



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-15203-TDI/1303**

**APLICAÇÃO DE IMAGENS ASTER NO ESTUDO DO AMBIENTE  
URBANO DE SÃO PAULO E RIO DE JANEIRO**

Marcus Andre Fuckner

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelas Dr<sup>as</sup> Teresa Gallotti Florenzano e Elisabete Caria Moraes, aprovada em  
3 de outubro de 2007.

INPE  
São José dos Campos  
2008

Publicado por:

**esta página é responsabilidade do SID**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Gabinete do Diretor – (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 – CEP 12.245-970

São José dos Campos – SP – Brasil

Tel.: (012) 3945-6911

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: [pubtc@sid.inpe.br](mailto:pubtc@sid.inpe.br)

**Solicita-se intercâmbio  
We ask for exchange**

**Publicação Externa – É permitida sua reprodução para interessados.**



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-15203-TDI/1303**

**APLICAÇÃO DE IMAGENS ASTER NO ESTUDO DO AMBIENTE  
URBANO DE SÃO PAULO E RIO DE JANEIRO**

Marcus Andre Fuckner

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,  
orientada pelas Dr<sup>as</sup> Teresa Gallotti Florenzano e Elisabete Caria Moraes, aprovada em  
3 de outubro de 2007.

INPE  
São José dos Campos  
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

F951a Fuckner, Marcus Andre  
Aplicação de imagens ASTER no estudo do ambiente urbano de  
São Paulo e Rio de Janeiro / Marcus Andre Fuckner. – São José dos  
Campos: INPE, 2007.  
230p. ; (INPE-15203-TDI/1303)

1.ASTER. 2.São Paulo. 3.Rio de Janeiro.  
4.Modelo digital de elevação. 5.Ilha urbana de calor. 6.MESMA.  
7.Qualidade do ar. 8.Uso do solo. I.Título.

---

CDU 528.711.7

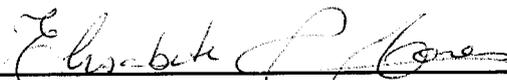
Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de Mestre em  
Sensoriamento Remoto

Dra. Claudia Maria de Almeida



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Elisabete Caria Moraes



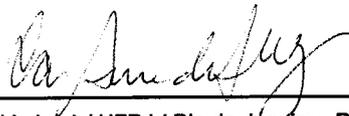
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Teresa Gallotti Florenzano



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Carla Bernadete Madureira Cruz



Convidado(a) / UFRJ / Rio de Janeiro - RJ

Dr. Carlos Roberto de Souza Filho



Convidado(a) / UNICAMP / Campinas - SP

Aluno (a): Marcus Andre Fuckner

São José dos Campos, 03 de Outubro de 2007



***“No Princípio criou Deus os céus e a Terra. (...)  
E disse Deus: Haja luz. E houve luz.”  
Gênesis 1:1 e 3.***



## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, proteção e salvação.

À família, principalmente ao meu pai Edílio e minha mãe Enilce, pelas incessantes orações e pelo apoio sempre, mesmo a quase 4 mil km de distância! Sei que vocês se orgulham de mim!

Às orientadoras Teresa e Bete! Desde o tempo em que planejei estudar no INPE, vocês acreditaram em mim e aceitaram meus ideais para o mestrado. Além disso, me ajudaram na saúde e na doença.

À Grande Família LTID, por me agüentarem importunando sem parar: André, Camila, Daniela, Delano, Dênis, Pablo e Taise.

Ao Pablo, ao Dênis e ao André também pela ajuda no aprendizado de *software*.

Ao Emerson e à Isabela, pelas dicas para o processo de seleção.

Etel, você simpática e companheira como sempre não poderia ficar sem receber um agradecimento especial. Ao apoio da Vera também agradeço.

A todos os colegas da turma do mestrado – e porque não, embora poucos – e do doutorado de 2005. Amo todos vocês e sinto muita saudade!

A todos os professores do curso. Realmente vestem a camisa e não dão trégua para o pessoal! Valeu!

Ao Professor Lênio Galvão, pelo apoio na execução da pesquisa com a ferramenta *AsterDTM*.

Ao Camilo, pelo apoio junto à UCSB para obter informações sobre o MESMA.

Ao Kerry Halligan, pelas dúvidas sanadas sobre o *VIPER Tools* e, inclusive, pela divulgação de meu trabalho em evento internacional.

À Rebecca Powell, por partilhar comigo sua experiência com o MESMA.

À Cláudia Almeida e ao Yosio, pelas contribuições no exame da proposta de dissertação que levaram ao bom delineamento da pesquisa. Em parte fui desobediente, e consegui cumprir o que queria!

Aos professores Cláudia Almeida (INPE), Carla Cruz (UFRJ) e Carlos Roberto de Souza Filho (UNICAMP), membros da banca final, por me ajudarem na construção de um trabalho melhor.

Carlos Roberto, a você agradeço também pelas respostas a questionamentos sobre o ASTER e pela oportunidade de acesso gratuito às imagens.

À Igreja Adventista do Sétimo Dia, pela educação cristã ética e empreendedora, bases sólidas para uma vida plena não apenas neste mundo.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos concedida durante dezesseis meses de curso. À OBTE pelo apoio durante o período sem bolsa.

À CAPES, pelo fomento aos trabalhos de campo e publicação em eventos científicos através de seus programas regulares para a pós-graduação.

À CETESB, por sua política de distribuição aberta de dados. Em especial, agradeço o apoio de Maria Lúcia Guardani e Jesuíno Romano.

À FEEMA, em especial à Alzira Gomes da Silva. Alzira, você não cansou de responder minhas mensagens perguntando inúmeras coisas. Muito obrigado!

À SMAC, pelas informações prestadas e dados cedidos.

À Universidade de São Paulo, por disponibilizar dados meteorológicos da estação do IAG.

À Prefeitura do Município de São Paulo, pela acessibilidade a dados demográficos em seu portal e a arquivos vetoriais da Divisão de Processamento de Dados da Secretaria Municipal de Planejamento.

À Prefeitura do Município do Rio de Janeiro. Através da Diretoria de Informações Geográficas do Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos o Rio de Janeiro possui uma excelente ferramenta de consulta: o portal *Armazém de Dados*.

Ao Sistema de Proteção da Amazônia, pela oportunidade de crescimento profissional.

E, sobretudo ao INPE, pela sólida formação recebida e pela integridade da instituição, que a ela concede cada vez mais láureas.

## RESUMO

Imagens de sensoriamento remoto constituem a base de dados para estudos urbanos, envolvendo elementos físicos, biológicos e antrópicos do ambiente. O objetivo deste trabalho foi explorar o potencial de aplicação de imagens ASTER/Terra no estudo ambiental de um setor de duas regiões metropolitanas: São Paulo (SP) e Rio de Janeiro (RJ), os maiores aglomerados urbanos do Brasil. Avaliou-se o uso dos algoritmos FLAASH, ISAC, *AsterDTM* e *VIPER Tools* no processamento de imagens de duas datas de cada área de estudo. As técnicas e formas de análise dos resultados adotadas se mostraram viáveis para estudos de mesoescala e para a geração de subsídios ao Planejamento Urbano e Regional. Foram gerados modelos digitais de elevação (MDE) e imagens de reflectância e de temperatura (aparente e da superfície), aplicaram-se modelos de mistura espectral e analisou-se a correlação de dados das imagens com dados de poluição do ar. Os MDEs obtidos apresentaram alta correlação com o mapa topográfico de referência, entretanto, foi necessário o ajuste dos resultados, pois seus valores foram em média 20 m inferiores aos de referência. A agregação de dados SRTM ao processamento se mostrou outra possibilidade factível para minimizar estes erros. Através das imagens de temperatura foi possível detectar a presença tanto de ilhas de calor quanto de “ilhas de frio” no espaço intra-urbano, considerando os dois métodos utilizados: Normalização da Emissividade e Banda de Referência. Para decompor a mistura espectral das imagens através de um Modelo de Múltiplos Componentes (MESMA), foram selecionados espectros representativos das categorias Vegetação, Superfícies Impermeáveis e Solo (V-I-S). As imagens-fração vegetação obtidas foram semelhantes ao inverso das imagens-fração de superfícies impermeáveis e solo, que foram agrupados devido à confusão espectral. Foi necessária a construção de bibliotecas espectrais específicas para cada área e data com criteriosa seleção de componentes. Divergindo dos resultados apresentados na bibliografia, não foi verificada alta correlação entre a concentração de material particulado e os dados das imagens. Isto pode ser justificado pela baixa densidade de estações de monitoramento da qualidade do ar, por sua localização inadequada, ou por particularidades das imagens de sensores remotos. Após a obtenção destes resultados foram selecionados planos de informação (classes de uso e ocupação do solo) de mapas da Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A e da Secretaria de Meio Ambiente do Rio de Janeiro. Foi analisado o comportamento da média e do desvio padrão da altitude, temperatura e frações mapeadas por classe, bem como realizada uma análise integrada dos resultados através do índice de correlação. A análise mostrou que a altitude, as frações mapeadas e o uso do solo influenciam a temperatura da superfície. Os resultados por classe indicaram um aquecimento de 3 a 4°C em São Paulo e de 6°C no Rio de Janeiro. Para a maioria dos casos, o sentido da correlação e o *ranking* por classe permaneceram inalterados, o que permitiu concluir que a relação entre as variáveis se mantém.



## **ASTER IMAGE APPLICATION IN THE URBAN ENVIRONMENTAL STUDY OF SAO PAULO AND RIO DE JANEIRO**

### **ABSTRACT**

Remote Sensing images are a database for urban studies involving physical, biological and human elements of the environment. The objective of this study is to explore Terra/ASTER images applied to an environmental study of a sector from two Metropolitan Regions: Sao Paulo (SP) and Rio de Janeiro (RJ), the largest urban areas of Brazil. The FLAASH, ISAC, *AsterDTM* and *VIPER TOOLS* algorithms were evaluated for the processing of study area images in two different dates. The techniques used and the analysis of results are an important contribution to urban medium scale studies and to regional and urban planning. The Digital Elevation Model (DEM), top of the atmosphere and surface reflectance, and brightness and surface temperature images were obtained. The spectral mixture model was applied and the correlation between spectral data and air pollution data were analyzed. The DEM obtained showed high correlation with the topographic reference map. However, it was necessary to make adjustments to the results obtained because there were 20 meters less than the reference data. Another possibility for correction of this problem was integration with SRTM data. From the temperature images, using both methods (Emissivity Normalization and Reference Channel), it was possible to detect the urban heat islands as well "urban cold islands". In order to unmix the spectral data, the Multiple Endmember Spectral Mixture Model (MESMA) was used. To perform this unmixing, the representative spectra of the following categories were selected: vegetation, impervious surfaces and soil (V-I-S). The vegetation fraction images are similar to inverse the impervious surface and soil fraction images. Due to this spectral confusion, impervious surface and soil were grouped together. In this sense, it is necessary for each study area and date to set up specific spectral libraries. In contrast to the results obtained in other studies, the correlation between spectral data and particulate matter was not high. The low density of the automatic air quality monitoring stations, their inadequate localization, and the remote sensing image characteristics can explain this result. The layers of the land cover/land use, along with information obtained from reference maps made by the Metropolitan Planning Agency (SP) and the Municipal Environment Agency (RJ), were selected. The mean and the standard deviation of the altitude, temperature and physical fractions mapped per class were analyzed. The integrated analysis of the results was carried out using a correlation index. This analysis showed that the temperature was influenced by altitude, the fractions mapped and the land use. The results obtained per class showed warming around 3 to 4°C in Sao Paulo, and 6°C in Rio de Janeiro. In most cases the correlation and the ranking per class did not change. We concluded that the relation among variables is stable.



## SUMÁRIO

**Pág.**

### **LISTA DE FIGURAS**

### **LISTA DE TABELAS**

### **LISTA DE SÍMBOLOS**

### **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>27</b>
1.1 Motivação .....	27
1.2 O Sistema Sensor ASTER .....	30
1.3 Objetivos .....	34
1.4 Estrutura do Trabalho .....	35
<b>2 ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>39</b>
<b>3 PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO</b> .....	<b>55</b>
3.1 Introdução .....	55
3.2 Material e Métodos .....	57
3.3 Resultados e Discussão .....	61
3.4 Avaliação dos Modelos de Elevação .....	67
3.5 Conclusões .....	75
<b>4 ESTUDO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE</b> .....	<b>77</b>
4.1 Introdução .....	77
4.2 Material e Métodos .....	84
4.3 Resultados e Discussão .....	90
4.4 Conclusões .....	103
<b>5 APLICAÇÃO DE MODELOS DE MISTURA ESPECTRAL</b> .....	<b>105</b>
5.1 Introdução .....	105
5.2 Material e Métodos .....	109
5.3 Resultados e Discussão .....	127
5.4 Conclusões .....	142
<b>6 SENSORIAMENTO REMOTO E QUALIDADE DO AR</b> .....	<b>147</b>
6.1 Introdução .....	147
6.2 Sensoriamento Remoto em Estudos de Qualidade do Ar .....	153
6.3 Material e Métodos .....	155
6.4 Resultados e Discussão .....	169
6.5 Conclusões .....	179

<b>7 ANÁLISE INTEGRADA DO AMBIENTE URBANO .....</b>	<b>183</b>
7.1 Introdução .....	183
7.2 Material e Métodos .....	184
7.3 Resultados e Discussão .....	190
7.3.1 Análise da Média e Desvio Padrão.....	190
7.3.2 Análise de Correlação.....	203
7.4 Conclusões .....	211
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>215</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>219</b>

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Imagem ASTER (recorte) das cidades de São Paulo em 17/05/2006 (superior) e Rio de Janeiro em 02/09/2004 (inferior) adquirida por canais dos subsistemas VNIR (1), SWIR (4) e TIR (10).....	32
1.2 Comparação entre canais espectrais dos sensores ASTER e TM...	34
2.1 O mundo segundo o grupo de pesquisa Globalização e Cidades Mundiais (GaWC).....	40
2.2 Paisagens do meio urbano de São Paulo.....	44
2.3 Paisagens do meio urbano do Rio de Janeiro.....	46
2.4 População por distrito do município de São Paulo (1991 e 2000) e incremento populacional no período (%).....	47
2.5 População por bairro do município do Rio de Janeiro (1991 e 2000) e incremento populacional no período (%).....	48
2.6 Vista panorâmica da Baixada de Jacarepaguá.....	50
2.7 Localização das áreas de estudo.....	51
2.8 Municípios das áreas de estudo de São Paulo (esquerda) e Rio de Janeiro (direita).....	52
2.9 Exemplo de alteração na paisagem urbana de São Paulo.....	53
2.10 Exemplo de alteração na paisagem urbana do Rio de Janeiro.....	53
3.1 Imagem ASTER adquirida pelas bandas 3N e 3B para um recorte das áreas de estudo de São Paulo em 17/05/2006 (superior) e Rio de Janeiro em 02/09/2004 (inferior).....	57
3.2 Fluxograma metodológico.....	59
3.3 Imagens utilizadas em composição colorida R3G2B1.....	60
3.4 Modelos digitais de elevação em níveis de cinza. No detalhe, recorte espacial das áreas de estudo.....	61

3.5	Mapa hipsométrico da área de estudo de São Paulo.....	62
3.6	Perfil topográfico A-B representativo da área de estudo de São Paulo.....	63
3.7	Elementos da divisão territorial municipal de São Paulo sobrepostos ao mapa hipsométrico.....	63
3.8	Mapa hipsométrico da área de estudo do Rio de Janeiro.....	64
3.9	Representação tridimensional do modelo digital de elevação gerado para a imagem do Rio de Janeiro de 02/09/2004.....	65
3.10	Perfil topográfico A-B representativo da área de estudo do Rio de Janeiro.....	65
3.11	Elementos da divisão territorial municipal do Rio de Janeiro sobrepostos ao mapa hipsométrico.....	66
3.12	Mosaico de cartas topográficas. No detalhe, exemplo de ponto cotado.....	68
3.13	Localização das amostras selecionadas e respectivos valores de altitude (em metros) no mosaico de cartas topográficas e nos modelos digitais de elevação (o MDE do Rio de Janeiro é de 02/09/2004).....	69
3.14	Diagramas de dispersão (a imagem do Rio de Janeiro é de 02/09/2004).....	71
3.15	Altitudes cotadas nas cartas topográficas subtraídas das altitudes estimadas pelos MDEs.....	72
3.16	Mapas hipsométricos da área de estudo do Rio de Janeiro elaborados antes (A) e depois da avaliação dos resultados (B).....	73
3.17	Fatiamento dos modelos digitais de elevação brutos obtidos a partir do processamento dos dados ASTER e da integração de dados ASTER e SRTM.....	74
4.1	Relação entre a emissividade e a temperatura no infravermelho termal.....	78
4.2	Configuração clássica da ilha urbana de calor.....	82

4.3	Fluxograma metodológico.....	85
4.4	Janelas atmosféricas.....	89
4.5	Intervalos de temperatura obtidos pelo método de Normalização da Emissividade, conforme o ajuste da emissividade de referência.	90
4.6	Intervalos de temperatura obtidos para as mesmas imagens processadas segundo diferentes Bandas de Referência.....	91
4.7	Exemplo de foco de calor na imagem de 25/04/2003 em composição colorida R3G2B1.....	92
4.8	Mapas de temperatura da área de estudo de São Paulo segundo os métodos de Normalização da Emissividade (A) e Banda de Referência (B).....	94
4.9	Elementos da divisão territorial municipal de São Paulo sobrepostos ao mapa de temperatura.....	97
4.10	Perfil de temperatura A-B representativo da área de estudo de São Paulo (Banda de Referência).....	98
4.11	Mapas de temperatura da área de estudo do Rio de Janeiro segundo os métodos de Normalização da Emissividade (A) e Banda de Referência (B).....	98
4.12	Elementos da divisão territorial municipal do Rio de Janeiro sobrepostos ao mapa de temperatura.....	100
4.13	Perfil de temperatura A-B representativo da área de estudo do Rio de Janeiro (Banda de Referência).....	101
4.14	Visualização dos mapas de temperatura sobrepostos aos modelos digitais de elevação.....	102
5.1	Fluxograma metodológico.....	110
5.2	Efeito da reamostragem dos dados ASTER do VNIR e SWIR.....	112
5.3	Interface padrão do módulo FLAASH.....	113
5.4	Etapas da aplicação dos modelos de mistura espectral.....	115
5.5	Interface para a criação do <i>Square Array</i> .....	118

5.6	Arquivos de Matrizes Quadradas. Da esquerda para a direita: RMSE, Ângulo Espectral, Fração de Brilho do Componente, Fração Sombra e Código Restrito.....	119
5.7	Interface para a seleção de componentes do modelo de mistura espectral.....	122
5.8	Interface para o processamento do modelo de mistura espectral....	123
5.9	Principais etapas da aplicação do MESMA.....	126
5.10	Regiões de interesse para a seleção de componentes.....	128
5.11	Imagem-fração sombra com os valores de 0,80 e 1,00 ajustados para a fração sombra máxima permitida.....	131
5.12	Componentes selecionados para a aplicação do MESMA segundo as categorias V-I-S (cores correspondem apenas à diferenciação entre componentes de cada categoria).....	132
5.13	Imagens-fração da área de estudo de São Paulo para 13/10/2002..	133
5.14	Imagens-fração da área de estudo de São Paulo para 17/05/2006..	134
5.15	Composição colorida das imagens-fração (São Paulo).....	134
5.16	Elementos da divisão territorial municipal de São Paulo sobrepostos à imagem-fração vegetação e principais corpos d'água destacados na imagem-fração sombra.....	135
5.17	Imagens-fração da área de estudo do Rio de Janeiro para 25/04/2003.....	138
5.18	Imagens-fração da área de estudo do Rio de Janeiro para 02/09/2004.....	138
5.19	Composição colorida das imagens-fração (Rio de Janeiro).....	139
5.20	Frações observadas para a componente sombra/água.....	139
5.21	Maiores erros e pixels não modelados por imagem.....	141
5.22	Comparação entre a proporção de pixels de maior reflectância nas bandas 3N e 2 nas imagens de 25/04/2003 e 02/09/2004 do Rio de Janeiro.....	143
6.1	Mortes por poluição do ar urbana no mundo (2000).....	151

6.2	Poluição do ar na cidade de São Paulo em 23/08/2007 (16:00 h)....	152
6.3	Efeitos da poluição atmosférica sobre o balanço de radiação.....	154
6.4	Fluxograma metodológico.....	156
6.5	Localização das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar nas Regiões Metropolitanas de São Paulo (superior) e do Rio de Janeiro (inferior).....	162
6.6	Exemplos de equipamentos utilizados para o monitoramento da qualidade do ar.....	164
6.7	Concentração de material particulado registrada pelas estações automáticas da área de estudo de São Paulo.....	170
6.8	Localização das estações de monitoramento de Osasco e Parque Dom Pedro II.....	172
6.9	Concentração de material particulado registrada pelas estações automáticas da área de estudo do Rio de Janeiro.....	173
6.10	Estações de monitoramento da qualidade do ar na área de estudo de São Paulo.....	177
6.11	Estações de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo localizadas fora da área de estudo.....	178
6.12	Estação de São Miguel Paulista após furto que conduziu à sua desativação temporária.....	178
6.13	Estações de monitoramento da qualidade do ar no Rio de Janeiro..	179
6.14	Incremento populacional nos municípios de São Paulo e Rio de Janeiro (1991 a 2000).....	181
7.1	Fluxograma metodológico.....	185
7.2	Uso e ocupação do solo na área de estudo de São Paulo.....	187
7.3	Uso e ocupação do solo na área de estudo do Rio de Janeiro.....	188
7.4	Altitude média por classe de uso em São Paulo.....	192
7.5	Temperatura média por classe de uso em São Paulo.....	193
7.6	Porcentagem média de fração por classe de uso em São Paulo.....	195
7.7	Reservatório de Guarapiranga em 13/10/2002 e 17/05/2006.....	196

7.8	Altitude média por classe de uso no Rio de Janeiro.....	199
7.9	Temperatura média por classe de uso no Rio de Janeiro (método NE).....	200
7.10	Porcentagem média de fração por classe de uso no Rio de Janeiro.....	202

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1.1	Sistemas sensores da plataforma espacial Terra..... 31
1.2	Características básicas dos subsistemas do sensor ASTER..... 31
3.1	Especificações das imagens ASTER..... 58
3.2	Ângulos de apontamento das imagens..... 61
3.3	Parâmetros estatísticos dos modelos digitais de elevação (área de estudo)..... 75
4.1	Albedo e emissividade de corpos terrestres selecionados (variação média entre parênteses)..... 79
4.2	Especificações das imagens ASTER..... 84
4.3	Temperaturas mínimas e máximas estimadas..... 93
4.4	Temperaturas de referência para São Paulo..... 94
4.5	Temperaturas de referência para o Rio de Janeiro..... 100
5.1	Especificações das imagens ASTER..... 110
5.2	Coeficientes de conversão de unidade para imagens ASTER..... 111
5.3	Parâmetros utilizados na aplicação do FLAASH..... 114
5.4	Organização das bibliotecas espectrais..... 127
5.5	Modelos de múltiplos componentes adotados..... 131
5.6	Percentual não modelado por imagem e modelo(s) de melhor desempenho..... 140
6.1	Características, fontes e efeitos dos principais poluentes presentes na atmosfera..... 149
6.2	Especificações das imagens ASTER..... 155
6.3	Irradiância solar espectral no topo da atmosfera para as bandas ASTER..... 157
6.4	Distância entre o Sol e a Terra..... 158

6.5	Parâmetros monitorados na RMSP por estações automáticas (cinza escuro) e manuais (cinza claro).....	160
6.6	Parâmetros monitorados na RMRJ por estações automáticas (cinza escuro) e manuais (cinza claro).....	161
6.7	Parâmetros monitorados em 13/10/2002 (domingo) na RMSP (em itálico para as estações localizadas fora da área de estudo)....	165
6.8	Parâmetros monitorados em 17/05/2006 (quarta-feira) na RMSP (em itálico para as estações localizadas fora da área de estudo)....	166
6.9	Parâmetros monitorados em 25/04/2003 (sexta-feira) na RMRJ (em itálico para as estações localizadas fora da área de estudo)....	167
6.10	Parâmetros monitorados em 02/09/2004 (quinta-feira) na RMRJ (em itálico para as estações localizadas fora da área de estudo)....	168
6.11	Correlação entre a concentração de material particulado e as imagens termais brutas e em temperatura aparente.....	175
6.12	Correlação entre a concentração de material particulado e as imagens de reflectância aparente.....	175
7.1	Classes de uso e ocupação do solo dos mapas de referência utilizados.....	186
7.2	Classes de uso e ocupação do solo selecionadas (São Paulo).....	186
7.3	Classes de uso e ocupação do solo selecionadas (Rio de Janeiro).	187
7.4	Média e desvio padrão da altitude, temperatura e imagens-fração por classe de uso e ocupação do solo de São Paulo (desvio padrão em itálico).....	191
7.5	Média e desvio padrão da altitude, temperatura e imagens-fração por classe de uso e ocupação do solo do Rio de Janeiro (desvio padrão em itálico).....	198
7.6	Correlação linear entre a altitude, temperatura e imagens-fração por classe de uso e ocupação do solo de São Paulo.....	204
7.7	Correlação linear entre a altitude, temperatura e imagens-fração por classe de uso e ocupação do solo do Rio de Janeiro.....	208

## LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
K	Kelvin
km	Quilômetro
m	Metro
$\mu\text{W}$	Microwatt
$n$	Número de elementos
nm	Nanometro
$r$	Coefficiente de correlação linear
$R^2$	Coefficiente de determinação
sr	Esferorradiano
t	Tonelada
W	Watt
$\mu\text{m}$	Micrometro
°	Grau
°C	Grau Celsius
$\sigma$	Desvio padrão
$\mu\text{g}$	Micrograma
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Micrograma por metro cúbico



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
AVHRR	<i>Advanced Very High Resolution Radiometer</i>
AVIRIS	<i>Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer</i>
BIL	<i>Band Interleaved by Line</i>
BR	Banda de Referência
CBERS	<i>China-Brazil Earth Resources Satellite</i>
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
CEAGESP	Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo
CERES	<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH <sub>4</sub>	Metano
CO	Monóxido de Carbono
COB	<i>Count-Based Endmember Selection</i>
COBI	<i>Count-Based Index</i>
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CRES	<i>Constrained Reference Endmember Selection</i>
CSV	<i>Comma Separated Value</i>
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico
DV	Direção do Vento
EAR	<i>Endmember Average RMSE</i>
EMPLASA	Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
EOS	<i>Earth Observing System</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
ERSDAC	<i>Earth Remote Sensing Data Analysis Center</i>
ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
EUA	Estados Unidos da América
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia de Meio Ambiente
FLAASH	<i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
FMC	Fumaça
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GV	<i>Green Vegetation</i>
HC	Hidrocarbonetos
HCMM	Hidrocarbonetos menos Metano
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
HSS	<i>Hyperspectral Scanner System</i>
IAG	Instituto Astronômico e Geofísico
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDL	<i>Interactive Data Language</i>
IFOV	<i>Instantaneous Field of View</i>
INFRAERO	Infra-Estrutura Aeroportuária
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IPP	Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos
ISAC	<i>In-Scene Atmospheric Compensation</i>
ITIR	<i>Intermediate Thermal Infrared Radiometer</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
M <sup>2</sup> /HAB	Metro Quadrado por Habitante
MASA	<i>Minimum Average Spectral Angle</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MESMA	<i>Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis</i>
MET	Meteorológicos
MISR	<i>Multi-Angle Imaging Spectroradiometer</i>
MNF	<i>Minimum Noise Fraction</i>
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MODTRAN	<i>Moderate Resolution Atmospheric Transmission</i>
MOPITT	<i>Measurement of Pollution in the Troposphere</i>
MP	Material Particulado
MP <sub>10</sub>	Material Particulado de diâmetro inferior a 10 microns
MP <sub>2,5</sub>	Material Particulado de diâmetro inferior a 2,5 microns
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND	Nível Digital
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NE	Normalização da Emissividade
NESR	<i>Noise Equivalent Signal Response</i>
NO	Monóxido de Nitrogênio
NO <sub>2</sub>	Dióxido de Nitrogênio
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
NPV	<i>Non-Photosynthetic Vegetation</i>
O <sub>3</sub>	Ozônio
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PA	Pressão Atmosférica
PI	Partículas Inaláveis
PI <sub>10</sub>	Partículas Inaláveis de diâmetro inferior a 10 microns
PI <sub>2,5</sub>	Partículas Inaláveis de diâmetro inferior a 2,5 microns
PPB	Partes por Bilhão
PPI	<i>Pixel Purity Index</i>
PPM	Partes por Milhão

PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROJAC	Centro de Produção de Jacarepaguá
PTS	Partículas Totais em Suspensão
REM	Radiação Eletromagnética
RJ	Rio de Janeiro
RMRJ	Região Metropolitana do Rio de Janeiro
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
RN	Referência de Nível
RSI	<i>Research Systems Incorporated</i>
SAM	<i>Spectral Angle Mapper</i>
SEBASS	<i>Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System</i>
SIPAM	Sistema de Proteção da Amazônia
SMA	<i>Spectral Mixture Analysis</i>
SMAC	Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro
SO <sub>2</sub>	Dióxido de Enxofre
SO <sub>x</sub>	Óxidos de Enxofre
SP	São Paulo
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>
T/ANO	Toneladas por Ano
T	Temperatura
TIGER	<i>Thermal Infrared Ground Emission Radiometer</i>
TIMS	<i>Thermal Infrared Multispectral Scanner</i>
TIPS	<i>Thermal Infrared Profiling System</i>
TIR	<i>Thermal Infrared</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UBL	<i>Urban Boundary Layer</i>
UCC	<i>Unit Conversion Coefficient</i>
UCL	<i>Urban Canopy Layer</i>
UCSB	<i>University of California Santa Barbara</i>
URA	Umidade Relativa do Ar
USP	Universidade de São Paulo
UTM	<i>Universal Transverse of Mercator</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
VIPER	<i>Visualization and Image Processing for Environmental Research</i>
V-I-S	<i>Vegetation-Impervious Surfaces-Soil</i>
VNIR	<i>Visible and Near Infrared</i>
VV	Velocidade do Vento
WHO	<i>World Health Organization</i>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

As cidades são centros de poder com paisagens e estilos de vida característicos. A paisagem urbana é, em determinada porção do espaço, o resultado da combinação dinâmica de elementos físicos, biológicos e antrópicos que, interagindo em conjunto, tornam a paisagem única a cada momento, dada sua constante evolução.

A partir da Revolução Industrial, o crescimento urbano mundial se intensificou com a absorção das populações provenientes das áreas rurais, desencadeando o processo de urbanização. Posteriormente, algumas regiões passaram por uma reorganização do espaço urbano, a qual desencadeou um outro processo, o de metropolização, resultante da integração físico-econômica de áreas urbanas localizadas em municípios distintos.

A ocupação imprópria e desordenada de áreas de risco que podem induzir e intensificar processos de deslizamentos, a formação de ilhas de calor associadas aos baixos índices de arborização, que ocasionam desconforto térmico, e o alto comprometimento da qualidade do ar em virtude da emissão de diversos poluentes são alguns dos processos ambientais que comprometem a qualidade do ambiente urbano e que ocorrem principalmente nos grandes aglomerados urbanos do Brasil como as Regiões Metropolitanas de São Paulo (RMSP) e do Rio de Janeiro (RMRJ). Embora elas não apresentem, na atualidade, os maiores índices de crescimento populacional dentre as demais regiões metropolitanas institucionalizadas no território nacional, sua qualidade ambiental encontra-se seriamente comprometida.

O crescimento das áreas urbanas nos países em desenvolvimento é um fenômeno que persiste, porém com desaceleração a partir de meados da década de 1980. Esse processo é tardio se comparado aos países desenvolvidos. Os dados oficiais apresentam 81% como sendo o percentual de

população urbana brasileira no ano 2000, montante este que se concentra na faixa litorânea do território nacional (IBGE, 2000).

A urbanização brasileira na segunda metade do século XX ocorreu de forma acelerada, desordenada e sem o acompanhamento da infra-estrutura, e foi impulsionada pelo êxodo rural (conseqüência da mecanização agrícola), florescimento da indústria para substituição de importações e por fluxos migratórios inter-regionais. O desenvolvimento urbano brasileiro das últimas décadas pode ser caracterizado da seguinte forma: crescimento populacional mais elevado das antigas periferias econômicas nacionais, intensificando a formação de aglomerações urbanas; padrões relativamente baixos de crescimento das regiões metropolitanas, sobretudo no Centro-Sul do país (em estágios mais avançados da transição demográfica) e em seus municípios-sede; e peso crescente do conjunto das chamadas cidades médias<sup>1</sup>. Em associação a essas tendências, Reis e Tanaka (2007) apontam novas formas de tecido urbano, ligadas ao fenômeno da urbanização dispersa, tais como os condomínios horizontais de alto padrão.

Os estudos urbanos têm nas imagens de satélite uma importante fonte de informação. Aspectos ligados a áreas urbanas, como a localização e tipo de sítio, padrões de crescimento e metropolização, podem ser estudados a partir de dados de sensoriamento remoto (JENSEN; COWEN, 1999). Inicialmente, quando surgiram as imagens dos sensores da série Landsat, na década de 1970, as análises regionais eram priorizadas, enquanto pouco se investigava sobre o espaço intra-urbano. Isto porque, como esclarece Möller-Jensen (1990), dados de sistemas sensores orbitais não se adequavam ao nível de detalhamento desejado para as aplicações urbanas. Tradicionalmente, havia defasagem na exatidão dos dados obtidos em nível orbital em relação a fotografias aéreas. Pesquisas em morfologia urbana visando o mapeamento e

---

<sup>1</sup> Segundo Braga (2004), no Brasil, em grande parte da bibliografia recente, cidade média é definida como aquela que apresenta população entre cem e quinhentos mil habitantes (não há consenso em se considerar a população total do município ou apenas a população urbana), não pertence a uma Região Metropolitana e não é capital estadual.

monitoramento do uso do solo eram limitadas, levando a representações inadequadas dos objetos geográficos (BATTY; HOWES, 2001; MESEV; LONGLEY, 1999). Nesse sentido, o uso de imagens de alta resolução espacial é imprescindível para análises intra-urbanas.

Os novos sensores orbitais que apresentam melhores resoluções espacial, temporal, espectral e radiométrica ampliaram as possibilidades de aplicação de seus dados em áreas urbanas. Entretanto, observa-se a necessidade de consorciar resolução com precisão, para atender aos requisitos de escalas grandes, pois os dados de sensores orbitais ainda não alcançaram a precisão de fotografias aéreas. Dentre esses sensores estão aqueles a bordo dos satélites IKONOS e Quickbird, com 1 e 0,6 m de resolução espacial em seus canais pancromáticos, respectivamente. Por outro lado, a melhoria na resolução espectral foi alcançada em sensores como o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo do satélite Terra, que obtém imagens em 14 canais com resoluções espaciais que variam de 15 a 90 m.

Com relação aos sensores a bordo dos satélites IKONOS e Quickbird, embora sua resolução espacial seja adequada para estudos urbanos, existe uma limitação que se refere ao reduzido número de bandas espectrais (quatro), que cobrem apenas o intervalo espectral do visível ao infravermelho próximo. Considerando esse fator, é necessário determinar uma combinação ideal entre as resoluções espacial e espectral para os estudos urbanos, ou seja, também é importante que as bandas espectrais de um sensor estejam posicionadas em comprimentos de onda adequados para a caracterização dos alvos e que tenham a largura adequada. As imagens de resolução espacial média, como aquelas do ASTER/Terra, podem ser utilizadas para estudos em mesoescala, pois apresentam uma série de vantagens espectrais em relação às imagens *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+)/Landsat.

A partir de dados de sensoriamento remoto, é possível obter indicadores de qualidade ambiental através da análise integrada de bases de dados demográficos, econômicos, de cobertura da terra e uso do solo, temperatura, topografia, vegetação, recursos hídricos, qualidade do ar, etc., para subsídio ao Planejamento Urbano e a Gestão Ambiental. Desse modo, conforme apresentam Herold et al. (2003), novas abordagens em Planejamento Urbano, tais como as relacionadas com o desenvolvimento sustentável e qualidade ambiental, que dependem de um melhor conhecimento das causas, da evolução e dos impactos da urbanização, contam com a contribuição das novas fontes de dados espaciais e das geotecnologias na análise, compreensão, representação e modelagem da dinâmica urbana.

## **1.2 O Sistema Sensor ASTER**

A espectroscopia de imageamento constitui uma das mais avançadas tecnologias em sensoriamento remoto. Hoje, há a possibilidade de obtenção de imagens em mais de duzentos canais espectrais e com resolução espacial inferior a 5 m, como é o caso do sensor aerotransportado *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS), ou de 30 m como no caso do HYPERION, a bordo da plataforma espacial EO-1.

Galvão (2001) ressalta que os avanços tecnológicos têm levado ao desenvolvimento de sensores com melhoria na resolução espectral até mesmo na faixa termal do espectro eletromagnético, como é o exemplo do ASTER/Terra, com cinco canais entre 8 e 12  $\mu\text{m}$ . O ASTER é um dos cinco sensores acoplados na plataforma Terra, listados na Tabela 1.1. Lançado em 18 de dezembro de 1999, o Terra possui uma órbita polar sol-síncrona, cruzando o equador às 10:30 h da manhã. Entre os sensores a bordo desta plataforma, o ASTER é o que possui a maior resolução espacial, mas também é o único que não opera regularmente, mas somente por programação.

Tabela 1.1 – Sistemas sensores da plataforma espacial Terra.

