



# **Distribuição Espacial do Material Particulado na Atmosfera da Região Metropolitana do Rio de Janeiro via Sensoriamento Remoto**

**Moema Martins**

**Monografia em Engenharia Química**

**Orientadores**

**Prof<sup>ª</sup>. Aline Sarmiento Procópio, D.Sc.  
Prof. Marcelo Luiz Drumond Lanza, M.Sc.**

**Março de 2008**

# **DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO MATERIAL PARTICULADO NA ATMOSFERA DA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO VIA SENSORIAMENTO REMOTO**

*Moema Martins*

Monografia em Engenharia Química submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovada por:

---

José Ricardo de Almeida França, Ph.D.

---

Magali Christe Cammarota, D.Sc.

---

Rossana Odette Mattos Folly, D.Sc.

Orientada por:

---

Prof<sup>ª</sup>. Aline Sarmiento Procópio, D.Sc.

---

Prof. Marcelo Luiz Drumond Lanza, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2008

Martins, Moema.

Distribuição do material particulado na atmosfera da Região Metropolitana do Rio de Janeiro via sensoriamento remoto / Moema Martins. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2008.

xi, 55 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008.

Orientadores: Aline Sarmiento Procópio e Marcelo Luiz Drummond Lanza.

1. Material particulado. 2. Sensoriamento remoto. 3. Poluição atmosférica. 4.

Monografia (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Aline Sarmiento Procópio e Marcelo Luiz Drummond Lanza. I. Título.

**Aos meus pais,  
por todo o investimento e confiança em mim depositados.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Aline, pela confiança em meu trabalho, pela grande dedicação na orientação desta monografia e pela amizade.

Ao Professor Marcelo, cuja adesão a este projeto foi fundamental para o sucesso do mesmo.

À Andrea, pela disponibilidade e dedicação em solucionar infinitas dúvidas.

Ao Oliver e toda a turma do DEL, pela metamorfose do meu computador e as tardes no “frigorífico”.

Ao meu pai, meu primeiro leitor e o mais entusiasta em relação à minha carreira.

À minha mãe e minha irmã, pela companhia, pelo exemplo de dedicação aos estudos, e pela ajuda nos momentos difíceis.

Ao Arthur, pelo apoio e pela compreensão nesses últimos anos de graduação, em especial, nestes últimos meses.

À Professora Renata, minha amiga, que me iniciou na carreira científica.

Aos meus colegas da pós, pelas conversas científicas e não científicas nos últimos anos, e pela amizade.

Aos meus colegas e professores da graduação, que compartilharam comigo esses últimos anos e tanto cresceram à minha formação profissional e pessoal.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO MATERIAL PARTICULADO NA  
ATMOSFERA DA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO VIA  
SENSORIAMENTO REMOTO**

Moema Martins

Março, 2008

Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Aline Sarmiento Procópio, D.Sc.

Prof. Marcelo Luiz Drummond Lanza, M.Sc.

A poluição do ar vem sendo apontada pela comunidade científica como o principal agente de degradação ambiental do planeta. O material particulado (MP) proveniente da emissão de poluentes atmosféricos por veículos e indústrias é danoso à saúde humana, pode ser causador de deposição ácida e pode alterar a microfísica das nuvens, alterando a frequência e a intensidade de chuvas, além de afetar o balanço radiativo do planeta. A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) possui a segunda maior concentração de população, veículos e indústrias do país, sofrendo de problemas crônicos de poluição do ar. Segundo a FEEMA, as concentrações de MP ainda superam os limites padrões na maioria da região. O MP possui propriedades ópticas e interage com a radiação solar em uma determinada faixa de comprimento de onda. Informações de refletância no topo da superfície com resolução de 1 km foram obtidas pelo sensor MODIS, localizado na plataforma satélite EOS-Terra operada pela NASA/GSFC. A partir da adaptação de uma metodologia para a obtenção da espessura óptica de aerossol com resolução espacial de 1 km e das propriedades ópticas das partículas da Região Metropolitana de São Paulo obtidas em trabalho anterior, foram produzidos mapas com a distribuição espacial do MP na RMRJ. Este estudo vem complementar as informações obtidas *in situ* pela FEEMA, propiciando a visualização de fontes de emissão e locais de estagnação de poluentes. Desta forma, pretende-se colaborar para o controle da poluição atmosférica da RMRJ, auxiliando no planejamento da expansão da região e identificando áreas prioritárias para os trabalhos de mitigação das emissões.

## ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vi
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xi
Capítulo I. Introdução.....	1
I.1. A Poluição Atmosférica.....	1
I.2. Os Poluentes Atmosféricos.....	1
I.2.1. O Material Particulado.....	3
I.3. As Fontes de Poluição Atmosférica .....	3
I.4. A Região Metropolitana do Rio de Janeiro.....	4
I.4.1. Emissões de Poluentes Atmosféricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.....	5
I.5. O Monitoramento da Qualidade do Ar.....	8
I.5.1. A Rede de Monitoramento da FEEMA.....	8
I.5.1.1. A Qualidade do Ar da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.....	10
I.5.2. O Monitoramento via Sensoriamento Remoto.....	12
Capítulo II. Objetivos.....	15
Capítulo III. Fundamentação Teórica.....	16
III.1. A Radiação Eletromagnética.....	16
III.2. A Interação entre a Radiação Solar e os Componentes da Atmosfera.....	17
III.2.1. As Propriedades Ópticas das Partículas de Aerossol.....	19
III.2.2. O Sensoriamento Remoto dos Aerossóis.....	21
Capítulo IV. Instrumentação e Métodos.....	24
IV.1. O MODIS – <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i> .....	24

IV.1.1. As Características dos Produtos do MODIS.....	26
IV.1.2. A Obtenção dos Produtos do MODIS.....	28
IV.2. O SBDART – <i>Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer</i>	31
IV.3. O Algoritmo de Obtenção da Espessura Óptica de Aerossol com 1 km de Resolução Espacial.....	34
Capítulo V. Resultados e Discussão.....	37
Capítulo VI. Conclusões .....	45
VI.1. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	45
Referências Bibliográficas.....	47
Apêndice A: Tabelas utilizadas para elaboração dos gráficos do item I.V.I.....	50
Apêndice B: Propriedades ópticas espectrais dos aerossóis da Região Metropolitana de São Paulo (Extraído de Castanho, 2005).....	52
Apêndice C: Resumo aceito no simpósio internacional IRS2008 - International Radiation Symposium/2008.....	57



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1: Fotografia da cidade do Rio de Janeiro (UniverCidade, 2008).....	4
Figura I.2: Bacias aéreas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (FEEMA, 2004).....	5
Figura I.3: Localização das fontes fixas inventariadas (FEEMA, 2004).....	6
Figura I.4: Traçado das principais vias de tráfego inventariadas (FEEMA, 2004)..	6
Figura I.5: (a) Total de emissões por tipo de fonte e (b) emissão de MP <sub>10</sub> por tipo de fonte (Elaborado a partir de dados da FEEMA, 2004).....	7
Figura I.6: (a) Total de emissões por tipologia industrial e (b) emissão de MP <sub>10</sub> por tipologia industrial (Elaborado a partir de dados da FEEMA, 2004).....	7
Figura I.7: (a) Total de emissões por via de tráfego e (b) emissão de MP <sub>10</sub> por via de tráfego (Elaborado a partir de dados da FEEMA, 2004).....	8
Figura I.8: Distribuição espacial das estações de monitoramento da qualidade do ar na RMRJ (FEEMA, 2007c).....	9
Figura I.9: Concentrações médias anuais de particulado total em suspensão obtidas pela rede manual de monitoramento da FEEMA (FEEMA, 2007a).	11
Figura I.10: Concentrações médias anuais de particulado inalável obtidas pela rede manual de monitoramento da FEEMA (FEEMA, 2007a).....	11
Figura I.11: Localização das estações manuais de monitoramento da FEEMA onde os limites padrão anuais de PTS e PI foram ultrapassados em 2006 (Elaborado a partir de dados da FEEMA, 2007a).....	12
Figura I.12: Espessura óptica de aerossol média, com resolução de 1° x 1°, para o mês de agosto de 2007 em todo mundo, obtida pelo sensor MODIS localizado na plataforma satélite EOS-Terra. (NASA, 2008a).....	13
Figura I.13: Plataforma EOS-Terra, operada pela NASA/GFSC (NASA, 2008b)....	14
Figura III.1: O espectro eletromagnético (NASA, 2008c).....	16
Figura III.2: Irradiância solar no topo da atmosfera (em azul) e ao nível do mar (em amarelo). Estão indicadas também algumas bandas de absorção do ozônio, oxigênio, dióxido de carbono e água, além de algumas bandas de observação do MODIS. (Adaptado de NASA, 2006).....	17
Figura III.3: O espalhamento Rayleigh e o espalhamento Mie.....	18

Figura III.4: Distribuição angular da radiação espalhada para: (a) partículas muito pequenas em relação ao comprimento de onda da radiação incidente; (b) partículas maiores que (a) e; (c) partículas muito maiores que em (b). (Adaptado de Liou, 1980).....	19
Figura III.5: A radiação emergente no topo da atmosfera ( $L_{TOA}(\lambda)$ ) é resultado da interação entre a radiação incidente ( $F_o(\lambda)$ ) e os componentes da atmosfera. A refletância no topo da atmosfera ( $\rho_{TOA}$ ) é resultado da refletância da superfície ( $\rho_{SUP}$ ), transmitância da atmosfera na descida ( $T_D$ ) e na subida ( $T_S$ ), e refletância direta da atmosfera ( $\rho_o$ ) (Elaborado a partir de Castanho, 2005) .....	22
Figura IV.1: Órbita polar: a cada órbita sucessiva o satélite varre uma faixa mais a oeste. (UW-Stout, 2008).....	24
Figura IV.2: Arquitetura de processamento dos produtos do MODIS com seus níveis (Elaborado a partir de Parkinson e Greenstone, 2000 apud King, 2003).....	27
Figura IV.3: Website do MODIS, onde são selecionados dias e horas de interesse (NASA, 2008e).....	28
Figura IV.4: Trajetória da plataforma satélite EOS-Terra, para o dia 24 de fevereiro de 2007 (NASA, 2008e).....	29
Figura IV.5: Imagem em cores reais obtida no website do MODIS para o dia 24 de fevereiro de 2007 (NASA, 2008e).....	30
Figura IV.6: Website da NASA, <i>Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS)</i> , onde podem ser obtidos os arquivos *.hdf nos três níveis de processamento (NASA, 2008f).....	31
Figura IV.7: configuração default para o input do SBDART (ICESS, 2008).....	32
Figura IV.8: Espessura óptica de aerossol (AOT) em 550 nm em função da refletância no topo da superfície em 650 nm. Valores calculados pelo SBDART para um determinado modelo de aerossol, ângulos zenitais solar e do sensor, ângulo azimutal entre ambos, e três refletâncias de superfície.....	34
Figura IV.9: Esquema do funcionamento do algoritmo utilizado neste trabalho.....	35
Figura V.1: Imagens em cores reais obtidas no website do MODIS para os dias (a) 05 de fevereiro, (b) 10 de março, (c) 25 de julho, (d) 16 de agosto (adaptado de NASA, 2008e).....	38
Figura V.2: Imagens de espessura óptica de aerossol em 550 nm (AOT) com resolução espacial de 10 km, obtidas para os dias (a) 05 de fevereiro, (b) 10 de março, (c) 25 de julho, (d) 16 de agosto, para a RMRJ.....	39

Figura V.3: Imagens de espessura óptica de aerossol em 550 nm (AOT) com resolução espacial de 1 km, obtidas para os dias (a) 05 de fevereiro, (b) 10 de março, (c) 25 de julho e (d) 16 de agosto, para a RMRJ.....	40
Figura V.4: Imagem de satélite da RMRJ, seus municípios, com exceção de Mesquita (que fica entre Nova Iguaçu e Nilópolis), e o traçado de suas principais vias de tráfego (adaptada de Google Maps, 2008).....	43
Figura V.5: Distribuição espacial das principais indústrias com alto potencial poluidor da Bacia Aérea III e suas adjacências (Oliveira, 2004).....	43

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela I.1: Principais poluentes atmosféricos, fontes de emissão e efeitos à saúde (Tabela adaptada de FEEMA, 2007).....	2
Tabela I.2: Listagem das estações e parâmetros monitorados. (Tabela adaptada de FEEMA, 2008b).....	9
Tabela IV.1: Bandas espectrais do MODIS, principais usos e resolução espacial (NASA, 2008d).....	25

## **Capítulo I. Introdução**

### ***1.1. A Poluição Atmosférica***

A poluição do ar vem sendo apontada pela comunidade científica como o principal agente de degradação ambiental do planeta. As mudanças climáticas ocorridas nas últimas décadas estão sendo atribuídas ao aumento das emissões de poluentes na atmosfera oriundos das atividades humanas, em níveis capazes de provocar alterações em escala mundial.

De forma geral, a poluição do ar pode ser definida como a alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas normais da atmosfera que possa causar prejuízos reais ou potenciais à saúde humana, à flora, à fauna, aos ecossistemas em geral, aos materiais e à propriedade, ou afetar as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente, as atividades normais da população ou o seu bem-estar (Brasil, 1981).

A qualidade do ar é definida pela interação entre as fontes de poluição e a atmosfera. A capacidade de dispersão dos poluentes atmosféricos varia de acordo com a topografia local e condições meteorológicas como temperatura, umidade, direção e velocidade dos ventos. Condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão de poluentes podem acarretar em uma piora da qualidade do ar sem que o nível de emissões varie, como ocorre durante o inverno (FEEMA, 2008a).

### ***1.2. Os Poluentes Atmosféricos***

Os poluentes atmosféricos são definidos pela Resolução CONAMA nº. 003 de 1990 como:

*“(...) 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:*

*I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;*

*II - inconveniente ao bem-estar público;*

*III - danoso aos materiais, à fauna e flora.*

*IV - prejudicial à segurança. ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.”*

Uma primeira classificação dos poluentes encontrados na atmosfera divide-os de acordo com sua origem em poluentes primários, que são emitidos diretamente

pelas fontes, e poluentes secundários, que são produto de reações entre o poluente emitido e outro material, podendo este ser um componente natural da atmosfera ou outro poluente.

Os principais poluentes atmosféricos são: o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), o monóxido de carbono (CO), o ozônio (O<sub>3</sub>), os hidrocarbonetos (HC), os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), a amônia (NH<sub>3</sub>), os compostos orgânicos voláteis (COV) e o material particulado (MP) em suspensão no ar.

A Tabela I.1 apresenta um resumo dos principais poluentes atmosféricos, com suas respectivas origens e efeitos à saúde.

*Tabela I.1: Principais poluentes atmosféricos, fontes de emissão e efeitos à saúde. (Tabela adaptada de FEEMA, 2007).*

<b>Poluentes</b>	<b>Fontes de Emissão</b>	<b>Efeitos à Saúde</b>
<b>Partículas em suspensão (MP)</b>	Combustão incompleta originada da indústria, motores à combustão, queimadas e poeiras diversas.	Interfere no sistema respiratório, pode afetar os pulmões e todo o organismo.
<b>Dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>)</b>	Queima de combustíveis fósseis que contenham enxofre, como óleo combustível, carvão mineral e óleo diesel.	Ação irritante nas vias respiratórias, o que provoca tosse e até falta de ar. Agrava os sintomas da asma e da bronquite crônica. Afeta, ainda, outros órgãos sensoriais.
<b>Óxidos de nitrogênio (NO<sub>2</sub> e NO)</b>	Queima de combustíveis em altas temperaturas em veículos, aviões, fornos e incineradores.	Agem sobre o sistema respiratório, podendo causar irritações e, em altas concentrações, problemas respiratórios e edema pulmonar.
<b>Monóxido de carbono (CO)</b>	Combustão incompleta de materiais que contenham carbono, como derivados de petróleo e carvão.	Provoca dificuldades respiratórias e asfixia. É perigoso para aqueles que têm problemas cardíacos e pulmonares.
<b>Ozônio (O<sub>3</sub>)</b>	Não é um poluente emitido diretamente pelas fontes, mas formado na atmosfera através da reação entre os compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio em presença de luz solar.	Irritação nos olhos e nas vias respiratórias, agravando doenças pré-existentes, como asma e bronquite, reduzindo as funções pulmonares.

### ***1.2.1. O Material Particulado***

O material particulado em suspensão no ar (MP), também chamado aerossol, consiste em sólidos ou líquidos (com exceção da água pura) com diâmetros inferiores a 100 µm. O MP possui composição química heterogênea, podendo conter: compostos orgânicos, *black carbon* (ou negro de fumo), sulfatos, nitratos, amônia, sal marinho, elementos oriundos de ressuspensão de solo (Al, Si, Ca, Mn, Fe, etc.) e metais pesados de origem industrial (Pb, Zn, Cu, Ni, Cd, Cr, etc.). Alguns desses componentes têm caráter mutagênico e cancerígeno (Castanho, 2005).

O material particulado inalável (MP<sub>10</sub> ou PI) é a fração do material particulado total que possui diâmetro inferior a 10 µm. O MP<sub>10</sub> é especialmente nocivo à saúde, pois pode penetrar mais profundamente no aparelho respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares e acumulando-se nos pulmões.

Além de prejudiciais à saúde, aerossóis de composição ácida contribuem para a ocorrência de deposição ácida, causando a degradação de monumentos e edificações e a destruição de vegetação e lavouras.

Ao contrário dos gases de efeito estufa, o material particulado em suspensão tem, em geral, efeito de redução na temperatura da superfície, pois diminui a radiação incidente através do espalhamento e da absorção da mesma (Castanho, 2005). O MP em suspensão pode também provocar alteração no perfil vertical de temperatura da atmosfera ao absorver a radiação, aumentando sua temperatura. Ao diminuir a temperatura da superfície e aumentar a temperatura da atmosfera, o MP aumenta sua estabilidade e diminui sua capacidade de dispersão de poluentes. Além disso, o MP também interfere no balanço radiativo do planeta e na intensidade e frequência de chuvas. Atuando como núcleo de condensação de nuvens, ele aumenta o número de gotas e diminui seu tamanho médio, reduzindo a eficiência de precipitação que removeria o MP em suspensão na atmosfera (Kaufman, 2002).

### ***1.3. As Fontes de Poluição Atmosférica***

Apesar de a atividade humana ser a principal causa da poluição atmosférica em grandes centros urbanos, há também as fontes naturais que contribuem para a emissão de poluentes no planeta. Os processos naturais de emissão são caracterizados pelas atividades de vulcões, do mar, da poeira cósmica, do arraste eólico, tempestades, pólen, etc.

As fontes de poluição antropogênica são divididas em dois grandes grupos: fontes móveis e fontes estacionárias. As fontes móveis são compostas pelos meios de transporte aéreo, marítimo e terrestre, com destaque para os veículos automotores por seu grande número e concentração nas áreas urbanas. As fontes estacionárias mais representativas das áreas urbanas são as indústrias, mas também se incluem neste grupo as queimadas, lavanderias, padarias, hotéis e hospitais.

#### ***1.4. A Região Metropolitana do Rio de Janeiro***

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) é composta por 17 municípios e concentra 80% da população do Estado em aproximadamente 15% de sua área total. Com uma população de mais de 11 milhões de pessoas, a RMRJ apresenta a maior densidade demográfica dentre as regiões metropolitanas do país, além do maior grau de urbanização, quase 97%, e é responsável pela geração de cerca de 80% da renda interna do Estado e de 13% da nacional (FEEMA, 2007).

