais importante do ponto de vista atmosférico é o que possui um tempo de residência suficiente para interagir com a radiação, influenciar a formação de nuvens ou prejudicar a saúde humana (ANDRADE, 2006). A maior quantidade de aerossóis presente na atmosfera é a que chamamos de material particulado fino ou $MP_{2,5}$, que são partículas com diâmetro de até 2,5 μm . As partículas de $MP_{2,5}$ são formadas, em grande parte, por processos de combustão e são nocivas à saúde. Já os aerossóis maiores, chamados de MP_{10} ou material particulado grosso, constituídos por partículas com diâmetro aerodinâmico de até 10 μm , são formados na sua maioria pela ressuspensão de poeira do solo.

1.2. As Megacidades e a Região Metropolitana de São Paulo

O crescimento econômico nas cidades gera uma necessidade de melhora no bem estar da população, podendo criar uma sobrecarga ao meio ambiente e uma demanda por produtos, energia e transportes. São Paulo é uma megacidade com uma população, que necessita de meios para sobrevivência e bem estar (MOLINA et al., 2004).

As megacidades consomem uma grande parcela do combustível fóssil existente na Terra com a produção de energia elétrica, transporte, comércio, energia para processos industriais e em atividades domésticas como cozinhar, produzir calor e/ou ventilação, entre outros. A exaustiva queima de combustível fóssil como fonte de energia emite uma grande quantidade de gases poluentes e material particulado para a atmosfera. Dentre os gases, presentes na atmosfera urbana e que possuem legislação de monitoramento podemos destacar, geralmente, o ozônio (O_3), o dióxido de enxofre (SO_2), e os óxidos de nitrogênio (NO_x).

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (Figura 1.1) possui uma expressiva mancha urbana, atualmente, segundo contagem feita pelo IBGE (<http://www.ibge.gov.br/home/>) e publicada no Diário Oficial da União de 05/10/2007, atingiu aproximadamente 19,2 milhões de habitantes sendo que a cidade de São Paulo sozinha contribui com 10.886.518 destes.

A RMSP está localizada aproximadamente em 23°S e 46°W, na porção sudeste do Brasil, numa bacia sedimentar cercada por serras e morros. Seu principal vale é o do Rio Tietê, orientado no sentido leste-oeste. Ao norte é cercada pela Serra da Cantareira, também orientada no sentido leste-oeste, e ao sudeste pela Serra do Mar.



Figura 1.1: Imagem do sensor MODIS AQUA sobre parte do estado de São Paulo, em destaque a mancha urbana da RMSP.

O clima de São Paulo pode ser dividido em duas estações: uma chuvosa que vai de outubro a abril e outra seca de maio a setembro. A estação chuvosa é influenciada pela entrada de sistemas extratropicais (sistemas frontais) e por áreas de instabilidade atmosférica, favorecendo a ocorrência de chuvas abundantes, como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Na estação seca o clima é influenciado pela entrada de rápidas frentes frias vindas do sul do continente, diminuição da precipitação e da temperatura, períodos de alta estabilidade atmosférica e pouco desenvolvimento da Camada Limite Planetária (CLP), o que contribui para que haja frequentemente uma inversão térmica muito próxima à superfície. Estas condições são desfavoráveis à dispersão de poluentes (CETESB 2006).

O estado de São Paulo apresenta uma grande variabilidade na ocupação do solo e no relevo, gerando fenômenos que influenciam o clima regional e local como as brisas marítimas e terrestres e as circulações vale-montanha (CETESB 2006, FREITAS, 2003).

A cidade de São Paulo é a mais poluída do estado, e está entre as dez cidades mais poluídas do mundo. As suas principais fontes de poluição são a frota veicular que é de 7,3 milhões de veículos (1/5 do total nacional) e suas quase 2000 indústrias de grande porte. A emissão veicular é responsável pela emissão de 97 % da emissão de monóxido de carbono (CO), 97 % de hidrocarbonetos (HC), 96 % de óxidos de nitrogênio (NOx), 40 % de material particulado total (MP) e 35 % de óxidos de enxofre (SOx) (CETESB, 2006). Em números anuais as fontes de poluição atmosférica em São Paulo são responsáveis por 1,48 milhões de t/ano de CO, 358,1 mil t/ano de HC, 331 mil t/ano de NOx, 29 mil t/ano de MP e 9,1 mil t/ano de SOx.

A contribuição de cada fonte poluidora na cidade de São Paulo é mostrada na Figura 1.2 onde se observa que os veículos automotores são os que contribuem mais na emissão de CO, HC e NOx e as indústrias para a emissão de SOx. Porém, ambas as fontes são importantes na contribuição do material particulado que também é formado pela ressuspensão de poeira do solo e pela formação de aerossol secundário.

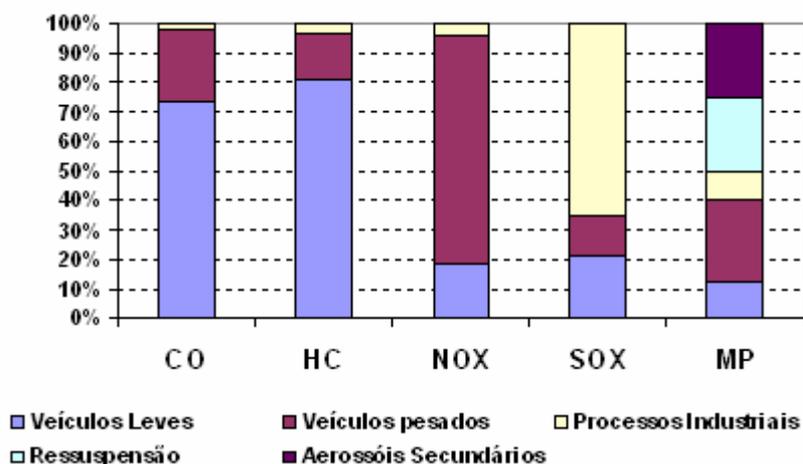


Figura 1.2: Emissões relativas de poluentes por tipos de fontes – (Adaptado de CETESB 2006).

1.3. O monitoramento da qualidade do ar em São Paulo

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) é o órgão governamental responsável pelo monitoramento e controle ambiental no estado de São Paulo. Para o monitoramento da qualidade do ar na RMSP a CETESB possui várias estações, sendo 20 automáticas e 13 manuais. Em algumas estações, como a de Pinheiros, são realizados os dois tipos de monitoramento.

A quantificação das substâncias poluentes presentes na atmosfera nos fornece o nível de poluição do ar. A resolução do CONAMA nº3, de 28/06/1990, considera poluente atmosférico “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade” (CETESB 2005).

O monitoramento da qualidade do ar possibilita o fornecimento de informações sobre impactos ao meio ambiente, avaliação da qualidade e limites de poluentes para a saúde da população, monitoramento de períodos de pico para ações de controle e acompanhamento das

tendências e mudanças de qualidade do ar devido a variações nas emissões dos poluentes e planejamento para controle nas emissões.

A CETESB apresenta um trabalho de levantamento de informações da qualidade do ar na RMSP, com redes de monitoramento guiadas por padrões legais de qualidade do ar, que são definidos para cada poluente atmosférico e fornecem informações para a formação de estratégias de controle da poluição do ar. A Figura 1.3 mostra a distribuição espacial das estações de monitoramento da CETESB na RMSP. Observa-se a limitada área coberta pelas estações, em relação à área coberta pela RMSP. O alto custo de operação destas estações é uma séria dificuldade à expansão da rede de monitoramento.

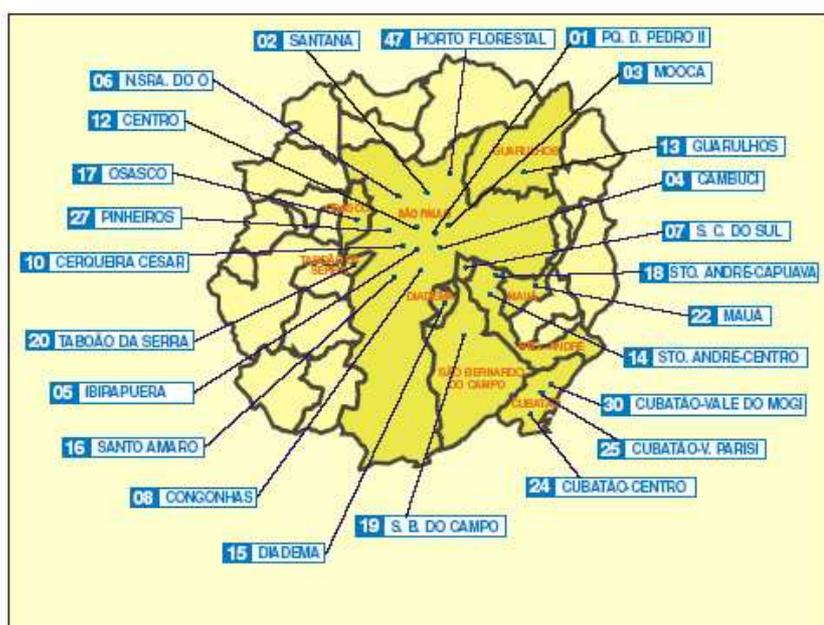


Figura 1.3: Distribuição espacial das estações de monitoramento automático da CETESB em alguns dos municípios da RMSP (extraído de CETESB, 2006).

Os poluentes atmosféricos são classificados como primários e secundários. Os poluentes primários são os emitidos diretamente das fontes e os secundários são os formados na atmosfera através de um processo físico-químico, como, por exemplo, a transformação gás-partícula, processo responsável por uma grande parte do material particulado inalável (ANDRADE, 2006).

Existem padrões de qualidade do ar que são parâmetros para o monitoramento e controle dos poluentes monitorados sistematicamente e servem de indicadores da qualidade do ar. Esses padrões definem legalmente qual a concentração máxima de um constituinte na atmosfera, como mostrado na Tabela 1.1

Tabela 1.1: Padrões de Qualidade do Ar. (adaptado de CETESB, 2004)

Padrões Nacionais de Qualidade do Ar			
(Resolução CONAMA n.º. 03 de 28/06/90)			
<i>Poluentes</i>	Padrão	Atenção	Alerta
Partículas Inaláveis (MP₁₀) média de 24h	150µg/m ³	250µg/m ³	420µg/m ³
Dióxido de Enxofre (SO₂) média de 24h	365µg/m ³	800µg/m ³	1600µg/m ³
Monóxido de Carbono (CO) média móvel de 8h	9ppm	15ppm	30ppm
Dióxido de Nitrogênio (NO₂) média horária	320µg/m ³	1130µg/m ³	2260µg/m ³
Ozônio (O₃) média horária	160µg/m ³	200µg/m ³ *	800µg/m ³

* Legislação Estadual (DE 8468 de 08/09/76)

1.3.1 O Monitoramento e a caracterização do Material Particulado na RMSP

A CETESB faz o monitoramento do material particulado inalável (MP₁₀) nas estações de monitoramento automático e do material particulado inalável fino (MP_{2,5}) em algumas estações nas redes manuais, todas localizadas na RMSP.

O método utilizado para se medir a concentração de MP₁₀ é o método de radiação beta a partir de medidas feitas por um amostrador de grande volume com separador inercial de partículas. Para medir o material particulado inalável fino (MP_{2,5}) é utilizado o método gravimétrico, com amostrador dicotômico. A Figura 1.4 mostra os instrumentos de medidas e algumas informações sobre amostradores podem ser obtidas em Braga et al. (2004).



(a)

(b)

Figura 1.4: a) Amostrador de grande volume acoplado a um separador inercial de partículas para determinação da concentração de partículas inaláveis (MP_{10}) em suspensão na atmosfera, b) Amostrador dicotômico para determinação da concentração de partículas inaláveis finas e partículas inaláveis grossas (Disponível em www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_automatica.asp. Último acesso em 21/03/2008).

O critério de representatividade de dados utilizado pela CETESB para as médias horárias de MP_{10} é de no mínimo $\frac{3}{4}$ das medidas válidas em uma hora (são feitas medidas a cada 15 minutos) e para o $MP_{2,5}$, que são fornecidos por médias diárias, ter-se pelo menos 22 horas de amostragem contínua.

A Figura 1.5 mostra as médias mensais de concentração de MP_{10} obtidas pela CETESB no período de 2002 a 2006. Pode-se observar um significativo aumento na concentração do poluente nos meses de junho, julho e agosto, deixando evidente o efeito da sazonalidade, com maiores concentrações durante o inverno, período seco na região.

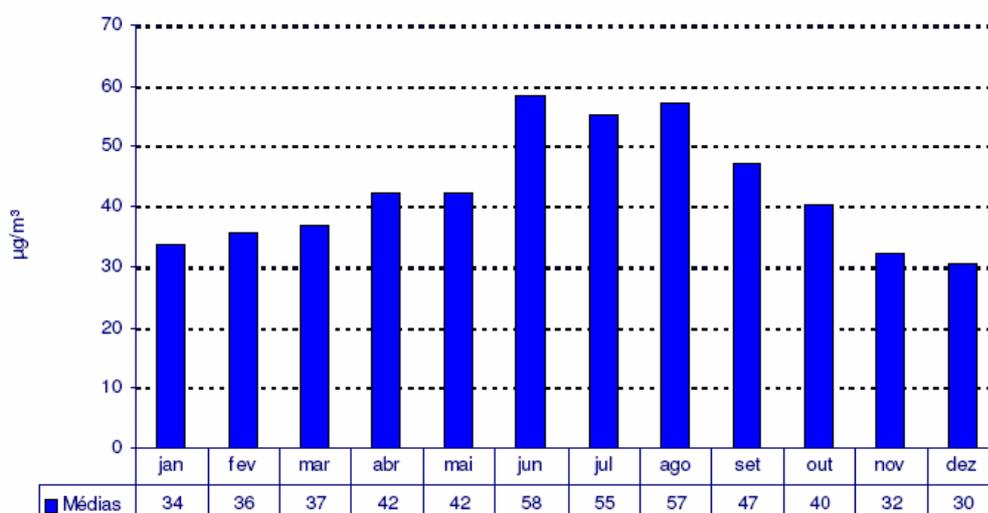


Figura 1.5: Concentrações Médias Mensais de MP_{10} de 2002 a 2006 na RMSP (CETESB, 2007).

Para o particulado inalável fino ($MP_{2,5}$) não existe um histórico das concentrações, pois o monitoramento deste poluente está sendo executado há pouco tempo pela CETESB. Ainda não existe legislação para padrão de qualidade do ar estabelecido para este poluente, mas sabe-se que, dentre os materiais particulados monitorados, é o mais nocivo à saúde. Se fosse considerado o padrão utilizado pelos Estados Unidos, que é de $15 \mu\text{g m}^{-3}$ para a média aritmética anual, todas as medidas realizadas nas estações excederiam o padrão.

Vários trabalhos envolvendo o $MP_{2,5}$ foram feitos nos últimos anos sobre a RMSP, sendo que alguns se concentraram em obter a composição do particulado fino, identificando os elementos traços e suas fontes (CASTANHO & ARTAXO, 2001, SANCHEZ-CCOYLLO, 2002, ALBUQUERQUE, 2005, ANDRADE, 2006). Mais recentemente, Oliveira (2007) apresenta como um de seus principais resultados a determinação das modas presentes no aerossol urbano da RMSP.

O relatório de qualidade do ar referente a 2006 (CETESB, 2007) mostra que para o monitoramento de MP_{10} , a RMSP apresentou valores que atendem ao padrão anual ($50\mu\text{g/m}^3$) e que são raros os episódios de ultrapassagens do padrão diário ($150\mu\text{g/m}^3$). As análises de tendências para o MP_{10} têm mostrado reduções dos níveis das concentrações nos últimos anos, conforme os relatórios da CETESB de 2003 a 2007. Nos anos de 2002, 2003 e 2004 foram observadas ultrapassagens dos padrões diário ($150\mu\text{g/m}^3$) e anual ($50\mu\text{g/m}^3$) com frequência. Em 2005 o padrão diário foi ultrapassado uma única vez e o padrão anual foi ultrapassado em uma única estação.

As Figura 1.6 e Figura 1.7 mostram as concentrações médias anuais de 2002 e 2006, por estação na RMSP, comparativamente podemos perceber a diminuição na concentração em cada estação nesses últimos anos. A Figura 1.8 (curva verde) apresenta a concentração média anual de MP_{10} para a RMSP. Nesta figura é possível notar que a partir de 2002 houve uma diminuição significativa nas concentrações, mostrando uma tendência de estabilidade em 2005 e 2006.

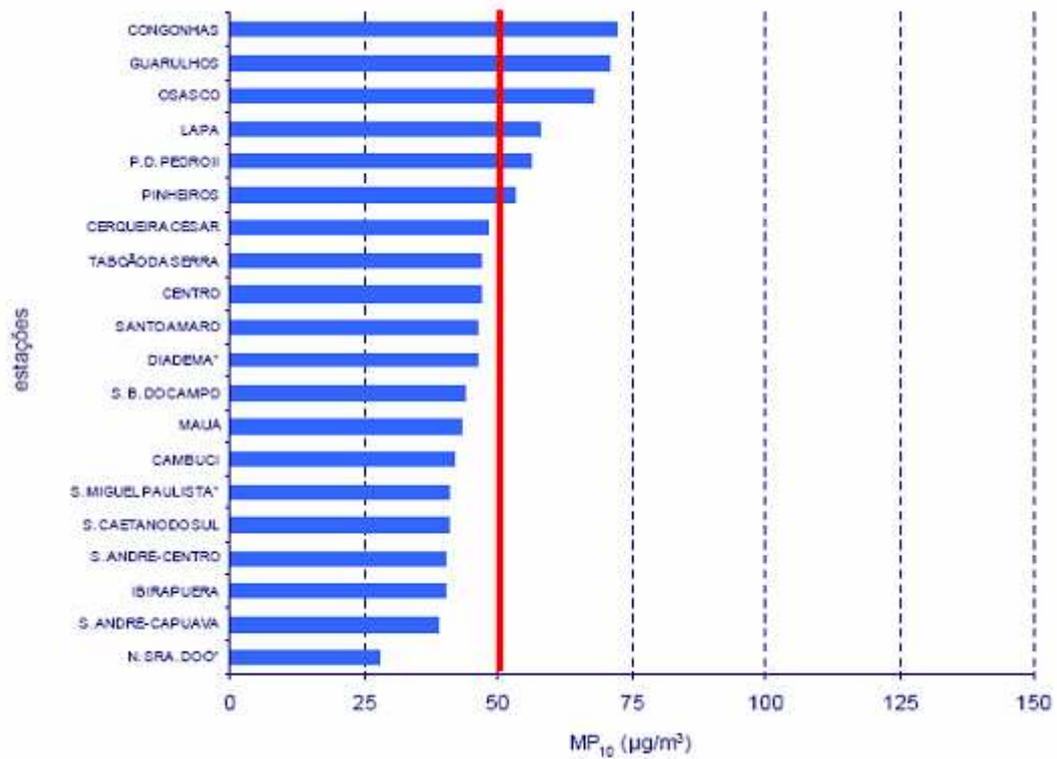


Figura 1.6: Médias aritméticas anuais de MP₁₀ em 2002 na RMSP (Fonte CETESB, 2003)

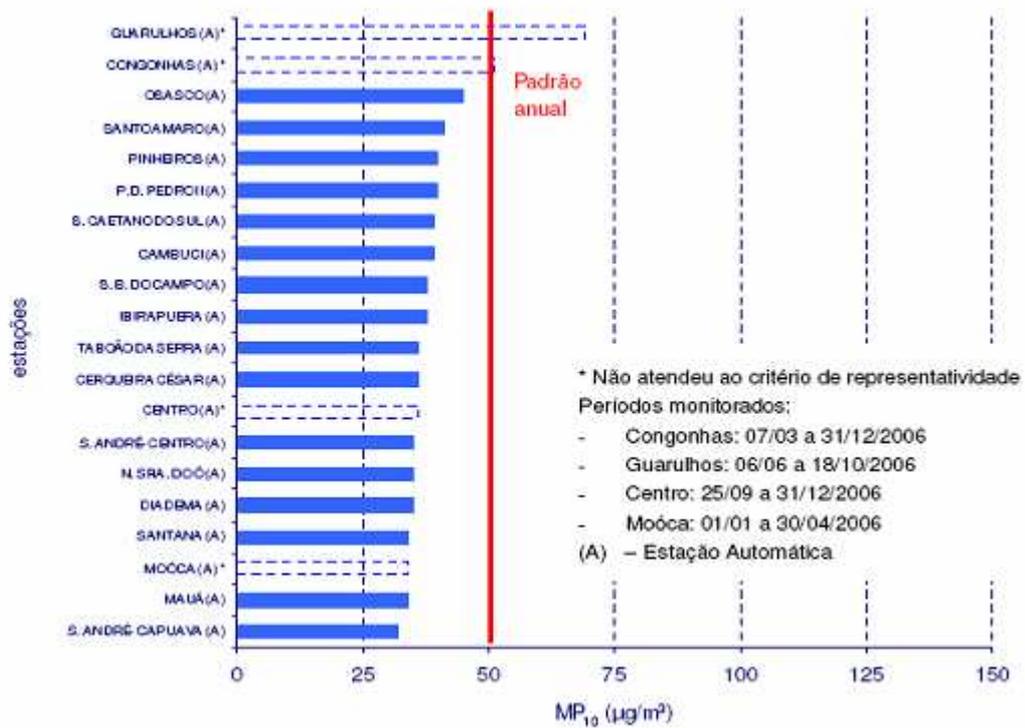


Figura 1.7: Médias aritméticas anuais de MP₁₀ em 2006 na RMSP – Rede automática (Fonte CETESB, 2007)

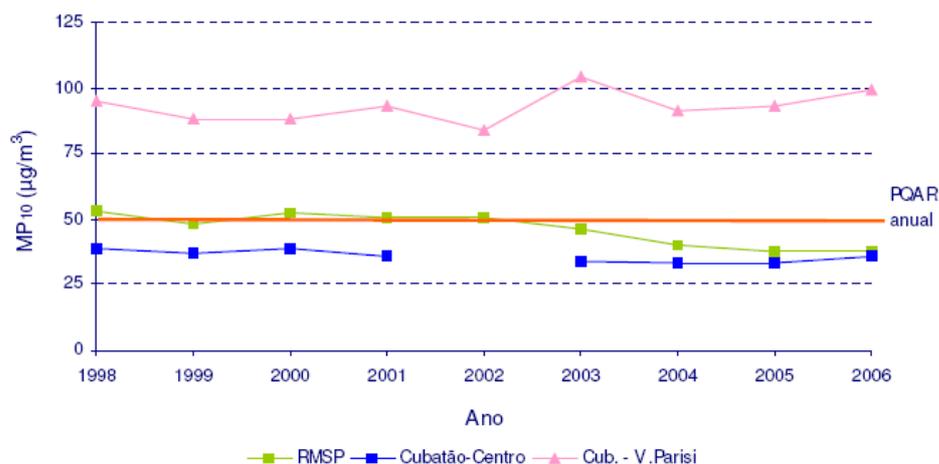


Figura 1.8: Evolução das Concentrações médias anuais na RMSP e Cubatão – Rede Automática (Fonte: CETESB, 2007)

O número de veículos na RMSP cresceu muito nos últimos anos (Figura 1.9) e a partir de 2005 uma nova frota começou a circular: a frota de veículos flex (álcool/gasolina). Este é um aspecto importante, uma vez que os veículos automotores exercem grande influência sobre a qualidade do ar, sendo a exaustão dos motores grande responsável pela emissão de MP_{2,5}.

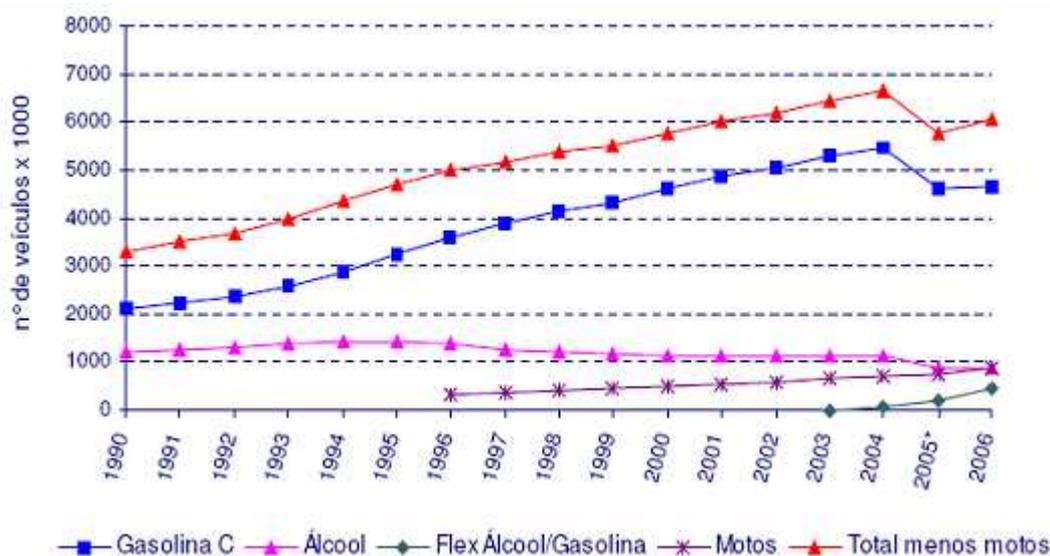


Figura 1.9: Evolução da frota de veículos leves na RMSP (Fonte: CETESB, 2007)

Observa-se nas Figura 1.10 e Figura 1.11 os resultados do monitoramento do MP_{2,5}, apresentando-se as médias anuais de 2006 por estação e a evolução das concentrações ao

longo dos anos, respectivamente. Nas médias anuais da estação Cerqueira César (linha azul), onde há monitoramento desde 2000, verifica-se uma pequena tendência de queda até 2003 e depois uma tendência de estabilidade.

O material particulado fino ($MP_{2,5}$), conforme o relatório da CETESB de 2007, representa 60% do MP total na RMSP, sendo, portanto, um importante poluente na atmosfera.

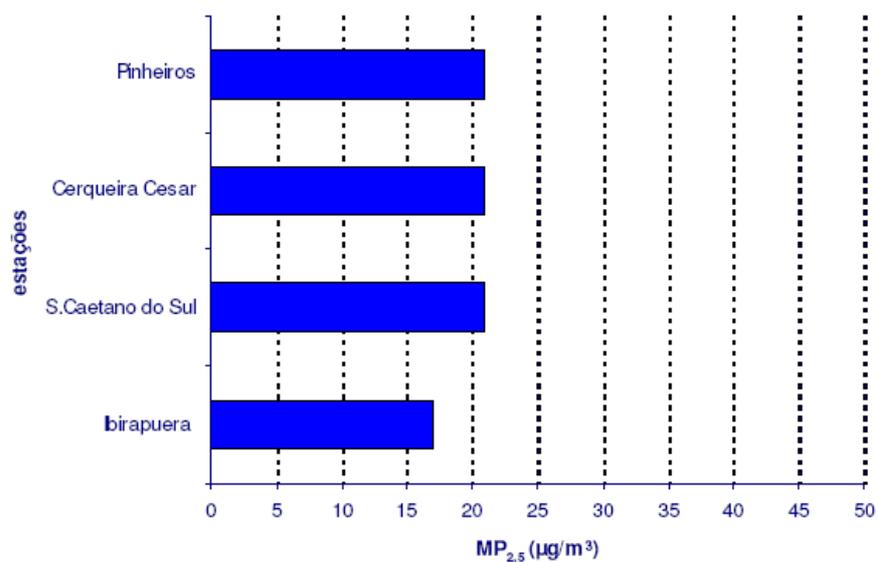


Figura 1.10: $MP_{2,5}$ - Médias Aritméticas anuais na RMSP em 2006. (Fonte: CETESB, 2007)

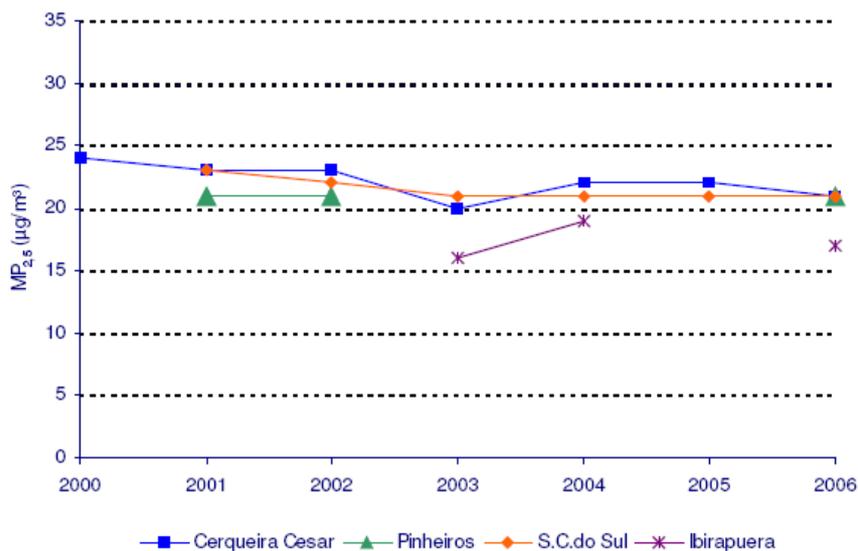


Figura 1.11: $MP_{2,5}$ - Evolução das concentrações médias anuais na RMSP. (Fonte: CETESB, 2007).

Como citado anteriormente, as concentrações de $MP_{2,5}$ na RMSP ainda ultrapassam os padrões internacionais. Existem poucas estações que realizam o seu monitoramento e não há legislação para o seu controle. O trabalho de levantamento de qualidade do ar pela CETESB é de extrema importância para a implantação de programas de controle de qualidade do ar e de políticas públicas em São Paulo. A dificuldade de monitoramento em cidades em expansão e a alta complexidade da poluição, tanto espacial quanto temporalmente, deram origem à principal motivação dessa pesquisa.

1.4. O monitoramento de aerossóis pelo MODIS, CIMEL e LIDAR

O sensoriamento remoto via sensores em satélites têm tido grandes avanços no desenvolvimento tecnológico e científico para medidas de poluentes atmosféricos. Alguns grupos ou países que desenvolvem programas neste sentido são a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), a Comunidade Européia e o Japão (AKIMOTO, 2003).

Os sensores existentes em satélites têm a função de medir a radiação eletromagnética (REM) emitida, refletida ou espalhada pelos constituintes da atmosfera e pela superfície. A partir dessas medidas podem-se determinar os valores de algumas grandezas físicas.

A radiação eletromagnética medida pelo sensor pode ser a radiação solar e, nesse caso, o sensor é chamado de “sensor passivo”. O sensoriamento também pode ser ativo, quando a radiação eletromagnética medida é proveniente não da radiação solar e sim de uma radiação, num determinado comprimento de onda, emitida pelo equipamento que contém o sensor.

1.4.1. Sensores Passivos

A NASA tem um programa especial de monitoramento da Terra chamado de EOS (*Earth Observing System*). O EOS é um programa com vários satélites de órbita polar para observações globais, cujo objetivo é o estudo das mudanças no meio ambiente por meio da atmosfera, oceano, terra, gelo e neve. O programa possui 24 satélites que estão sendo lançados desde 1997 e têm o seu último lançamento previsto para 2009. Informações sobre os satélites podem ser obtidas na internet através do endereço: http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/mission_profiles/index.php¹. No caso específico do monitoramento de aerossóis via satélite, grandes avanços foram obtidos graças a dois

¹ Último acesso em 13 de maio de 2008.

sensores: o sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) e o sensor MISR (*Multi-angle Imaging Spectroradiometer*).

O sensoriamento remoto de propriedades de aerossol visa caracterizar globalmente a distribuição dos mesmos. Para o monitoramento são utilizados radiômetros multiespectrais bem calibrados, polarímetros multiespectrais e espectroradiômetros, sendo que a maioria dos sistemas de sensores usa canais que variam do visível até o infravermelho próximo (KING et al., 1999).

Na Figura 1.12 são mostrados exemplos de produtos derivados a partir das medidas realizadas pelo MODIS. Em (a) uma imagem no espectro visível sobre a RMSP e em (b) o produto de AOD (*Aerosol Optical Depth*) derivado da mesma varredura que deu origem à imagem sobre a região.

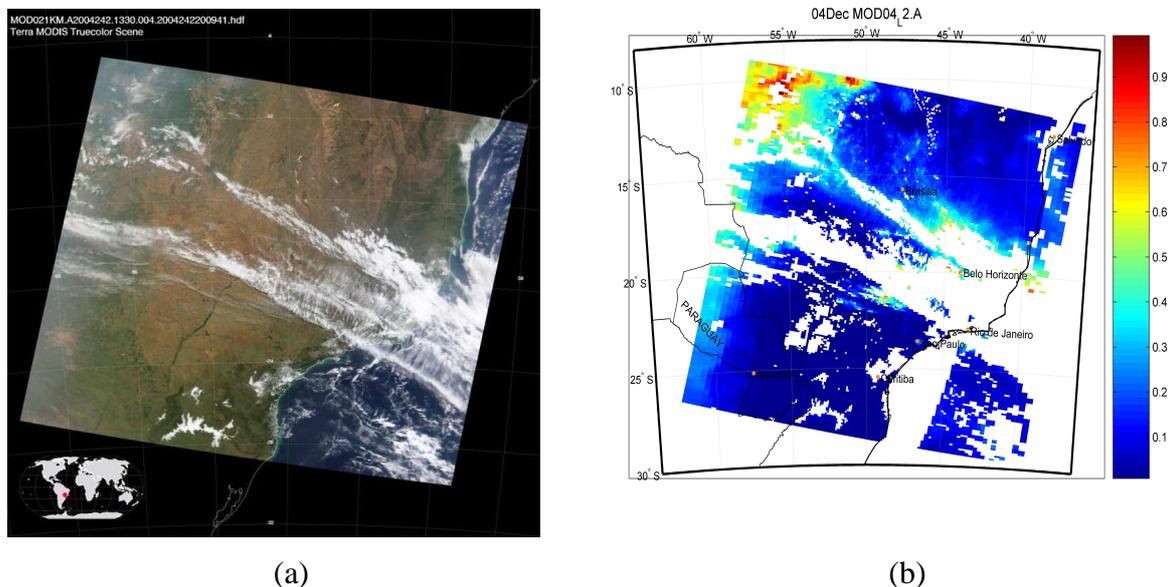


Figura 1.12: a) Imagem do sensor MODIS, no visível, a bordo do satélite TERRA para o dia 04 de dezembro de 2004 sobre a RMSP, b) Imagem da mesma área, mostrando o produto de AOD utilizado pela NASA.

Outro sistema de monitoramento de aerossóis importante é o da AERONET (*AERosol RObotic NETwork*). A AERONET é uma rede mundial de radiômetros solares de monitoramento de aerossóis que possui mais de 200 radiômetros CIMEL Eletronique (CE-318A), espalhados pelo mundo em locais estratégicos. O CIMEL é um radiômetro espectral solar que mede propriedades ópticas de diferentes tipos de aerossol na coluna atmosférica. As medidas são feitas em oito canais, que têm comprimentos de onda de: 0,34; 0,38; 0,44; 0,50; 0,67; 0,87; 0,94 e 1,02 μm .

O radiômetro CIMEL localizado em São Paulo opera desde maio de 2000 no topo do Edifício Pelletron do Instituto de Física da USP, localizado no campus Cidade Universitária da Universidade de São Paulo, e um dos produtos de seu algoritmo é a profundidade óptica de aerossol (AOD). A profundidade óptica de aerossol, quantidade de material opticamente ativo na atmosfera, tem um importante papel no que diz respeito a sua interferência no balanço radiativo do sistema Terra-Atmosfera. Seus efeitos sobre a radiação têm sido equiparados em magnitude ao dos gases responsáveis pelo efeito estufa (IPCC, 2001).

1.4.2. Sensores Ativos

O LIDAR (*Light Detection and Ranging*) é um exemplo de sistema de sensoriamento remoto ativo, pois emite um feixe de laser para a atmosfera num determinado comprimento de onda e mede a interação dessa radiação com os constituintes da atmosfera (sinal retro-espalhado). É uma ferramenta de estudo e pesquisa do perfil atmosférico (EICHINGER & KOVALEV, 2004; MEASURES, 1984; WEITKAMP, 2005). Suas principais características são; a alta resolução tanto espacial (verticalmente) quanto temporal, aliada a possibilidade de observar a atmosfera nas condições ambientais a que ela se encontra e em tempo real, além de atingir um intervalo de altitude de mapeamento da atmosfera desde o solo até mais de 100 km. A técnica pode ser empregada também no estudo de processos de turbulência e ciclos diurnos na camada limite planetária, além do estudo da medida de vapor de água atmosférico e do comportamento de alguns poluentes atmosféricos, como o material particulado.

Na aplicação de monitoramento de poluentes na atmosfera, o LIDAR pode fornecer, com uma fonte laser de comprimento de onda de largura de banda estreita, informação da presença e distribuição de partículas de 0,1 a 10 μm de diâmetro.

1.5. Enfoques e objetivos desse trabalho

Como mencionado anteriormente, o sistema de monitoramento da qualidade do ar via estações em superfície apresenta um alto custo tecnológico e operacional. Conforme pode ser observado na Figura 1.3, a rede da CETESB existente é insuficiente para uma correta determinação das condições da qualidade do ar nos vários municípios que compõem a RMSP. Sendo assim, o uso do sensoriamento remoto via satélite pode ser uma ferramenta útil para a complementação do monitoramento de poluentes nas mega-cidades.

Com base no que foi exposto, o principal objetivo deste trabalho foi verificar a existência de relações entre os produtos de profundidade óptica de aerossol (AOD - *Aerosol Optical Depth*) e medidas de concentração de material particulado (MP) obtidas pela rede de

monitoramento da CETESB, e, assim, verificar a viabilidade da utilização dos produtos derivados de satélite na avaliação da qualidade do ar nas regiões em que não seja possível o monitoramento convencional.

Os objetivos secundários foram:

- Avaliar a sensibilidade do modelo utilizado para o cálculo da profundidade óptica, podendo assim determinar a melhor condição da relação entre a refletância de superfície e a refletância medida no topo da atmosfera (TOA) a ser utilizada na RMSP.
- Aplicar uma metodologia que utiliza a refletância crítica (CASTANHO, 2005), para reduzir as incertezas na determinação da profundidade óptica obtida através das medidas de radiância realizadas pelo MODIS, identificando o modelo de aerossol mais adequado ou um modelo padrão médio.
- Verificar produtos de profundidade óptica obtidos com o novo algoritmo desenvolvido através da comparação com os valores obtidos com o CIMEL,
- Verificar a influência do vapor de água, da camada de mistura (CM) e do transporte de aerossol em altos níveis, verificando assim a influência desses fatores no valor da profundidade óptica derivada (AOD).

Este trabalho é dividido em capítulos que seguem a seguinte ordem: no capítulo 2 é apresentada uma explanação sobre características e aspectos teóricos dos aerossóis atmosféricos, da radiação atmosférica e respectivas interações. No capítulo 3 é feita uma descrição sobre os equipamentos e métodos utilizados para obtenção da base de dados. O capítulo 4 apresenta a análise de dados, composta em grande parte por correlações entre o MP e a AOD. As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo apresentam-se os conceitos básicos do aerossol atmosférico, da radiação atmosférica e da transferência radiativa e a definição de Profundidade Óptica de Aerossol (AOD), conceitos estes usados ao longo do desenvolvimento do trabalho.

A radiação solar incidente no topo da atmosfera interage com os componentes da atmosfera (gases e partículas de aerossol) e com a superfície da Terra. No caminho percorrido pela radiação ocorre o processo de transferência radiativa e o processo de interação da radiação com os aerossóis e através desta pode-se estimar a quantidade de aerossol presente na atmosfera, denominado de profundidade óptica de aerossol.

As emissões de grandes quantidades de gases e aerossóis na atmosfera, a alteração na radiação solar e das propriedades da superfície são os fatores que alteram o equilíbrio energético do sistema climático. Essas mudanças de energia do sistema são medidas em termos do forçamento radiativo que é a medida da influência de um fator na alteração do equilíbrio da energia que entra e sai do sistema (IPCC, 2007)

O forçamento radiativo ou forçante radiativa pode ser positivo, quando tende a aquecer a superfície, ou negativo, no caso de haver um resfriamento da mesma.

Segundo resultados apresentados no último relatório do IPCC (IPCC, 2007) os efeitos diretos e indiretos dos aerossóis causam um forçamento radiativo negativo e os gases do efeito estufa (CO_2 , N_2O e CH_4) um forçamento positivo, resultados estes que podem ser verificados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Os aerossóis têm um papel muito importante na atmosfera terrestre, porém, constituem a maior fonte de incerteza nas previsões acerca das mudanças climáticas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) devido ao curto tempo de permanência na atmosfera e à alta variabilidade espacial e temporal dos mesmos.