Sensor	Número de Canais	Resolução Espacial (m)	Exemplos de Aplicações
ASTER ( <i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i> )	14	15/30/90	Temperatura da superfície, emissividade, elevação
CERES ( <i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i> )	3 (2 instrumentos)	20.000	Balanco de radiação terrestre
MISR ( <i>Multi-angle Imaging Spectroradiometer</i> )	4 (9 ângulos)	275/1.100	Nuvens, aerossóis, imagens multiângulo
MODIS ( <i>Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer</i> )	36	250/500/1.000	Recursos terrestres, dos oceanos e baixa atmosfera
MOPITT ( <i>Measurement of Pollution in the Troposphere</i> )	-	22.000	Distribuição, transporte e fontes de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub>

Fonte: NASA (2007).

O ASTER foi desenvolvido a partir de uma parceria entre o Japão e os Estados Unidos. As características básicas dos três subsistemas do ASTER: *Visible and Near Infrared* (VNIR), *Short Wave Infrared* (SWIR) e *Thermal Infrared* (TIR), são apresentadas na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Características básicas dos subsistemas do sensor ASTER.

Subsistema	Banda	Comprimento de Onda (µm)	Resolução Espacial (m)	Níveis de Quantização do Sinal
VNIR	1	0,52 – 0,60	15 m	8 bits
	2	0,63 – 0,69		
	3N	0,78 – 0,86		
	3B	0,78 – 0,86		
SWIR	4	1,600 – 1,700	30 m	8 bits
	5	2,145 – 2,185		
	6	2,185 – 2,225		
	7	2,235 – 2,285		
	8	2,295 – 2,365		
TIR	9	2,360 – 2,430	90 m	12 bits
	10	8,125 – 8,475		
	11	8,475 – 8,825		
	12	8,925 – 9,275		
	13	10,25 – 10,95		
	14	10,95 – 11,65		

Fonte: Abrams et al. (1999).

O VNIR possui resolução espacial de 15 m e recobre a faixa do visível e infravermelho próximo com três bandas; o SWIR possui seis bandas de 30 m, e recobre o infravermelho de ondas curtas; o TIR é composto por cinco bandas termais com 90 m de resolução. Atualmente, os dados termais do ASTER representam aqueles de maior resolução espacial adquiridos em nível orbital. O sistema VNIR possui ainda uma banda 3B que opera na mesma faixa espectral da banda 3N, porém com retrovisada ao longo da órbita do satélite (com poucos segundos de diferença do nadir), o que permite a construção de pares estereoscópicos e geração de modelos de elevação (ABRAMS et al., 1999). Os dados são adquiridos em uma faixa de 60 km de largura, e os subsistemas SWIR e TIR podem ter um ângulo de visada lateral de até  $\pm 8,55^\circ$ . Para o VNIR, esse ângulo varia entre  $\pm 24^\circ$ . A Figura 1.1 apresenta um recorte de duas imagens ASTER. Em função da resolução espacial, é possível observar nelas a diferença entre cada subsistema.

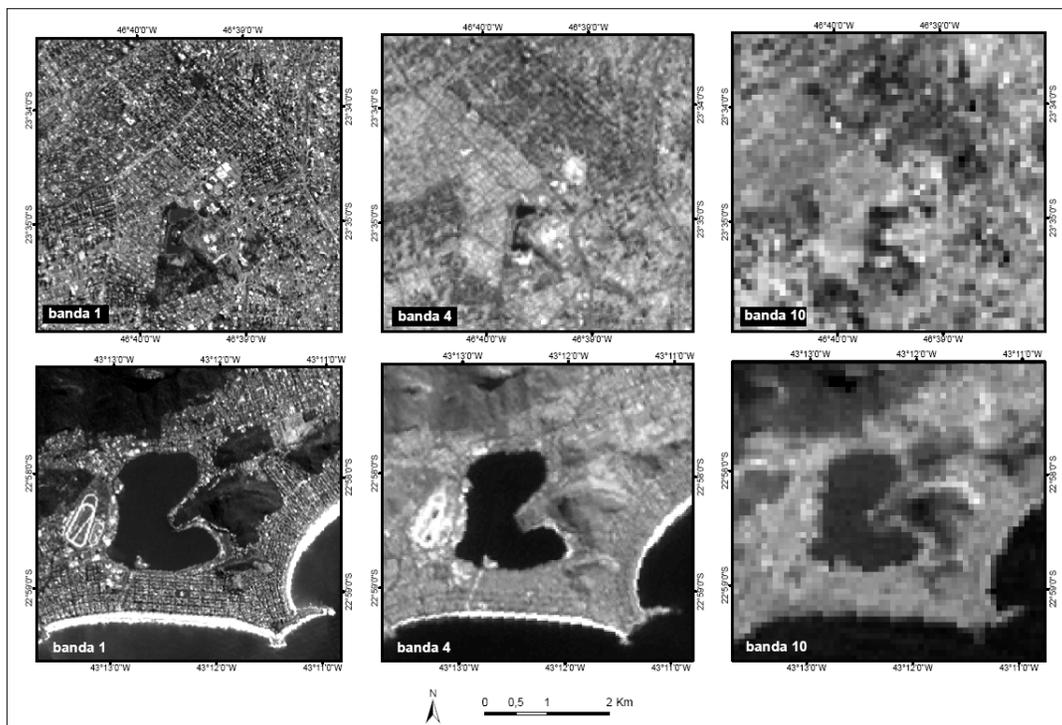


Figura 1.1 – Imagem ASTER (recorte) das cidades de São Paulo em 17/05/2006 (superior) e Rio de Janeiro em 02/09/2004 (inferior) adquirida por canais dos subsistemas VNIR (1), SWIR (4) e TIR (10).

O ASTER foi projetado utilizando os recursos empregados com sucesso em experiências anteriores com os sensores *Thermal Infrared Multispectral Scanner* (TIMS), *Thermal Infrared Ground Emission Radiometer* (TIGER), *Thermal Infrared Profiling System* (TIPS), todos desenvolvidos por instituições norte-americanas, e *Intermediate Thermal Infrared Radiometer* (ITIR), de desenvolvimento japonês (JPL, 2007). No Japão, o órgão governamental responsável pelo sensor é o Ministério da Economia, Comércio e Indústria.

Uma comparação entre os sensores ASTER e TM/Landsat (Figura 1.2) mostra vantagens do sensor ASTER, tais como a maior quantidade de canais na faixa do infravermelho médio, quatro a mais que o TM, além de uma melhor resolução espacial nos canais do visível e do infravermelho próximo, 15 m, enquanto os correspondentes do TM têm 30 m. A principal desvantagem do sensor ASTER está na falta de uma banda localizada na região do espectro visível de menor comprimento de onda, correspondente ao azul.

O ASTER é o primeiro sensor orbital multiespectral termal, e seu imageamento pode ocorrer tanto no período diurno quanto noturno. Comparado ao TM do Landsat 5<sup>2</sup>, ele apresenta a vantagem da melhor resolução espacial na faixa do infravermelho termal, 90 contra 120 m, maior quantidade de bandas (cinco) e um nível maior de discretização dos alvos, pois o sinal é quantizado em 12 bits, enquanto que os dados termais do sensor TM também apresentam 8 bits assim como as demais bandas do sensor. Além disso, os dados do sensor ASTER podem ser utilizados em estudos topográficos a partir da geração de modelos digitais de elevação com resolução de 15 m ou inferior.

---

<sup>2</sup> No satélite Landsat 7, a banda 6 do sensor ETM+ possui resolução espacial de 60 m.

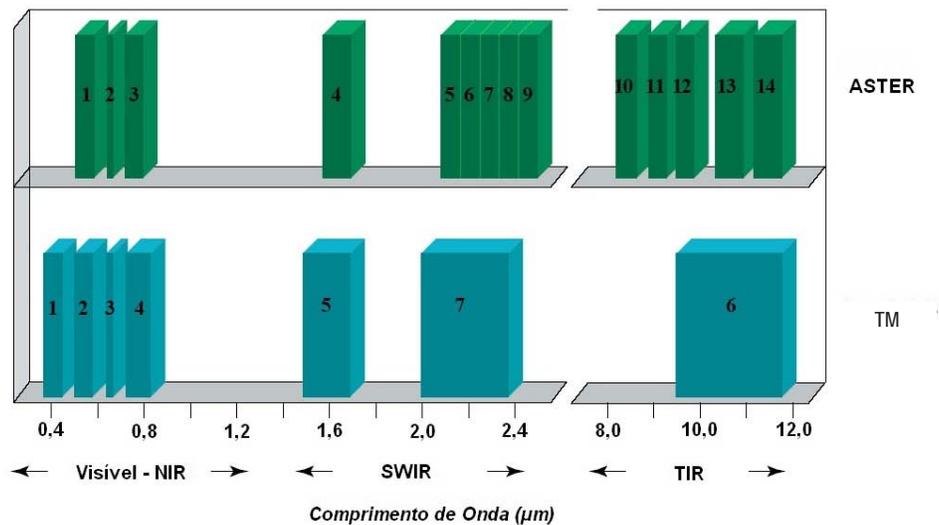


Figura 1.2 – Comparação entre canais espectrais dos sensores ASTER e TM.

Os dados ASTER são distribuídos nos níveis 1A, 1B, 2 e 3. O nível 1A corresponde aos dados brutos, sem qualquer tipo de processamento. No nível 1B, os dados são corrigidos geométrica e radiometricamente. Os dados nível 2 correspondem a produtos gerados a partir do nível 1B que são: temperatura aparente, emissividade, composições coloridas com realce por decorrelação, reflectância de superfície, temperatura de superfície, radiância de superfície e classificação das nuvens e da superfície polar. No nível 3 são gerados modelos digitais de elevação (JPL, 2007).

### 1.3 Objetivos

Considerando a disponibilidade de dados de novos sensores para estudos urbanos em mesoescala no Brasil, este trabalho tem como objetivo explorar o potencial de todas as bandas do ASTER/Terra, inclusive as cinco termais, no estudo de ambientes urbanos metropolitanos de São Paulo e Rio de Janeiro, bem como avaliar técnicas de análise desses dados.

Para atender ao objetivo geral da pesquisa, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Gerar modelos digitais de elevação a partir de imagens ASTER em áreas com configuração topográfica distinta;
- Detectar ilhas de calor e analisar a relação entre a temperatura da superfície e o uso e ocupação do solo;
- Testar o uso da Análise da Mistura Espectral por Múltiplos Componentes (MESMA) para imagens ASTER de dois grandes aglomerados urbanos tropicais;
- Verificar a relação entre dados de concentração de material particulado no ar coletados por estações automáticas de monitoramento e dados espectrais;
- Testar o processamento de modelos de elevação, imagens de temperatura e modelos de mistura espectral analisando imagens de duas diferentes datas para cada área de estudo;
- Avaliar os resultados obtidos sobre as frações físicas mapeadas, a temperatura e a topografia por classes de uso e ocupação do solo, selecionadas; e
- Contribuir para a caracterização da estrutura física urbana, gerando subsídios ao Planejamento Urbano e Metropolitano de São Paulo e Rio de Janeiro.

#### **1.4 Estrutura do Trabalho**

Neste Primeiro Capítulo é apresentado o tema da pesquisa, algumas características do sensor ASTER – dados primários – e os objetivos. As imagens ASTER utilizadas foram selecionadas em função da disponibilidade, tendo em vista que o sensor não adquire imagens continuamente, como ocorre com o *Charge Coupled Device (CCD)/China-Brazil Earth Resources Satellite (CBERS)* e *TM/Landsat*. A seleção das imagens também levou em conta a

cobertura de nuvens, a área de abrangência, o dia da semana e considerou uma análise prévia dos boletins de qualidade do ar das estações automáticas de monitoramento. O dia da semana e os boletins de qualidade do ar foram utilizados para a verificação das condições de qualidade do ar nas datas de imageamento do sensor. O Segundo Capítulo apresenta uma caracterização geográfica das áreas de estudo.

No Terceiro Capítulo são apresentados os procedimentos metodológicos empregados na geração dos modelos digitais de elevação, os resultados obtidos, as comparações com outras fontes de dados efetuadas visando à avaliação dos produtos, e as análises decorrentes. No Quarto Capítulo são tecidas considerações sobre estudos envolvendo dados termais com aplicação ao meio ambiente urbano e apresentadas as etapas de processamento dos dados dos canais termais do sensor ASTER até a obtenção dos mapas de temperatura, analisados previamente ainda no escopo deste capítulo.

O Quinto Capítulo apresenta a motivação para a aplicação do modelo de mistura espectral, os fundamentos básicos do modelo MESMA e os parâmetros adotados para o processamento das imagens, desde a seleção de regiões de referência para a construção de bibliotecas espectrais até a obtenção de imagens-fração e arquivos auxiliares. As imagens-fração são descritas e analisadas considerando o modelo teórico adotado.

No Sexto Capítulo é abordada a relação entre dados de qualidade do ar e dados de imagens de sensores remotos. Esta relação é analisada com base nos dados disponíveis para as diferentes áreas de estudo adquiridos por estações de monitoramento e demais informações obtidas a partir de trabalho de campo, usando métodos estatísticos multivariados. Os resultados são discutidos, e perspectivas para os trabalhos nessa linha de pesquisa são registradas.

No Capítulo Sete, os resultados do processamento das imagens ASTER (apresentados nos capítulos anteriores) são analisados de forma integrada por

classes de uso do solo, utilizando como referência mapas de uso e ocupação do solo das áreas de estudo. A análise dos resultados ao longo do trabalho considerou também as divisões administrativas adotadas pelos municípios, para melhor caracterização do ambiente urbano, natural ou institucionalizado.

Por fim, são tecidas algumas considerações, associadas às conclusões obtidas nas diferentes etapas<sup>3</sup> e aos objetivos da pesquisa, e recomendações para novas pesquisas, considerando a necessidade de avanço nos estudos de sensoriamento remoto aplicado e no emprego de novas metodologias de trabalho em busca da resolução de problemas do ambiente urbano que afetam a qualidade de vida da população.

---

<sup>3</sup> O texto encontra-se organizado a fim de facilitar a possível publicação posterior sob forma de artigos técnico-científicos submetidos a eventos e/ou periódicos.



## 2 ÁREA DE ESTUDO

Considerando a hierarquia de cidades que compõem a rede urbana brasileira, destacam-se dois centros principais, configurados a partir de fortes relações internas com os demais centros urbanos nacionais (sejam eles metrópoles regionais, capitais regionais, centros regionais ou centros locais) e das relações que esses centros estabelecem com o sistema de cidades globais (ou cidades mundiais). Na hierarquia urbana, conforme IPEA (2001a), São Paulo e Rio de Janeiro correspondem às metrópoles nacionais do Brasil.

Em nível internacional, considerando a hierarquia de cidades mundiais proposta por Beaverstock et al. (1999), quase todas as cidades de primeira ordem, também chamadas de cidades mundiais alfa, localizam-se em países desenvolvidos, exceto Cingapura e Hong Kong, que articulam o conjunto de países do Sudeste Asiático (Figura 2.1). Embora possuam função similar na América Latina, a Cidade do México e São Paulo são enquadradas na categoria de cidades mundiais de segunda ordem (beta). A classificação proposta ordena as cidades mundiais de 1 a 12 e foi efetuada a partir da análise de diversas referências bibliográficas e da localização dos principais centros de serviços bancários, legais, empresariais e comerciais no mundo. Nessa classificação, São Paulo encontra-se no nível 8, e Rio de Janeiro, no nível 3 (correspondente às cidades com forte evidência de formação de cidade mundial). As cidades de Londres, Paris, Nova Iorque e Tóquio encontram-se no topo da escala (nível 12).

São Paulo e Rio de Janeiro se destacam no cenário nacional e internacional devido a fatores como a proximidade geográfica e, principalmente, pelo fato de juntas representarem um mercado com dimensão e grau de diversificação produtiva comparável ao das mais importantes metrópoles dos países desenvolvidos. É nessas cidades que são geradas e transitam as decisões financeiras, mercadológicas e tecnológicas capazes de moldar os destinos da economia nacional e suas articulações com fluxos internacionais de comércio,

informação e conhecimento (IPEA, 2001a). Por outro lado, semelhante ao que ocorre em outras metrópoles globais, os padrões de segregação espacial associados ao crescimento demográfico das cidades têm se refletido em uma série de deseconomias de aglomeração.

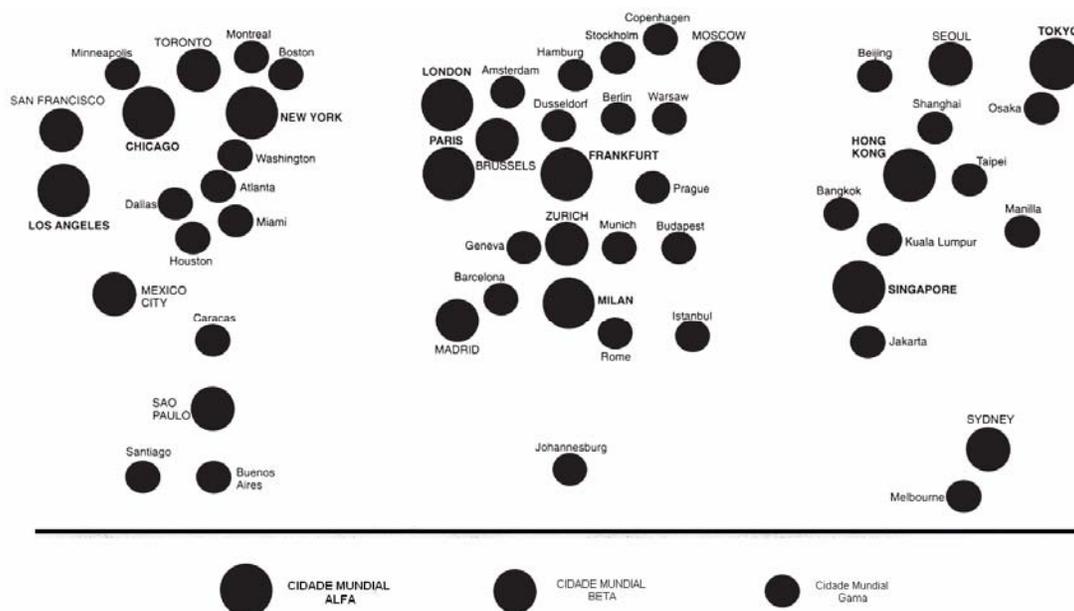


Figura 2.1 – O mundo segundo o grupo de pesquisa Globalização e Cidades Mundiais (GaWC).

Fonte: Beaverstock et al. (1999).

Para Fernandes e Medeiros (1978) o conceito de economias de aglomeração está ligado à idéia de benefício advindo pela localização de empresas próximas umas às outras, maximizando a infra-estrutura já existente, atraindo fornecedores e racionalizando custos, o que caracteriza a noção de economias de escala. Essas empresas passam a estruturar centros urbanos maiores que, à sua vez, representam mercados de consumo também maiores. Quando essa aglomeração se torna excessiva, o excesso de produção e população em um centro urbano provoca a congestão no tráfego, que é contraproducente, porque aumenta tempo e custos despendidos nos deslocamentos diários. Além disso, os preços no mercado imobiliário sobem, os salários precisam ser maiores em função do aumento no custo de vida, a infra-estrutura de um centro urbano

congestionado fica comprometida, isto é, colapso no sistema de transporte, crises no abastecimento de água, e agravam-se os problemas ambientais, a marginalidade social e a violência, gerando-se então deseconomias. As grandes empresas privadas, em particular, se apropriam dos benefícios das economias de aglomeração, enquanto o ônus da criação de infra-estrutura e provimento de serviços urbanos recai sobre o poder público, refletindo em pesados custos para a sociedade.

Fernandes e Medeiros (1978) apontam que a geração das deseconomias e deterioração da qualidade de vida e do meio ambiente, bem como a crescente demanda de infra-estrutura, são resultantes da concentração excessiva de atividades e da população em algumas áreas do território nacional. Para que seja compatibilizado o crescimento econômico com a atenuação das desigualdades regionais, é fundamental que ocorra um controle da localização espacial das atividades, o que não é verificado efetivamente no Brasil.

A consolidação de São Paulo e Rio de Janeiro como os centros mais dinâmicos da economia nacional é decorrente do processo histórico de produção do espaço nestas duas áreas. No caso de São Paulo, destaca-se o ciclo cafeeiro e o desenvolvimento industrial da cidade. Já no Rio de Janeiro, destaca-se a importância do ciclo do ouro das Minas Gerais e, posteriormente, a vinda da família real e instalação, pós Independência, da capital imperial e posterior capital federal. A concentração das atividades produtivas nessas cidades e, conseqüentemente, da renda nacional, foi intensificada a partir de planos econômicos, a exemplo do Programa de Metas implementado na década de 1950 (FERNANDES; MEDEIROS, 1978). Essas duas áreas urbanas, conjugadas às áreas urbanas de seus municípios vizinhos, concentram significativa parcela da renda, serviços e produção nacional. A opção das grandes empresas e dos grandes grupos econômicos em sediar seus centros decisórios e de pesquisa nessas metrópoles é confirmada pelo volume de investimentos declarados e/ou dirigidos para as duas Regiões Metropolitanas,

e pela concentração das sedes das maiores empresas privadas e estatais nas cidades-núcleos, apresentada com riqueza de detalhes por IPEA (2001a).

A primazia de São Paulo é cada vez mais notável. A desconcentração industrial verificada é na verdade uma desconcentração concentrada da atividade industrial. Enquanto diversas empresas transferem o seu parque fabril de São Paulo para outras cidades, as atividades de mais alto nível tecnológico concentram-se nela cada vez mais. Além de pouco integrada, a economia do Rio de Janeiro, que se caracterizava pela grande dependência dos investimentos públicos federais, sofre com a redução dos investimentos desde a transferência da capital federal para Brasília, em 1960. Ademais, a cidade é sobrepujada cada vez mais por São Paulo. Recentemente, com a notícia da instalação da nova refinaria da Petrobrás no município de Itaboraí (RMRJ), observa-se mais uma vez a desconcentração concentrada da atividade industrial no território.

São Paulo e Rio de Janeiro são os municípios mais populosos do Brasil e possuem aproximadamente 10,9 e 6,1 milhões de habitantes, respectivamente (IBGE, 2006). Ambos apresentam problemas ambientais graves, necessitando de estudos técnico-científicos que contribuam na definição de políticas públicas e estratégias de intervenção. Nos últimos anos, fenômenos como as ilhas urbanas de calor e a poluição do ar têm se intensificado não apenas na área urbana dos municípios-sede, mas em outros municípios das regiões metropolitanas. Os problemas socioambientais que ocorrem em São Paulo e Rio de Janeiro demonstram que as cidades cresceram mais do que a sua capacidade de absorver os impactos decorrentes da forma como se deu sua estruturação urbana. A degradação do ambiente urbano é, em parte, decorrente da falta ou do ténue trato com a questão ambiental no planejamento urbano e metropolitano.

Para Jannuzzi (2004), São Paulo caminha para a estabilização de seu contingente populacional, fato observado em outros grandes centros urbanos

do mundo. Embora o município de São Paulo tenha apresentado, dentre as capitais brasileiras, uma das menores taxas de crescimento entre os anos de 1970 e 2000, superando apenas Recife, Rio de Janeiro e Porto Alegre (IBGE, 2000), o crescimento da Região Metropolitana é expressivo, motivado fundamentalmente pela expansão das periferias. A RMSP é formada por 39 municípios e foi instituída em 1973 (IPEA, 2001c). São Paulo, a sede, está localizada ao longo dos vales dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí.

O sítio urbano de São Paulo está inserido no chamado Planalto Atlântico, entre as altitudes de 720 a 850 m. O relevo deste planalto apresenta diferentes tipos de unidades geomorfológicas: planícies aluviais (várzeas), colinas, morros, serras e maciços com as mais variadas orientações. Dentre as elevações, sobressaem-se as Serras da Cantareira e do Mar, nos limites norte e sul do município, respectivamente, e o Pico do Jaraguá (extremo oeste da Serra da Cantareira) (SÃO PAULO, 2002). A poucos quilômetros de distância (45 km em média) encontra-se o Oceano Atlântico. O desenvolvimento da cidade de São Paulo ocorreu segundo um plano radial concêntrico, com a implantação de eixos viários perimetrais e radiais cortando-a em várias direções, criando entre esses eixos diversos bairros, comerciais e residenciais, em muitos dos quais a qualidade de vida deteriorou-se (SCARLATO, 1998).

Na Figura 2.2 são apresentados exemplos de paisagens com características representativas do meio ambiente urbano de São Paulo. Na primeira fotografia (Figura 2.2a), pode-se observar, em uma primeira aproximação, a grande extensão da mancha urbana da cidade até as proximidades do Pico do Jaraguá (ao fundo). Na segunda fotografia (2.2b), tomada do Viaduto do Glicério, importante elo viário entre as zonas leste e central da cidade, observa-se a concentração elevada de edifícios na região central da cidade, a de ocupação mais antiga. A terceira fotografia (2.2 c) apresenta um retrato do Parque do Ibirapuera, uma das poucas áreas verdes de lazer da cidade, e a quarta (2.2d), um trecho do Elevado Costa e Silva, obra viária implementada para minimizar

os problemas enfrentados com o excessivo número de veículos em trânsito, visando otimizar o fluxo e ligar diferentes zonas da cidade.



Figura 2.2 – Paisagens do meio urbano de São Paulo.

A RMRJ, instituída em 1974, é composta oficialmente por 19 municípios (IPEA, 2001b). O Rio de Janeiro é um município costeiro, banhado pelo Oceano Atlântico e pela Baía de Guanabara, uma das mais importantes reentrâncias do litoral brasileiro. O relevo do município é caracterizado por planícies costeiras e montanhas como os Maciços da Tijuca, da Pedra Branca e do Gericinó, além de outras elevações de menor proeminência. Devido à configuração de seu sítio, foi necessária a execução de grandes obras como aterros e túneis para a expansão do sistema viário.

A RMRJ, semelhante ao que ocorre em São Paulo, também apresenta uma tendência à estabilização do processo de urbanização e de concentração urbana. A área de influência da metrópole, conforme o IPEA (2001c), é praticamente a mesma desde o apogeu de sua região cafeeira, mantendo até hoje forte primazia urbana em relação ao restante do Estado.

A expansão da cidade do Rio de Janeiro ocorreu ao longo das Estradas de Ferro Central do Brasil, Rio D'Ouro e Leopoldina, construídas na segunda metade do século XIX (BRANDÃO, 1996). Dentre outras grandes intervenções, podem ser citadas a interligação de várias ilhas isoladas na Baía da Guanabara para a construção da Cidade Universitária (campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro) na Ilha do Fundão, o Aterro do Flamengo e o Plano Urbanístico de Lúcio Costa para a ocupação da Barra da Tijuca.

Aspectos relevantes da paisagem urbana do Rio de Janeiro e característicos desta área de estudo são apresentados na Figura 2.3. A primeira fotografia (Figura 2.3a) apresenta um dos principais cartões-postais do Rio de Janeiro, o Morro do Pão-de-Açúcar. Assim como diversas outras existentes na cidade, essas elevações são constituídas de rochas metamórficas e correspondem aos maciços litorâneos encontrados nessa porção do território brasileiro. Apesar de contribuírem à vocação turística da cidade, grande parte dessas elevações são utilizadas, nas áreas menos inclinadas, para assentamentos humanos, a exemplo da Favela da Rocinha (2.3b), considerada a maior favela do Brasil. A terceira paisagem apresentada é a do Recreio dos Bandeirantes (2.3c), bairro nobre e de recente incorporação à mancha urbana do Rio de Janeiro. Este bairro está localizado na chamada “Nova Zona Sul” e, embora distante do núcleo urbano, apresenta uma série de características que lhe conferem excelente grau de qualidade ambiental se comparado aos demais. As demais fotografias apresentam um trecho da Avenida Presidente Vargas, situada no centro da cidade (2.3d), o pátio de trens da Estrada de Ferro Leopoldina (2.3e), e uma vista dos bairros da Tijuca e Maracanã (2.3f), na qual é possível observar a Ponte Rio-Niterói (ao fundo).



Figura 2.3 – Paisagens do meio urbano do Rio de Janeiro.

São Paulo e Rio de Janeiro foram selecionadas como áreas de estudo devido a sua representatividade para o tema de interesse, disponibilidade de imagens, ocorrência de diferentes tipos de cobertura da terra, localização de estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar e acessibilidade para pesquisa de campo. Outro fator relevante para a seleção dessas áreas deve-se à sua configuração e diversidade topográfica, possibilitando avaliar a geração de modelos digitais de elevação.

A população absoluta registrada por cada distrito do município de São Paulo (SP) e bairro do município do Rio de Janeiro (RJ) nos anos de 1991 e 2000, assim como o incremento populacional verificado neste período, são apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5. As unidades geográficas de análise foram determinadas de acordo com a divisão territorial oficial dos municípios. O município de São Paulo encontra-se subdividido em 31 subprefeituras e estas contemplam um total de 96 distritos (SÃO PAULO, 2006)<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Os arquivos vetoriais contendo a delimitação territorial do município de São Paulo foram obtidos da Secretaria Municipal de Planejamento do Município de São Paulo.

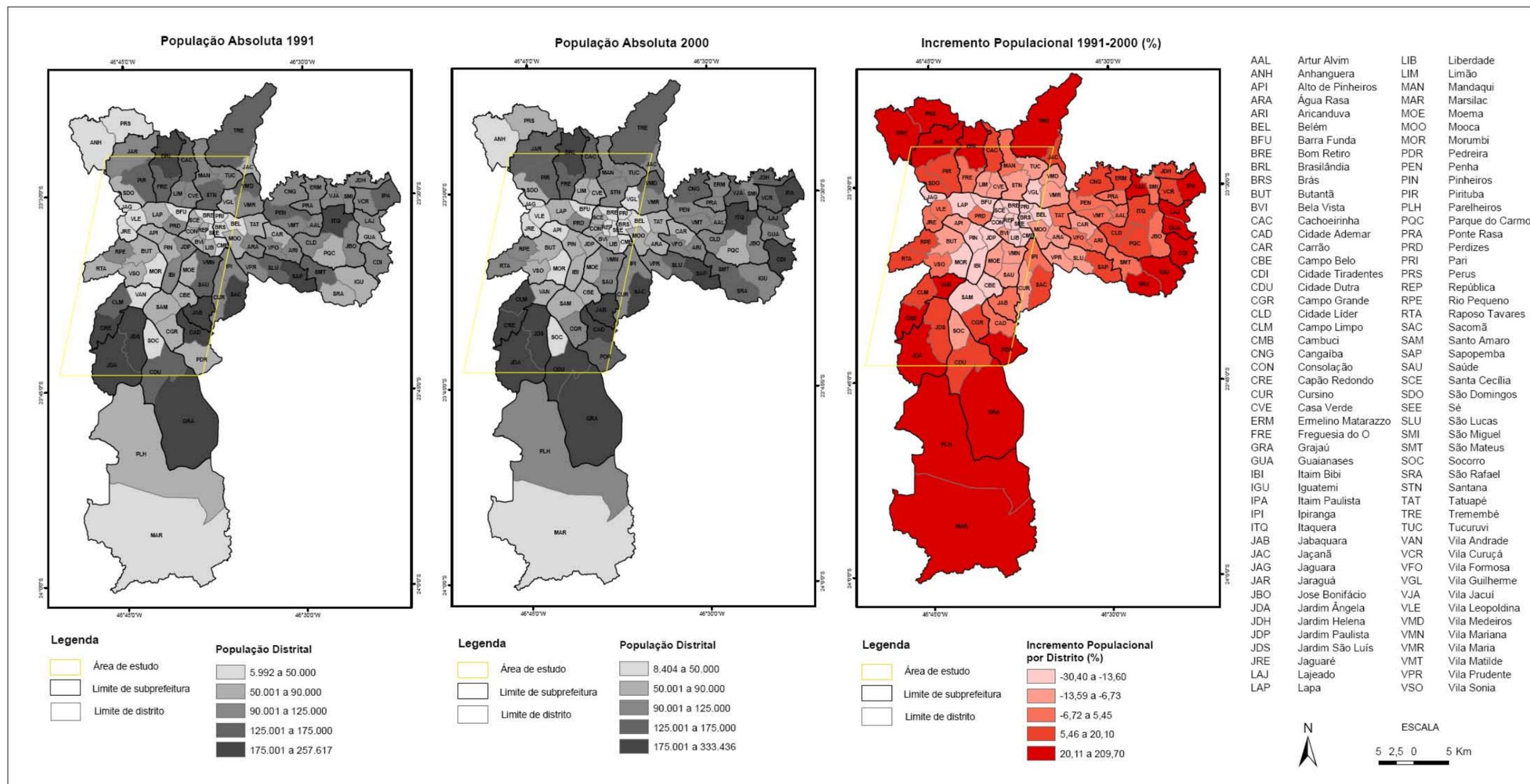


Figura 2.4 – População por distrito do município de São Paulo (1991 e 2000) e incremento populacional no período (%).

Fonte: Organizado a partir de censos demográficos (IBGE, 1991; 2000).

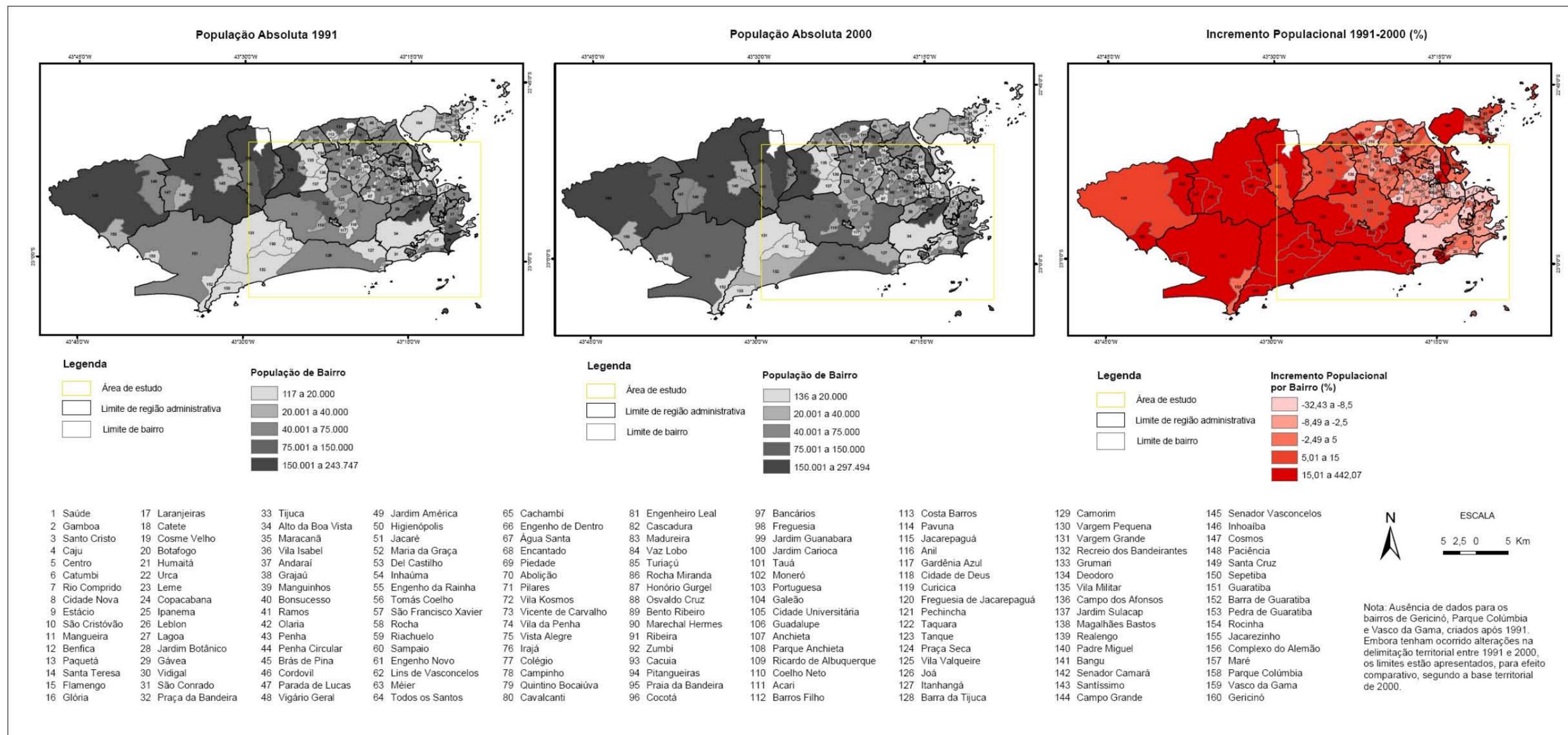


Figura 2.5 – População por bairro do município do Rio de Janeiro (1991 e 2000) e incremento populacional no período (%).

Fonte: Organizado a partir de censos demográficos (IBGE, 1991; 2000).

Em São Paulo, o crescimento demográfico mais intenso, com as maiores taxas observadas no período de 1991 a 2000, vem ocorrendo nas regiões extremas do município, nos distritos de Anhanguera (13,38%), na zona norte, Cidade Tiradentes (7,89%), na zona leste e Parelheiros (7,07%), na zona sul (IBGE, 1991; 2000). No distrito de Anhanguera, o incremento populacional registrado foi de 210%. Um dos maiores problemas verificados é que nesses novos eixos de expansão populacional do município de São Paulo a ocupação é feita de forma desordenada, sem a devida manutenção de áreas verdes e a construção de áreas de lazer. Por outro lado, é observada a tendência de esvaziamento populacional das áreas centrais, com destaque para os distritos da Sé, Brás e Santa Cecília. Na década de 1990, isto também foi verificado em outros distritos como Limão, Freguesia do Ó e Moema, mais afastados do centro, mas de ocupação antiga na capital (JANNUZZI, 2004). Distritos como Moema, por exemplo, tem perdido população com alto nível de renda para novas áreas de urbanização dispersa, em Alphaville (Barueri), Atibaia, Vinhedo, etc.