Por possuir a segunda maior concentração de veículos, indústrias e outras fontes emissoras de poluentes do país, a RMRJ apresenta problemas crônicos de poluição do ar. Esses fatores são agravados pelas características físicas da região, sendo estas a topografia acidentada, a influência do mar, o clima tropical e a intensa ocupação do solo. A Figura I.1 apresenta uma fotografia da cidade do Rio de Janeiro. Pode-se observar uma camada de poluentes próxima à superfície.



*Figura I.1: Fotografia da cidade do Rio de Janeiro. (UniverCidade, 2008)*

Apesar de a brisa marítima e as canalizações de ar decorrentes da topografia contribuírem para a eficiência na dispersão de poluentes em vários pontos da região, as áreas situadas mais para o interior encontram nos maciços paralelos à orla marítima verdadeiras barreiras físicas a esses ventos. Além disso, as temperaturas elevadas e a



intensidade da radiação solar incidente favorecem os processos fotoquímicos e outras reações na atmosfera, gerando poluentes secundários (FEEMA, 2007).

A RMRJ é usualmente analisada em quatro sub-regiões denominadas Bacias Aéreas, que são áreas homogêneas em termos dos mecanismos responsáveis pela dispersão de poluentes do ar. A homogeneidade de dispersão reside em características de relevo, climatológicas e de cobertura do solo. As Bacias Aéreas são delimitadas pela topografia e pelos espaços aéreos vertical e horizontal, como apresentado na Figura I.2 (FEEMA, 2004).



*Figura I.2: Bacias aéreas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (FEEMA, 2004)*

- Bacia Aérea I – inserida na Bacia Hidrográfica da Baía de Sepetiba, localiza-se na Zona Oeste da Região Metropolitana e possui cerca de 730 km<sup>2</sup> de área.
- Bacia Aérea II – localizada no município do Rio de Janeiro, envolve as regiões administrativas de Jacarepaguá e Barra da Tijuca, possuindo cerca de 140 km<sup>2</sup> de área.
- Bacia Aérea III – compreende as Zonas Norte e Centro do Município do Rio de Janeiro e os municípios da Baixada Fluminense, com exceção de Queimados (Duque de Caxias, Nova Iguaçu, São João de Meriti, Nilópolis, Belford Roxo e Mesquita), ocupando uma área de cerca de 700 km<sup>2</sup>.
- Bacia Aérea IV – localizada a leste da Baía de Guanabara, possui uma área de cerca de 830 km<sup>2</sup>.

#### ***1.4.1. Emissões de Poluentes Atmosféricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro***

O Inventário de Fontes Emissoras de Poluentes Atmosféricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro é um estudo realizado pela FEEMA e concluído em

maio de 2004. Neste trabalho, foram analisadas as principais fontes fixas e fontes móveis da região, num total de 425 empresas e 186 vias de tráfego. Foram descartadas as fontes fixas de pequeno porte, as de baixo potencial poluidor, as queimadas naturais e antropogênicas, a queima de lixo doméstico, a suspensão de MP proveniente de encostas degradadas, e as vias de tráfego não pavimentadas – cuja emissão de particulado é significativa na RMRJ. As Figuras I.3 e I.4 apresentam disposição das fontes fixas e o traçado das vias de tráfego inventariadas.



*Figura I.3: Localização das fontes fixas inventariadas, representadas pelos pontos em vermelho (FEEMA, 2004).*



*Figura I.4: Traçado das principais vias de tráfego inventariadas, em vermelho. (FEEMA, 2004)*

Ao contrário do que comumente se imagina, as fontes móveis são responsáveis pela maior parte das emissões totais de poluentes para a atmosfera. Isto se deve, especialmente, à grande quantidade de monóxido de carbono (CO) emitida pelos veículos. No entanto, em relação à emissão de particulados, a distribuição resultante é mais equilibrada e as fontes fixas são as maiores contribuintes. Vale lembrar que as vias não pavimentadas não foram inventariadas. A emissão de poluentes proveniente de fontes fixas e móveis é apresentada nas Figuras I.5(a) e I.5(b).

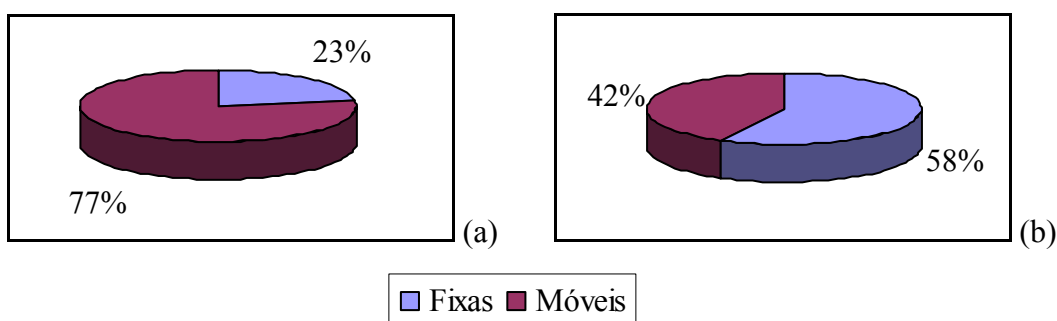


Figura I.5: (a) Total de emissões por tipo de fonte e (b) emissão de MP<sub>10</sub> por tipo de fonte (Elaborado a partir de dados da FEEMA, 2004).

As emissões provenientes de fontes fixas foram analisadas pelo tipo de indústria. As indústrias petroquímica e de geração de energia destacam-se como as grandes poluidoras dentre as fontes inventariadas, apresentando valores altíssimos de emissões em geral e de material particulado em especial, como mostram as Figuras I.6(a) e I.6(b).

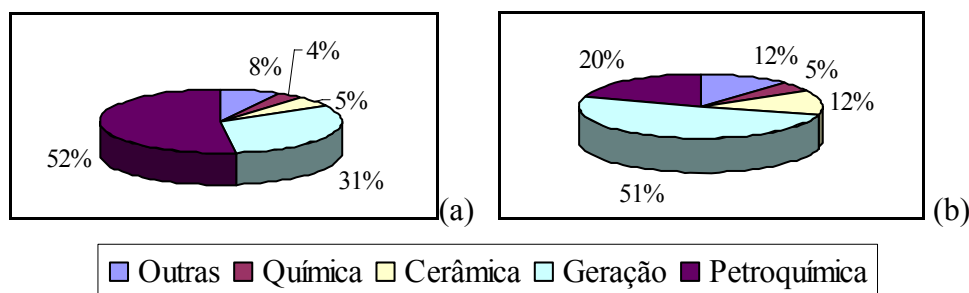


Figura I.6: (a) Total de emissões por tipologia industrial e (b) emissão de MP<sub>10</sub> por tipologia industrial (Elaborado a partir de dados da FEEMA, 2004).

A contribuição das fontes móveis foi avaliada considerando-se o fluxo de veículos leves e pesados, a velocidade média dos veículos, as características espaciais das vias e fatores médios de emissão para classes de veículos automotores

provenientes do Inventário de Emissões Veiculares da FEEMA (FEEMA, 2004). Analisando os resultados, observa-se que na Avenida Brasil são emitidos quase 30% do total de emissões por fontes móveis. Este resultado é coerente, tendo em vista que a via possui o maior volume de tráfego da Região. As Figuras I.7(a) e I.7(b) ilustram parte dos resultados do inventário.

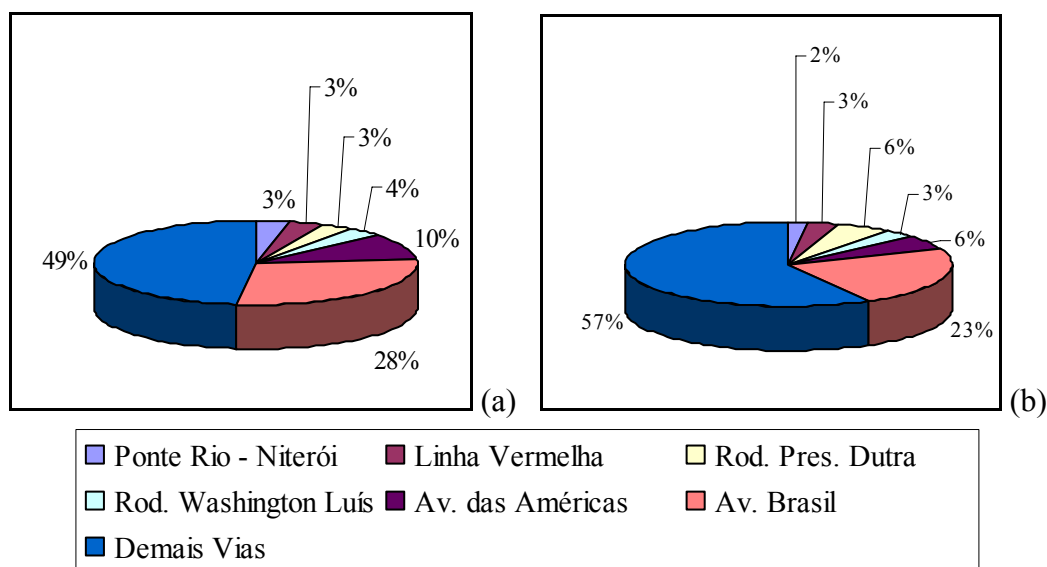


Figura I.7: (a) Total de emissões por via de tráfego e (b) emissão de MP<sub>10</sub> por via de tráfego (Elaborado a partir de dados da FEEMA, 2004).

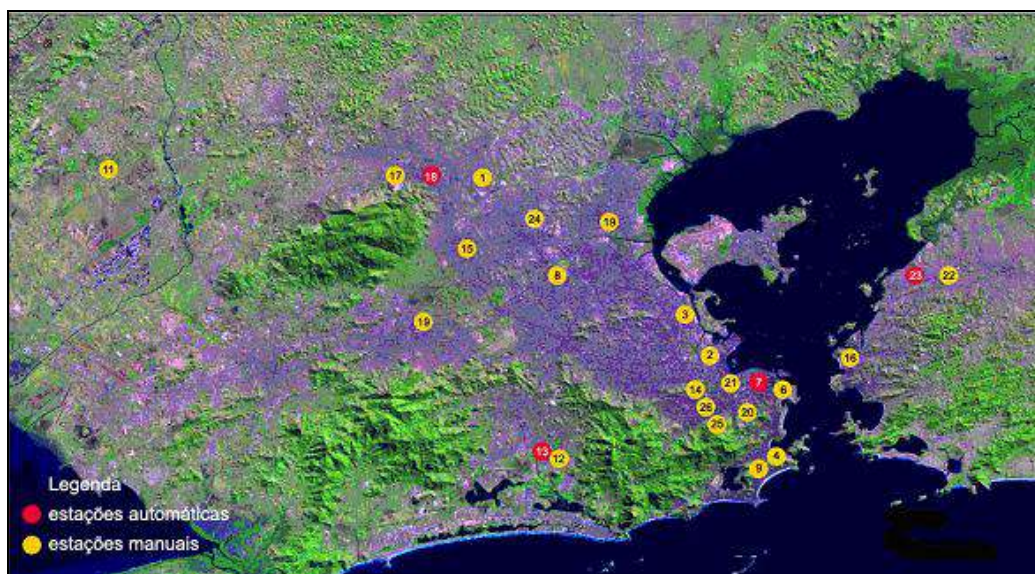
As tabelas de dados utilizadas na elaboração dos gráficos deste item encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

## 1.5. O Monitoramento da Qualidade do Ar

### 1.5.1. A Rede de Monitoramento da FEEMA

A FEEMA possui uma rede de monitoramento da qualidade do ar composta por quatro estações automáticas e vinte e duas estações manuais localizadas em pontos fixos da RMRJ, como mostra a Figura I.8.

Nota-se que a grande maioria das estações encontra-se na Bacia Aérea III, no centro da RMRJ. A Bacia Aérea I, mais à esquerda, possui apenas duas estações manuais; a Bacia II, abaixo, uma estação manual e uma automática; e a Bacia IV, à direita, duas manuais e uma automática, contra um total de dezessete estações manuais e duas automáticas para a Bacia III.



*Figura I.8: Distribuição espacial das estações de monitoramento da qualidade do ar na RMRJ (FEEMA, 2008b).*

As estações automáticas efetuam o monitoramento de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), ozônio (O<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e material particulado inalável (PI), além dos parâmetros meteorológicos (M) de direção e velocidade dos ventos, temperatura e umidade. As estações manuais monitoram apenas os particulados, podendo ou não fazer distinção entre partículas totais (PTS) e partículas inaláveis. Na Tabela I.2 encontram-se listadas as estações e seus respectivos parâmetros monitorados.

*Tabela I.2: Listagem das estações e parâmetros monitorados. (FEEMA, 2008b)*

Estação	Parâmetros Monitorados							
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	CO	HC	PI	PTS	M
Belford Roxo							X	
Benfica							X	
Bonsucesso						X	X	
Botafogo						X		
Centro						X	X	
Centro Automática	X	X	X	X	X	X		X
Coelho Neto							X	
Copacabana						X	X	
Duque de Caxias						X	X	
Engenho da Rainha							X	
Itaguaí						X	X	

Tabela I.2 (continuação): Listagem das estações e parâmetros monitorados. (FEEMA, 2008b)

Estação	Parâmetros Monitorados							
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	CO	HC	PI	PTS	M
Jacarepaguá						X	X	
Jacarepaguá Automática	X	X	X	X	X	X		X
Maracanã						X	X	
Nilópolis						X		
Niterói						X		
Nova Iguaçu						X		
Nova Iguaçu Automática	X	X	X	X	X	X		X
Realengo							X	
Santa Tereza							X	
São Cristóvão						X	X	
São Gonçalo						X	X	
São Gonçalo Automática	X	X	X	X	X	X		X
São João de Meriti						X	X	
Sumaré						X	X	
Tijuca							X	

#### ***1.5.1.1. A Qualidade do Ar na Região Metropolitana do Rio de Janeiro***

De acordo com o último Relatório Anual de Qualidade do Ar realizado pela FEEMA, baseado no monitoramento efetuado em 2006 e publicado em agosto de 2007, o poluente cuja concentração supera com maior frequência os limites padrões fixados pelo CONAMA é o material particulado inalável. Dentre os poluentes gasosos, apenas o ozônio teve concentrações acima do limite padrão.

A Figura I.9 mostra a concentração média anual de particulado total em suspensão (PTS) em várias estações da rede manual de monitoramento da FEEMA. A linha em vermelho indica o limite padrão de concentração média anual, 80 µg/m<sup>3</sup>. Pode-se observar que metade das médias obtidas apresenta valores acima do limite padrão anual.

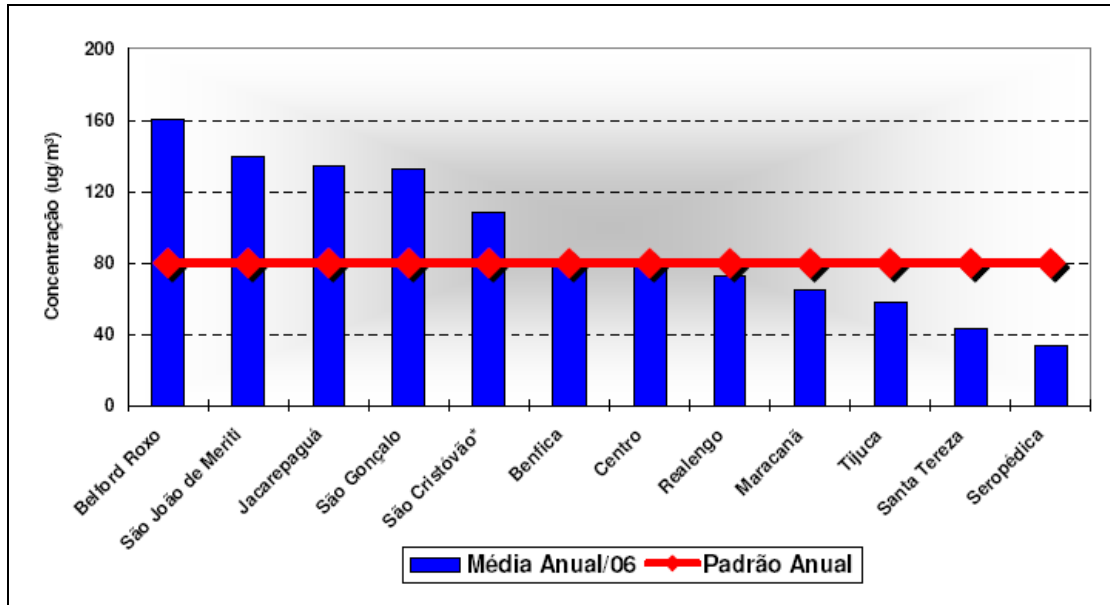


Figura I.9: Concentrações médias anuais de particulado total em suspensão obtidas pela rede manual de monitoramento da FEEMA (FEEMA, 2007)

Para o particulado inalável (PI), as concentrações médias anuais obtidas ultrapassaram o limite padrão anual em mais da metade das áreas monitoradas, como apresentado na Figura I.10. A linha em vermelho corresponde ao limite padrão anual, fixado em 50 µg/m<sup>3</sup>.

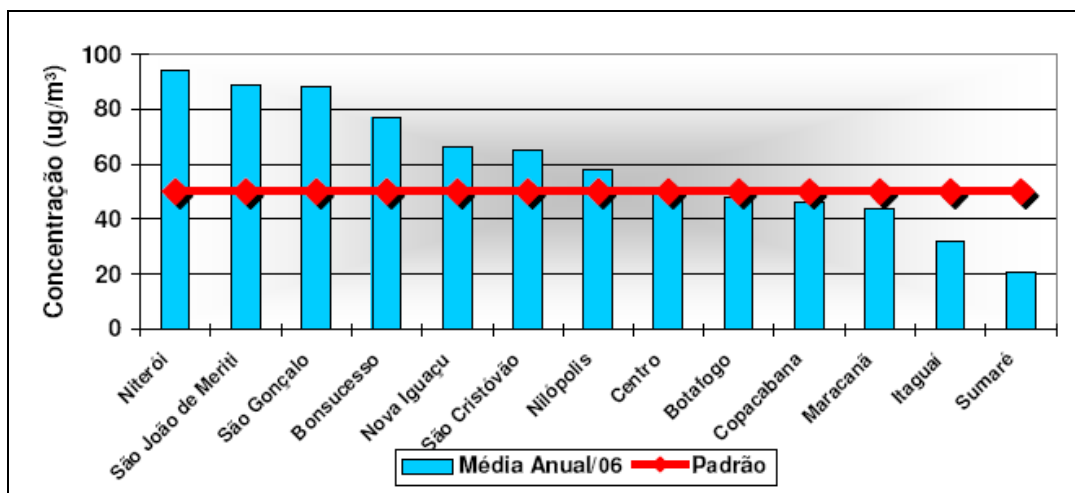
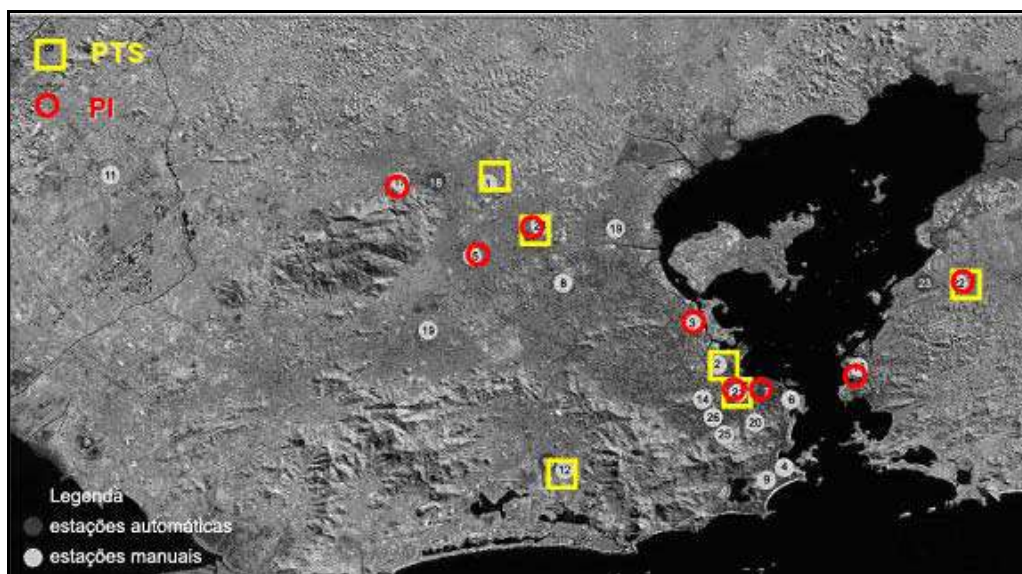


Figura I.10: Concentrações médias anuais de particulado inalável obtidas pela rede manual de monitoramento da FEEMA. (FEEMA, 2007)

A Figura I.11 foi elaborada para facilitar a visualização da localização das estações de monitoramento onde os limites padrões anuais de PTS e PI foram ultrapassados.