Componentes do Forçamento Radiativo

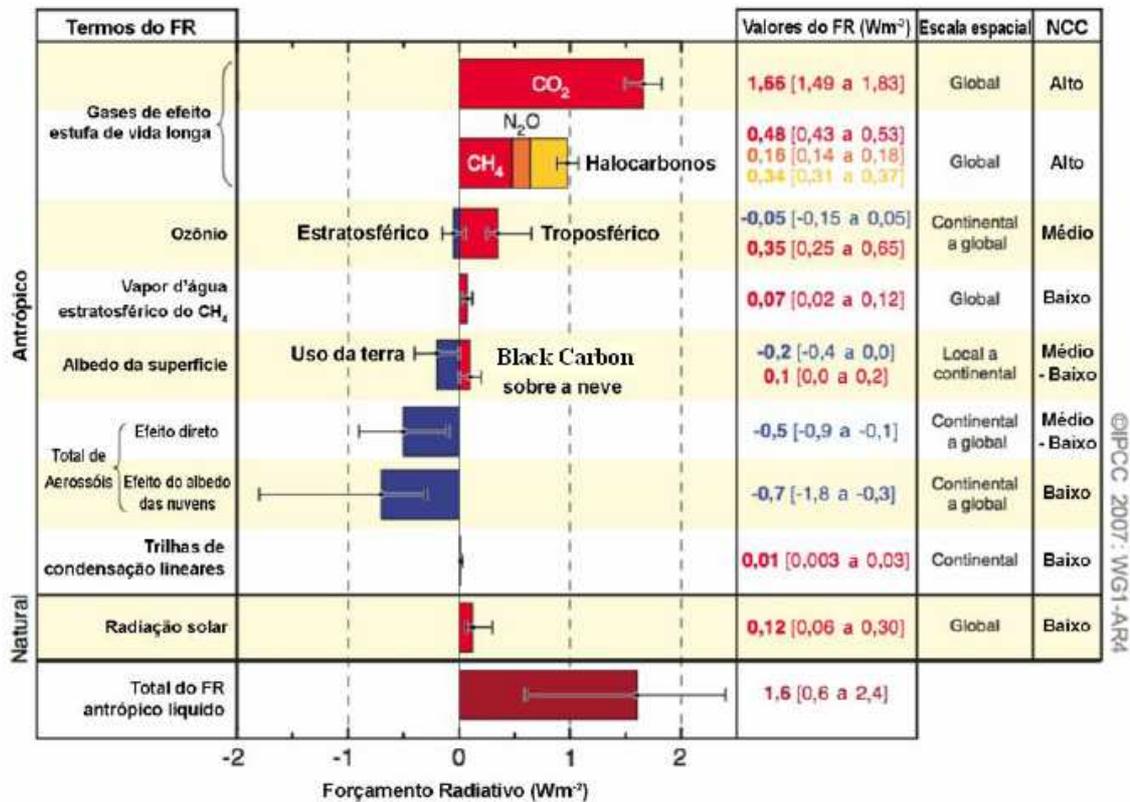


Figura 2.1: Estimativas da média global do forçamento radiativo (FR), para 2005 e faixas de incertezas para o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nítrico (N₂O) antropicos. A extensão geográfica típica (escala espacial) do FR e o nível de compreensão científico avaliado (NCC). O forçamento radiativo antropico líquido e sua faixa de incerteza também são mostrados. (Adaptado de IPCC, 2007).

Com o objetivo de obter um resultado mais preciso sobre o efeito do aerossol sobre a atmosfera terrestre, torna-se importante o monitoramento de suas propriedades via sensoriamento remoto por satélites em adição aos outros métodos considerados convencionais, tais como as medidas realizadas pela AERONET com o CIMEL.

2.1. Características do aerossol atmosférico

As fontes de emissão do aerossol podem ser naturais ou antropogênicas. Na natureza temos como principais fontes: a poeira originada do solo, o spray marinho e a erupção vulcânica. A principal fonte antropogênica é a queima de biomassa e de combustíveis fósseis.

Os aerossóis possuem uma grande diversidade de propriedades químicas e físicas, fatores esses que são influenciados pela diversidade de fontes, região e condições meteorológicas. A caracterização do aerossol se dá não só pela sua concentração na atmosfera, mas também pela sua distribuição de tamanho, composição, fase e morfologia.

Na caracterização do aerossol, uma das mais relevantes características é o diâmetro aerodinâmico (d_a). Através do diâmetro, as partículas são classificadas como: *partículas finas*, aquelas com diâmetros menores que $2,0 \mu\text{m}$ ($d_a < 2,0 \mu\text{m}$); *partículas grossas*, com diâmetros maiores ou iguais a $2,0 \mu\text{m}$ ($d_a \geq 2,0 \mu\text{m}$) e; *partículas inaláveis*, com diâmetros menores ou iguais a $10 \mu\text{m}$ ($d_a \leq 10 \mu\text{m}$). (SEINFELD & PANDIS, 1998; ANDRADE, 2006).

A CETESB adota a denominação de *material particulado inalável* para partículas com até $10 \mu\text{m}$ de diâmetro aerodinâmico (MP_{10}) e *partícula inaláveis finas* para partículas com diâmetro de até $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{MP}_{2,5}$).

A Figura 2.2 mostra a função distribuição clássica de tamanho de aerossol (WHITBY & CANTRELL, 1976). Em uma série clássica de artigos, Whitby e colaboradores (WHITBY et al., 1972a, 1972b, HUSAR et al., 1972) sugeriram a existência de três grupos distintos de partículas. Partículas com diâmetro aerodinâmico maior que $2,0 \mu\text{m}$, denominadas de partículas grossas e aquelas com diâmetro aerodinâmico menor que $2,0 \mu\text{m}$, denominadas de partículas finas. A moda das partículas finas pode ser dividida em partículas com diâmetro aerodinâmico entre $0,08$ e $2 \mu\text{m}$, conhecidas como moda de acumulação e aquelas com diâmetro aerodinâmico entre $0,01$ e $0,08 \mu\text{m}$, chamadas de moda de núcleos de Aitken (OLIVEIRA, 2007).

A distribuição de tamanho do aerossol é determinada por processos físicos e químicos como: nucleação, condensação, coagulação, difusão e sedimentação. As partículas com diâmetro de até $1,0 \mu\text{m}$ são formadas, na sua maioria, por conversão gás-partícula e as maiores que $1,0 \mu\text{m}$ são formadas em maior parte por processos mecânicos como: ressuspensão de poeira do solo, spray marinho e erupção vulcânica (ALBUQUERQUE, 2005; ANDRADE, 2006).

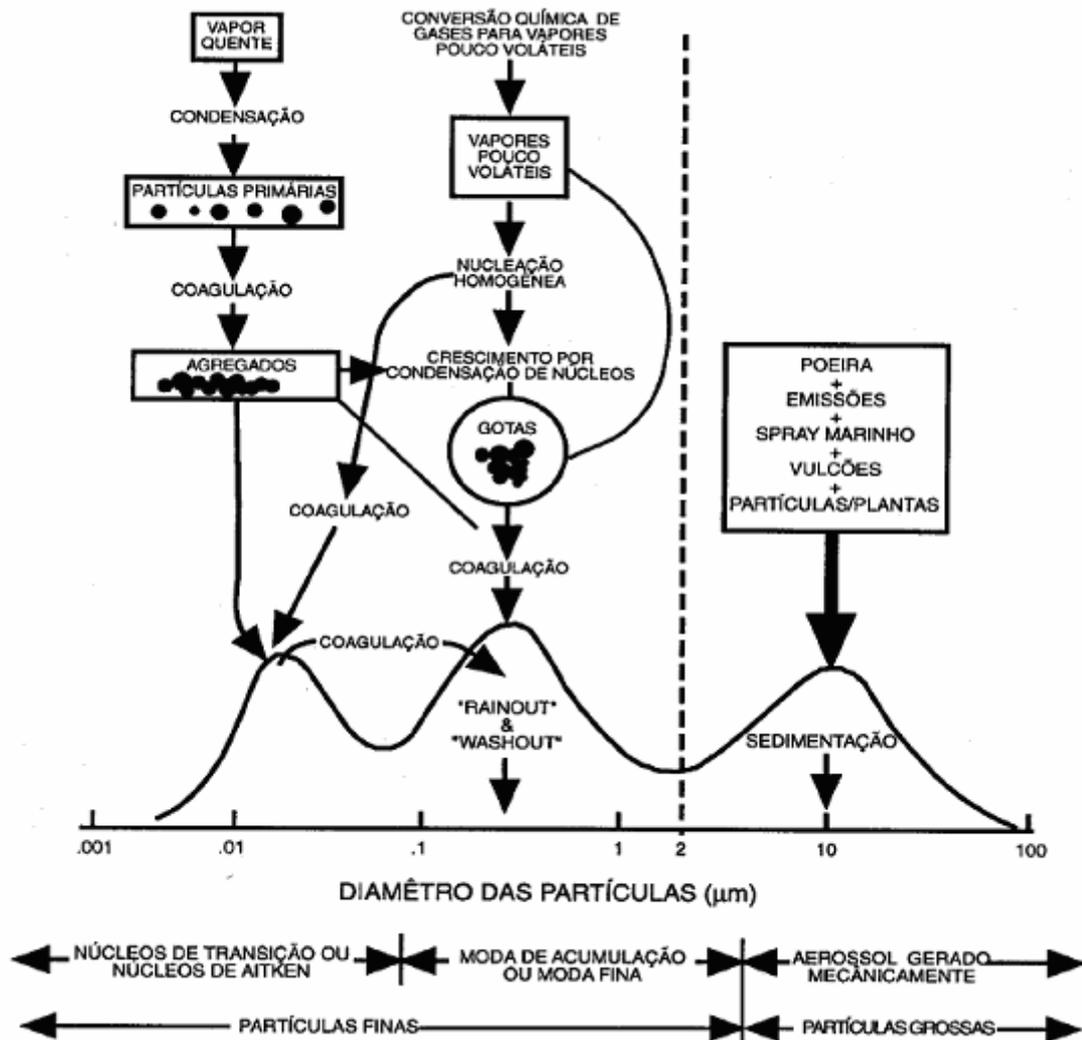


Figura 2.2: Função de Distribuição de Tamanho do aerossol atmosférico (adaptada de SEINFELD & PANDIS, 1998 e baseada em WHITBY & CANTRELL, 1976).

Cabe destacar que, dependendo do diâmetro das partículas, diferentes regiões do aparelho respiratório humano podem ser atingidas. As partículas com menos que 10,0 μm de diâmetro, são as que podem atingir as vias respiratórias inferiores, como pode ser observado na Figura 2.3. Nesta figura observa-se que as partículas com diâmetro entre 0,001 e 0,01 μm afetam mais a região traqueobronquial. A região pulmonar é mais atingida pelas partículas com diâmetros pouco maiores que 0,01 μm e a região que abrange o nariz, a boca, a faringe e a laringe é mais atingida pelas partículas com diâmetros maiores, entre 1,0 e 10,0 μm .

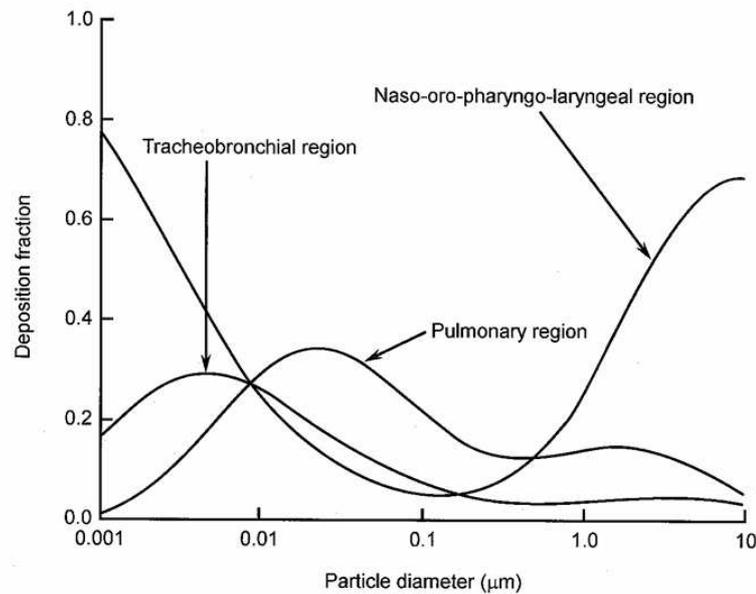


Figura 2.3: Deposição de um aerossol polidisperso com diâmetro aerodinâmico de 2,5 μm no aparelho respiratório, calculada para várias regiões do pulmão (extraída de ANDRADE, 2006 e adaptada de YEH et al., 1996).

A remoção do aerossol da atmosfera ocorre basicamente de duas maneiras: deposição úmida, que ocorre com a incorporação de partículas em gotas de chuva e deposição seca, que acontece quando as partículas caem em direção à superfície por ação da gravidade.

A presença de aerossóis na atmosfera é essencial para que haja a formação de nuvens. Muitos aerossóis são eficientes em agir como núcleos de condensação de nuvens (NCN). Também, podem ser afetados pelas nuvens através da ocorrência de condensação de vapor d'água nas partículas ou da incorporação das partículas pelas gotas. O aerossol pode ser removido com a chuva e regenerado com a evaporação de água na atmosfera (MIRANDA, 2001; ALBUQUERQUE, 2005).

O processo de conversão *gás-partícula* acontece quando moléculas de gás reagem com a atmosfera e formam partículas, as quais podem ser incorporadas às nuvens formando NCN's. Esses processos de conversão gás-partícula podem ocorrer através do processo de nucleação ou por condensação.

O processo de nucleação do aerossol pode ser homogêneo ou heterogêneo. A nucleação homogênea ocorre quando moléculas gasosas se agregam formando aglomerados, quando estes se tornam estáveis originam uma nova partícula. O processo de condensação de gases sobre partículas pré-existentes é o que se denomina nucleação heterogênea.

Existe ainda o processo de coagulação do aerossol, que são colisões efetivas entre espécies condensáveis (YNOUE, 2004, ALBUQUERQUE, 2005, ANDRADE, 2006).

2.2. Processos radiativos na atmosfera

A radiação eletromagnética é o principal processo de transferência de energia para a atmosfera. Viaja em forma de ondas, na velocidade da luz e em todos os comprimentos de onda do espectro.

Para o sistema Terra-atmosfera a principal fonte de energia é a radiação eletromagnética solar. O sol emite radiação eletromagnética majoritariamente na região espectral de comprimentos de onda menores ou iguais a $4 \mu\text{m}$ (ondas curtas), a qual interage com a atmosfera e seus constituintes (nuvens, gases e partículas). Os gases e as partículas da atmosfera têm a propriedade de absorver, refletir e espalhar em todas as direções a radiação solar incidente sobre os mesmos. As nuvens e os diferentes tipos de superfície terrestre também interagem com a radiação.

A Figura 2.4 mostra o espectro eletromagnético em função do comprimento de onda. Além da radiação solar, verifica-se o intervalo de emissão dos corpos terrestres (superfície e os próprios constituintes da atmosfera), os quais emitem majoritariamente radiação com comprimentos de onda maiores que $4 \mu\text{m}$ (ondas longas).

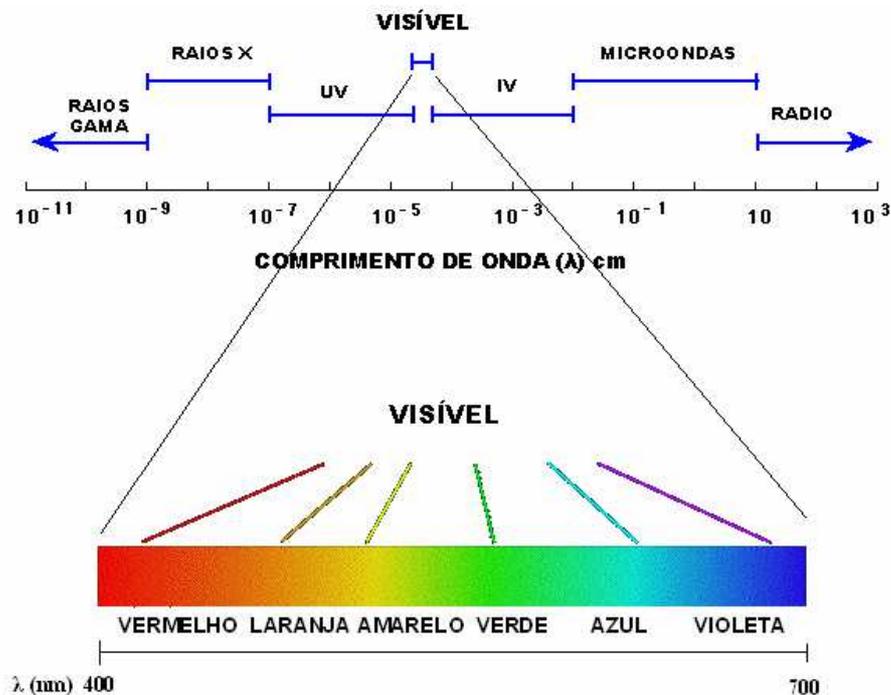


Figura 2.4: Ilustração esquemática das regiões do espectro eletromagnético em função do comprimento de onda da radiação (λ), em destaque a região do espectro visível.

O Sol emite radiação eletromagnética como um corpo negro nos comprimentos de onda do ultravioleta, do visível e do infravermelho próximo a uma temperatura de aproximadamente 6000 K. A Figura 2.5 mostra o espectro de irradiância solar que atinge o topo da atmosfera. Nesta figura pode-se perceber que o pico de energia ocorre próximo ao comprimento de onda de 0,5 μm , na porção do visível.

A radiância espectral solar como a de um corpo negro é descrita pela Função de Planck. Radiância é a razão entre a intensidade de radiação de um certo elemento de superfície em uma determinada direção e a área da projeção ortogonal deste elemento de superfície num plano perpendicular àquela direção (LIOU, 2002).

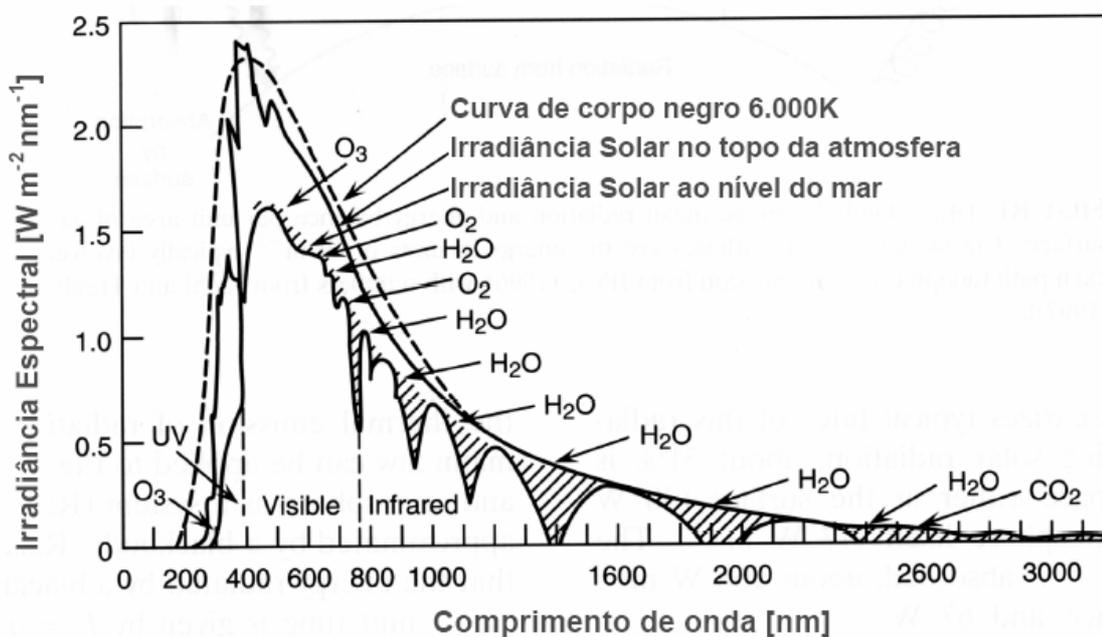


Figura 2.5: Espectro da Irradiância solar no topo da atmosfera e ao nível do mar. A linha tracejada representa a curva de um corpo negro a 6000 K e as regiões hachuradas indicam as regiões de absorção da radiação pelos constituintes da atmosfera (Figura adaptada de SEINFELD & PANDIS, 1998).

Os constituintes da atmosfera, gases e partículas, interagem com a radiação solar incidente absorvendo e espalhando-a. Alguns gases como as moléculas de O_3 e o H_2O , têm característica absorvedora, e outras como as do N_2 e O_2 são espalhadoras e interagem segundo a teoria de espalhamento Rayleigh. As partículas de aerossóis podem absorver a radiação ou espalhá-la segundo a teoria de espalhamento Mie.

2.2.1. Absorção e espalhamento de radiação por partículas de aerossol e gases

O espalhamento e a absorção são processos físicos atenuadores de radiação e estão associados à interação da luz com a matéria. O espalhamento é o processo pelo qual pequenas partículas ou moléculas suspensas num meio de diferente índice de refração, distribuem parte da energia eletromagnética incidente em outras direções. O processo de absorção é um processo físico em que gases ou partículas removem energia radiativa do feixe incidente transformando-a em outros tipos de energia. Na atmosfera, quase sempre, essa transformação se dá na forma de energia térmica.

O processo de espalhamento das partículas não ocorre de modo aleatório, a distribuição da radiação em várias orientações depende de algumas características das partículas que compõem o meio na qual a radiação se propaga. Resumidamente, essas características são o índice de refração complexo da partícula, a sua forma e o seu parâmetro de tamanho (YAMASOE, 2004).

O parâmetro de tamanho da partícula (x) é proporcional ao raio da partícula (r) e inversamente proporcional ao comprimento de onda (λ) da radiação incidente, conforme a Equação 2-1 (LIOU, 2002).

$$x = 2\pi r / \lambda \quad (2-1)$$

Se na relação acima $x \ll 1$ o regime de espalhamento que se aplica é o espalhamento Rayleigh, que ocorre quando partículas de tamanho muito menor que o comprimento de onda do visível interagem com a radiação ($r < 0,1 \lambda$). Essa interação ocorre principalmente com as moléculas de O_2 e N_2 , constituintes majoritários da atmosfera.

No espalhamento Rayleigh ocorre um espalhamento simétrico de radiação em relação ao plano normal à direção da radiação incidente, sendo $P(\Theta)$ a função de fase que é responsável em descrever a distribuição angular do espalhamento, onde Θ é o ângulo de espalhamento.

$$P(\Theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \Theta) \quad (2-2)$$

Se $x \cong 1$, na Equação 2-1, tem-se o espalhamento Mie, cuja teoria considera o espalhamento para partículas esféricas e homogêneas com tamanho aproximadamente igual ao comprimento de onda incidente. Finalmente se $x \gg 1$ temos espalhamento por partículas

atmosféricas grandes em relação ao comprimento de onda incidente, que é regido pelas leis da óptica geométrica.

O espalhamento Mie é usado para descrever a interação das partículas de aerossol e gotas de nuvens com a radiação solar incidente. Deduzido analiticamente por Mie em 1908 a partir das equações de Maxwell, o espalhamento Mie descreve a interação de ondas eletromagnéticas de comprimento λ , que são perturbadas ao interagirem com partículas de raio r , permitindo o cálculo de várias propriedades ópticas de partículas esféricas dielétricas, finitas, de tamanhos e índices de refração arbitrários.

As equações sobre a teoria Mie apresentadas a seguir podem ser encontradas com as devidas deduções em Bohren & Huffman (1998), Thomas & Stamnes (1999) e Liou (2002).

O índice de refração complexo da partícula determina a fração de contribuição dos processos de espalhamento e absorção na atenuação da radiação pela partícula e é dado pela Equação 2-3.

$$n = n_{\text{real}} - i n_{\text{mag}} \quad (2-3)$$

Os fatores de eficiência de Espalhamento e Extinção são parâmetros adimensionais e os coeficientes de Mie a_n e b_n são funções apenas do índice de refração complexo da partícula e do parâmetro de tamanho (x), definido na Equação 2-1. A expressão matemática para os coeficientes a_n e b_n em termos das funções esféricas de Bessel podem ser encontradas em diversas referências na literatura.

Fatores de Eficiência de Espalhamento e Extinção

$$Q_{\text{esp}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2 \cdot n + 1) \cdot \text{Re}(a_n^2 + b_n^2) \quad (2-4)$$

$$Q_{\text{ext}} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2 \cdot n + 1) \cdot \text{Re}(a_n + b_n) \quad (2-5)$$

A eficiência de absorção pode ser obtida pela diferença entre as Equações 2-5 e 2-4 (LIOU, 2002), ou seja:

$$Q_{\text{abs}} = Q_{\text{ext}} - Q_{\text{esp}} \quad (2-6)$$

A partir dos fatores de eficiência de extinção (espalhamento ou absorção) para partículas individuais, Equações 2-4 e 2-5, e da distribuição de tamanho em números ($n(r) =$

$dN(r)/dr$ das partículas pode-se escrever o coeficiente linear de extinção para uma coleção de partículas na atmosfera como:

$$\beta_{ext}(\lambda) = \int_0^{\infty} Q_{ext}(m, x) \pi r^2 n(r) dr \quad [\text{m}^{-1}] \quad (2-7)$$

sendo r o raio da partícula .

Os coeficientes de espalhamento e absorção (β_{esp} e β_{abs}) podem também ser calculados de forma análoga a Equação 2-7 apenas substituindo-se Q_{ext} adequadamente por Q_{esp} ou Q_{abs} .

2.3. A transferência radiativa e o monitoramento por satélite

O formalismo matemático do monitoramento via sensores em satélites se baseia na Equação de Transferência Radiativa (ETR). Nesta seção é apresentada a aplicação da ETR ao sensoriamento remoto por satélite, porém, sua dedução com todo o formalismo pode ser vista em Liou (2002) e Wallace & Hobbs (2006).

Os sensores em satélites medem radiâncias ou irradiâncias no topo da atmosfera (TOA), integradas em determinadas bandas espectrais. No caso do MODIS, um dos sensores usados neste trabalho, foram usadas medidas das bandas 1 e 7, correspondentes aos comprimentos de onda de 650 e 2100 nm, respectivamente.

A ETR permite determinar a radiância espectral após as interações com os constituintes da atmosfera a partir da radiância espectral incidente. Para esse cálculo, uma aproximação chamada atmosfera plano-paralela é aplicada. A aproximação de atmosfera plano-paralela é aceita na maioria das aplicações meteorológicas e climatológicas em escala regional, quando as variações verticais de temperatura, pressão e algumas outras variáveis forem muito mais importantes que as variações horizontais. Essa consideração é relevante, pois a espessura geométrica “ópticamente ativa” da atmosfera possui aproximadamente 100 km de altura, sendo muito menor que o raio da Terra. Nesta aproximação, considera-se a atmosfera como um conjunto de camadas verticalmente estruturadas e horizontalmente homogêneas.

A Figura 2.6 mostra um desenho esquemático da aproximação plano-paralela que pode ser descrita pela variação elementar da altura, onde dz' é a variação da altitude, ds' é o sentido de propagação do feixe, ζ' é o ângulo zenital, sendo a relação entre eles dada por:

$$ds' = dz' / \cos \zeta' \tag{2-8}$$

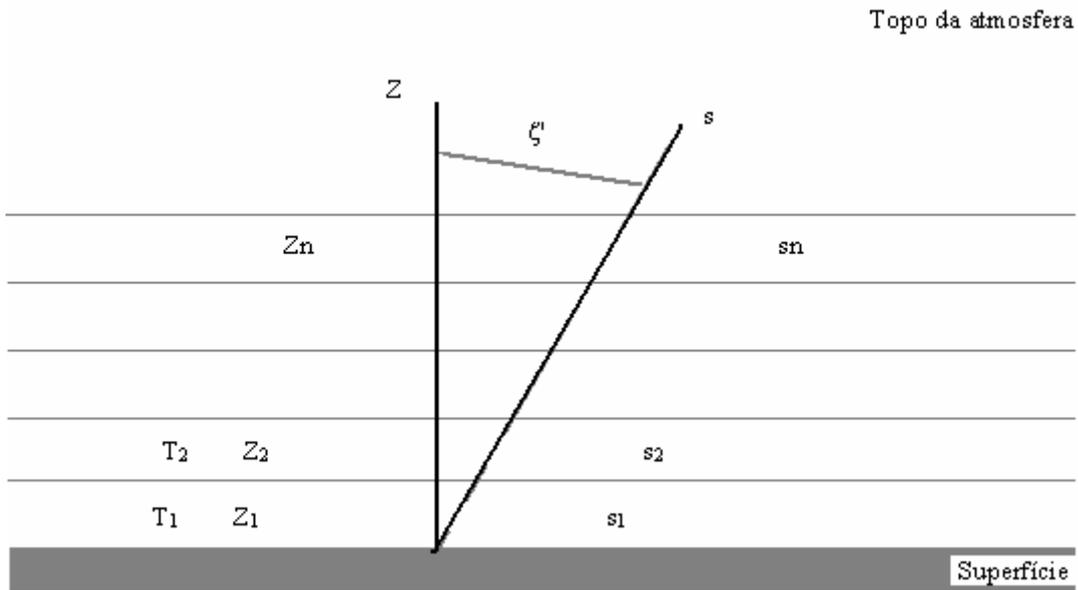


Figura 2.6: Atmosfera plano-paralela com camadas verticais e homogêneas horizontalmente.

2.3.1. A Lei de Beer-Lambert-Bouguer

A lei de Beer-Lambert-Bouguer descreve a atenuação da radiação eletromagnética ao atravessar um meio homogêneo. Considera-se um feixe colimado de luz incidindo perpendicularmente à área dA de uma parcela de ar de espessura ds , conforme ilustrado na Figura 2.7.

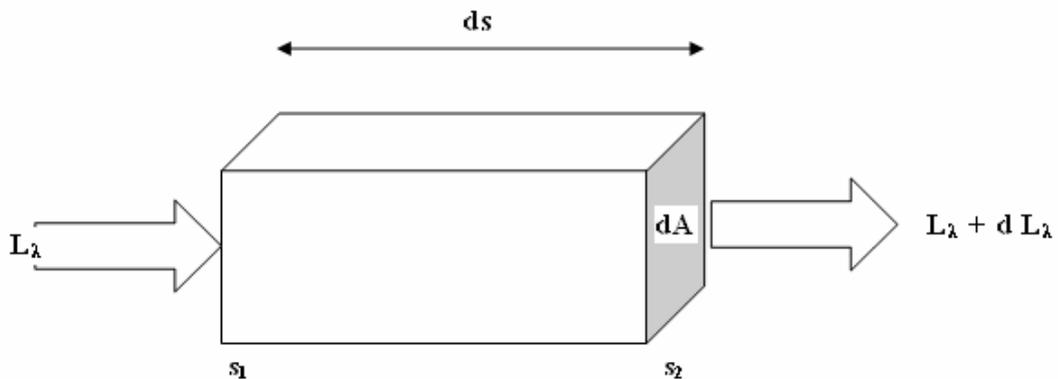


Figura 2.7: Esquema ilustrativo da atenuação sofrida por um feixe de radiação caracterizado pela radiância espectral L_λ ao atravessar um volume de matéria de comprimento ds .

A radiância espectral L_λ associada ao comprimento de onda λ sofre atenuação ou extinção (absorção ou espalhamento) ao interagir com um volume elementar de matéria de comprimento ds , situado a posição s_l de um caminho óptico. Seja dL a variação da radiância espectral incidente L ao longo de um caminho óptico. Pode-se escrever a variação da radiância em termos do coeficiente linear como:

$$dL(\lambda) = -\beta_{\text{ext}}(\lambda) L(\lambda) ds \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}] \quad (2-9)$$

Sendo θ_0 o ângulo de incidência da radiância com a normal à superfície, temos a relação $ds = dz/\cos \theta_0$, que, se substituída na Equação 2-9 e integrada dos dois lados, resulta em:

$$\int_{L_0}^{L_1} \frac{1}{L(\lambda)} dL(\lambda) = \frac{1}{\cos(\theta_0)} \int_{z_0}^{z_1} -\beta_{\text{ext}}(\lambda) dz \quad (2-10)$$

A integral do coeficiente linear de extinção na coluna vertical z é chamada de espessura óptica de extinção (τ_{ext} ou simplesmente τ), que é dada pela espessura óptica de espalhamento mais a espessura óptica de absorção.

A Lei de extinção de Beer-Lambert-Bouguer mostra que a intensidade da radiação decai exponencialmente ao longo do caminho ótico percorrido, onde: L_0 é a radiância incidente e L_1 é a radiância emergente.

$$L_1(\lambda) = L_0(\lambda) \exp\left(-\frac{\tau}{\cos(\theta_0)}\right) \quad [\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}] \quad (2-11)$$

2.3.2. A Equação da Transferência Radiativa

A equação da Lei de extinção de Beer-Lambert-Bouguer descreve como a radiância espectral diminui ao atravessar um meio, devido aos processos de absorção e espalhamento. Entretanto, existem outros processos que podem ocorrer na interação da radiação com um volume de matéria, tais como a emissão, remoção por espalhamento (espalhamento simples) e adição por espalhamento (espalhamento múltiplo).

A equação que considera todos os processos de interação da radiação eletromagnética com a matéria é a equação de transferência radiativa (LIOU, 2002).

Na Figura 2.8 são apresentados esquematicamente os processos de interação da radiação na atmosfera, não sendo possível representar a absorção que pode ser causada tanto por aerossóis quanto na escala molecular.

A espessura óptica da atmosfera é composta pelas espessuras causadas pelo aerossol, pelo espalhamento Rayleigh e pela absorção molecular. Temos então a espessura óptica da atmosfera dada por:

$$\tau = \tau_a + \tau_R + \tau_{\text{gás}} \quad (2-12)$$

em que:

τ_a = é referente ao aerossol

τ_R = é referente ao espalhamento Rayleigh

$\tau_{\text{gás}}$ = é referente à absorção molecular

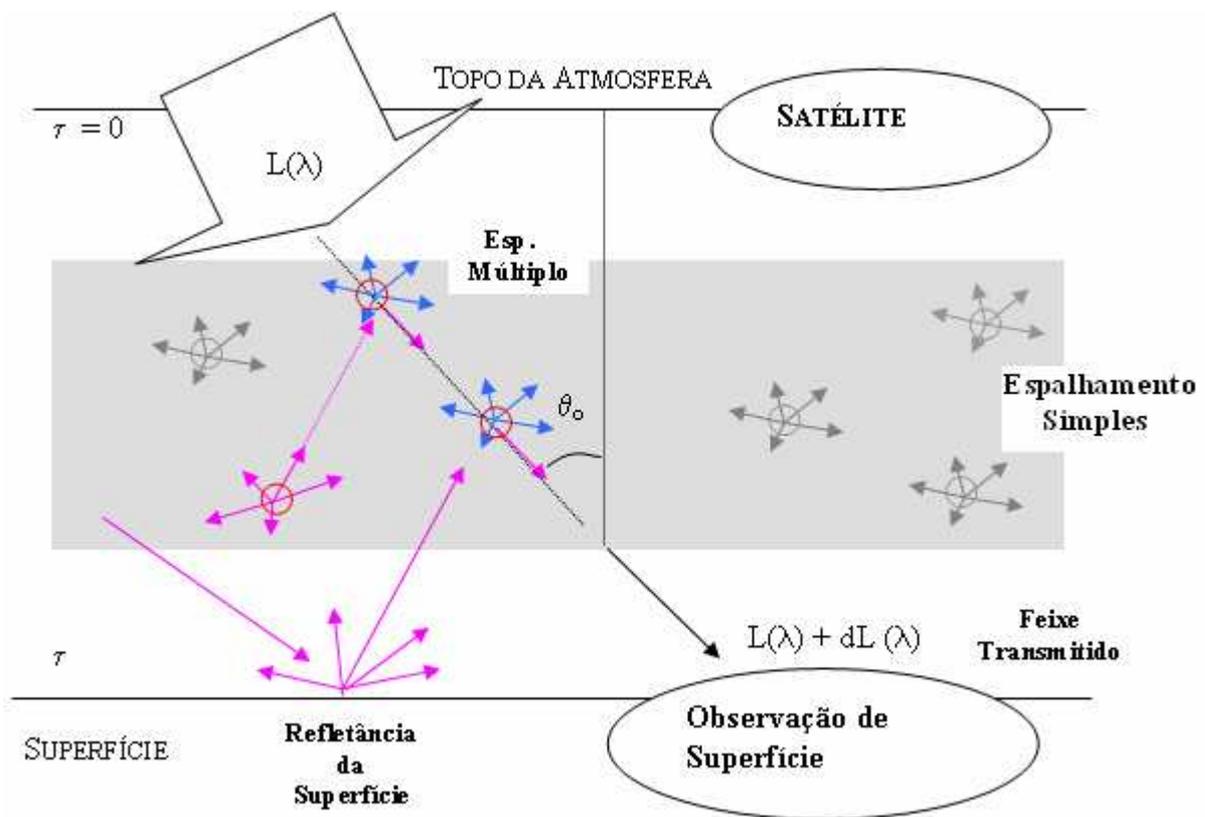


Figura 2.8: Representação esquemática da atenuação da radiação incidente, da adição devido ao espalhamento múltiplo, do feixe transmitido e da refletância da superfície. (figura adaptada de CASTANHO, 2005).

O feixe transmitido é a razão entre a radiância que chega a superfície e a que chega ao topo da atmosfera, chamado de transmitância direta atmosférica (t).

$$t = \frac{L_1(\lambda)}{L_o(\lambda)} = \exp\left(-\frac{\tau}{\cos(\theta_o)}\right) \text{ [adimensional]} \quad (2-13)$$

Outra interação que influencia a medida de radiância feita pelo satélite é a reflexão da superfície. Quando o satélite realiza uma medida sobre áreas continentais a refletância da superfície é altamente variável por causa dos diferentes tipos de solo, diferentes coberturas vegetais e urbanização. Esse efeito é corrigido fazendo-se medidas no comprimento de onda do infravermelho próximo (0,7 a 4 μm), onde a interação com o aerossol é muito menor e assim consegue se estimar a refletância de superfície.

A equação de transferência radiativa é apresentada na Equação 2-14, (LIOU, 2002); onde:

- o primeiro termo é o feixe transmitido diretamente na direção de atenuação da radiância incidente no comprimento de onda λ ;
- o segundo termo é a intensidade da radiação adicionada ao espalhamento na direção de observação devido ao múltiplo espalhamento;
- o terceiro termo é a radiação adicionada ao feixe devido à re-emissão da radiação absorvida pelos constituintes da atmosfera.

$$\pm \mu \frac{dL(\lambda, \tau, \pm \mu, \varphi)}{d\tau} = L(\lambda, \tau, \pm \mu, \varphi) + [-\omega_o(\lambda, \tau)J(\lambda, \tau, \pm \mu, \varphi)] + \{-[1 - \omega_o(\lambda, \tau)]B_\lambda(\lambda, T(\tau))\} \quad (2-14)$$

sendo $\mu = \cos \theta_0$

$$J(\lambda, \tau, \pm \mu, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi L(\lambda, \tau, \pm \mu', \varphi') P(\lambda, \tau, \cos(\Theta)) \frac{d\mu' d\varphi'}{4\pi} \text{ é a função fonte de espalhamento,}$$

ou seja, a soma das contribuições de radiação incidente de várias direções que é espalhada na direção de observação.

τ = é a espessura óptica

P = é a função de fase no ângulo de espalhamento Θ

B_λ = é o valor da função de Planck

λ = é o comprimento de onda da radiação

ω_0 = é o albedo simples.

2.3.3. A radiação recebida pelo Satélite

A aplicação de transferência radiativa apresentada neste trabalho tem o objetivo de avaliar a viabilidade o monitoramento de aerossóis. O sensoriamento remoto dos aerossóis esta baseado nas propriedades de radiância medidas no topo da atmosfera e nas propriedades de refletância da superfície (KAUFFMAN et al., 1997).

A refletância no topo da atmosfera [$\rho_{TOA}(\lambda)$] é definida pela Equação 2-15.

$$\rho_{TOA}(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_0, \varphi) = \frac{\pi L_{TOA}(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_0, \varphi)}{F_o(\lambda) \mu_o} \quad (2-15)$$

Nessa expressão:

L_{TOA} é a radiância espectral emergente no topo da atmosfera [$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$];

$F_o(\lambda)$ é a componente vertical do fluxo solar espectral incidente no topo da atmosfera [$W m^{-2} \mu m^{-1}$];

θ_0 e θ são os ângulos zenitais, solar e do sensor, respectivamente;

φ_0 e φ representam os ângulos azimutais, solar e do sensor.

Algumas considerações são feitas para a refletância medida no topo da atmosfera, uma é a aproximação para uma atmosfera plano-paralela e a outra para uma superfície com refletância Lambertiana (isotrópica). Uma refletância isotrópica é uma refletância sem dependência angular, ou seja, é independente da direção de propagação.