O município do Rio de Janeiro encontra-se subdividido em cinco áreas de planejamento, 33 regiões administrativas e 160 bairros<sup>5</sup> (RIO DE JANEIRO, 2006). Atualmente, o maior eixo de expansão demográfica encontra-se na zona oeste do município. O incremento populacional é mais intenso na baixada de Jacarepaguá (Figura 2.6), inclusive com a substituição de áreas até então ocupadas pela agricultura familiar por loteamentos urbanos, como ocorre em Vargem Grande e Vargem Pequena.

Toda a ocupação urbana nesta área, que, embora pertença à zona oeste do município é conhecida como “Nova Zona Sul”, seja pela presença de praias, seja pela ocupação residencial de famílias de alto poder aquisitivo, teve início com o loteamento da Barra da Tijuca a partir de 1968, segundo o Plano Urbanístico de Lúcio Costa (IPEA, 2001b). Na área, em sua maior parte, houve

---

<sup>5</sup> Os arquivos da delimitação territorial do município do Rio de Janeiro foram obtidos do portal Armazém de Dados, da Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro.

um direcionamento à implementação de condomínios verticais de alto padrão. Já no final da década de 1990, a área mais dinâmica passa a ser o Recreio dos Bandeirantes, nas proximidades do Pontal de Sernambetiba, inicialmente um loteamento projetado para residências e edifícios de baixo gabarito (número de pavimentos).



Figura 2.6 – Vista panorâmica da Baixada de Jacarepaguá.

Embora tenham sido analisadas imagens de duas datas para cada área de estudo, esta pesquisa não teve como objetivo a análise multitemporal. A seleção das imagens de duas datas visou avaliar a aplicabilidade do método e os processamentos empregados em diferentes condições ambientais, inclusive quanto à análise experimental da correlação com dados de qualidade do ar. O recorte espacial adotado para cada área é apresentado na Figura 2.7.

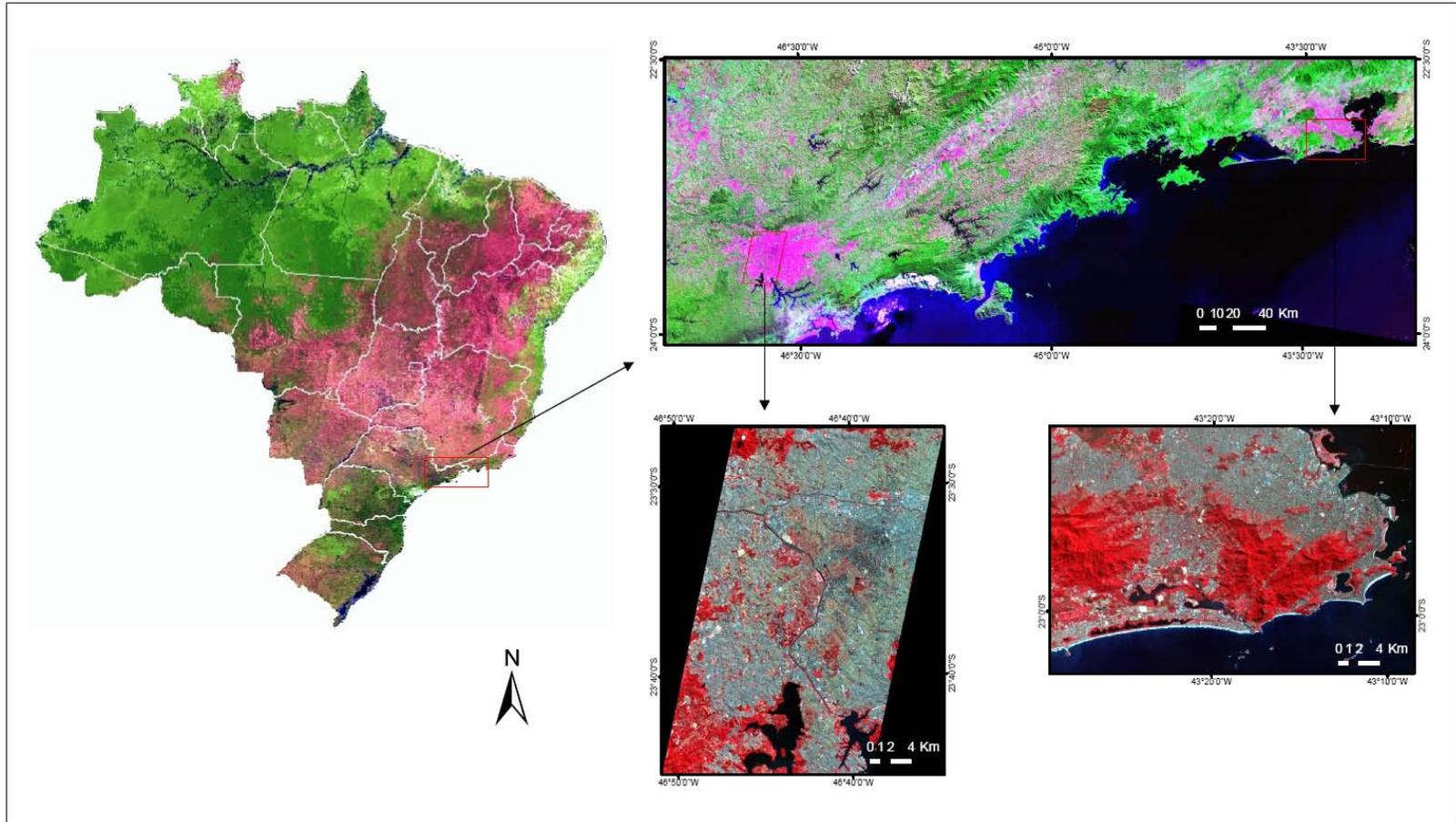


Figura 2.7 – Localização das áreas de estudo.

Essas áreas de estudo representam parte de seis municípios: Cotia, Embu, Itapequerica da Serra, Osasco, São Paulo e Taboão da Serra, no caso da RMSP, e dois municípios: Nilópolis e Rio de Janeiro, no caso da RMRJ (Figura 2.8). Para facilitar a referência ao longo do texto, a primeira área será chamada simplesmente de São Paulo, e a segunda, de Rio de Janeiro.

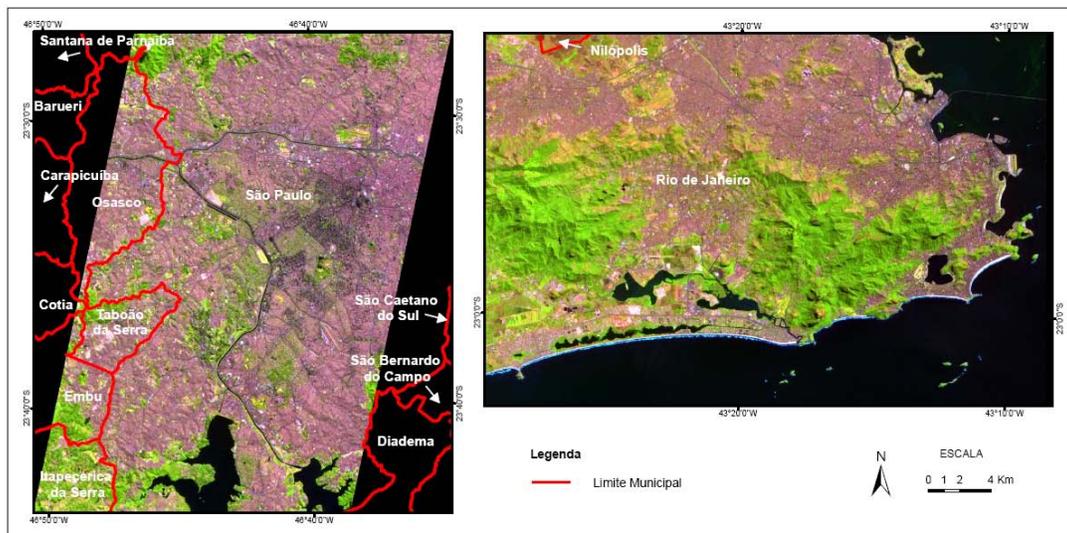


Figura 2.8 – Municípios das áreas de estudo de São Paulo (esquerda) e Rio de Janeiro (direita).

Dentre as principais mudanças de uso e cobertura da terra ocorridas nas áreas de estudo, as maiores alterações foram verificadas em São Paulo<sup>6</sup>. Pôde ser observada, na imagem de 17/05/2006, a presença do pátio do metrô da Linha Amarela – 4, localizado no distrito de Vila Sônia, a implementação do Rodoanel Mário Covas em sua primeira fase, ligando as Rodovias Bandeirantes e Anhangüera à Rodovia Régis Bittencourt (BR-116), e as obras de construção do shopping Villa-Lobos e implantação do Parque de mesmo nome. O Parque Villa-Lobos, localizado no distrito de Alto de Pinheiros, foi implantado em área degradada onde anteriormente era depositado lixo da Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo (CEAGESP), entulho, e material dragado do Rio Pinheiros (Figura 2.9).

<sup>6</sup> Para São Paulo houve um intervalo maior entre as datas de aquisição das imagens utilizadas no estudo, aproximadamente 41 meses, enquanto para o Rio de Janeiro o intervalo foi de 16 meses.

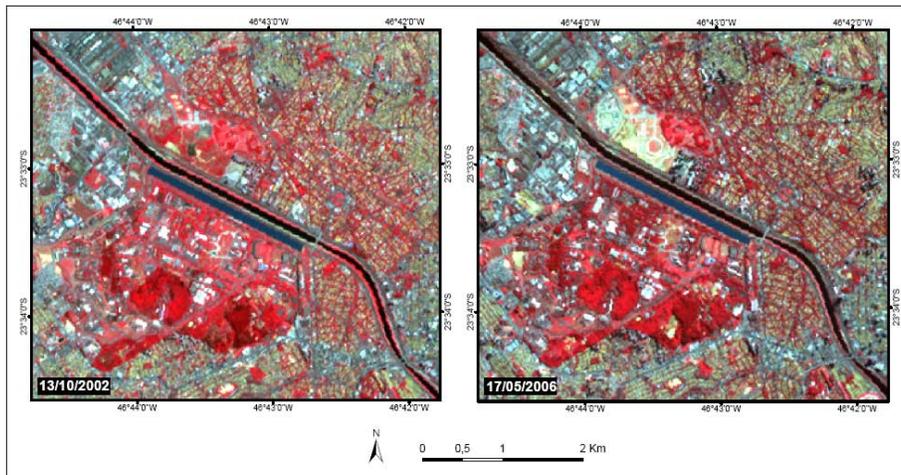


Figura 2.9 – Exemplo de alteração na paisagem urbana de São Paulo.

No Rio de Janeiro, as maiores alterações na paisagem correspondem a obras na baixada de Jacarepaguá, próximas à Avenida Ayrton Senna, direcionadas à construção da Vila Olímpica dos Jogos Panamericanos de 2007, e outros empreendimentos de menor porte (Figura 2.10). Conforme IPP (2005), as áreas naturais da cidade sofreram uma redução de 14,9% no período compreendido entre 1984 e 2001, representando uma conversão de 6.357 hectares para área antropizada. As regiões que mais sofreram esta conversão são as regiões de planejamento 4 e 5, situadas na zona oeste da cidade, área de expansão urbana notável das últimas décadas.

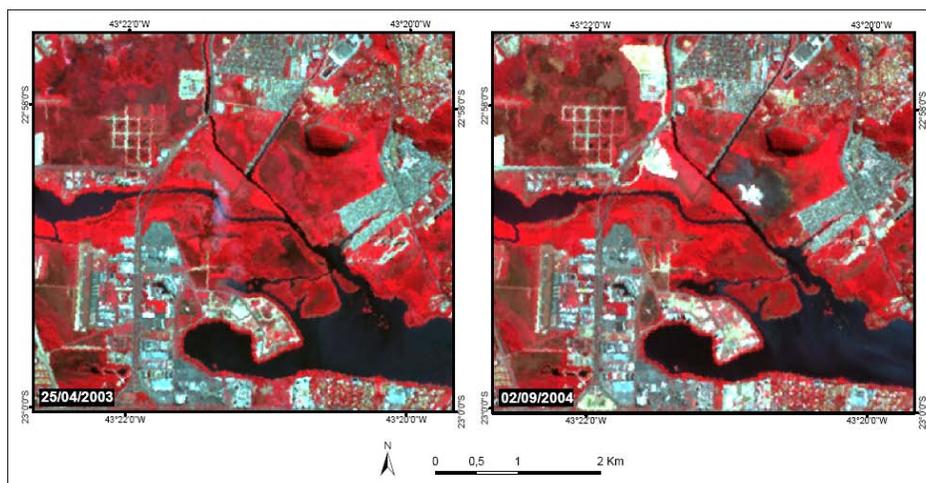


Figura 2.10 – Exemplo de alteração na paisagem urbana do Rio de Janeiro.



### 3 PROCESSAMENTO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

#### 3.1 Introdução

A topografia é um componente físico de notável relevância para o estudo do ambiente urbano. Dentre as aplicações de variáveis derivadas de dados topográficos como declividade, orientação das vertentes, etc., nos estudos urbanos, podem ser citadas a determinação de áreas propícias aos assentamentos humanos, áreas de risco de movimentos de massa, mapeamento da declividade, de potencial erosivo e estudo de processos geomorfológicos de natureza endógena e exógena. No campo da pesquisa ambiental urbana, a topografia é importante para a caracterização do clima urbano e para o estudo de padrões de uso e ocupação do solo, associados a vantagens locacionais e facilidade de deslocamento.

O sensoriamento remoto é indispensável aos estudos envolvendo topografia, desde o trabalho de restituição fotogramétrica com vistas ao mapeamento altimétrico em diferentes escalas, apoiado nos princípios da estereoscopia, até a obtenção de modelos digitais de elevação. Um modelo digital de elevação (MDE) é representado por uma matriz numérica cujos valores correspondem à elevação da área (Z), referenciada a um sistema de coordenadas espaciais (X e Y), ou por uma representação vetorial.

Com o advento de sensores orbitais, modelos digitais de elevação puderam ser extraídos através da interferometria, modo de operação de alguns sensores imageadores de microondas, como o exemplo do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), ou da estereoscopia, através de sensores imageadores ópticos que adquirem imagens com retrovisada, por exemplo, como o ASTER/Terra.

O subsistema VNIR do ASTER possui resolução espacial de 15 m e recobre a faixa do visível e infravermelho próximo com três bandas. Esse sistema possui ainda uma banda 3B (de “*backward*”) com o mesmo intervalo espectral (de 0,78

a 0,86  $\mu\text{m}$ ) da banda 3N (de “nadir”), na qual os dados são adquiridos com um ângulo de retrovisada de aproximadamente  $28^\circ$ , permitindo a construção de pares estereoscópicos para cada imagem e a geração de modelos de elevação (ABRAMS et al., 1999). Na opinião de Melgaço et al. (2005) a grande vantagem da retrovisada é que, devido ao curtíssimo intervalo de tempo entre a aquisição das duas imagens que compõem o par estereoscópico, praticamente não há diferenças radiométricas, condições de iluminação da cena e cobertura de nuvens, o que não é verificado em sistemas que adquirem pares estereoscópicos a partir de dados adquiridos em órbitas adjacentes.

Dois exemplos de dados adquiridos nas bandas 3N e 3B podem ser observados na Figura 3.1. Nota-se, no caso específico dos corpos d’água representados na imagem do Rio de Janeiro, a maior rugosidade registrada pela banda 3B. Na banda 3B da imagem de São Paulo, observa-se o maior sombreamento de edifícios.

Entre os poucos trabalhos experimentais já publicados que empregaram dados ASTER para a obtenção de modelos digitais de elevação, ou seja, não utilizaram o produto nível 3 do ASTER, pode ser citado o de Parma (2007), que teve como objetivo analisar a aplicabilidade do modelo para Cartografia, o de Godoy e Diáz (2007), para o estudo da Geomorfologia, o de Melgaço et al. (2005), que comparou modelos extraídos a partir de dados ASTER e SRTM, e o de Oliveira (2005). Este último autor comparou a adequação dos MDEs gerados a partir de imagens ASTER, RADARSAT-1 e SRTM aos padrões de exatidão cartográfica estabelecidos pela legislação nacional, utilizando um módulo do programa *PCI Geomatics* para o processamento das imagens com pontos de controle coletados em campo. Seus resultados apontaram para a adequação dos MDEs ASTER à exatidão recomendada para a escala 1:100.000.

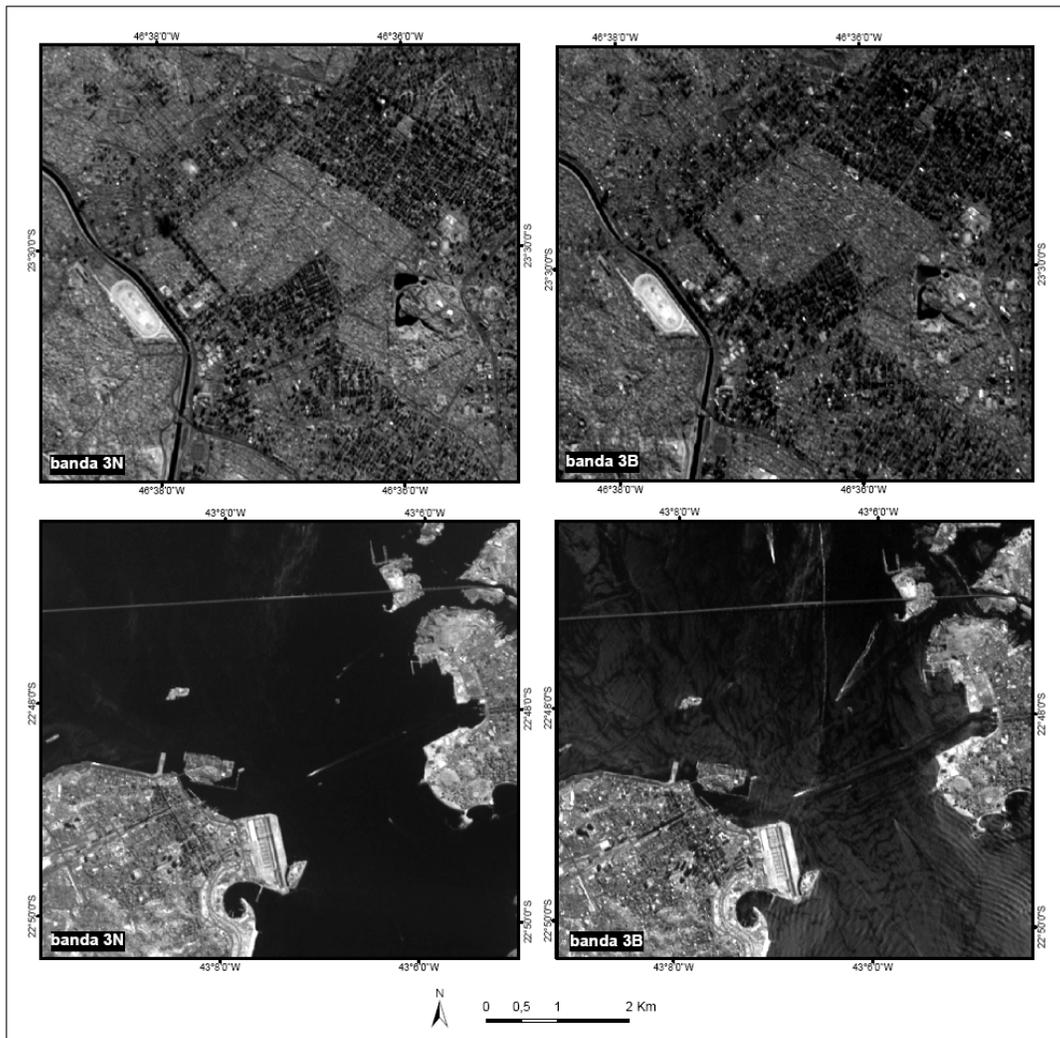


Figura 3.1 – Imagem ASTER adquirida pelas bandas 3N e 3B para um recorte das áreas de estudo de São Paulo em 17/05/2006 (superior) e Rio de Janeiro em 02/09/2004 (inferior).

### 3.2 Material e Métodos

As especificações dos dados ASTER utilizados para a geração dos modelos digitais de elevação são apresentadas na Tabela 3.1. Para o processamento dos dados ASTER adquiridos nas bandas espectrais 3N e 3B foram utilizados os programas: *ENVI 4.2* com o módulo *AsterDTM*, *STATISTICA 6.0* para a análise estatística, *Global Mapper 7* para a obtenção dos perfis topográficos e *ArcGIS 9.1* para a elaboração de mapas.

Tabela 3.1 – Especificações das imagens ASTER.

Satélite (Sensor)	Resolução Espacial	Bandas	Datas de aquisição
Terra (ASTER)	15 m (VNIR)	3N, 3B	13/10/2002 (SP) 25/04/2003 (RJ) 02/09/2004 (RJ)

O algoritmo *AsterDTM* foi desenvolvido para a geração de modelos digitais de elevação a partir de dados ASTER em linguagem *Interactive Data Language* (IDL) com interface gráfica implementada no programa *Environment for Visualizing Images* (ENVI). Conforme Melgaço et al. (2005), no ambiente do *AsterDTM* a correção geométrica entre as imagens 3B e 3N é feita através dos dados de efemérides do satélite, contidos no arquivo “.hdf” da imagem ASTER. Esses dados são processados de forma automática, resultando em imagens quase epi-polares (pixels observados em nadir). Com um sistema referencial comum às imagens estereoscópicas sendo atingido, o deslocamento entre as mesmas, ou paralaxe, é medido através do método de correlação, de forma que para cada pixel na imagem 3N, o deslocamento em pixels na imagem 3B equivalente seja proporcional ao valor da altimetria nesse pixel.

Os modelos digitais de elevação no *AsterDTM* são gerados a partir das imagens brutas disponibilizadas nos níveis de processamento 1A ou 1B, e podem ser extraídos com resolução de saída de 15, 30 ou 60 m. O algoritmo permite ainda a definição de valores mínimos e máximos para a saída do modelo, detecção automática de corpos de água, orientação da imagem para o Norte, aplicação de *offset* positivo ou negativo antes ou após o processamento, além do ajuste de outros parâmetros. Após o processamento, também é possível criar uma visão em anaglifo, figura estereoscópica da área obtida a partir de dois diferentes ângulos, visualizados em duas cores complementares. O módulo *AsterDTM* permite a extração dos MDEs utilizando exclusivamente a imagem ASTER, ou ainda integrando-a a outro MDE. Informações com detalhe sobre as opções implementadas no algoritmo podem ser consultadas em

Sulsoft (2005). Os procedimentos empregados para a geração e avaliação dos modelos digitais de elevação encontram-se sintetizados na Figura 3.2.

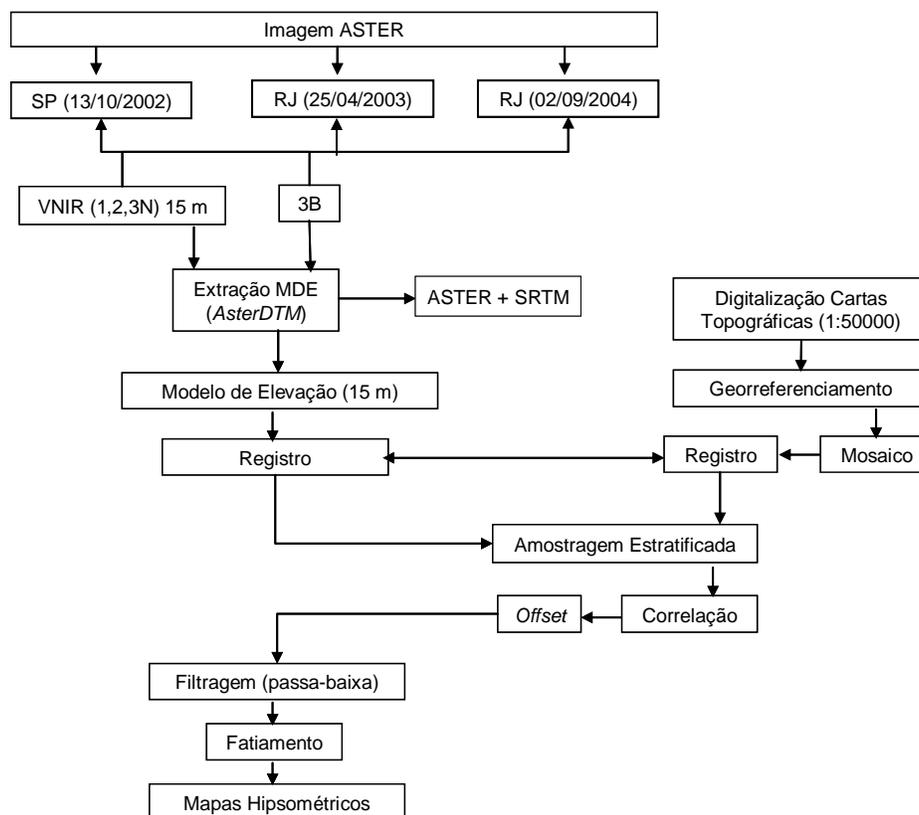


Figura 3.2 – Fluxograma metodológico.

Utilizando o recurso de detecção de corpos de água disponibilizado pelo módulo, foram gerados três modelos para as imagens ASTER<sup>7</sup> (Figura 3.3). A resolução de saída ajustada foi 15 m. Optou-se por não utilizar informações agregando MDE externo ao processamento tendo em vista os dados disponíveis serem imagens SRTM (“.hgt”) com 90 m de resolução espacial e GTOPO (“.DEM”) com 1.000 m de resolução espacial. Após serem gerados, os MDEs foram registrados com base no mosaico *GeoCover* disponibilizado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), cena *S-23-20\_2000*,

<sup>7</sup> Para São Paulo optou-se por gerar apenas um MDE porque a imagem ASTER de 17/05/2006 (Figura 3.2) não compreendia toda a área de interesse.

com resolução espacial de 14,25 m. O método de interpolação usado foi o vizinho mais próximo, com o emprego de um polinômio de 1º grau. O erro médio quadrático do registro (RMSE) foi de aproximadamente 4 m para os três MDEs obtidos.

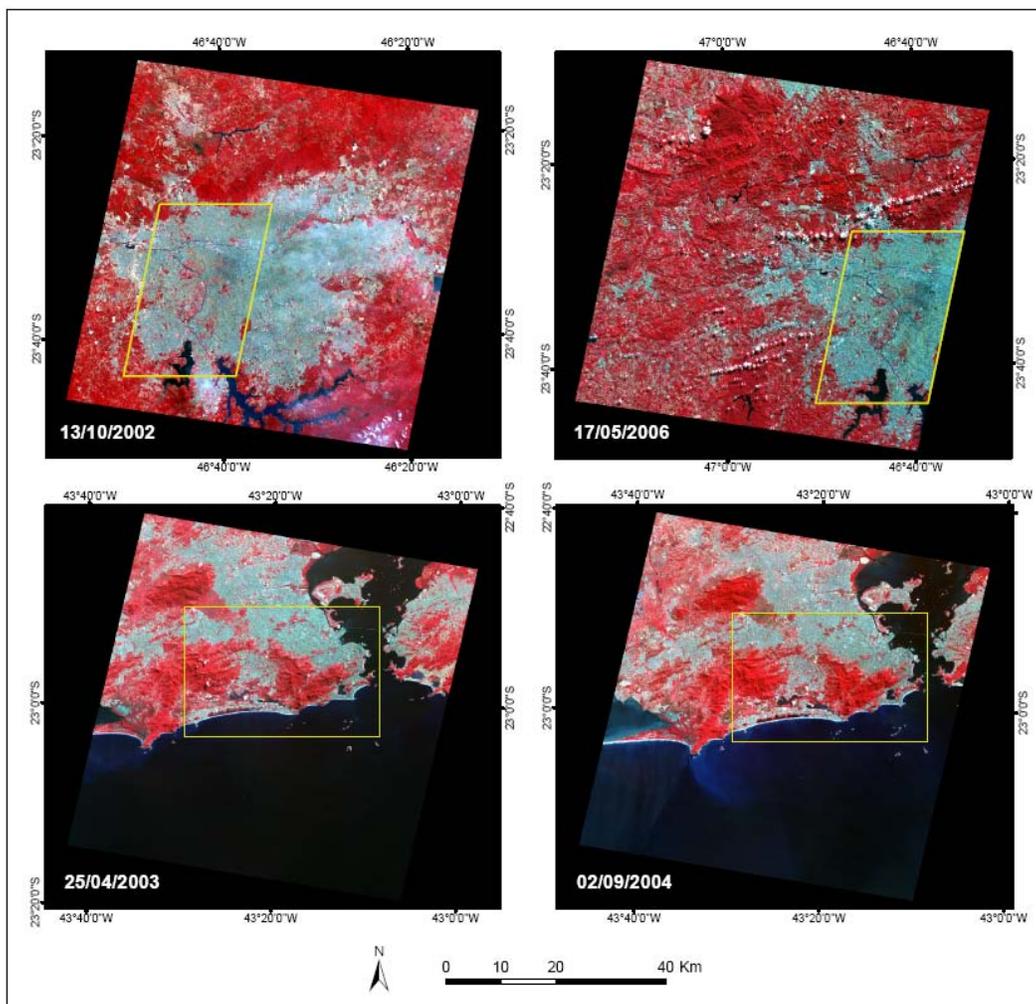


Figura 3.3 – Imagens utilizadas em composição colorida R3G2B1.

Considerando a diferença verificada nos ângulos de apontamento do sensor para as imagens de São Paulo, com maiores valores registrados em 17/05/2006 (Tabela 3.2), houve o interesse em analisar a influência dessa característica da imagem sobre as frações físicas mapeadas, tema tratado no Quinto Capítulo.

Tabela 3.2 – Ângulos de apontamento das imagens.

Data	VNIR	SWIR	TIR
13/10/2002 (SP)	-0,022	-0,006	0,005
17/05/2006 (SP)	-2,87	-2,83	-2,85
25/04/2003 (RJ)	-0,022	0,044	0,005
02/09/2004 (RJ)	-0,022	0,022	0,005

### 3.3 Resultados e Discussão

A Figura 3.4 apresenta os MDEs obtidos após o processamento das imagens. Os MDEs apresentaram um ruído considerável, conseqüência, dentre outros fatores, da adoção da resolução espacial máxima permitida para a saída dos modelos no *AsterDTM*, correspondente a 15 m. Para melhorar a visualização dos mapas hipsométricos finais aplicou-se uma filtragem passa-baixa no MDE, utilizando uma janela de 9x9 pixels. Em seguida foram elaborados mapas hipsométricos, classificando os MDEs por faixas de altitude (Figuras 3.5 e 3.8).

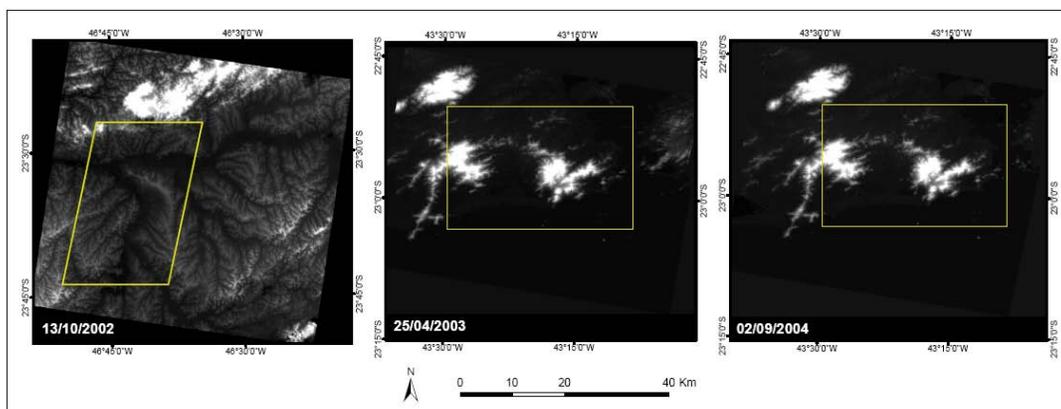


Figura 3.4 – Modelos digitais de elevação em níveis de cinza. No detalhe, recorte espacial das áreas de estudo.

No mapa hipsométrico da área de estudo de São Paulo podem ser observados os vales dos Rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí, bem como córregos de menor representatividade em suas planícies de inundação, caso do Riacho Ipiranga, Córrego Pirajussara e Água Espriada, por exemplo, em boa parte canalizados. Um importante componente do sítio urbano de São Paulo é o

divisor de águas entre o Rio Pinheiros e o Tamanduateí, conhecido por Espigão Central. A altitude nesta área é superior a 800 m e a orientação do divisor, do distrito de Jabaquara até o de Vila Mariana, é norte-sul e, de Vila Mariana até a Lapa, é sudeste-noroeste, a mesma orientação dos Rios Pinheiros e Tamanduateí. Uma característica importante deste divisor é que a vertente voltada para o Rio Tamanduateí tem uma declividade menor que a vertente voltada para o Rio Pinheiros (mais abrupta no lado oeste), onde se localizam a planície e os terraços do Rio Pinheiros.

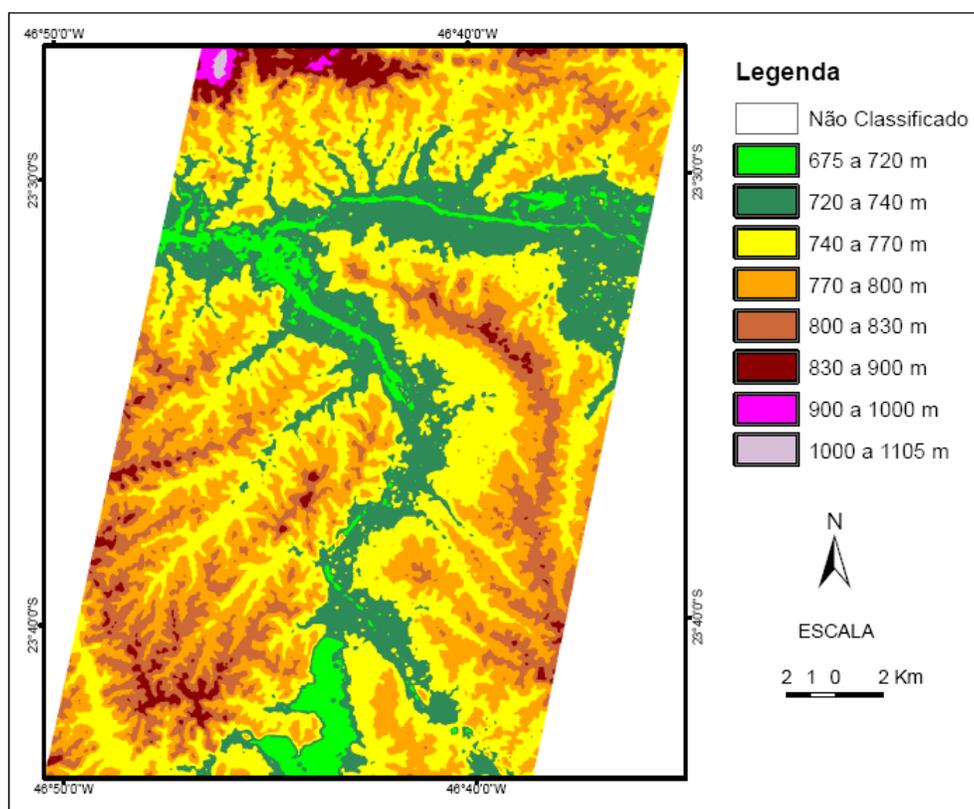


Figura 3.5 – Mapa hipsométrico da área de estudo de São Paulo.

No perfil topográfico (Figura 3.6) podem ser observadas feições do relevo destacadas no MDE. As áreas a oeste do Rio Pinheiros são predominantemente marcadas por colinas e em alguns trechos por platôs acima de 800 m, onde se localiza o distrito do Morumbi, por exemplo. A área a leste do Tamanduateí, onde estão os distritos da Moóca, Brás e Belém, é

predominantemente marcada por terraços planos a sub-planos e por colinas amplas (TARIFA; ARMANI, 2000). Estas feições são perceptíveis no mapa hipsométrico de São Paulo (Figura 3.5) e são destacadas sobre a Figura 3.7.

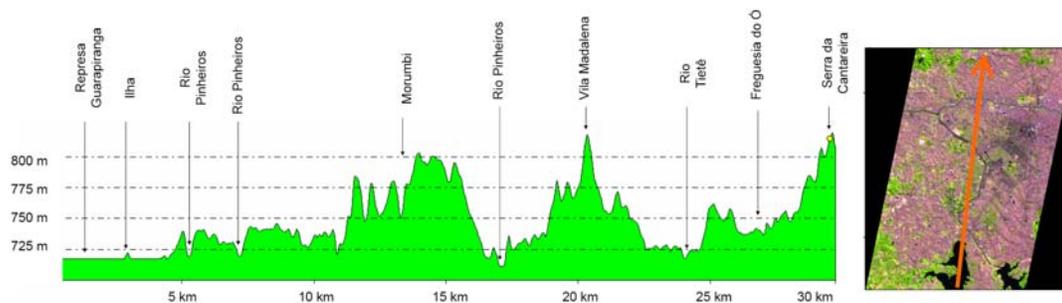


Figura 3.6 – Perfil topográfico A-B representativo da área de estudo de São Paulo.