*Figura I.11: Localização das estações manuais de monitoramento da FEEMA onde os limites padrões anuais de PTS e PI foram ultrapassados em 2006 (Elaborado a partir de dados da FEEMA, 2007).*

Pode-se observar a partir desta Figura, que seis dos oito pontos em que o padrão anual de PI foi ultrapassado encontram-se na Bacia Aérea III e os outros dois, na Bacia Aérea IV. Vale lembrar também que há apenas uma estação de monitoramento na Bacia Aérea I. Quanto ao PTS, os resultados correspondem a quatro na Bacia Aérea III, uma na II e uma na IV, de um total de seis ultrapassagens.

### ***1.5.2. O Monitoramento via Sensoriamento Remoto***

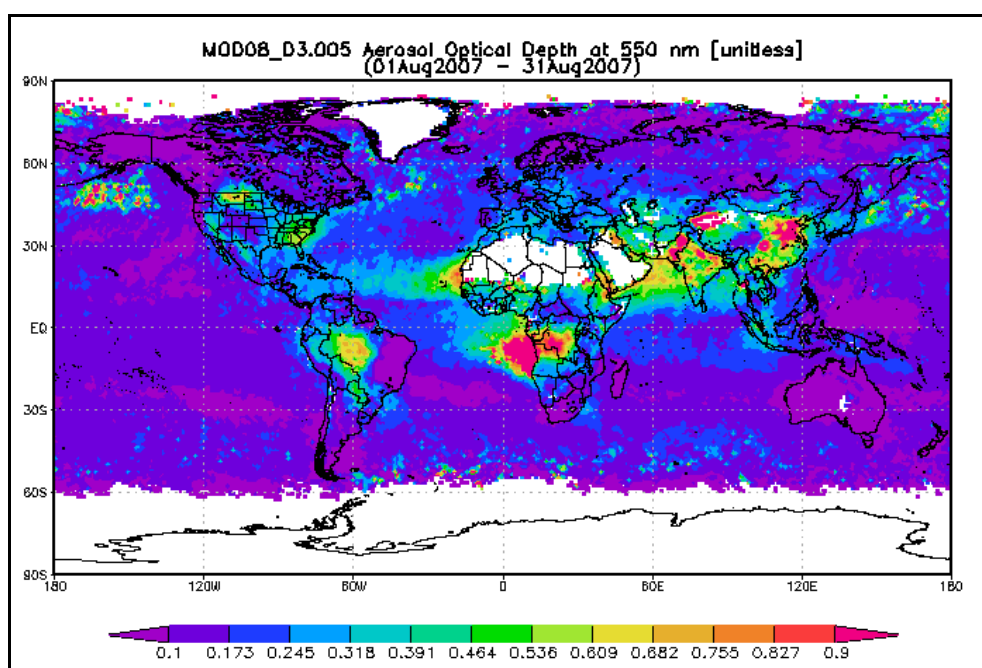
Assim como os gases, as partículas de aerossol presentes na atmosfera possuem propriedades ópticas que variam de acordo com sua composição e tamanho, podendo absorver, refletir e espalhar radiação incidente em diferentes proporções. Desta forma, a radiação que chega à superfície da Terra resulta da interação da energia radiante do Sol com as partículas e moléculas gasosas que se encontram em seu caminho. Analogamente, a energia refletida pela Terra que chega ao topo da atmosfera é resultado da energia solar que interagiu com a atmosfera na ida e na volta e com a própria superfície terrestre.

O sensoriamento remoto do material particulado presente na atmosfera pode ser realizado a partir da superfície terrestre – com a utilização de radiômetros solares, de fora da atmosfera – através de sensores localizados em satélites, ou em altitudes



próximas à superfície – com sensores a bordo de aviões (Castanho, 2005). Este sensoriamento é dito passivo, pois nenhuma radiação é emitida pelo satélite.

A Figura I.12 apresenta a distribuição espacial média do material particulado para o mês de agosto de 2007 em todo o mundo, com resolução de 1° x 1°, obtida pelo sensor MODIS localizado na plataforma satélite *Earth Observing System – Terra* (ilustrado na Figura I.13). As cores quentes equivalem a valores maiores de espessura óptica de aerossol e as frias equivalem a valores menores. Nas regiões em branco, não foi possível obter informação.



*Figura I.12: Espessura óptica de aerossol média, com resolução de 1° x 1°, para o mês de agosto de 2007 em todo mundo, obtida pelo sensor MODIS localizado na plataforma satélite EOS-Terra (NASA, 2008a).*

Na imagem anterior, pode-se observar a concentração de material particulado gerado pelas queimadas na região amazônica e na África, assim como o movimento das plumas em dispersão. Pode-se também observar uma grande concentração de particulados sobre o oceano na costa oeste da África. Esta alta concentração é resultado da convergência entre duas correntes globais de circulação atmosférica, levando os poluentes oriundos das queimadas amazônicas até costa africana.



*Figura I.13: Plataforma EOS-Terra, operada pela NASA/GFSC. (NASA, 2008b)*

## Capítulo II. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é fazer um mapeamento da distribuição espacial do material particulado na atmosfera da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), utilizando dados obtidos via sensoriamento remoto pela NASA/GSFC. Os mapas produzidos terão resolução espacial de 1 km e informação de *espessura óptica de aerossol* – propriedade que se relaciona de forma proporcional à concentração de particulados na atmosfera.

Espera-se com esses mapas visualizar fontes de emissão e locais de estagnação de poluentes, complementando as informações obtidas *in situ* fornecidas pela FEEMA.

Para realizar tal objetivo, faz-se necessário o estudo do *software* SBDART (*Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer*), que resolve as equações de transferência radiativa na atmosfera, e do algoritmo para obtenção da espessura óptica de aerossol com resolução de 1 km, que compreende um conjunto de programas desenvolvidos em Matlab por Castanho (2005).

Este estudo pretende colaborar para o controle da poluição atmosférica da RMRJ, auxiliando no planejamento da expansão da região e indicando áreas prioritárias para os trabalhos de mitigação das emissões nocivas à qualidade do ar.

## Capítulo III. Fundamentação Teórica

### III.1. A Radiação Eletromagnética

A radiação eletromagnética é o processo de transporte de energia através do espaço, preenchido ou não por matéria, por meio de ondas eletromagnéticas. Por possuir característica direcional e espectral, a grandeza da radiação eletromagnética varia de acordo com a direção e o comprimento de onda.

O espectro eletromagnético foi dividido em sub-regiões com faixas de comprimento de onda definidas. Em ordem crescente de comprimento de onda e decrescente de frequência, temos os raios cósmicos, os raios gama, os raios-x, o ultravioleta, o visível, o infravermelho próximo, o infravermelho térmico, as microondas e as ondas de rádio (Procópio, 2005), como ilustrado na Figura III.1.

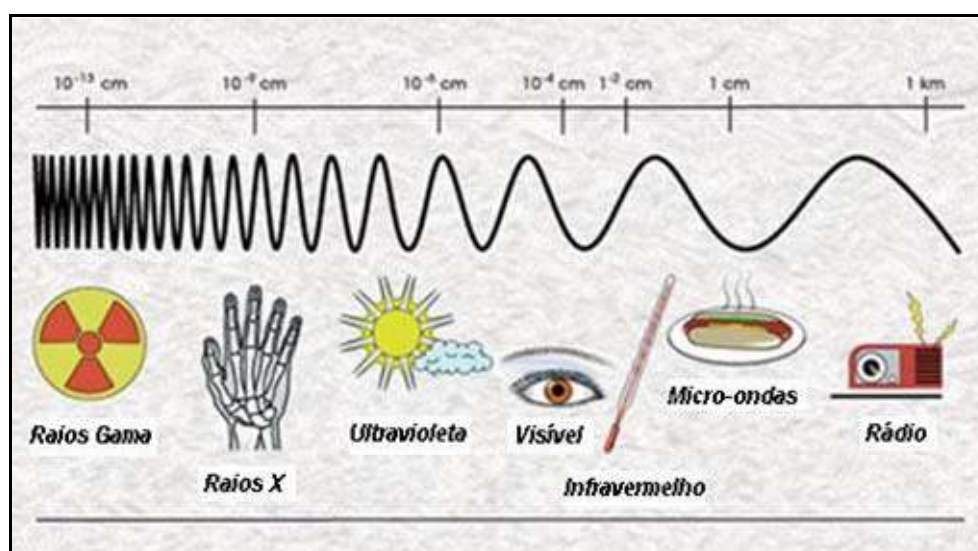


Figura III.1: O espectro eletromagnético (adaptado de NASA, 2008c).

Toda matéria, em qualquer estado físico, emite radiação de acordo com sua temperatura. Tal emissão é resultante de oscilações e transições dos elétrons e, portanto, se relaciona com o grau de excitação no interior da matéria – a energia interna. O corpo negro é uma superfície ideal que se comporta como absorvedor e emissor perfeito, servindo como parâmetro de comparação para a caracterização de corpos reais. Esta superfície se caracteriza pela capacidade de absorver toda a radiação sobre ela incidente, independentemente do comprimento de onda e da

direção, e emitir, de forma perfeitamente difusa, o máximo de radiação possível a uma dada temperatura (Incropera, 1992).

### III.2. A Interação entre a Radiação Solar e os Componentes da Atmosfera

A radiação emitida pelo Sol é similar à emitida por um corpo negro a aproximadamente 6000 K de temperatura e tem seu pico de intensidade na faixa do visível. Os gases e partículas presentes na atmosfera absorvem parte da radiação solar em determinados intervalos bem definidos, chamados bandas de absorção. O ozônio e o oxigênio, por exemplo, absorvem radiação principalmente na faixa do ultravioleta; a água, o dióxido de carbono e o metano (gases de efeito estufa) absorvem no infravermelho; e o material particulado, no visível (Procópio, 2005). Desta forma, a energia que chega à superfície da Terra apresenta um espectro diferente da observada no topo da atmosfera.

Os intervalos onde os componentes gasosos da atmosfera permitem a passagem da radiação são denominados *janelas atmosféricas*. É justamente nestes intervalos que a maioria dos instrumentos de sensoriamento remoto trabalha. A Figura III.2 apresenta os espectros da irradiância solar no topo da atmosfera e ao nível do mar, além de algumas bandas de absorção do ozônio, oxigênio, dióxido de carbono, água e algumas bandas de observação do sensor MODIS.

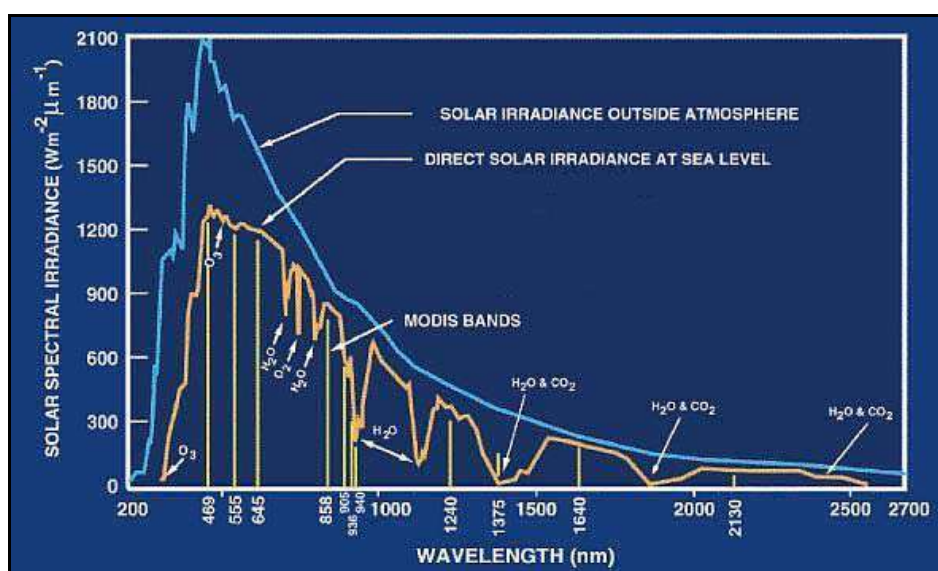


Figura III.2: Irradiância solar no topo da atmosfera (em azul) e ao nível do mar (em laranja). Estão indicadas também algumas bandas de absorção do ozônio, oxigênio, dióxido de carbono e água, além de algumas bandas de observação do MODIS (em amarelo). (NASA, 2006)

Além da absorção, os componentes presentes na atmosfera também possuem a capacidade de espalhar a radiação solar. O espalhamento é o processo no qual moléculas ou pequenas partículas suspensas em um meio distribuem parte da energia eletromagnética em todas as direções (Procópio, 2005). Além disso, o espalhamento é o fenômeno responsável pela diminuição de visibilidade e pode ocorrer de três formas distintas, dependendo da relação entre o tamanho da partícula e o comprimento da onda. Esta relação é matematicamente definida pelo *parâmetro de tamanho* ( $x$ ):

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \quad (\text{III.1})$$

onde  $r$  é o raio da partícula e  $\lambda$  é o comprimento da onda incidente.

Quando a partícula é muito menor que o comprimento de onda ( $x \ll 1$ ), ocorre espalhamento do tipo Rayleigh. Neste regime, a radiação incidente é espalhada com a mesma intensidade nas direções de retro e pró-espalhamento. Ao contrário, se a partícula for muito maior que o comprimento de onda ( $x \gg 1$ ), o espalhamento segue os padrões da ótica geométrica, com seus fenômenos de difração, refração e reflexão. Quando a partícula tem tamanho similar ao comprimento de onda, ocorre o espalhamento modelado pela teoria de Mie, desenvolvida em 1908 (Procópio, 2005, p.53, 60). A teoria de Mie consiste na solução analítica completa das equações de Maxwell para o espalhamento da radiação eletromagnética por uma partícula esférica. Neste caso, a proporção entre radiação pró-espalhada e retro-espalhada vai depender das propriedades ópticas da partícula. A Figura III.3 ilustra o espalhamento Rayleigh (a) e o espalhamento Mie (b).

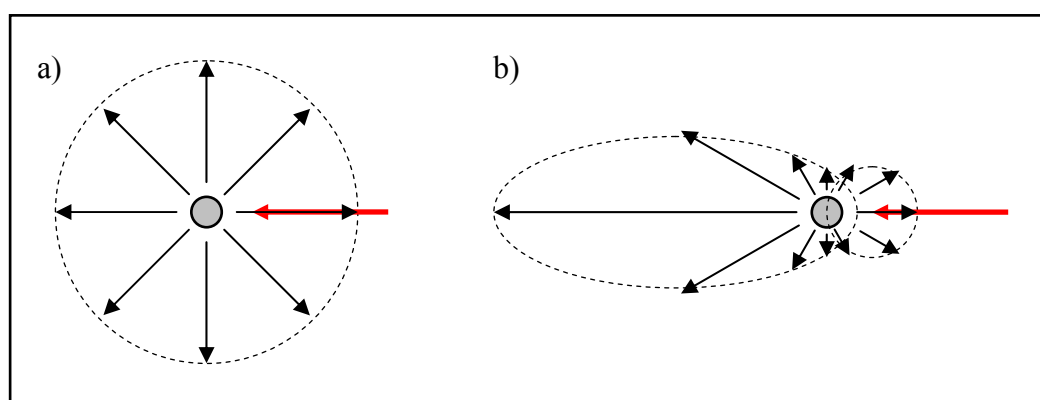


Figura III.3: O espalhamento Rayleigh e o espalhamento Mie. O vetor em vermelho indica a direção da radiação incidente.

A soma da fração da radiação incidente que foi espalhada com a que foi absorvida é chamada de *radiação extinta* ou *radiação atenuada*.

### III.2.1. As Propriedades Ópticas das Partículas de Aerossol

Neste Capítulo, são descritas as propriedades ópticas das partículas de aerossol que vão determinar sua interação com a radiação solar, como segue:

i) *Função de fase (P)*: é uma função tridimensional e representa a probabilidade de espalhamento em cada direção, em relação à radiação incidente, para um dado comprimento de onda e propriedades da partícula – molécula ou sólido em suspensão (Liou, 2002 apud Castanho, 2005):

$$P(\Theta, x, m, \lambda) = \frac{F(\Theta, x, m, \lambda)}{\int_0^\pi F(\Theta, x, m, \lambda) * \text{seno}(\Theta) * d\Theta} \quad [\text{adimensional}] \quad (\text{III.2})$$

onde  $F$  é a irradiância,  $\Theta$  é o ângulo de espalhamento,  $x$  é o parâmetro de tamanho,  $m$  é o índice de refração e  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação incidente. A variação da função de fase com o tamanho da partícula e o comprimento da onda incidente, está representada na Figura III.4. Quanto menor a partícula, menor a diferença de intensidade entre radiação pró-espalhada e retro-espalhada, aproximando-se do modelo de Rayleigh.