A radiação que chega ao topo da atmosfera interage com a camada de aerossóis sendo retro-espalhada, pró-espalhada, absorvida e transmitida. A interação depende das propriedades ópticas da camada de aerossóis como o albedo simples [$\omega_0(\lambda)$], parâmetro de assimetria [$g(\lambda)$] ou função de fase [$P(\Theta)$], eficiência de extinção [$Q_{ext}(\lambda)$] e espessura óptica da camada de aerossóis (τ_a).

A refletância medida no topo pelo sensor no satélite é uma composição de fatores: há a refletância da atmosfera direta (sem interferência da superfície), mais a componente refletida pela superfície. A radiação que reflete da superfície volta para o espaço onde é medida pelo sensor, mas antes interage novamente com a atmosfera.

Na Equação 2-16, a refletância da atmosfera é representada pelo termo (ρ_0) que é a soma da refletância dos gases (ρ_m) mais a soma da refletância das moléculas de aerossóis. O segundo termo da Equação 2-16 é a parte da radiação que interage com a atmosfera e é transmitida (T_d) até a superfície, interage com esta tendo uma parte refletida ($\rho_{sup} * T_d$) e volta

pra atmosfera até chegar ao seu topo ($\rho_{\text{sup}} * T_d * T_s$) e ser medida pelo sensor (CASTANHO, 2005; KAUFMAN, 1987; MARTINS, 1999).

$$\rho_{\text{TOA}}(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) = \rho_o(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) + \frac{T_d(\lambda, \theta_0)T_s(\lambda, \theta)}{(1 - s\rho')} \rho_{\text{SUP}}(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) \quad (2-16)$$

$$\text{onde } \rho_o(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) = \rho_m(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) + \frac{\bar{\omega}_o \tau P(\lambda, \Theta)}{4\mu\mu_o}$$

T_d é a transmitância na descida

T_s é a transmitância na subida

ρ_{sup} é a refletância da superfície

s é a razão de retro-espalhamento da atmosfera

ρ' é a refletância da superfície média nos ângulos de visada e incidência

3. Material e Métodos

Neste capítulo é apresentada uma descrição de como são calculadas as espessuras ópticas de aerossol (AOD). Algumas informações sobre a utilização da base de dados da CETESB, de como as medidas de concentração de material particulado são obtidas e uma breve descrição sobre medidas do CIMEL são apresentadas.

Os valores de AOD foram calculados pelo método desenvolvido por Castanho (2005), denominado “*Modelo Dinâmico*”. O Modelo Dinâmico parte de medidas de radiâncias obtidas com o sensor MODIS e tem como produto final a AOD média ao redor de pontos pré-definidos, no caso, as estações de monitoramento da CETESB.

A inovação do cálculo da AOD pelo Modelo Dinâmico se dá pela utilização de modelos de aerossol, determinados em função do albedo simples e pela aplicação da metodologia da refletância crítica.

O modelo de aerossol é definido para um conjunto de pontos de medidas de refletância sob determinadas condições, a partir de um estudo sobre as propriedades ópticas do aerossol de São Paulo, (CASTANHO, 2005). A escolha do modelo para cada conjunto de pontos se dá pelo Método da Refletância Crítica (MARTINS, 1999; CASTANHO, 2005). Uma breve descrição da metodologia da Refletância Crítica é apresentada no Anexo A.

A relação entre o material particulado e a AOD pode ser afetada por vários fatores, tais como o perfil vertical de distribuição do aerossol, a umidade relativa e o tempo de permanência do aerossol na atmosfera.

Alguns trabalhos avaliam a relação entre a AOD e o material particulado com simulações em modelo global químico e de transporte (DONKELAAR et al., 2006) ou estimando a concentração de material particulado a partir das medidas de satélites incluindo parâmetros de influencia na AOD como, a umidade relativa e a altura da camada de mistura de aerossol (NICOLANTONIO et al., 2007). Há também um estudo feito nos Estados Unidos, em que foi feita uma comparação entre profundidade óptica do MODIS (com resolução de 10 km) e estações de monitoramento terrestre. Foram verificados resultados satisfatórios para algumas regiões e resultados menos satisfatórios para outras, mostrando, para algumas regiões, a potencialidade do sensor para eventos locais ou regionais de poluição (ENGEL-COX et al., 2004).

3.1. O sensor MODIS e seus produtos

Os sensores MODIS se encontram a bordo dos satélites TERRA e AQUA lançados pela NASA. O satélite TERRA foi lançado em 1999 e o AQUA só em 2002. Ambos são instrumentos de pesquisa multidisciplinar que visam fornecer informações científicas sobre interações que ocorrem na superfície terrestre, na temperatura de superfície, no oceano e na atmosfera. Os satélites possuem órbita polar em torno da Terra, numa altitude de aproximadamente 700 km. O TERRA possui uma órbita descendente, com horário de passagem em torno das 10h30min sobre o Equador, e o AQUA uma órbita ascendente, com passagem em torno das 13h30min. Os satélites repetem a geometria da sua órbita a cada 16 dias (KING et al., 1992; 2003; REMER et al., 2006).

O MODIS é um radiômetro espectral passivo que possui uma largura de abertura de 2330 km, sendo capaz de monitorar quase todo o globo em 1 dia. As grandezas espectrais medidas são determinadas pelo que se chama de bandas. O MODIS possui 36 bandas espectrais discretas entre 0,4 e 14,5 μm . As bandas espectrais abrangem diferentes resoluções espaciais, podendo ser de 250 m, 500 m e 1 km.

As bandas 1 e 2 têm resolução de 250 m, as bandas de 3 a 7 possuem resolução de 500 m e as demais de 1 km. Estão associadas aos seguintes comprimentos de onda: banda 1 = 0,65 μm ; banda 2 = 0,85 μm ; banda 3 = 0,45 μm ; banda 4 = 0,55 μm ; banda 5 = 1,24 μm ; banda 6 = 1,64 μm ; banda 7 = 2,11 μm . Barnes et al. (1998) descrevem detalhadamente o instrumento MODIS, seu desenho óptico, bandas espectrais e suas características, calibração e operação.

As medidas dos satélites TERRA e AQUA são periodicamente transmitidas para estações de recepção na Terra. Os dados transmitidos são separados por sensores (MODIS, ASTER, CERES, MISR, MOPITT) e enviados para o GSFC-NASA (*Goddard Space Flight Center*) para processamento.

Os produtos do MODIS são gerados em 3 níveis: nível L1, nível L2 e nível L3 (KING et al., 2003). Possuem 2330 km de largura, aproximadamente 2030 pixels x 1354 pixels, que geram o primeiro produto no nível 1, o L1A, chamados de MOD01 ou MYD01. O símbolo MOD é usado quando se trata de produto do MODIS a bordo do TERRA e o MYD quando se trata do AQUA, o resto da simbologia usada é igual para ambos e explicada a seguir.

No nível 1 é gerado o primeiro produto e a partir dele são gerados os arquivos de cobertura espacial, como o MOD02/MYD02 (nível L1B), que possui radiâncias calibradas e

georreferenciadas das 36 bandas espectrais separadas conforme a sua resolução. O produto MOD03 é o arquivo que possui os dados de georreferenciamento completos com a respectiva resolução espacial do sensor.

No Nível 2 (L2) são gerados diversos produtos: os produtos de máscara de nuvens para distinção entre pixels com e sem nuvens (MOD35); produto de perfil atmosférico (MOD07) (LI et al., 1999, 2000, 2001); produto de aerossol (MOD04) sobre terra (KAUFMAN et al., 1997) e sobre oceano (TANRÈ et al., 1997, 1999); produto de água precipitável (MOD05) (KAUFMAN & GAO, 1992; GAO & KAUFMAN, 2003); e produto sobre propriedades de nuvens (MOD06) (PLATNICK et al., 2003).

Por fim, são gerados os produtos de Nível 3 (MOD08) que representam médias estatísticas (especialmente em 1° x 1° e no período de 1 dia, 8 dias ou mensais) das propriedades obtidas no Nível 2, para todo o globo (KING et al., 2003). Informações detalhadas sobre o algoritmo de máscara de nuvens podem ser encontradas em Ackerman et al. (1998) e Martins et al. (2002).

O produto do MODIS utilizado nesse trabalho foi o L1B, que possui informações de radiâncias calibradas e georreferenciadas de todas as bandas espectrais.

As informações sobre radiâncias são utilizadas para se calcular a profundidade óptica de aerossol (AOD) através de um algoritmo discutido no Anexo A.

Os arquivos são disponibilizados no formato HDF (Hierarchical Data File), o que permite a organização de planilhas (matrizes) de forma hierárquica e com informações correspondentes a cada variável (SDS – Scientific Data Set).

O tipo de arquivo utilizado foi o de radiâncias com 500 m de resolução. Esse tipo de arquivo é chamado de MOD02HKM do nível 1B. O nome completo do arquivo quando obtido do satélite TERRA se dá como:

MOD04_L2.AYYYYDDD.HHMM.VVV.YYYYDDDDHHMMSS.hdf

Definição:

MOD04_L2= Earth Science Data Type Name

A= Acquisition Data

YYYYDDD= Data year and Julian Date

HHMM= Data Hour & Minute Start Time

VVV= Collection Version

YYYYDDDDHHMMSS= Processing Date & Time

hdf= Suffix denoting HDF file

3.1.1. Imagens de AOD geradas pela NASA e pelo Modelo Dinâmico

As imagens abaixo são do 242º dia do ano de 2004 durante a passagem do satélite TERRA. Nas Figura 3.1 (a e b) são mostrados produtos finais do MODIS: em (a) a imagem no visível e em (b) o produto de AOD com resolução de 10 km. Comparando as duas imagens pode-se observar que há uma falha no produto de máscara de nuvens do satélite, pois há regiões de imagem limpa (sem nuvens) em que não foi gerado o produto de AOD. Na Figura 3.1c é apresentado um recorte do produto de AOD do MODIS para a RMSP. O produto é extraído diretamente do arquivo hdf do MODIS. Em (d) e (e) tem-se o recorte para a RMSP, agora com a AOD na resolução de 1,5 km calculada pelo Modelo Dinâmico com o método da Refletância Crítica em (d) e pelo modelo3 (modelo de aerossol médio) em (e).

Na Figura 3.1e os pontos em branco foram excluídos pelo produto de máscara de nuvem do Modelo Dinâmico e em (d) além dos que já haviam sido excluídos pela máscara de nuvem tem-se muitos outros pontos excluídos pelo método da refletância crítica.

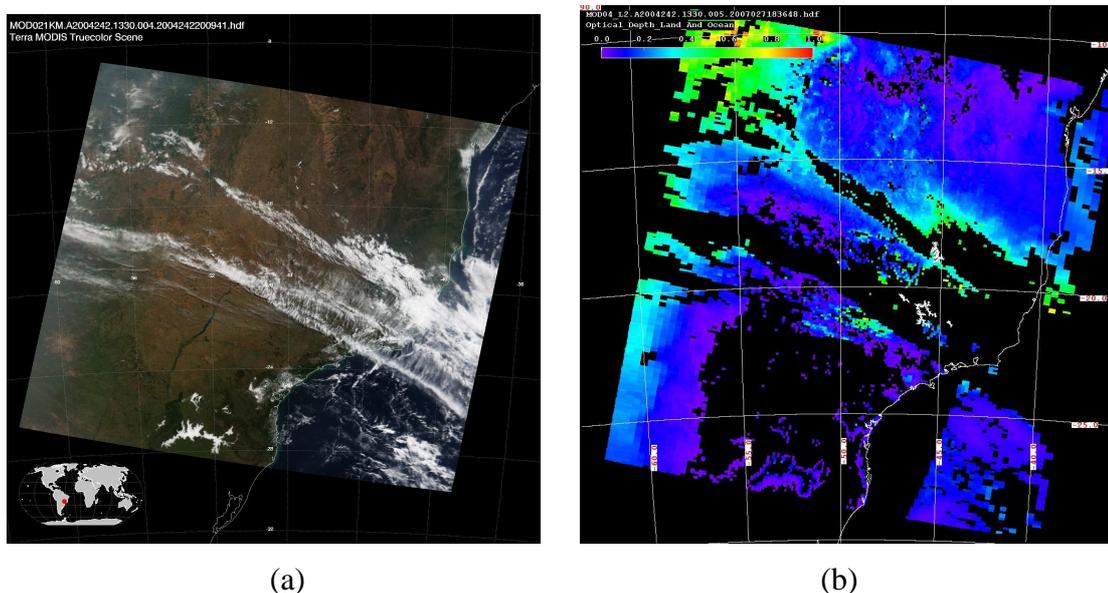
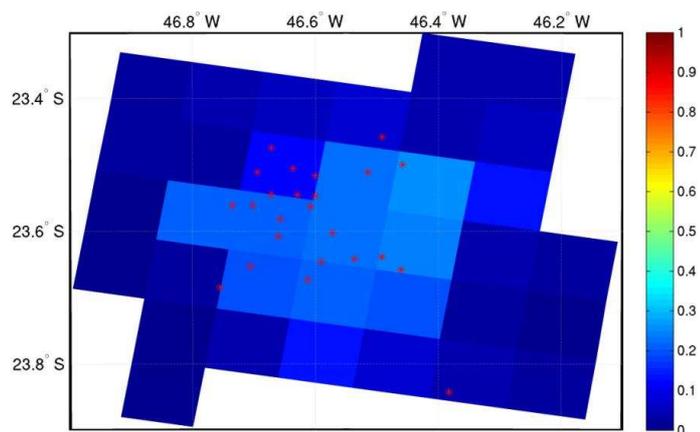
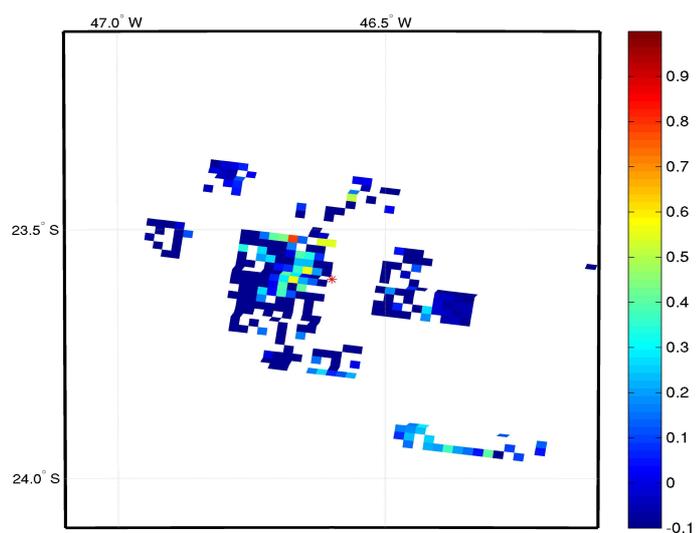


Figura 3.1: Imagem para o dia 242 do ano de 2004 do TERRA: a) Imagem do MODIS no visível, b) Produto de AOD 10 km do MODIS, c) Produto de AOD 10 km do MODIS na RMSP, d) Produto do Modelo Dinâmico na RMSP com resolução de 1,5 km x 1,5 km – Refletância Crítica, e) Produto do Modelo Dinâmico na RMSP com resolução de 1,5 km x 1,5 km – Modelo 3 de aerossol

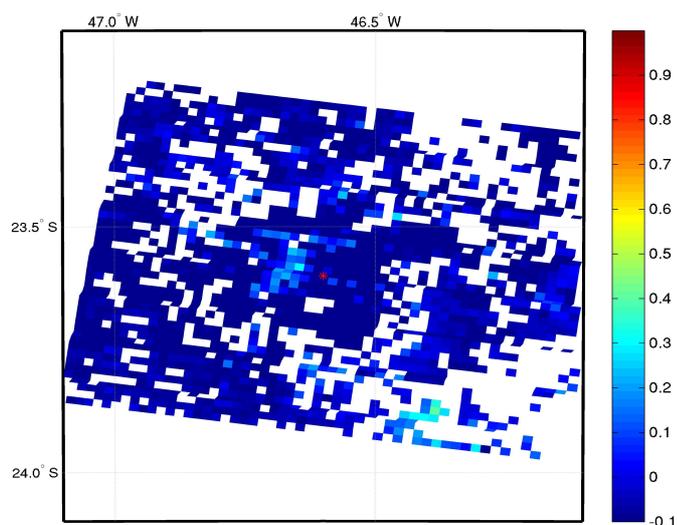


(c)



(d)

Figura 3.1: Continuação.



(e)

Figura 3.1: Conclusão.

3.2. Medidas de Material Particulado em São Paulo pela CETESB.

Os resultados apresentados neste trabalho abrangem o período entre os anos de 2002 e 2005. Para validar os resultados obtidos por meio dos dados de satélite, foram utilizadas medidas da concentração de material particulado feitas pela rede de monitoramento da CETESB (automática e manual) durante o período considerado. Foram utilizados dias e horários dentro da disponibilidade da base de dados e da coincidência com datas em que havia medidas do satélite.

Na Tabela 3.1 são apresentadas as estações onde ocorrem o monitoramento do MP_{10} e do $MP_{2,5}$ e suas respectivas localizações geográficas, ao redor das quais foram calculadas as AOD's. Para as medidas de MP_{10} foram calculadas médias diárias (24 horas) e médias diurnas (médias para o período entre 6 e 18 h.). Nas análises com o $MP_{2,5}$ foram utilizadas as médias diárias fornecidas pela CETESB.

Tabela 3.1: Tabela da Estações de Monitoramento da CETESB com posição geográfica

SIGLA	NOME	LATITUDE	LONGITUDE	PM10	PM2,5
PDP	Pq. D. Pedro II	-23,5453	-46,6292	SIM	
SAN	Santana	-23,5056	-46,6361	SIM	
MOC	Móoca	-23,5472	-46,6000	SIM	
CAM	Cambuci	-23,5631	-46,6078	SIM	
IBR	Ibirapuera	-23,5819	-46,6569	SIM	SIM
NSO	Nossa Senhora O	-23,4744	-46,6717	SIM	
SCS	S. Caetano do Sul	-23,6028	-46,5722	SIM	SIM
CON	Congonhas	-23,6081	-46,6603	SIM	
LAP	Lapa	-23,5111	-46,6944	SIM	
CEC	Cerqueira Cesar	-23,5450	-46,6717	SIM	SIM
PEN	Penha	-23,5114	-46,5147	SIM	
CET	Centro			SIM	
GUA	Guarulhos	-23,4583	-46,4917	SIM	
STA	Stº André-Centro	-23,6417	-46,5361	SIM	
DIA	Diadema	-23,6733	-46,6128	SIM	
SAA	Santo Amaro	-23,6528	-46,7056	SIM	
OSC	Osasco	-23,5167	-46,6000	SIM	
STC	Stº André-Capuava	-23,6389	-46,4917	SIM	
SBE	S. Bernardo do Campo	-23,6464	-46,5908	SIM	
TAB	Taboão da Serra	-23,6847	-46,7550	SIM	
SMP	S. Miguel Paulista*	-23,5000	-46,4583	SIM	
MAU	Mauá	-23,6578	-46,4608	SIM	
CUB	Cubatão- v. Parisi	-23,8422	-46,3825	SIM	
PIN	Pinheiros	-23,5612	-46,7017	SIM	SIM

3.3. O radiômetro CIMEL

A AERONET (AERosol RObotic NETwork), rede mundial de radiômetros solares de monitoramento de aerossóis, possui mais de 200 radiômetros Cimel Eletronique (CE-318A), espalhados pelo mundo em locais estratégicos. O CIMEL é um radiômetro espectral solar que mede propriedades ópticas de diferentes tipos de aerossol na coluna atmosférica. As medidas são feitas em oito canais, que têm comprimentos de onda de 0,34, 0,38, 0,44, 0,50, 0,67, 0,87, 0,94 e 1,02 μm .

O radiômetro CIMEL localizado em São Paulo opera desde maio de 2000 no topo do Edifício Pelletron do Instituto de Física da USP, localizado no campus Cidade Universitária da Universidade de São Paulo, e um dos produtos de seu algoritmo é a profundidade óptica de aerossol (AOD).

Neste trabalho a medida de profundidade óptica de aerossóis (AOD) em 500 nm, obtida pelo CIMEL, é comparada com medidas de concentração de material particulado (MP_{10}) medidos próximo à superfície. A estação da CETESB da qual as medidas foram

extraídas está localizada no bairro de Pinheiros e foi selecionada por ser a de maior proximidade com o radiômetro CIMEL utilizado. É importante destacar que, embora essa seja a estação de monitoramento mais próxima, as duas localidades apresentam padrões distintos de uso do solo, sendo a região de Pinheiros mais urbanizada que a do Edifício Pelletron, localizado numa área mais isolada. Esta diferença pode gerar discrepâncias consideráveis.

O período da análise utilizado está compreendido entre março de 2002 e dezembro de 2005 e a base de dados é composta por médias horárias, de MP_{10} e da AOD, sempre no período diurno.

A AERONET mede a AOD com um intervalo de poucos minutos, desde que não haja nuvens, situação na qual não é feita a medida. Por esse motivo, tem-se uma irregularidade muito grande na quantidade de medidas feitas a cada hora. A metodologia utilizada foi calcular uma média horária das medidas existentes de AOD e compará-la com médias horárias do MP_{10} e médias diárias de $MP_{2,5}$ fornecidas pela CETESB. Também foram comparados os produtos de AOD obtidos pelo MODIS, pelo CIMEL e pelo Modelo Dinâmico.

4. Análise de Dados

Neste capítulo são apresentadas as principais análises feitas no decorrer deste trabalho. O desenvolvimento dos itens e subitens estão apresentados, na medida do possível, de forma fiel à ordem cronológica do desenvolvimento da pesquisa e têm o objetivo de explorar fatores e condições que interferem no valor da correlação entre a concentração de material particulado e a profundidade óptica de aerossol, buscando assim, um melhor entendimento do comportamento desses parâmetros na RMSP.

A base de dados consiste em dias no período de 2002 a 2005. Os dias foram selecionados com os critérios de haver imagem do MODIS sobre a região estudada em um dos satélites, TERRA ou AQUA, e ao mesmo tempo haver medidas no radiômetro CIMEL. Essa condição atende ao critério de dias “sem nuvens”, pois o CIMEL não realiza medidas em dias de céu encoberto. Condição necessária para o Modelo Dinâmico calcular a AOD.

Após a seleção dos dias foram extraídas da base de dados da CETESB as medidas de concentração do material particulado em todas as estações de monitoramento nos dias em que havia medidas dos satélites.

Os resultados são apresentados para cada estação, já que a proposta do Modelo Dinâmico é de identificar um tipo de aerossol para cada região.

4.1. Correlações entre concentrações de MP_{10} e AOD

O objetivo deste trabalho foi estudar a correlação entre o MP e a AOD e pesquisar o quanto estas duas variáveis são comparáveis sobre a RMSP. A região possui um número razoável de estações a serem investigadas, tanto na sua correlação com a AOD quanto na verificação do comportamento entre as estações, podendo fornecer assim uma certa validação do Modelo Dinâmico na região.

Os valores médios de MP_{10} utilizados foram calculadas com base em médias horárias de concentração de material particulado inalável (MP_{10}). Foram calculadas médias diurnas (entre 6 e 18 h), médias diárias (médias de 24 h.) e se utilizou também a média horária mais próxima ao horário de passagem do satélite, média das 11h para os dias com medida do satélite TERRA e das 13h para dias com medida do satélite AQUA.

Os valores de profundidades ópticas médias (AOD) foram calculados com o Modelo Dinâmico, pelo método da refletância crítica, usando um fator de superfície de 0,6, resolução

de 1,5 km e posterior cálculo de médias para áreas de 10 km x 10 km ao redor das estações da CETESB.

Na tentativa de se investigar diferenças no comportamento dos parâmetros, na AOD e na concentração de MP_{10} , com relação à horários de medidas e instrumentos, são apresentadas correlações e curvas de regressão distintas para valores de AOD obtidas a partir do satélite TERRA e do satélite AQUA.

Os resultados das curvas para comparações e o valor de R (coeficiente de correlação de Pearson) são apresentados a seguir para o conjunto de medidas disponíveis nos dias selecionados e em todos os pontos de monitoramento da RMSP.

Foram feitas investigações para diferentes períodos: para todos os dias disponíveis e somente os meses de junho, julho e agosto, relativos ao período de inverno.

O primeiro resultado apresentado na comparação do MP_{10} , Figura 4.1, mostra os diagramas de dispersão e as correlações entre médias horárias de MP_{10} e AOD. A esquerda são apresentados os resultados para todo o período e a direita o resultados somente para o inverno.

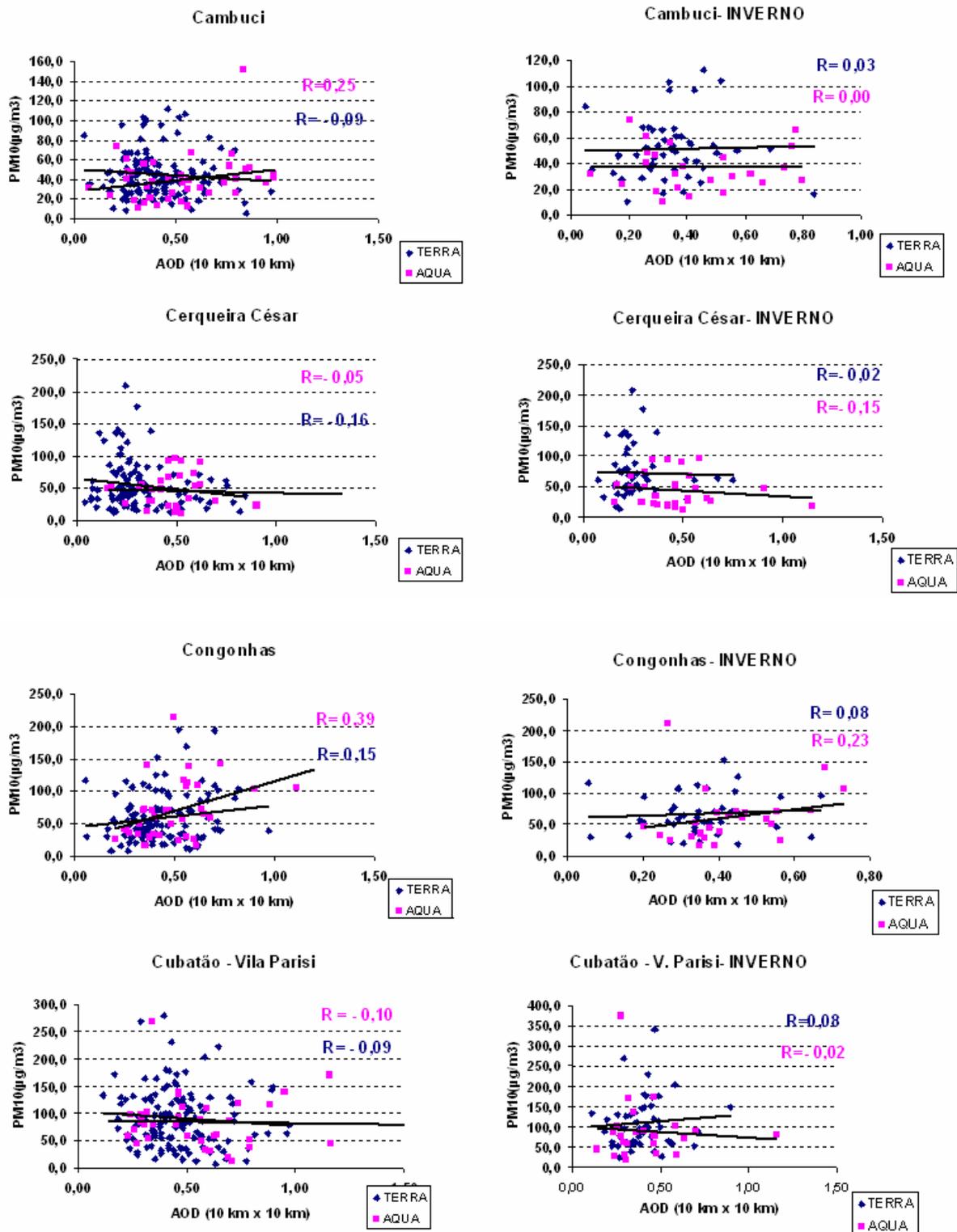


Figura 4.1: Diagramas de Dispersão e correlações entre a concentração de material particulado $MP_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ nas estações da CETESB e a AOD média (10 km x 10 km). À esquerda é mostrada a dispersão para todo o período e a direita somente médias no período de inverno. Curva do TERRA média horária das 11 h e do AQUA das 13 h, para o MP_{10} .

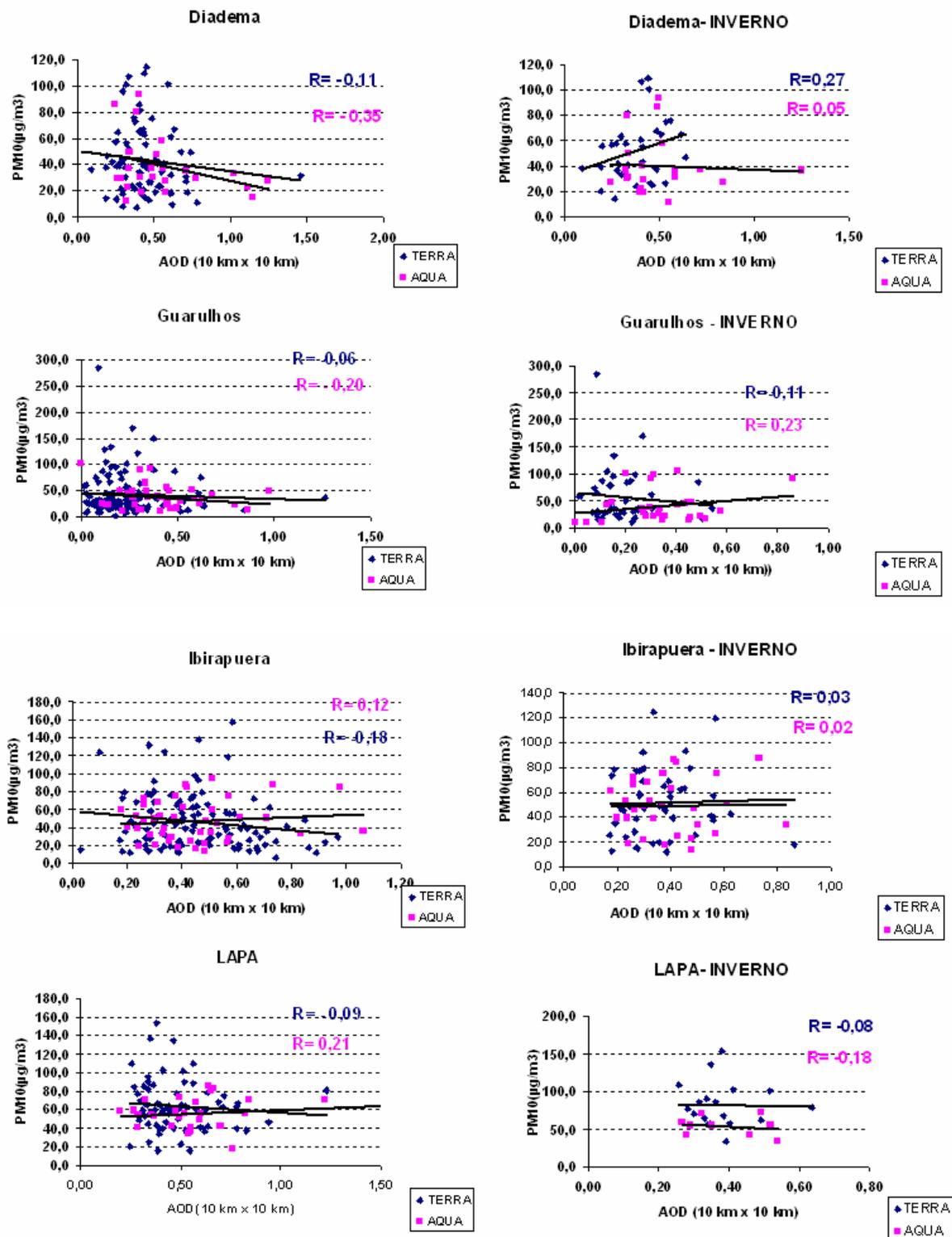


Figura 4.1: Continuação.

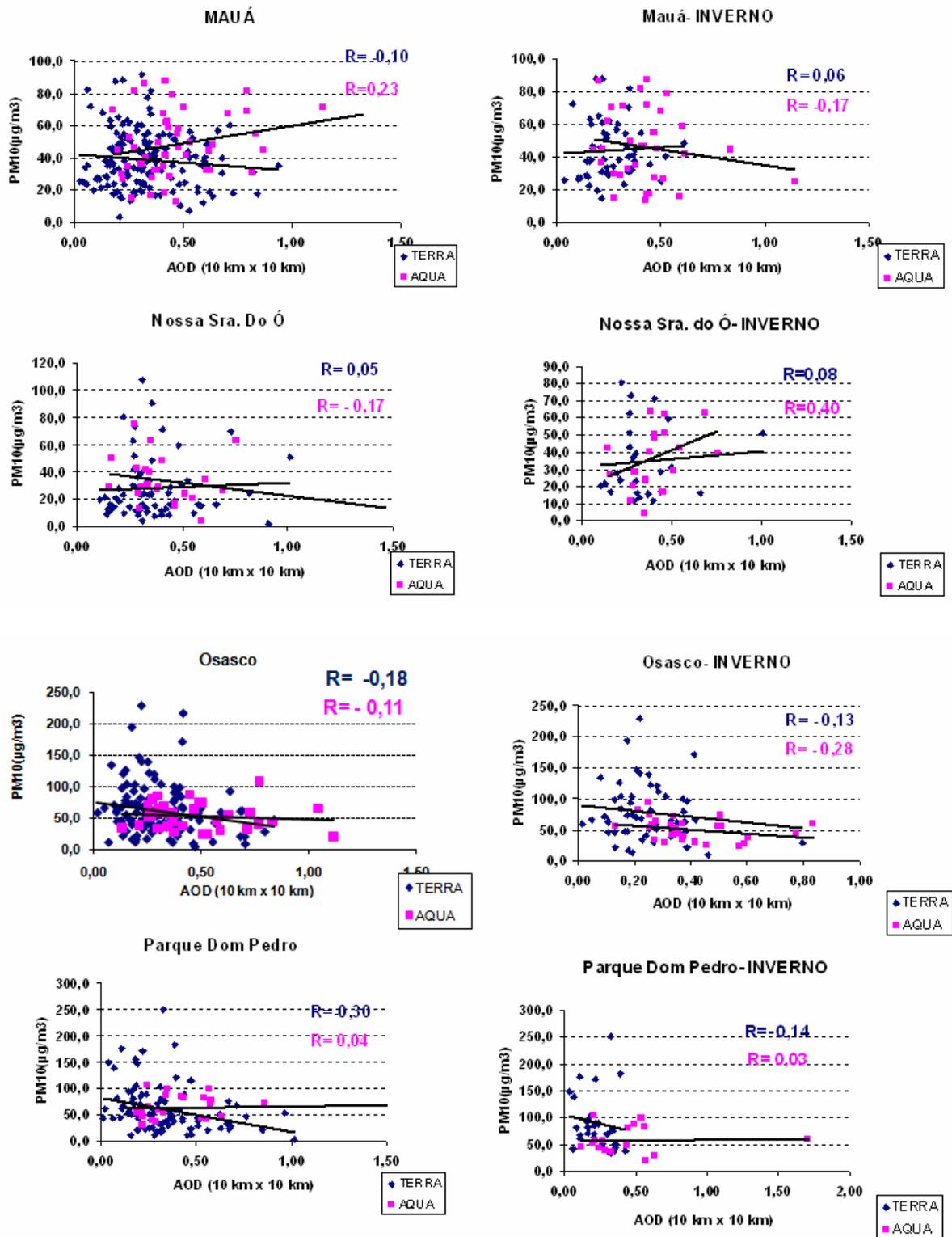


Figura 4.1: Continuação.

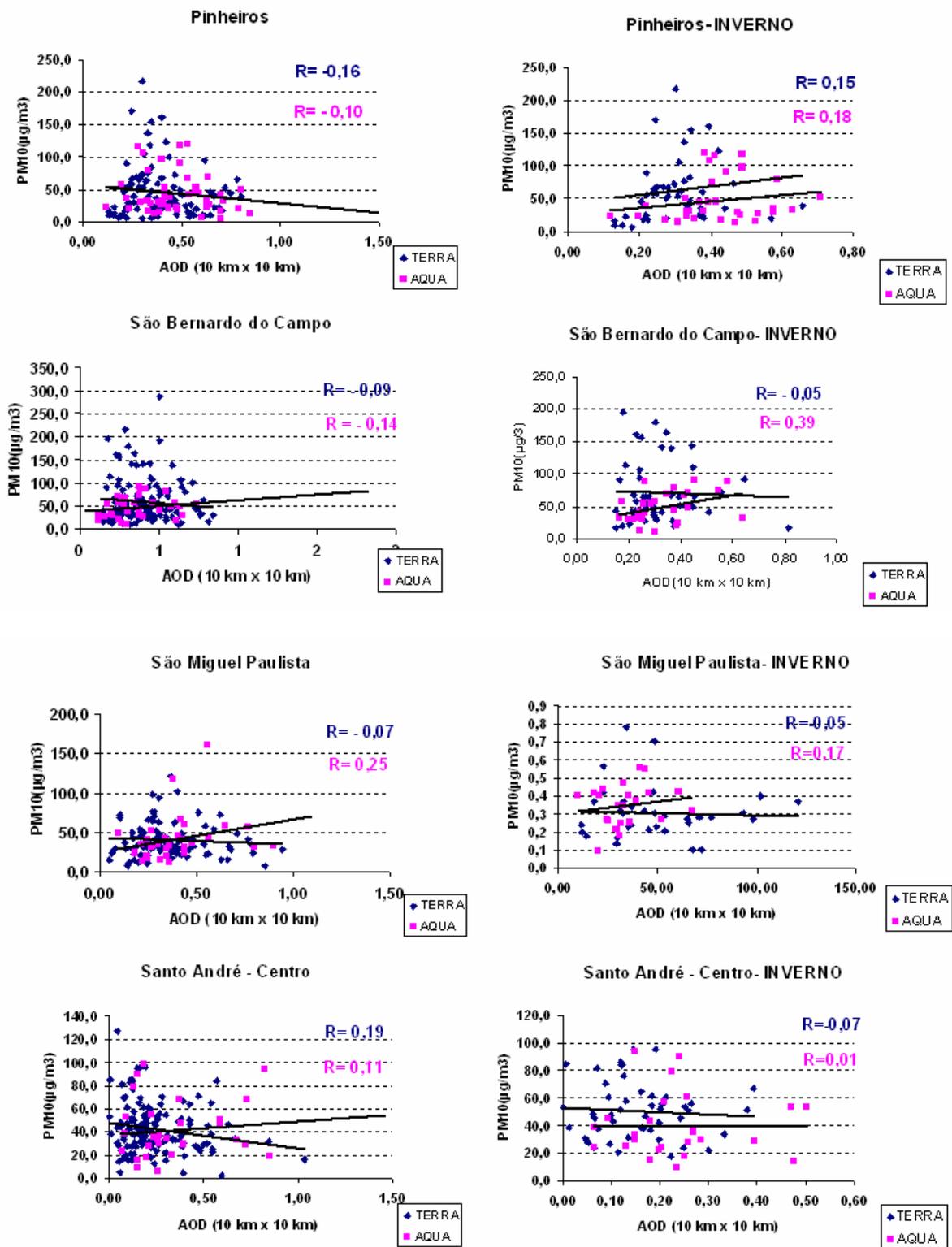


Figura 4.1: Continuação.