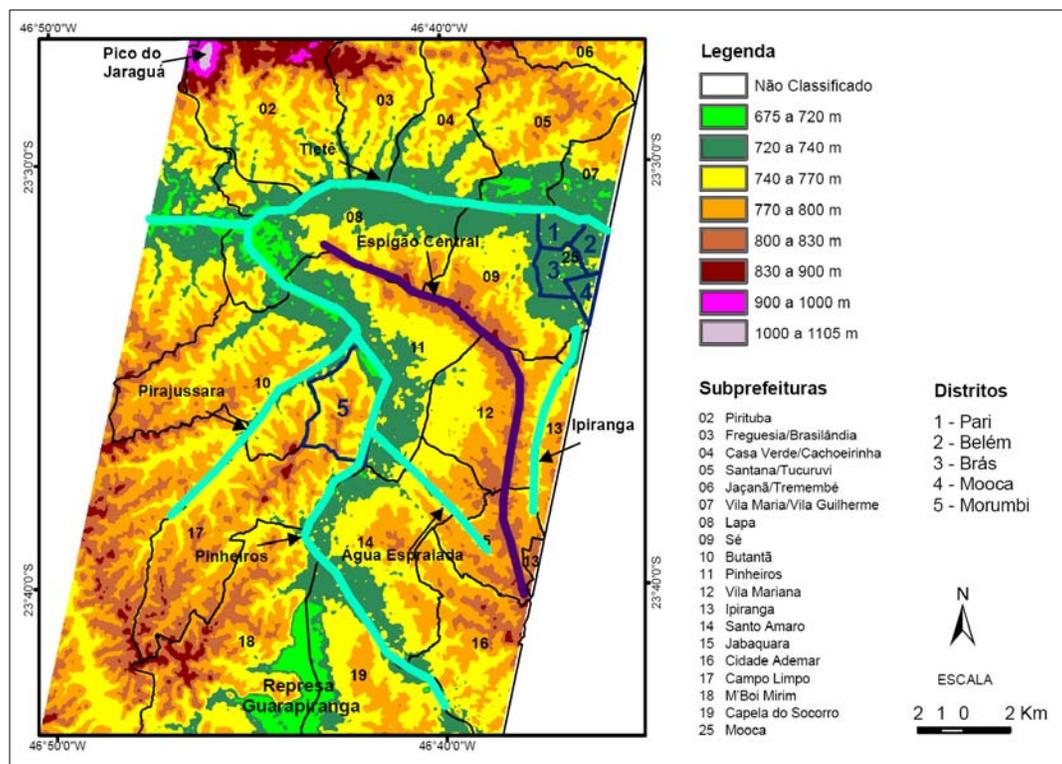


Figura 3.7 – Elementos da divisão territorial municipal de São Paulo sobrepostos ao mapa hipsométrico.

O MDE do Rio de Janeiro também foi classificado em faixas de altitude, considerando a elevada amplitude topográfica verificada (Figura 3.8). As

maiores altitudes obtidas a partir das imagens de 2003 e 2004 correspondem aos picos dos maciços da Tijuca e Pedra Branca, as maiores elevações dessa área de estudo. Outras feições características do relevo do Rio de Janeiro são as elevações de menor proeminência, tais como as serras do Juramento–Misericórdia, do Engenho Novo e de Copacabana–Botafogo. A Figura 3.9 apresenta a visualização tridimensional do MDE gerado para a imagem do Rio de Janeiro de 02/09/2004<sup>8</sup>.

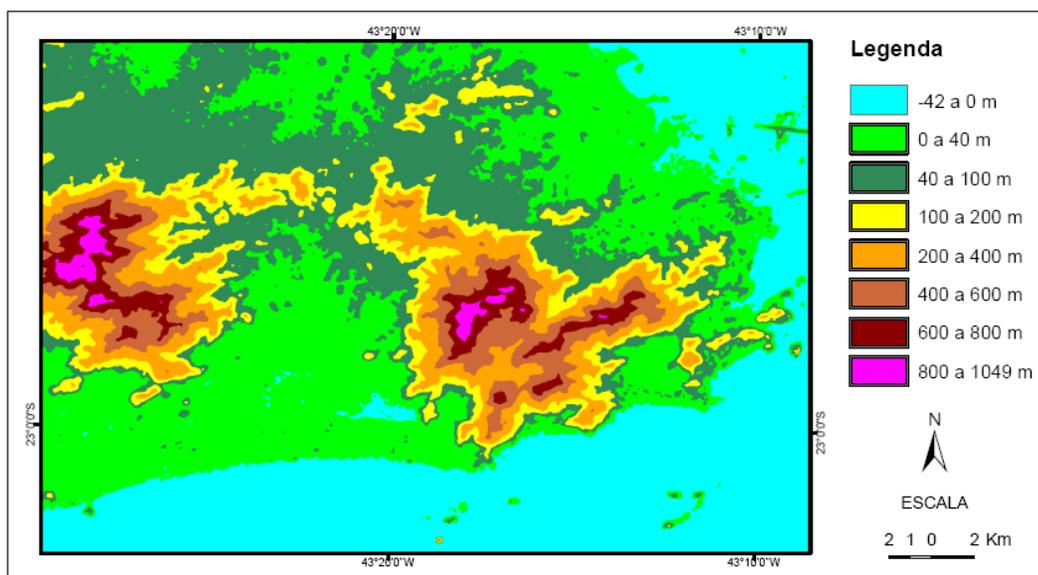


Figura 3.8 – Mapa hipsométrico da área de estudo do Rio de Janeiro.

Segundo dados da Prefeitura Municipal, 22,5% da área do município do Rio de Janeiro encontra-se situada acima da cota 100 m de altitude (RIO DE JANEIRO, 2006). Embora o MDE não contemple todo o município, foi observado que este percentual se assemelha para a área de estudo, pois 22,3% encontra-se acima da cota 100 m.

<sup>8</sup> Após o processamento inicial dos MDEs, foi encontrado achatamento nos topos das elevações para a área de estudo do Rio de Janeiro e nivelamento máximo, no caso da imagem do ano de 2004, em torno de 350 m. No caso da imagem de 2003, o nivelamento foi verificado em torno de 600 m. Este problema foi informado à Sulsoft, empresa responsável pelo desenvolvimento do algoritmo *AsterDTM*, que procurou resolvê-lo, desenvolvendo uma nova versão. Esta versão, utilizada posteriormente, foi capaz de corrigir o problema.

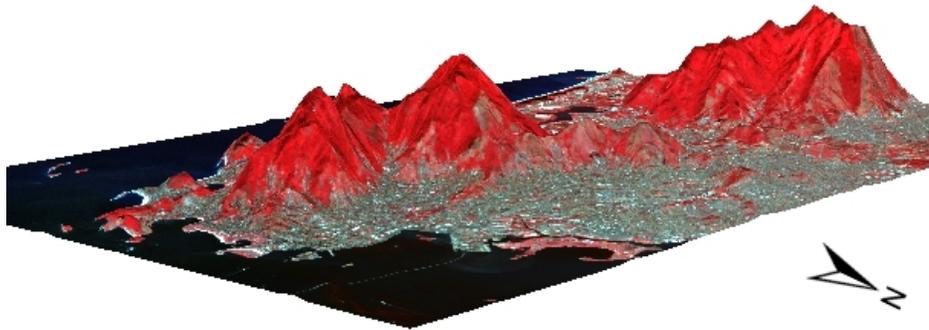


Figura 3.9 – Representação tridimensional do modelo digital de elevação gerado para a imagem do Rio de Janeiro de 02/09/2004.

O Maciço da Tijuca divide a cidade em duas regiões: zona norte e zona sul. Ele é subdividido pelo Alto da Boa Vista em: Maciço da Tijuca propriamente dito e Serra da Carioca, a leste. As áreas mais planas podem ser subdivididas em Baixada Fluminense e Baixada de Jacarepaguá. No perfil topográfico extraído do MDE podem ser observadas feições de destaque do relevo (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Perfil topográfico A-B representativo da área de estudo do Rio de Janeiro.

Apesar dos obstáculos do relevo à ocupação humana, algumas vias de interligação das baixadas foram implementadas, tais como a estrada Jacarepaguá – Grajaú e a estrada do Alto da Boa Vista, ambas com alta sinuosidade em seu traçado. O crescimento da cidade e a necessidade de maior acessibilidade conduziram à perfuração dos maciços visando a construção de túneis. Entre estes podem ser citados os túneis Rebouças (Rio Comprido – Lagoa), Dois Irmãos (Gávea – São Conrado), Santa Bárbara (Laranjeiras – Catumbi) e o da Linha Amarela (Água Santa – Freguesia de

Jacarepaguá). Outras feições de destaque são as lagoas de Jacarepaguá, Tijuca, Marapendi, Camorim e Rodrigo de Freitas, localizadas entre os maciços e o Oceano Atlântico e separadas deste último por cordões arenosos praticamente ocupados em toda a sua extensão pelo uso urbano.

Algumas encostas do Maciço da Tijuca encontram-se ocupadas por favelas, tais como a da Rocinha, Dona Marta e Vidigal. Segundo IPP (2005), os atendimentos da Defesa Civil em acidentes relativos à fragilidade das encostas ocupam posição de destaque nas estatísticas anualmente. Os deslizamentos ou as ameaças de material proveniente das elevações (deslizamento de barreira, rolamento de pedra e queda de muro de arrimo ou de contenção) constituem a grande maioria dos atendimentos às ocorrências relacionadas ao meio ambiente e ultrapassaram 65% dos atendimentos em nove anos (1993 a 2004). Há também um grande número de favelas em áreas de baixadas como, por exemplo, a Cidade de Deus, o Complexo da Maré, o Jacarezinho e Vidigal Geral. Na Figura 3.11 podem ser observados os bairros correspondentes.

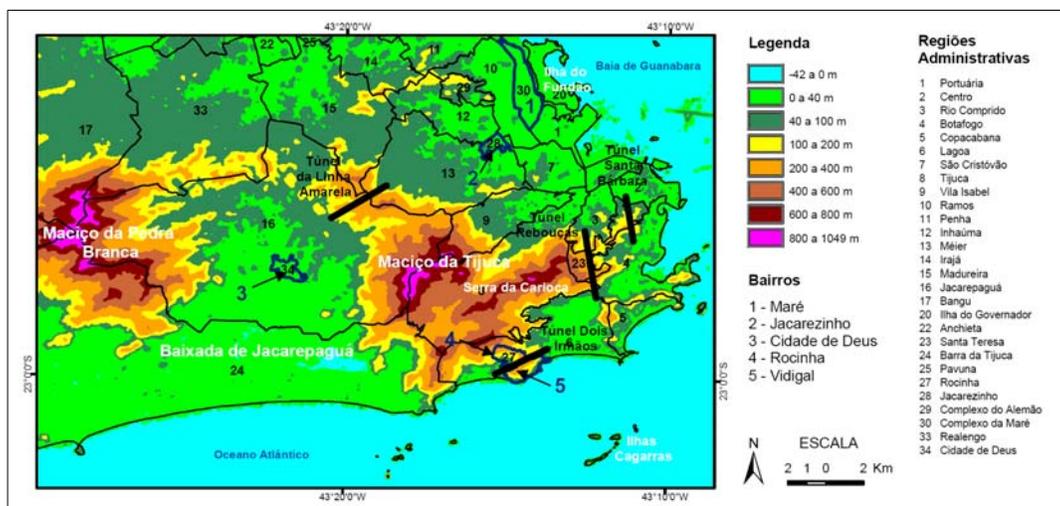


Figura 3.11 – Elementos da divisão territorial municipal do Rio de Janeiro sobrepostos ao mapa hipsométrico.

### **3.4 Avaliação dos Modelos de Elevação**

Segundo Abrams et al. (1999) os MDEs relativos (elaborados sem pontos de controle) do ASTER podem ser gerados com valores de RMSE de até 10 m. A precisão altimétrica do MDE gerado a partir do *AsterDTM* não é citada em seu manual (SULSOFT, 2005), embora seja difundido o valor de 14 m. Este valor, no entanto, pode divergir conforme a área de estudo. Considerando a configuração topográfica notadamente distinta das áreas de estudo deste trabalho e a relevância deste dado para a análise integrada proposta na pesquisa, foi executada uma avaliação dos MDEs para verificar o nível de conformidade em relação ao mapeamento topográfico oficial em escala compatível. Esta avaliação foi executada conforme os procedimentos apresentados a seguir.

Inicialmente foi planejado utilizar como referência os marcos geodésicos do IBGE conhecidos como Referência de Nível (RN). Os memoriais descritivos de cada uma dessas marcações foram obtidos, separadamente, junto ao IBGE, para as áreas de estudo. Após verificação inicial dos dados, foi observado que, no caso específico do Rio de Janeiro, quase a totalidade dos dados estão cotados em níveis muito próximos ao do mar. O ideal seria trabalhar com dados amostrados em diferentes faixas de altitude, considerando sua amplitude e a representatividade de cada faixa em área.

Como alternativa, embora de menor precisão planimétrica e altimétrica, foram utilizados como referência dados (pontos cotados) extraídos de cartas topográficas em escala 1:50.000 da área de abrangência das imagens. As cartas topográficas em escala 1:50.000 correspondentes às áreas de estudo, Folhas Osasco (IBGE, 1984a), São Paulo (IBGE, 1984b), Vila Militar (DSG, 1963) e Baía da Guanabara (DSG, 1965), foram digitalizadas em cores. Após digitalização, as cartas foram georreferenciadas, mosaicadas e co-registradas com os MDEs. Para o georreferenciamento das cartas topográficas foram utilizados cerca de 35 pontos para cada carta, e o RMSE foi inferior a 5 m em

todos os casos (aproximadamente 0,98 pixel). A Figura 3.12 apresenta o mosaico de cartas topográficas elaborado para a seleção de pontos de referência no Rio de Janeiro.

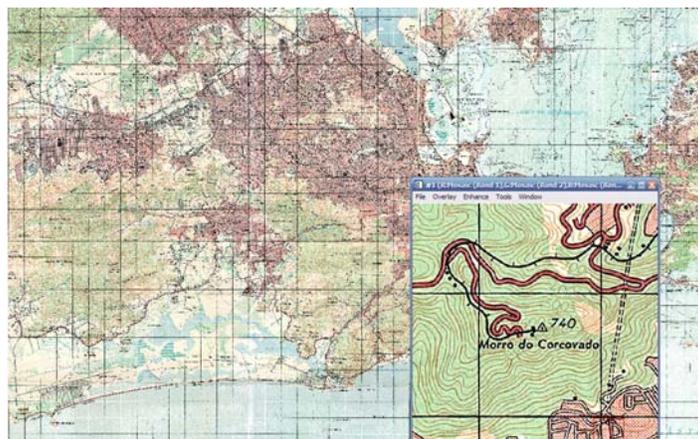


Figura 3.12 – Mosaico de cartas topográficas. No detalhe, exemplo de ponto cotado.

A partir de amostragem aleatória estratificada, considerando classes de altitude pré-determinadas para a elaboração de mapas hipsométricos a partir dos MDEs, foram selecionados 75 pontos cotados nas cartas topográficas para verificação dos valores correspondentes nos MDEs (Figura 3.13). Isto para avaliar, por análise de regressão linear simples, a qualidade dos modelos gerados, bem como verificar a necessidade ou não de aplicar um *offset* sobre o MDE, negativo ou positivo. Estes 75 pontos representaram quase a totalidade de pontos cotados do mosaico de cartas. No caso do Rio de Janeiro, foram selecionados os mesmos pontos de referência para a avaliação dos dois MDEs, permitindo, dessa forma, uma comparação entre eles.

Para a análise da relação estatística entre as variáveis foi utilizado o coeficiente de correlação linear de Pearson ( $r$ ). Este coeficiente, conforme define Neter et al. (1996), indica o grau de intensidade da correlação linear entre duas variáveis e, ainda, o sentido dessa correlação (positiva ou negativa). O coeficiente de correlação linear de Pearson varia entre -1 e +1 ( $-1 \leq r \leq +1$ ).

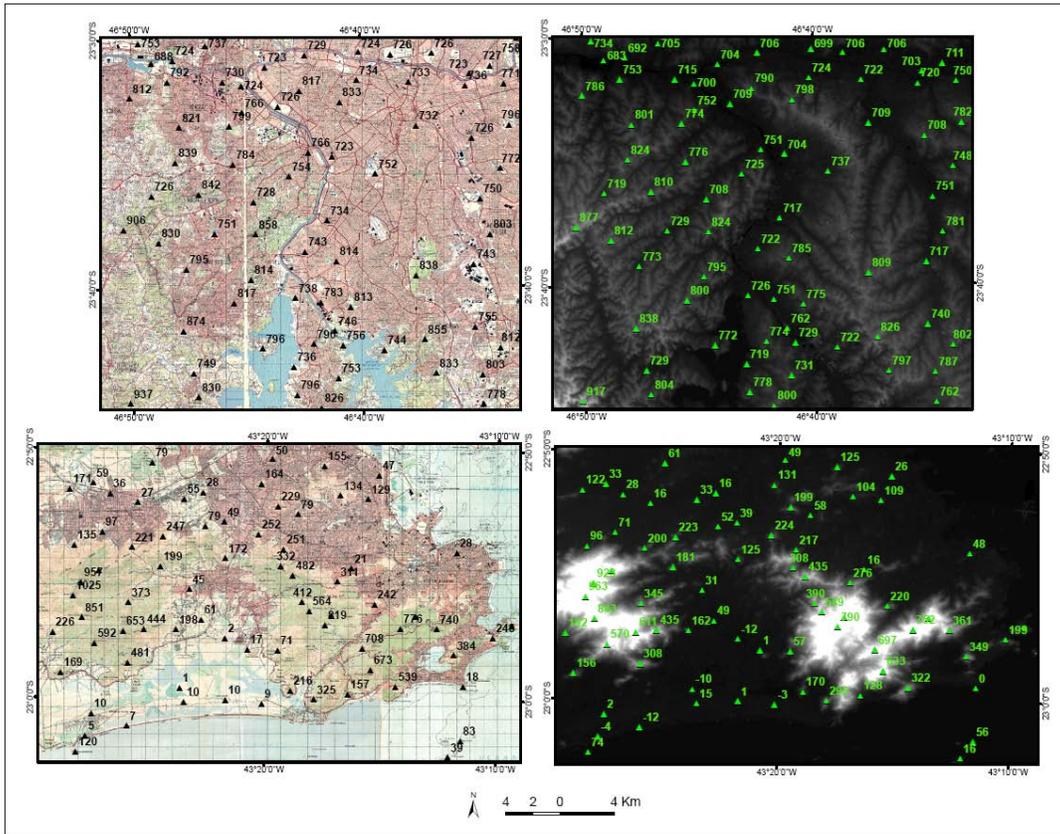


Figura 3.13 – Localização das amostras selecionadas e respectivos valores de altitude (em metros) no mosaico de cartas topográficas e nos modelos digitais de elevação (o MDE do Rio de Janeiro é de 02/09/2004).

Considerando uma amostra com  $n$  pares ordenados  $(x_i, y_i)$ , o coeficiente de correlação é definido pela Equação 3.1:

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left[ n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right] \left[ n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right]}} \quad (3.1)$$

Caso seja observada relação linear entre as variáveis através da medida de correlação, a relação pode ser estabelecida e, conseqüentemente, pode ser feita uma série de inferências a partir da técnica estatística da análise de regressão. Segundo Neter et al. (1996) um modelo de regressão é uma

ferramenta estatística que através do relacionamento existente entre duas ou mais variáveis permite que uma delas possa ser descrita ou ter seu valor estimado a partir das demais. Um modelo de regressão é um modo formal de expressar a tendência que a variável dependente (Y) tem em variar com a(s) variável(is) independente(s) (X) de modo sistemático. Isto pode ser visualizado através da dispersão dos pontos (observações) ao redor da curva de relação estatística. Um modelo de regressão contendo somente uma variável independente é denominado modelo de regressão simples ou modelo de primeira ordem. Um modelo com mais de uma variável independente é denominado modelo de regressão múltipla.

Para esta etapa da pesquisa foi empregado um modelo de regressão linear simples visando ajustar os valores de altitude obtidos pelos MDEs a uma referência conhecida. Este modelo pode ser expresso matematicamente conforme a Equação 3.2:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \xi_i \quad (3.2)$$

onde:

$Y_i$  é o valor da variável dependente, que deseja ser explicada, na  $i$ -ésima observação;

$X_i$  é uma das variáveis independentes ou explicativas;

$\beta_0$  é o coeficiente da regressão que representa o intercepto populacional em Y da equação de regressão (é o valor de Y quando X é igual a zero);

$\beta_1$  é o coeficiente da regressão que determina a inclinação da linha; e,

$\xi_i$  é um termo de erro aleatório com média zero e variância constante.

Em geral, não se conhecem os valores dos coeficientes de regressão  $\beta_0$  e  $\beta_1$ . Entretanto, estes parâmetros podem ser estimados através de dados obtidos por amostragem. Os estimadores de  $\beta_0$  e  $\beta_1$  são conhecidos por  $b_0$  e  $b_1$  e são calculados usando os pares  $(x_i, y_i)$  obtidos por amostras.

O índice de correlação obtido entre o MDE e a Carta foi de 0,9841 para São Paulo, 0,9780 para a imagem de 25/04/2003 do Rio de Janeiro e 0,9781 para a imagem de 02/09/2004 (Figura 3.14). Era esperado que valores mais altos fossem obtidos para São Paulo, devido à menor amplitude topográfica da área de estudo.

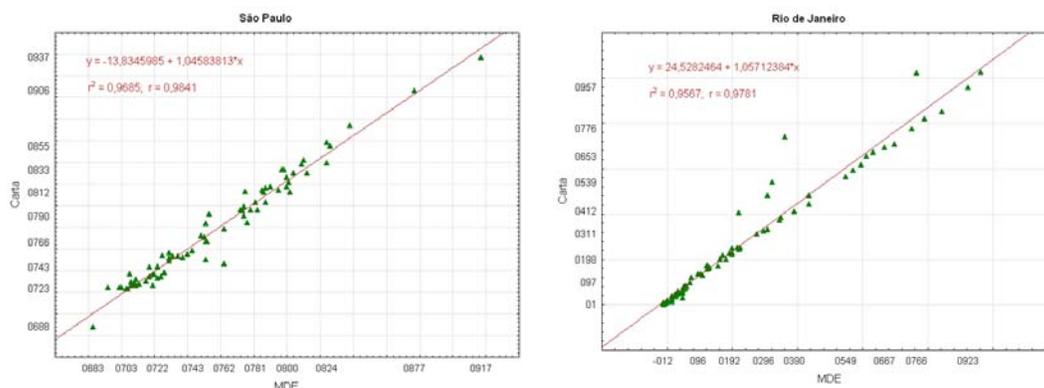


Figura 3.14 – Diagramas de dispersão (a imagem do Rio de Janeiro é de 02/09/2004).

Apesar dos elevados índices de correlação, para todos os MDEs foi necessária a aplicação de um *offset*, pois os valores resultantes foram em média 20 m inferiores aos pontos cotados nas cartas. Isto diverge dos resultados verificados na avaliação de dados SRTM, como a exemplo dos trabalhos de Barros e Cruz (2007) e Zaloti Júnior et al. (2007), que encontraram valores superestimados para os MDEs em relação aos dados de referência. Na Figura 3.15 pode ser observada a diferença entre as altitudes cotadas nas cartas topográficas e as altitudes estimadas pelos MDEs.

No caso de dados de radar, a superestimação ocorre, em áreas específicas, principalmente pela influência de edifícios ou do estrato arbóreo superior em áreas cobertas por densa vegetação e, para dados adquiridos em bandas de menor comprimento de onda, como as bandas K e X, porque o sinal do radar não é capaz de atravessar estes alvos e obter informações do relevo. Nesse exemplo, portanto, o valor de altitude registrado corresponde ao do telhado dos edifícios ou da copa das árvores. Barros e Cruz (2007) verificaram também que

as maiores diferenças de altitude são encontradas em áreas de maior declividade, embora tenham considerado sua amostra pouco significativa.

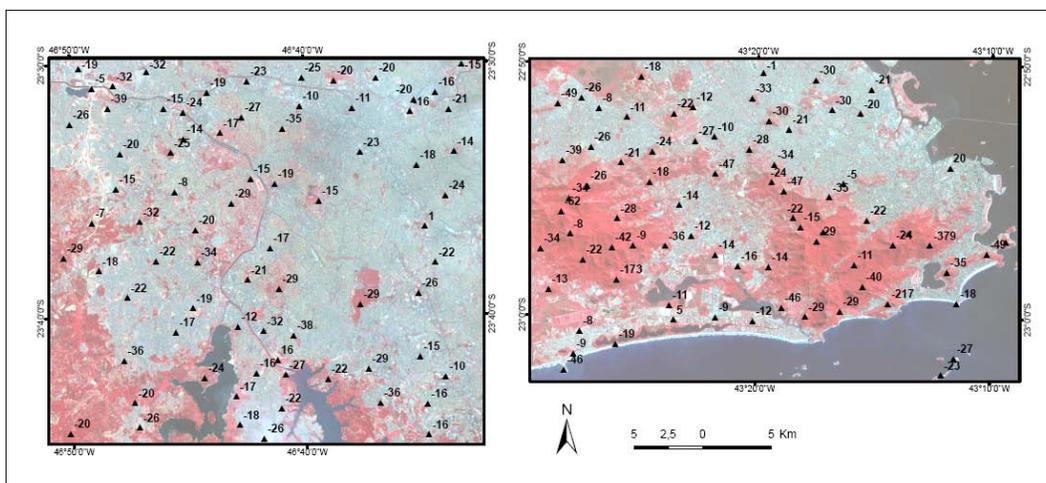


Figura 3.15 – Altitudes cotadas nas cartas topográficas subtraídas das altitudes estimadas pelos MDEs.

A aplicação do *offset* nos MDEs foi efetuada a partir das equações obtidas nos modelos de regressão linear simples:

- a)  $MDE = -13,834 + 1,0458 * Carta$  (imagem de São Paulo);
- b)  $MDE = 31,533 + 1,0581 * Carta$  (imagem de 25/04/2003 do Rio de Janeiro);
- c)  $MDE = 24,528 + 1,0571 * Carta$  (imagem de 02/09/2004 do Rio de Janeiro).

A avaliação dos resultados foi fundamental para a correção dos MDEs. Para a área de estudo do Rio de Janeiro, por exemplo, no modelo original as altitudes das áreas emersas mais baixas apresentaram valores inferiores aos do nível do mar. A Figura 3.16 apresenta os MDEs obtidos antes e após a aplicação da equação de regressão.

Embora a análise da adequação dos MDEs ao mapeamento topográfico oficial em escala compatível tenha contribuído para o ajuste de seus valores, novos testes podem ser aplicados na comparação entre MDEs obtidos através do módulo *AsterDTM* utilizando unicamente dados ASTER, ou agregando ao processamento imagens SRTM, na opção disponível de inclusão de MDE

externo. Nesta etapa, visando verificar a influência e a diferença entre os resultados, também foram gerados os MDEs utilizando como recurso externo o MDE do SRTM. As imagens SRTM utilizadas (em formato “.hgt”) foram a S23W044 e S24W044 para o Rio de Janeiro e a S24W047 para São Paulo.

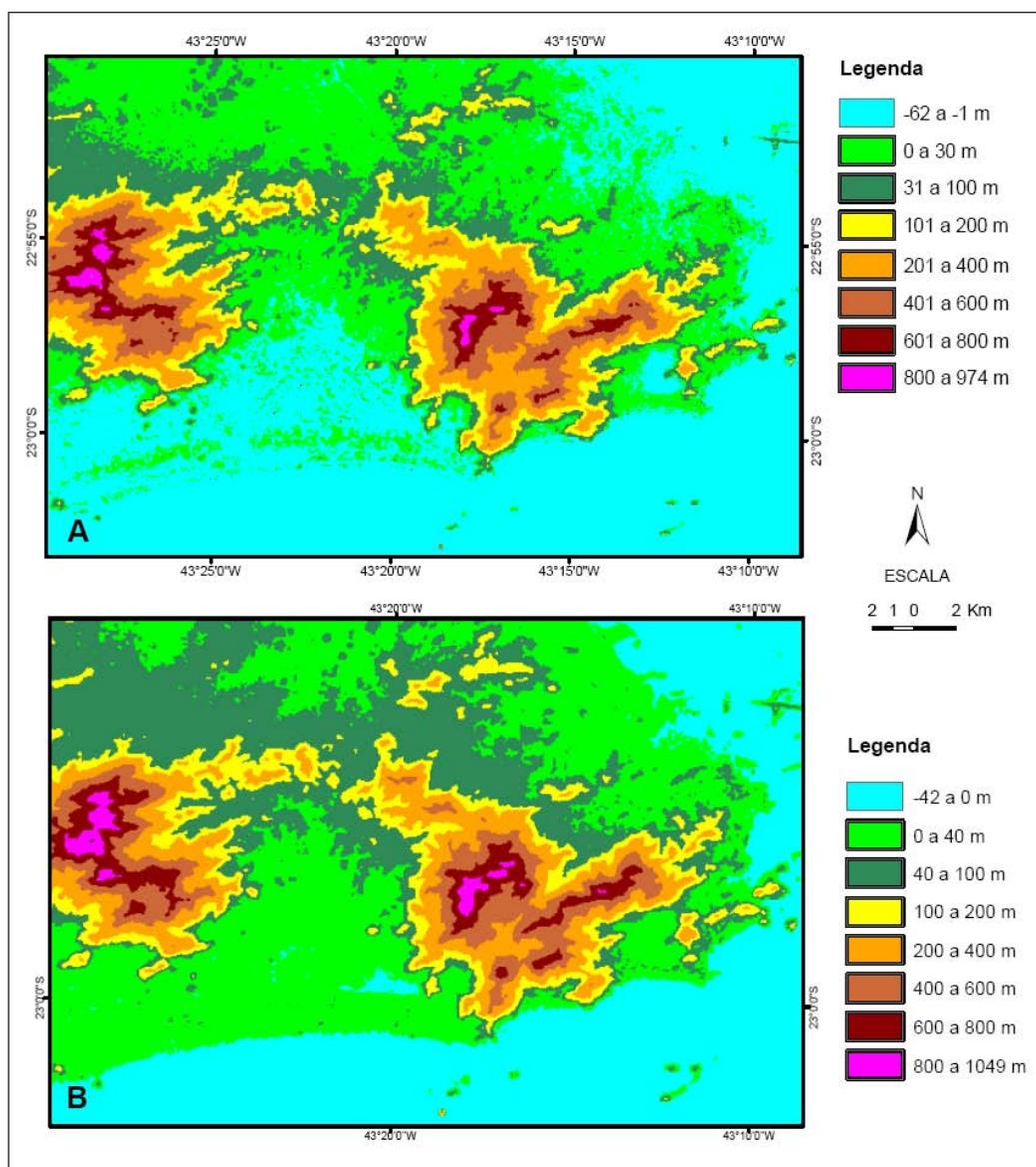


Figura 3.16 – Mapas hipsométricos da área de estudo do Rio de Janeiro elaborados antes (A) e depois da avaliação dos resultados (B).

A análise dos resultados em faixas de altitude (Figura 3.17) mostrou que para o Rio de Janeiro e para São Paulo parece ser grande a diferença entre o MDE gerado unicamente a partir de dados ASTER e o MDE gerado a partir da integração entre dados ASTER e SRTM. Com relação à média das imagens, as imagens ASTER (Tabela 3.3) apresentaram, nos três casos, médias inferiores, da ordem de aproximadamente 20 m, em relação às registradas com os dados ASTER integrados ao SRTM.

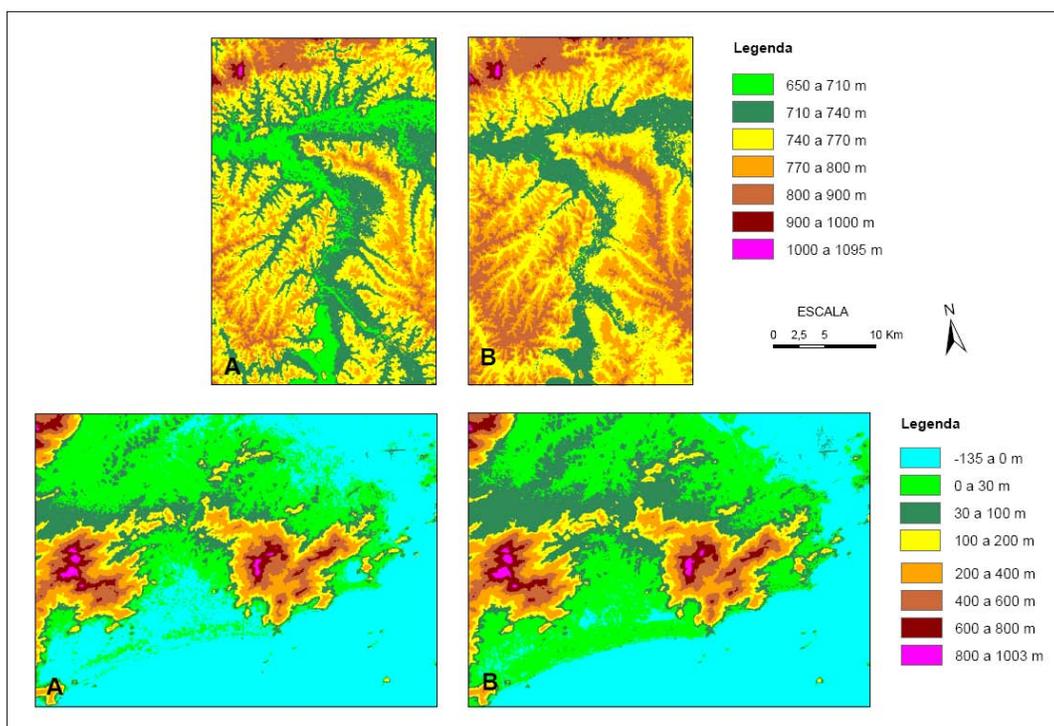


Figura 3.17 – Fatiamento dos modelos digitais de elevação brutos obtidos a partir do processamento dos dados ASTER e da integração de dados ASTER e SRTM.

Portanto, concluiu-se que a integração de dados SRTM apresenta potencial para a melhoria dos resultados com o processamento de MDEs no algoritmo *AsterDTM*. Esta seria uma outra possibilidade de trabalho para o ajuste dos MDEs gerados a partir de imagens ASTER, caso sejam encontrados problemas semelhantes aos desta pesquisa (valores inferiores à referência).

Tabela 3.3 – Parâmetros estatísticos dos modelos digitais de elevação (área de estudo).

MDE	Mínimo (m)	Máximo (m)	Média (m)	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
ASTER (2002)	650	1074	747,00	32,24
ASTER e SRTM (2002)	695	1095	768,37	32,10
ASTER (2003)	-75	985	63,47	158,18
ASTER e SRTM (2003)	-124	1003	81,38	158,79
ASTER (2004)	-75	977	68,31	160,23
ASTER e SRTM (2004)	-135	913	83,17	160,05

### 3.5 Conclusões

Este estudo concluiu pela boa qualificação do MDE do ASTER para representar a superfície. Como esperado, as maiores discordâncias entre valores de altitude ocorreram na área de estudo do Rio de Janeiro em virtude da topografia acidentada, como o exemplo das proeminentes elevações dos Morros do Corcovado, Pico Dois Irmãos, Pedra da Gávea, Pão de Açúcar e Urca.

Os MDEs apresentaram elevada correlação com as cartas topográficas oficiais em escala compatível, necessitando, entretanto, da aplicação de um *offset* para ajuste, pois as altitudes foram subestimadas. A agregação de dados SRTM ao processamento também se mostrou uma possibilidade factível para evitar a subestimação. A diferença encontrada pode ter ocorrido em função de discrepâncias no processamento do programa utilizado.

É importante citar que a interferometria pode levar a melhores resultados do que a estereoscopia. Por outro lado, a vantagem dos dados ASTER em relação a dados como os do SRTM está na maior resolução espacial. Entretanto, estes resultados ainda são preliminares e novos testes deverão ser efetuados, inclusive no intuito de verificar a precisão do MDE para a representação direta da superfície.

Para a continuidade destas pesquisas, os resultados poderão ser comparados com o processamento aplicando-se outros algoritmos disponíveis em programas de processamento de imagens, bem como com o produto ASTER nível 3 (modelo digital de elevação), disponível para aquisição sob demanda, com 30 m de resolução. É possível que, utilizando um MDE ASTER com resolução mais grosseira, seja minimizado o ruído bem como dispensada a necessidade da aplicação de filtragem. Além disso, poderão ser extraídos MDEs para as mesmas áreas de estudo efetuando o processamento de imagens de outros sensores, respeitadas na avaliação as diferenças em função da resolução espacial.

## 4 ESTUDO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE

### 4.1 Introdução

A característica espectral da radiação eletromagnética (REM) permite a realização de inúmeros estudos da superfície terrestre através dos dados detectados por sensores remotos. Segundo a lei de Planck, a emissão espectral de REM de um corpo é proporcional à sua temperatura. De acordo com as temperaturas presentes no sistema terra/atmosfera, a emissão de REM, conhecida como emitância ou exitância radiante, encontra-se na faixa espectral do infravermelho distante ou termal, em torno de 4 a 100  $\mu\text{m}$  (FEAGLE; BUSINGER, 1980). Os dados coletados por sistemas sensores são, portanto, representativos da temperatura do elemento do sistema terra/atmosfera imageado.

Emissividade representa uma propriedade intrínseca de uma substância pura (KAHLE; ALLEY, 1992). A emissividade espectral de um objeto é uma medida de sua capacidade de emitir radiação comparada a um corpo negro sendo, portanto, definida pela razão existente entre a radiância emitida por uma superfície natural e a radiância emitida por um corpo negro à mesma temperatura (KEALY; HOOK, 1993).

Um corpo negro representa uma superfície hipotética, cuja emitância espectral é máxima em todos os comprimentos de onda, ou seja, possui emissividade constante e igual a 1. Os objetos da superfície terrestre não emitem radiância como um corpo negro, pois apresentam emissividade variável. Quando a emissividade espectral de um objeto é igual a 1, a sua temperatura radiométrica (também conhecida como temperatura de brilho ou aparente) é igual à temperatura real deste (temperatura termométrica). Se a emitância é medida em  $n$  canais espectrais, existem  $n + 1$  dados desconhecidos ( $n$  emissividades, uma por canal, e uma temperatura da superfície). A emitância observada por um sistema sensor nos canais do infravermelho termal é função da temperatura e emissividade da superfície, conforme o exemplo apresentado

na Figura 4.1, e também das propriedades ópticas da coluna atmosférica localizada no pixel e na sua vizinhança.