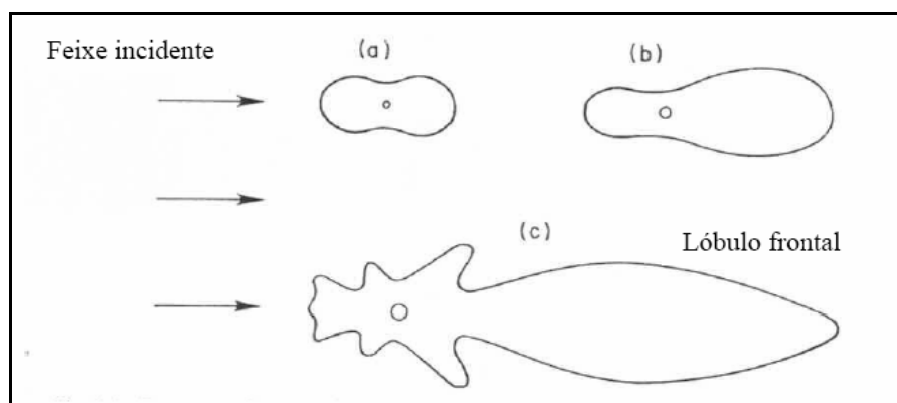


Figura III.4: Distribuição angular da radiação espalhada para: (a) partículas muito pequenas em relação ao comprimento de onda da radiação incidente; (b) partículas maiores que (a) e; (c) partículas muito maiores que (b). (Adaptado de Liou, 1980)

ii) *Parâmetro de assimetria (g)*: é a média dos cossenos dos ângulos de espalhamento ( $\Theta$ ), ponderada pela intensidade da radiação, e pode ser derivado da função de fase (Seinfeld e Pandis, 1998 apud Procópio, 2005).

$$g = \frac{1}{2} \int_0^\pi \cos(\Theta) * P(\Theta, x, m, \lambda) * \sin(\Theta) * d\Theta \quad [\text{adimensional}] \quad (\text{III.3})$$

O parâmetro de assimetria pode assumir valores entre -1 e 1, indicando quanto da radiação foi pró-espalhada e quanto foi retro-espalhada. Se  $g = 1$ , toda radiação incidente é pró-espalhada; se  $g = -1$ , toda radiação incidente é retro-espalhada; se  $g = 0$ , o espalhamento é simétrico.

iii) *Seção de choque de extinção ( $C_{ext}(\lambda)$ )*: é a relação entre a energia removida ( $E_{ext}(\lambda)$ , [W]) e a irradiância inicial incidente sobre esta partícula ou molécula ( $F_o$ , [W/m<sup>2</sup>]), em um dado instante e em um dado comprimento de onda (Procópio, 2005):

$$C_{ext}(\lambda) = \frac{E_{ext}(\lambda)}{F_o(\lambda)} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{III.4})$$

iv) *Eficiência de extinção ( $Q_{ext}(\lambda)$ )*: também chamada *fator de eficiência de extinção* é a razão entre a seção de choque de extinção em um dado comprimento de onda e a seção de choque geométrica de uma partícula (Procópio, 2005). Para uma partícula esférica:

$$Q_{ext}(\lambda) = \frac{C_{ext}(\lambda)}{\pi r^2} \quad [\text{adimensional}] \quad (\text{III.5})$$

v) *Coefficiente linear de extinção ( $\beta_{ext}(\lambda)$ )*: é a relação entre o fluxo radiante atenuado e a irradiação incidente, sobre um volume de ar contendo partículas, em um dado comprimento de onda (Procópio, 2005):

$$\beta_{ext}(\lambda) = C_{ext}(\lambda) * N \quad [\text{m}^{-1}] \quad (\text{III.6})$$

onde  $N$  é o número de partículas por volume [m<sup>-3</sup>].

vi) *Albedo simples ( $w_o(\lambda)$ )*: é a relação entre a radiação espalhada e a radiação atenuada total em um dado comprimento de onda, devido à interação da radiação incidente com as partículas em um volume de ar (Procópio, 2005):

$$w_o(\lambda) = \frac{\beta_{esp}(\lambda)}{\beta_{ext}(\lambda)} = \frac{\beta_{esp}(\lambda)}{\beta_{esp}(\lambda) + \beta_{abs}(\lambda)} \quad [\text{adimensional}] \quad (\text{III.7})$$



vii) *Profundidade óptica de extinção* ( $\delta_{ext}(\lambda)$ ): é resultado da integração do coeficiente linear de extinção ao longo do caminho óptico ( $ds$ ) percorrido pela radiação e fornece informação a respeito da quantidade e eficiência de extinção da matéria opticamente ativa em determinado comprimento de onda (Procópio, 2005):

$$\delta_{ext}(\lambda) = \int_{S1}^{S2} \beta_{ext}(\lambda) * ds \quad [\text{adimensional}] \quad (\text{III.8})$$

viii) *Espessura óptica de extinção* ( $\tau_{ext}(\lambda)$ ): é componente vertical ( $dz$ ) da profundidade óptica de extinção (Procópio, 2005), dada por:

$$\tau_{ext}(\lambda) = \cos(\theta_o) * \delta_{ext}(\lambda) \quad [\text{adimensional}] \quad (\text{III.9})$$

onde  $\theta_o$  é o ângulo solar zenital, formado entre o Sol e o zênite.

A espessura óptica de extinção reúne a soma da *espessura óptica de aerossol* ( $\tau_{a,ext}$ ) e as espessuras ópticas geradas pela absorção molecular (especialmente o ozônio) ( $\tau_{abs,O3}$ ) e pelo espalhamento Rayleigh ( $\tau_{esp,R}$ ) (Castanho, 2005):

$$\tau_{ext}(\lambda) = \tau_{a,ext}(\lambda) + \tau_{abs,O3}(\lambda) + \tau_{esp,R}(\lambda) \quad (\text{III.10})$$

Neste trabalho, será utilizado um conjunto de propriedades ópticas das partículas de aerossol da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), devido à ausência de dados para a RMRJ. Acredita-se que esta aproximação seja bastante razoável, tendo em vista que os aerossóis estudados são provenientes de duas grandes regiões metropolitanas do Brasil, que utilizam os mesmos tipos de combustíveis em suas atividades e têm localizações geográficas próximas. A determinação das propriedades do aerossol característico da RMSP foi feita a partir de medidas obtidas com fotômetros da AERONET (Aerosol Robotic Network) por Castanho (2005).

### **III.2.2. O Sensoriamento Remoto dos Aerossóis**

O sensoriamento remoto do material particulado presente na atmosfera se baseia na capacidade das partículas de interagir com a radiação solar em um determinado comprimento de onda. A radiação solar que chega ao sensor é resultado do que foi refletido diretamente pela atmosfera, mais o que foi refletido pela superfície, sendo transmitido pela atmosfera na ida e na volta, como apresentado na Figura III.5.

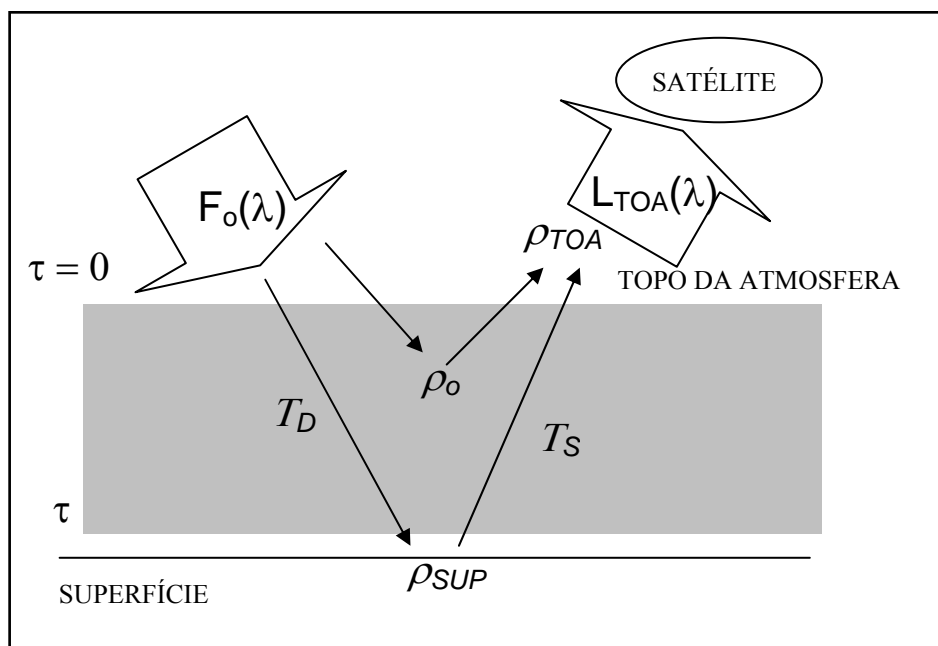


Figura III.5: A radiação emergente no topo da atmosfera ( $L_{TOA}(\lambda)$ ) é resultado da interação entre a radiação incidente ( $F_o(\lambda)$ ) e os componentes da atmosfera. A refletância no topo da atmosfera ( $\rho_{TOA}$ ) é resultado da refletância da superfície ( $\rho_{SUP}$ ), transmitância da atmosfera na descida ( $T_D$ ) e na subida ( $T_S$ ), e refletância direta da atmosfera ( $\rho_o$ ) (adaptado de Castanho, 2005).

A refletância no topo da atmosfera ( $\rho_{TOA}$ ) é então resultado da refletância da superfície ( $\rho_{SUP}$ ), multiplicada pela transmitância na descida ( $T_D$ ) e na subida ( $T_S$ ), somada à refletância direta da atmosfera ( $\rho_o$ ) (Kaufman, 1997 e Martins, 1999 apud Castanho, 2005):

$$\rho_{TOA} = \rho_{SUP} * T_D * T_S + \rho_o \quad [\text{adimensional}] \quad (\text{III.11})$$

Por sua vez, a refletância no topo da atmosfera nada mais é do que a razão entre a radiação emergente medida no topo da atmosfera integrada no hemisfério ( $\pi * L_{TOA}(\lambda)$ ) e a componente vertical da radiação incidente ( $F_o(\lambda) * \cos(\theta_o)$ ) (Kaufman, 1997 apud Castanho, 2005):

$$\rho_{TOA}(\lambda) = \frac{\pi * L_{TOA}(\lambda)}{F_o(\lambda) * \cos(\theta_o)} \quad [\text{adimensional}] \quad (\text{III.12})$$

onde  $\theta_o$  é o ângulo solar zenital (formado entre o Sol e o zênite).

A lei de Beer-Lambert-Bouguer determina a variação de intensidade da radiação ao passar por uma camada de aerossóis. A equação abaixo descreve a atenuação da radiação ( $dL$ ) ao longo de um caminho óptico ( $ds$ ), utilizando o coeficiente linear de extinção (Procópio, 2005):

$$dL(\lambda) = -\beta_{ext}(\lambda)*L(\lambda)*ds \quad (III.13)$$

A banda 7 do MODIS (2110 nm) foi utilizada para fins de determinação da refletância da superfície ( $\rho_{sup}$ ). De acordo com Kaufman (1997), este canal é transparente para a maioria das partículas de aerossol e a refletância da superfície em 2200 nm se relaciona diretamente com as refletâncias em 490 nm e 660 nm pelas relações aproximadas determinadas experimentalmente:

$$\rho_{sup}(660) = \rho_{sup}(2200)*0,5 \quad (III.14)$$

$$\rho_{sup}(490) = \rho_{sup}(2200)*0,25 \quad (III.15)$$

Neste trabalho foi utilizada a relação:

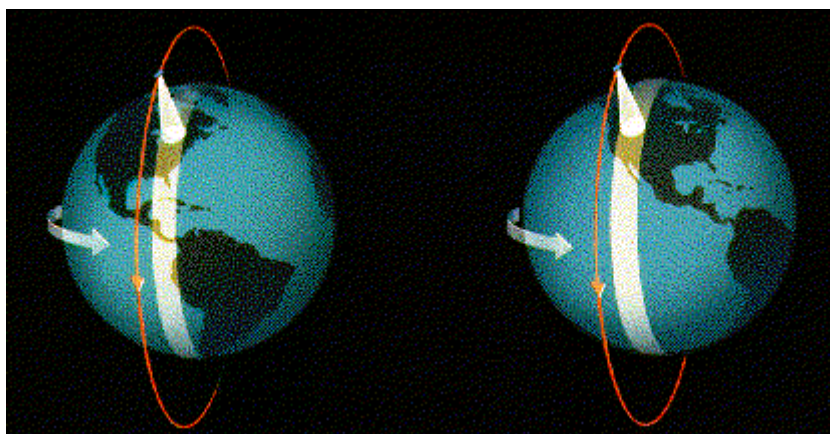
$$\rho_{sup}(650) = \rho_{sup}(2110)*0,55 \quad (III.16)$$

determinada experimentalmente por Castanho (2005). Com esta relação, pode-se estimar a refletância da superfície em 650 nm para uma espessura óptica de aerossol nula. A diferença entre os valores de  $\rho_{sup}(650)$  obtidos pelo sensor e pela relação acima para uma espessura óptica de aerossol nula é resultante da presença dos aerossóis.

## Capítulo IV. Instrumentação e Métodos

### IV.1. O MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

O MODIS é um radiômetro espectral passivo e se encontra localizado a bordo de duas plataformas satélites, o EOS-Terra e o EOS-Aqua, lançadas respectivamente em 1999 e 2002. As plataformas possuem órbita polar, em sincronia com o Sol e se encontram a uma altitude de 705 km. O MODIS possui uma largura de visada de 2330 km, sendo capaz de cobrir praticamente todo o planeta em dois dias e passando pela RMRJ diariamente por volta das 10 h e 13 h (Terra e Aqua, respectivamente) (King *et al.*, 2003). A Figura IV.1 ilustra a varredura de um satélite com órbita polar.



*Figura IV.1: Órbita polar: a cada órbita sucessiva o satélite varre uma faixa mais a oeste. (UW-Stout, 2008)*

O sensor capta a radiação emitida e refletida pelo planeta em trinta e seis bandas espectrais, entre 415 e 14235 nm, com diferentes resoluções. Os dados coletados pelo MODIS auxiliam na compreensão da dinâmica global e dos processos que ocorrem nos continentes, nos oceanos e na parte mais baixa da atmosfera. A Tabela IV.1 resume as bandas do MODIS com suas respectivas resoluções espaciais em superfície e principais usos.

*Tabela IV.1: Bandas espectrais do MODIS, principais usos e resolução espacial (NASA, 2008d)*

<b>Nº da banda</b>	<b>Largura da banda (nm)</b>	<b>Principais usos</b>	<b>Resolução espacial (m)</b>
1	620 - 670	Limites de terra, nuvens e aerossóis	250
2	841 - 876		
3	459 - 479		
4	545 - 565	Propriedades de terra, nuvens e aerossóis	500
5	1230 - 1250		
6	1628 - 1652		
7	2105 - 2155		
8	405 - 420	Biogeoquímica, cor do oceano, fitoplâncton	1000
9	438 - 448		
10	483 - 493		
11	526 - 536		
12	546 - 556		
13	662 - 672		
14	673 - 683		
15	743 - 753		
16	862 - 877		
17	890 - 920		
18	931 - 941		
19	915 - 965		
20	3660 - 3840	Temperatura da superfície e das nuvens	
21	3929 - 3989		
22	3929 - 3989		
23	4020 - 4080	Temperatura atmosférica	
24	4433 - 4498		
25	4482 - 4549		
26	1360 - 1390	Vapor d'água, nuvens tipo cirrus	
27	6535 - 6895		
28	7175 - 7475		
29	8400 - 8700	Propriedades das nuvens	
30	9580 - 9880	Ozônio	
31	10780 - 11280	Temperatura da superfície e das nuvens	
32	11770 - 12270		
33	13185 - 13485	Altitude do topo das nuvens	
34	13485 - 13785		
35	13785 - 14085		
36	14085 - 14385		

Neste trabalho, foram utilizadas as informações captadas pelas bandas 1 e 7.

#### ***IV.1.1. Características dos Produtos do MODIS***

Os dados coletados pelo MODIS são processados em três níveis sequenciais, L1, L2 e L3, gerando uma série de produtos associados. Os arquivos possuem tamanhos aproximados entre 1 MB e 500 MB e são distribuídos gratuitamente via Internet pela NASA/GSFC no formato \*.hdf (*hierarchical data file*). Estes arquivos consistem de matrizes organizadas de forma hierárquica. A Figura IV.2 apresenta esquematicamente os produtos do MODIS e seus níveis de processamento.

O primeiro passo é a geração do arquivo MOD01 de nível L1A, que contém, além dos dados das 36 bandas espectrais, registros diários dos equipamentos a bordo do satélite (King, 2003).

Este produto é separado em arquivos com informação de cada cinco minutos de trajetória do satélite. Em superfície isto corresponde a uma área de 2330 km, que é a largura de visada do sensor, por 1350 km longitudinalmente. Esses produtos correspondem ao nível L1B e os arquivos são chamados MOD02 e MOD03. O MOD02 contém as radiâncias espectrais calibradas e georreferenciadas nas três resoluções espaciais, gerando os arquivos MOD02-250m (com os dados das duas bandas de 250 m), MOD02-500m (com os dados das cinco bandas de 500 m e agregados das duas bandas com resolução de 250 m), MOD02-1km (com os dados das dezenove bandas de 1 km e agregados das outras sete bandas de resolução inferior). O produto MOD03 fornece informação com resolução de 1 km sobre as coordenadas geodésicas, elevação do solo e geometria de visada (King, 2003).

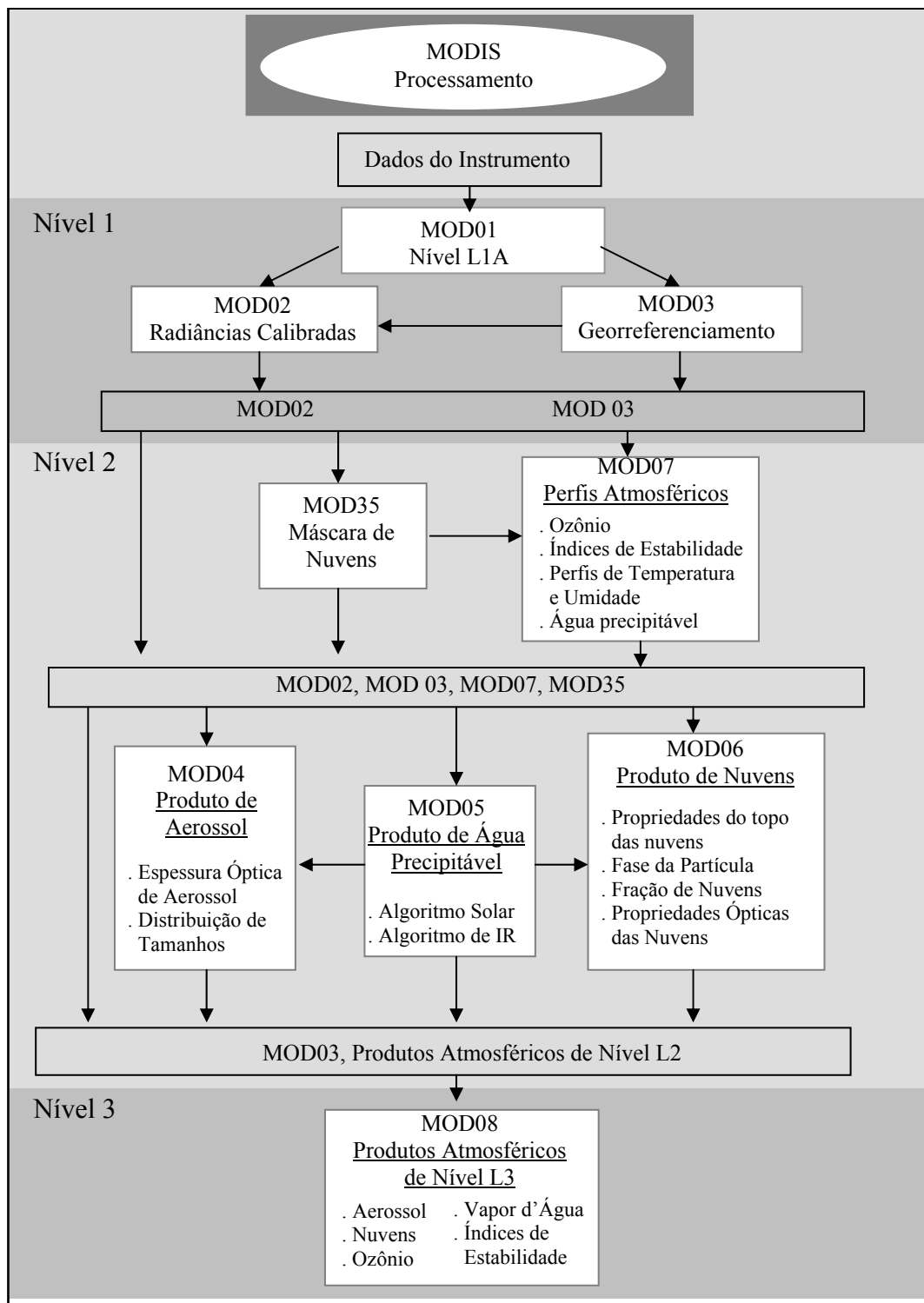


Figura IV.2: Arquitetura de processamento dos produtos do MODIS com seus níveis (Elaborado a partir de Parkinson e Greenstone, 2000 apud King, 2003).