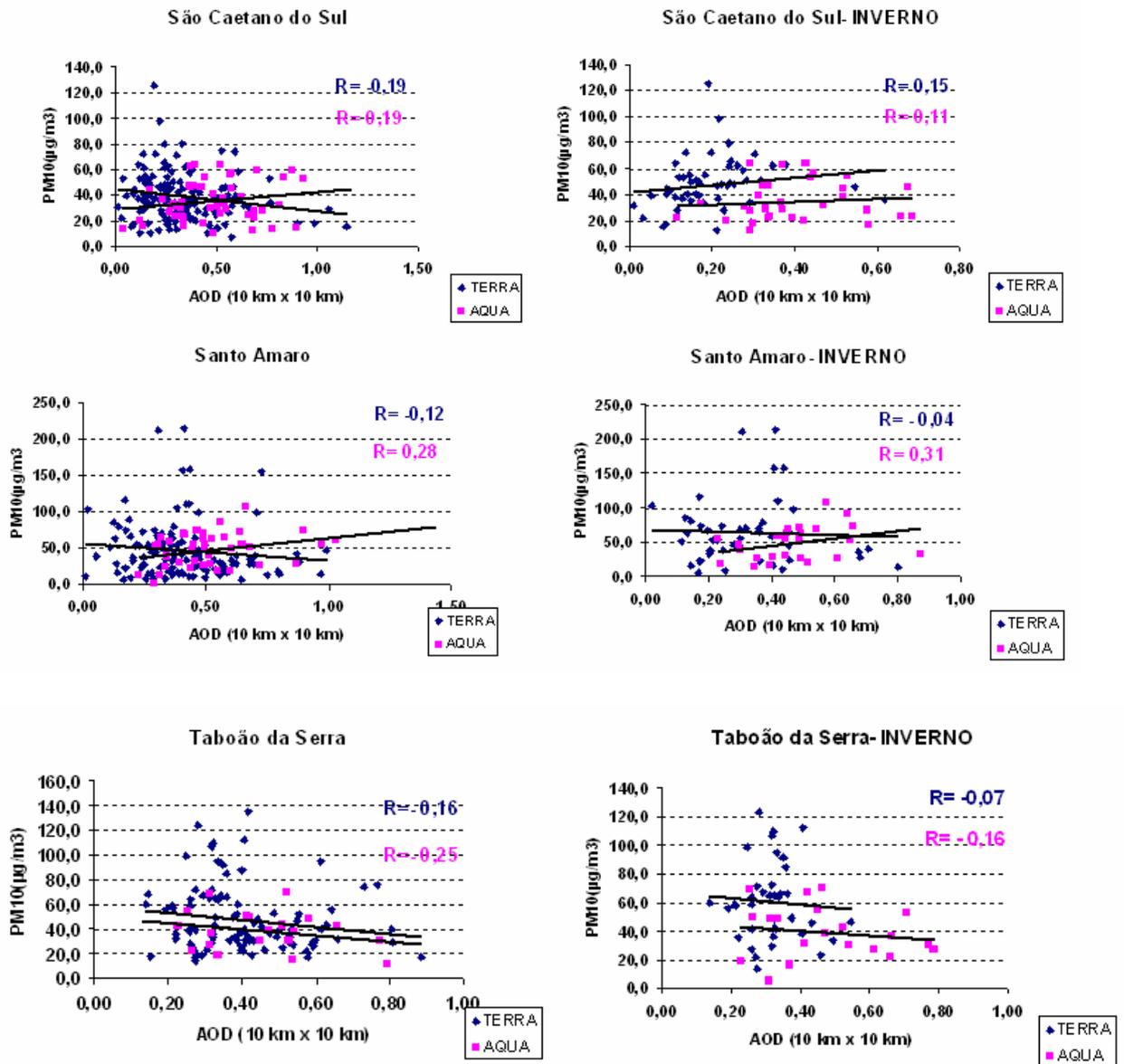


Figura 4.1: Conclusão.

Nos resultados apresentados na Figura 4.1 a maioria das estações apresenta uma correlação negativa ou valores de R próximos de zero entre os parâmetros. As estações de Congonhas e Nossa Senhora do Ó são as exceções, apresentando curvas com correlações positivas. No entanto a estação de Congonhas apresenta piora quando analisada somente para os dias de inverno e a estação Nossa Senhora do Ó apresenta uma significativa melhora na curva de medidas do satélite AQUA. Algumas outras estações apresentam melhora na correlação quando verificadas no período de inverno, porém, não é possível verificar um padrão bem definido.

Um ponto a ser observado são os valores de concentrações acima de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para algumas estações. Para esses valores a AOD não apresenta uma boa resposta se comparada ao MP. Essas são características de poluição muito localizada nas estações que na média horária de MP estão muito evidentes.

Os gráficos da Figura 4.2 apresentam as correlações e retas de regressão entre a AOD média de $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ e as médias diárias e diurnas de MP_{10} para todas as estações estudadas.

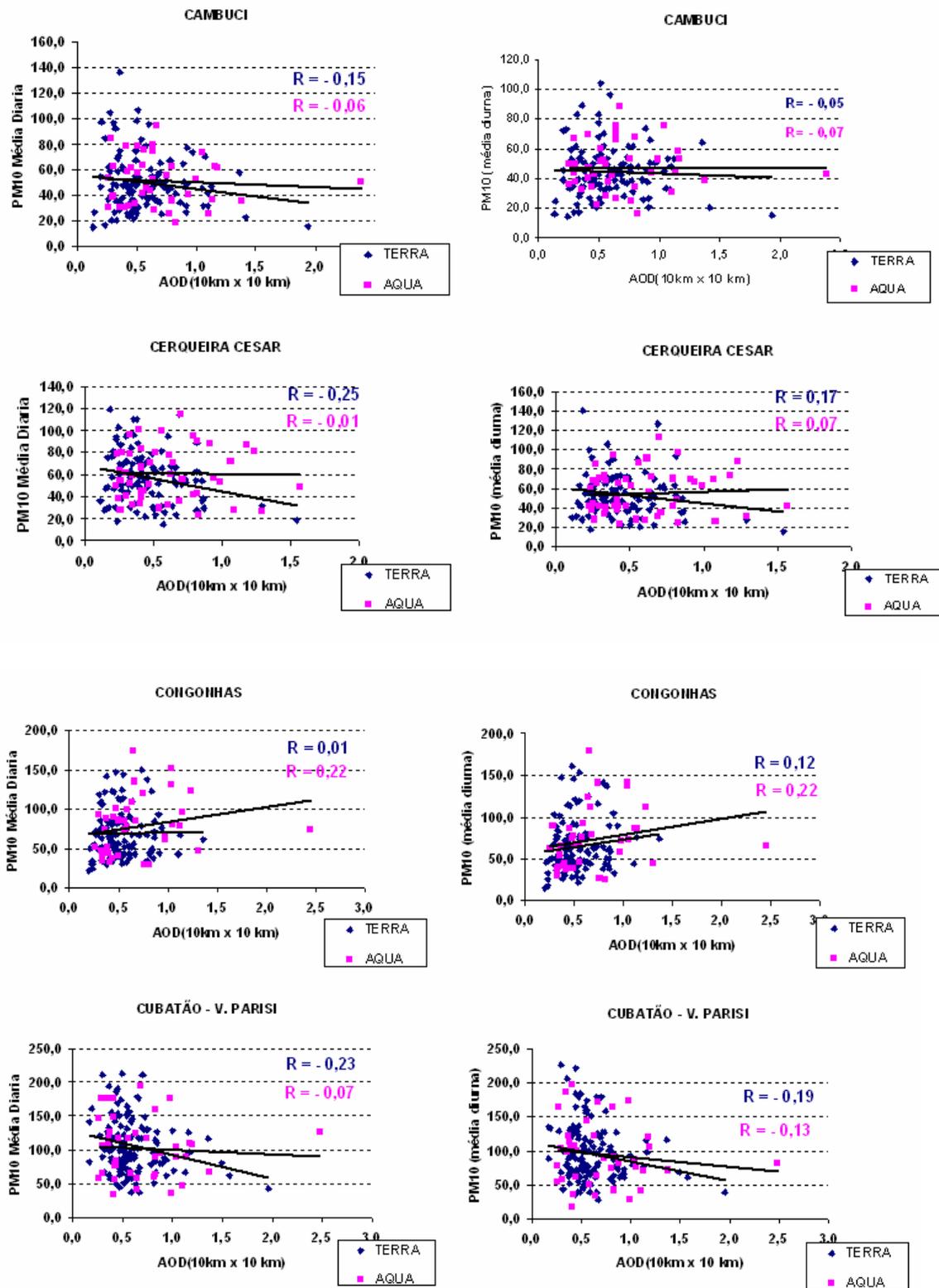


Figura 4.2: Diagramas de Dispersão e correlações entre a concentração de material particulado $PM_{10}(\mu g/m^3)$ nas estações da CETESB e da AOD média (10 km x 10 km). À esquerda é mostrada a dispersão para médias diárias de concentração de PM_{10} e a direita para médias diurnas (6h às 18 h).

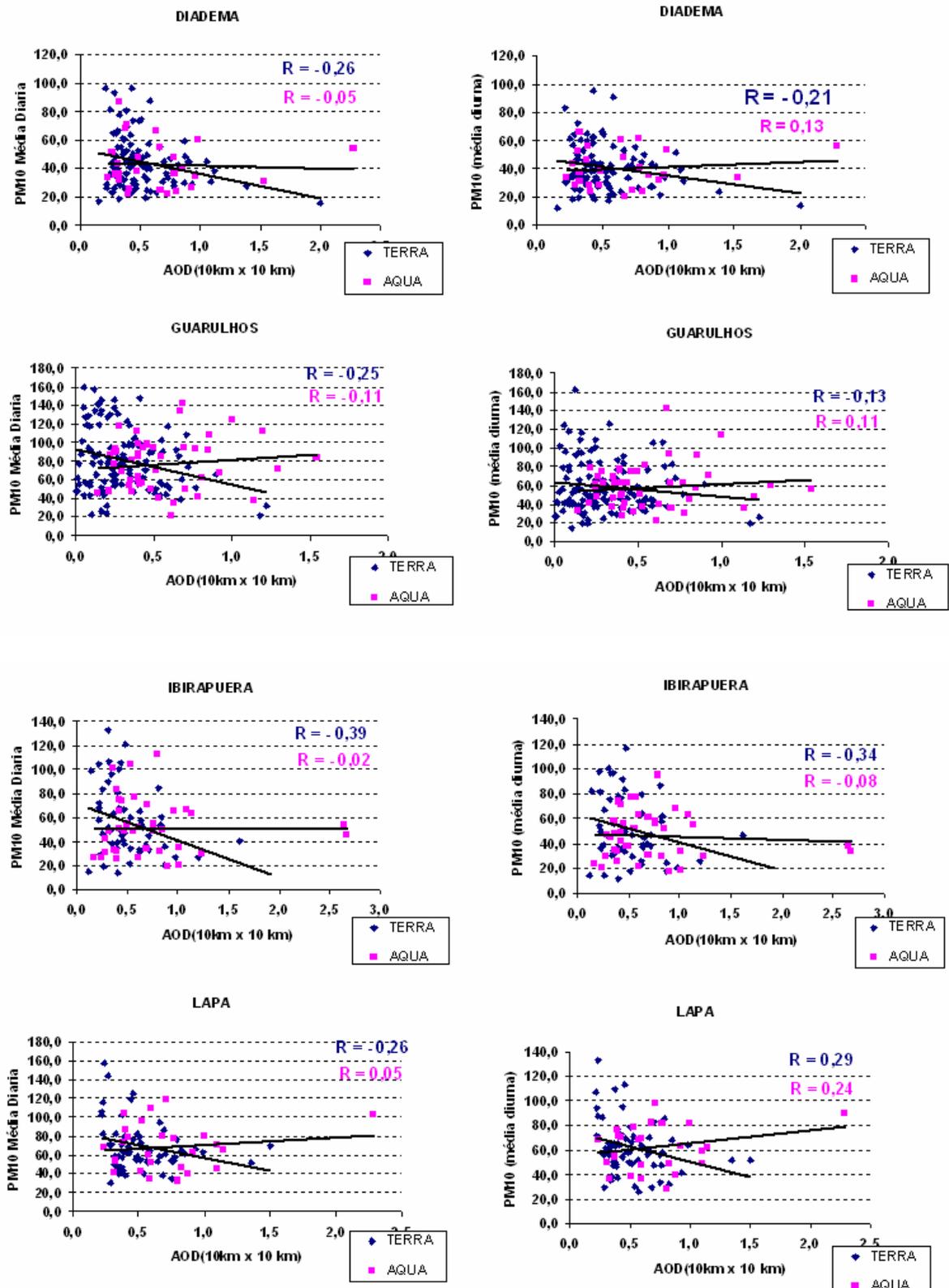


Figura 4.2: Continuação.

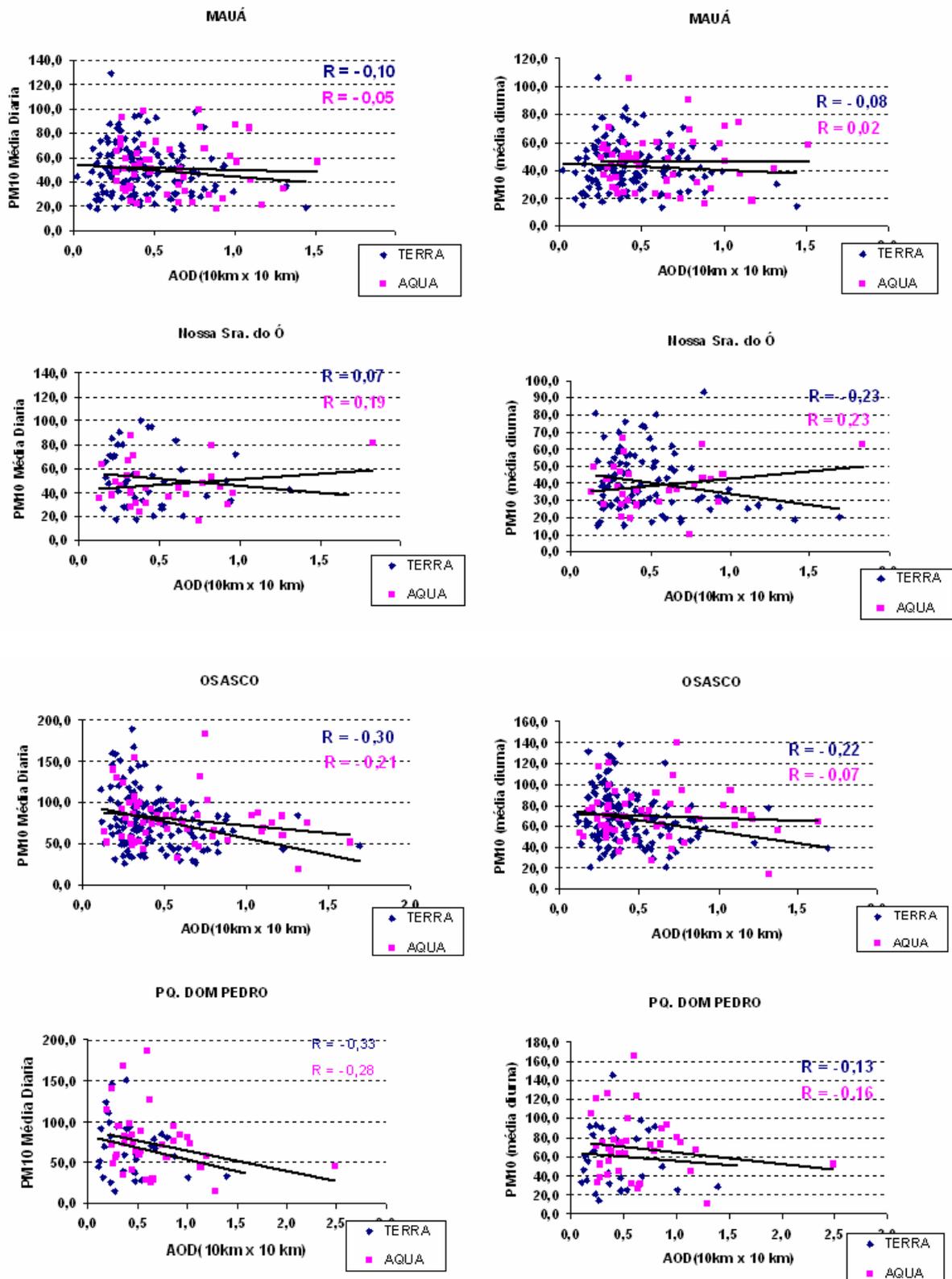


Figura 4.2: Continuação.

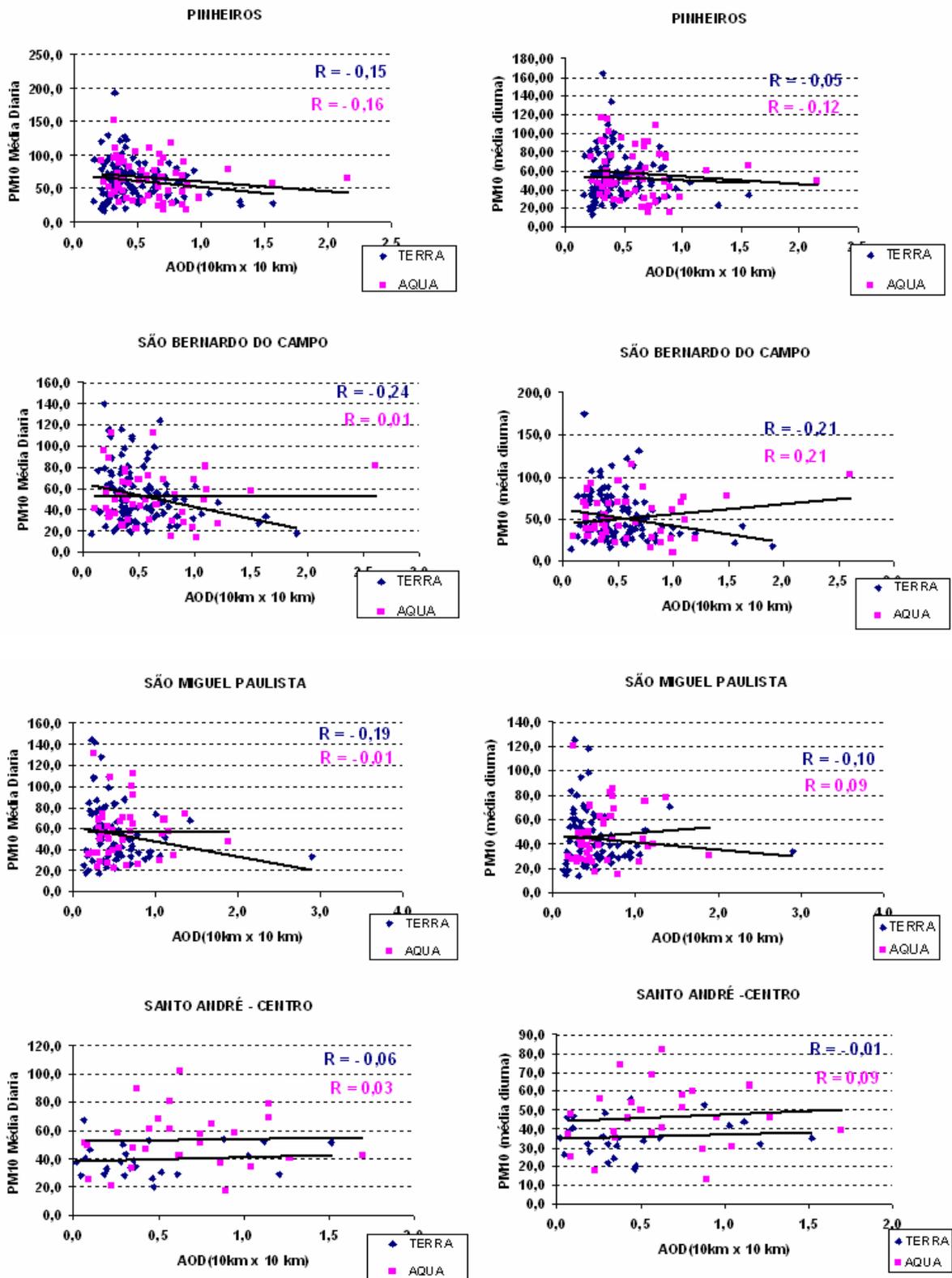


Figura 4.2: Continuação.

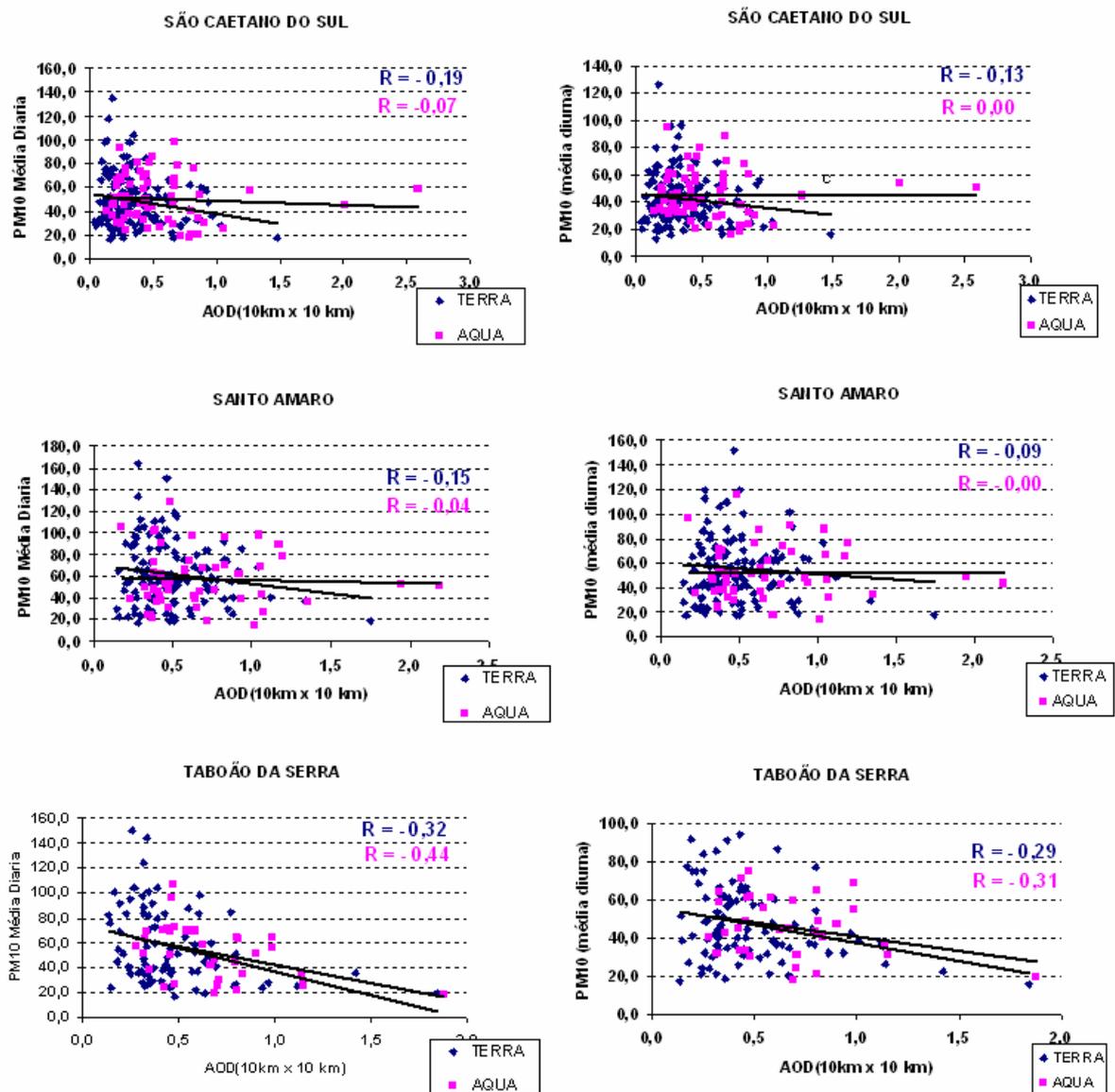


Figura 4.2: Conclusão.

As correlações apresentadas na Figura 4.2 mostram um comportamento parecido se comparados aos apresentados na Figura 4.1. Muitas estações apresentam valores de correlação negativos e novamente pode-se destacar as estações de Congonhas e Nossa Senhora do Ó, que apresentam correlações positivas.

Na Figura 4.2, ao compararmos os gráficos de dispersão de médias diárias (à esquerda) com médias diurnas (à direita), percebe-se uma diminuição da concentração de MP_{10} para as médias diurnas e um aumento para o valor de correlação para a maioria das estações estudadas. Pode-se destacar os resultados obtidos a partir do satélite AQUA onde 9 das 19 estações estudadas apresentaram correlações positivas.

Os resultados para médias diurnas com menor concentração de MP_{10} podem estar evidenciando a influência da camada de mistura, que durante o dia se apresenta mais elevada, fazendo com que o de material particulado esteja mais disperso.

A partir dos resultados obtidos para médias diárias, foram isolados os meses de junho, julho e agosto com o objetivo de investigar a influência da umidade relativa ou quantidade de água presente nos aerossóis. O período foi escolhido por ser a época mais seca na região.

Os resultados das regressões e correlações para médias diurnas no período de inverno são apresentados na Figura 4.3.

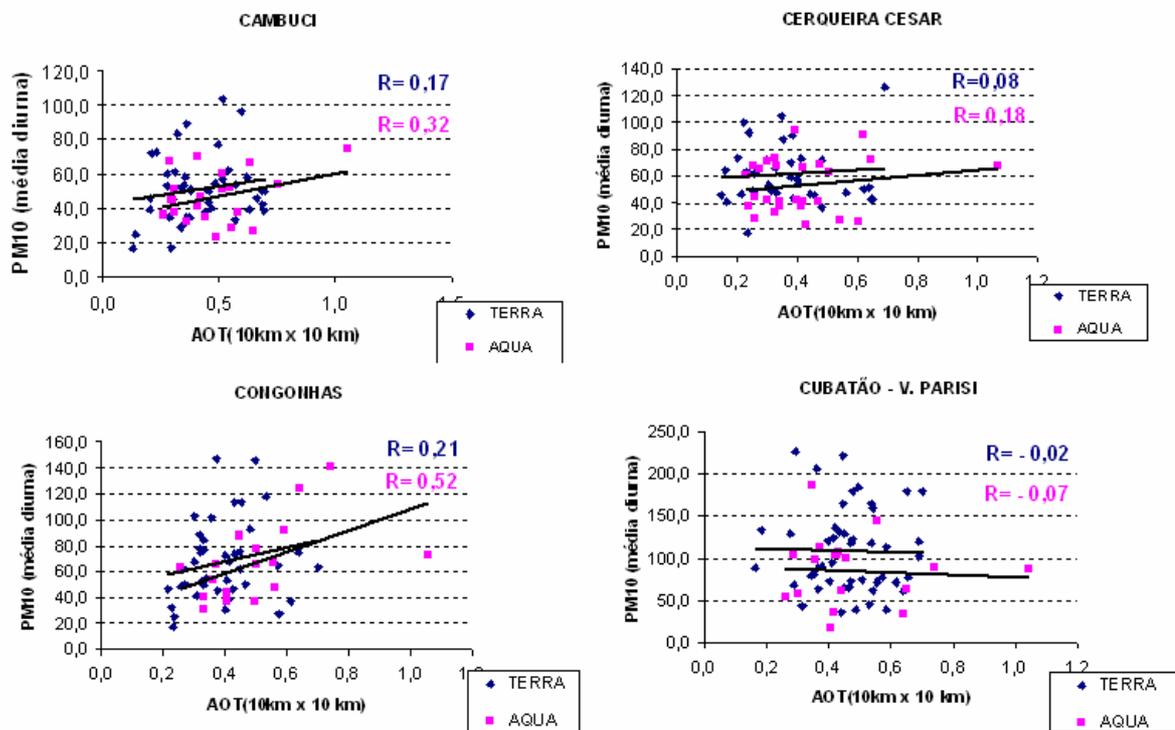


Figura 4.3: Diagramas de Dispersão e correlações entre a média diurna da concentração de material particulado $MP_{10}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ nas estações da CETESB e a AOD média (10 km x 10 km), para os meses de junho, julho e agosto.

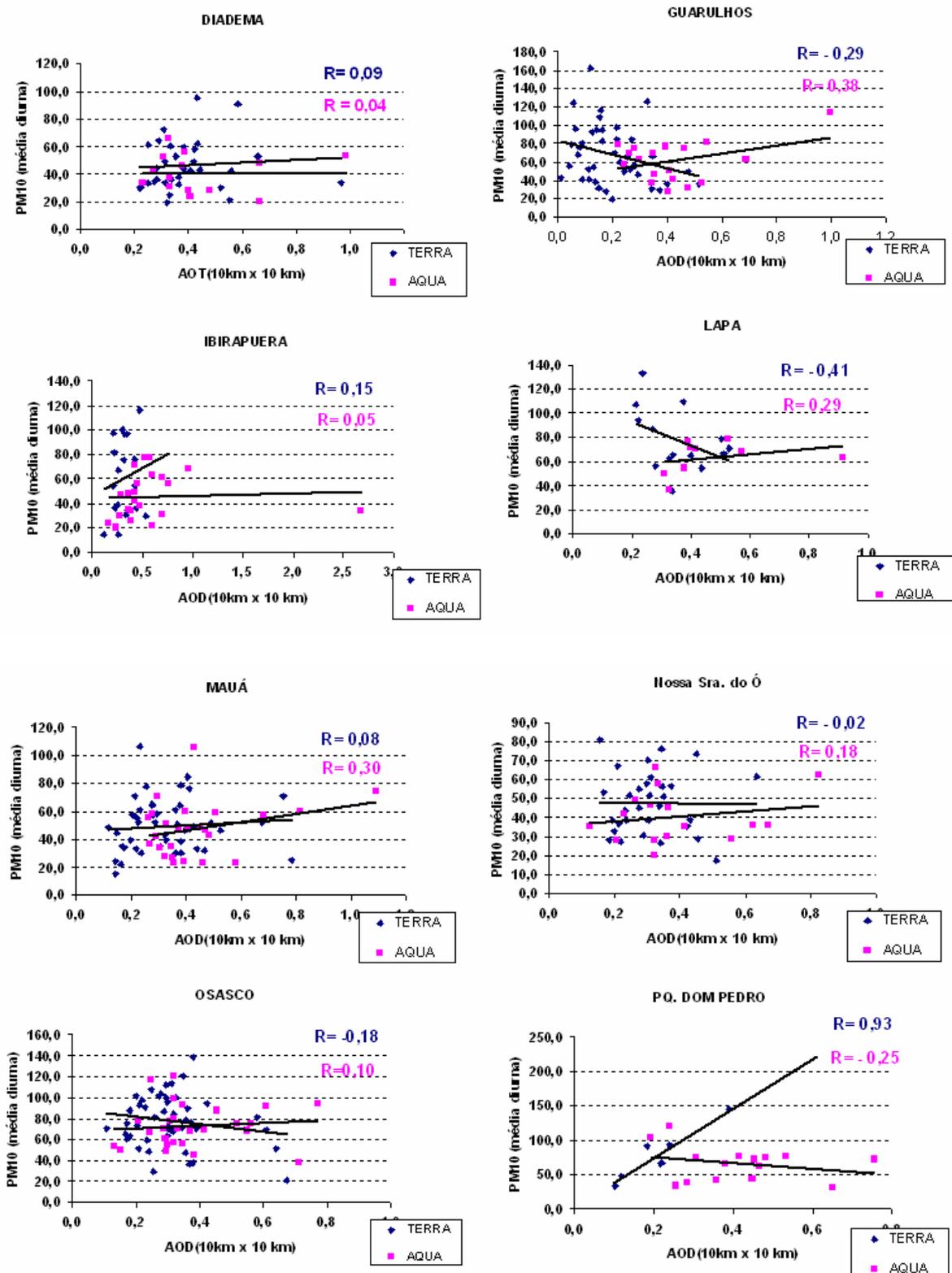


Figura 4.3: Continuação.

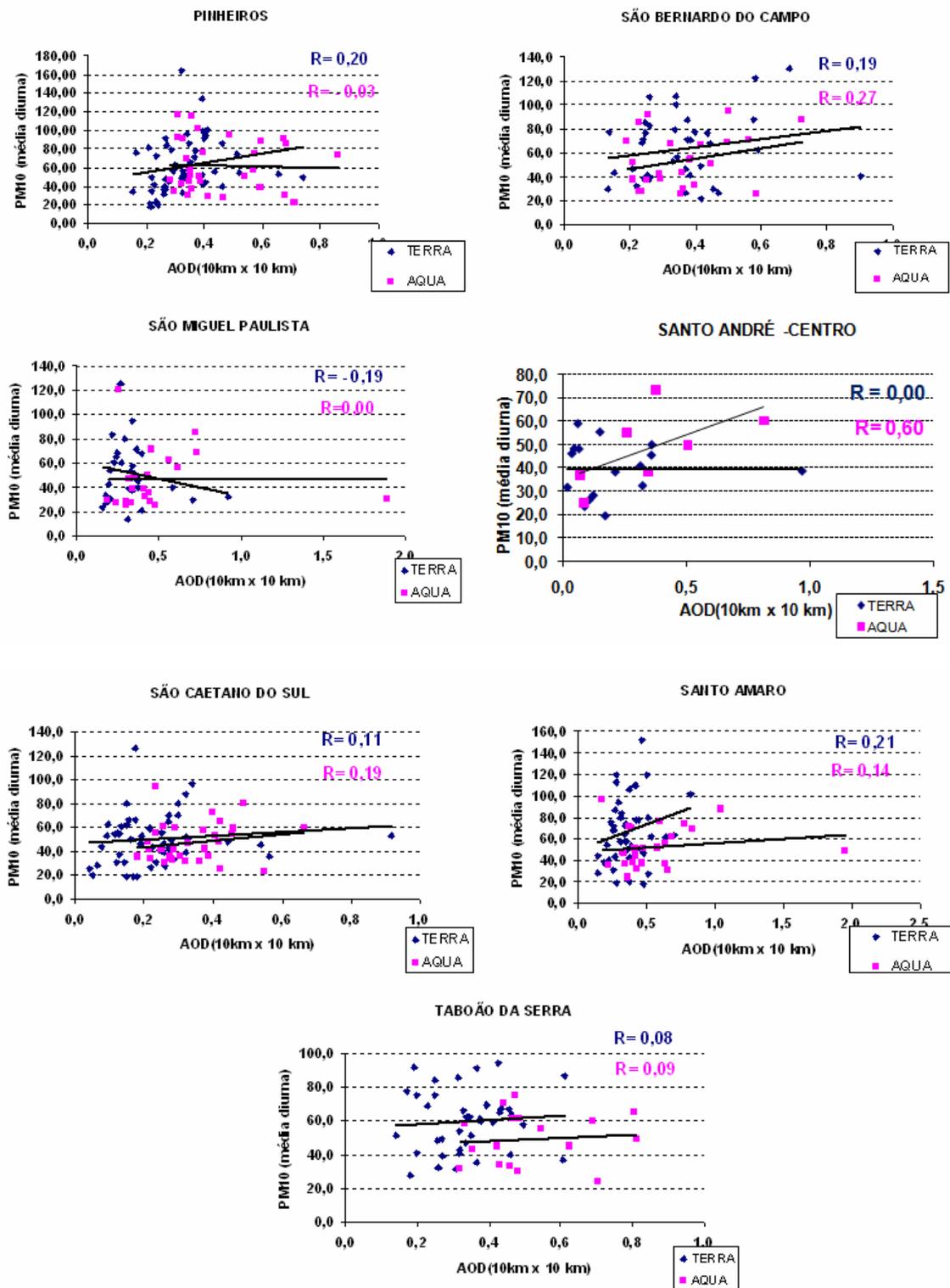


Figura 4.3: Conclusão.

As análises para o período de inverno mostram que as variáveis estão mais bem correlacionadas para a maioria das estações e para ambos os satélites. Na comparação entre os

resultados apresentados na Figura 4.3 com os apresentados na Figura 4.2 podemos observar que para muitas estações deixam de existir coeficientes de correlação (R) negativos, passando os mesmos para valores positivos. Os resultados apresentam 10 estações com correlações positivas para ambos os satélites. Como o inverno de São Paulo é tipicamente seco, mostra-se interessante uma investigação da quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica e/ou a umidade relativa sobre a correlação de MP_{10} e a AOD.

4.2. Validação com o radiômetro CIMEL

Para a validação dos resultados obtidos com o Modelo Dinâmico, fez-se uma comparação destes com medidas de AOD obtidas a partir do radiômetro CIMEL. A base de dados compreende dias entre março de 2002 e dezembro de 2005.

As análises consistem de estudos de correlações entre medidas de AOD do CIMEL e AOD do produto do Modelo Dinâmico calculadas pelo método da refletância crítica (RC) e calculadas com um modelo médio de aerossol na RMSP (modelo 3, descrito no Anexo A). Foram feitas também comparações entre o produto de AOD do MODIS com resolução de 10 km a partir do algoritmo utilizado operacionalmente pela NASA.

A AOD do CIMEL é medida em 500 nm e a AOD do MODIS e do MODELO estão no comprimento de onda de 550 nm. Sendo assim, para comparar valores no mesmo comprimento de onda foi usada a relação entre o expoente de Ångstron e profundidade óptica dada por:

$$AOD \sim \lambda^{-\alpha} \quad (4-1)$$

Com a medida de AOD em 500 nm determinou-se o valor de α e em seguida conhecendo-se λ e α determinou-se a AOD em 550nm para assim tornar possível a comparação entre a AOD do CIMEL em 550 nm com AOD do modelo no mesmo comprimento de onda.

Na Figura 4.4 são apresentadas as correlações entre a AOD – Modelo Dinâmico e AOD - CIMEL, em a) o resultado do Modelo Dinâmico foi gerado com o método da refletância crítica e em b) o resultado foi gerado com o modelo 3 (modelo médio).

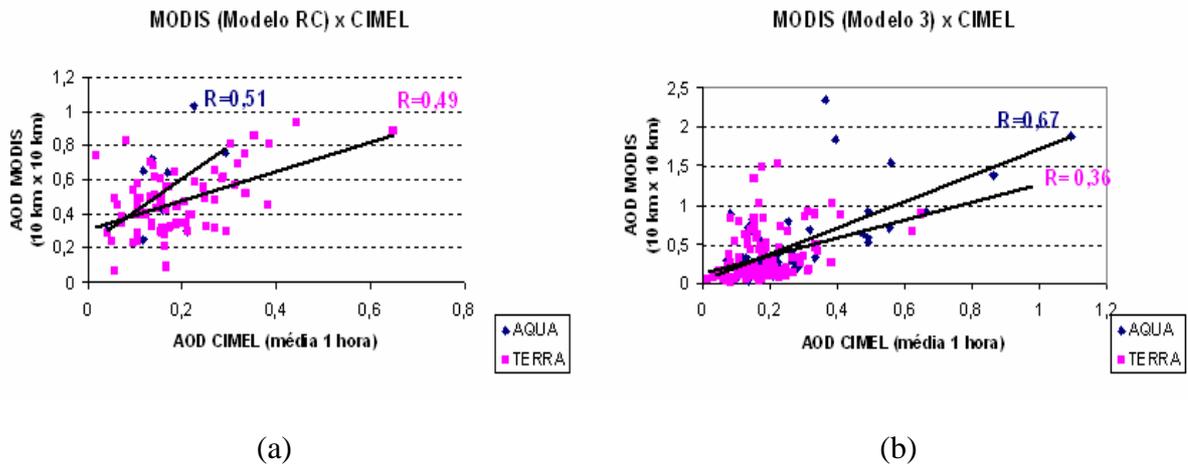


Figura 4.4: Correlação entre a AOD do Modelo Dinâmico e a AOD do CIMEL; a) AOD MODELO – calculada pela refletância crítica, b) AOD MODELO – calculada pelo MODELO 3.

Na Figura 4.5 são apresentados o diagrama de dispersão e a correlação entre a AOD obtida com o algoritmo operacional da NASA com resolução de 10 km e a AOD do CIMEL em 550 nm. Os resultados são todos apresentados separadamente para os dois sensores MODIS (a bordo do TERRA e a bordo do AQUA).

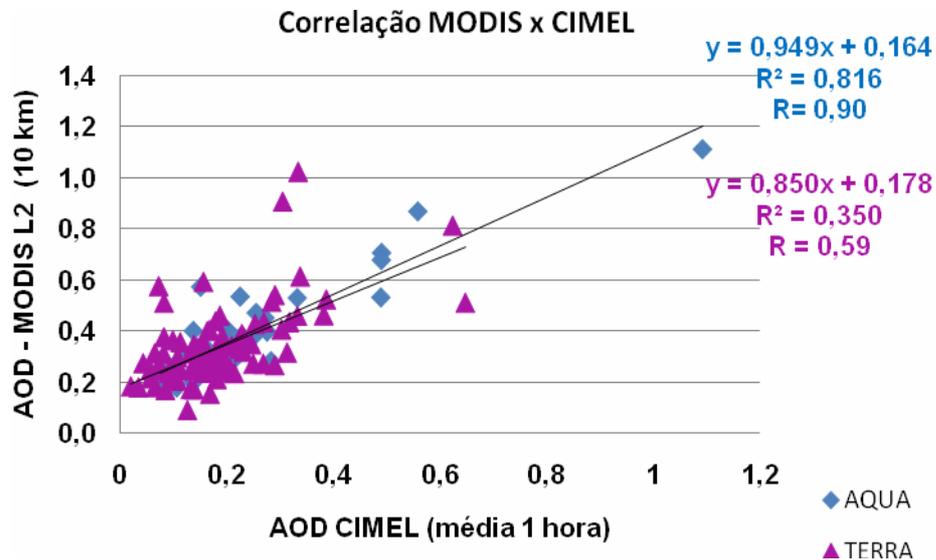


Figura 4.5: Gráfico de correlação entre o produto de AOD do MODIS com resolução de 10 km e a AOD CIMEL.