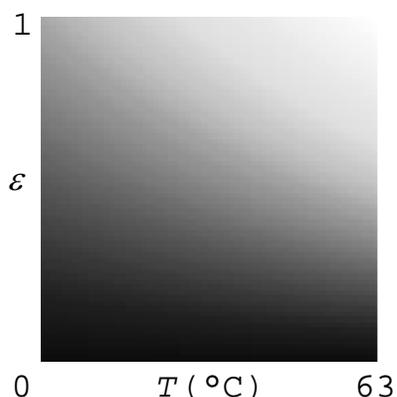


Figura 4.1 – Relação entre a emissividade e a temperatura no infravermelho termal.

Fonte: Lucca (2005).

Para a análise de dados termais, é importante efetuar a separação entre a temperatura e a emissividade (KAHLE; ALLEY, 1992). Como, segundo Salisbury e D'Ária (1992), a maioria dos materiais urbanos apresenta emissividade elevada, esta se torna o principal fenômeno de influência. A temperatura observada pelo sensor pode ser descrita conforme a Equação 4.1:

$$T_{sat} = \tau \varepsilon T_{sup} + T_{atm} \quad (4.1)$$

em que:  $T_{sat}$  é a temperatura aparente;

$\tau$  é a transmitância da atmosfera;

$\varepsilon$  é a emissividade;

$T_{sup}$  é a temperatura da superfície; e

$T_{atm}$  é a temperatura média ponderada pela modelagem da emissão da atmosfera.

A radiação emitida pela superfície é modificada pelos efeitos da atenuação e emissão atmosférica. Até mesmo nas janelas atmosféricas de 4 a 5  $\mu\text{m}$  e de 8 a 13  $\mu\text{m}$ , excluindo a faixa em torno de 9,6  $\mu\text{m}$ , onde ocorre a forte banda de absorção do ozônio, há significativa interferência da atmosfera, a ponto de

introduzir erros ou obscurecer os espectros de emissão da superfície (YOUNG et al., 2002).

Como a emissividade está relacionada à composição da superfície, é freqüentemente utilizada para o mapeamento de seus constituintes. A emissividade das superfícies é controlada por fatores como o conteúdo de água, composição química, estrutura e rugosidade. Snyder et al. (1998) salientam, no caso da vegetação, que a emissividade pode variar significativamente com a espécie, densidade e estágio de crescimento. Já a emissividade do solo, varia em função do seu tipo e conteúdo de umidade. Assim como a reflectância, a emissividade, em um corpo real (também chamado de radiador seletivo) varia em função do comprimento de onda. Lillesand e Kiefer (2000) apresentam informações sobre a média do albedo<sup>9</sup> e da emissividade de alguns alvos urbanos, listadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Albedo e emissividade de corpos terrestres selecionados (variação média entre parênteses).

<b>Tipo de Superfície Urbana</b>	<b>Albedo</b>	<b>Emissividade</b>
Estradas	0,07 (+/- 0,01)	0,96 (+/- 0,03)
Áreas mistas	0,12 (+/- 0,03)	0,95 (+/- 0,04)
Áreas com cobertura vegetal	0,16 (+/- 0,02)	0,98 (+/- 0,03)
Áreas com média densidade de construção	0,20 (+/- 0,02)	0,94 (+/- 0,03)
Áreas com alta densidade de construção	0,25 (+/- 0,02)	0,93 (+/- 0,03)

Fonte: Lillesand e Kiefer (2000).

Dados termais extraídos de sensores remotos são utilizados na análise de espectros de emissividade, no mapeamento mineral, na detecção de queimadas e em estudos de climatologia, hidrologia, vulcanismo e deficiência hídrica em plantas, entre outros. As principais pesquisas em meteorologia envolvem a extração de perfis de temperatura e emissividade a partir de sensores orbitais com a finalidade de monitorar e prever o tempo, bem como

<sup>9</sup> Albedo é a relação entre os fluxos radiantes refletido e incidente integrados espectralmente ao longo de todo o espectro solar eletromagnético (VIANELLO; ALVES, 1997).

de estudar as possíveis mudanças climáticas geradas por ações antropogênicas. Com o advento do sensoriamento remoto orbital, dados *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR)/NOAA, com resolução espacial de 1 km, passaram a ser utilizados para o mapeamento de temperatura da superfície terrestre, assim como a banda 6 dos sensores TM e ETM+ a bordo dos satélites Landsat, com resolução espacial de 120 e 60 m, respectivamente.

A heterogeneidade na cobertura e uso das áreas urbanas é refletida na grande variação espacial das superfícies termais (WENG, 2003). Como consequência, vários estudos urbanos envolvendo sensoriamento remoto termal têm sido desenvolvidos como, por exemplo, a análise da relação entre a temperatura da superfície e o uso da terra (LO; QUATTROCHI, 2003; WENG et al., 2004), os padrões de temperatura da superfície em função da geometria, orientação e altura dos edifícios (NICHOL, 1996), as respostas diurnas e noturnas de diferentes materiais (CHUVIECO, 2002), a poluição do ar (SIFAKIS; DESCHAMPS, 1992; UNG et al., 2001; WALD; BALEYNAUD, 1999; WEBER et al., 2001) e a representação das temperaturas da superfície a partir de dados com diferentes resoluções espaciais (SOUSA; BAPTISTA, 2005), entre outros.

O clima é considerado um importante fator no estudo ambiental urbano e de fundamental importância para a qualidade do meio. As alterações induzidas pelo processo de urbanização influenciam o balanço de energia, refletindo-se na maior capacidade de estocagem de calor em função das propriedades dos materiais empregados na construção do espaço urbano (BRANDÃO, 1996), além de alterar os fluxos de umidade e o sistema de circulação do vento (BEZERRA; BRANDÃO, 1997).

O enfoque atual dos estudos de clima urbano concentra-se na contaminação da atmosfera e nas alterações sobre a qualidade do ar, o conforto térmico e as inundações urbanas. Segundo Monteiro (1976) a caracterização do clima urbano é realizada através de três subsistemas representativos de cada uma

destas alterações: o físico-químico, o termodinâmico e o hidrometeorológico. Logo, poluição do ar, ilhas de calor e inundações constituem produtos das alterações em cada subsistema do clima urbano.

Os dois principais enfoques de trabalho sobre ilhas de calor são: análise da variação multitemporal e da variação espacial da temperatura. O primeiro, a análise multitemporal, visa verificar se houve aumento na temperatura média ao longo dos anos, o que pode ser um indicador do surgimento ou intensificação do fenômeno. Nessa abordagem se insere o trabalho de Lo e Quatrocchi (2003). Como há casos em que o aumento na temperatura da superfície pode ser motivado por diferentes condições meteorológicas no momento de aquisição dos dados de sensoriamento remoto, qualquer estudo que envolve ilhas de calor deve considerar essas condições. No segundo enfoque, o da variação espacial da temperatura, tratado em estudos como o de Weng et al. (2004), o objetivo é verificar padrões de variação da temperatura da superfície ou ainda, as diferenças segundo os tipos de uso e cobertura da terra.

Conforme Baptista (2003) o fenômeno de ilhas de calor é mais freqüente em ambientes urbanos, pois os diferentes padrões de refletividade (albedo) são altamente dependentes dos materiais empregados na construção civil e que constituem as superfícies impermeabilizadas do espaço urbano. Dependendo do albedo, mais ou menos REM será absorvida e, conseqüentemente, maior ou menor será a quantidade de radiação emitida pela superfície.

Em geral são estudados dois tipos de ilhas de calor: a da camada do dossel urbano, conhecida como *Urban Canopy Layer* (UCL) e a da camada limite urbana ou *Urban Boundary Layer* (UBL) (OKE, 1976). A ilha de calor do dossel urbano está localizada abaixo do nível dos telhados ou cobertura das edificações e produz processos de microescala atuando nas ruas (cânions) entre os edifícios. Para caracterizar essas ilhas de calor são utilizados dados de temperatura obtidos a partir de imagens de satélite, corrigidos para os

efeitos da atmosfera, chamados de temperatura da superfície. A ilha de calor da camada limite urbana encontra-se acima da altura dos telhados e é um fenômeno local de mesoescala influenciado pela estrutura física geral da superfície urbana. Este fenômeno é mais bem caracterizado ao se medir e comparar as temperaturas do ar de uma estação rural e de uma estação urbana (LO; QUATTROCHI, 2003). Para uma análise da ilha de calor da camada limite urbana é necessário recorrer a uma função que relacione a temperatura da superfície com a temperatura do ar próxima ao solo.

A configuração clássica de uma ilha de calor verifica-se com o aumento na temperatura da superfície em direção às áreas centrais do espaço urbano, mais densamente ocupadas (Figura 4.2). Uma ilha de calor pode ser estudada considerando a magnitude da diferença de temperatura observada entre a cidade e o ambiente rural circundante.

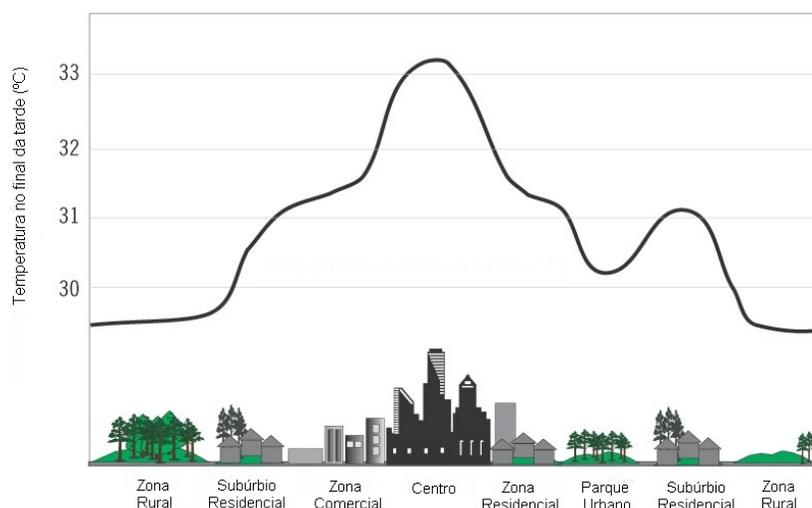


Figura 4.2 – Configuração clássica da ilha urbana de calor.

Fonte: [www.epa.gov/heatisland/about/index.html](http://www.epa.gov/heatisland/about/index.html). Acesso em: 18 jul. 2007.

Dada a natureza heterogênea do ambiente urbano, Nichol (1996) argumenta que os estudos que utilizam dados termais de alta resolução espacial não analisam as ilhas de calor, mas os padrões da temperatura de superfície. Para

a autora, ilhas de calor é um termo aplicável para estudos que envolvem dados de baixa e média resolução espacial.

Oke (1982) elaborou um dos primeiros estudos sobre clima urbano, conceituando e caracterizando fisicamente a ilha de calor. No Brasil, o primeiro estudo sobre esse fenômeno foi desenvolvido por Lombardo (1985), que utilizou imagens multitemporais da cidade de São Paulo obtidas pelo sensor AVHRR. Detectando cerca de 10°C de diferença de temperatura, seus resultados permitiram caracterizar a presença de uma ilha de calor em São Paulo segundo a configuração clássica.

Estudos publicados recentemente sobre ilhas de calor no Brasil foram os de Baptista (2003), Sousa e Baptista (2005) e Teza e Baptista (2005). Baptista (2003) analisou imagens termais do Distrito Federal obtidas pelo sensor TM/Landsat 5 em 1984 e em 2001. Concluiu que houve uma ampliação da ilha de calor, motivada fundamentalmente pela expansão urbana aliada à ocupação de áreas públicas.

Os resultados da comparação realizada por Chen e Zhou (2004) entre temperaturas medidas pelos sensores ETM+/Landsat e ASTER<sup>10</sup> mostraram uma alta correlação ( $R^2$  variando entre 0,85 e 0,95). Nos diagramas de dispersão dos dados das duas cenas analisadas, considerando como referência para o sensor ETM+ tanto a banda termal de alto ganho quanto a de baixo ganho, foi verificada a presença de colunas regulares verticais com amplitude de 10°C ou mais. Isto indica que, para diferentes locais (pontos em uma imagem), as temperaturas medidas pelo ETM+ podem ser as mesmas, enquanto as temperaturas medidas pelo ASTER podem variar 10° C ou mais para os mesmos locais, ou seja, Chen e Zhou (2004) concluíram que o ASTER é mais eficiente na discriminação das temperaturas em relação ao ETM+.

---

<sup>10</sup> Chen e Zhou (2004) utilizaram como referência o produto ASTER temperatura de brilho (nível 2).

## 4.2 Material e Métodos

Para a análise da temperatura da superfície nas áreas de estudo de São Paulo e Rio de Janeiro foram utilizados dados coletados nas cinco bandas termais do sensor ASTER identificadas na Tabela 4.2. Nesta etapa, para processamento das transformações radiométricas e registro das imagens foi utilizado o programa *ENVI 4.2*, e na elaboração de mapas o programa *ArcGIS 9.1*.

Tabela 4.2 – Especificações das imagens ASTER.

Satélite (Sensor)	Resolução Espacial	Bandas	Datas de aquisição
Terra (ASTER)	90 m (TIR)	10, 11, 12, 13 e 14	13/10/2002 (SP) 25/04/2003 (RJ) 02/09/2004 (RJ) 17/05/2006 (SP)

Os procedimentos empregados para o processamento das imagens termais encontram-se detalhados na Figura 4.3. As imagens termais foram corrigidas segundo dois processos: (1) correção para absorção e reemissão atmosférica; e (2) correção para emissividade (VOOGT; OKE, 2003).

Para que seja obtida a imagem da temperatura de superfície, em etapa anterior à conversão dos dados termais para emissividade e temperatura é imprescindível efetuar a correção dos efeitos atmosféricos na imagem de satélite. A temperatura da superfície da Terra corrigida para emissividade pode ser computada segundo a Equação 4.2 (ARTIS; CARNAHAN, 1982):

$$T_s = \frac{T_c}{1 + \left( \lambda \times \frac{T_c}{\gamma} \right) \ln \epsilon'} \quad (4.2)$$

em que:  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação emitida (para o pico da resposta espectral de cada banda e média de sua largura);

$T_c$  é a temperatura aparente;

$\gamma = h \cdot c / \sigma$  ( $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ ),  $h$  é a constante de Planck ( $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ ),  $c$  é a velocidade da luz ( $2,998 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ).

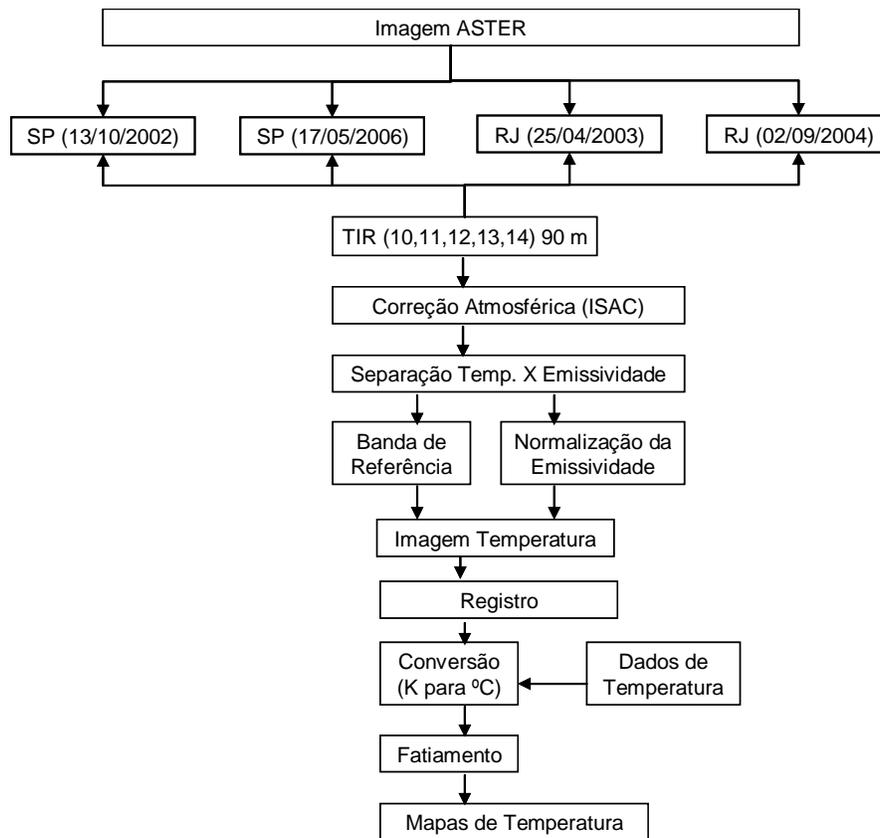


Figura 4.3 – Fluxograma metodológico.

A correção foi efetuada através de um algoritmo de Compensação Atmosférica da Cena – ISAC (*In-Scene Atmospheric Compensation*) (YOUNG et al., 2002) implementado no programa *ENVI 4.2*<sup>11</sup>. Este algoritmo foi desenvolvido para o sensor aerotransportado *Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System* (SEBASS), de propriedade da empresa *Aerospace Corporation*, que possui 124 bandas no intervalo espectral de 7,5 a 13,4  $\mu\text{m}$ .

<sup>11</sup> A correção dos efeitos da atmosfera das imagens termais não foi efetuada no programa *PCI Geomatics 10.0*, pois ele exige que a imagem termal seja reamostrada para 15 m antes de efetuar a correção. Apesar de efetuar a correção atmosférica, não é gerada uma imagem temperatura (após o processo de separação entre a temperatura e a emissividade) como faz o programa *ENVI*. Além disso, o algoritmo do *PCI* apenas efetua a correção para a banda 13 do sensor. O programa *ENVI 4.2* permite corrigir as imagens de todos os canais termais do sensor (5) e, desta forma, é possível comparar os resultados canal por canal. Tomando como base princípios físicos do sensoriamento remoto, é possível selecionar o melhor canal (faixa do espectro emitido) para o estudo da temperatura da superfície.

O algoritmo ISAC possibilita corrigir os efeitos da atmosfera de dados termais multiespectrais com base nos parâmetros de radiância coletados pelo próprio sensor remoto, sem a necessidade de dados meteorológicos auxiliares, freqüentemente indisponíveis ou inadequados, e de modelagem atmosférica (YOUNG et al., 2002). O algoritmo ISAC não se baseia em modelagem atmosférica como o *Moderate Resolution Atmospheric Transmission* (MODTRAN). Enquanto o processamento no MODTRAN requer informações como modelo de atmosfera representativa, modelo de aerossol<sup>12</sup>, entre outros, o algoritmo ISAC utiliza dados da própria imagem para efetuar a correção.

No algoritmo ISAC se assume que as condições atmosféricas são uniformes e que há uma superfície semelhante a um corpo negro na cena (em geral, considera-se vegetação ou água, que possuem emissividades altas e com menor variação)<sup>13</sup>. Por isso, é recomendável que se trabalhe com pequenas áreas e, também, que estas não apresentem grande amplitude topográfica. Quando houver grande amplitude, o ideal seria segmentar a área de interesse em setores de altitude similar.

No processo de correção pelo método da Compensação Atmosférica da Cena, a temperatura de superfície de cada pixel é estimada e usada para se obter a temperatura aparente com base na equação de Planck, assumindo-se uma emissividade igual a 1. Em seguida, é ajustada uma linha no diagrama de dispersão entre a emitância e a temperatura aparente. Os percentuais de radiação atenuada e transmitida pela atmosfera são derivados a partir dos coeficientes de regressão dessa linha (RSI, 2005).

A temperatura de superfície pode ser obtida usando toda a imagem no processo de correção, e estimando seu valor para cada pixel através do valor máximo de temperatura aparente encontrado entre todas as bandas de entrada, ou através do método dos Mais Brilhantes (*Max Hit*), que estima a

---

<sup>12</sup> Aerossóis correspondem a partículas sólidas ou líquidas dispersas na atmosfera.

<sup>13</sup> Não é necessário informar a localização desta superfície para a correção atmosférica.

temperatura de superfície somente para os pixels que têm a temperatura aparente máxima em uma banda específica. Essa banda é aquela que tem o maior número de pixels com o valor máximo de temperatura aparente.

A linha de regressão para ambos os casos (totalidade de pixels ou somente os mais brilhantes) pode ser ajustada através da aplicação do método de *Top of Bins* ou do método da Regressão Normalizada. No método *Top of Bins*, é ajustada uma linha no topo do diagrama de dispersão entre a emitância e a temperatura aparente. O topo corresponde aos pixels que possuem emissividade mais próxima a 1. São selecionados 5% dos dados do diagrama de dispersão.

No método de Regressão Normalizada, primeiramente se ajusta uma linha no diagrama de dispersão entre os valores de emitância e de temperatura aparente. Os resíduos são comparados a um gráfico de probabilidade normal e uma nova regressão é calculada. Os pixels que tiverem valores superiores a três vezes o valor da resposta equivalente ao ruído do sensor são considerados *outliers* e são removidos. Uma nova regressão é feita a partir desse conjunto reduzido de pixels.

Caso seja adotado o ajuste pela Regressão Normalizada, é necessário que seja informado o valor de Resposta Equivalente de Ruído do Sensor – NESR (*Noise Equivalent Signal Response*). Dependendo da unidade em que se encontram, também é necessário ajustar o fator de escala dos dados radiométricos para  $W \cdot ^{-2}sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ . No caso de dados ASTER calibrados, o fator de escala selecionado foi equivalente a 1, pois se encontravam na respectiva unidade. A unidade do comprimento de onda também deve ser informada e, geralmente, corresponde a micrometros ou nanometros.

Nas imagens tratadas neste estudo foram utilizados todos os pixels para o cálculo da equação de regressão normalizada, considerando uma resposta de ruído do sensor de 2,5%. O ajuste por Regressão Normalizada foi adotado,

pois conforme RSI (2005), o método *Top of Bins* é susceptível ao ruído do sensor que pode ocorrer no topo do diagrama de dispersão.

Após a correção atmosférica, a separação entre a emissividade e a temperatura nos dados termais foi obtida através de dois métodos disponíveis no programa *ENVI*: com o uso de uma Banda de Referência (*Reference Channel*) e através da Normalização da Emissividade (*Emissivity Normalization*). O terceiro método, conhecido como Resíduos Alfa (*Alpha Residuals*), embora seja o mais recomendado pela bibliografia especializada (KEALY; HOOK, 1993) para o estudo da emissividade, não foi empregado porque possui a limitação de não gerar uma imagem de temperatura.

Considerando a seleção de uma Banda de Referência, o valor de temperatura (corrigida para os efeitos atmosféricos) é usado para extrair os valores de emissividade referente a cada canal (HOOK et al., 1992). Neste método, conceitualmente o mais simples, é assumido que, para o canal selecionado, o valor de emissividade é constante. Este valor constante de emissividade deve ser informado. Como os canais são altamente correlacionados, o ruído da imagem tende a ser realçado após este processamento. Se o canal selecionado apresenta ruído, este é introduzido nos outros canais.

Nesta pesquisa, o valor de emissividade adotado com o uso do método Banda de Referência foi 0,96. Durante a execução do processamento foi observado que se a emissividade dos corpos for mais alta do que o valor adotado, o valor da temperatura será superestimado. O inverso também é verdadeiro. Infelizmente, esta dificuldade ocorre nas aplicações em áreas urbanas, onde a diversidade de materiais é grande e, conseqüentemente, estes apresentam muita diferença quanto à emissividade.

Através da Normalização da Emissividade é calculada a temperatura para cada pixel em cada banda, partindo de um valor fixo de emissividade. Os valores mais altos de temperatura para cada pixel são usados no cálculo dos valores de emissividade segundo a equação de Planck.

Comparando essas duas técnicas, Kealy e Hook (1993) observaram que o método de Normalização da Emissividade possui maior exatidão para estimar a temperatura do que a escolha de uma Banda de Referência. Ainda segundo esses autores, erros são introduzidos na obtenção de imagens de temperatura da superfície devido a diferenças na emissividade dos materiais terrestres, pouco conhecidas.

Ambos os métodos foram empregados neste estudo, e a diferenciação entre os resultados pôde ser analisada. Para o método da Banda de Referência foi selecionado o canal 13 (10,25 – 10,95  $\mu\text{m}$ ), pois este intervalo espectral é pouco susceptível à atenuação da atmosfera, conforme apresenta a Figura 4.4. Trabalhos anteriores como, por exemplo, o de Lu e Weng (2006), também utilizaram esse canal ASTER para a obtenção da imagem de temperatura.

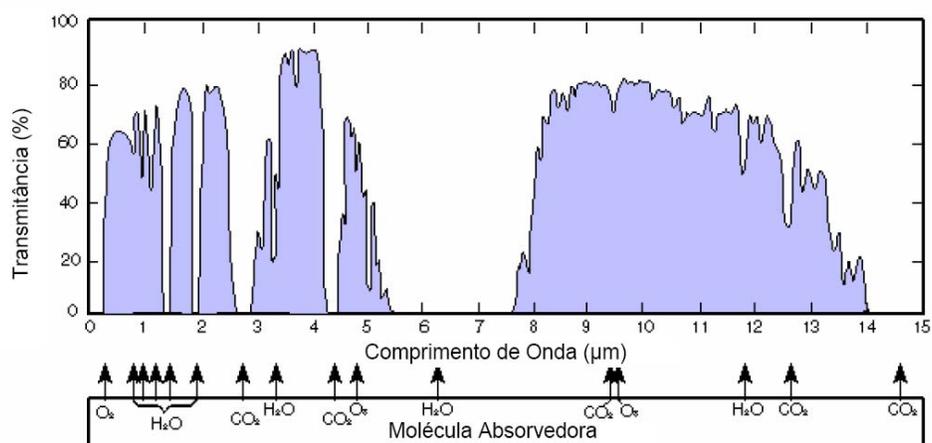


Figura 4.4 – Janelas atmosféricas.

Fonte: [www.answers.com/topic/infrared-1](http://www.answers.com/topic/infrared-1). Acesso em: 18 jul. 2007.

Após as transformações radiométricas as imagens foram registradas com base no mosaico *GeoCover (S-23-20\_2000)* da NASA. O método de interpolação usado foi o vizinho mais próximo, com o emprego de um polinômio de 1º grau.

O erro de registro variou entre 20 e 35 m para as quatro imagens<sup>14</sup>. As imagens temperatura, em Kelvin (K), foram convertidas para graus Celsius (°C) aplicando-se a Equação 4.3:

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (4.3)$$

Após essa etapa, as imagens foram classificadas segundo intervalos representativos de temperatura, considerando a amplitude térmica encontrada para cada data, e os resultados foram analisados considerando dados de temperatura medidos por estações meteorológicas.

### 4.3 Resultados e Discussão

Ao analisar a Figura 4.5, que apresenta as imagens de temperatura da superfície, foi verificado que quanto menor o valor da emissividade ajustado para a correção pelo método da Normalização da Emissividade, maiores foram os valores de temperatura resultantes e vice-versa.

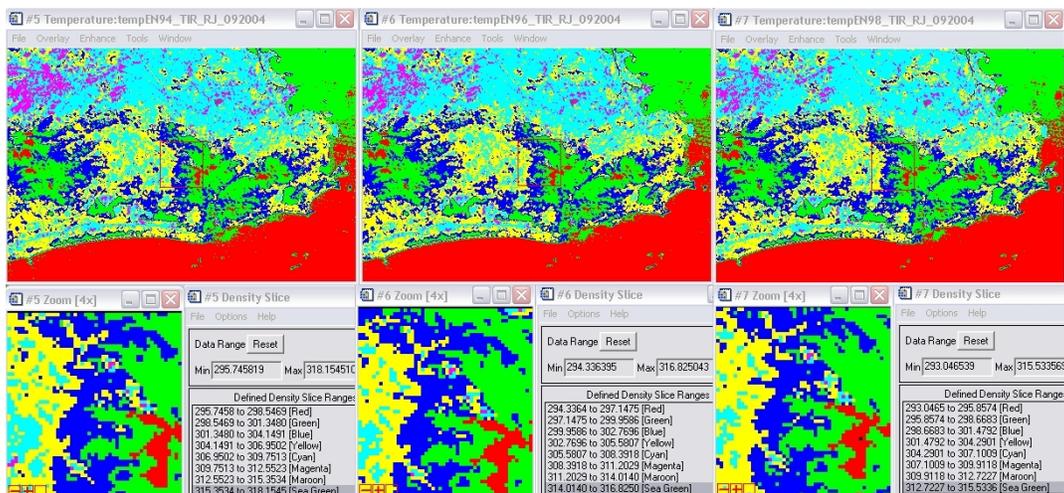


Figura 4.5 – Intervalos de temperatura obtidos pelo método de Normalização da Emissividade, conforme o ajuste da emissividade de referência.

<sup>14</sup> As imagens temperatura são geradas pelo programa *ENVI 4.2* sem georreferenciamento, após o processamento que visa à separação entre a temperatura e a emissividade.

Quando foi selecionada uma Banda de Referência, a variação pareceu ser aleatória, dependendo do canal. As imagens de temperatura da superfície dos dias 13/10/2002 (São Paulo) e 25/04/2003 (Rio de Janeiro) apresentadas na Figura 4.6 mostram a diferença nos valores de temperatura ao se utilizar cada canal termal do ASTER como referência (11 a 14). O canal 10 (8,125 – 8,475  $\mu\text{m}$ ) não é recomendado por RSI (2005) para o cálculo da temperatura, haja vista a atenuação atmosférica do sinal nesta faixa do espectro.

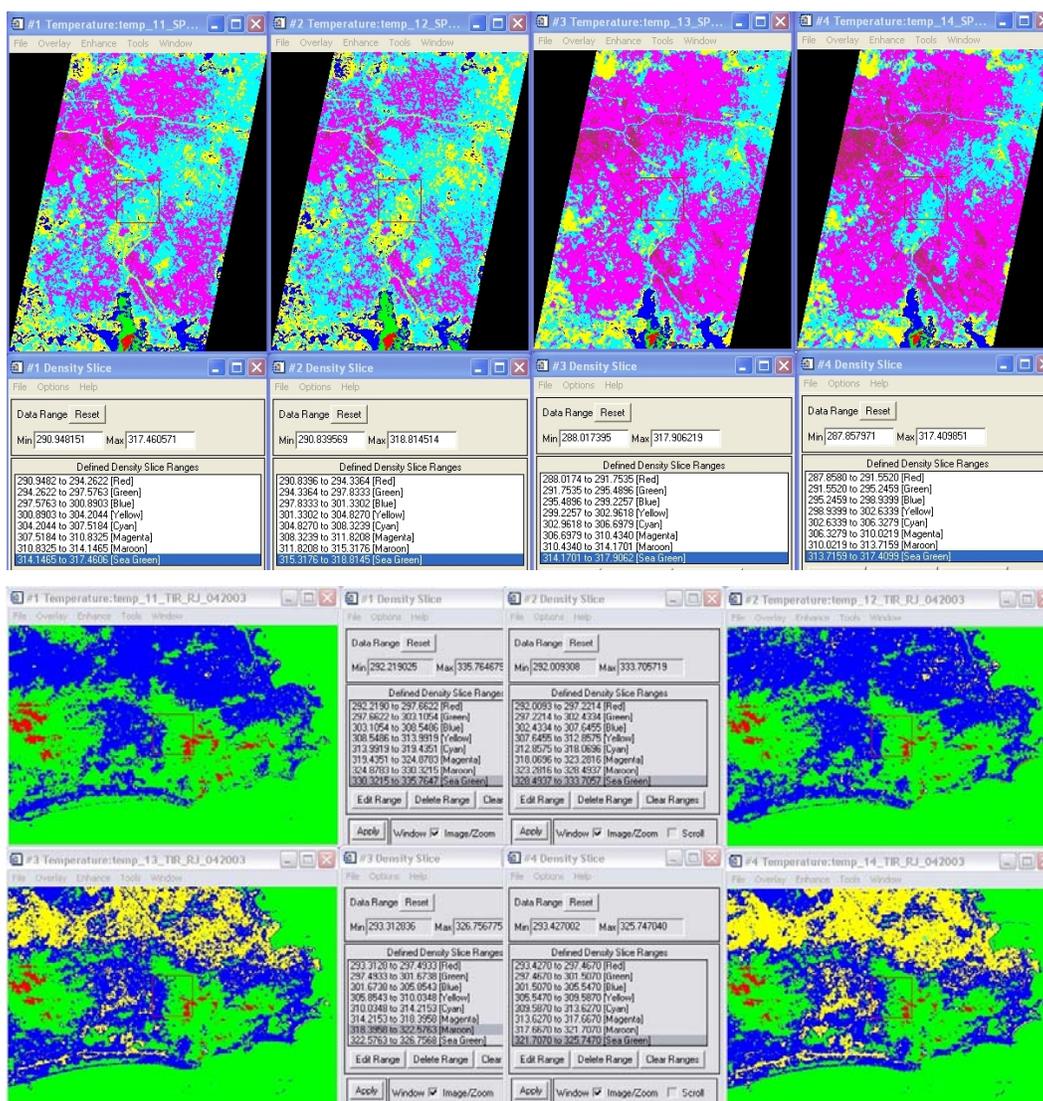


Figura 4.6 – Intervalos de temperatura obtidos para as mesmas imagens processadas segundo diferentes Bandas de Referência.

Os resultados obtidos com a Normalização da Emissividade foram semelhantes quanto à distribuição espacial. A diferenciação ocorreu nos valores de temperatura, conforme citado anteriormente. Na imagem de 2003 do Rio de Janeiro foram encontrados valores muito altos de temperatura em determinados pixels. A primeira hipótese foi a de que esses pixels correspondessem a ruídos. Entretanto, ao analisar a imagem dos canais do visível, identificou-se um rastro da fumaça ascendendo do local, o que confirmou as temperaturas mais elevadas para aquele ponto, da ordem de até 20 K, em função da presença de dois pixels (*outliers*) que representam áreas com fogo (brasas), conforme observados na análise visual das imagens de canais do VNIR e do SWIR (Figura 4.7). Este resultado indica, conseqüentemente, uma boa sensibilidade do sensor.

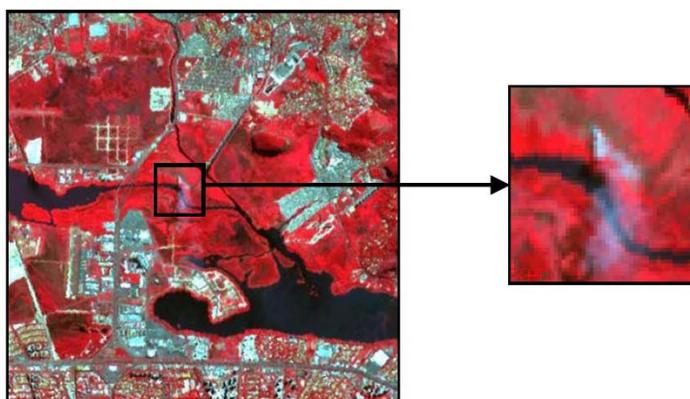


Figura 4.7 – Exemplo de foco de calor na imagem de 25/04/2003 em composição colorida R3G2B1.

A Tabela 4.3 apresenta os valores mínimos e máximos de temperatura encontrados considerando toda a área de estudo para cada imagem utilizada. Ao se comparar as imagens de temperatura do Rio de Janeiro referentes aos anos de 2003 e 2004 observa-se que os valores máximos estimados para 2003 foram consideravelmente superiores. Esta diferença está relacionada com a queimada identificada em 25/04/2003 (Figura 4.7). Os dados desta tabela mostram que as temperaturas estimadas são sempre superiores quando se

utiliza o método da Normalização da Emissividade em comparação com o uso da canal 13 do sensor ASTER como Banda de Referência.

Tabela 4.3 – Temperaturas mínimas e máximas estimadas.

Data da Imagem	Banda de Referência		Normalização da Emissividade	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
13/10/2002 (SP)	14,55	45,24	17,33	45,67
17/05/2006 (SP)	14,55	37,1	15,39	37,37
25/04/2003 (RJ)	17,44	53,61	19,8	62,61
02/09/2004 (RJ)	17,02	42,78	20,07	43,67

A partir das transformações radiométricas dos dados termiais, os padrões de temperatura da superfície foram analisados considerando sua aplicação para o estudo das ilhas de calor do dossel urbano, segundo o recorte temporal e espacial adotado. Os mapas de temperatura elaborados a partir da classificação dos resultados em intervalos selecionados são apresentados na Figura 4.8 para São Paulo e na Figura 4.11 para o Rio de Janeiro.

Para São Paulo foram elaborados mapas de temperatura a partir do processamento das duas imagens selecionadas e segundo a adoção dos métodos de Normalização da Emissividade e Banda de Referência (Figura 4.8). As temperaturas de referência para a análise das imagens processadas foram obtidas de estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar e da estação meteorológica do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo (IAG/USP)<sup>15</sup>. Os valores registrados para cada data são apresentados na Tabela 4.4.

<sup>15</sup> Estações meteorológicas automáticas são as que registram dados continuamente, amostrados em intervalos de 10, 15, 30 minutos ou outro, enquanto as estações convencionais registram dados apenas em horários estabelecidos internacionalmente, que correspondem às 12:00, 18:00 e 24:00 h UTC (horário de Greenwich), 9:00, 15:00 e 21:00 h para o horário de Brasília (fuso -3).