Os produtos de nível L2 são gerados a partir dos produtos de nível L1 e possuem resolução entre 1 e 10 km. As informações fornecidas são: máscara de nuvens – MOD35 – que distingue entre céu limpo e com presença de nuvens; perfis atmosféricos – MOD07 – que incluem ozônio, índices de estabilidade, temperatura,

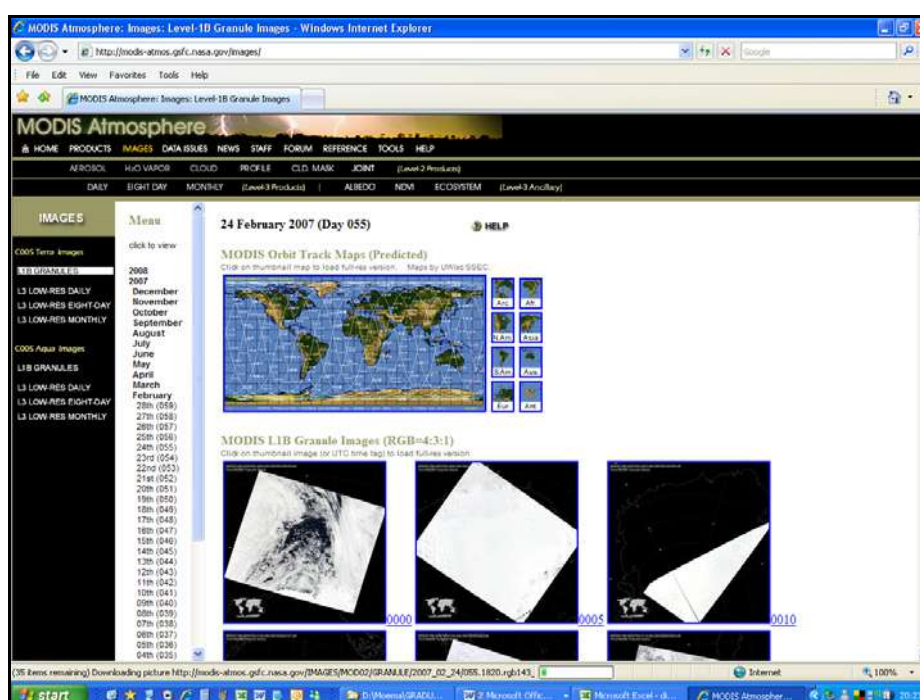
umidade e água precipitável; aerossol – MOD04 – com a espessura óptica de aerossol e a distribuição de tamanhos; água precipitável – MOD05 – segundo algoritmo solar e de infravermelho; e propriedades das nuvens – MOD06 – propriedades de topo, temperatura, emissividade, altura e propriedades ópticas (King, 2003).

Os produtos de nível L3 são agregados com resolução de 1° x 1° em um dia, oito dias ou mensais das informações contidas nos produtos de nível L2 e incluem: aerossóis, nuvens, ozônio, vapor d'água e índices de estabilidade (King, 2003).

Neste trabalho, foram utilizados o produto de nível L1B MOD02-1km e o produto de nível L2 MOD04, que possui resolução espacial de 10 km. O primeiro foi utilizado na obtenção da espessura óptica de aerossol com 1 km de resolução espacial e o segundo, para comparação com o novo produto gerado.

#### ***IV.1.2. A Obtenção dos Produtos do MODIS***

Os produtos do MODIS foram selecionados a partir da observação da imagem em cores no website do MODIS, apresentado na Figura IV.3.

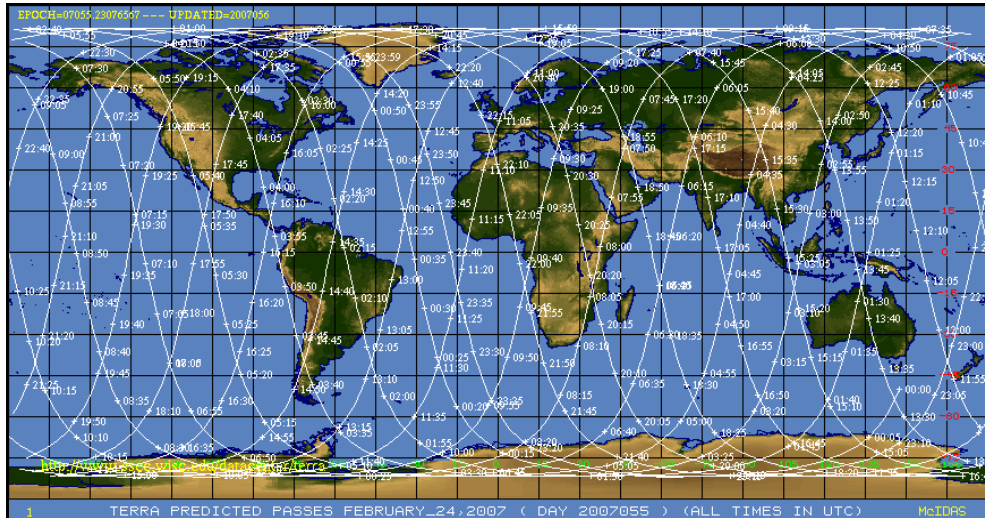


*Figura IV.3: Website do MODIS, onde são selecionados dias e horas de interesse (NASA, 2008e).*

A primeira seleção é quanto à data, seguida da região de forma mais geral e depois da hora, localizando o grânulo exato de cinco minutos de trajetória que contém

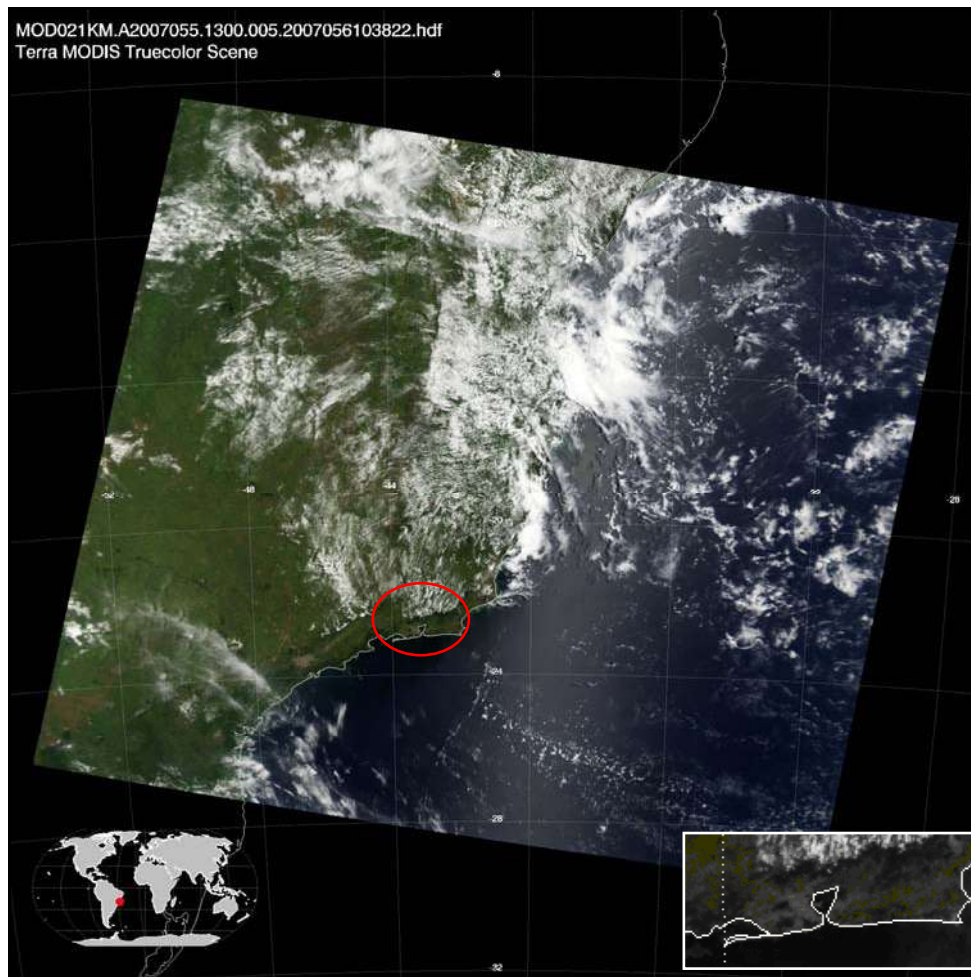


o local de interesse. A trajetória do satélite para o dia especificado pode ser visualizada, como mostra a Figura IV.4, auxiliando na determinação do quadro em que se encontra a região de interesse.



*Figura IV.4: Trajetória da plataforma satélite EOS-Terra, para o dia 24 de fevereiro de 2007 (NASA, 2008e).*

As imagens em cores reais podem ser obtidas em tamanho grande, permitindo ao usuário verificar não apenas a presença da região de interesse, como também a qualidade de visualização da mesma. A Figura IV.5 apresenta uma imagem obtida neste website para o dia 24 de fevereiro de 2007.



*Figura IV.5: Imagem em cores reais obtida no website do MODIS para o dia 24 de fevereiro de 2007 (NASA, 2008e)*

Uma vez verificado que a região de interesse possui imagem para o dia desejado e uma boa visualização, pode-se obter os arquivos \*.hdf nos três níveis de processamento em outro website da NASA, o *Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS)*, apresentado na Figura IV.6. Os produtos de nível L2 (descritos no item anterior) possuem tamanho menor – até cerca de 10 MB - e estão disponíveis para *download* imediato. Os produtos de nível L1B, com informação de radiação em todas as bandas espectrais do MODIS e resoluções de 250 m a 1 km, possuem tamanhos de cerca de 160 MB e são disponibilizados a pedido dos usuários, ficando disponíveis para *download* por uma semana.

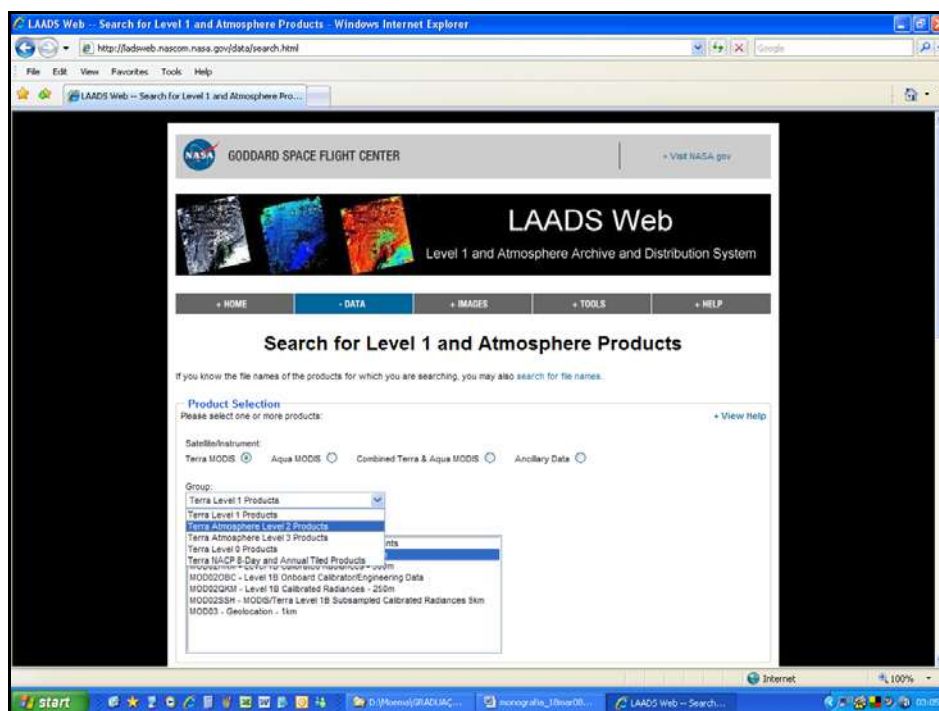


Figura IV.6: Website da NASA, Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS), onde podem ser obtidos os arquivos \*.hdf nos três níveis de processamento (NASA, 2008f).

#### IV.2. O SBDART – Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer

O SBDART é um *software* livre desenvolvido para estudos de balanço de energia radiativa na atmosfera e de sensoriamento remoto. A ferramenta resolve as equações de transferência radiativa, considerando uma atmosfera plano-paralela e utilizando o código DISORT (*Discrete Ordinate Radiative Transfer*), que fornece solução numérica das equações (Ricchiuzzi *et al*, 1998). O software encontra-se disponível para *download* no website: [http://www.icess.ucsb.edu/esrg/pauls\\_dir/](http://www.icess.ucsb.edu/esrg/pauls_dir/).

O SBDART possui uma biblioteca que contém propriedades padrão para modelar condições atmosféricas, como tipo de aerossol, nuvens, moléculas gasosas, e propriedades da superfície (Castanho, 2005).

A operação do programa se dá através do fornecimento de *inputs*, que podem conter mais de oitenta parâmetros com valores exatos ou a seleção entre opções que caracterizam diferentes condições. Pode-se, por exemplo, caracterizar a refletância da superfície fornecendo-se um valor exato para a variável ou selecionando uma superfície como: areia, oceano, vegetação, neve, ou uma combinação entre estes elementos. O SBDART lê o input, resolve as equações e gera *outputs* na forma de matrizes. A Figura IV.7 apresenta a configuração *default* para o input do SBDART.

```

=====
&INPUT
idatm = 4 , amix = 0.0 , isat = 0 ,
wlinf = 0.550 , wlsup = 0.550 , wlinc = 0.0 ,
sza = 0.0 , csza = -1.0 , solfac = 1.0 ,
nf = 2 , iday = 0 , time = 16.0 ,
alat = -64.7670 , alon = -64.0670 , zpres = -1.0 ,
pbar = -1.0 , sclh2o = -1.0 , uw = -1.0 ,
uo3 = -1.0 , o3trp = -1.0 , ztrp = 0.0 ,
xrsc = 1.0 , xn2 = -1.0 , xo2 = -1.0 ,
xco2 = -1.0 , xch4 = -1.0 , xn2o = -1.0 ,
xco = -1.0 , xno2 = -1.0 , xso2 = -1.0 ,
xnh3 = -1.0 , xno = -1.0 , xhno3 = -1.0 ,
xo4 = 1.0 , isalb = 0 , albcon = 0.0 ,
sc = 1.0,3*0.0 , zcloud = 5*0.0 , tcloud = 5*0.0 ,
lwp = 5*0.0 , nre = 5*8.0 , rhcld = -1.0 ,
krhclr = 0 , jaer = 5*0 , zaer = 5*0.0 ,
taerst = 5*0.0 , iaer = 0 , vis = 23.0 ,
rhaer = -1.0 , wlbaer = 47*0.0 , tbaer = 47*0.0 ,
abaer = -1.0 , wbaer = 47*0.950 , gbaer = 47*0.70 ,
pmaer = 940*0.0 , zbaer = 50*-1.0 , dbaer = 50*-1.0 ,
nothrm = -1 , nosct = 0 , kdist = 3 ,
zgrid1 = 0.0 , zgrid2 = 30.0 , ngrid = 50 ,
zout = 0.0,100.0 , iout = 10 , deltam = t ,
lamber = t , ibcnd = 0 , saza = 180.0 ,
prnt = 7*f , ipth = 1 , fisot = 0.0 ,
temis = 0.0 , nstr = 4 , nzen = 0 ,
uzen = 20*-1.0 , vzen = 20*90 , nphi = 0 ,
phi = 20*-1.0 , imomc = 3 , imoma = 3 ,
ttemp = -1.0 , btemp = -1.0 , spowder = f ,
idb = 20*0
/
=====

```

Figura IV.7: configuração default para o input do SBDART (ICESS, 2008).

Neste trabalho, o SBDART foi utilizado para gerar as equações de espessura óptica de aerossol ( $\tau_a$ ) em função da refletância no topo da atmosfera ( $\rho_{TOA}$ ). As equações foram geradas por meio da simulação da  $\rho_{TOA}$  para determinadas propriedades de aerossol e refletâncias de superfície.

Os *inputs* utilizados neste trabalho contêm:

- i) cinco comprimentos de onda para caracterizar a dependência espectral das propriedades ópticas;
- ii) albedo simples para cada um dos comprimentos de onda;
- iii) fator de assimetria para cada um dos comprimentos de onda;
- iv) eficiência de extinção para cada um dos comprimentos de onda;
- v) uma série de refletâncias de superfície, variando de 0,002 a 0,152;
- vi) uma série de espessuras ópticas de aerossol em 550 nm, variando de 0 a 1,5;
- vii) distância entre a Terra e o Sol para o dia analisado;
- viii) comprimentos de onda de observação, definidos em 650 nm e 2110 nm;

- ix) perfil atmosférico definido em tropical;
- x) pressão atmosférica definida em 1005 hPa;
- xi) quantidade de vapor d'água integrada na coluna fixada em  $2 \text{ g/cm}^2$ ;
- xii) ângulo solar zenital lido do arquivo \*.hdf;
- xiii) ângulo zenital do sensor lido do arquivo \*.hdf;
- xiv) ângulo azimutal entre o Sol e o sensor lido do arquivo \*.hdf;
- xv) saída (*output*) desejada;
- xvi) e parâmetros como: tipo da função de filtro, espectro solar computacional, e número de ângulos solares zenitais computacional.

Algumas variáveis foram intencionalmente deixadas no *default*, como a altitude da tropopausa (100 km). Esta variável, por exemplo, não interfere no resultado final, pois o efeito dos aerossóis é observado integrado na vertical.

A saída selecionada fornece informações sobre a radiância emergente e a incidente no topo da atmosfera (em  $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ ), nos canais de 650 nm e 2110 nm, e outras variáveis.

Conhecendo-se a radiância emergente e a incidente, calcula-se a refletância no topo da atmosfera ( $\rho_{TOA}$ ), de acordo com a equação III.12, para cada refletância de superfície ( $\rho_{sup}$ ) e espessura óptica de aerossol ( $\tau_a$  ou AOT – *aerosol optical thickness*). Com os dados de refletância TOA gerados, foram obtidas equações de 3ª ordem que relacionam os valores de  $\tau_a$  diretamente com os valores de  $\rho_{TOA}$  – as *equações de inversão*. A Figura IV.8 apresenta o resultado calculado para 3 refletâncias de superfície, 13 valores de espessuras ópticas de aerossol, um determinado modelo de aerossol (com albedo simples em 550 nm igual a 0,76), ângulos zenitais solar e do sensor (definidos em  $51^\circ$  e  $25^\circ$ , respectivamente) e ângulo azimutal entre ambos (definido em  $119^\circ$ ).