Analisando as figuras acima (Figura 4.4 e Figura 4.5) percebe-se que há diferença significativa na correlação entre as AOD's para o satélite AQUA e para o satélite TERRA. Essa diferença torna-se mais discrepante quando se observa a correlação entre a AOD-

MODIS e a AOD-CIMEL. Porém, ambas as retas ajustadas apresentam coeficientes angulares e lineares da mesma ordem de grandeza e com valores próximos. Outro fato a ser considerado é que existem menos pontos de análise para o satélite AQUA, fator que pode influenciar estatisticamente nos resultados.

Na comparação das curvas de regressão entre a AOD do Modelo Dinâmico - RC e a AOD do CIMEL temos valores de correlação bem próximos para ambos os satélites, o que não acontece para os resultados avaliados pelo Modelo Dinâmico - modelo3, que mostra valores bem distintos para as curvas do TERRA e do AQUA.

Outros fatores relevantes a serem observados são as curvas com AOD calculada pela RC, onde se observa um coeficiente linear significativo com relação à AOD do CIMEL. Esse comportamento não é observado com a curva de AOD calculada pelo Modelo 3 de aerossol. As curvas com AOD calculada pelo modelo 3 apresentam coeficientes lineares bem mais próximos de zero.

4.3. Correlação AOD CIMEL com MP₁₀ e com MP_{2,5}

A medida de profundidade óptica de aerossóis (AOD) em 500 nm, obtida pelo CIMEL, foi comparada com medidas de concentração de material particulado (MP₁₀) medidos próximo à superfície. A estação da CETESB onde foram extraídas as medidas de MP está localizada no bairro de Pinheiros e foi selecionada por ser a mais próxima do radiômetro CIMEL utilizado.

A base de dados é composta por médias horárias, de MP₁₀ e de AOD, sempre no período diurno. As séries temporais (Figura 4.6) são compostas por todos os dias e horários coincidentes entre as duas variáveis estudadas.

Na Figura 4.6 é apresentada a comparação das séries temporais da AOD-CIMEL e da concentração de material particulado (MP₁₀). As medidas de MP₁₀ superiores a 200 µg/m³ que se apresentavam geralmente nos horários das 7 e 8 horas da manhã foram excluídas por serem consideradas uma contribuição muito local.

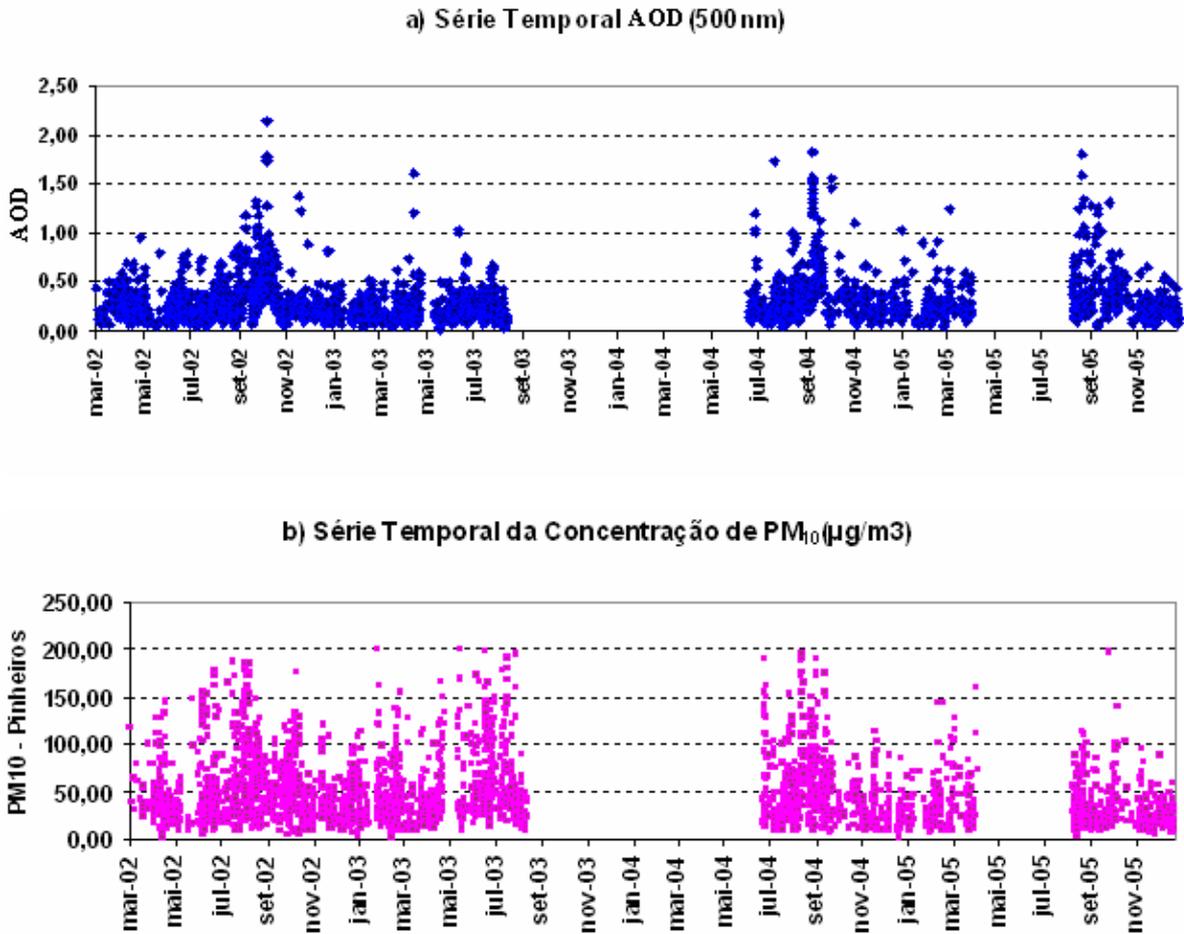


Figura 4.6: a) Séries temporais de profundidade óptica de aerossol em 500 nm, b) Séries temporais da concentração de material particulado, em $\mu g/m^3$.

Observa-se na Figura 4.6 alguns períodos em que o aumento da AOD e do material particulado coincidem, como em julho/agosto-2004, março-2005 e final do ano de 2005, período em que os dois parâmetros se apresentam relativamente baixos. Nos períodos de setembro/outubro-2002 e setembro/outubro-2005 temos uma elevação no valor da AOD e a concentração do material particulado não apresenta muita alteração. Nesses períodos pode ocorrer transporte de material particulado originado em outras regiões para a região estudada, o que explicaria a diferença entre o comportamento dos parâmetros estudados.

A primeira análise apresentada é o diagrama de dispersão entre a AOD e a concentração de MP_{10} de toda a série temporal (Figura 4.7 a). Neste caso, o valor de correlação calculado foi igual a 0,18. A Figura 4.7b apresenta o diagrama de dispersão considerando-se apenas medidas para os horários entre 11 e 14 h e com a remoção das medidas realizadas nos meses de setembro e outubro. Os meses de setembro e outubro foram

desconsiderados por serem meses típicos de ocorrência de queimadas nas regiões da Amazônia e Brasil Central, havendo transporte da pluma de poluentes vinda dessas regiões para a RMSP. A escolha dos horários tem o objetivo de verificar a influência da altura da camada de mistura (CM).

Os resultados da comparação entre a AOD e o PM_{10} através da análise descrita acima é apresentado a seguir (Figura 4.7 e Figura 4.8).

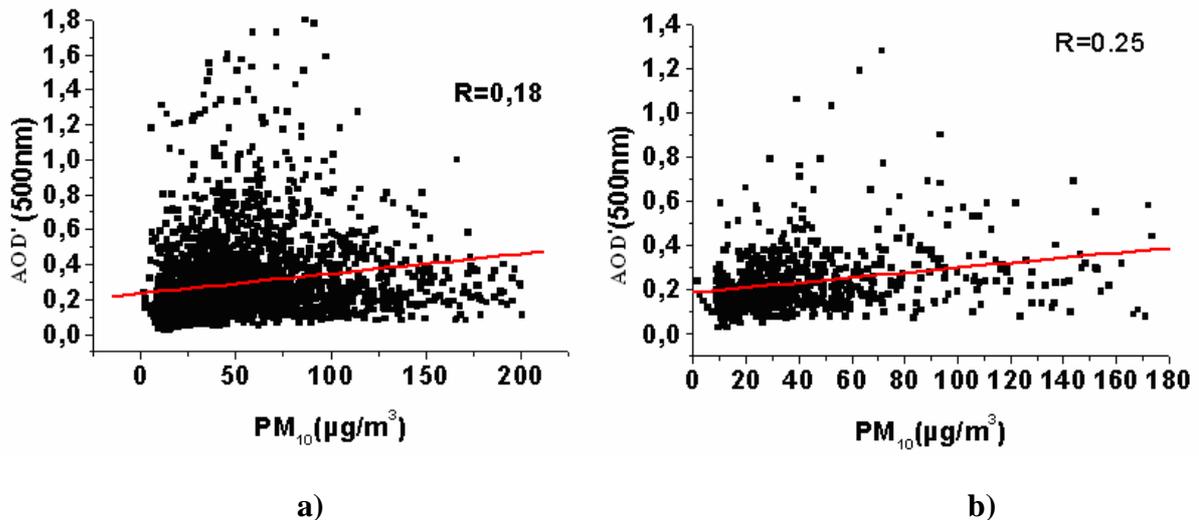


Figura 4.7: Diagrama de dispersão entre AOD (500nm) e PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). a) série temporal completa, b) série temporal sem os meses de setembro e outubro e só com os horários entre 11 e 14 h.

Na Figura 4.8 é apresentada a análise para o período entre julho e agosto de 2004. A Figura 4.8 a) mostra todos os horários de medida e a Figura 4.8 b) apenas as medidas realizadas nos horários entre 11 e 14h.

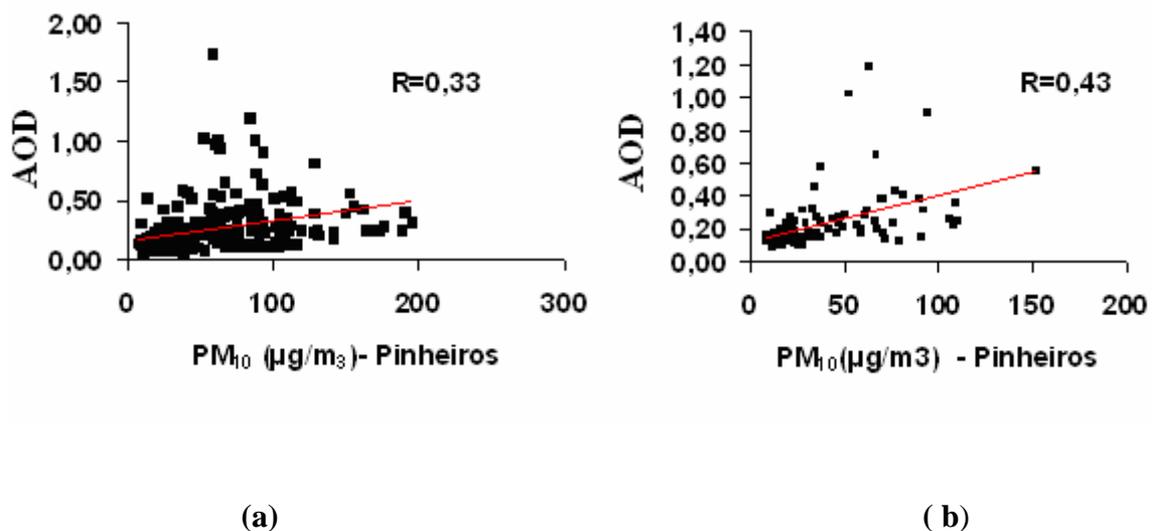


Figura 4.8: Diagrama de dispersão para os meses de julho e agosto de 2004; a) com todos os horários do dia, b) medidas nos horários entre 11 e 14 h.

Na análise da série temporal completa foi encontrado um valor de correlação de 0,18 e para a análise restringindo-se os horários entre 11 e 14 h, excluindo os meses de setembro e outubro, foi encontrada uma correlação de 0,25.

Para o estudo de um período específico entre julho e agosto de 2004 os resultados apresentaram uma correlação de 0,33 para os meses de junho e julho e 0,43 para medidas nos horários entre 11 e 14 h.

A correlação da AOD com a concentração de $MP_{2,5}$ é feita através de médias diárias, uma vez que a CETESB tem como padrão para o monitoramento de $MP_{2,5}$ a média de 24 horas.

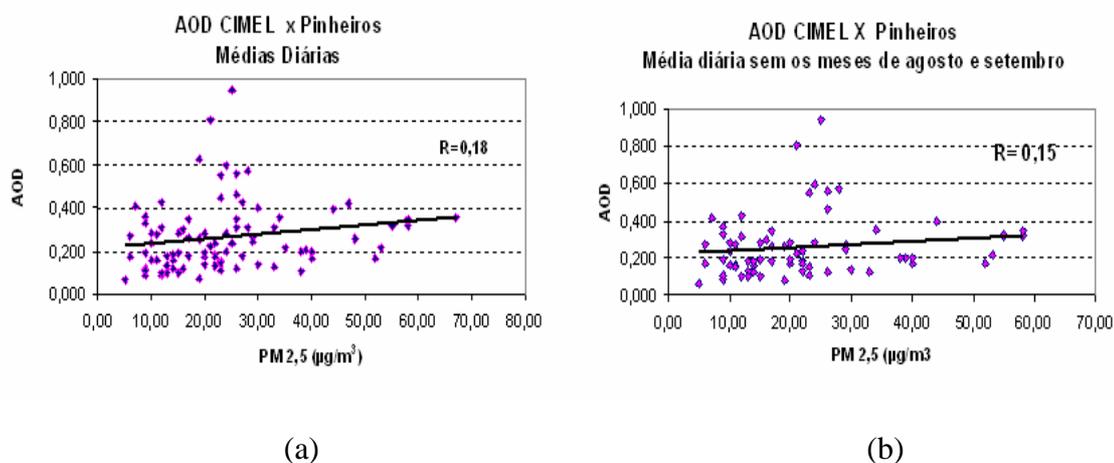


Figura 4.9: Diagrama de dispersão para as medidas de AOD-CIMEL e $MP_{2,5}$. Em (a) série temporal completa e em (b) excluindo-se os meses de agosto e setembro.

Como pode ser observado das figuras apresentadas, a correlação entre a profundidade óptica de aerossol derivada do fotômetro CIMEL e a concentração em massa de material particulado (MP_{10} e $MP_{2,5}$), no período de 2001 a 2005, apresentou valores distintos para as várias situações análises. A correlação para todos os pontos com o MP_{10} e com $MP_{2,5}$ se apresentaram semelhantes, ambas com $R=0,18$. Observa-se que quando se correlaciona a série temporal completa o coeficiente de correlação é mais baixo do que quando se restringe a alguns períodos e horários. Os resultados apresentaram maior consistência utilizando-se somente horários entre as 11 e 14h. Nas condições com as restrições analisadas foi possível obter uma melhor relação entre as variáveis medidas para estimar as condições de poluição atmosférica.

4.4. Análise de cluster entre as estações para o MP₁₀ e a AOD

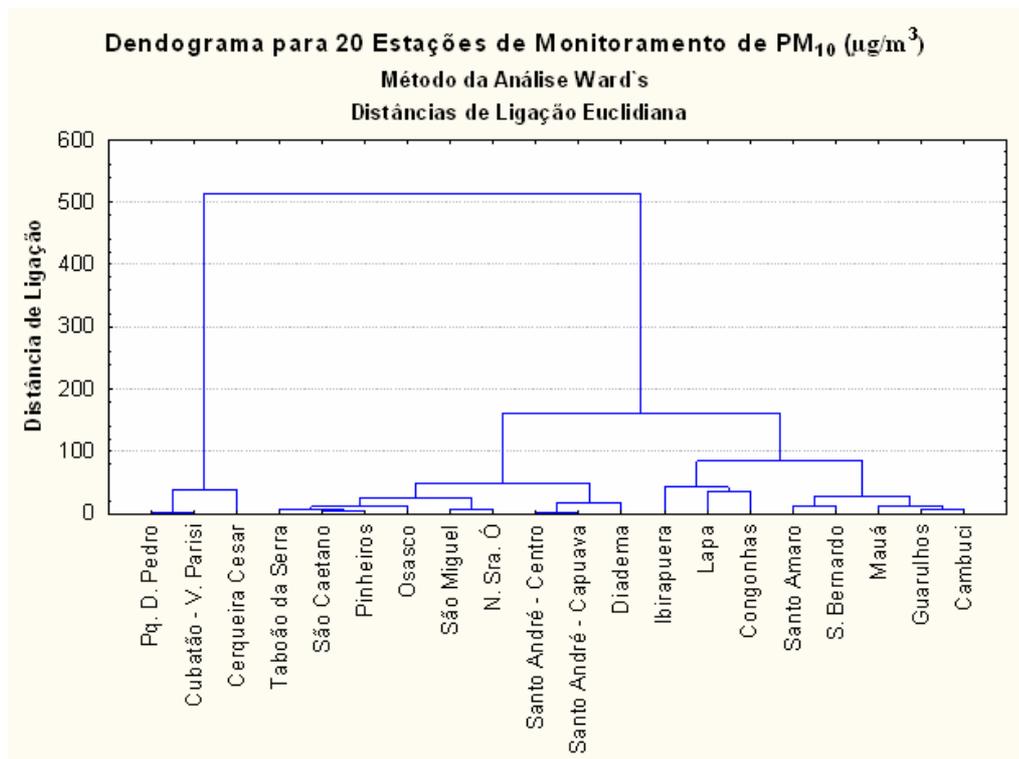
A análise de cluster é um método de agrupar variáveis aparentemente independentes com o objetivo de identificar algum padrão de similaridade entre o comportamento das variáveis. Neste trabalho, o objetivo de sua utilização foi verificar como as estações de monitoramento de qualidade do ar da CETESB, se agrupam independentemente de suas localizações geográficas para o monitoramento de MP₁₀. O método foi aplicado para 20 estações. As análises foram feitas com os métodos de *Single Linkage* e *Ward*, sempre com distância euclidiana. Os melhores resultados foram obtidos com o método de *Ward* e são apresentados nas Figura 4.10 *a* e *b*.

Na Figura 4.10 *a* e *b* é apresentada a análise de cluster para as estações da CETESB, fazendo-se o corte na distância em 150 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pode-se observar a formação de 3 grupos. O primeiro grupo é formado pelas estações Pq. D. Pedro, Cubatão - V. Parisi e Cerqueira Cesar. O segundo por Taboão da Serra, São Caetano, Pinheiros, Osasco, São Miguel, N. Sra. do Ó, Sto. André-Centro, Sto. André-Capuava e Diadema. O terceiro pelas estações Ibirapuera, Lapa, Congonhas, Santo Amaro, São Bernardo, Mauá, Guarulhos e Cambuci.

Após a separação das estações em grupos com a análise de cluster, passamos a estudar o comportamento dos mesmos. Fez-se então uma correlação para cada grupo entre a concentração de MP₁₀ e a AOD média em 10 km para as medidas de todas as estações. Na Figura 4.11 são apresentadas os diagramas de dispersão e as correlações para cada grupo de estações.



a) Distâncias de ligação para a AOD entre as estações.



b) Dendrograma obtido na análise de cluster entre as MP₁₀ em diferentes estações. Estações da esq. p/ à direita: Pq. D. Pedro, Cubatão - V. Parisi, Cerqueira Cesar, Taboão da Serra, São Caetano, Pinheiros, Osasco, São Miguel, N. Sra. do Ó, Santo André - Centro, Santo André - Capuava, Diadema, Ibirapuera, Lapa, Congonhas, Santo Amaro, São Bernardo, Mauá, Guarulhos, Cambuci.

Figura 4.10: Análise de Cluster entre as estações da CETESB. (a) Degraus com as distâncias entre as estações para o MP₁₀ (b) Divisões dos grupos de estações para o MP₁₀.

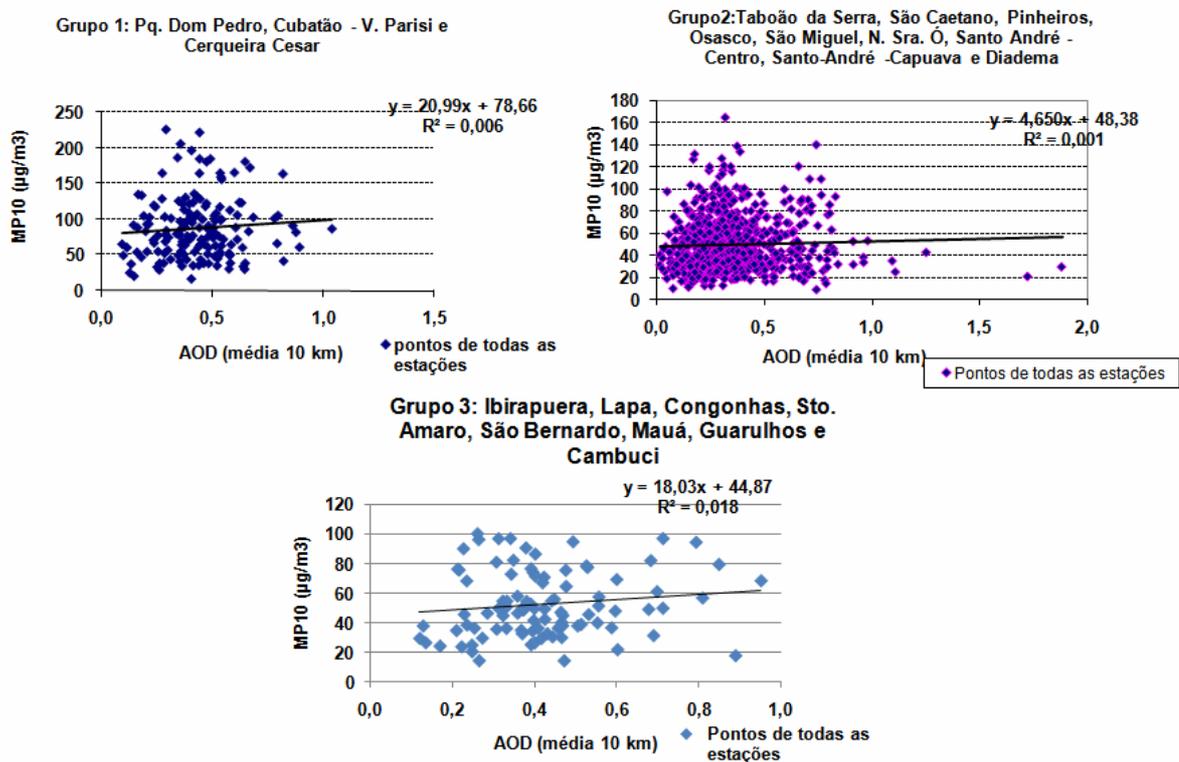


Figura 4.11: Correlações entre MP_{10} e a AOD (média 10 km) para os 3 grupos de estações.

Na Figura 4.11 verificam-se os resultados das correlações por grupo, sendo que em cada gráfico foram agrupados todos os pontos de medidas das respectivas estações.

Ao agrupar estações os coeficientes de correlação apresentam valores baixos. Neste caso, o método de análise de cluster não se apresenta representativo para as estações da CETESB na comparação entre a AOD e o MP para a RMSP.

4.5. Análise da Correlação entre MP_{10} e AOD por faixas de concentração

As correlações entre o MP_{10} e a AOD apresentadas no item 4.1 resultaram em valores baixos e alguns deles negativos. Visando identificar condições que melhorassem os resultados, dividiu-se o material particulado (MP_{10}) em faixas de concentração e fez-se o estudo da correlação com a AOD para cada uma dessas faixas. A análise foi feita em algumas estações de estudo, as quais apresentaram comportamentos distintos. Os critérios de escolha foram: a estação de melhor correlação (Congonhas), a de pior correlação (Taboão da Serra), outras duas que apresentam resultado de correlação positiva para um sensor e negativa para

outro (Lapa e Nossa Sra. do Ó) e também a estação de maior concentração de MP_{10} (Cubatão – Vila Parisi).

As faixas de divisão do MP_{10} foram baseadas nos parâmetros de qualidade do ar utilizados pela CETESB e são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Padrões de qualidade do ar utilizados pela CETESB para o MP_{10} .

Qualidade	Índice	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
boa	0-50	0-50
regular	51-100	50-150
inadequada	101-199	150-250
má	200-299	250-420
péssima	>299	> 420

Analisando o comportamento dos diagramas de dispersão apresentados nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.11, percebe-se que os pontos extremos, superiores e inferiores, dos eixos de AOD e de concentração de material particulado se apresentam menos correlacionados. Esses pontos de valores altos de AOD, por exemplo, podem estar interferindo em grande parte na baixa correlação dos dados.

Após a divisão do MP_{10} em faixas de concentração, colocou-se em gráficos de dispersão, ajustaram-se retas e calculou-se a correlação para cada intervalo de MP_{10} com as respectivas AOD's. Esses resultados são apresentados na Figura 4.12 para as estações: Congonhas, Taboão da Serra, Cubatão – V. Parisi, Lapa e Nossa Senhora do Ó.

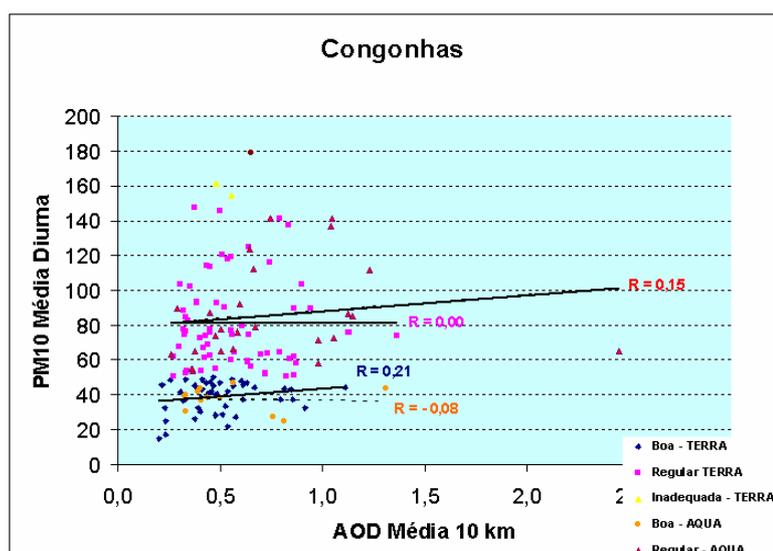


Figura 4.12: Correlação entre a concentração de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD Média (10 km x 10 km). As curvas são divididas por faixas de concentração de MP_{10}

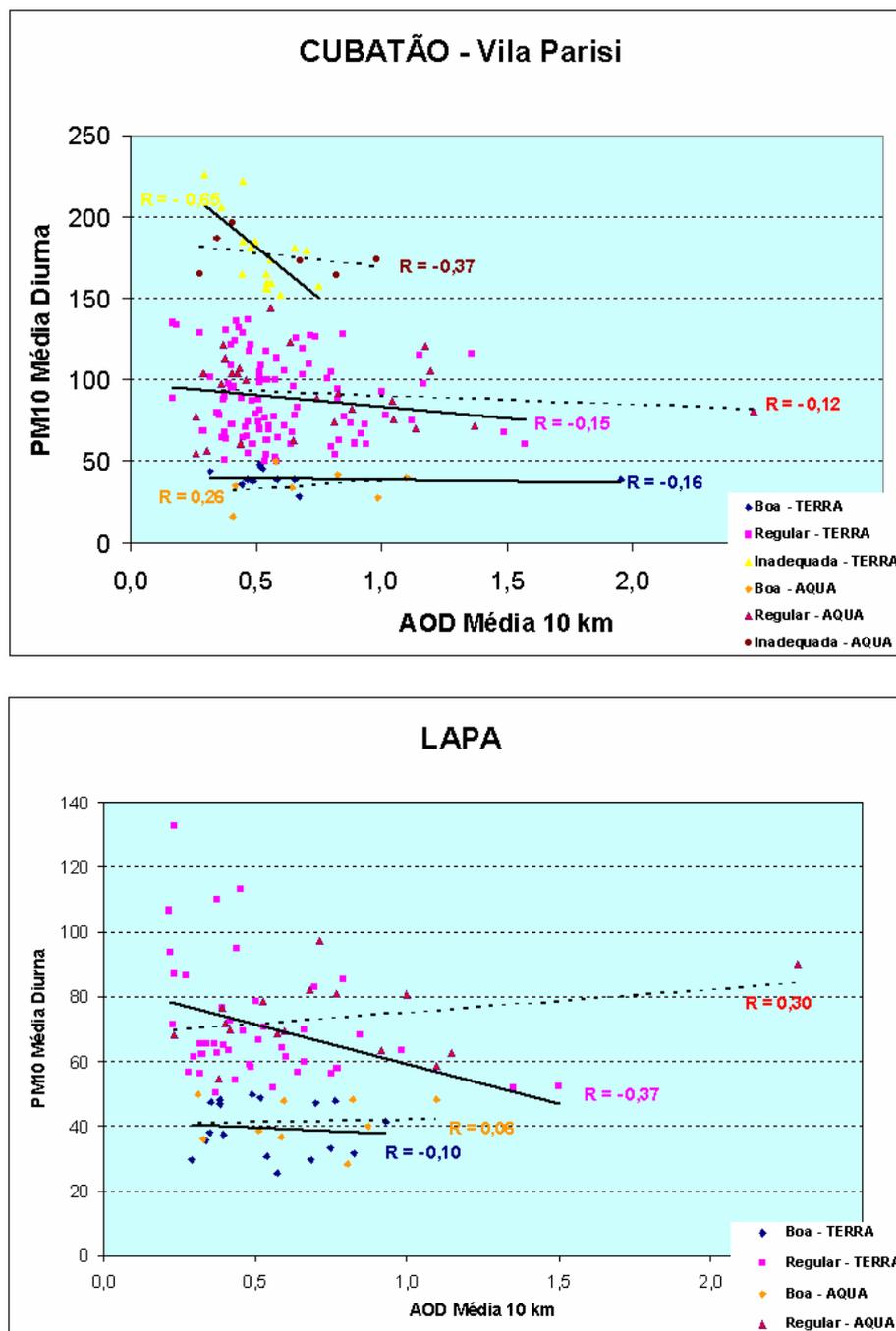


Figura 4.12: Continuação.

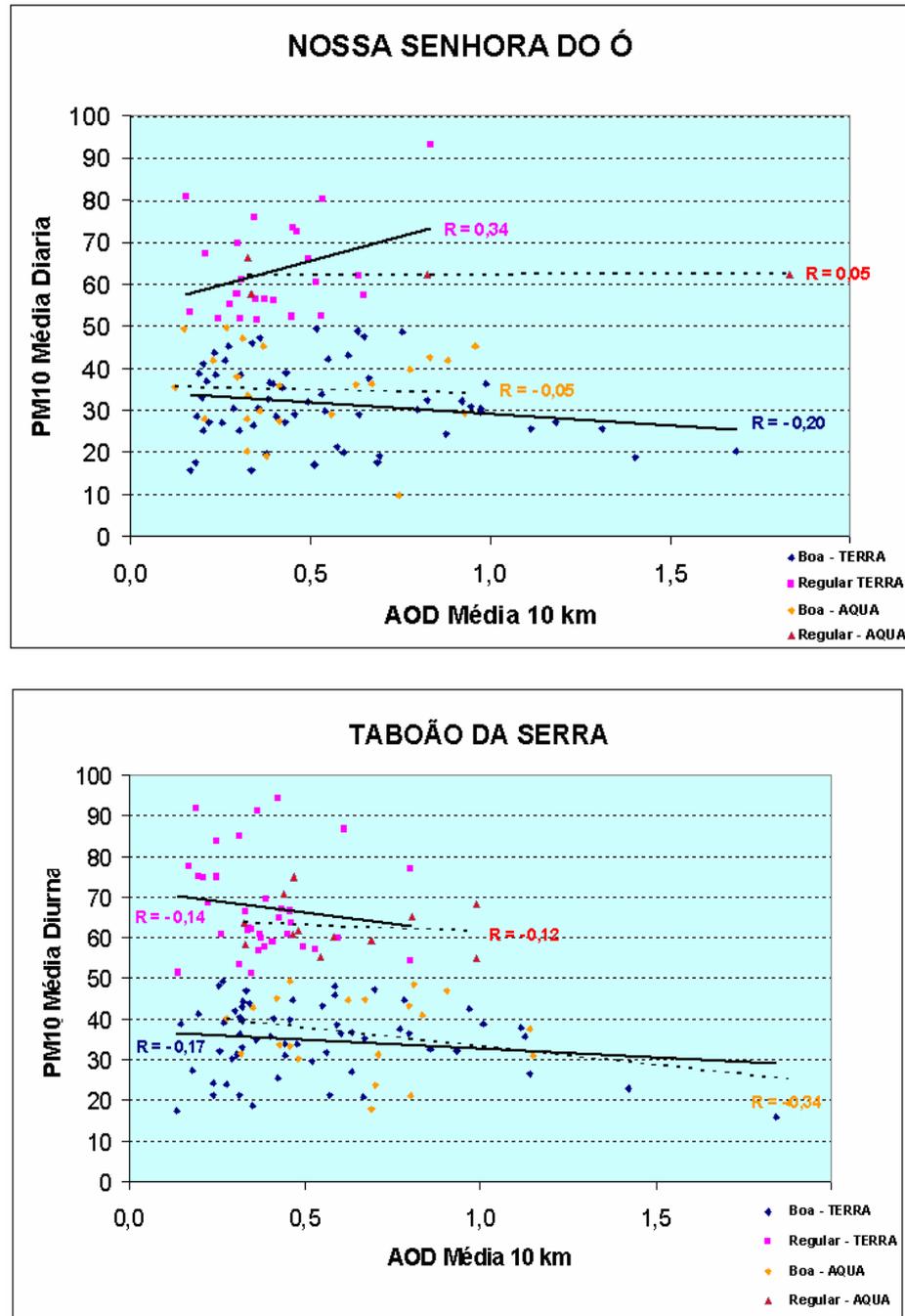


Figura 4.12: Conclusão.

Observa-se na Figura 4.12 que 3 das 4 melhores correlações apresentadas estão na faixa regular de concentração do material particulado e 1 esta na condição boa. Pode-se destacar como a faixa que melhor responde à AOD como a faixa correspondente ao índice regular de qualidade do ar estabelecido pela CETESB, que é o índice onde as concentrações se apresentam entre 50 e 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.6. Influência do Vapor d'água na correlação entre a AOD e o MP₁₀

Conforme resultados apresentados nas seções anteriores, as variáveis estudadas apresentaram uma melhor correlação durante o período diurno e, mais especificamente, durante o período de inverno. Nesta seção buscou-se identificar o efeito de uma terceira variável, a quantidade de vapor d'água (UW) na coluna atmosférica. Os valores de UW utilizados são fornecidos pela NASA e disponibilizados em: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/validation_corrdata.html, na forma de médias ao redor dos radiômetros da AERONET. Obviamente, neste trabalho foram utilizados os valores correspondentes à estação de São Paulo da AERONET.

As análises são apresentadas para 4 estações: Cubatão – V. Parisi, Lapa, Nossa Senhora do Ó e Taboão da Serra, conforme pode ser verificado nas Figura 4.13 a,b,c e d.

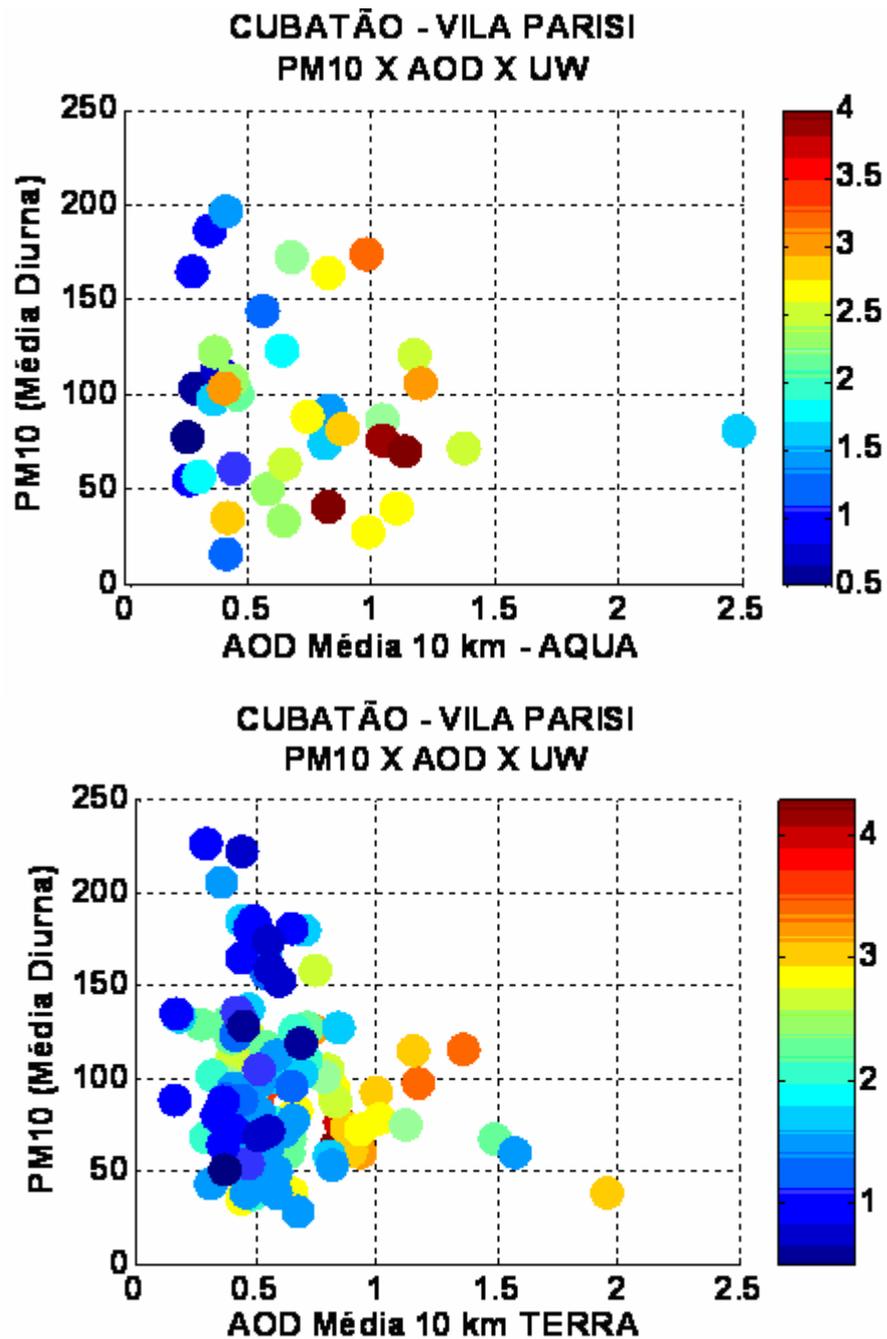


Figura 4.13 (a): Diagrama de dispersão entre o Material Particulado Fino e a AOD Média de 10 km x o Vapor d'água (cm)- barra de cores. No topo para o satélite AQUA e na base para o satélite TERRA. Estação de Cubatão V. Parisi.