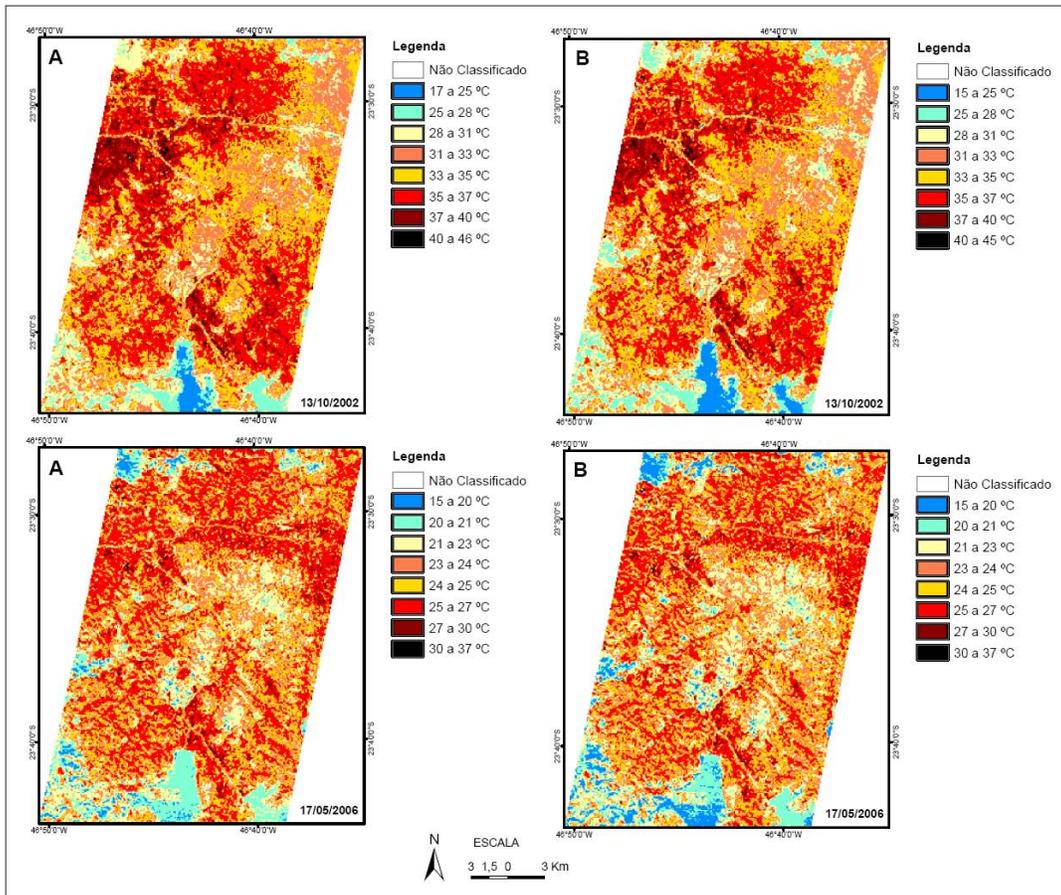


Figura 4.8 – Mapas de temperatura da área de estudo de São Paulo segundo os métodos de Normalização da Emissividade (A) e Banda de Referência (B).

Tabela 4.4 – Temperaturas de referência para São Paulo.

Estação	Temperatura (°C) em 13/10/2002	Temperatura (°C) em 17/05/2006
Parque Dom Pedro II	26,1	-
Ibirapuera	-	18,8
Taboão da Serra	-	19,3
Pinheiros	-	17,8
IAG (Água Funda)	25,4	18,5

Fonte: CETESB e IAG/USP.

Embora o número de estações que registraram valores de temperatura para a área de estudo de São Paulo em horário próximo ao da passagem do satélite, ou seja, entre 10:00 e 10:30 h da manhã, seja inferior ao verificado para o Rio

de Janeiro, foi possível observar concordância entre seus valores e os valores apresentados pelas imagens de satélite processadas. Notadamente a imagem de 17/05/2006 apresentou valores em média 10°C inferiores aos registrados na imagem adquirida em 13/10/2002 (Figura 4.8).

Analisando a distribuição espacial da temperatura em São Paulo, observa-se que regiões apontadas por Tarifa e Armani (2000) apresentaram temperaturas relativamente maiores nas duas imagens. Um exemplo é a zona leste do município de São Paulo (embora a área de estudo contemple apenas uma pequena parte dessa zona). Na região mais baixa da Moóca/Brás (zona leste), caracterizada por um vale plano, rebaixado e com telhados e superfícies impermeáveis (das avenidas e ferrovias) que absorvem muito a radiação solar, temperaturas elevadas foram detectadas na cena de 2006.

Entre os alvos que apresentaram maiores temperaturas, comparadas às da área circundante, destacam-se a pista do aeroporto de Congonhas e a favela de Paraisópolis, em ambas as datas. A favela de Paraisópolis apresenta temperaturas superiores às áreas adjacentes, correspondentes aos distritos do Morumbi e à área de condomínios verticais de alto padrão no distrito de Vila Andrade. Distritos altamente arborizados, a exemplo do Jardim Paulista, apresentam temperaturas mais amenas se comparadas às de distritos vizinhos menos arborizados, tais como Pinheiros (núcleo antigo de Pinheiros).

A zona oeste é área predominantemente comercial e residencial de médio e alto padrão com porcentagem de áreas verdes variando de média a alta, incluindo, neste entorno próximo, o Campus da USP. Foram verificadas temperaturas mais amenas nessa região. Osasco é uma aglomeração urbana de grande porte e aparece como sendo mais quente em relação às demais, principalmente na imagem de 2002, apresentando temperaturas semelhantes às da baixada da Mooca/Brás. Tarifa e Armani (2000) também observaram este comportamento para esta região em seu trabalho. Ao sul, elevadas temperaturas também foram registradas para a área industrial de Santo Amaro.

A idéia de que as áreas centrais das grandes cidades e metrópoles são ilhas de calor é questionada por Tarifa e Armani (2000). Em São Paulo, por exemplo, a verticalização do núcleo urbano central da metrópole parece exercer um efeito no sentido de atenuar a temperatura. Esta área é fortemente sombreada. No seu conjunto ou na maior parte, e no horário (aproximadamente 10:00 h) em que as imagens de satélites foram tomadas, as áreas mais verticalizadas apresentaram temperaturas de 1 a 2 °C inferiores às de outras áreas com edificações de menor gabarito, mesmo apresentando a mesma proporção de vegetação. Muitas dessas áreas não recebem luz solar em praticamente nenhum horário do dia, criando “ilhas de frescor” ou “ilhas de frio”, uma realidade complexa. O antigo núcleo do distrito de Santana, hoje área altamente verticalizada, também apresenta característica semelhante, menos aquecido que o seu entorno, ressalvadas as condições de validade para o horário das 10:00 h da manhã. Alvos representativos para estas análises podem ser visualizados na Figura 4.9, com o auxílio da delimitação territorial do município de São Paulo em subprefeituras e distritos. Na Figura 4.10 é apresentado um transecto da temperatura na área de estudo.

Analisando os mapas de temperatura da área de estudo do Rio de Janeiro (Figura 4.11), verifica-se que algumas áreas mais quentes correspondem a afloramentos rochosos, tal como pode ser observado nas imagens para a Pedra Bonita e Pedra da Gávea e para o conjunto formado pelos morros do Pão de Açúcar e da Urca. Outros elementos da superfície que se destacaram por apresentar elevadas temperaturas foram os corredores viários, a exemplo das Avenidas das Américas e Ayrton Senna, com larga cobertura asfáltica, material de rápido aquecimento. Outra área que apresentou elevadas temperaturas foi o Autódromo de Jacarepaguá.

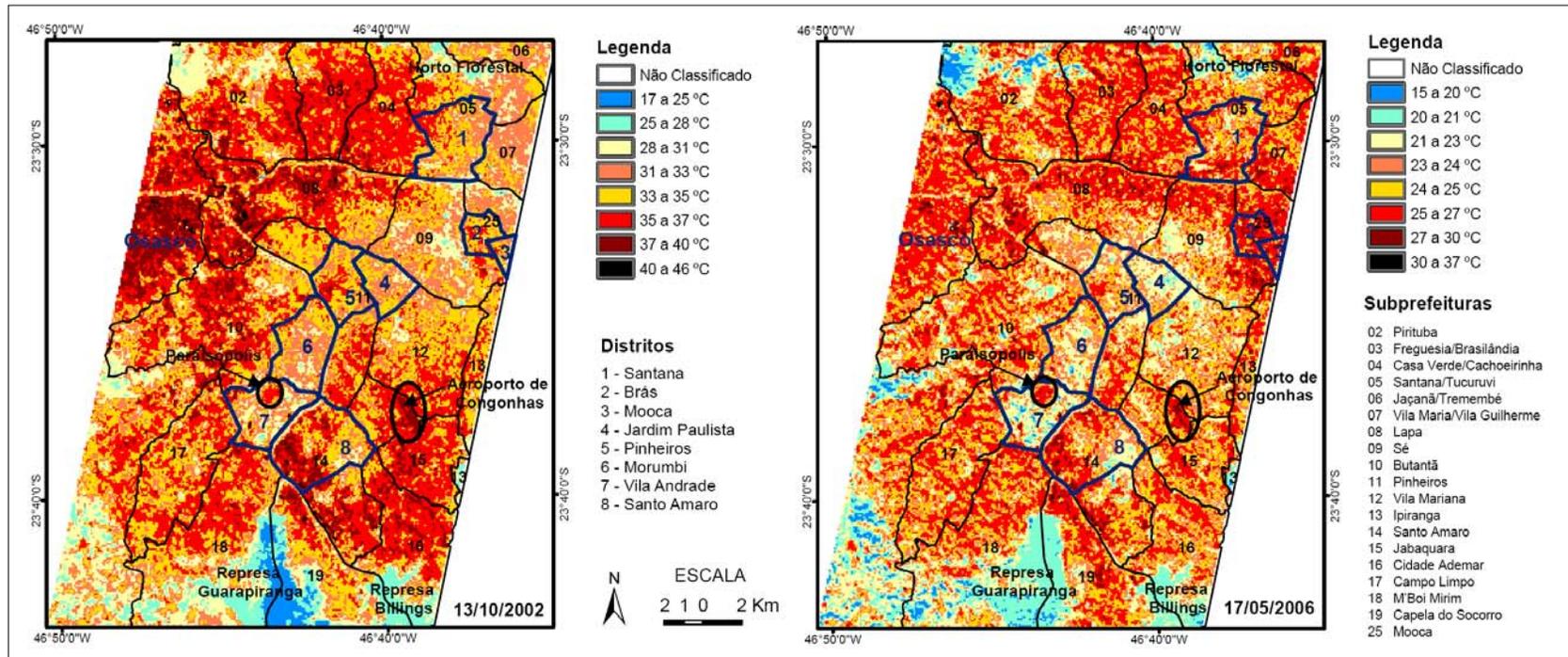


Figura 4.9 – Elementos da divisão territorial municipal de São Paulo sobrepostos ao mapa de temperatura.

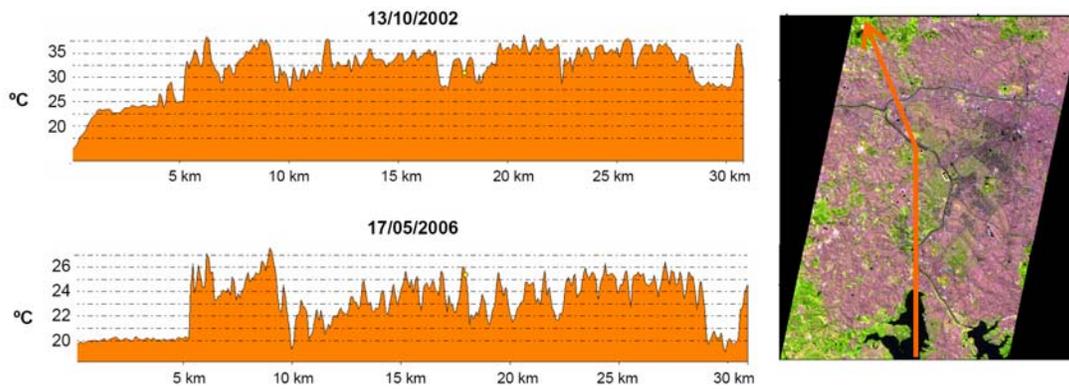


Figura 4.10 – Perfil de temperatura A-B representativo da área de estudo de São Paulo (Banda de Referência).

Para a área de estudo do Rio de Janeiro não foi verificada grande diferença entre as temperaturas registradas em cada data, assim como não foi verificada grande diferença entre os resultados obtidos ao empregar os dois métodos de processamento (Normalização da Emissividade e Banda de Referência).

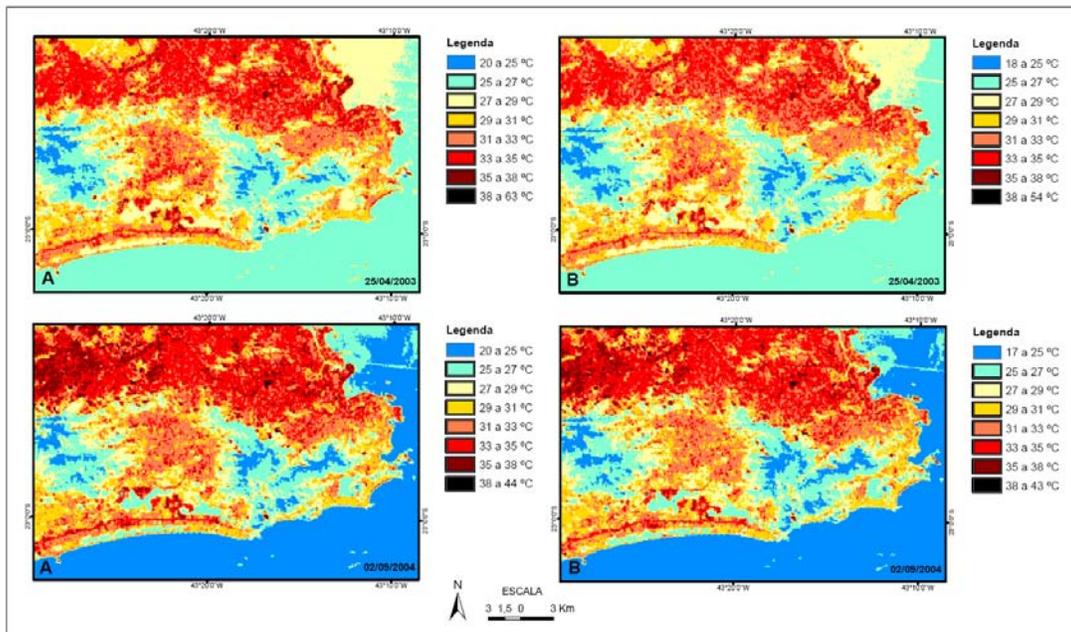


Figura 4.11 – Mapas de temperatura da área de estudo do Rio de Janeiro segundo os métodos de Normalização da Emissividade (A) e Banda de Referência (B).

Nas duas datas as águas interiores das lagoas apresentaram temperaturas superiores às encontradas no Oceano Atlântico e na Baía de Guanabara, cujas águas também sofrem aquecimento ao norte da Ponte Rio-Niterói, à medida que se distanciam das águas oceânicas. Este aquecimento também está associado às diferenças de batimetria. As vertentes voltadas para o norte do Maciço da Tijuca apresentaram maiores temperaturas se comparadas às vertentes voltadas para o sul, mais próximas do mar e susceptíveis à atuação das brisas marítimas. Considerando também o efeito da inclinação do eixo terrestre em relação ao plano do eixo de sua translação (eclíptica), observa-se que ao longo de todo o ano, as vertentes voltadas para o norte são mais iluminadas do que as vertentes voltadas para o sul. Alguns pontos de referência para a análise desses resultados podem ser observados na Figura 4.12. Na Figura 4.13 é apresentado um transecto da temperatura para a área de estudo.

As temperaturas de referência para a comparação com os resultados obtidos a partir das imagens de satélite foram registradas por estações de monitoramento da qualidade do ar e são apresentadas na Tabela 4.5. Vale ressaltar que não são todas as estações que registram dados meteorológicos, entre os quais, a temperatura. Houve dificuldade na obtenção de dados de temperatura do Rio de Janeiro por não existirem estações automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na área de estudo, e também pelo fato de as universidades locais não disporem desses equipamentos.

Os valores apresentados pelas imagens de temperatura foram coerentes com as medidas de referência. Os dados das estações apontaram menores temperaturas para 02/09/2004 e isto pôde ser observado nos corpos d'água da área de estudo (Figura 4.11), embora em 25/04/2003 haja uma ligeira diferença (para menos) nas temperaturas médias da zona norte do Rio de Janeiro<sup>16</sup>.

---

<sup>16</sup> Para a avaliação dos resultados obtidos com o processamento das imagens de satélite não foi calculado o índice de correlação ou outra estatística em virtude do reduzido número de observações. O objetivo deste trabalho não foi, em suma, validar os mapas de temperatura

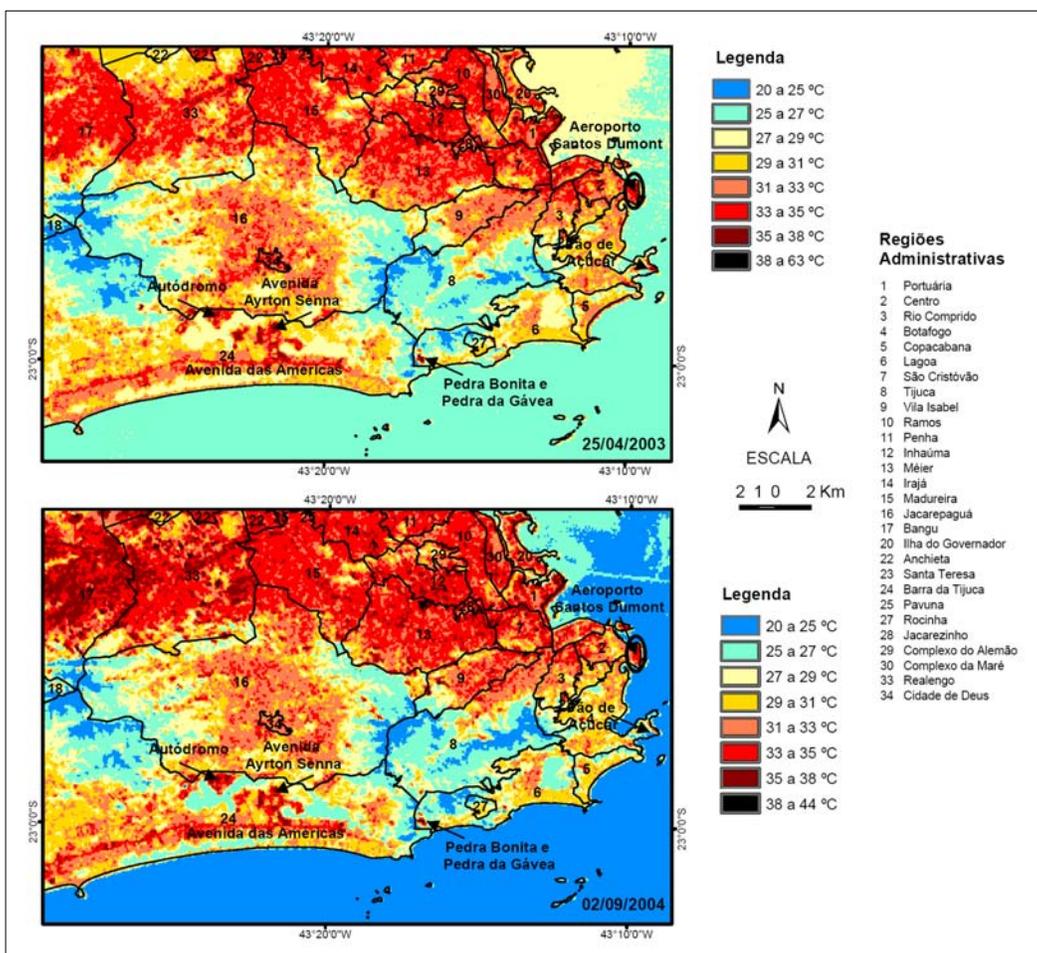


Figura 4.12 – Elementos da divisão territorial municipal do Rio de Janeiro sobrepostos ao mapa de temperatura.

Tabela 4.5 – Temperaturas de referência para o Rio de Janeiro.

Estação	Temperatura (°C) em 25/04/2003	Temperatura (°C) em 02/09/2004
São Cristóvão	33,0	28,2
Saenz Peña (Tijuca)	-	27,5
Largo da Carioca (Centro)	32,0	29,4
Cardeal Arcoverde (Copacabana)	34,8	29,6
Barra da Tijuca	-	31,0
Lagoa	-	24,5

Fonte: FEEMA e SMAC.

quanto à exatidão dos valores registrados, mas sim, analisar o contraste entre as respostas verificadas no meio intra-urbano, sua correspondência com os demais indicadores considerados na pesquisa, e com diferentes tipos de uso e ocupação do solo.

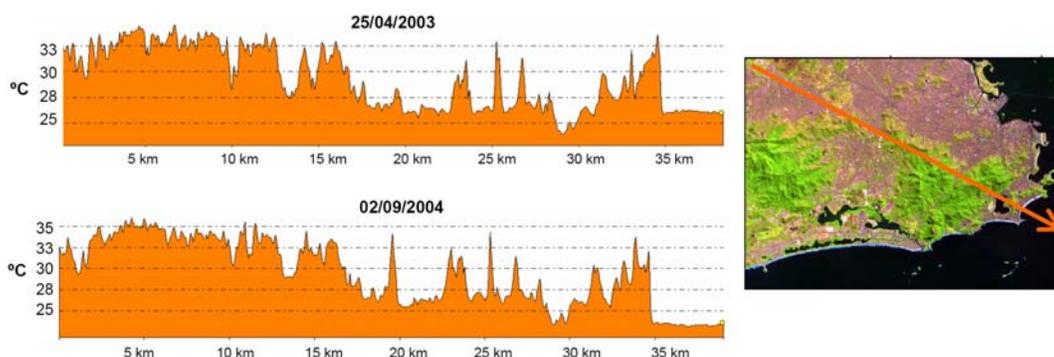


Figura 4.13 – Perfil de temperatura A-B representativo da área de estudo do Rio de Janeiro (Banda de Referência).

Quando os mapas de temperatura são apresentados sobrepostos ao modelo digital de elevação em uma visualização tridimensional (Figura 4.14), observa-se um forte indicativo da relação entre a temperatura e a topografia. Esta relação e a relação com o uso e ocupação do solo é objeto de análise no Sétimo Capítulo deste trabalho. Diferentemente do que ocorre em São Paulo, Brandão (1996) aponta que a ilha de calor configurada na cidade do Rio de Janeiro reflete a diversidade de seus microclimas, propiciados por sua condição de cidade litorânea estrangulada por maciços montanhosos. Nela se verifica a grande influência desses aspectos geocológicos e dos padrões variados de morfologia urbana nos contrastes térmicos espaciais.

Em São Paulo e no Rio de Janeiro, a verticalização, configurando-se como uma cortina de concreto, canaliza os ventos em determinadas situações, enquanto que em outras representa uma barreira à circulação do ar. Esse fenômeno pode ser observado em eixos viários altamente verticalizados, com reduzida presença de áreas verdes ou de lazer entre os edifícios, bem como de edifícios de menor gabarito. As avenidas Rio Branco e Nossa Senhora de Copacabana, no Rio de Janeiro, e Paulista e Brigadeiro Faria Lima, em São Paulo, se enquadram nessa condição. Além disso, mais especificamente no Rio de Janeiro, os maciços costeiros representam uma barreira à circulação das brisas marítimas para a zona norte da cidade, a sotavento, situação esta que é agravada em virtude da falta de arborização.

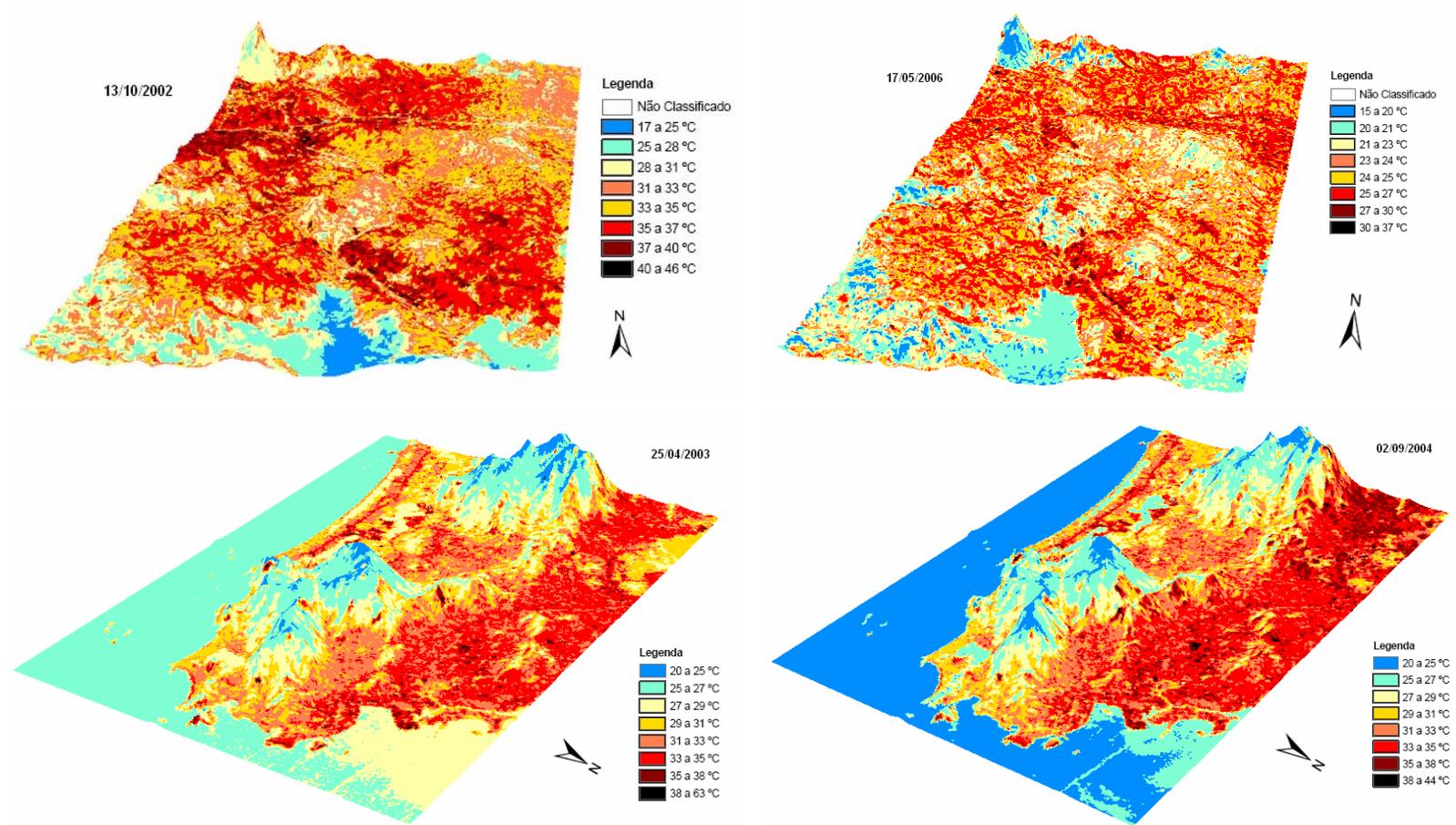


Figura 4.14 – Visualização dos mapas de temperatura sobrepostos aos modelos digitais de elevação.

#### 4.4 Conclusões

As áreas urbanas e metropolitanas intensamente transformadas devido às grandes modificações não planejadas e ocasionadas pelas atividades industriais, pelos complexos viários e pelas edificações em detrimento das áreas verdes contribuem, em geral, para o aumento da temperatura e, conseqüentemente, para a intensificação do efeito de ilha de calor. Dada a dinâmica destas transformações, verifica-se que a interpretação de imagens de temperatura para estas áreas não é um procedimento fácil, sobretudo por causa da complexidade dos fatores envolvidos, como as características da cobertura da superfície, morfologia, materiais e densidade.

Os métodos empregados para a obtenção das imagens temperatura – Normalização da Emissividade e Banda de Referência – apresentaram resultados diferentes sendo que os dados de temperatura estimados utilizando o canal 13 do ASTER como referência em geral foram inferiores aos dados estimados utilizando todos os canais (método da Normalização da Emissividade).

Apesar da pequena quantidade de dados disponíveis para comparação, os dados estimados foram compatíveis com dados de temperatura registrados por estações meteorológicas, o que atesta a qualidade dos dados termais adquiridos pelo ASTER, considerando a precisão absoluta de 1 K ou menos informada por JPL (2007) para os seus produtos de temperatura aparente<sup>17</sup>. Não pôde ser feita aferição de campo, pois se trabalhou com imagens de catálogo<sup>18</sup>.

Dados ASTER permitiram analisar o contraste entre as respostas verificadas no meio intra-urbano, a fim de caracterizar padrões de temperatura da

---

<sup>17</sup> A precisão apontada é de 3 K para a faixa de 200 a 240 K, 2 K para a faixa de 240 a 270 K, 1 K para a faixa de 270 a 340 K, e 2 K para a faixa de 340 a 370 (JPL, 2007).

<sup>18</sup> Através da ferramenta *ASTER DAR Tool* foi submetido e aprovado um pedido de imageamento (programação) do sensor ASTER para a área de estudo em São Paulo em 2006. Todavia, as imagens não foram adquiridas.

superfície. Em grandes aglomerações, a exemplo de São Paulo e Rio de Janeiro, como consequência do relevo, da verticalização, do uso e cobertura da terra, das funções urbanas e distribuição espacial das áreas destinadas a fins residenciais, comerciais, industriais e de lazer, etc., a ilha de calor não ocorre à maneira clássica, sendo perceptíveis alterações significativas em sua configuração quando submetida a uma análise intra-urbana. Foi observado também que a presença da ilha de calor está associada aos padrões socioeconômicos de ocupação urbana em diferentes bairros ou distritos.

## 5 APLICAÇÃO DE MODELOS DE MISTURA ESPECTRAL

### 5.1 Introdução

A radiância detectada por um sensor corresponde à média ponderada das radiâncias de todos os materiais contidos no *Instantaneous Field of View* (IFOV). Desse modo, a radiância representa uma mistura de diferentes tipos de superfícies (materiais), além da contribuição da radiância proveniente do espalhamento atmosférico, o que dificulta o estudo da distribuição espacial de determinados elementos representados na imagem.

Procurando recuperar a resposta espectral de cada tipo de alvo, Shimabukuro e Smith (1991) desenvolveram um modelo linear de mistura para imagens multiespectrais aplicado ao estudo dos recursos terrestres. Para os autores, a resposta de cada pixel em qualquer comprimento de onda pode ser considerada como uma combinação linear da resposta espectral de cada elemento contido no IFOV. A equação de um modelo de mistura pode então ser expressa conforme a Equação 5.1:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} x_j) + e_i \quad (5.1)$$

em que:  $r_i$  é a reflectância de um pixel na  $i$ -ésima banda espectral;

$a_{ij}$  é a reflectância do  $j$ -ésimo elemento na  $i$ -ésima banda espectral;

$x_j$  é a proporção ocupada pelo  $j$ -ésimo elemento no pixel;

$e_i$  é o erro estimado para a  $i$ -ésima banda espectral, que indica as porções do espectro que não foram modeladas;

$j$  corresponde a 1, 2, 3, ...,  $n$  (número de elementos); e

$i$  corresponde a 1, 2, 3, ...,  $m$  (número de bandas espectrais).

A aplicação de um modelo de mistura gera imagens-fração ou proporção, em número variável de acordo com o número de elementos selecionados como constituintes da mistura espectral, conhecidos como *endmembers*<sup>19</sup>.

Sousa (1999) aplicou um modelo de mistura espectral para estudar os padrões de uso do solo e da cobertura vegetal em uma área do vale do Paraíba, Estado de São Paulo. A partir da aplicação do modelo, o autor pôde classificar a cobertura vegetal em função da idade e estrutura, principalmente nas áreas de planícies aluviais, assim como diferentes teores de umidade no solo, distinguir corpos d'água e portos de areia.

Modelos de mistura espectral também se aplicam ao estudo de fenômenos físicos, econômicos e sócio-demográficos das cidades. A paisagem urbana é composta por um vasto número de elementos e materiais, que a definem como sendo radiometricamente heterogênea e complexa (SMALL, 2005). Rashed et al. (2003) salientam que a classificação de uma área urbana baseada nas imagens-fração obtidas a partir da análise de mistura espectral pode ter maior exatidão se comparada a outras técnicas tradicionais de classificação.

A aplicação de modelos lineares de mistura pode facilitar a discriminação entre os alvos. Baseados nesta técnica, trabalhos como o de Rashed et al. (2003) demonstraram ser possível analisar os componentes gerais da estrutura física urbana a partir de imagens multiespectrais de média resolução espacial. Estes resultados, por sua vez, podem ser integrados com outras variáveis para o estudo da qualidade ambiental.

Em qualquer ambiente urbano, conforme cita Ridd (1995), o conjunto de componentes pode incluir superfícies impermeáveis, vegetação e solo, configurando um modelo *Vegetation – Impervious surface – Soil* (V-I-S). Em muitos casos, no entanto, há a necessidade da inclusão de um quarto elemento neste modelo, sombra/corpos d'água, para ampliar a sua aplicabilidade.

---

<sup>19</sup> Neste trabalho, a palavra “*endmembers*” foi traduzida por “componentes”.

O número de componentes em um modelo de mistura pode ser no mínimo de dois e no máximo igual ao número de bandas espectrais utilizadas. Os componentes podem ser selecionados de bibliotecas de dados espectrais, da própria imagem, ou adquiridos em campo com espectrorradiômetros. Rashed et al. (2003) recomendam obter os componentes da própria imagem, pois, dessa forma, há compatibilidade com a resolução espacial da imagem, tornando mais fácil associá-los a feições na cena.

Para Weng et al. (2004) o mais importante na obtenção de imagens-fração de alta qualidade é a correta seleção dos componentes. Na imagem, a seleção de componentes pode ser feita através da técnica *Pixel Purity Index* (PPI) proposta por Boardman et al. (1995). Segundo esta técnica, os componentes devem representar respostas espectrais puras do elemento considerado. Antes da aplicação do modelo é possível efetuar a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) para minimizar os efeitos de ruído nas bandas e decorrelacionar os dados. Para esta finalidade, à semelhança do que ocorre quando se aplica uma transformação por Componentes Principais, a(s) última(s) componentes podem ser descartadas, pois são elas que concentram o ruído. A transformação MNF se aplica a dados multiespectrais e hiperespectrais.

Em um modelo de mistura também podem ser geradas imagens-erro, que auxiliam na avaliação dos resultados. A proporção relativa de cada elemento em um modelo de mistura varia de acordo com a área considerada. Normalmente, o erro gerado é grande porque os componentes necessários para descrever determinadas áreas da cidade como, por exemplo, as áreas centrais, são diferentes daqueles adequados a bairros residenciais.

Modelos de mistura espectral simples subutilizam o potencial de muitos dados de sensoriamento remoto em discriminar materiais, enquanto produzem ao mesmo tempo erros de estimativa devido à incorreta escolha dos componentes ou do número de componentes usados para decompor um determinado pixel. Por outro lado, neste tipo de modelo, o uso de um grande número de

componentes pode aumentar o erro devido à confusão entre eles. Por essa razão, Rashed et al. (2003) recomendam a aplicação de um Modelo de Mistura Espectral de Múltiplos Componentes – MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*).

O MESMA é uma modificação do modelo de mistura espectral tradicional. Desenvolvido por Roberts et al. (1998), o algoritmo tem sido utilizado para mapeamento de espécies vegetais, neve, solos e até da composição da superfície lunar (DENNISON et al., 2004). Segundo Rashed et al. (2003), o MESMA permite que o número e o tipo de componentes varie para cada pixel na imagem. No Brasil, uma versão simplificada do modelo MESMA foi desenvolvida para mapeamento mineral por Carvalho Júnior et al. (2001).

O MESMA busca selecionar como componentes para o modelo pixels que representam a variabilidade espectral de uma determinada classe na cena, que, não necessariamente, correspondem a pixels puros. Os componentes mais puros não são, necessariamente, os mais representativos. Embora deva representar a variedade, a biblioteca espectral criada não deve ser muito grande para evitar a forte confusão espectral.

Nunes e Souza Júnior (2007) compararam os resultados obtidos com a aplicação de modelos de mistura espectral simples e MESMA, utilizando imagens TM/Landsat do município de Belém (Pará), e não encontraram grandes diferenças nos resultados. Entretanto, em imagens Landsat com apenas seis canais espectrais não há grande alteração nos espectros de pixels pertencentes às mesmas categorias de materiais, como vegetação, por exemplo, diferentemente do que ocorre em imagens de sensores com maior número de bandas.

Powell (2006) aplicou o modelo MESMA em imagens TM/Landsat visando analisar a influência da urbanização sobre as mudanças na cobertura da terra em escala regional. As áreas de estudo foram a cidade de Manaus e seu entorno (Amazonas) e algumas cidades do Estado de Rondônia, Região Norte

do Brasil. Este trabalho validou as frações das imagens processadas utilizando dados de videografia.

Para Powell (2006) o uso do MESMA é importante porque permite comparações regionais do desenvolvimento urbano através das séries históricas de dados Landsat. Os resultados obtidos pela autora apontam para a necessidade do desenvolvimento de uma biblioteca espectral específica para cada área urbana, considerando a diversidade de materiais que compõem a superfície e que ocorrem na mistura espectral. Para a comparação dos resultados, Powell (2006) recomendou a aplicação do modelo em outras cidades e ambientes, bem como o uso de dados de outros sensores.