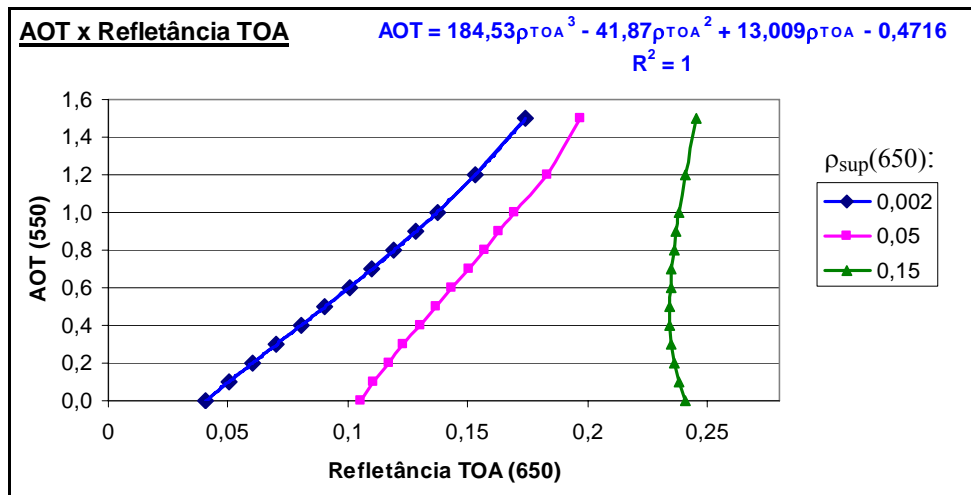


Figura IV.8: Espessura óptica de aerossol (AOT) em 550 nm em função da refletância no topo da superfície em 650 nm. Valores calculados pelo SBDART para um determinado modelo de aerossol com albedo simples em 550 nm igual a 0,76, ângulos zenitais solar e do sensor definidos em 51° e 25°, respectivamente e ângulo azimutal entre ambos igual a 119°.

Esta Figura foi gerada durante o estudo do SBDART, para assimilação de seu mecanismo de funcionamento e compreensão do significado e influência de suas variáveis.

### IV.3. O Algoritmo de Obtenção da Espessura Óptica de Aerossol com 1 km de Resolução Espacial

O procedimento descrito no item anterior e a produção dos mapas de espessura óptica de aerossol são realizados por um algoritmo desenvolvido por Castanho utilizando o *software* Matlab e disponibilizado para este trabalho. O algoritmo utiliza um conjunto de quatro arquivos \*.m, um conjunto de cinco modelos de aerossol (com suas respectivas propriedades ópticas), o SBDART e um arquivo \*.hdf de nível L1B.

O primeiro programa determina o dia de interesse; lê o arquivo \*.hdf correspondente; seleciona a região a ser analisada; salva as informações de radiância em 650 nm e 2110 nm, *pixels* válidos e georreferenciamento em um arquivo \*.mat; e constrói uma imagem da refletância em 2110 nm, com resolução espacial de 1 km, da área de interesse.

O segundo programa é onde se define o modelo de aerossol. Ele utiliza duas “functions”, que constituem os outros dois arquivos \*.m, descritas abaixo; calcula a refletância da superfície em 650 nm a partir dos dados de radiância em 2110 nm

salvos no arquivo \*.mat e da equação III.16; e constrói a imagem de espessura óptica de aerossol.

A primeira “function” contém o conteúdo dos *inputs* fornecidos ao SBDART, que é acionado na seqüência pela mesma “function” e fornece os *outputs* para os comprimentos de onda definidos em 650 nm e 2110 nm, conforme descrito no item IV.2 deste trabalho.

A segunda “function” calcula as refletâncias no topo da atmosfera em 650 nm e 2110 nm e gera as equações de inversão, também descritas no item IV.2.

Para utilização deste algoritmo, foram necessários a adaptação de um computador para utilização do sistema operacional Linux, a instalação do SBDART e do Matlab para Linux neste sistema operacional, e uma adaptação dos scripts para operar dentro das particularidades da configuração final obtida e das características da RMRJ.

A Figura IV.9 apresenta um esquema do funcionamento do algoritmo utilizado neste trabalho.

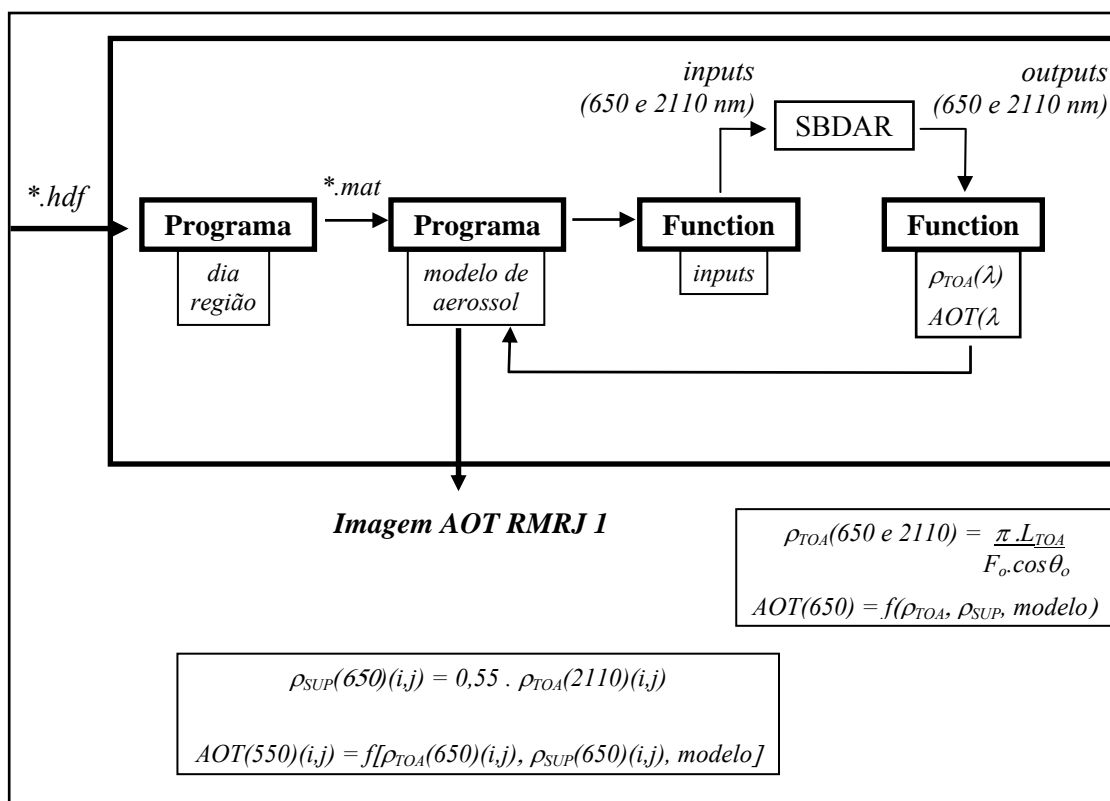


Figura IV.9: Esquema do funcionamento do algoritmo utilizado neste trabalho.

Foram também feitas modificações no algoritmo que diminuíram seu tempo de processamento de quase uma hora para cerca de 10 minutos – por cada imagem gerada, para um determinado dia e um determinado modelo de aerossol. As modificações incluíram redução no número de rodadas do SBDART (efetuando os cálculos apenas para o modelo de aerossol selecionado e não para os cinco) e redução nas variáveis lidas de seu *output* (utilizando apenas as que são de fato necessárias aos cálculos subsequentes).



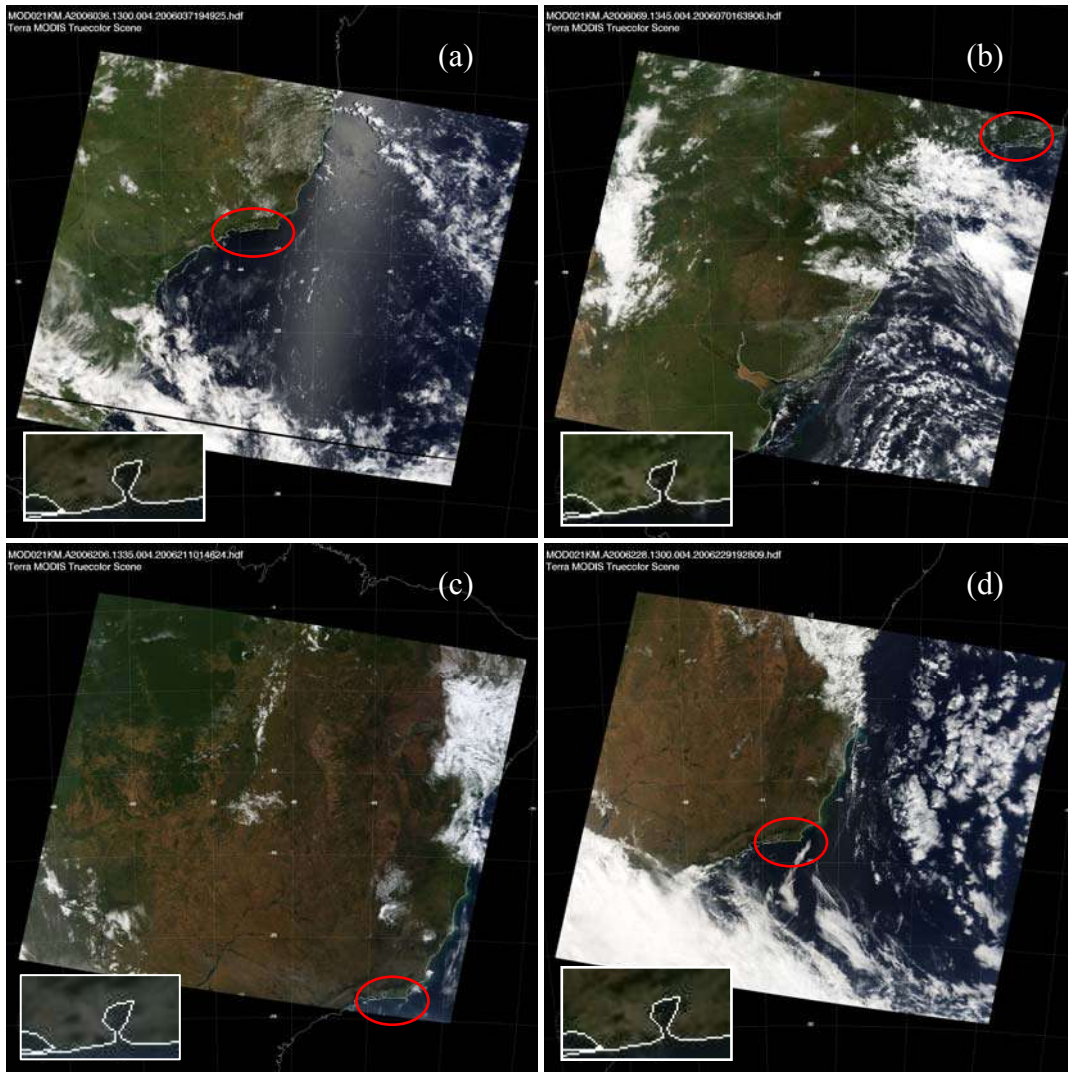
## Capítulo V. Resultados e Discussão

A partir das imagens em cores reais disponíveis no *website* do MODIS, foram selecionados vinte dias do ano de 2006 aparentemente sem nuvens. Para uma primeira visualização, utilizou-se os produtos de aerossol do MODIS de nível L2 (MOD04), que possuem resolução espacial de 10 km e tamanho de arquivo de cerca de 2 MB. Através do Matlab, os arquivos foram lidos e foi obtida a espessura óptica de aerossol com resolução espacial de 10 km. O tempo de processamento deste algoritmo é de cerca de 20 s para cada rodada.

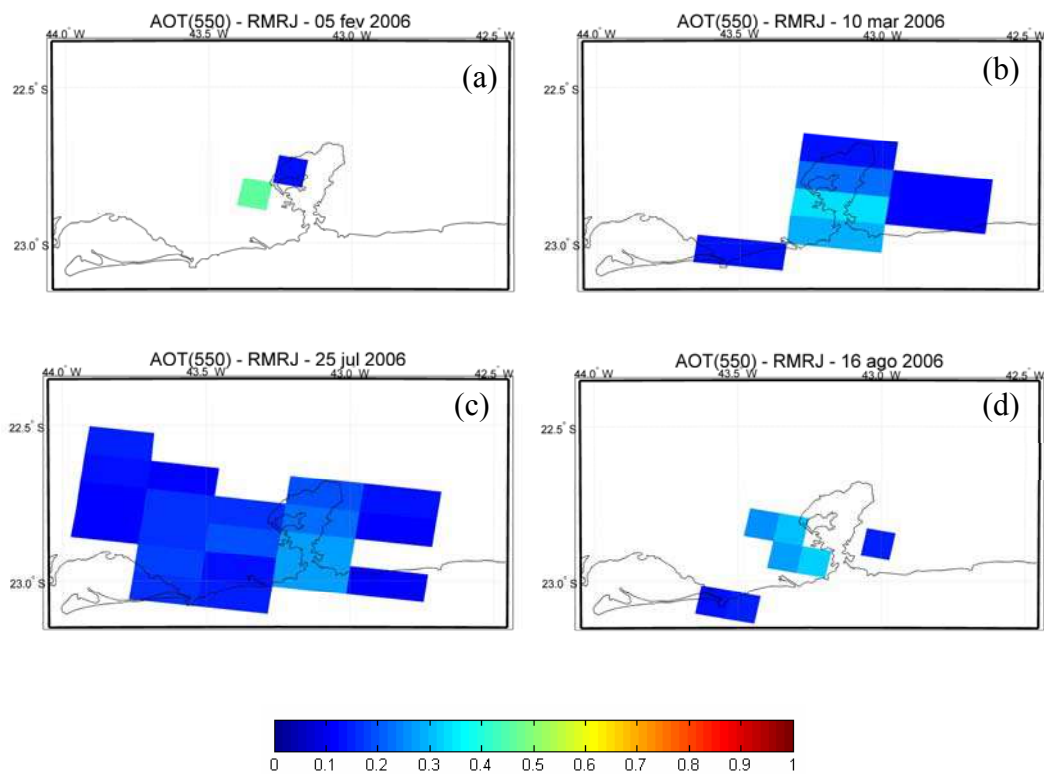
Foram eleitos então dez dias para serem analisados utilizando o produto de nível L1B do MODIS (MOD02-1km), com aproximadamente 160 MB e descrito no item IV.1.1 deste trabalho. Após o *download* dos arquivos \*.hdf e as adequações feitas ao algoritmo descrito no item IV.3, foram geradas as imagens de espessura óptica de aerossol com resolução de 1 km, para cada um dos cinco modelos de aerossol.

Foram selecionados quatro dias do ano de 2006 para serem discutidos: 05 de fevereiro, 10 de março, 25 de julho e 16 de agosto. A seleção do modelo de aerossol para cada dia foi posterior à geração das imagens é baseada apenas na escolha da melhor definição para a imagem resultante.

As Figuras V.1 (a) a (d), apresentam as imagens em cores reais obtidas no *website* do MODIS para os dias: 05 de fevereiro, 10 de março, 25 de julho e 16 de agosto, respectivamente. As Figuras V.2 (a) a (d) apresentam as imagens de espessura óptica de aerossol com resolução espacial de 10 km obtidas para os mesmos dias, na mesma ordem. As Figuras V.3 (a) a (d) apresentam as imagens de espessura óptica de aerossol com resolução espacial de 1 km obtidas para os mesmos dias, na mesma ordem e modelo de aerossol 5 para o primeiro dia, 3 para o último e 1 para os restantes. As propriedades ópticas de cada modelo de aerossol encontram-se tabelas no Apêndice B deste trabalho. O albedo simples em 550 nm para cada um dos 5 modelos modelo vale, respectivamente: 0,735; 0,799; 0,849; 0,902; e 0,961. Vale lembrar que, neste trabalho, foram utilizadas as propriedades ópticas das partículas da RMSP, por ausência de dados para a RMRJ.



*Figura V.1: Imagens em cores reais obtidas no website do MODIS para os dias (a) 05 de fevereiro, (b) 10 de março, (c) 25 de julho, (d) 16 de agosto (adaptado de NASA, 2008e).*



*Figura V.2: Imagens de espessura óptica de aerossol em 550 nm (AOT) com resolução espacial de 10 km, obtidas para os dias (a) 05 de fevereiro, (b) 10 de março, (c) 25 de julho, (d) 16 de agosto, para a RMRJ.*

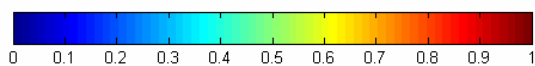
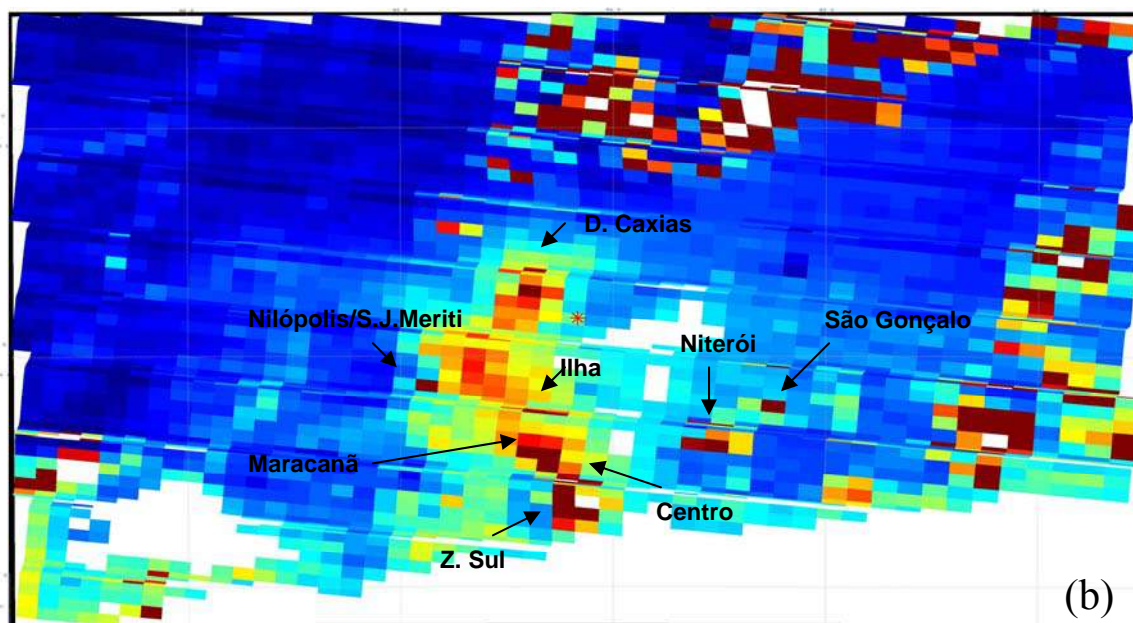
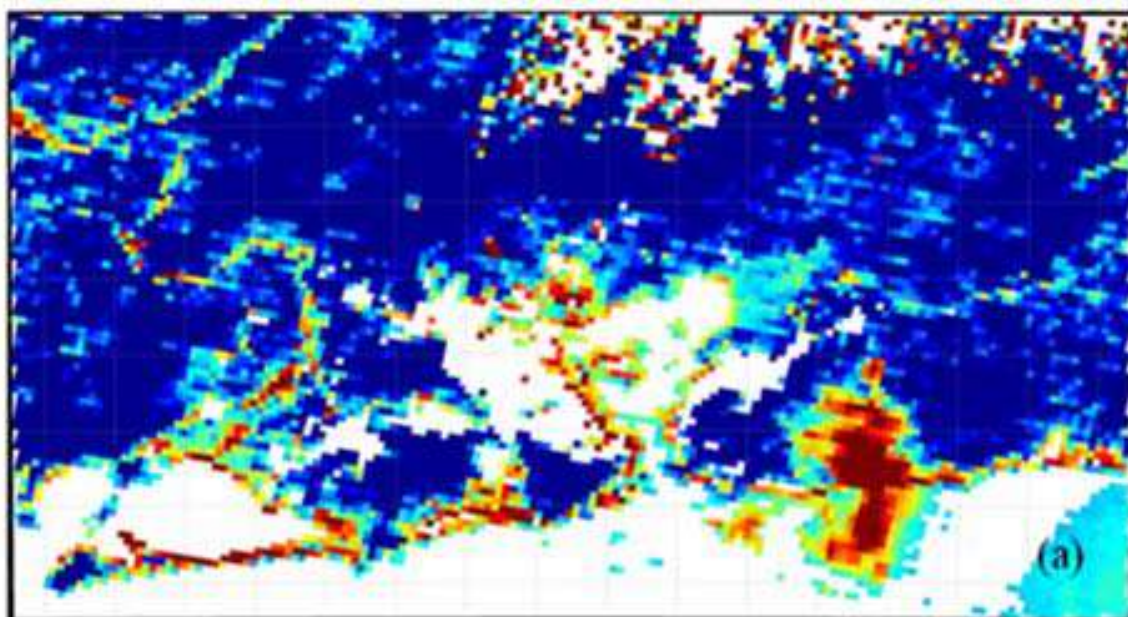


Figura V.3: Imagens de espessura óptica de aerossol em 550 nm (AOT) com resolução espacial de 1 km, obtidas para os dias (a) 05 de fevereiro e (b) 10 de março, para a RMRJ.