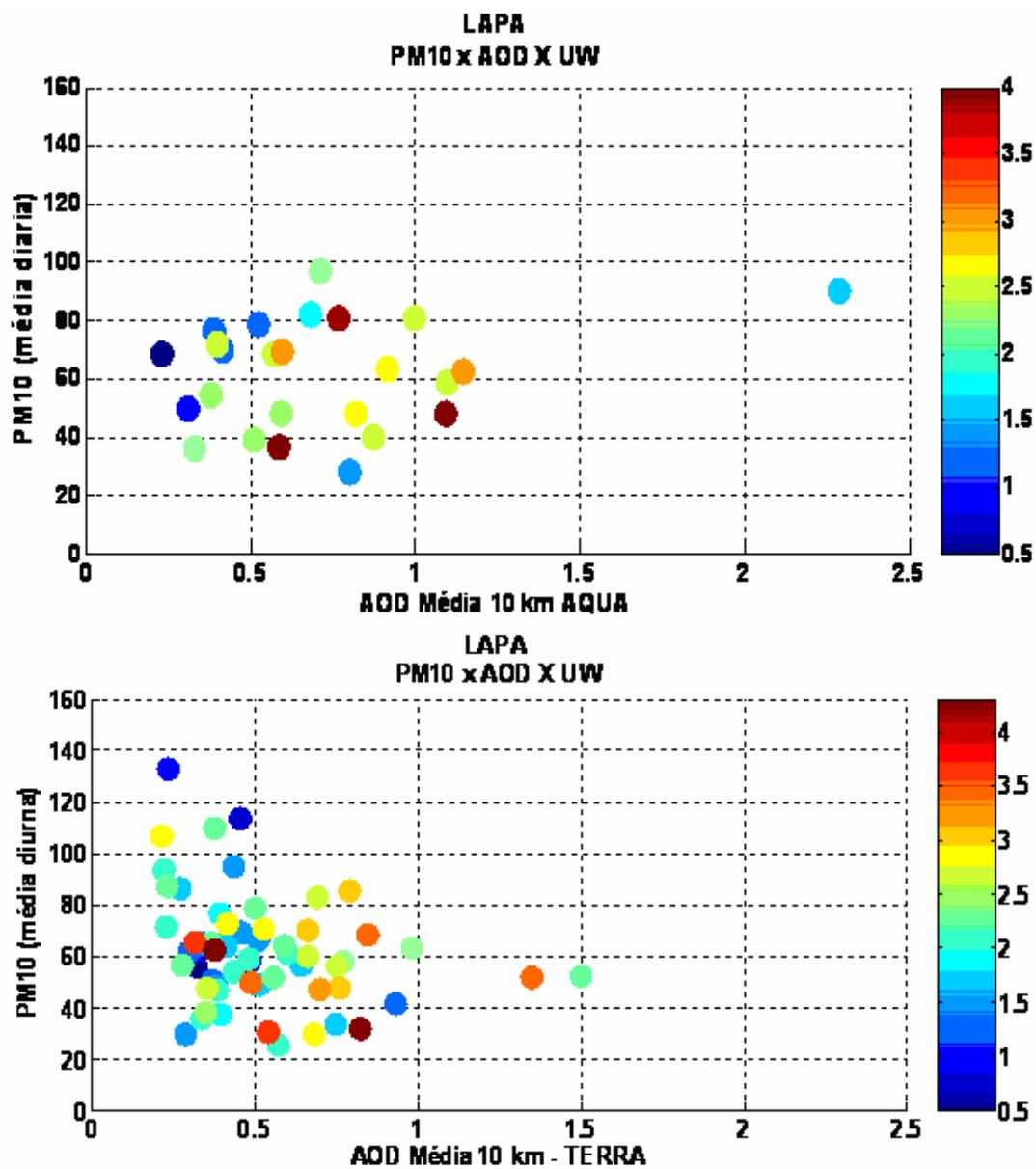


Figura 4.13 (b): Mesmo que na Figura 4.13 (a) para a Estação Lapa.

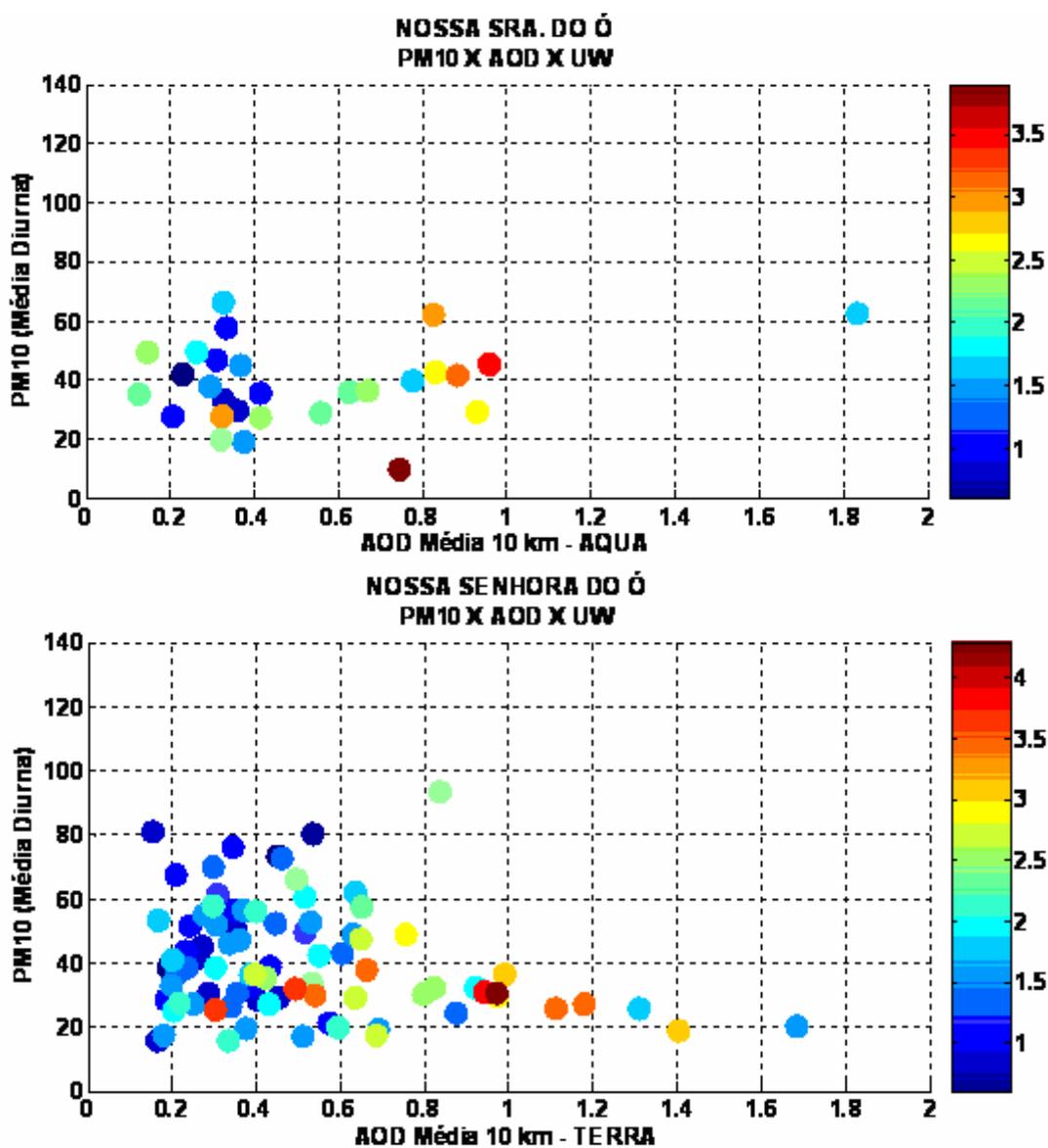


Figura 4.13 (c): Mesmo que na Figura 4.13 (a) para a Estação Nossa Senhora do Ó.

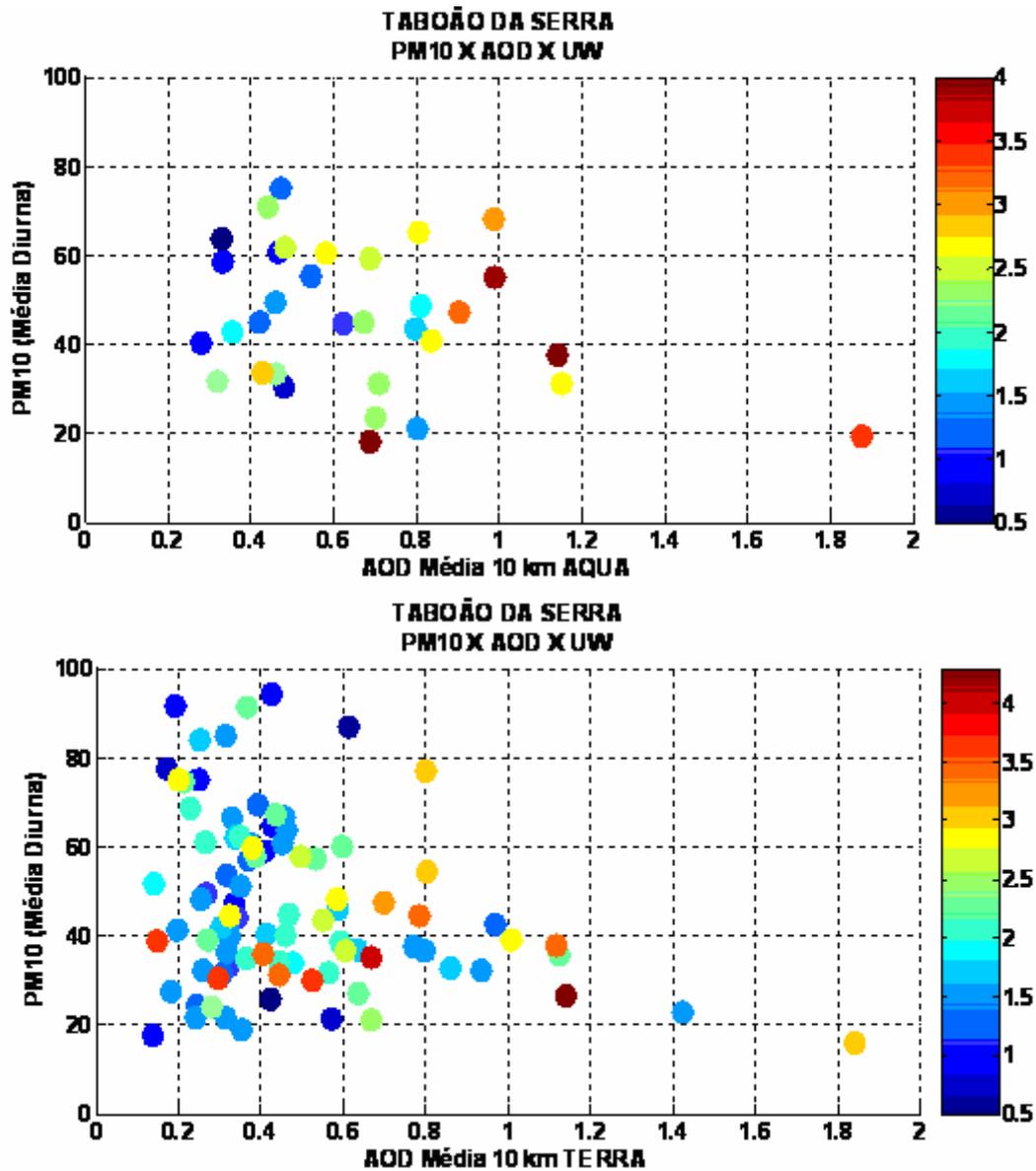


Figura 4.13 (d): Mesmo que na Figura 4.13 (a) para a Estação Taboão da Serra.

Nas Figura 4.13 a, b, c, e d percebe-se que os pontos em tons de azul se apresentam mais concentrados no lado esquerdo dos gráficos, com tons de laranja e vermelho tendendo ao lado direito do eixo de AOD. Os resultados indicam que durante os dias com valores mais altos de vapor d'água a AOD apresenta uma tendência de super estimativa, evidenciando a influência nos valores de profundidades ópticas mais elevadas. Outra influência da quantidade de água na atmosfera pode ocorrer sobre as características do aerossol tais como o seu tamanho e quantidade de água presente no seu interior.

A partir dos resultados apresentados na Figura 4.13 fez-se um estudo da distribuição da frequência dos pontos em função da quantidade de água na coluna, resultado esse apresentado na Figura 4.14

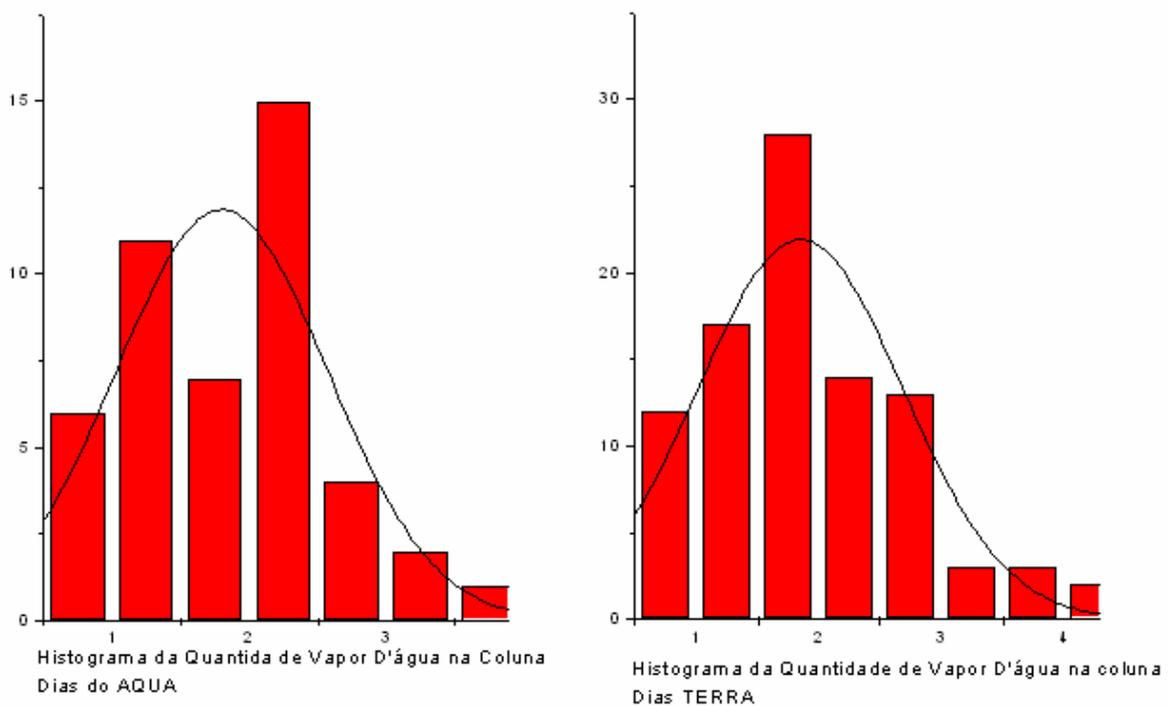


Figura 4.14: Histograma da distribuição de pontos em função das medidas de quantidade de vapor d'água na coluna, à esquerda a distribuição do pontos do AQUA e a direita do TERRA.

O histograma acima mostra a distribuição de pontos em função da quantidade de água na coluna atmosférica. Com base nos resultados apresentados, limitou-se o valor do vapor d'água em 3 cm e realizou-se novamente o cálculo das correlações para as estações estudadas. O valor de 3 cm foi estimado por ser um valor próximo à meia altura dos histogramas apresentados para os satélites AQUA e TERRA.

A Figura 4.15 mostra os resultados das correlações após a limitação da quantidade de vapor d'água, ou seja, foram considerados válidos somente dias com UW menor que 3,0 cm.

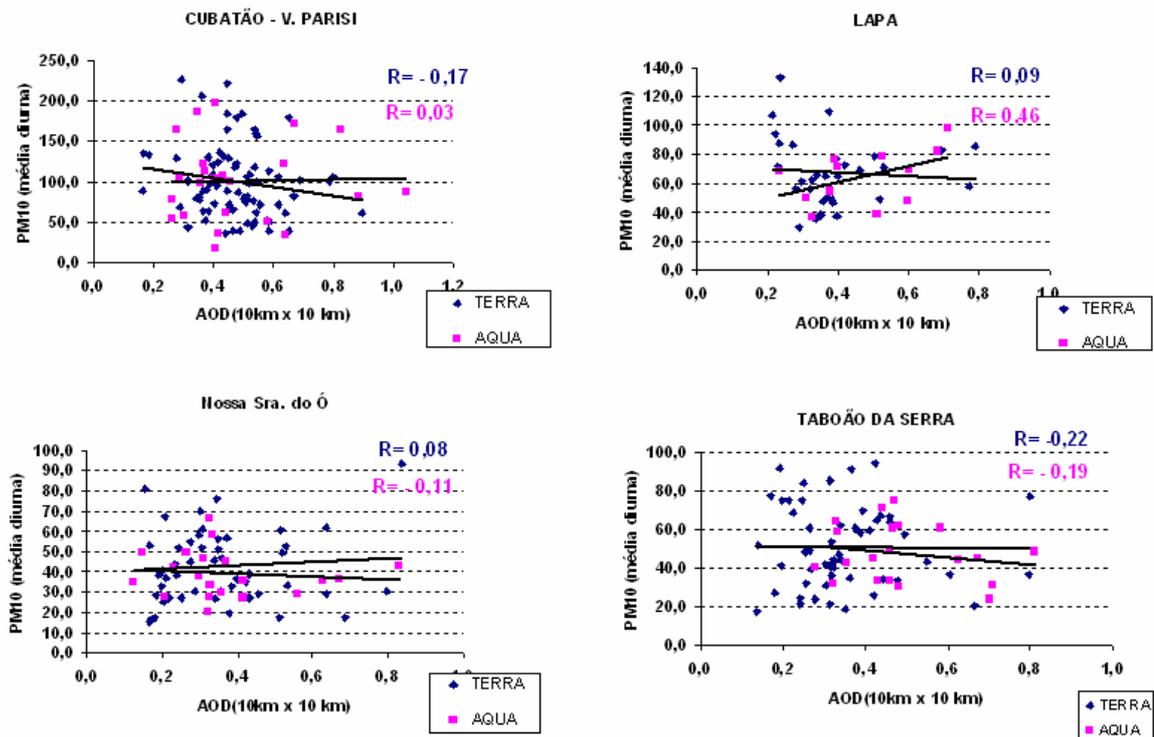


Figura 4.15: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de MP_{10} e a AOD média de 10 km x 10 km para dias que possuem valor de quantidade de água na coluna até 3,0 cm.

Comparando os resultados após limitarmos os dias da análise em dias com medidas de quantidade de vapor d'água em até 3,0 cm com o resultado apresentado anteriormente para todos os dias da série, tivemos melhora nas correlações de 2 das 4 estações estudadas para as curvas de ambos os satélites. Na comparação com os resultados anteriores para os dias de inverno, somente a estação da Lapa apresentou melhora para as curvas de ambos os satélites.

A quantidade de água se mostra um dos fatores que influencia a comparação entre os parâmetros estudados, MP e AOD via satélite. Porém, os estudos apresentados não identificam o padrão de influência sendo necessárias mais informações sobre cada dia estudado.

4.7. Correlações entre a concentração de $MP_{2,5}$ e a AOD

Apesar da pouca base de dados do material particulado fino obtida pela CETESB na RMSP, optou-se por utilizá-la na pesquisa na tentativa de se obter melhores correlações entre esta variável e a AOD.

O material particulado fino é um parâmetro importante representando cerca de 60 % da quantidade em material particulado inalável da Região Metropolitana de São Paulo (CETESB 2006). Os problemas observados nessa base de dados são: 1) a existência de poucas estações de monitoramento; 2) os períodos monitorados serem curtos e não consecutivos; 3) as medidas fornecidas serem somente de médias diárias e não horárias, além do monitoramento ser realizado por uma rede manual.

Na comparação com o $MP_{2,5}$ o primeiro passo executado foi a realização de testes de sensibilidade com o Modelo Dinâmico para comparação dos parâmetros. Foram comparadas concentrações de $MP_{2,5}$ com seis AOD's diferentes (calculadas sob diferentes parâmetros no Modelo Dinâmico). As diferenças no cálculo foram basicamente a área média em que se calcula a AOD ao redor das estações, o valor da razão entre os coeficientes de refletância da superfície (coef. refl 650nm/coef refl 2100nm) e o método de se escolher o modelo de aerossol (método de refletância crítica ou modelo fixo de aerossol que representaria um modelo médio de aerossol - modelo 3).

As comparações do $MP_{2,5}$ com as AOD's foram feitas em três etapas: a primeira para todos os dias disponíveis; a segunda para os meses de inverno (junho, julho e agosto) e; a terceira excluindo-se os meses de setembro e outubro, considerados meses típicos de transporte de material de queimadas da Amazônia para a região de Sudeste. A análise do $MP_{2,5}$ para os meses de junho, julho e agosto, foi feita com o objetivo de observar isoladamente a influência do período de inverno nos dados disponíveis. Observou-se que no período de inverno as correlações entre o material particulado, seja fino ou grosso, e a profundidade óptica melhoram significativamente, fato esse que pode ser devido à baixa umidade do ar durante o inverno na RMSP.

Como já apresentado nos resultados para o MP_{10} , fez-se também uma investigação sobre o comportamento das correlações com a quantidade de vapor de água na coluna atmosférica. A análise da correlação do material particulado fino com a profundidade óptica de aerossol foi feita para as estações localizadas nos bairros de Cerqueira Cesar e Pinheiros.

Os valores de AOD obtidos a partir do Modelo Dinâmico e suas variações se dão em função da variação de alguns parâmetros de entrada, apresentados na Tabela 4.2. As Figuras 4.16 e 4.17 apresentam os diagramas de dispersão e as correlações para as 6 possibilidades de cálculo de AOD para as estações Cerqueira Cesar e Pinheiros.

Tabela 4.2: Parâmetros variados na entrada do Modelo Dinâmico usado para calcular os valores de AOD.

AOD	Área	Modelo de Aerossol	Coef. fator de superfície
AOD1	10 km x 10 km	Variável (refl. Crítica)	0,6
AOD2	5 km x 5km	Modelo 3	0,6
AOD3	5 km x 5 km	Modelo 3	0,55
AOD4	10 km x 10 km	Variável (refl. Crítica)	0,55
AOD5	6 km x 6 km	Variável (refl. Crítica)	0,55
AOD6	6 km x 6 km	Variável (refl. Crítica)	0,6

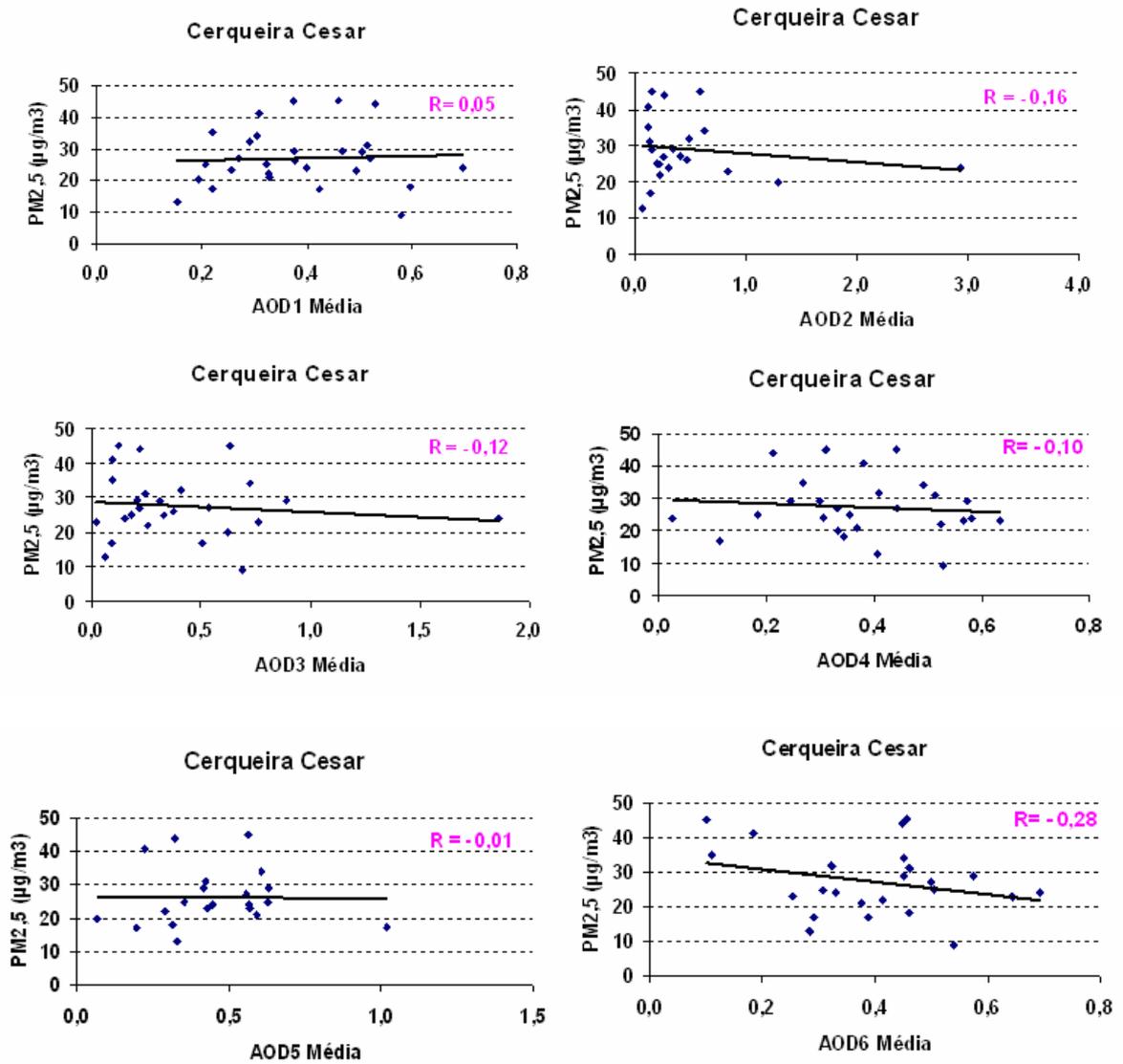


Figura 4.16: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de material particulado fino $\text{MP}_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD's na estação Cerqueira Cesar.

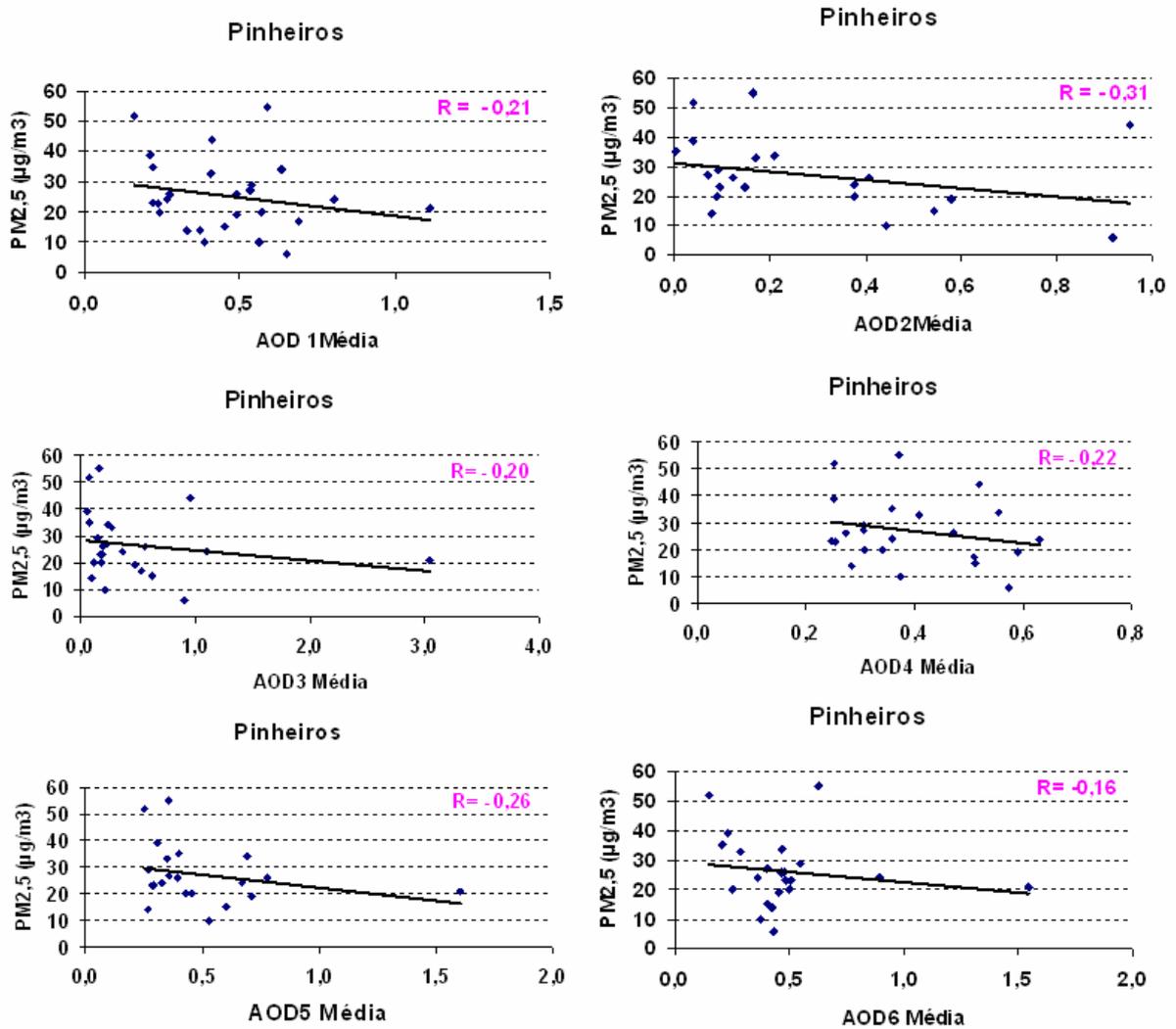


Figura 4.17: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de material particulado fino $\text{MP}_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD's na estação de Pinheiros.

Nas Figuras 4.16 e 4.17 os resultados de correlação entre o $\text{MP}_{2,5}$ e as AOD's não se apresentaram bons, apesar da comparação com o $\text{MP}_{2,5}$ se mostrar melhor do que a comparação com o MP_{10} . Para a estação Cerqueira César o maior valor de correlação é o da AOD1, sendo esta a única situação que apresenta correlação positiva. Para a estação de Pinheiros nenhuma das AOD's apresentou correlação positiva. Sendo assim, foi selecionada a AOD1 para a continuidade da investigação com o $\text{MP}_{2,5}$.

Com o objetivo de se isolar períodos de melhor e pior correlação foram feitas análises em duas épocas distintas: o período de inverno e o período obtido da exclusão dos meses de setembro e outubro da base de dados. Os meses de setembro e outubro foram excluídos da análise por serem considerados meses de prováveis queimadas na região da amazônia, com probabilidade de transporte da pluma de poluentes para a região estudada, o

que pode influenciar as medidas da AOD local. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19.

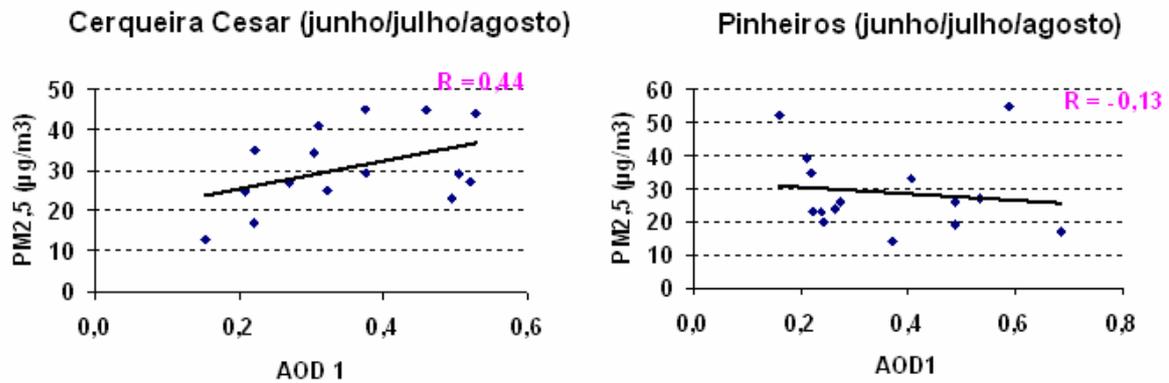


Figura 4.18: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de material particulado fino $MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD1 para os meses de junho, julho e agosto.

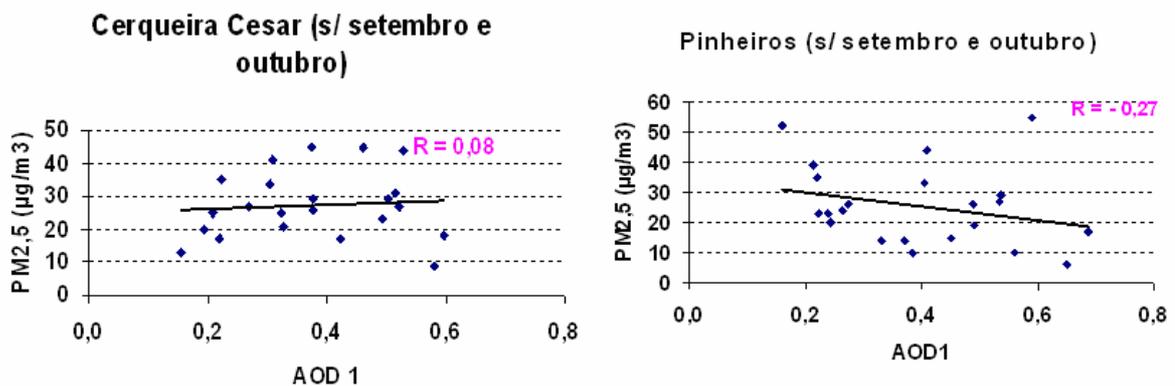


Figura 4.19: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de material particulado fino $MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD1 sem os meses de setembro e outubro.

Observa-se que na análise para os meses de inverno temos uma melhora significativa nos resultados, principalmente para a estação Cerqueira César que mostrou um coeficiente de correlação de 0,44. A análise excluindo-se os meses de setembro e outubro não apresentou bons resultados em nenhuma das estações.

Baseado nos resultados para os meses de inverno (período seco na região), desenvolveu-se um estudo considerando a quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica, tal como apresentado anteriormente na análise com o MP_{10} .

4.8. Influência do Vapor d'água na correlação entre a AOD e o $MP_{2,5}$

Similarmente à análise feita para o MP_{10} , nesta seção apresenta-se um estudo acerca da quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica. Os resultados são apresentados na Figura 4.20.

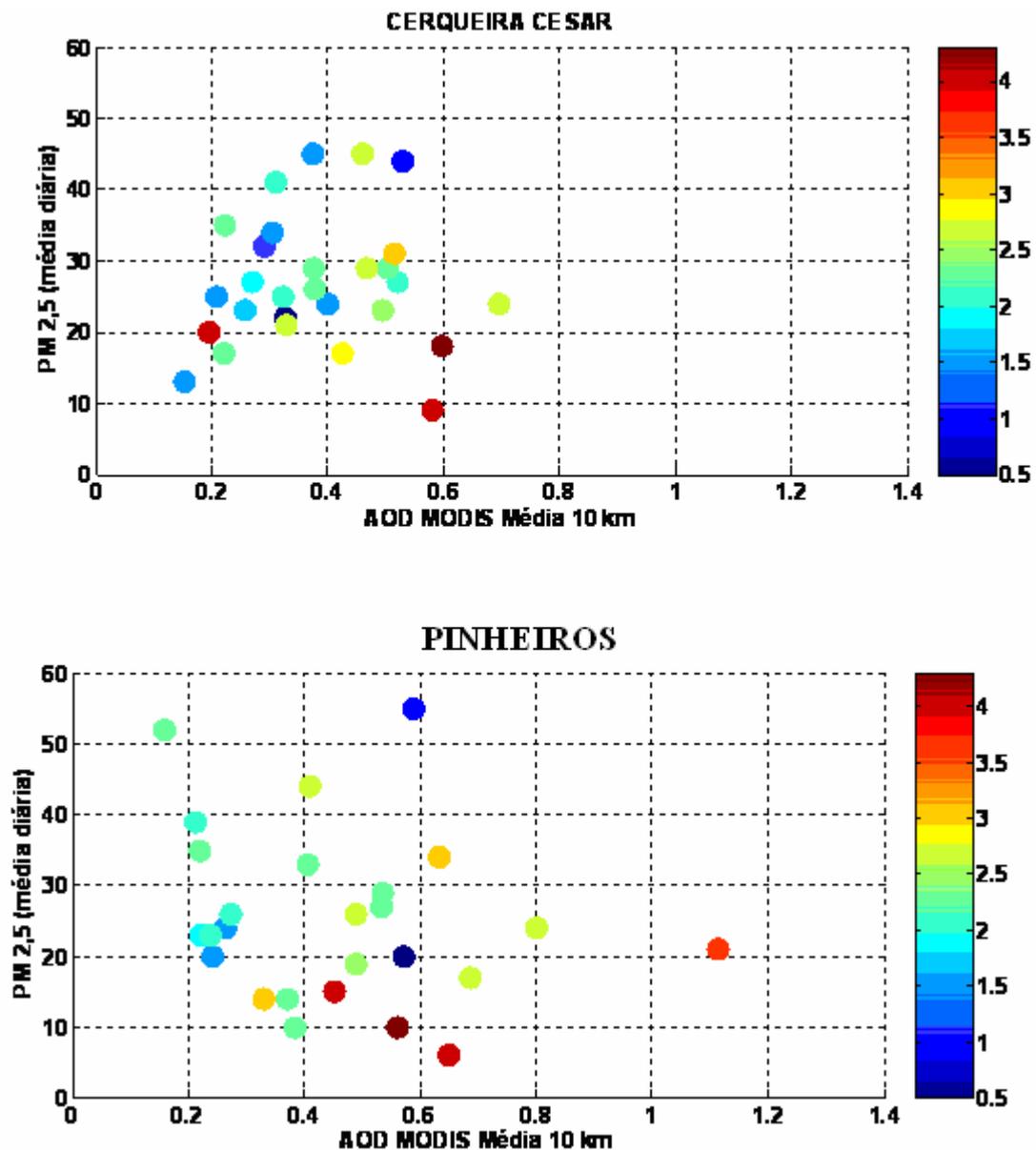


Figura 4.20: Diagramas de dispersão entre o Material Particulado Fino e a AOD Média (10 km x 10 km) x o Vapor d'água (cm) - barra de cores

Na análise da quantidade de vapor d'água na coluna com o $MP_{2,5}$ os pontos se apresentam mais dispersos do que na análise com o MP_{10} , mas ainda assim é possível observar os tons avermelhados para as AOD's maiores.

Conforme feito anteriormente, limitando-se agora a quantidade de vapor d'água na coluna em 2,1 cm são obtidas novas correlações para a comparação da AOD com o $MP_{2,5}$,

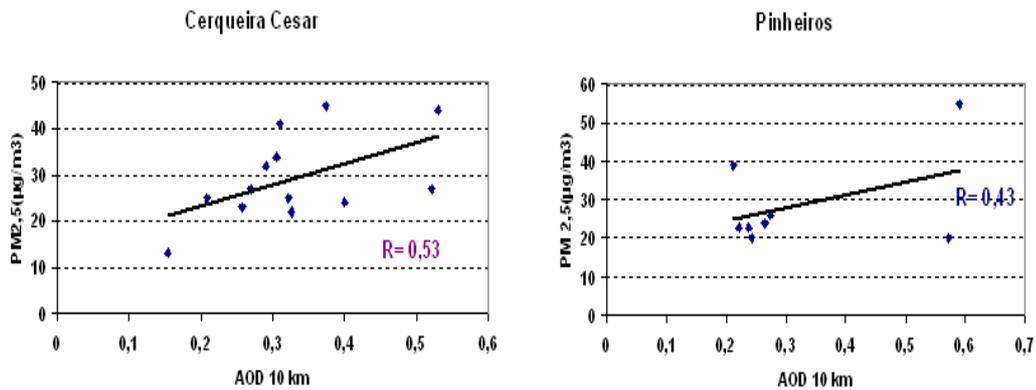


Figura 4.21: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de $MP_{2,5}$ e a AOD para dias com valor de quantidade de água na coluna até 2,1 cm.

Observa-se na Figura 4.21, apesar da pouca quantidade de pontos, que o conteúdo de vapor d'água foi um fator de grande influência nos valores dos coeficientes de correlação. As correlações para as duas estações estudadas apresentaram uma significativa melhora, principalmente a estação de Pinheiros que anteriormente havia apresentado uma correlação negativa entre os parâmetros.

4.9. Limitando a Geometria do Sensor

Castanho et al. (2007) apresentam um estudo sobre a razão entre a refletância de superfície no comprimento de onda do visível e no infravermelho. O estudo é empírico e baseado na razão entre refletâncias. O Modelo Dinâmico utiliza a razão entre as refletâncias para calcular a AOD, fator esse que torna essencial a utilização de um valor confiável dessa razão. Neste trabalho, algumas condições são especificadas para minimizar erros na determinação da razão estudada, entre elas, dias com ângulo de espalhamento menor que 140° , uma vez que dias com ângulos maiores que este apresentam razões entre $\rho_{\text{sup}}(0,66 \mu\text{m})/\rho_{\text{sup}}(2,1 \mu\text{m})$ superestimadas, o que influenciaria também os valores da AOD calculados pelo modelo utilizado neste trabalho.

A partir do estudo citado acima foram refeitas as análises das correlações entre o MP_{10} e a AOD, considerando somente dias com ângulo de espalhamento menor que 140° . Esses resultados são apresentados para todas as estações de monitoramento da CETESB estudadas neste trabalho (Figura 4.22).