Os dados ASTER apresentam grande potencial para a aplicação do modelo MESMA devido a sua resolução espacial e espectral. A aplicação do modelo MESMA para dados ASTER em estudos urbanos foi conduzida por Rashed (2004) para a cidade de Cairo (Egito). As imagens-fração obtidas foram relacionadas a dados demográficos a fim de caracterizar a estrutura física e os padrões de ocupação urbana. Para o autor, os índices elevados de solo exposto, por exemplo, indicaram alto grau de instabilidade associada à reconstrução e atividades de desenvolvimento, em áreas de forte expansão demográfica. A aplicação do MESMA permite obter medidas quantitativas físicas que podem ser incorporadas ao estudo do contexto ambiental e ecológico da urbanização, considerando a variável vegetação, por exemplo, e outros fenômenos socioeconômicos urbanos.

## **5.2 Material e Métodos**

Para a aplicação dos modelos de mistura espectral foram utilizadas imagens adquiridas por dois subsistemas do sensor ASTER conforme especificado na Tabela 5.1 e foram empregados os procedimentos sintetizados na Figura 5.1. Os módulos *FLAASH* e *VIPER Tools* implementados no programa *ENVI 4.2* foram utilizados para o processamento das imagens, e o *ArcGIS 9.1* para a elaboração de figuras e mapas.

Tabela 5.1 – Especificações das imagens ASTER.

Satélite (Sensor)	Resolução Espacial	Bandas	Datas de aquisição
Terra (ASTER)	15 m (VNIR) 30 m (SWIR)	1, 2, 3 (VNIR) 4, 5, 6, 7, 8 e 9 (SWIR)	13/10/2002 (SP) 25/04/2003 (RJ) 02/09/2004 (RJ) 17/05/2006 (SP)

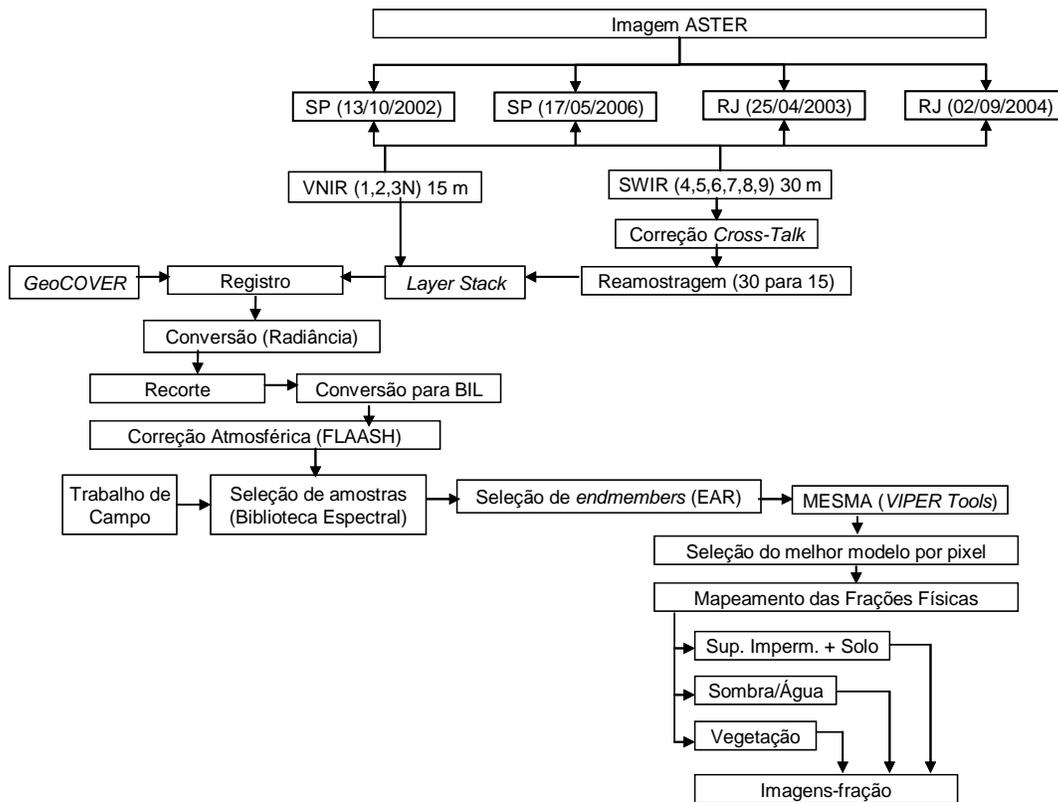


Figura 5.1 – Fluxograma metodológico.

As imagens ASTER foram obtidas no nível 1B, já corrigidas geométrica e radiometricamente. As imagens encontram-se na Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum WGS84. Essas imagens (nível 1B) devem ser convertidas para radiância espectral (em  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ) através dos coeficientes de conversão de unidade – UCC (*Unit Conversion Coefficient*).

Para converter a imagem de nível digital (ND) para radiância espectral utiliza-se a Equação 5.2, sendo que o UCC é diferente para cada banda ASTER.

$$L_{rad} = (ND - 1) \times UCC \quad (5.2)$$

O valor do UCC varia conforme o ganho aplicado a cada banda do sensor durante a aquisição da imagem (alto, normal, baixo 1 e baixo 2)<sup>20</sup>, e pode ser obtido consultando Abrams et al. (1999), conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Coeficientes de conversão de unidade para imagens ASTER.

Banda	Coeficiente			
	Alto Ganho	Ganho Normal	Baixo Ganho 1	Baixo Ganho 2
1	0,676	1,688	2,25	-
2	0,708	1,415	1,89	-
3N	0,423	0,862	1,15	-
3B	0,423	0,862	1,15	-
4	0,1087	0,2174	0,2900	0,2900
5	0,0348	0,0696	0,0925	0,4090
6	0,0313	0,0625	0,0830	0,3900
7	0,0299	0,0597	0,0795	0,3320
8	0,0209	0,0417	0,0556	0,2450
9	0,0159	0,0318	0,0424	0,2650

Fonte: Abrams et al. (1999).

No programa *ENVI 4.2* não há a necessidade de aplicação desta transformação radiométrica, pois automaticamente são extraídas as informações de calibração do cabeçalho dos arquivos “.hdf” das imagens ASTER, incluindo também as informações do georeferenciamento, ao serem abertas na lista de bandas disponíveis. Para os dados ASTER nível 1A, uma calibração completa para radiância é executada. Para os dados ASTER no nível 1B, caso dos dados utilizados neste trabalho, o programa converte os dados escalonados em radiância para unidades de radiância espectral no formato numérico de ponto flutuante. As unidades de saída são  $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ .

<sup>20</sup> As informações sobre o ganho aplicado a cada canal são registradas no arquivo descritor auxiliar das imagens ASTER.

As imagens ASTER, antes de serem transformadas para reflectância, foram corrigidas para o efeito de *cross-talk*, que atua nas bandas do SWIR e é causado pela dispersão da REM incidente sobre os detectores da banda 4 do sensor (ERSDAC, 2003). Este procedimento foi executado através do programa de correção das imagens ASTER no nível de processamento 1B disponibilizado pelo *Earth Remote Sensing Data Analysis Center*. Após corrigidas, é adicionado um sufixo “\_chg” às imagens.

Os dados do SWIR foram reamostrados de 30 para 15 m e combinados com os do VNIR para formar um único arquivo. Ressalta-se que a técnica de vizinho mais próximo, utilizada na reamostragem, não alterou os valores da imagem, apenas quadruplicou o número de pixels, conforme pode ser observado na Figura 5.2.

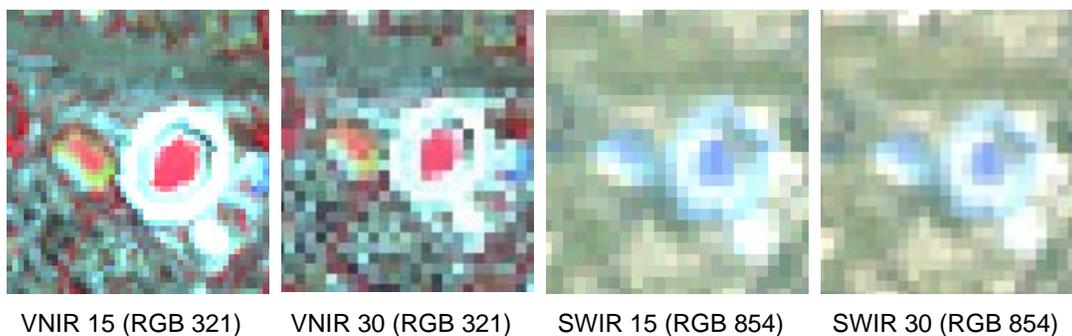


Figura 5.2 – Efeito da reamostragem dos dados ASTER do VNIR e SWIR.

A transformação das imagens de radiância para reflectância de superfície foi efetuada empregando-se um modelo de correção dos efeitos da atmosfera. Conforme Slater (1980) a reflectância de superfície é estimada eliminando-se a contribuição da atmosfera em cada pixel através da modelagem da interação da REM com os gases atmosféricos radiativamente ativos. Utilizou-se o modelo de transferência radiativa *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH), baseado em códigos do MODTRAN 4.0 (ACHARYA et al., 1999).

Antes da aplicação do FLAASH os dados precisam ser convertidos para o modelo *Band Interleaved by Line* (BIL). O módulo FLAASH exige que o arquivo de entrada apresente-se no formato numérico de ponto flutuante e que a calibração em radiância apresente-se na unidade  $\mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$ . Portanto, é necessária a aplicação de um fator de escala 10 para o ajuste da unidade em radiância do arquivo de entrada da imagem ASTER no momento do processamento pelo módulo FLAASH. Este módulo efetua a correção de bandas no intervalo de comprimento de onda de 0,35 a 2,5  $\mu\text{m}$ , segundo parâmetros ajustáveis em uma interface amigável (Figura 5.3).

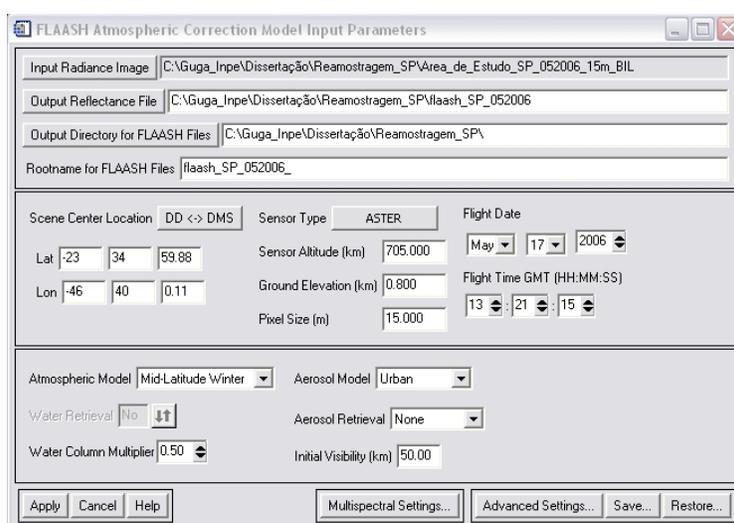


Figura 5.3 – Interface padrão do módulo FLAASH.

Os dados de entrada utilizados são relativos a características da imagem, do sensor e da cena, tais como data e hora de aquisição, altitude do sensor, altitude média da cena, coordenadas geográficas do centro da cena e tamanho do pixel. Devem ainda ser selecionados os respectivos modelos de atmosfera e de aerossóis mais adequados à área de interesse, e inseridos o valor multiplicador da coluna de água e a visibilidade. A maior parte das opções de ajuste do modelo é voltada a sensores hiperespectrais. Caso o sensor possua bandas estreitas localizadas em comprimentos de onda como 940 e 1135 nm, nos quais é forte a absorção da REM pelo vapor d'água, sua quantidade

poderá ser estimada pelo modelo. Semelhantemente, poderá ser feita uma estimativa de aerossóis utilizando razão de bandas. Como o ASTER não possui bandas estreitas localizadas nas faixas recomendadas, estas estimativas não foram aplicadas.

O modelo aplicado considerou um único valor de altitude para toda a cena apesar da grande variação neste parâmetro. Este procedimento pode tornar a imagem não bem corrigida para toda a área, no entanto, quando há uma alta frequência de variação altimétrica, como no caso do Rio de Janeiro, considerando diferentes valores haveria a necessidade de recortar a imagem em diversas partes, descontínuas.

Dado o alto custo dos dados de visibilidade de propriedade da Infra-estrutura Aeroportuária (INFRAERO), optou-se por utilizar como parâmetro de entrada no FLAASH 40 km, pois para cenas claras é indicada uma visibilidade de 40 a 100 km. Pela análise visual das imagens (composição colorida multiespectral) da área de estudo do Rio de Janeiro, observa-se que a imagem de 2004 apresenta menor influência de vapor d'água e aerossóis do que a imagem de 2003. O modelo de aerossóis utilizado foi o Urbano porque, conforme RSI (2005), o modelo Marítimo em faixas litorâneas está associado ao meio rural, e não ao urbano. Os parâmetros utilizados para a correção dos efeitos da atmosfera das imagens são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Parâmetros utilizados na aplicação do FLAASH.

Parâmetro	Imagem			
	25/04/2003	17/05/2006	02/09/2004	13/10/2002
Modelo de atmosfera	Verão de médias latitudes	Inverno de médias latitudes	Verão de médias latitudes	Verão de médias latitudes
Modelo de aerossóis	Urbano	Urbano	Urbano	Urbano
Visibilidade (km)	40	40	40	40
Multiplicador da coluna de água	1,0	0,5	0,5	0,5

As imagens foram registradas com base no mosaico *GeoCover* (imagem *S-23-20\_2000*). O método de interpolação usado foi o vizinho mais próximo, com o emprego de um polinômio de 1º grau. Para as imagens de reflectância da superfície o erro variou entre 4 e 5 m.

Os modelos de mistura espectral de múltiplos componentes foram processados considerando os arquivos de imagens com dados do VNIR e SWIR agregados (nove bandas no total). Foi utilizado o aplicativo *Visualization and Image Processing for Environmental Research (VIPER) Tools* (versão *Beta 1.12*), desenvolvido por Roberts e Halligan (2006), que possibilita a execução das etapas apresentadas na Figura 5.4. No *VIPER Tools* encontra-se embutida uma rotina de otimização da seleção dos modelos customizados para cada pixel.

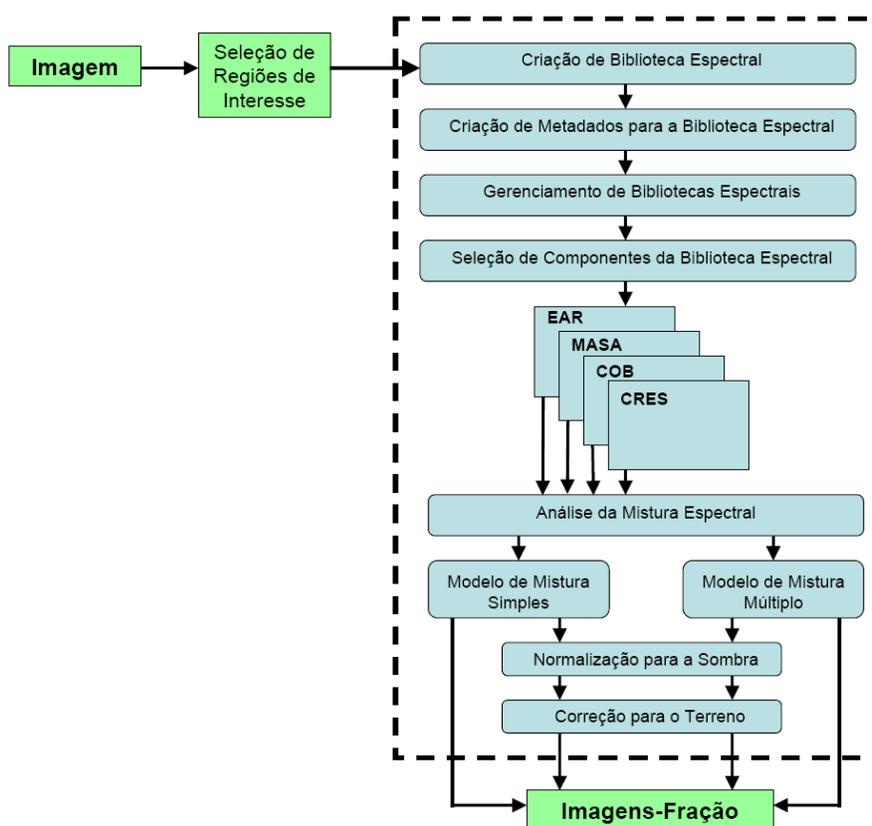


Figura 5.4 – Etapas da aplicação dos modelos de mistura espectral.

Fonte: Adaptado de Roberts e Halligan (2006).

O *VIPER Tools* oferece um conjunto de ferramentas para o processamento de imagens multiespectrais e hiperespectrais: criação e gerenciamento de bibliotecas espectrais, seleção de componentes para análise de mistura espectral e para cálculo e interpretação de modelos de mistura espectral simples – SMA (*Spectral Mixture Analysis*) e modelos de mistura espectral de múltiplos componentes (MESMA). Embora seja um programa livre, *VIPER Tools* não possui código fonte aberto e os direitos autorais são mantidos. Faz-se necessária a requisição de uma licença para sua instalação. Desenvolvido em linguagem *IDL*, *VIPER Tools* possui interface como um módulo embutido no programa *ENVI*. Atualmente, encontra-se na versão Beta 1.12 e o único sistema operacional compatível é o *Windows*<sup>21</sup>. *VIPER Tools* pode processar dados nas formas de nível digital, radiância ou reflectância. Fatores de escala podem ser definidos, considerados os formatos numéricos e escalonamento dos dados. A unidade de saída das imagens-fração é o formato numérico de ponto flutuante. O objetivo do programa é ser utilizado em conjunto com as demais ferramentas disponíveis no *ENVI* para visualização, processamento de dados e acesso aos produtos resultantes, evitando qualquer repetição de atividade.

Na primeira etapa de aplicação do modelo foi construída uma biblioteca espectral. Os espectros foram selecionados a partir de regiões de interesse nas imagens, identificadas a partir da análise visual de composições coloridas e análise espectral, bem como através de pesquisa de campo nas duas áreas de estudo. Esta seleção teve como objetivo principal a busca de componentes representativos da diversidade de alvos existente nas áreas de estudo, agregados segundo classes e categorias de interesse. As categorias para a biblioteca espectral foram definidas tomando como referência o modelo teórico V-I-S (RIDD, 1995). Conforme Powell (2006), dois são os pontos-chave para o

---

<sup>21</sup> Após a instalação do programa, não foi possível a solicitação da licença em virtude da limitação a versões do *Windows* no idioma inglês. Após contato com a equipe de desenvolvimento, o programa foi liberado para a instalação em outros idiomas.

sucesso na aplicação do MESMA: a construção de uma biblioteca espectral regional adequada e a seleção de parâmetros e ajustes do modelo.

Os espectros identificados foram visualizados através da ferramenta Visualizador de Biblioteca Espectral (*Spectral Library Viewer*) disponível no ENVI. Uma biblioteca espectral foi construída a partir das regiões de interesse contendo as informações relativas a comprimentos de onda, no entanto, sem qualquer informação espacial. Ao ser criado o arquivo “.sli” da biblioteca espectral no *VIPER Tools*, automaticamente foi criado um arquivo de valores separados por vírgula “.csv”. Os metadados para as bibliotecas de cada área de estudo foram inseridos neste arquivo no programa *Microsoft Excel*. O arquivo original criado pelo programa apresenta apenas o identificador de cada pixel e o número da linha e da coluna em que o pixel se encontra na imagem a qual ele está associado. Novas colunas com caracteres foram inseridas, introduzindo a informação sobre a respectiva classe e a categoria do material correspondente àquela região de interesse.

As categorias e classes determinadas devem ter um nível de especificidade de acordo com os objetivos de cada estudo (frações de interesse a serem mapeadas). O arquivo de metadados pode apresentar várias colunas, quantas forem consideradas necessárias, embora o *VIPER Tools* utilize apenas a informação inserida na segunda ou terceira coluna para o agrupamento dos espectros. Deve haver prudência para que informações críticas não sejam perdidas ao sobrescrever o arquivo (formato “.csv”) com os metadados inseridos.

Na segunda etapa do *VIPER Tools* é possível efetuar o gerenciamento de bibliotecas espectrais, buscando uma fusão entre duas ou mais bibliotecas, por exemplo. Isto é necessário na maioria dos casos em que a referência provém de diferentes fontes. Nesta etapa, que requer muito cuidado para assegurar a integridade dos dados utilizados, é possível recortar bibliotecas para preservar somente os espectros desejados, fundir bibliotecas e/ou escalonar os dados

alterando o fator de escala da reflectância. Dada a inexistência de bibliotecas espectrais de alvos urbanos brasileiros, construídas a partir da coleta de dados em campo com espectrorradiômetros (que poderiam vir a ser reamostradas para as bandas ASTER), foi necessário construir uma biblioteca espectral específica para cada área de estudo a partir dos dados das respectivas imagens.

A etapa seguinte foi a criação do arquivo de Matriz Quadrada (".sqr" - *Square Array*) segundo a interface apresentada na Figura 5.5. Este arquivo contém valores das métricas de ajuste, base para o cálculo das técnicas de seleção de componentes no *VIPER Tools*, conforme destacadas a seguir. Há três formas de se criar esse arquivo: sem restrições, com restrições ou com restrições parciais.

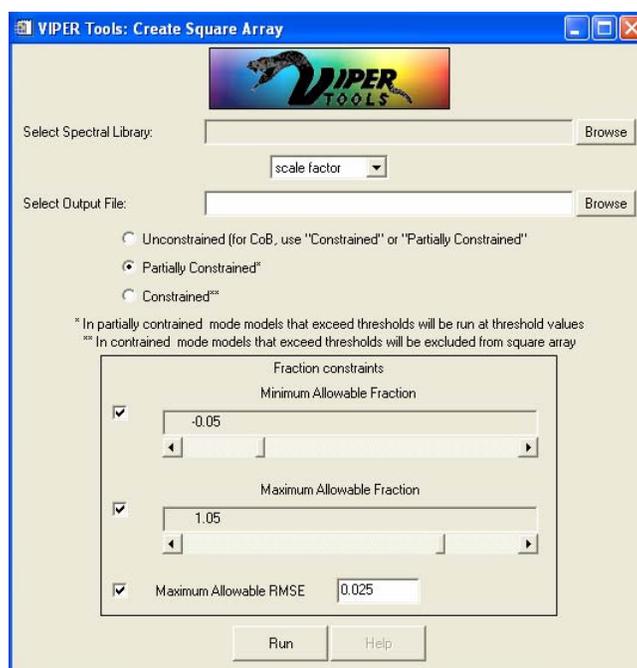


Figura 5.5 – Interface para a criação do *Square Array*.

O arquivo de Matriz Quadrada agrega diversas informações. A banda RMSE apresenta os valores calculados da raiz do erro quadrático médio de um espectro modelando o outro. A banda Ângulo Espectral apresenta os valores

de distância angular (em radianos), entre dois espectros<sup>22</sup>. A banda Fração de Brilho do Componente é a fração de um modelo de mistura quando um componente é utilizado para modelar o outro. A banda Fração Sombra, por sua vez, corresponde à fração sombra de um modelo de mistura quando um componente é utilizado para modelar o outro. É calculada como tendo o valor igual a 1 menos a Fração de Brilho do Componente. A banda Código Restrito contém valores de 1 se o modelo foi parcialmente restrito (as frações modeladas excederam o limite, mas não excederam o limiar de aceitação do erro); 2 se o limiar de aceitação do erro foi excedido (completamente restrito); e 0 (zero) para modelos sem qualquer restrição (ROBERTS; HALLIGAN, 2006). Um exemplo dos cinco arquivos gerados para cada biblioteca espectral é apresentado na Figura 5.6.

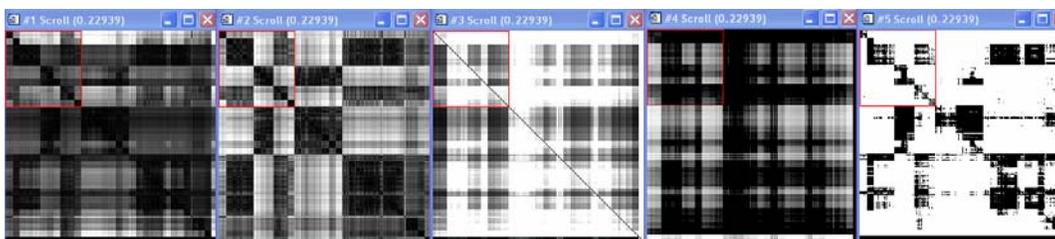


Figura 5.6 – Arquivos de Matrizes Quadradas. Da esquerda para a direita: RMSE, Ângulo Espectral, Fração de Brilho do Componente, Fração Sombra e Código Restrito.

Considerando valores padrão recomendados na literatura (ROBERTS et al., 1998) e seguindo a recomendação de adoção do método parcialmente restrito, foram aplicados os valores de -0,05, 1,05 e 0,025 para a fração mínima, máxima e para o limiar de aceitação de erro, respectivamente. As métricas de ajuste calculadas através das matrizes quadradas foram utilizadas pelo *VIPER Tools* para determinar quais espectros são os mais representativos de seu grupo de espectros (classe), através das técnicas de Erro Médio do Componente – EAR (*Endmember Average RMSE*), do Mínimo Ângulo Espectral Médio – MASA (*Minimum Average Spectral Angle*) e da Seleção de

---

<sup>22</sup> Esta é a mesma métrica utilizada para o cálculo do Mapeador de Ângulo Espectral do ENVI (SAM – *Spectral Angle Mapper*).

Componentes Baseada em Contagem – COB (*Count-based Endmember Selection*).

Diferentemente do que ocorre com outras técnicas de seleção de componentes para modelos de mistura espectral, a exemplo do PPI, no EAR os componentes selecionados não são os mais puros ou os mais extremos, mas os mais representativos de uma classe, ou seja, os que melhor modelam a biblioteca espectral. O EAR não trabalha com a confusão espectral entre classes. Entretanto, como os componentes extremos não são privilegiados, há a tendência dos pixels mais brilhantes da imagem não serem modelados. Quando os valores mínimos de EAR são altos, isto significa que a variabilidade espectral no interior da classe é alta (DENNISON; ROBERTS, 2003). Para cada classe, os componentes que melhor a representam aparecem com o menor EAR (o espectro ótimo a ser selecionado conforme esta técnica é aquele que produz o menor erro).

Enquanto o EAR utiliza o RMSE como métrica de ajuste, o MASA utiliza o ângulo espectral. Para o MASA, o melhor candidato a componente de um modelo é aquele que tiver o menor ângulo espectral. O EAR e o MASA são conceitualmente muito similares. Isto foi verificado na prática ao observar que muitos espectros da biblioteca que apresentaram os menores valores de EAR também apresentaram menores valores de MASA. O MASA é mais seletivo para objetos escuros, enquanto o EAR é mais seletivo para objetos claros. Segundo Roberts e Halligan (2006), isto ocorre porque, para alvos escuros, sutis diferenças entre o espectro de referência e os demais resultam em um aumento no ângulo espectral. Para alvos brilhantes, uma pequena diferença entre os espectros altera muito pouco o ângulo espectral, enquanto introduz uma maior diferença no RMSE.

A técnica COB, diferentemente das demais métricas, tem a vantagem de selecionar um simples espectro e modelar os demais espectros de sua classe, bem como modelar a biblioteca espectral retirando os demais espectros da

mesma classe. Este procedimento é feito para todos os pixels incluídos na biblioteca espectral. Para esta métrica, os melhores componentes são aqueles que modelam o maior número de espectros de sua classe. A utilização dessa métrica apresenta uma série de ressalvas, pois é importante considerar que o fato de um componente modelar bem sua classe não significa que modelará bem a imagem.

Através da COB é apresentado o número total de espectros de sua classe modelados por cada espectro (*in\_COB*). A COB também apresenta uma medida que permite analisar a confusão entre as classes (*out\_Cob*), na qual maiores valores sugerem significativa confusão. Em uma situação ideal, o melhor espectro é aquele que modela apenas espectros de sua classe e não modela espectros de outra, ou seja, tem um alto “*in\_COB*” e um baixo “*out\_COB*”. É também calculado o *Count Based Index* (COBI), que é igual à razão de “*in\_COB*” por “*out\_COB*” com o denominador multiplicado pelo número de espectros da classe. Um espectro com alto “COBI” e alto “*in\_COB*” representa uma excelente escolha como componente para o modelo de mistura (espectro especialista). Espectros com valores baixos de “COBI” somente deverão ser aceitos caso possuam um alto “*in\_COB*” (espectro generalista) (ROBERTS; HALLIGAN, 2006).

Para o cálculo dessas três métricas é gerado um arquivo com extensão “.emc”, visualizado na interface da Figura 5.7. É necessário informar qual é o atributo (no caso, coluna do arquivo de metadados da biblioteca espectral) que deve ser utilizado para o grupamento dos espectros.

Os espectros selecionados foram exportados para uma nova biblioteca espectral a ser utilizada para a aplicação do(s) modelo(s) de mistura. Após terem sido selecionados espectros de referência segundo a ordem definida pela(s) métrica(s) adotada(s), é prudente visualizá-los através da ferramenta padrão do ENVI em Visualizador de Biblioteca Espectral. Este procedimento pode evitar a introdução de espectros de referência ruidosos ou que não sejam

representativos dos alvos de interesse a serem modelados, e também corrigir qualquer erro de seleção ou digitação ocorrido em etapa anterior. Nesta etapa, para uma eficiente modelagem da fração de interesse que inclua a sua diversidade de alvos, selecionar o melhor espectro proveniente de uma outra região de interesse (polígono) da mesma classe pode proporcionar um melhor resultado do que selecionar exatamente os espectros mais indicados por uma determinada métrica (que poderão pertencer todos a uma mesma região).

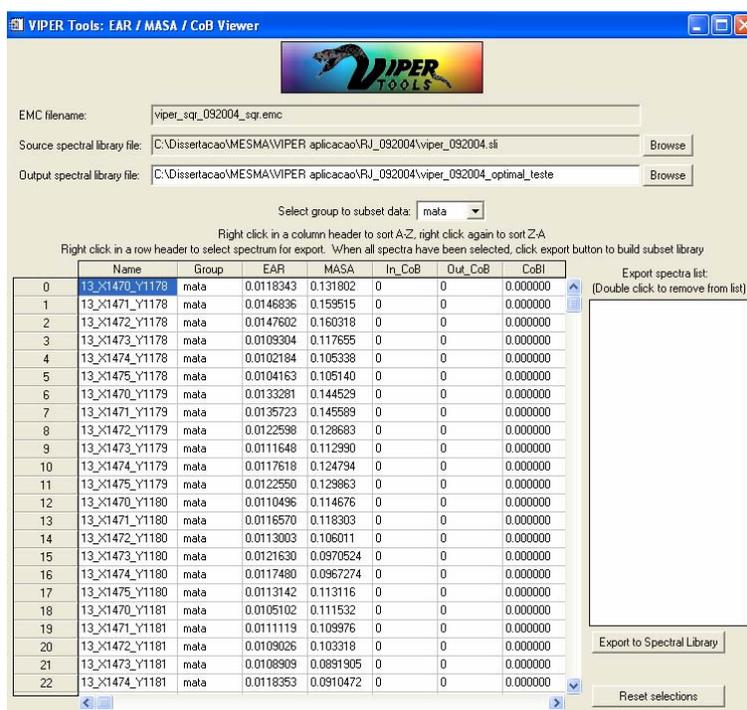


Figura 5.7 – Interface para a seleção de componentes do modelo de mistura espectral.

Além das técnicas de EAR, MASA e COB para a seleção de componentes, o *VIPER Tools* também oferece a técnica de Seleção Restrita de Componentes de Referência – CRES (*Constrained Reference Endmember Selection*). A técnica CRES é aplicada para o processamento de modelos de mistura simples e é tipicamente utilizada para selecionar componentes de uma biblioteca espectral de referência a fim de gerar as frações desejadas quando aplicadas a um espectro da imagem. Para a seleção através desta técnica, é importante que a biblioteca de referência contenha informações das frações estimadas em

campo. Os melhores modelos serão os que apresentarem os menores valores do índice CRES (ROBERTS; HALLIGAN, 2006).

O *VIPER Tools* permite a aplicação de modelos de mistura simples, selecionando um único componente para cada biblioteca espectral de referência, ou múltiplos modelos, com a seleção de mais de um componente por biblioteca, conforme apresenta a Figura 5.8. Existem ainda opções de restrição a valores mínimos e máximos fracionais, limiar de aceitação do erro ou resíduos e fração sombra máxima permitida, as quais devem ser ajustadas em todos os processamentos.

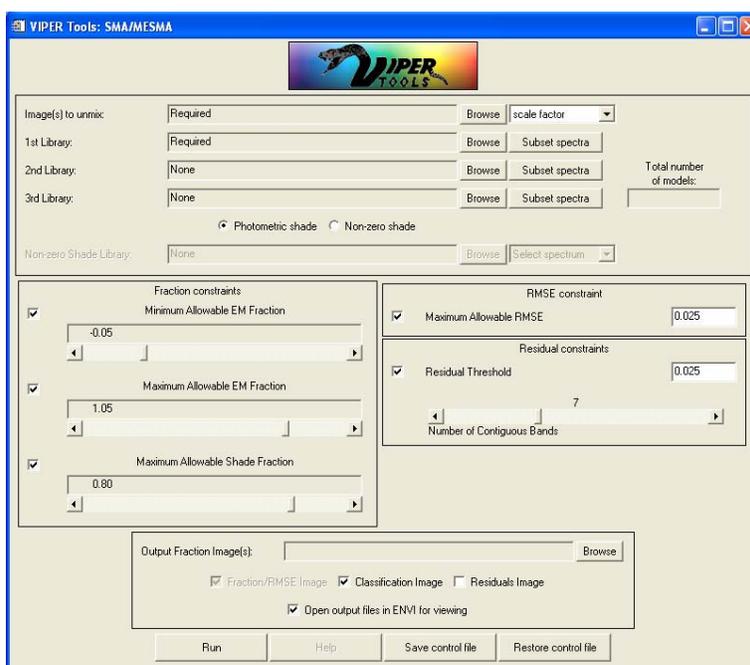


Figura 5.8 – Interface para o processamento do modelo de mistura espectral.

O fator de escala para dados de reflectância processados no FLAASH e utilizado na aplicação do MESMA foi 10.000. Os parâmetros padrão do modelo correspondem a -0,05 e 1,05 para as frações mínima e máxima permitidas, e 0,80 como a fração sombra máxima permitida. Não é permitido que os resíduos excedam 2,5% de reflectância para mais do que sete bandas contíguas (ROBERTS et al., 1998). No caso de um fator de escala equivalente a 10.000,

valores de erro de 0,025 significam 2,5% de reflectância. Caso nenhum modelo se ajuste às limitações impostas, o pixel não é modelado.

A fração sombra no modelo pode ser obtida de duas formas: sombra fotométrica, segundo a qual a sombra-padrão corresponde à reflectância igual a zero, e a sombra não fotométrica, que permite a seleção de um componente de referência para a sombra de uma biblioteca espectral. Em geral, nessa abordagem, é utilizado um espectro de água limpa como uma aproximação daquele de sombra. Ao efetuar este processamento, as bandas da imagem e da biblioteca espectral devem ser, obrigatoriamente, as mesmas e estar dispostas na mesma ordem. Um mesmo modelo pode ainda ser utilizado para o processamento de mais de uma imagem.

A ordem de imagens no arquivo resultante corresponde à biblioteca selecionada no ato de definição da primeira, segunda e terceira bibliotecas, com os componentes específicos. Desta forma, à primeira biblioteca é associada a primeira imagem-fração e assim por diante. O número de imagens-fração será igual ao número de bibliotecas selecionadas (uma a três) adicionada da fração-sombra (padrão para todos os modelos).

Além das imagens-fração, pode ser selecionada a apresentação de uma imagem classificada e/ou uma imagem de resíduos do modelo para cada banda. A saída padrão apresenta, além das imagens-fração, uma imagem erro (RMSE) e uma imagem modelo (com o número do modelo<sup>23</sup> selecionado – atributo “Z” por pixel).

As últimas opções do módulo *VIPER Tools* dizem respeito ao pós-processamento visando à Normalização da Sombra e/ou à Correção para o Terreno. A Normalização da Sombra é aplicada buscando minimizar os efeitos da sombra nas imagens de entrada, removendo esta componente das

---

<sup>23</sup> O número e os componentes de cada modelo de mistura podem ser verificados no arquivo de metadados associado ao arquivo de imagem resultante do processamento no *VIPER Tools*. Neste mesmo arquivo é possível verificar também qual a porcentagem da imagem modelada por cada modelo.

imagens-fração. O procedimento é recomendado, por exemplo, caso haja interesse no estudo da representatividade da cobertura vegetal em um ambiente semi-árido com topografia acidentada. A sombra em função do relevo altera a imagem-fração e pode confundir a interpretação dos valores de abundância de vegetação verde para aquela área, se comparados aos valores obtidos para uma área sem sombreamento decorrente da topografia. Esta área provavelmente apresentará valores superiores na imagem-fração vegetação, embora a abundância do material seja semelhante nas duas áreas. Este efeito pode ser reduzido através da normalização da sombra nas imagens-fração, resultado da aplicação de modelos de mistura espectral no *VIPER Tools*. Após o processamento, a imagem-fração sombra é excluída, e a soma das demais frações para cada pixel passa a corresponder a 1. Considerando a relevância da fração sombra nas áreas de estudo (São Paulo e Rio de Janeiro), por representar, principalmente, os corpos d'água, esta etapa de pós-processamento não foi executada.