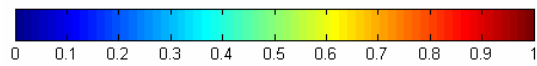
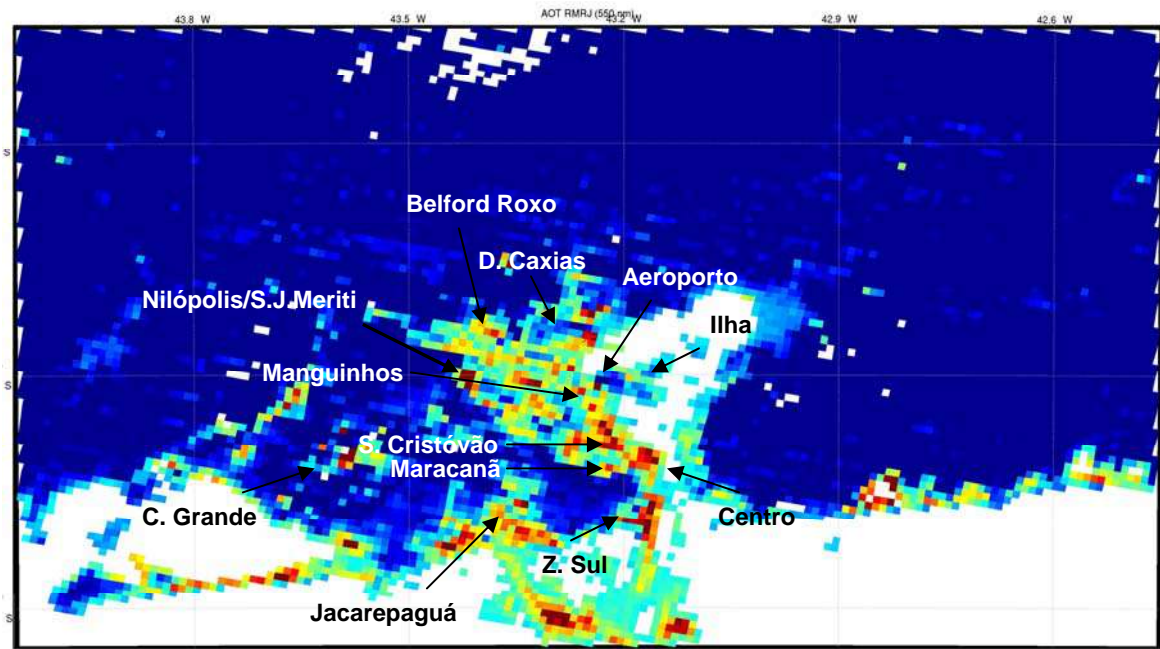
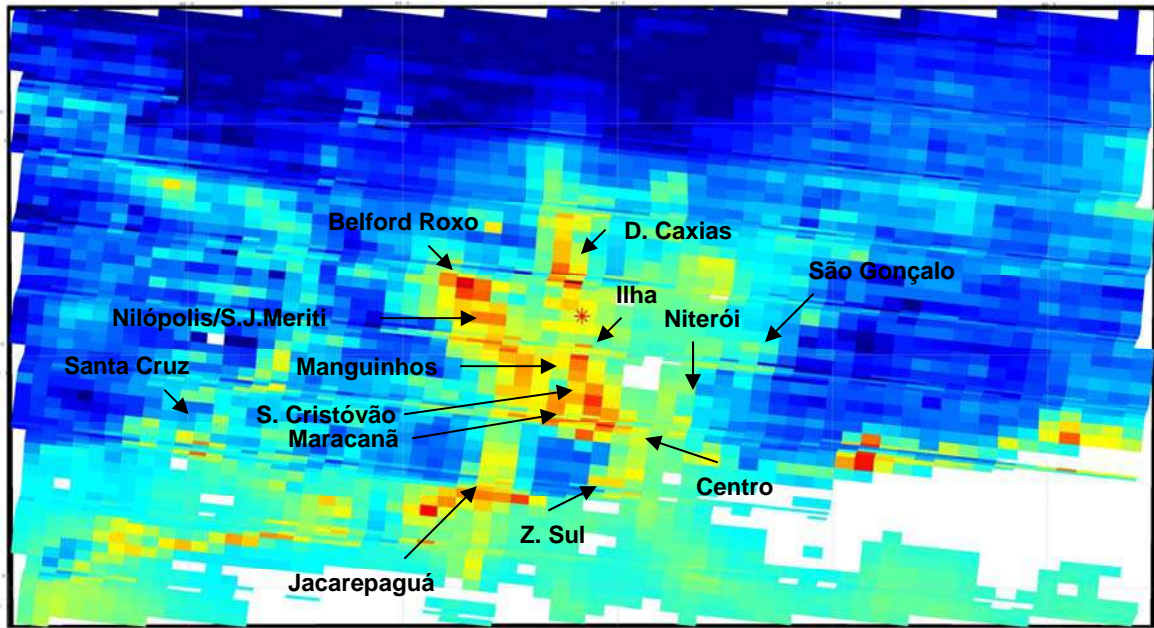


Figura V.3: Imagens de espessura óptica de aerossol em 550 nm (AOT) com resolução espacial de 1 km, obtidas para os dias (c) 25 de julho e (d) 16 de agosto, para a RMRJ.

Com estas imagens, pôde-se perceber a presença de nuvens em dias aparentemente limpos, como pode ser visto na imagem do dia 05 de fevereiro. As nuvens possuem elevada refletância, impedindo a observação dos aerossóis.

Adicionalmente, percebeu-se que, para uma melhor definição das imagens de espessura óptica, a região de interesse deve estar localizada junto ao eixo de passagem do satélite. As imagens com posicionamento da RMRJ deslocado em relação ao eixo, apresentaram *pixels* alongados na horizontal, devido ao ângulo de observação do satélite no momento da varredura. Este efeito pode ser observado nas imagens obtidas para os dias 10 de março e 25 de julho.

Ainda quanto à qualidade das imagens, percebeu-se que a presença do mar e da Baía da Guanabara invalida muitos *pixels* de informação próximos ao litoral e aos limites da baía. A elevada refletância dos corpos d'água impede a observação dos aerossóis utilizando este algoritmo – que considera toda a área analisada como uma região continental – invalidando os pontos em que estão presentes. A NASA utiliza dois algoritmos distintos para obtenção da espessura óptica de aerossol em continentes e oceanos.

Quanto às informações obtidas, pode-se perceber, em todas as imagens sem nuvens, que a região da Bacia Aérea III é a que apresenta maior concentração de particulados, especialmente nos municípios da Baixada Fluminense e toda a região entre o Maciço da Tijuca e a Avenida Brasil, que engloba as Zonas Norte e Centro da cidade e contém muitas favelas. Este resultado ratifica as informações obtidas pela rede de monitoramento da FEEMA, segundo a qual  $\frac{1}{4}$  das ultrapassagens do padrão anual de particulado inalável ocorreram na Bacia Aérea III.

A Figura V.4 mostra a localização dos municípios da RMRJ, com exceção do município de Mesquita (que fica entre Nova Iguaçu e Nilópolis), e suas principais vias de tráfego. A Figura V.5 mostra a distribuição espacial das principais indústrias com alto potencial poluidor da Bacia Aérea III e suas adjacências.



Figura V.4: Imagem de satélite da RMRJ, seus municípios, com exceção de Mesquita (que fica entre Nova Iguaçu e Nilópolis), e o traçado de suas principais vias de tráfego (adaptada de imagem obtida no Google Maps, 2008).

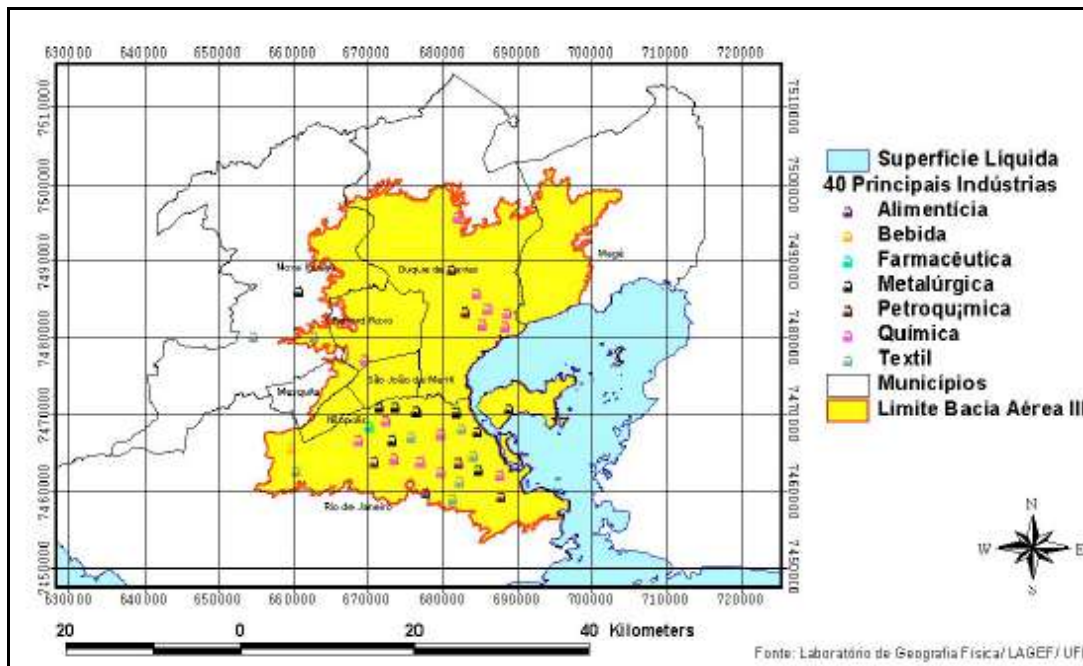


Figura V.5: Distribuição espacial das principais indústrias com alto potencial poluidor da Bacia Aérea III e suas adjacências (Oliveira, 2004).

Pode-se observar na Figura V.5 que os locais onde a concentração de indústrias é maior coincidem com as regiões onde foram obtidos os maiores valores de espessura óptica de aerossol.

A grande concentração de indústrias, a presença da Refinaria de Duque de Caxias (Reduc) e do aterro sanitário de Gramacho justifica o fato de a região ser uma das mais afetadas pela poluição por particulados. Segundo Oliveira (2004), a contribuição do aterro nas emissões de material particulado chega a ser visível em algumas ocasiões, devido à formação de uma nuvem amarelada de material em suspensão.

Pode-se observar também uma elevada espessura óptica de aerossol nos bairros de Manguinhos, Jacarepaguá e Campo Grande, e no município de São Gonçalo. Em Jacarepaguá, Campo Grande e São Gonçalo se localizam centenas de indústrias de vários portes. Já no bairro de Manguinhos se encontra a segunda refinaria da RMRJ, a Refinaria de Manguinhos, e sua região é praticamente tomada por favelas.

A prática de queima de lixo nas regiões predominantemente habitadas por população de baixa renda, devida à insuficiência de coleta de lixo domiciliar e fatores culturais, é responsável por um grande volume de emissão de particulados (Oliveira, 2004). Além disso, a predominância de vias não pavimentadas nessas regiões também contribui para a emissão de particulados por ressuspensão.

Uma elevada espessura óptica de aerossol também pode ser observada sobre o Aeroporto Internacional Tom Jobim nas três imagens sem nuvens. Este resultado faz muito sentido, devido à grande circulação de veículos automotores no local, a queima de combustível dos próprios aviões, a ressuspensão do solo causada por seu movimento e o gasto dos freios. No entanto, a proximidade do mar e a falta do uso de uma máscara de corpos d'água tornam impossível afirmar que a espessura óptica observada é decorrente da concentração de particulados.

Além dessas áreas, a região central da cidade do Rio de Janeiro também apresenta alta espessura óptica de aerossol. O enorme fluxo de veículos e a presença do Aeroporto Santos Dumont e do Porto do Rio de Janeiro justificam esse resultado.



## Capítulo VI. Conclusões

A realização deste trabalho foi um primeiro passo em direção à análise da distribuição espacial do material particulado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) via sensoriamento remoto. Os resultados mostram que a Bacia Aérea III é a região mais intensamente afetada pelos aerossóis, ratificando as informações obtidas pelas estações de monitoramento da FEEMA.

Pode-se também observar uma elevada espessura óptica de aerossol nas regiões próximas a Jacarepaguá (Bacia II), Campo Grande (Bacia I) e São Gonçalo (Bacia IV).

Além de ter ficado clara a relação entre a presença de indústrias e a geração de material particulado, pôde-se perceber também que os locais habitados predominantemente por população de baixa renda são os mais afetados pela alta concentração de MP. Este fato deve-se, em parte, ao fato de que a maioria das indústrias se localiza nessas regiões, mas assinala também a influência da cultura de queima de lixo na emissão dos particulados. Este resultado aponta para a importância da coleta de lixo domiciliar e faz uma conexão entre a poluição por resíduos sólidos e a poluição atmosférica.

Adicionalmente, foi possível obter informação sobre a concentração de particulados nos bairros de Manguinhos e Campo Grande, que apresentaram elevada espessura óptica de aerossol e não são monitorados pela FEEMA.

Os objetivos de compreensão do funcionamento e utilização tanto do *software* SBDART, quanto do algoritmo de obtenção de espessura óptica com resolução espacial de 1 km foram plenamente atingidos, sendo possível, inclusive, a efetuação de modificações no algoritmo que diminuíram seu tempo de processamento.

### VI.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

Uma campanha para caracterização das propriedades ópticas das partículas da RMRJ e o desenvolvimento de uma máscara de corpos d'água para a região ficam como sugestões para trabalhos futuros. Estes trabalhos podem melhorar muito os resultados obtidos no presente estudo.

Outro estudo importante a ser feito é a obtenção da concentração de particulados em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , a partir da espessura óptica de aerossol encontrada na RMRJ,

facilitando a comparação entre os valores obtidos via sensoriamento remoto e estações fixas de monitoramento.

Também fica como sugestão a realização de estudos comparativos: entre as concentrações médias de material particulado nas estações do verão e inverno; e entre as informações obtidas pelos MODIS a bordo das plataformas EOS-Terra e EOS-Aqua, com passagens pela RMRJ pela manhã e à tarde, respectivamente.

## Referências Bibliográficas

- BRASIL. Lei nº6.938, de 31 de agosto de 1981, art.3º. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/CCIVIL/LEIS/L6938compilada.htm> (acessado em março de 2008). 1981.
- 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*. Tese de Doutorado, Instituto de Física da Universidade de São Paulo, p. 24, 27, 44, 59, 61, 62, 65, 85, 127. 2005.
- FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do meio Ambiente), *Inventário de Fontes Emissoras de Poluentes Atmosféricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro*, p. 2-11, 2004.
- FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do meio Ambiente), *Relatório Anual da Qualidade do Ar*, p.1, 3, 4, 9, 10, 11, 38, 40. 2007.
- FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do meio Ambiente), *Qualidade do Ar*. Disponível em <http://www.feema.rj.gov.br/qualidade-ar.asp?cat=65> (acessado em janeiro de 2008). 2008a.
- FEEMA (Fundação Estadual de Engenharia do meio Ambiente), *Rede de Monitoramento da Qualidade do Ar*. Disponível em <http://www.feema.rj.gov.br/estacoes-ar.asp?cat=65> (acessado em janeiro de 2008). 2008b.
- GOOGLE MAPS, website de consulta de mapas do Google. Disponível em <http://maps.google.com.br/> (acessado em março de 2008). 2008.
- ICESS, (Institute for Computational Earth System Science, University of California, Santa Barbara, *Introduction to SBDART*. Disponível em [http://www.icesb.ucsb.edu/esrg/pauls\\_dir/](http://www.icesb.ucsb.edu/esrg/pauls_dir/) (acessado em fevereiro de 2008). 2008.
- INCROPERA, F. P., WITT, D. P., *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, LTC, Rio de Janeiro, 3ª Ed, p.322, 328. 1992.

- KAUFMAN, Y. J. et al. *The MODIS 2.1 $\mu$ m channel – Correlation with visible reflectance for use with remote sensing of aerosol*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, p. 1289. 1997.
- KAUFMAN, Y. J., TANRÉ, D., BOUCHER, O., *A satellite view of aerosols in the climate system*, Nature, p. 220. 2002.
- KING, M. D. et al. *Cloud and Aerosol Properties, Precipitable Water and Profiles of Temperature and Water Vapor from MODIS*, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 41, n. 2, p. 442-444. 2003.
- LIU, K.N., *An Introduction to atmospheric radiation*, Academic Press, New York, p. 392. 1980.
- MMA (Ministério do Meio Ambiente), CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), Resolução nº 003 de 28 de junho de 1990.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), MODIS Bands. Disponível em [http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/ATM/solar\\_tn.gif](http://modarch.gsfc.nasa.gov/MODIS/ATM/solar_tn.gif) (acessado em novembro de 2006). 2006.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), *MODIS Terra and Aqua Daily Level-3 Data*. Disponível em [http://disc1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance\\_id=MODIS\\_DAILY\\_L3](http://disc1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=MODIS_DAILY_L3) (acessado em janeiro de 2008). 2008a.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), *Visible Earth*. Disponível em <http://visibleearth.nasa.gov/> (acessado em janeiro de 2008). 2008b
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), *Langley Research Center*. Disponível em <http://www.nasa.gov/centers/langley/science/FIRST.html> (acessado em março de 2008). 2008c
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), *MODIS Specifications*. Disponível em <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php> (acessado em janeiro de 2008). 2008d
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), *MODIS-Atmosphere: Images: LIB Granule Images*. Disponível em <http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/images/> (acessado em março de 2008). 2008e.