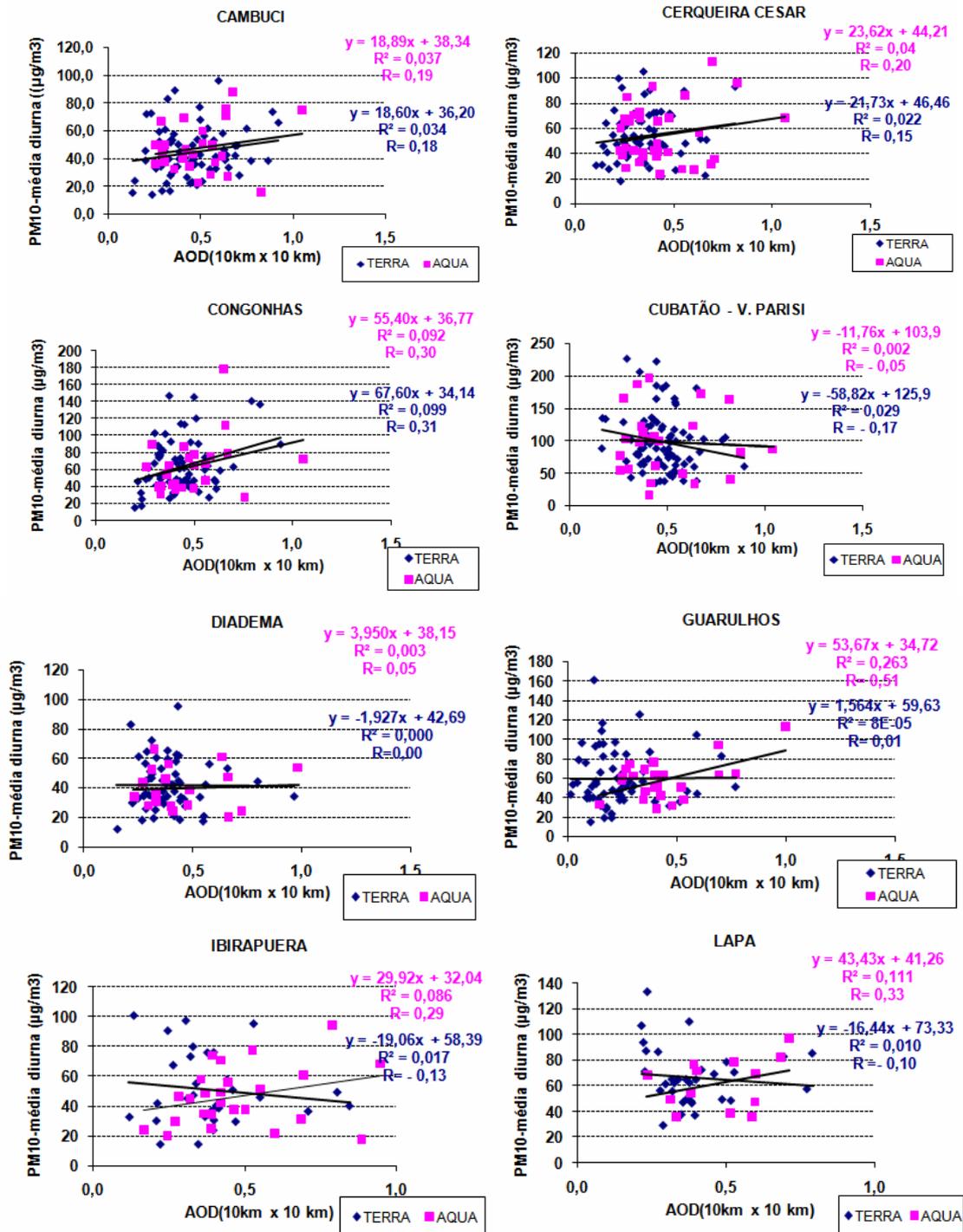


Figura 4.22: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de MP_{10} (médias diurnas) e a AOD (média 10 km x 10 km) para as estações de monitoramento da CETESB, somente para dias com ângulo de espalhamento menor que 140° .

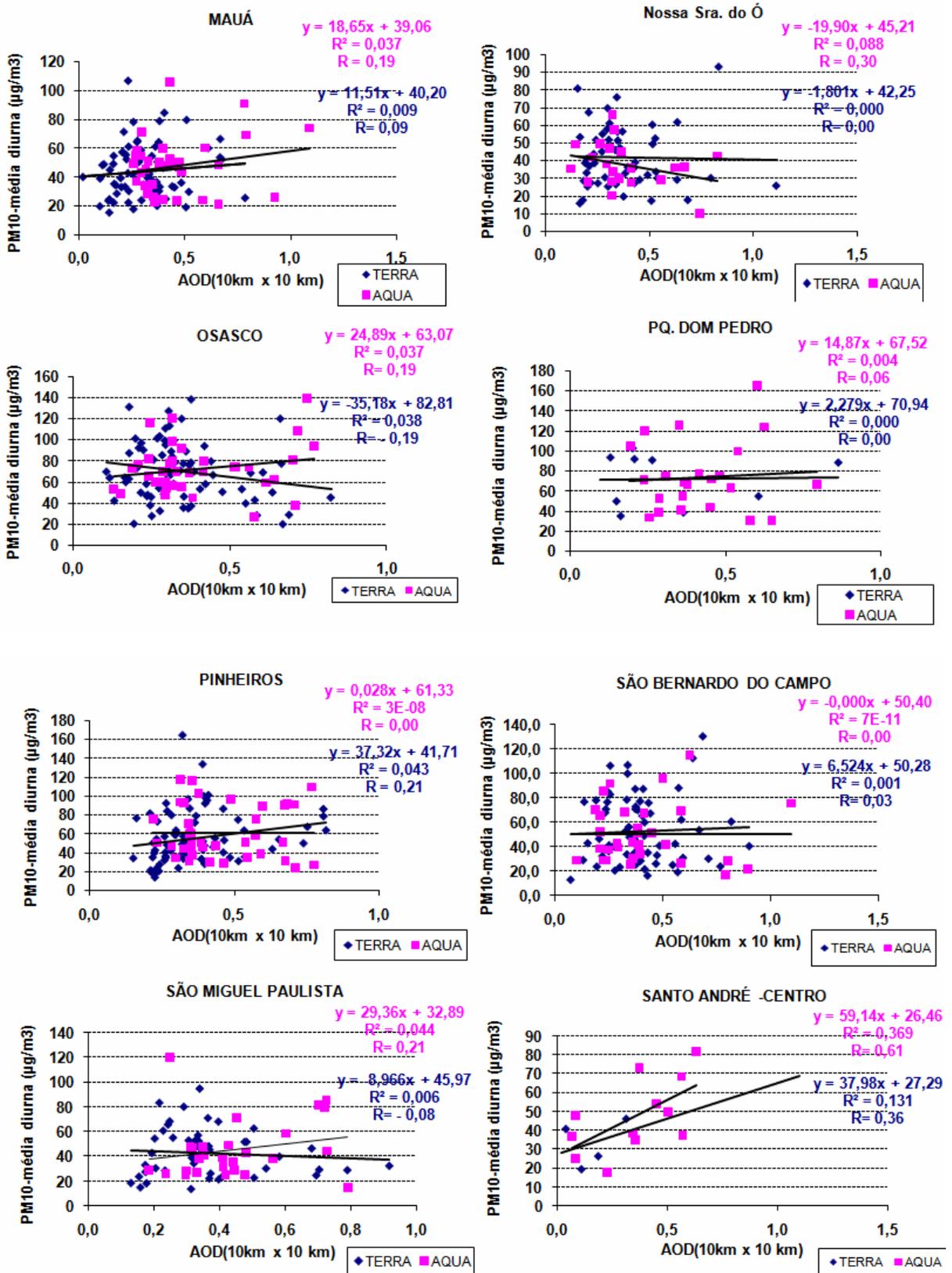


Figura 4.22: Continuação.

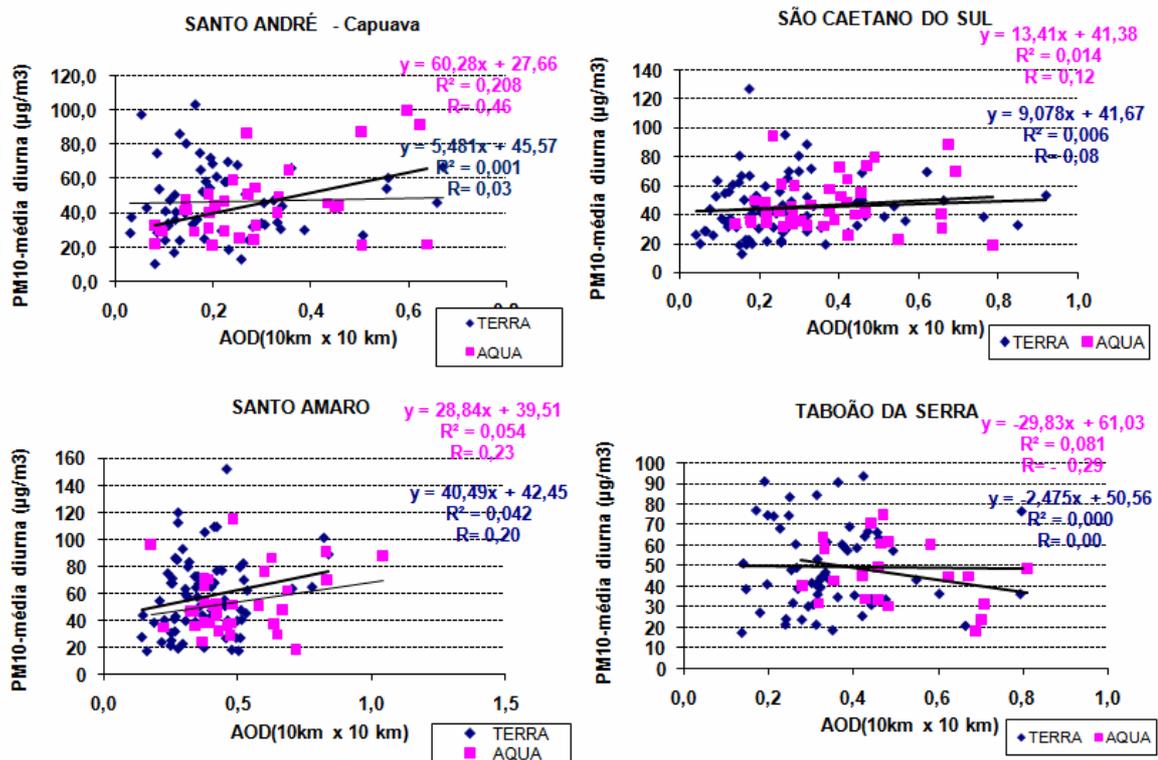


Figura 4.22: Conclusão.

Os resultados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada**. mostram correlações bem mais coerentes do que as apresentadas anteriormente (seção 4.1), confirmando a importância da geometria do sensor na determinação da AOD, conforme destacado por Castanho et al. (2007). Somente considerando este aspecto foi possível a obtenção de um menor número de coeficientes de correlação negativos (apenas duas estações).

4.10. Imagens sem nuvens

Apesar dos critérios de escolha dos dias já excluírem dias com nuvens e dos algoritmos de máscara de nuvens aplicados pelo sensor no satélite e pelo Modelo Dinâmico, nesta seção fez-se uma avaliação visual criteriosa na imagem no visível do MODIS para a RMSP. O critério foi olhar especificamente imagens do sensor MODIS, no visível, sobre a região da mancha urbana de São Paulo, e excluir todos os dias que apresentavam nuvens na região. Foram analisados somente os dias com ângulos de espalhamento menores que 140° e a partir desses dias foram excluídos os dias que apresentavam nuvens. Os resultados são apresentados na Figura 4.23.

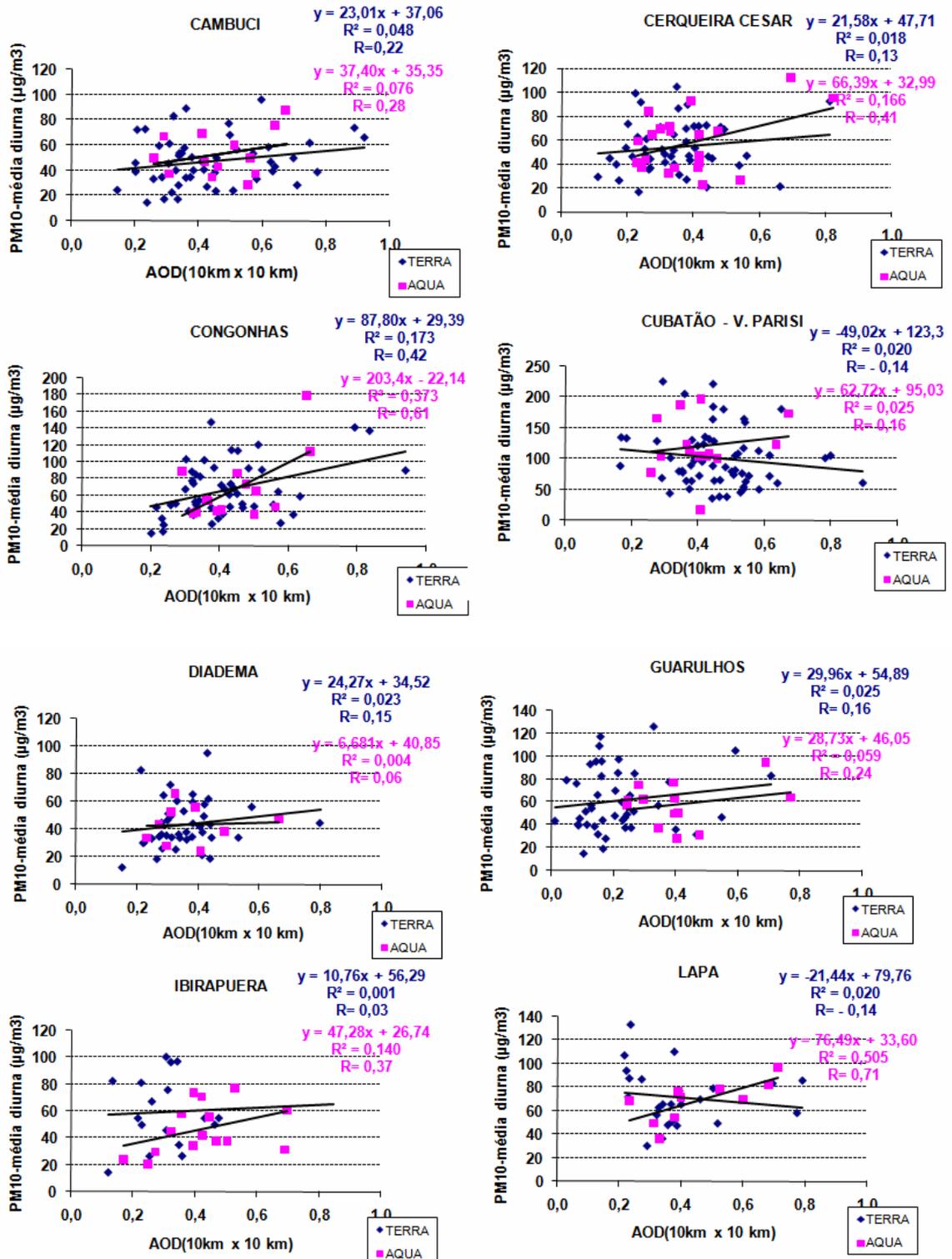


Figura 4.23: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de MP₁₀(médias diurnas) e a AOD (média 10 km x 10 km) para as estações de monitoramento da CETESB, somente dias com ângulos de espalhamento menores que 140° e sem nuvens.

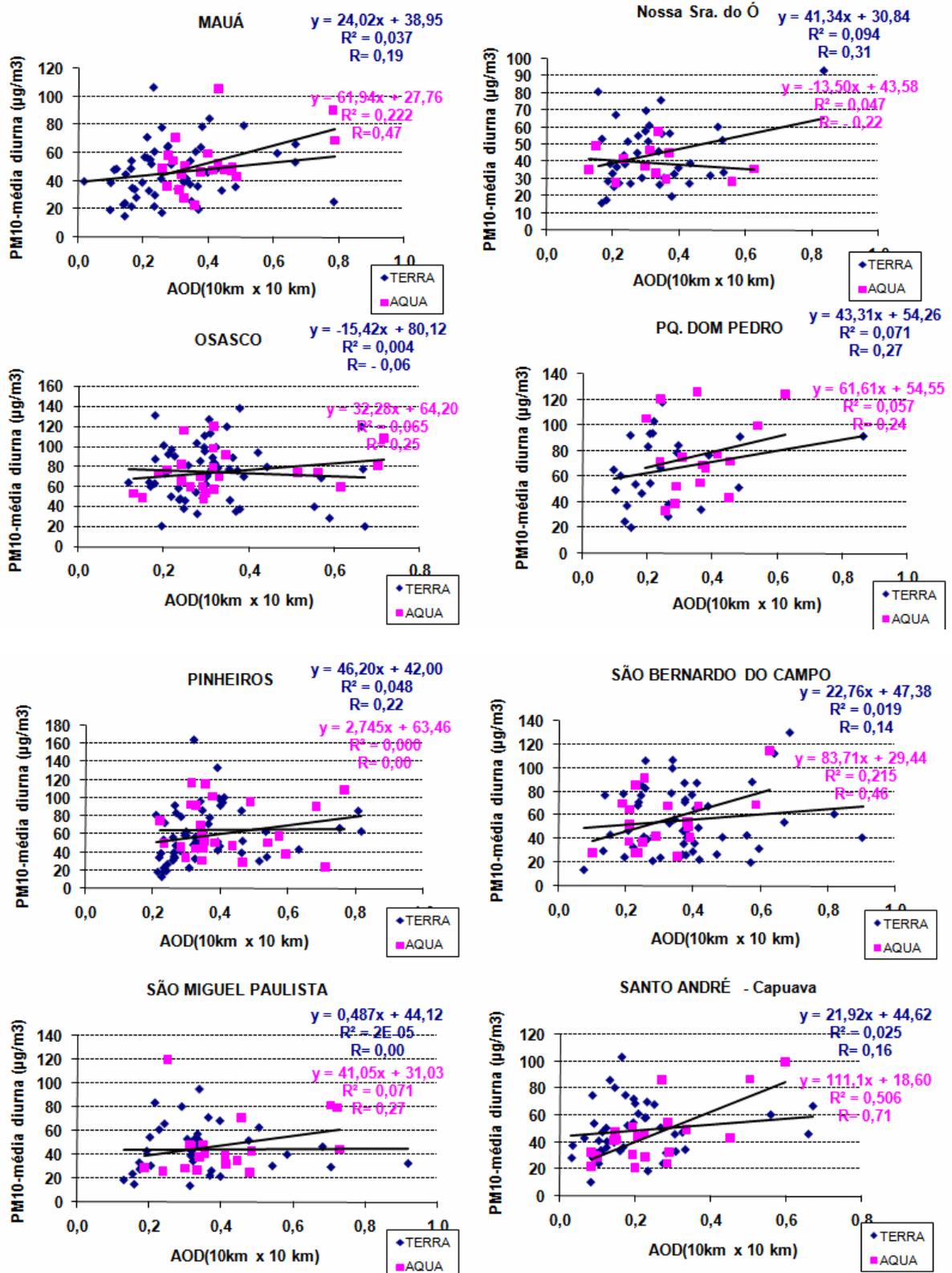


Figura 4.23: Continuação.

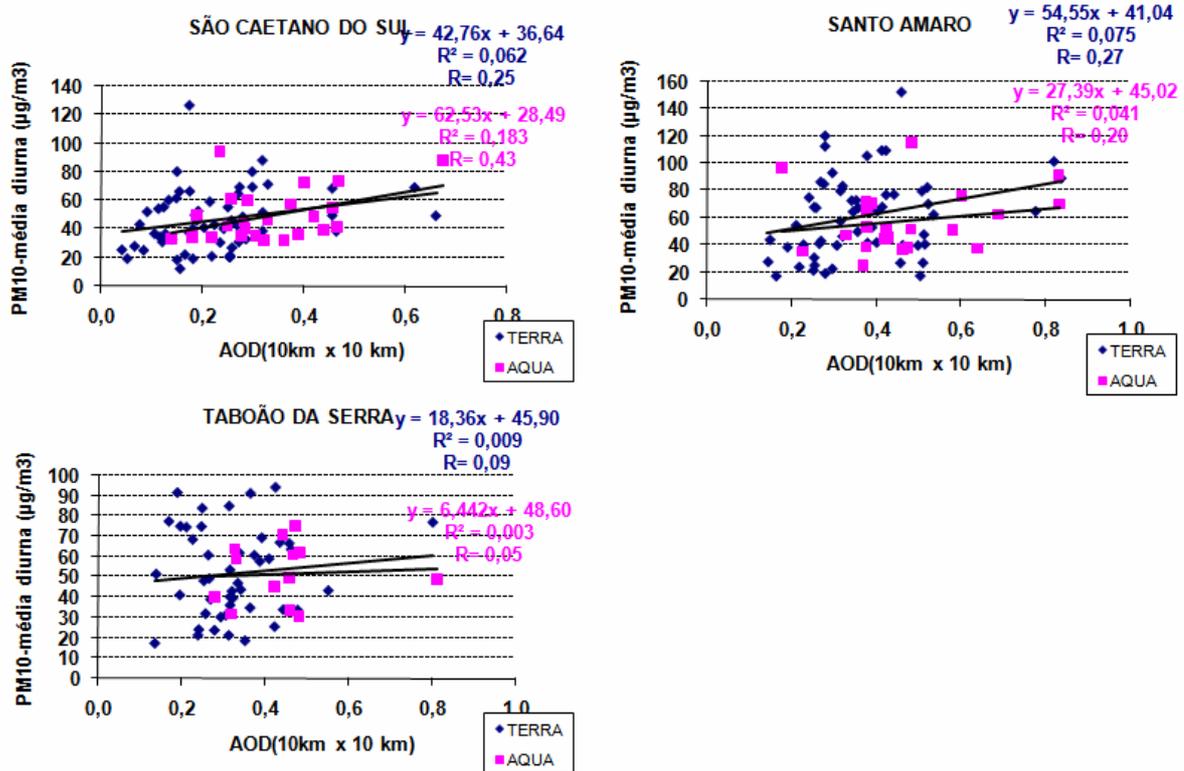


Figura 4.23: Conclusão.

Ao limitar o ângulo de espalhamento e usar somente imagens sem nuvens no visível passamos a ter melhores correlações em todas as estações de monitoramento para pelo menos um dos sensores. Somente 4 das 38 curvas ajustadas apresentam com coeficiente angular negativo. As estações que apresentam para pelo menos um sensor correlação negativa são: Cubatão - V. Parisi, Lapa, N. Sra. do Ó e Osasco.

Podemos destacar a estação com melhor correlação para os dois satélites como a estação de Congonhas, com $r = 0,61$ para o AQUA e $r = 0,42$ para o TERRA. Para as demais estações os maiores valores de correlação foram todos obtidos para o sensor a bordo do AQUA. São elas: Santo André - Capuava $r = 0,71$, São Bernardo $r = 0,46$; Mauá $r = 0,47$; Lapa $r = 0,71$; Cerqueira César $r = 0,41$ e São Caetano $r = 0,43$.

4.11. Estudos de Casos a partir de imagens do LIDAR

O LIDAR, um sensor passivo descrito anteriormente, fornece informações sobre o perfil atmosférico. O sistema do LIDAR estima indiretamente a concentração relativa de aerossóis na atmosfera de 300 m a 15 km (chegando a 30 km à noite) e utiliza os aerossóis

como traçadores da estrutura da atmosfera, evidenciando assim a evolução temporal da troposfera durante o dia e à noite.

As imagens do LIDAR foram utilizadas como ferramenta de comparação entre “padrões” qualitativos dos dias estudados. Identificou-se nesses “padrões”, presença de nuvens, presença de aerossol acima da camada de mistura e a concentração de aerossol próximo à superfície.

Devido a pouca disponibilidade de dias coincidentes entre imagens do LIDAR e os dias já estudados com as imagens do MODIS, foram analisados somente 36 dias dos anos de 2004 e 2005. Apesar dos 36 dias de imagens do LIDAR, não serão observados gráficos com 36 pontos, devido à indisponibilidade de medidas nas estações de monitoramento e ou de algum ponto de AOD.

A análise se baseou em correlações entre a concentração de MP_{10} – média diurna e a AOD – média de 10 km x 10 km. Na Figura 4.24 são mostradas à esquerda a correlação com todos os pontos e a direita, somente dias sem nuvens e sem indício de presença de material particulado acima da camada de mistura (CM).

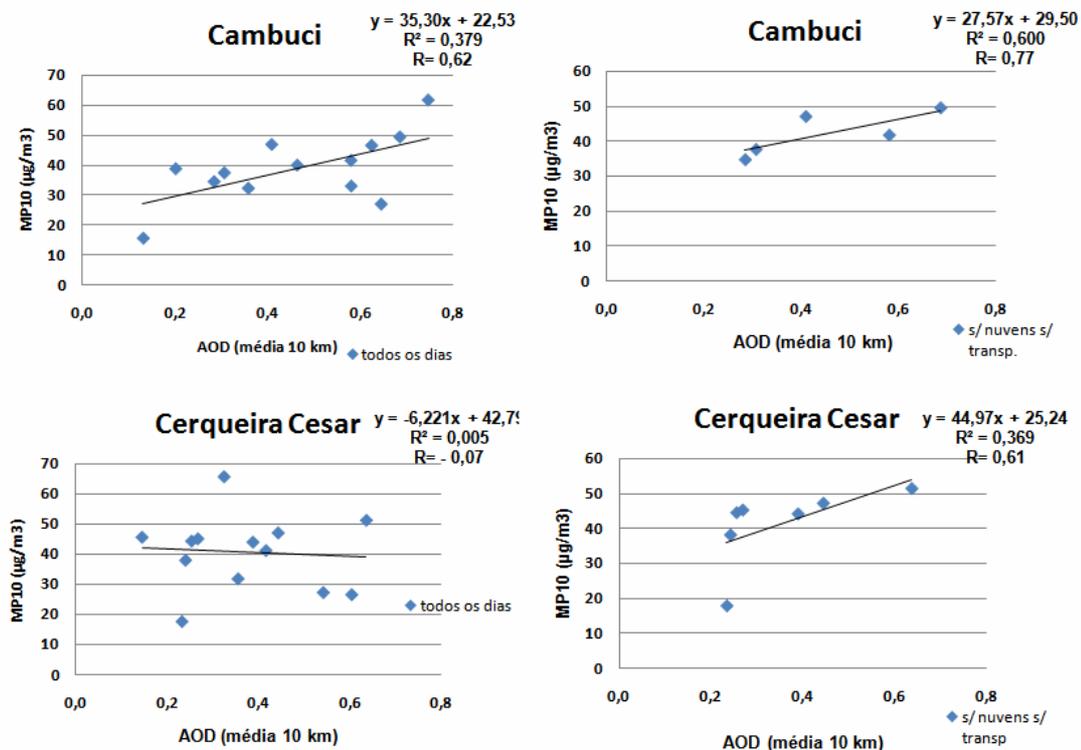


Figura 4.24: Diagramas de dispersão e correlações entre a concentração de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – média diurna e AOD média 10 km x 10 km. À esquerda todos os dias disponíveis para cada estação e à direita somente dias sem a presença de nuvens e sem a observação de aerossol acima da CM.

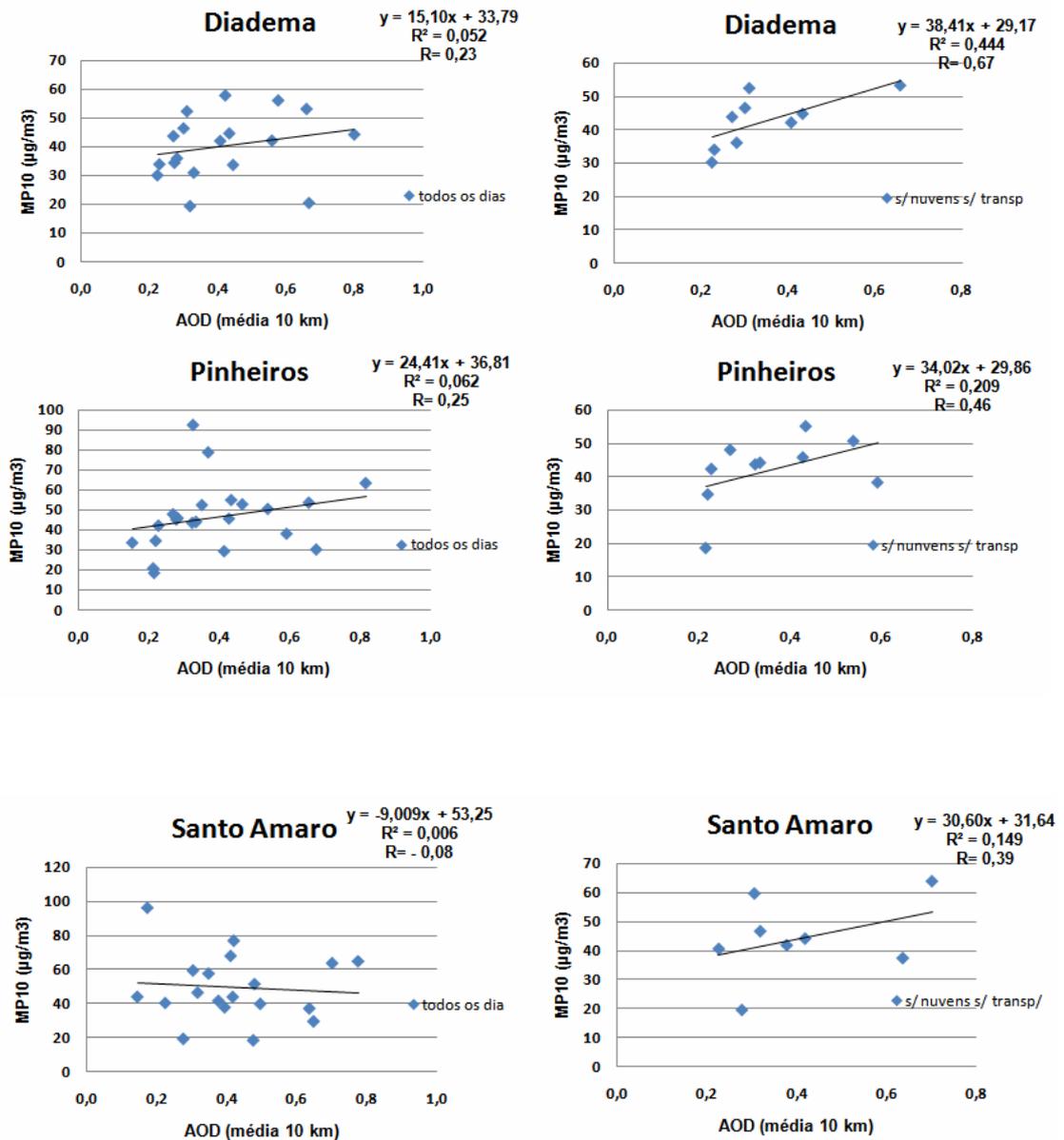


Figura 4.24: Continuação.

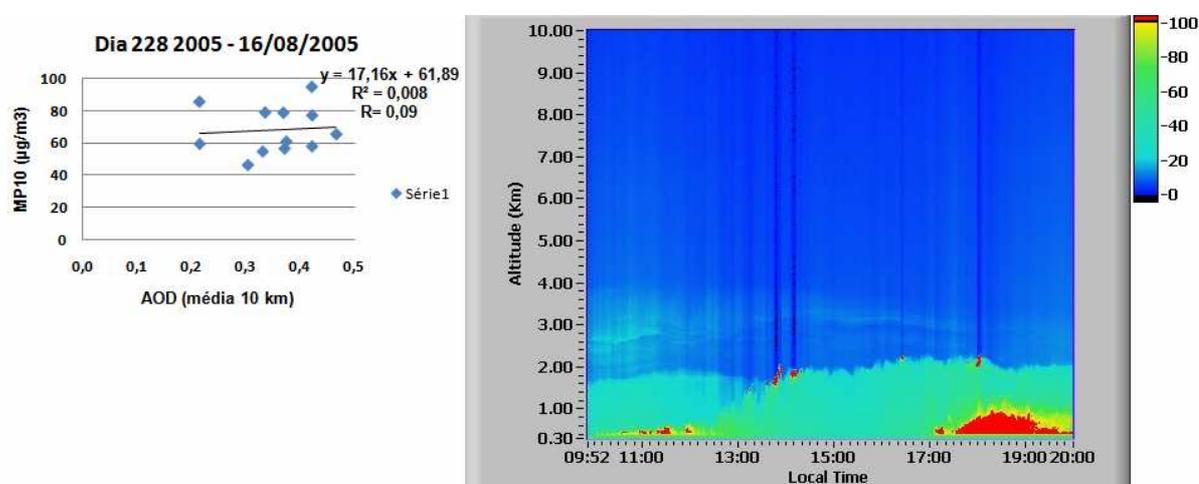
A presença de aerossol acima da camada de mistura pode influenciar a medida de AOD, interferindo negativamente na correlação entre os parâmetros estudados. Os resultados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, comparam para cada estação os gráficos à esquerda com toda a série de dados e à direita somente com dias sem nuvens e sem presença de aerossol acima da CM. Observa-se uma significativa melhora nos valores de correlação em todas as estações estudadas, destacando-se a estação Cerqueira César que passou de $r = -0,07$ para $r = 0,61$.

4.11.1. Análise por característica de dias

A análise apresentada nesta seção tem o objetivo de estudar a correlação entre a concentração de MP_{10} e a AOD para dias isolados. Os coeficientes de correlação foram calculados para seis dias, sendo três destes com presença de nuvens e/ou indício de material particulado acima da camada de mistura e outros três apresentaram concentração de aerossol somente próximo à superfície. Para cada dia foram correlacionados os pontos para todas as estações de monitoramento com medida disponível.

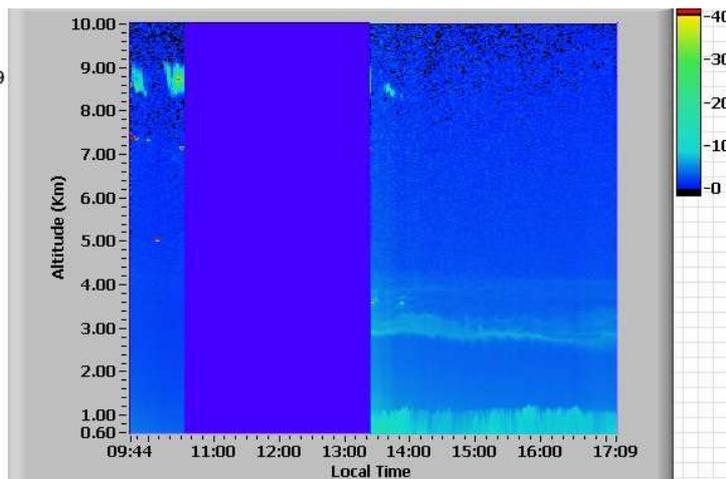
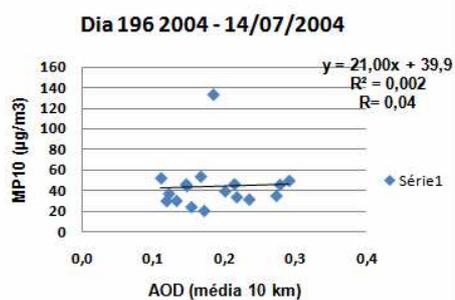
Nas Figuras 4.25 e 4.26 são apresentadas, à esquerda as correlações para cada dia, onde cada ponto representa a medida de uma estação de monitoramento, e à direita a imagem do LIDAR.

A Figura 4.25 apresenta os 3 primeiros dias selecionados, ou seja, dias com algumas nuvens e/ou com grande presença de aerossol acima da camada de mistura. Os dias selecionados foram: 18/08/2005, 14/07/2004 e 15/07/2004. Os dias sem a presença de aerossol acima da camada de mistura são apresentados na Figura 4.26. Foram os dias 27/07/2004, 24/11/2004 e 23/08/2005.

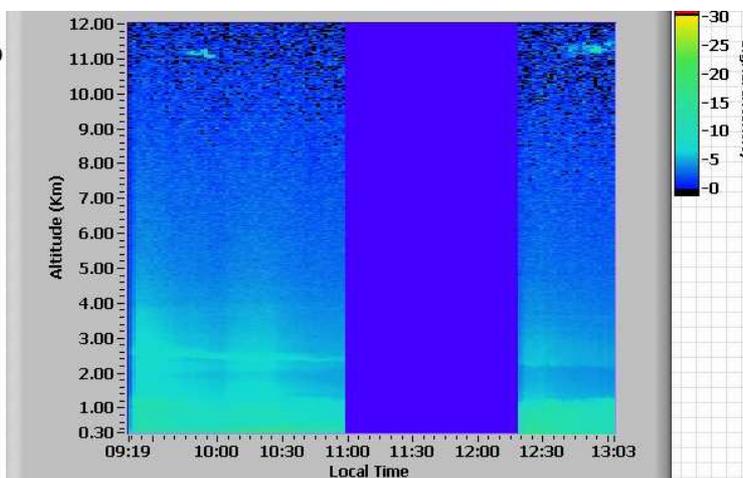
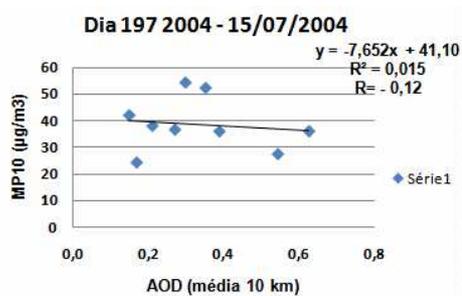


(a)

Figura 4.25: À esquerda – Diagrama de dispersão e correlação entre a concentração de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD média 10 km x 10 km e à direita - imagem do LIDAR. Em (a) dia 16/08/2005, (b) 14/07/2004 e (c) 15/07/2004.

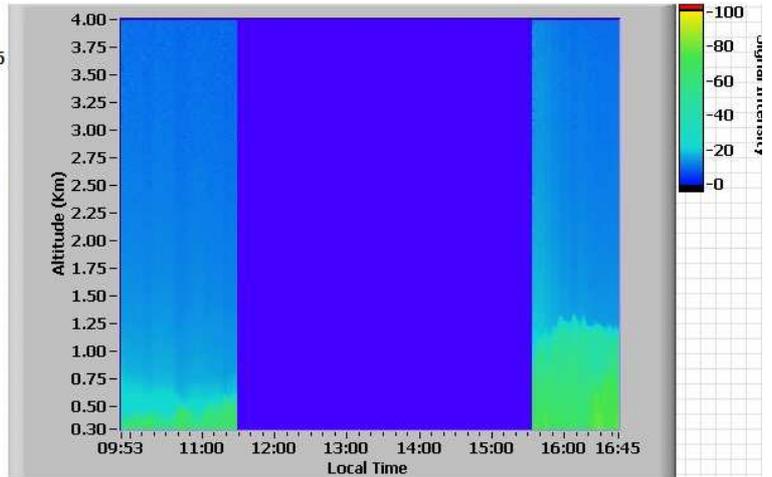
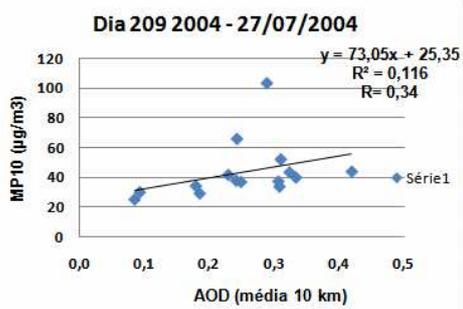


(b)

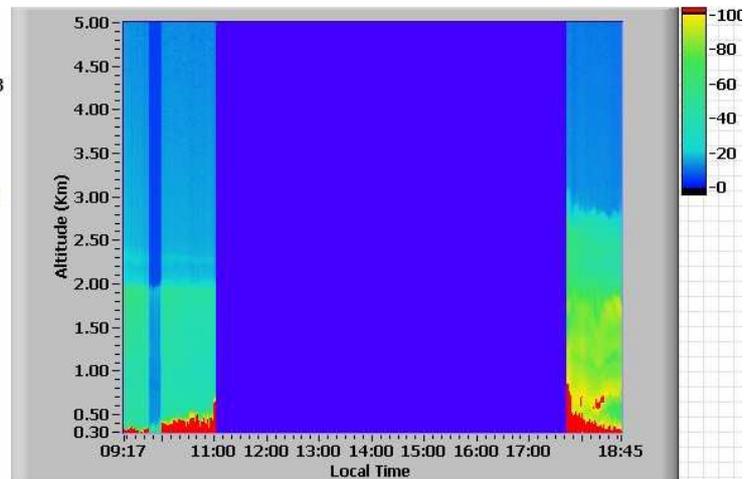
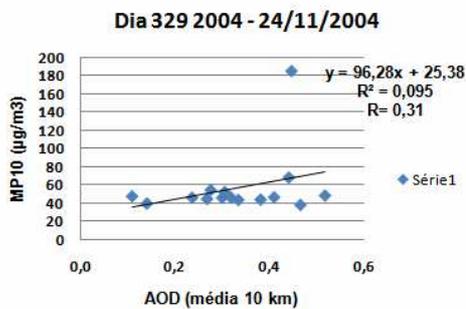


(c)

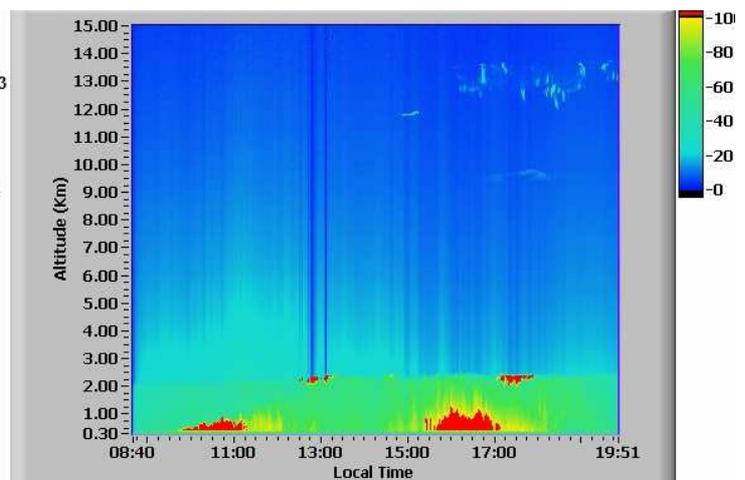
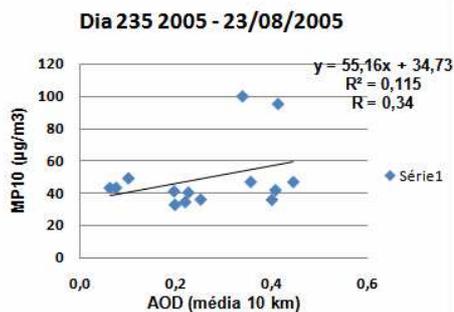
Figura 4.25: Continuação.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.26: À esquerda – Diagrama de dispersão e correlação entre a concentração de MP_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) e a AOD média 10 km x 10 km e à direita - imagem do LIDAR. Em (a) dia 27/07/2004, (b) 24/11/2004 e (c) 23/08/2005.