- NASA (National Aeronautics and Space Administration), *LAADS Web (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System)*. Disponível em <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/> (acessado em março de 2008). 2008f.
- OLIVEIRA, J. L. F., *Análise espacial e modelagem atmosférica: contribuições ao gerenciamento da qualidade do ar da Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Tese de Doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 76, 77, 80. 2004
- PROCÓPIO, A. S.. *Forçante radiativa direta dos aerossóis na Região Amazônica devido à queima de biomassa*. Tese de Doutorado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, p. 47, 48, 53, 54, 57. 2005.
- RICCHIAZZI, P. et al. *SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere*. Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 79, n. 10, p. 2101. 1998.
- SEINFELD, J.H. e PANDIS, S.N., *Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, New York. 1998.
- UNIVERCIDADE. *Greenmap Rio*. Disponível em <http://www.univercidade.br/greenmaprio/lugares/bahiapt.htm> (acessado em março de 2008). 2008.
- UW-Stout (University of Wisconsin-Stout), Physics Department, Disponível em <http://www.uwstout.edu/> (acessado em março de 2008). 2008.

## APÊNDICE A

### Tabelas utilizadas para elaboração dos gráficos do item I.V.I.

*Tabela A.1, referente à Figura I.5: (a) Total de emissões por tipo de fonte e (b) emissão de MP<sub>10</sub> por tipo de fonte.*

*Taxa anual de emissão de poluentes para fontes móveis e fontes fixas (FEEMA, 2004).*

Fontes	Taxa de Emissão de Poluente (*1000 ton/ano)					
	MP <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	HC	Total
<b>Fixas</b>	10,6	55,8	30,3	6,3	25,9	128,9
<b>Móveis</b>	7,8	7,5	60,2	314,7	53,4	443,6
<b>Total</b>	18,4	63,3	90,5	321	79,3	572,5

*Tabela A.2, referente à Figura I.7: (a) Total de emissões por tipologia industrial e (b) emissão de MP<sub>10</sub> por tipologia industrial.*

*Taxa anual de emissão de poluentes por tipologia industrial (Tabela adaptada de FEEMA, 2004).*

Tipo de Indústria	Taxa de Emissão de Poluente (*1000ton/ano)					
	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	HC	MP <sub>10</sub>	Total
<b>Fumo</b>	0,01	0	0	0	0	0,01
<b>Naval</b>	0,02	0	0	0	0,01	0,03
<b>Lavanderia</b>	0,15	0,07	0,01	0	0,01	0,24
<b>Diversos</b>	0,13	0,17	0,02	0,01	0,02	0,35
<b>Papel</b>	0,29	0,1	0,01	0	0,02	0,42
<b>Cimenteira</b>	0,18	0,18	0,09	0,01	0,07	0,53
<b>Têxtil</b>	0,42	0,17	0,08	0,01	0,04	0,72
<b>Farmacêutica</b>	0,34	0,24	0,09	0,01	0,06	0,74
<b>Vidro</b>	0,34	0,67	0,04	0,02	0,13	1,2
<b>Asfalto</b>	0,22	0,19	0,61	0,18	0,12	1,32
<b>Metalúrgica</b>	0,29	0,6	0,18	0,03	0,64	1,74
<b>Alimentícia</b>	1,32	0,78	0,25	0,04	0,17	2,56
<b>Química</b>	0,87	0,98	0,29	2,19	0,5	4,83
<b>Cerâmica</b>	2,66	0,6	2,14	0,03	1,27	6,7
<b>Geração de Energia</b>	20,37	14,02	0,47	0,12	5,4	40,38
<b>Petroquímica</b>	28,16	11,49	2,11	23,19	2,12	67,07
<b>Total Geral</b>	55,76	30,27	6,38	25,85	10,58	128,84

Tabela A.3, referente à Figura I.8: (a) Total de emissões por via de tráfego e (b) emissão de  $MP_{10}$  por via de tráfego.

Contribuição percentual da emissão de poluentes entre as principais vias de tráfego (Tabela adaptada de FEEMA, 2004).

Nome da Via	Contribuição percentual de poluente (%)					
	MP <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	HC	Total (%)
<b>Linha Amarela</b>	*	1,9	1,9	2,5	2,5	1,8
<b>Av. Ayrton Sena</b>	*	2,2	1,8	2,9	2,9	2,0
<b>Ponte Rio - Niterói</b>	1,9	3,2	2,7	3,9	3,9	3,1
<b>Linha Vermelha</b>	3,1	3,4	3,8	2,8	2,8	3,2
<b>Rod. Pres. Dutra</b>	5,5	2,9	3,4	2,6	2,2	3,3
<b>Rod. Washington Luís</b>	2,9	3,9	4,2	3,5	3,5	3,6
<b>Av. das Américas</b>	5,7	9,6	7,9	12,2	12,3	9,5
<b>Av. Brasil</b>	22,9	30,0	33,4	25,3	25,2	27,4
<b>Demais Vias</b>	58,0	42,9	40,9	44,3	44,7	46,2

## APÊNDICE B

### Propriedades ópticas espectrais dos aerossóis da Região Metropolitana de São Paulo (Extraído de Castanho, 2005).

*Tabela B.1: Propriedades ópticas espectrais do modelo de aerossol 1*

Comprimento de Onda	Albedo Simples	Parâmetro de Assimetria	Eficiência			
			Extinção	Espalhamento	Esp Traseiro	Absorção
$\lambda$ (nm)	wo	g	Qext	Qesp	Qespra	Qabs
200	0,832	0,792	2,044	1,702	0,0146	0,3427
220	0,83	0,778	1,834	1,522	0,0117	0,3115
242	0,825	0,765	1,637	1,35	0,0086	0,287
266	0,817	0,747	1,428	1,166	0,0114	0,2622
293	0,809	0,727	1,242	1,005	0,0094	0,2371
322	0,799	0,709	1,078	0,861	0,0082	0,2168
354	0,786	0,687	0,9185	0,7221	0,0088	0,1964
390	0,773	0,663	0,7817	0,6045	0,0079	0,1772
429	0,758	0,641	0,6651	0,5045	0,0074	0,1607
440	0,754	0,635	0,6362	0,4797	0,0075	0,1565
472	0,748	0,617	0,5672	0,424	0,0077	0,1432
500	0,743	0,603	0,5166	0,3837	0,0074	0,1328
519	0,74	0,595	0,4861	0,3595	0,0071	0,1266
550	0,735	0,582	0,4436	0,3261	0,0071	0,1175
571	0,732	0,576	0,4168	0,3053	0,0069	0,1116
628	0,725	0,559	0,3571	0,259	0,0068	0,0981
670	0,721	0,552	0,3216	0,2319	0,0064	0,0897
691	0,717	0,548	0,3075	0,2203	0,0061	0,0871
760	0,699	0,543	0,2683	0,1876	0,0056	0,0807
835	0,682	0,541	0,2357	0,1609	0,0053	0,0749
919	0,673	0,545	0,211	0,142	0,0046	0,069
1011	0,668	0,548	0,1908	0,1275	0,0043	0,0633
1112	0,655	0,561	0,1665	0,109	0,0038	0,0575
1223	0,646	0,588	0,1485	0,096	0,003	0,0525
1345	0,641	0,613	0,1332	0,0854	0,0025	0,0479
1480	0,636	0,633	0,1197	0,0761	0,0023	0,0436
1628	0,638	0,657	0,1105	0,0705	0,0017	0,04
1791	0,643	0,678	0,1027	0,066	0,0015	0,0367
1970	0,647	0,692	0,0949	0,0614	0,0015	0,0335
2167	0,657	0,705	0,0894	0,0587	0,0011	0,0307
2622	0,676	0,723	0,0795	0,0538	0,001	0,0258
2884	0,687	0,728	0,0754	0,0518	0,0008	0,0236
3173	0,695	0,728	0,0714	0,0497	0,0008	0,0218



*Tabela B.2: Propriedades ópticas espectrais do modelo de aerossol 2*

Comprimento de Onda $\lambda$ (nm)	Albedo Simples wo	Parâmetro de Assimetria g	Eficiência			
			Extinção Qext	Espalhamento Qesp	Esp Traseiro Qesptra	Absorção Qabs
200	0.864	0.786	24160	20860	0.0193	0.3293
220	0.864	0.774	21890	18910	0.0186	0.2978
242	0.862	0.764	19930	17180	0.0113	0.2754
266	0.856	0.748	17620	15090	0.0157	0.2535
293	0.852	0.731	15420	13140	0.0136	0.2282
322	0.845	0.716	13560	11470	0.0104	0.2097
354	0.836	0.695	11630	9715	0.0117	0.1911
390	0.827	0.674	9921	8202	0.0104	0.1719
429	0.816	0.653	8482	6917	0.0094	0.1565
440	0.812	0.648	8115	6590	0.0093	0.1525
472	0.807	0.631	7181	5793	0.0096	0.1388
500	0.804	0.618	6510	5233	0.0094	0.1277
519	0.802	0.610	6110	4898	0.0090	0.1212
550	0.799	0.597	5529	4417	0.0088	0.1112
571	0.796	0.590	5177	4122	0.0086	0.1055
628	0.792	0.572	4376	3466	0.0085	0.0910
670	0.790	0.565	3931	3106	0.0079	0.0825
691	0.786	0.562	3736	2936	0.0076	0.0800
760	0.772	0.554	3222	2488	0.0071	0.0734
835	0.758	0.550	2790	2113	0.0066	0.0676
919	0.749	0.555	2478	1857	0.0058	0.0621
1011	0.745	0.560	2213	1648	0.0055	0.0565
1112	0.732	0.570	1922	1407	0.0049	0.0515
1223	0.726	0.596	1724	1251	0.0040	0.0473
1345	0.721	0.619	1550	1117	0.0034	0.0433
1480	0.716	0.636	1393	997	0.0032	0.0396
1628	0.718	0.659	1297	932	0.0025	0.0365
1791	0.723	0.679	1210	875	0.0020	0.0335
1970	0.727	0.691	1122	815	0.0022	0.0307
2167	0.735	0.703	1066	784	0.0017	0.0282
2622	0.752	0.719	0963	723	0.0016	0.0239
2884	0.762	0.723	0922	702	0.0014	0.0220
3173	0.769	0.722	0883	679	0.0014	0.0204

*Tabela B.3: Propriedades ópticas espectrais do modelo de aerossol 3*

Comprimento de Onda $\lambda$ (nm)	Albedo Simples wo	Parâmetro de Assimetria g	Eficiência			
			Extinção Qext	Espalhamento Qesp	Esp Traseiro Qespra	Absorção Qabs
200	0.898	0.785	24670	22160	0.0231	0.2507
220	0.899	0.775	22460	20190	0.0214	0.2265
242	0.898	0.766	20500	18400	0.0135	0.2091
266	0.894	0.752	18170	16250	0.0186	0.1924
293	0.892	0.737	15990	14250	0.0151	0.1733
322	0.887	0.723	14090	12490	0.0116	0.1592
354	0.880	0.704	12090	10640	0.0136	0.1450
390	0.874	0.685	10360	9055	0.0116	0.1306
429	0.866	0.667	8868	7678	0.0104	0.1190
440	0.863	0.662	8483	7323	0.0102	0.1160
472	0.859	0.645	7510	6449	0.0106	0.1061
500	0.855	0.634	6806	5819	0.0101	0.0987
519	0.853	0.626	6400	5459	0.0097	0.0941
550	0.849	0.615	5784	4911	0.0092	0.0873
571	0.847	0.607	5420	4588	0.0091	0.0832
628	0.840	0.591	4578	3847	0.0089	0.0731
670	0.836	0.583	4098	3428	0.0083	0.0670
691	0.833	0.579	3906	3252	0.0079	0.0654
760	0.820	0.568	3353	2751	0.0073	0.0602
835	0.808	0.564	2895	2339	0.0069	0.0557
919	0.799	0.565	2558	2043	0.0062	0.0515
1011	0.793	0.566	2270	1800	0.0057	0.0470
1112	0.783	0.575	1965	1538	0.0051	0.0427
1223	0.777	0.596	1758	1366	0.0043	0.0392
1345	0.772	0.616	1569	1211	0.0035	0.0358
1480	0.769	0.634	1410	1084	0.0035	0.0326
1628	0.770	0.656	1305	1005	0.0026	0.0300
1791	0.773	0.674	1212	0937	0.0023	0.0275
1970	0.776	0.688	1125	0873	0.0023	0.0252
2167	0.783	0.701	1062	0832	0.0019	0.0231
2622	0.796	0.717	0953	0758	0.0016	0.0195
2884	0.803	0.721	0908	0729	0.0014	0.0179
3173	0.809	0.719	0863	0698	0.0015	0.0165

*Tabela B.4: Propriedades ópticas espectrais do modelo de aerossol 4.*

Comprimento de Onda $\lambda$ (nm)	Albedo Simples wo	Parâmetro de Assimetria g	Eficiência			
			Extinção Qext	Espalhamento Qesp	Esp Traseiro Qespra	Absorção Qabs
200	0.931	0.778	25690	23920	0.0286	0.1764
220	0.932	0.769	23450	21860	0.0278	0.1593
242	0.932	0.761	21550	20080	0.0175	0.1470
266	0.929	0.748	19200	17840	0.0231	0.1355
293	0.928	0.735	16960	15740	0.0188	0.1217
322	0.926	0.723	15040	13920	0.0142	0.1119
354	0.921	0.705	12970	11940	0.0168	0.1023
390	0.918	0.689	11180	10260	0.0139	0.0920
429	0.913	0.673	0.9626	0.8788	0.0122	0.0838
440	0.911	0.669	0.9223	0.8406	0.0120	0.0817
472	0.908	0.654	0.8171	0.7417	0.0126	0.0753
500	0.906	0.645	0.7439	0.6738	0.0119	0.0701
519	0.905	0.639	0.7024	0.6354	0.0114	0.0670
550	0.902	0.629	0.6376	0.5750	0.0107	0.0626
571	0.899	0.623	0.5972	0.5369	0.0107	0.0603
628	0.894	0.608	0.5053	0.4520	0.0102	0.0534
670	0.892	0.602	0.4570	0.4077	0.0095	0.0493
691	0.890	0.599	0.4349	0.3872	0.0091	0.0477
760	0.882	0.590	0.3733	0.3291	0.0084	0.0442
835	0.874	0.584	0.3208	0.2804	0.0078	0.0404
919	0.869	0.584	0.2839	0.2466	0.0071	0.0373
1011	0.865	0.583	0.2515	0.2175	0.0065	0.0340
1112	0.858	0.585	0.2166	0.1858	0.0058	0.0308
1223	0.854	0.602	0.1935	0.1652	0.0052	0.0283
1345	0.850	0.616	0.1713	0.1456	0.0041	0.0257
1480	0.847	0.627	0.1522	0.1289	0.0043	0.0233
1628	0.847	0.644	0.1400	0.1186	0.0032	0.0214
1791	0.849	0.659	0.1289	0.1094	0.0027	0.0195
1970	0.849	0.671	0.1186	0.1007	0.0030	0.0179
2167	0.854	0.684	0.1112	0.0950	0.0024	0.0162
2622	0.862	0.699	0.0983	0.0848	0.0021	0.0136
2884	0.867	0.703	0.0933	0.0809	0.0018	0.0124
3173	0.870	0.702	0.0881	0.0767	0.0020	0.0115

*Tabela B.5: Propriedades ópticas espectrais do modelo de aerossol 5.*

Comprimento de Onda $\lambda$ (nm)	Albedo Simples wo	Parâmetro de Assimetria g	Eficiência			
			Extinção Qext	Espalhamento Qesp	Esp Traseiro Qespra	Absorção Qabs
200	0.974	0.776	26090	25410	0.0365	0.0681
220	0.974	0.769	23850	23230	0.0318	0.0615
242	0.974	0.761	21820	21250	0.0217	0.0567
266	0.973	0.748	19330	18810	0.0277	0.0518
293	0.973	0.736	17110	16640	0.0221	0.0467
322	0.972	0.724	15090	14670	0.0171	0.0428
354	0.970	0.708	12970	12580	0.0204	0.0391
390	0.969	0.693	11160	10810	0.0154	0.0348
429	0.967	0.676	0.9561	0.9243	0.0144	0.0317
440	0.966	0.672	0.9156	0.8846	0.0134	0.0311
472	0.964	0.658	0.8089	0.7800	0.0144	0.0289
500	0.964	0.649	0.7370	0.7101	0.0133	0.0269
519	0.962	0.643	0.6936	0.6675	0.0140	0.0261
550	0.961	0.632	0.6267	0.6023	0.0115	0.0244
571	0.960	0.626	0.5887	0.5649	0.0124	0.0237
628	0.957	0.612	0.4976	0.4764	0.0118	0.0212
670	0.955	0.605	0.4488	0.4288	0.0117	0.0200
691	0.955	0.602	0.4262	0.4069	0.0105	0.0193
760	0.952	0.592	0.3636	0.3461	0.0097	0.0175
835	0.950	0.588	0.3131	0.2973	0.0090	0.0158
919	0.948	0.586	0.2782	0.2636	0.0089	0.0146
1011	0.947	0.582	0.2479	0.2348	0.0078	0.0131
1112	0.944	0.583	0.2131	0.2012	0.0069	0.0119
1223	0.943	0.599	0.1915	0.1806	0.0068	0.0109
1345	0.941	0.612	0.1695	0.1595	0.0052	0.0100
1480	0.942	0.625	0.1510	0.1423	0.0054	0.0088
1628	0.942	0.641	0.1402	0.1320	0.0044	0.0082
1791	0.944	0.657	0.1301	0.1227	0.0034	0.0073
1970	0.943	0.668	0.1209	0.1141	0.0043	0.0068
2167	0.947	0.682	0.1137	0.1077	0.0032	0.0060
2622	0.951	0.694	0.1017	0.0967	0.0027	0.0050
2884	0.953	0.697	0.0970	0.0924	0.0025	0.0046
3173	0.954	0.693	0.0920	0.0877	0.0030	0.0043

## APÊNDICE C

### **Resumo aceito no simpósio internacional IRS2008 - International Radiation Symposium/2008.**

*IRS 2008, 03-08 august, 2008, Foz do Iguaçu*

*Session E: General Remote Sensing*

#### **A Study of the Spatial Distribution of Aerosol Optical Thickness in Rio de Janeiro**

Moema Martins (EQ/UFRJ); Aline S. Procópio (EQ /UFRJ); Andrea D. A. Castanho (MIT); Marcelo L. D. Lanza (DEL/UFRJ)

The Rio de Janeiro Metropolitan Region (RJMR) has the second largest concentration of people, vehicles, industries and other air pollutant sources of Brazil, suffering from chronic air pollution problems. The air quality monitoring net operated by FEEMA (Environmental Engineering State Foundation) performs continuous surface measurements of gaseous pollutants and aerosols, as well as meteorological parameters in various points of the region. Results show that the aerosols concentrations are higher than the standard upper limits in most of the sites sampled. A high resolution (1x1 km) spatial distribution of aerosols over the RJMR was obtained based on reflectance measured by MODIS (Moderate Resolution Spectrometer) sensors, on board of EOS-Terra and EOS-Aqua platforms, operated by NASA/GSFC. Aerosol optical thicknesses were retrieved from these measurements using the software SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer Model) and an algorithm developed in a previous study. By now, no studies have been made to characterize the aerosol optical properties from the RJMR atmosphere. Therefore, aerosols models from the Sao Paulo Metropolitan Region were assumed as an approximation. These properties have been obtained in a previous study using photometers measurements of AERONET (Aerosol Robotic Network) operated by NASA. Aerosol optical thickness images with 1 x 1 km resolution were obtained over the RJMR, providing a more effective characterization of the aerosol distribution in the area. This study intends to complement the information obtained by FEEMA, providing a tool for the aerosol monitoring in the RJMR, as well as for the development of emissions managing and controlling strategies.