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam os resultados das análises baseadas em imagens do LIDAR. Comparando os resultados apresentados com a distinção das características nos dias, pode-se mostrar uma grande diferença no padrão de comportamento da curva ajustada e do valor de correlação entre o MP_{10} e a AOD. Para as comparações nos dias com presença de aerossol acima da camada de mistura temos os coeficientes de correlação de 0,09, 0,04 e -0,12 e para os dias “sem” a presença de aerossol acima da camada de mistura os coeficientes obtidos foram de 0,34, 0,31 e 0,34.

5. Conclusões

O principal objetivo principal deste trabalho foi verificar a existência de relações entre a concentração de material particulado (MP), medidas próximo à superfície, e a AOD obtida a partir de monitoramento via satélite.

O estudo foi feito através da análise dos coeficientes de correlação de Pearson, os quais representam ou indicam uma possível relação linear entre os parâmetros estudados. Também, foram analisados alguns fatores que podem influenciar a correlação entre as variáveis na RMSP.

As medidas de concentração de MP próximo à superfície representam as condições locais de poluição. São feitas geralmente nas proximidades das fontes que as influenciam, tais como o trânsito, as indústrias e a ressuspensão do solo. A AOD indica a quantidade de aerossóis em toda a coluna atmosférica e, embora possibilite uma maior representação espacial, sofre a influência de transporte de aerossóis vindos de outras regiões.

As análises foram feitas para cada estação de monitoramento com o objetivo de se visualizar condições diferentes na região estudada, a RMSP. Como não foi possível identificar padrões e nem agrupar as estações através das análises, as conclusões são apresentadas de acordo com as características estudadas e observadas, discutindo e exemplificando com as estações as condições na qual foram encontrados os melhores resultados em termos dos coeficientes de correlação.

Na análise das correlações com o MP_{10} foram feitas comparações com vários padrões de médias de MP_{10} : horária (média do horário mais próximo ao de passagem do satélite); diária (média de 24 h.) e; diurna (entre 6 e 18 h). Observou-se nas comparações citadas acima que quando consideram-se médias entre períodos maiores, ou seja, médias para um maior número de medidas, os resultados se apresentam melhores do que com as médias horárias. Isso se deve ao fato de que médias diurnas ou diárias tendem a minimizar o efeito local e/ou horário das condições existentes nas medidas do material particulado.

Nos resultados entre a média horária de MP_{10} a maioria das correlações apresentou valores negativos, exceto para as estações de Congonhas e Nossa Senhora do Ó. Quando a análise foi limitada a dias do período de inverno a maioria das estações apresentou melhores resultados e a maioria das retas de regressão passou a ter coeficiente angular positivo.

Ao comparar os resultados para médias diárias e médias diurnas pôde-se perceber que para as primeiras houve uma diminuição nas concentrações do material particulado e um

pequeno aumento no valor de correlação em várias estações. A diminuição no valor da concentração do MP_{10} pode ser devido à influência da camada de mistura que se apresenta mais elevada durante o dia.

Foram isolados os meses de inverno (junho, julho e agosto) e os resultados se apresentaram bem melhores do que quando analisado todo o período da série de dados. Neste caso, a maioria das correlações passou a ser positiva com alguns valores de correlações apresentando resultados coerentes como as curvas de regressão para o satélite AQUA nas estações de Congonhas e Guarulhos. A melhora das correlações para o período do inverno, período seco na região, pode ter sido influenciada pela quantidade de água na coluna atmosférica.

Para a investigação da influência da água no estudo entre a AOD e o MP, foi relacionada para cada dia estudado a quantidade de água presente na coluna atmosférica e os resultados das correlações para as estações estudadas. Verificou-se que existe uma tendência de pontos (dias) com maior quantidade de água na coluna estarem vinculados à AOD's mais elevadas. Esse resultado evidencia que a quantidade de água na coluna atmosférica pode ser uma das causas para a superestimativa dos valores de AOD, ou seja, pode existir na composição dos aerossóis uma grande porcentagem de água, fator este detectado pelo satélite. Após a extração dos pontos com quantidade de água na coluna acima de 3,0 cm a comparação com o MP_{10} apresentou uma melhora em 5 das 8 curvas de regressão e nos valores de correlação apresentados.

Um fator importante na comparação com o MP_{10} foi a limitação do ângulo de espalhamento do sensor em até 140° , ressaltando a importância da geometria do sensor nos cálculos. Quando foram utilizados somente dias com ângulo de espalhamento menor que 140° a maioria dos coeficientes de correlação passou a apresentar valores positivos, tornando os resultados mais coerentes. A partir da limitação do ângulo de espalhamento, fez-se uma seleção de dias sem nuvens. Neste caso, algumas correlações chegaram a apresentar valores próximos a 0,7 como no caso das estações da Lapa e de Santo André – Capuava. Cabe ressaltar que os melhores resultados se apresentam quando comparadas curvas a partir de medidas do satélite AQUA.

As comparações entre o $MP_{2,5}$ e a AOD foram feitas para as estações de Cerqueira César e Pinheiros. A estação Cerqueira César apresentou melhores correlações que a estação de Pinheiros. Uma limitação na análise com o $MP_{2,5}$ foi a baixa quantidade de medidas. Para a AOD escolhida, a estação Cerqueira César apresentou correlação de 0,05 e a estação

Pinheiros de -0,21. Estes valores aumentaram quando foram feitas análises para o período de inverno, passando a ser de 0,44 e -0,13 respectivamente.

Limitando-se a análise para dias com a quantidade de água na coluna atmosférica em até 2,1 cm, a estação Cerqueira César passou a apresentar coeficientes de correlação de 0,53 e a estação Pinheiros de 0,43.

Os estudos com o LIDAR se mostraram de grande importância no entendimento das baixas correlações encontradas ao longo do trabalho e na melhora dos resultados. As análises por estações quando excluídos dias com presença de nuvens e/ou presença de aerossol acima da camada de mistura apresentaram um aumento significativo nas correlações de todas as estações estudadas. A estação Cerqueira César que mostrava uma correlação de -0,07, passou a apresentar correlação de 0,61. A estação Pinheiros passou de 0,25 para 0,46. Foram selecionados dias com características diferentes e observou-se que para dias com presença de aerossol em altos níveis, por exemplo, dia 14/07/2004 a correlação era muito mais baixa do que para dias sem presença de aerossol em altos níveis, como o dia 27/07/2004. Para o dia 14/07/2004 a correlação encontrada foi de -0,04 e para o dia 27/07/2004 foi de 0,34.

De maneira geral, os fatores mais relevantes observados neste trabalho na comparação entre a concentração de MP_{10} e a AOD foram:

- a influência da época do ano e da quantidade de água na coluna atmosférica.
- a limitação do ângulo de espalhamento do sensor e a seleção de dias sem nuvens.
- a presença de aerossol acima da CM pode influenciar negativamente os resultados.

Como apresentado no decorrer deste trabalho, as correlações entre MP e AOD são muito sensíveis as condições ambientais dos dias estudados, sendo o conhecimento das condições meteorológicas muito importantes para este tipo de aplicação.

Embora os resultados obtidos neste trabalho não tenham apresentado valores de correlação entre o produto de AOD e a concentração de material particulado que possam ser considerados significativos, considerando os vários aspectos apresentados o monitoramento via sensores em satélite representa uma possível ferramenta para a determinação indireta da qualidade do ar, principalmente em regiões que não disponham de estações de monitoramento.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Avaliar com um maior número de medidas a relação entre o $MP_{2,5}$ e AOD, podendo inserir alguns critérios para a análise, tais como a seleção de dias sem nuvens e a limitação do ângulo de espalhamento.

- Avaliar a influência da altura da CM tanto na comparação com o MP₁₀ quanto com o MP_{2,5}.
- A utilização de outros parâmetros meteorológicos, obtidos por modelos numéricos, por exemplo, pode trazer maiores informações sobre as condições meteorológicas mais adequadas para a aplicação deste tipo de produto gerado por satélites.

Referências Bibliográficas

- ACKERMAN, S. A.; STRABALA, K. I.; MENZEL, W. P.; FREY, R. A.; MOELLER, C. C.; GUMLEY, L. E. Discriminating clear-sky from clouds with MODIS. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 103 (D24), 32141-32157, 1998.
- AKIMOTO, H. Global Air Quality and Pollution. *Science*, 203, 1716-1719, 2003.
- ALBUQUERQUE, T. T. de A. Distribuições de Tamanho, Composição Química e Identificação das Fontes do Aerossol Atmosférico de São Paulo: Um Estudo de Caso Para o Inverno de 2003. São Paulo, 2005. *Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.*
- ANDRADE, M. de F. Caracterização das fontes de material particulado e ozônio troposféricos na Região Metropolitana de São Paulo, São Paulo, 2006. *Tese de Livre-Docência apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.*
- BARNES, W. L.; PAGANO, T. S.; SALOMONSON, V. V. Prelaunch Characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, 36, 1088-1100, 1998.
- BOHREN, C.F.; HUFFMAN, D.R., *Absorption and Scattering of Light by Small Particles.* John Wiley & Sons, EUA, 1998.
- BRAGA, C. F.; TEIXEIRA, E. C.; ALVES, R de C. M. Estudo de Aerossóis Atmosféricos e Aplicação de Modelos Numéricos. *Química. Nova*, Vol. 27, No. 4, 567-573, 2004
- CASTANHO, A. D. A. Propriedades ópticas das partículas de aerossol e uma nova metodologia para a obtenção de espessura óptica via satélite sobre São Paulo. São Paulo, 2005. 250p. *Tese de doutoramento do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.*
- CASTANHO, A. D. & ARTAXO, P.: Wintertime and summertime São Paulo aerosol source apportionment study. *Atmos Environ.* 35, 4889-4902, 2001
- CASTANHO, A. D. A.; PRINN., R.; MARTINS, V.; HEROLD, M.; ICHOKU, C.; MOLINA, L. T. Urban Visible/SWIR surface reflectance ratios from satellite and sun photometer measurements in Mexico City. *Atmos. Chem. Phys. Dis.* (7), 8113-8139, 2007.
- CETESB. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2002. São Paulo: CETESB, Série Relatórios/ Secretaria de Estado do Meio Ambiente, (disponível em www.cetesb.sp.gov.br), 2003.

- CETESB. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2003. São Paulo: CETESB, Série Relatórios/ Secretaria de Estado do Meio Ambiente, (disponível em www.cetesb.sp.gov.br), 2004.
- CETESB. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2004. São Paulo: CETESB, Série Relatórios/ Secretaria de Estado do Meio Ambiente, (disponível em www.cetesb.sp.gov.br), 2005.
- CETESB. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2005. São Paulo: CETESB, Série Relatórios/ Secretaria de Estado do Meio Ambiente, (disponível em www.cetesb.sp.gov.br), 2006.
- CETESB. Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo - 2006. São Paulo: CETESB, Série Relatórios/ Secretaria de Estado do Meio Ambiente, (disponível em www.cetesb.sp.gov.br), 167 p, 2007.
- CHU, D. A.; KAUFMAN, Y. J.; ZIBORDI, G.; CHEM, J. D.; MAO J.; LI, C.; HOLBEN, B. N. Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) *J. Geophys. Res.*, 108 (D21) 4661, 2003.
- DONKELAAR, A.; MARTIN, R. V.; PARK, R. J. Estimating ground-level PM_{2.5} using aerosol optical depth determined from satellite remote sensing. *J. Geophys. Res.*, VOL. 111, D21201, doi:10.1029/2005JD006996, 2006.
- DUBOVIK, O.; HOLBEN, B.; ECK, T.; SMIRNOV, A.; KAUFMAN, Y.; KING, M.; TANRÉ, D.; SLUTSKER, I. Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide locations. *J. Atmos Sci.* vol. 59, p. 590– 608, 2002.
- ENGEL-COX, J. A.; HOLLOMAN, C. H.; COUTANT, B. W.; HOFF, R.M. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality. *Atmos. Environ.*, 38 (16), 2496-2509, 2004.
- EICHINGER, W. E. & KOVALEV, V. A. *Elastic Lidar: Theory, Practice, and Analysis Methods*. Wiley Publishers, 2004.
- FREITAS, E. D. Circulações locais em São Paulo e sua influência sobre a dispersão de poluentes. São Paulo, 2003. *Tese de Doutorado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo*.
- GAO, B.C. & KAUFMAN, Y. J. Water vapor retrievals using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) near-infrared channels. *J. Geophys. Res.*, 108 (D13), 4389, doi: 10.1029/2002JD003023, 2003.

- HUSAR, R. B., WHITBY, K.T., LIU, B.Y.H. (1972). Physical mechanisms governing the dynamics of Los Angeles smog aerosol. *J. Colloid Interface Sci.*, 39, 211-224.
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) - Climate Change 2001: *The Scientific Basis*, WMO, UNEP, 2001
- IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) - Climate Change 2007: *The Physical Science Basis - Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. This Summary for Policymakers was formally approved at the 10th Session of Working Group I of the IPCC, Paris, February 2007.*
- KAUFMAN, Y. J. Satellite sensing of aerosol absorption. *J. Geophys. Res.*, 92, 4307-4317, 1987.
- KAUFMAN, Y. J. & GAO, B. C. Remote sensing of water vapor in the near IR from EOS/MODIS. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, 30, 871-884, 1992.
- KAUFMAN, Y. J.; TANRÈ, D.; REMER, L. A.; VERMOTE, E. F.; CHU, A.; HOLBEN, B. N. Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS moderate resolution imaging spectroradiometer. *J. Geophys. Res.*, 102, 17051-17067, 1997.
- KING, M.D., Y.J. KAUFMAN, W.P. MENZEL, D. TANRÈ. Remote sensing of clouds, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, vol. 30(1), p 2-27, 1992.
- KING, M. D.; KAUFMAN, Y. J.; TANRÈ, D.; NAKAJIMA, T. Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from Space: Past, Present, and Future. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, (80), 2229-2259, 1999.
- KING, M. D. ; MENZEL, W. P; KAUFMAN, Y. J.; TANRÈ, D.; GAO, B. C.; PLATNICK, S.; ACKERMAN, S. A.; REMER, L. A.; PINCUS, R.; HUBANKS, P. A. Cloud and aerosol properties, precipitable water, and profiles of temperature and water vapor from MODIS. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens.*, 41(2), 442-458, 2003.
- LI, J. & HUANG, H. L. Retrieval of atmospheric profiles from satellite sounder measurements by use of the discrepancy principle. *Appl. Opt.*, 38, 916-923, 1999.
- LI, J.; WOLF, W. W.; MENZEL, W. P.; ZHANG, W. J.; HUANG, H. L.; ACHTOR, T. H. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: The algorithm and validation. *J. Appl. Meteorol.*, 39, 1248-1268, 2000.
- LI, J.; SCHMIDT, C. C.; NELSON, J. P.; SCHMIT, T. J.; MENZEL, W. P. Estimation of total atmospheric ozone from GOES sounder radiances with high temporal resolution. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2, 157-168, 2001.

- LIU, K. N. An Introduction to Atmospheric Radiation, Second Edition, *Academic Press*, USA, 2002.
- MARTINS, J. A. Efeito dos núcleos de condensação na formação de nuvens e o desenvolvimento da precipitação na região amazônica durante a estação seca. São Paulo, 2006. *Tese de doutoramento do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo*.
- MARTINS, J. V. O Efeito de Partículas de Aerossol de Queimadas da Amazônia no balanço Radiativo da Atmosfera. São Paulo, 1999. *Tese de doutoramento do Instituto de Física da Universidade de São Paulo*.
- MARTINS, J. V.; TANRÈ, D.; REMER, L.A.; KAUFMAN, Y. J.; MATTOO, S.; LEVY, R. MODIS Cloud screening for remote sensing of aerosol over oceans using spatial variability. *Geophys. Res. Lett.*, 29(12), doi:10.1029/2001GL013252, 2002.
- MEASURES, R. M. *Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications*. Krieger Publishing Company, 1984.
- MIRANDA, R. Caracterização físico-química e propriedades ópticas do aerossol urbano na região metropolitana de São Paulo, 2001 *Tese de doutoramento do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo*.
- MOLINA, L.T., MOLINA, M.J.; SLOOT, R.; KOLB, C.E.; GBOR, P.K.; MENG, F.; SINGH, R.; GALVEZ, O.; SLOAN, J.J.; ANDERSON, W.; TANG, X.Y.; SHAO, M.; ZHU, T.; ZHANG, Y.H.; HU, M.; GURJAR, B.R.; ARTAXO, P.; OYOLA, P.; GRAMSCH, E.; HIDALGO, D.; GERTLER, A. Critical Review: Air Quality in Selected Megacities. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, on line supplement, disponível em <http://www.awma.org>, 2004.
- NICOLANTONIO, W.; CACCIARI, A.; BOLZACCHINI, E.; FERRERO, L.; VOLTA, M.; PISONI, E. Modis aerossol optical properties over north Italy for estimating surface-level PM_{2,5}. 'Envisat Symposium' 2007, Montreux, Switzerland, 2007
- OLIVEIRA, M. G. L.; Evolução das distribuições de tamanho em massa e número do aerossol atmosférico em São Paulo São Paulo, 2007. *Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo*.
- PLATNICK, S.; KING, M. D.; ACKERMAN, S. A.; MENZEL, W. P.; BAUM, B. A.; RIÉDI, J. C.; FREY, R. A. The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, p.459–473, fev 2003.

- PROCÓPIO, A. Forçante radiativa direta dos aerossóis na Região Amazônica devido à queima de biomassa. São Paulo, 2005. *Tese de doutoramento do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.*
- REMER, L. A.; TANRÉ, D.; KAUFMAN, Y. *Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collection 5 – Product ID: MOD04/MYD04.* Disponível em http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf, Acesso em: out. 2006.
- RICCHIAZZI, P.; YANG, S.; GAUTIER, C.; SOWLE, D. *SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the earth's Atmosphere.* *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 79, p. 2101-2114, 1998.
- SANCHEZ-CCOYLLO, O. R.; Identificação da contribuição das fontes locais e remotas de poluentes na região metropolitana de São Paulo. São Paulo, 2002. *Tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.*
- SEINFELD, J.H. & PANDIS, S. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change.* New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.
- TANRÉ, D.; KAUFMAN, Y. J.; HERMAN, M.; MATTOO, S. Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances. *J. Geophys. Res.* 102 (D14), 16971-16988, 1997.
- TANRÉ, D.; REMER, L. A.; KAUFMAN, Y. J.; MATTOO, S.; HOBBS, P. V.; LIVINGSTON, J. M.; RUSSELL, P. B.; SMIRNOV, A. Retrieval of aerosol optical thickness and size distribution over ocean from the MODIS airborne simulator during TARFOX. *J. Geophys. Res.* 104 (D2), 2261-2278, 1999.
- THOMAS, G.E. & STAMNES, K., *Radiative Transfer in the Atmosphere and Ocean.* Cambridge University Press, New York, 1999.
- WALLACE, J. M. & HOBBS, P. V.: *Atmospheric science: an introductory survey*, 2nd ed., 2006. International Geophysics Series, Academic Press, Elsevier Inc., 483 pp.
- WEITKAMP, C. *Lidar Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere.* Springer, 2005.
- WHITBY, K. T., LIU, B. Y. H., HUSAR, R. B., BARSIC, N. H. The Minnesota aerosol analyzing system used in the Los Angeles smog project. *J. Colloid Interface Sci.*, 39, 136-164. 1972a.

- WHITBY, K. T., HUSAR, R. B., LIU, B. Y. H. The aerosol size distribution of Los Angeles smog. *J. Colloid Interface Sci.*, 39, 177-204. 1972b.
- WHITBY, K. T., CANTRELL, D., Fine Particles. *International Conference of Environment Sensing and Assessment, Las Vegas, NV, Institute of Electrical and Electronic Engineers*, 1976.
- YAMASOE, M. A. – Apostila do Curso “Meteorologia por satélite”, 2004 do IAG-USP – disponível em: <http://www.master.iag.usp.br/ensino>
- YEH, H. C.; CUDDIHY, R. G.; PHALEN, R. F.; CHANG, I Y. Comparisons of Calculated Respiratory Tract Deposition of Particles Based on the Proposed NCRP Model and the New ICRP66 Model, *Aerosol Sci. Technol.*, 25:2 134-140, 1996.

Anexo A – Metodologia para o Cálculo de AOD

A.1. Refletância Crítica – Metodologia para determinação do modelo de aerossol

A metodologia da Refletância Crítica (RC) foi definida previamente por Kaufman (1987) e Martins (1999) e aplicada por Castanho (2005).

A refletância crítica é uma propriedade intrínseca do aerossol e está diretamente relacionada ao albedo simples do aerossol. É a uma medida de refletância no topo da atmosfera que tem como principal característica a independência com relação à profundidade óptica do aerossol.

Partindo da Equação 2.16, que define a refletância no TOA medida pelo sensor, e reescrevendo-a para uma atmosfera poluída e para uma atmosfera limpa, temos a Equação A-1a (ρ_{TOA} Poluída) e a Equação A-1b (ρ_{TOA} Limpa):

$$\rho_{TOA} Poluída(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) = \rho_{OPol}(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) + \frac{F_{dPol}(\lambda, \theta_0)T_{Pol}(\lambda, \theta)}{(1 - s\rho')} \rho_{SUP}(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) \quad (A-1a)$$

$$\rho_{TOA} Limpa(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) = \rho_{OLim}(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) + \frac{F_{dLim}(\lambda, \theta_0)T_{Lim}(\lambda, \theta)}{(1 - s\rho')} \rho_{SUP}(\lambda, \theta_0, \theta, \varphi_o, \varphi) \quad (A-1b)$$

Considerando $(1 - s\rho')$ desprezível, isolando o termo ρ_{SUP} em A-1 (b) e substituindo em A-1(a) chegamos a relação abaixo,

$$\rho_{TOA} Poluído = (\rho_{OPOL} - \rho_{OLim})\alpha + \rho_{TOA} Limpa.\alpha \quad (A-2)$$

em que

$$\alpha = \frac{F_{dPol}T_{Pol}}{F_{dLim}T_{Lim}} \quad (A-3)$$

Conforme se observa na Equação A-2, temos uma relação linear entre ρ_{TOA} (650) para um dia poluído e ρ_{TOA} (650) para um dia limpo.

Experimentalmente essa relação pode ser verificada com simulações em um código de transferência radiativa. A partir de medidas de refletância no TOA para várias AODs e estimando a refletância no TOA para uma AOD nula, determinam-se relações entre a refletância para dias poluídos x refletância para dias limpos.

Esse resultado pode ser visto na Figura A- 1 na qual cada simulação foi representada por uma curva e cada curva representa resultados para profundidades ópticas diferentes.

Na Figura A- 1 observa-se que existem dois pontos de intersecção com a reta 1:1, esses pontos são os pontos de refletância crítica. Para cada conjunto de retas que se interseccionam, define-se um tipo de aerossol identificado pelo seu albedo (ω_0).

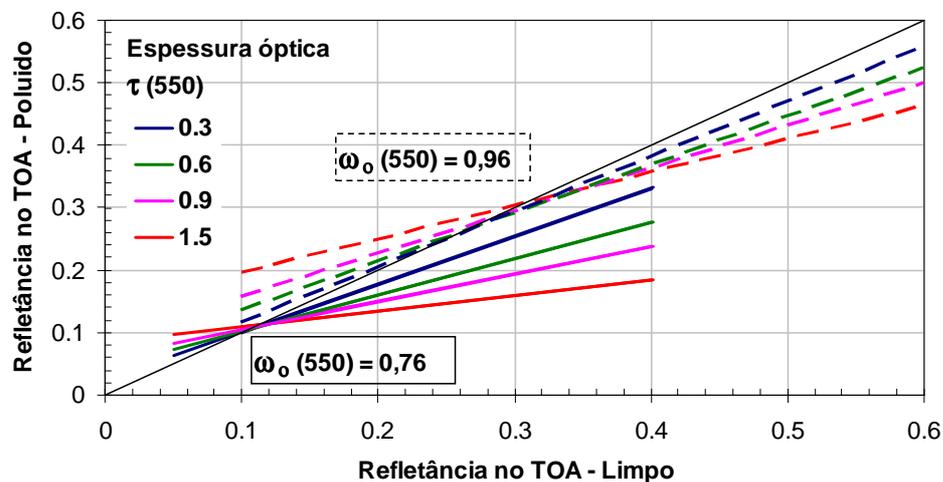


Figura A- 1: Resultados da simulação no SBDART para dois modelos de aerossol, com albedo de 0,76 e 0,96. (Figura extraída de CASTANHO, 2005).

Numa região de estudo, define-se uma refletância crítica para cada modelo de aerossol. Os resultados das simulações fornecem uma relação direta entre albedo de aerossol e a refletância crítica. Para São Paulo essas relações são apresentadas na Figura A- 2, onde foram identificados os 5 modelos de aerossol na região.

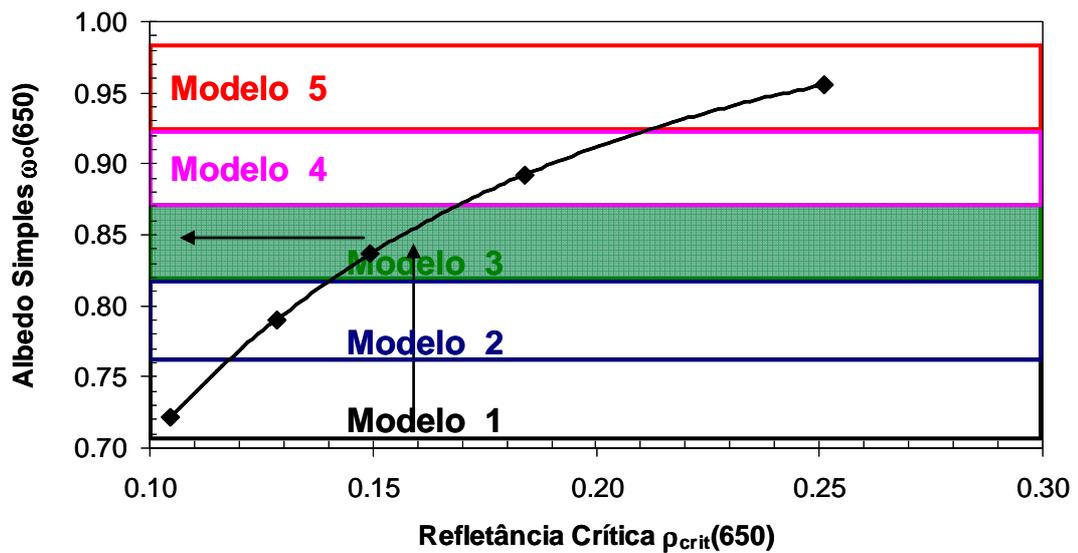


Figura A- 2: Relação entre albedo simples de aerossol e refletância crítica para São Paulo. (Figura extraída de CASTANHO, 2005).

Com a relação apresentada na Figura A- 2 e aplicando a metodologia para um dia de estudo exemplifica-se a determinação de um modelo de aerossol para um conjunto de pixels de medida.

A partir de medidas de refletância feitas pelo MODIS em 650 nm num dia poluído e com valores de refletância simulada para um dia limpo, faz-se o ajuste de reta dos pontos experimentais. No ponto onde a reta ajustada cruza a reta 1:1 (reta teórica da refletância crítica), determina-se o valor da refletância crítica para o dia estudado. Este resultado é apresentado na Figura A- 3.

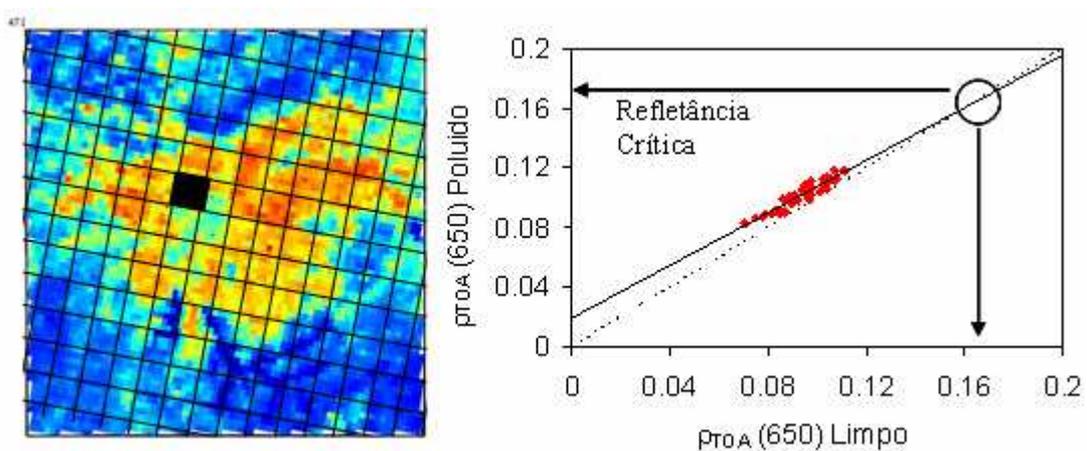


Figura A- 3: Exemplo de determinação da refletância crítica para um dia de estudo. (Figura extraída de CASTANHO, 2005).

A.2. Descrição do algoritmo para cálculo da AOD

A seguir é apresentada uma explicação resumida do algoritmo para o cálculo da profundidade óptica do aerossol. A descrição completa da metodologia pode ser consultada em Castanho (2005).

O modelo é basicamente desenvolvido no software MATLAB, rodado em ambiente LINUX e interagindo com o SBDART, que é um código de transferência radiativa em linguagem Fortran, e nos dá como saída valores de AOD calculadas com resolução mínima de 500 m x 500 m. Este trabalho apresenta resultados com resolução de 1,5 km x 1,5 km e AOD médias calculadas ao redor das estações de monitoramento no solo.

O algoritmo é composto de cinco módulos tratados como: *Llopen*, *Máscara de Nuvem*, *Insbdart*, *Equ* e *Modelo SP*.

Llopen: é a primeira parte do algoritmo que basicamente abre o arquivo HDF, seleciona os pixels dentro da área de interesse, calcula a refletância nas bandas 1 e 7 do sensor MODIS e chama a função *Máscara de Nuvem*;

Máscara de Nuvem: o objetivo desta parte do algoritmo é identificar pontos escuros (nuvens ou sombras) nas medidas de refletância. A partir das refletâncias calculadas no *Llopen*. O algoritmo utiliza as medidas na banda 7 (2,1 μm) e impõe condições de que só os pixels com valores de refletância maiores que 0,01 (sombra) e menores que 0,25 (nuvens) são válidos.

Além de excluir pontos escuros, o módulo *Máscara de Nuvem* calcula refletâncias médias para minimizar erros de medidas do satélite. Existe uma variável de entrada no algoritmo, chamada de V (no nosso caso foi usado $V=3$), que define quantos pixels de refletâncias são usados para se calcular a média.

Insbdart: é a parte do script que gera um arquivo executável com as variáveis de entrada para o modelo interagir com o SBDART.

O SBDART é um código de transferência radiativa que resolve a equação de transferência radiativa para uma atmosfera plano-paralela com ou sem a presença de nuvens (RICCHIAZZI et al., 1998). O programa possui uma biblioteca com propriedades padrão que modelam diferentes tipos de atmosfera.

A interação do modelo com o SBDART possui a função de simular a refletância no topo da atmosfera sob determinadas e variadas refletâncias de superfície, propriedades de aerossol em suspensão na atmosfera e geometria do satélite para o dia estudado.

A refletância no topo da atmosfera é simulada pelo SBDART para dois comprimentos de onda, (650 nm e 2100 nm) sendo que em 2100 nm a simulação é feita para a obtenção das informações sobre a superfície. A informação sobre a superfície é essencial para que se possa excluí-la da medida estimada a partir das medidas feitas pelo satélite no TOA.

Para a simulação no SBDART existem variáveis de entrada que dependem da geometria do satélite no dia da medida, como os ângulos PHI (ângulo azimutal relativo entre o sensor e o sol), SZA (ângulo solar zenital), UZEN (ângulo zenital do sensor) e o valor de UW (quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica), valores estes extraídos de arquivos da NASA (disponíveis em: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/validation_corrdata.html).

Há também parâmetros que são fixos para todos os dias, tais como os valores da altura da região estudada, modelos de aerossol e comprimentos de onda.

Os modelos de aerossol são definidos conforme estudo feito na região.

Equ: é a parte do algoritmo que vai gerar o conjunto de equações de transferência ou equações de inversão, para cada dia estudado, com os resultados das simulações do SBDART (em 650 nm e em 2100 nm) e as equações de RC (Refletância Crítica) para cada modelo de aerossol.

A partir dos resultados de radiância e irradiância do SBDART o algoritmo calcula a refletância com a seguinte relação:

$$Re\ fletância = Radiância * \pi / Irradiância \quad (A-4)$$

As equações de inversão são geradas relacionando a AOD com a refletância no TOA em um polinômio de grau 3. Os resultados formam um conjunto de equações para 13 valores de AOD, 26 valores de albedo de superfície e 5 modelos de aerossol, gerados para o comprimento de onda de 650 e 2100 nm. Em 2100 nm o conjunto de equações é gerado somente para AOD=0.

Após a geração do conjunto de equações o algoritmo as interpola para os valores intermediários.

O passo seguinte do algoritmo é calcular a Refletância Crítica (RC) para cada albedo do aerossol.

A.3. Cálculo da Refletância Crítica – RC para cada modelo de aerossol

Com o conjunto de equações simulados no SBDART o algoritmo determina a relação entre a refletância do topo da atmosfera para um dia poluído com a refletância no topo para um dia limpo (AOD=0).

Esse processo é feito para cada um dos cinco modelos de aerossol e para cada modelo há um conjunto de retas. O ponto de intersecção de cada conjunto de retas com a reta 1:1 nos dá o valor da RC para cada modelo de aerossol.

Teoricamente, o valor de RC deveria ser o mesmo para todas as AODs geradas pelo mesmo tipo de aerossol, mas como experimentalmente isso não acontece, o algoritmo faz um ajuste entre os coeficientes angulares e lineares das retas a fim de se obter um valor de RC médio para cada modelo de aerossol.

Modelo SP: a última parte do algoritmo utiliza os resultados e simulações calculadas nos “passos” anteriores e os aplica para obter o resultado final, que é uma AOD média calculada ao redor de um ponto dentro da região estudada.

Primeiramente o modelo delimita os valores de refletância que serão usados, pela latitude e longitude. Determina a posição dos pontos e em qual área será calculada a AOD média e seleciona o número de pixels (V) que serão utilizados para calcular a RC (no nosso caso V=5).

Kaufman (1997) desenvolveu empiricamente uma razão entre as refletâncias de superfície no azul (em 0,47 μm) e no vermelho (em 0,66 μm) com relação à refletância no infravermelho próximo (2,1 μm), segundo a Equação A-5.

$$\rho_{\text{sup}}(0,66) = 0,5 * \rho_{\text{sup}}(2,1) \quad (\text{A-5})$$

O algoritmo é baseado na Equação A-5 para estimar a refletância da superfície em 650 nm a partir da refletância da superfície em 2100 nm. O fator 0,5 da Equação A-5 é variável de região para região (CASTANHO, 2007) e nesta pesquisa foram testados os valores de 0,55 e 0,60, sendo utilizado para os resultados o valor de 0,60 por fornecer melhores correlações.

O modelo faz um ajuste entre a refletância em 650 nm (dia poluído) x Refletância 650 nm (dia limpo - condição simulada no SBDART com AOD nula). Esse ajuste deve também satisfazer a condição de um coeficiente de correlação maior que 0,8, condição esta necessária para o cálculo da RC.

Através do valor da RC calculada, o modelo busca nos conjuntos de equações simuladas na parte do *Equ* qual a equação que corresponde a RC e, com isso, determina o modelo de aerossol para o conjunto de pixels estudado.

Após determinar o modelo de aerossol o algoritmo utiliza a equação de inversão simulada para o modelo de aerossol determinado, satisfazendo o valor medido de refletância no topo e o valor calculado de refletância de superfície e identifica a equação de inversão correspondente para se calcular a AOD.

A Figura A- 4, obtida de Castanho (2005), mostra um exemplo de equações obtidas para um modelo de aerossol, onde a partir da medida de refletância no TOA, conhecendo-se o valor da refletância de superfície, pode-se identificar o valor da AOD.

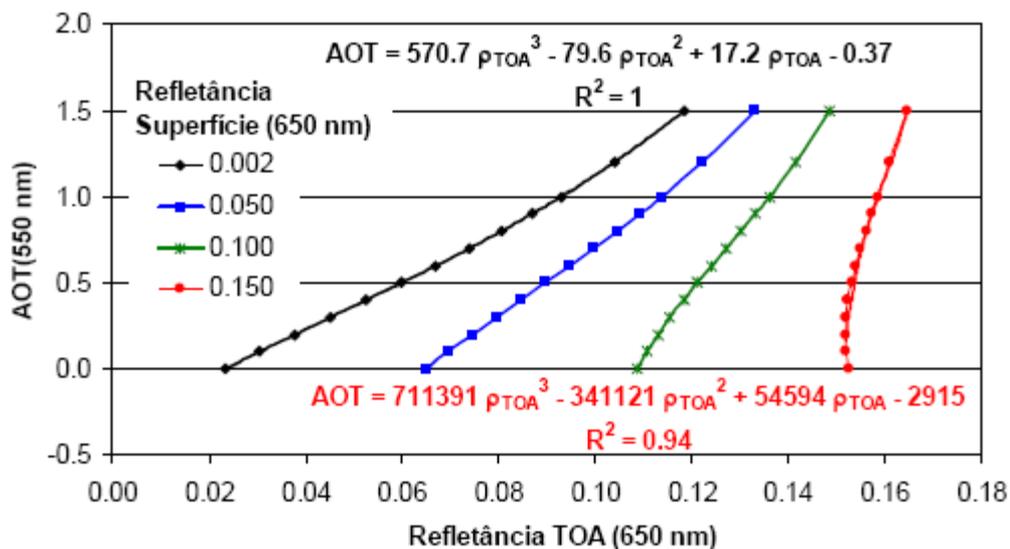


Figura A- 4: Equações de inversão da refletância no TOA em profundidade óptica (AOD), definidas para uma condição específica de posições angulares do Sol e do sensor, para o modelo de aerossol 3 e algumas refletâncias de superfície ($\rho_{sup}(650) = 0,002; 0,05; 0,1; 0,15$). Os cálculos das refletâncias no topo da atmosfera (650 nm) para diferentes τ_a (550 nm) foram realizados com o código de transferência radiativa SBDART. Fonte: Castanho (2005).