O MESMA, conforme implementado no *VIPER Tools*, permite modelar para cada pixel de uma imagem modelos com até quatro componentes. Entretanto, isto não é obrigatório, e nem inerente ao modelo, porque as combinações são efetuadas automaticamente. Se um pixel for modelado com menos componentes do que o necessário, a porção não modelada do pixel será fracionada para as frações resultantes aumentando, assim, o erro do modelo para aquele pixel. Similarmente, o uso de muitos componentes para decompor o espectro do pixel resultará em erros de fração, causados pela confusão espectral entre os componentes (RASHED, 2004).

Por outro lado, conforme aumenta a complexidade do modelo, em função do maior número de categorias ou pela inclusão de mais componentes por categoria, diminui sua exatidão e aumenta o gasto com processamento computacional. Por essa razão, Halligan (2002) não recomenda o emprego de um número muito grande de modelos. Otimizando a seleção de modelos, se um pixel é modelado por um modelo de duas componentes, então este modelo

deve ser selecionado. Dessa forma, o pixel será modelado por um modelo de quatro componentes somente se não tiver sido modelado anteriormente por modelos menos complexos, permitindo a comparação de resultados e a seleção do melhor modelo baseado em critérios como a mínima complexidade, adotado por Powell (2006).

A principal limitação do *VIPER Tools* consiste em não apresentar ainda uma rotina para seleção do melhor modelo para cada pixel da imagem considerando os modelos com número diferente de componentes. Esta seleção é efetuada considerando somente modelos de dois, três ou quatro componentes, conforme o número de bibliotecas espectrais de referência para as frações desejadas selecionadas<sup>24</sup>. A rotina de aplicação do modelo MESMA pode ser observada na Figura 5.9.

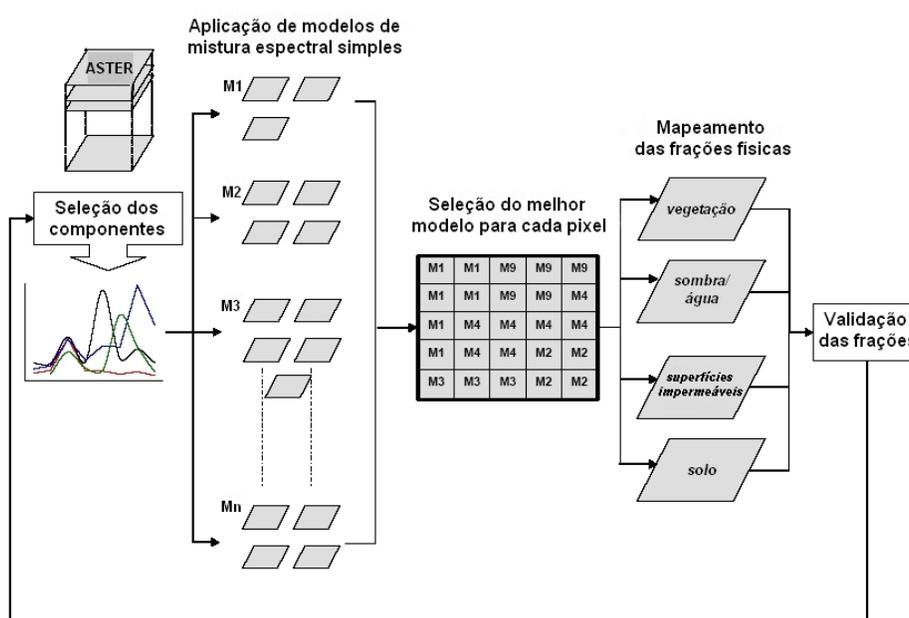


Figura 5.9 – Principais etapas da aplicação do MESMA.

Fonte: Adaptado de Rashed et al. (2003).

<sup>24</sup> A rotina de seleção de modelo de acordo com a complexidade está sendo implementada no *VIPER Tools* pela equipe responsável pelo desenvolvimento do programa, coordenada por Kerry Halligan, na Universidade da Califórnia Santa Bárbara – UCSB.

### 5.3 Resultados e Discussão

Para as áreas de estudo de São Paulo e Rio de Janeiro foram criadas bibliotecas espectrais com dez classes as quais são apresentadas na Tabela 5.4. Estas classes foram escolhidas considerando as categorias adotadas conforme o modelo V-I-S e a especificidade dos materiais representativos da superfície em cada área.

Tabela 5.4 – Organização das bibliotecas espectrais.

São Paulo		Rio de Janeiro	
Categoria	Classe	Categoria	Classe
V	Gramma	V	Gramma
	Mata		Mata
I	Ginásio	I	Banhado
	Asfalto		Ginásio
	Concreto		Asfalto
	Cobertura		Urbano
S	Urbano	S	Rocha
	Areia		Areia
	Solo		Solo
Sombra	Água	Sombra	Água

Considerando os tipos de materiais escolhidos para inclusão nas bibliotecas espectrais e após a análise visual e a realização de trabalho de campo, foram determinadas 30 regiões de interesse na imagem, contendo 36 pixels cada, para inclusão na biblioteca e posterior processamento das técnicas de seleção dos melhores componentes. A espacialização das regiões de interesse é apresentada na Figura 5.10.

Algumas amostras, no caso específico da área de estudo de São Paulo, foram selecionadas como referência apenas para uma das datas. Um exemplo é a área com solo exposto no futuro pátio do Metrô (Linha 4 Amarela) no distrito de Vila Sônia, zona oeste da cidade de São Paulo, presente apenas na imagem de 2006 e, conseqüentemente, selecionada apenas para esta data.

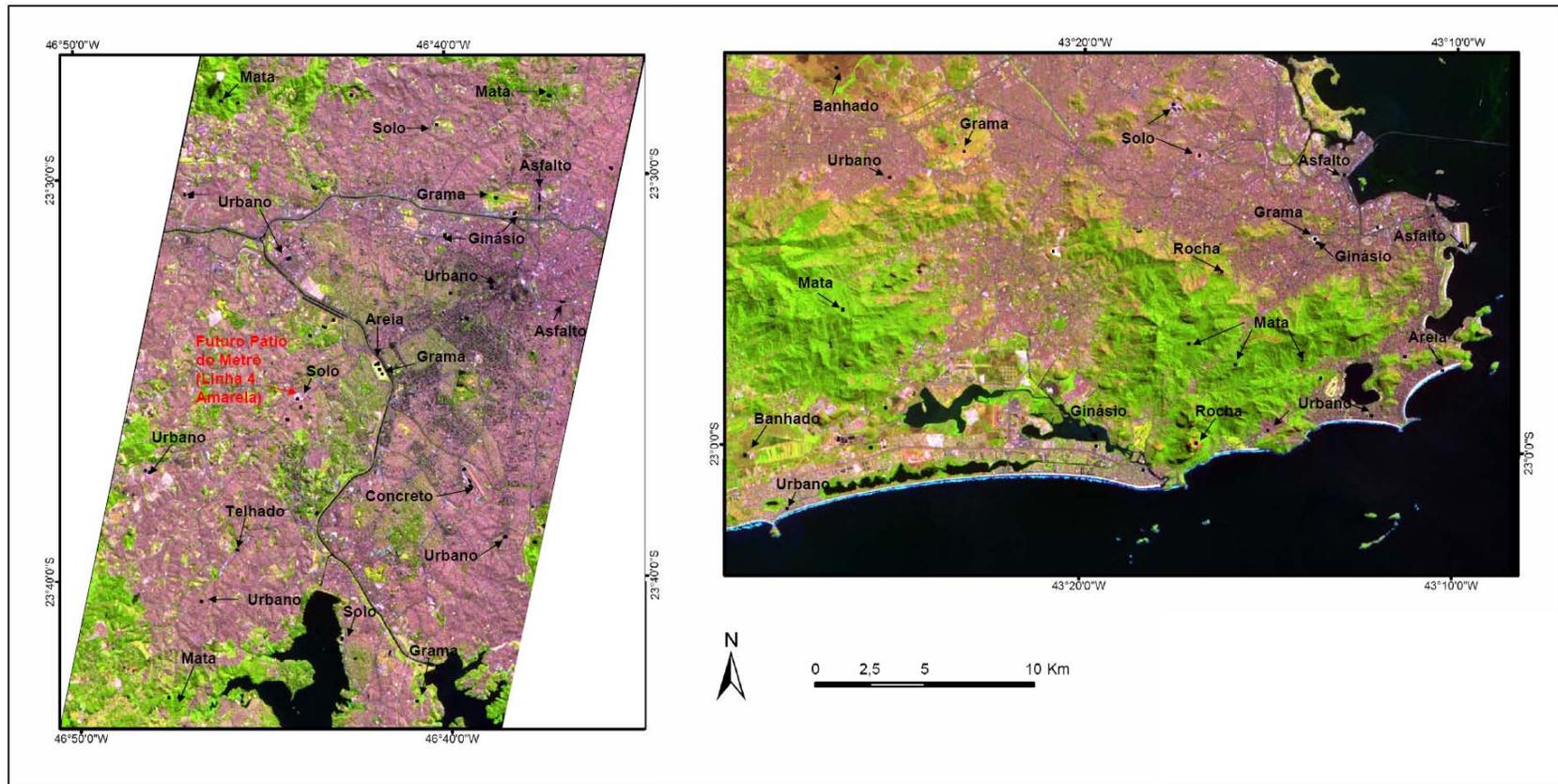


Figura 5.10 – Regiões de interesse para a seleção de componentes.

Os demais processamentos que antecederam a aplicação do modelo de mistura espectral de múltiplos componentes foram conduzidos com sucesso após a realização de diversos testes e considerando todas as quatro imagens. Para a criação do arquivo de Matrizes Quadradas foi considerado o método Parcialmente Restrito com os valores padrão de referência adotados no *VIPER Tools*. A seleção dos componentes por classe foi efetuada através da técnica do EAR. Dennison e Roberts (2003) e Powell (2006) também selecionaram componentes através desta técnica.

Analisando os testes iniciais com a aplicação do modelo foi verificado que uma parcela significativa dos pixels das imagens não era modelada, e que havia muita confusão entre as frações de superfícies impermeáveis e solo. Diante disto, foi realizado outro teste com um arquivo contendo apenas oito bandas, pois, em alguns casos, a banda de número 9 do ASTER, de maior comprimento de onda e menor sinal detectado, tende a apresentar ruído para alguns pixels, mesmo após a correção dos efeitos da atmosfera. Novamente, foi observada grande confusão entre a fração de solo e a de superfícies impermeáveis. No teste com uma imagem com apenas três bandas (correspondentes aos canais do subsistema VNIR) foi possível modelar toda a imagem e melhor modelar a fração solo, embora tenha sido registrado muito ruído nas frações de sombra e vegetação<sup>25</sup>.

Inicialmente testou-se o MESMA com quatro frações: de vegetação, de superfícies impermeáveis, de solo e de sombra/água. Entretanto, a análise visual dos resultados obtidos mostrou confusão espectral entre os espectros, notadamente entre solo e superfícies impermeáveis. Este problema também foi observado por Powell (2006), no estudo do ambiente urbano. Desse modo, considerando que a quantidade de pixels modelados com quatro frações não aumentava consideravelmente se comparada com a aplicação de modelos com componentes de apenas três categorias, utilizou-se esta última opção: três

---

<sup>25</sup> Cumpre ressaltar que esses dois testes foram efetuados apenas para uma dentre as quatro cenas analisadas, correspondente a 02/09/2004.

componentes para cada modelo, representativos das categorias vegetação, superfícies impermeáveis ou solo e sombra ou água (aplicação de sombra fotométrica). As categorias de solo e superfícies impermeáveis foram agrupadas para evitar o ruído. Operação semelhante foi empregada por Powell (2006), que agrupou vegetação verde (GV) e vegetação não fotossinteticamente ativa (NPV).

Foi observada que a inclusão de um pixel como referência para a modelagem da fração sombra conduziu a muitos erros<sup>26</sup>. Isto também foi observado por Nunes e Souza Júnior (2007). No caso do Rio de Janeiro, por exemplo, em que a porção da imagem representada pelo Oceano Atlântico, Baía de Guanabara e demais águas interiores, conforme dados obtidos de SMAC (2006), é alta (31,5%), e a radiância detectada pelo sensor no infravermelho médio é baixa se comparada à do VNIR, esses alvos não foram priorizados para a correção dos efeitos da atmosfera por apresentarem muito ruído.

Após a realização dos testes para a aplicação dos modelos foi verificado que os melhores resultados para a fração sombra e demais frações foram obtidos considerando a sombra fotométrica (*Photometric Shade*). Dessa forma a fração sombra foi estimada assumindo valores iguais a zero para todas as bandas para esse componente. A fração sombra máxima permitida ajustada foi 1, em virtude da existência de espectros nas imagens com 100% de água (uma aproximação do elemento sombra) e por ter sido observado que ao se limitar muito a fração de sombra máxima as superfícies escuras (alvos de resposta baixa) não foram bem modeladas, conforme mostra a Figura 5.11. Considerando a fração máxima permitida igual a 0,80, o percentual de pixels não modelados da imagem chegou a 28,02%, enquanto que ao ajustar a fração máxima permitida para 1,00, este percentual caiu para 2,68%.

---

<sup>26</sup> Para a modelagem da fração sombra, o módulo *VIPER Tools* permite a inserção de apenas um componente como referência, caso a reflectância dos pixels de sombra na imagem seja considerada como diferente de zero. Para as demais frações de interesse, é permitida a inserção de mais componentes.

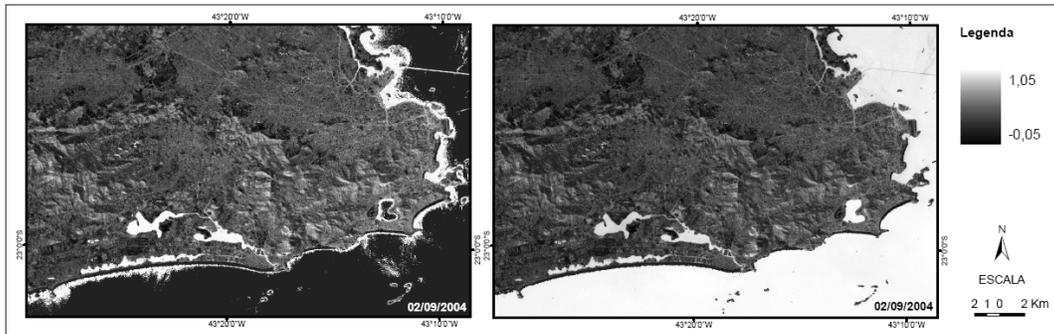


Figura 5.11 – Imagem-fração sombra com os valores de 0,80 e 1,00 ajustados para a fração sombra máxima permitida.

Para a área de estudo do Rio de Janeiro foi testada a aplicação de uma máscara para a água, gerada a partir de uma classificação não supervisionada K-médias. No entanto, a utilização desta máscara (exclusão dos pixels) não melhorou os resultados na aplicação do modelo.

Os modelos aplicados após a realização dos devidos testes contemplaram o número e as classes de componentes conforme listados na Tabela 5.5. Também foram efetuados testes com um número maior de componentes, todavia, visualmente não foram obtidos melhores resultados, seja em valores maiores para determinada fração, seja modelando com menos ruído.

Tabela 5.5 – Modelos de múltiplos componentes adotados.

Imagem	V	I	S	Total de Componentes	Total de modelos
13/10/2002 (SP)	5	8	2	15	50
17/05/2006 (SP)	5	8	2	15	50
25/04/2003 (RJ)	6	7	4	17	66
02/09/2004 (RJ)	5	6	4	15	50

O número de componentes foi inferior ao selecionado por Powell (2006) para aplicação do modelo MESMA à imagem da cidade de Manaus, correspondente a 26 componentes, considerando todas as classes. A assinatura espectral de cada componente selecionado a partir da técnica EAR e incluído para o processamento do MESMA é apresentada na Figura 5.12.

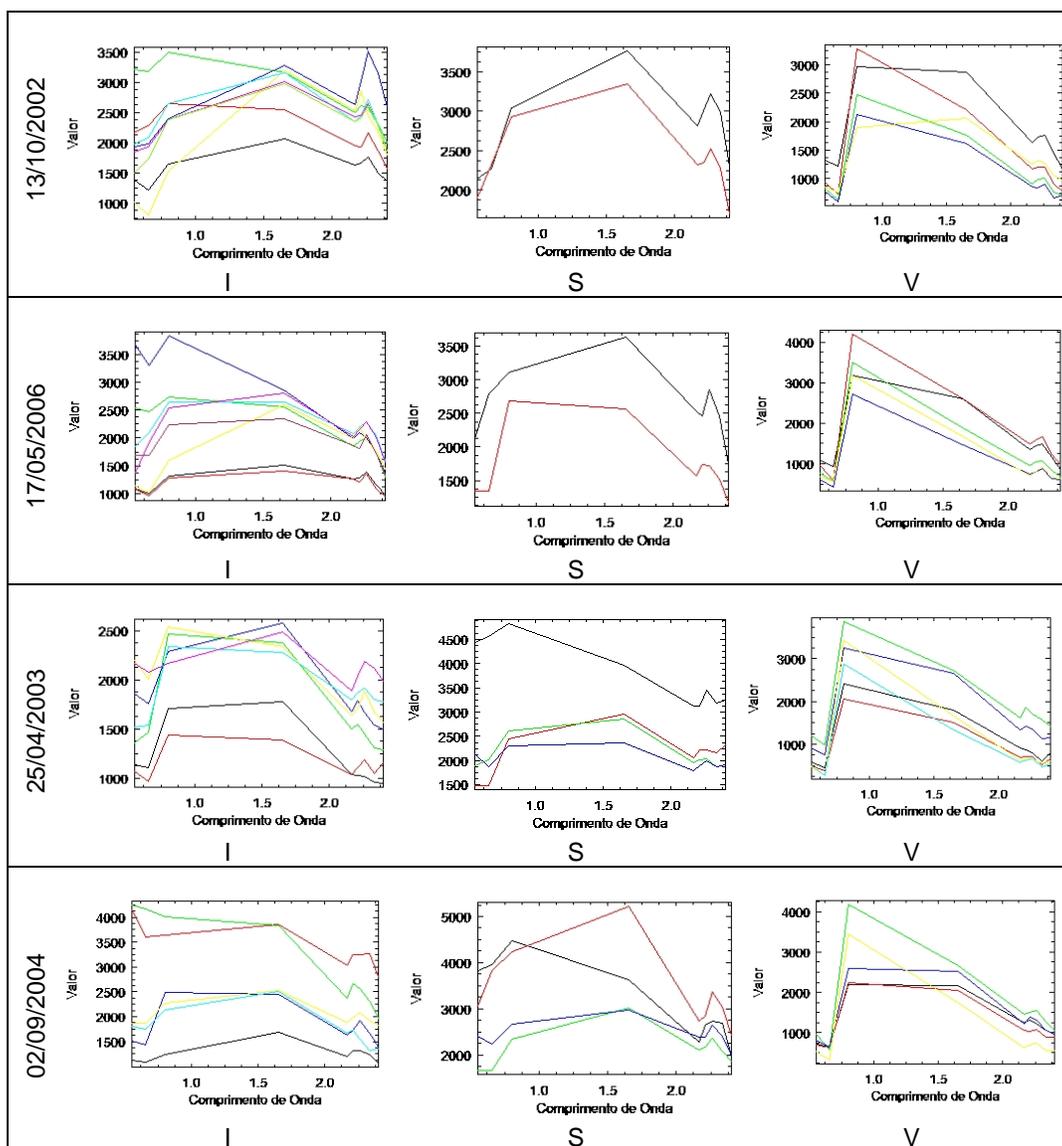


Figura 5.12 – Componentes selecionados para a aplicação do MESMA segundo as categorias V-I-S (cores correspondem apenas à diferenciação entre componentes de cada categoria).

A representatividade das superfícies impermeáveis e solo na área de estudo de São Paulo é notável em relação às demais categorias, seja comparando cada fração obtida em níveis de cinza (Figuras 5.13 e 5.14), ou através de composição colorida multiespectral (Figura 5.15). As poucas áreas com altos valores de fração vegetação são encontradas nas porções extremas da área de estudo. Nas frações sombra são destacadas as represas de Guarapiranga e

Billings, os Rios Tietê e Pinheiros e demais corpos d'água presentes na área de estudo, a exemplo da raia para canoagem na Cidade Universitária, e os lagos nos Parques da Aclimação e do Ibirapuera (Figura 5.16).

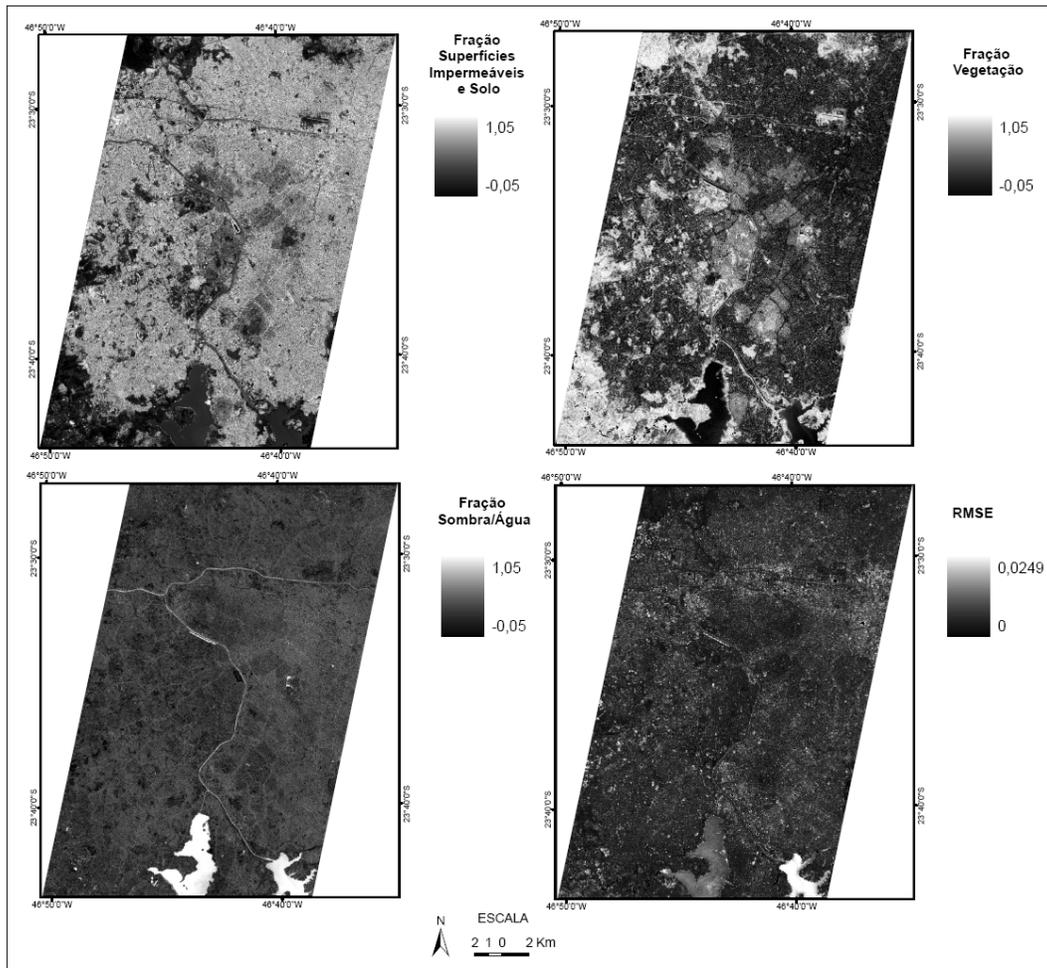


Figura 5.13 – Imagens-fração da área de estudo de São Paulo para 13/10/2002.

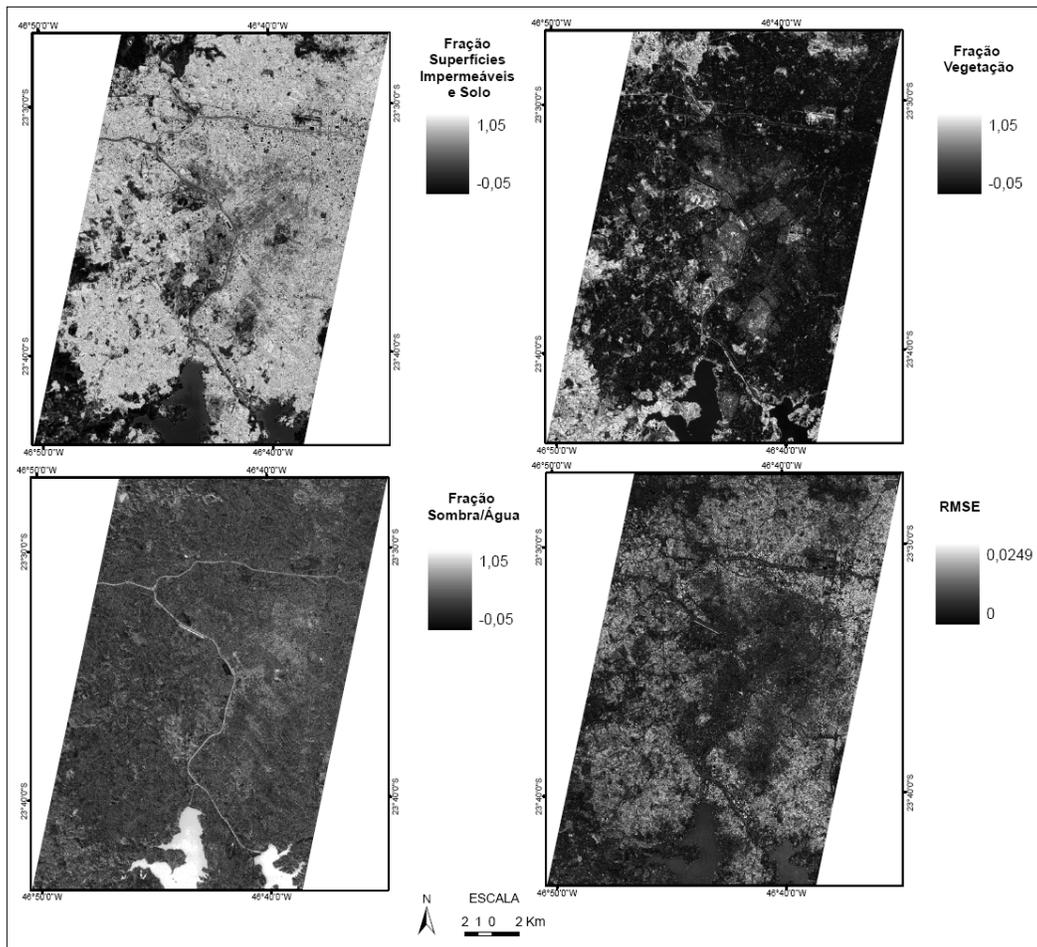


Figura 5.14 – Imagens-fração da área de estudo de São Paulo para 17/05/2006.

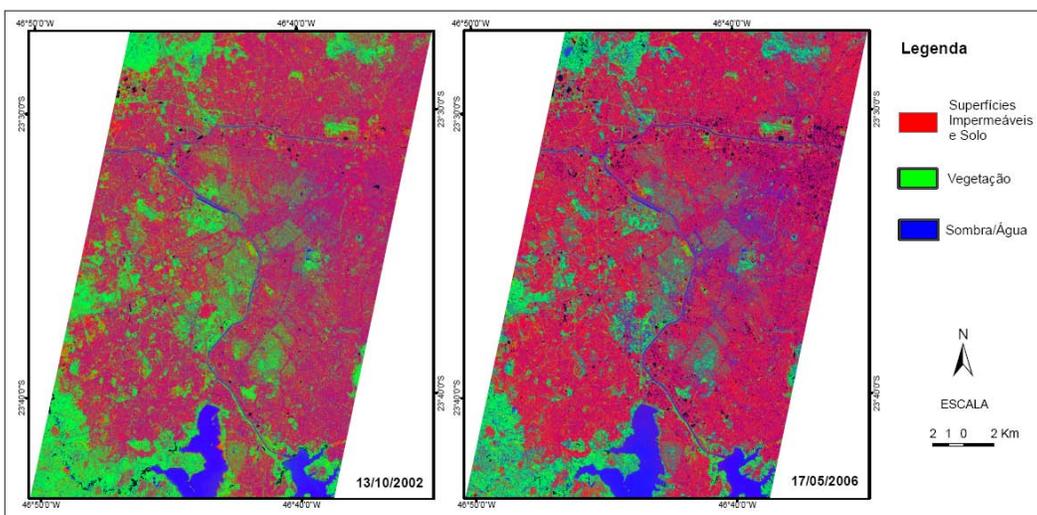


Figura 5.15 – Composição colorida das imagens-fração (São Paulo).

O município de São Paulo também apresenta grandes áreas florestais em seu território. No entanto, a maior parte delas encontra-se nas serras do Mar (sul do município – Área de Proteção Ambiental de Capivari-Monos) e da Cantareira (norte do município – Parque Estadual da Cantareira) e nos arredores do Pico do Jaraguá (noroeste – Parque Estadual do Jaraguá). As demais áreas florestais resumem-se a parques como o do Estado (atual Parque Estadual Fontes do Ipiranga), do Carmo, do Ibirapuera, da Aclimação e demais parques isolados de menor área, os quais apresentaram maiores valores de fração vegetação nas imagens apresentadas nas Figuras 5.13 e 5.14.

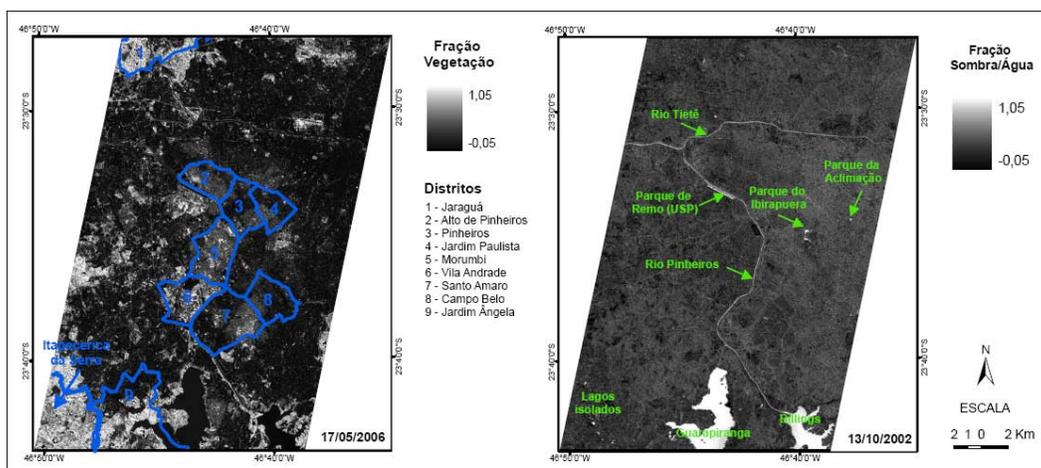


Figura 5.16 – Elementos da divisão territorial municipal de São Paulo sobrepostos à imagem-fração vegetação e principais corpos d’água destacados na imagem-fração sombra.

A localização das áreas verdes no espaço intra-urbano de São Paulo é extremamente desigual em sua distribuição espacial e está relacionada com a inclusão/exclusão social da população. Penhalber et al. (2004) obtiveram um índice de 13,4 m<sup>2</sup> de área verde por habitante para o município de São Paulo. Este valor é superior ao proposto pela Organização das Nações Unidas (ONU), que é de 12 m<sup>2</sup>/hab. Entretanto, as autoras destacam que se os Parques Estaduais da Cantareira e da Serra Mar, localizados, respectivamente, nos extremos norte e sul do município, em áreas rurais e não em áreas urbanas, fossem excluídos da estatística, este índice cairia para 5,08 m<sup>2</sup>/hab., muito

inferior ao recomendado pela ONU. Na delimitação territorial oficial sobreposta à imagem-fração vegetação na Figura 5.16 é possível destacar que os distritos de Vila Andrade, Morumbi, Alto de Pinheiros, e parte dos distritos de Jardim Paulista, Pinheiros, Campo Belo e Santo Amaro, ocupados por população de mais alta renda, apresentam maior cobertura vegetal.

Os distritos que mais perderam cobertura vegetal correspondem aos que enfrentam maiores índices de exclusão social (SÃO PAULO, 2002). Para grande parcela da população não resta alternativa além do desmatamento para ocupação de encostas e vales inundáveis. Segundo Furlan (2004) os quatro distritos de maior privação social (Marsilac, Parelheiros, Jardim Ângela e Lajeado) são os que mais perderam cobertura vegetal e, portanto, estão submetidos a uma situação de redução da qualidade ambiental. Analisando a Figura 5.16 observa-se que no distrito de Jardim Ângela, por exemplo, ainda há significativa cobertura vegetal. No entanto, é preciso considerar que nem sempre o total de cobertura vegetal refere-se a espaços que a população pode usufruir para o lazer. Muitas das áreas destinadas pelos instrumentos de planejamento urbano voltados ao zoneamento para a construção de praças e jardins têm sido invadidas por ocupações irregulares. Diversas áreas verdes de lazer são inacessíveis por configurarem-se como áreas inóspitas (margens de córregos com depósito de lixo e esgoto a céu aberto, com presença de animais peçonhentos e/ou roedores, parques cercados em função da violência, áreas abandonadas), o que reduz ainda mais a quantidade de áreas verdes disponíveis para o lazer da população.

Conforme estudo realizado pela Prefeitura de São Paulo a partir de dados de sensoriamento remoto (FURLAN, 2004), São Paulo perdeu 5.357 hectares de sua cobertura vegetal somente na década de 1990. Para a autora, é importante pensar a cidade a partir de um urbanismo que priorize a qualidade ambiental. Cidades como São Paulo, que perderam boa parte da cobertura vegetal durante o processo de ocupação, poderiam requalificar seu ordenamento territorial incorporando os benefícios que a cobertura vegetal desempenha no

ambiente urbano. Outros investimentos necessários dizem respeito à coleta e ao trato com os resíduos sólidos e líquidos.

Furlan (2004) salienta a importância da existência de áreas verdes como canteiros de avenidas, árvores isoladas, terrenos baldios e jardins internos de residências para medir a densidade de vegetação. No entanto, estes espaços não possuem função social direta na vida urbana, e não refletem benefícios à população de áreas carentes de espaços livres para lazer e recreação. Isto não significa que o verde viário não seja essencial, pois desempenha papel importante na manutenção e na promoção da qualidade ambiental da cidade. Infelizmente, um dos fatores que dificulta a arborização viária são as múltiplas funções que foram atribuídas às calçadas e canteiros centrais.

As imagens-fração e imagem-erro obtidas para o Rio de Janeiro são representadas nas Figuras 5.17 e 5.18 em níveis de cinza. A Figura 5.19 apresenta uma composição colorida elaborada a partir da imagem-fração superfícies impermeáveis e solo associada à cor vermelha (R), imagem-fração vegetação à cor verde (G) e imagem-fração sombra à cor azul (B).

A imagem-fração vegetação destaca áreas florestadas tais como o Parque Nacional da Floresta da Tijuca, que abriga a maior floresta urbana do mundo, e o Parque Estadual da Pedra Branca. A representatividade desta fração é maior em bairros de ocupação recente e de alto padrão, a exemplo do Recreio dos Bandeirantes, se comparada à representatividade em diversos bairros da zona norte do Rio de Janeiro. Nesta zona, as áreas verdes, inclusive praças, são praticamente inexistentes. Isto reflete sobre outros indicadores ambientais. Desde a década de 1970, Gallego (1972) aponta para a necessidade da criação de áreas verdes para amenizar elevadas temperaturas nas áreas industriais e a poluição do ar, em bairros como os que se situam ao longo da Avenida Brasil.

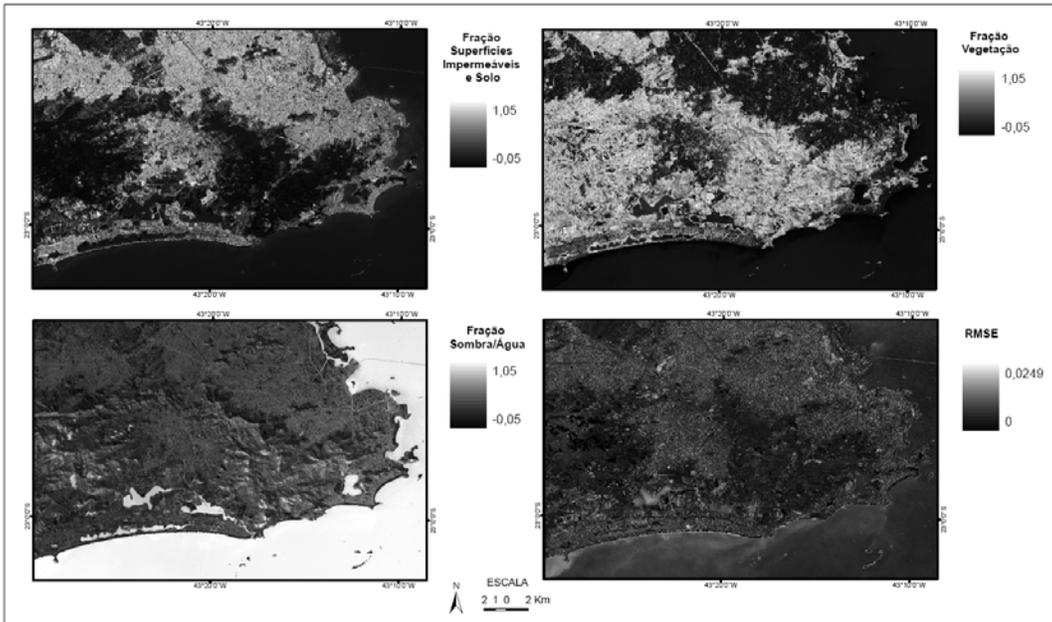


Figura 5.17 – Imagens-fração da área de estudo do Rio de Janeiro para 25/04/2003.

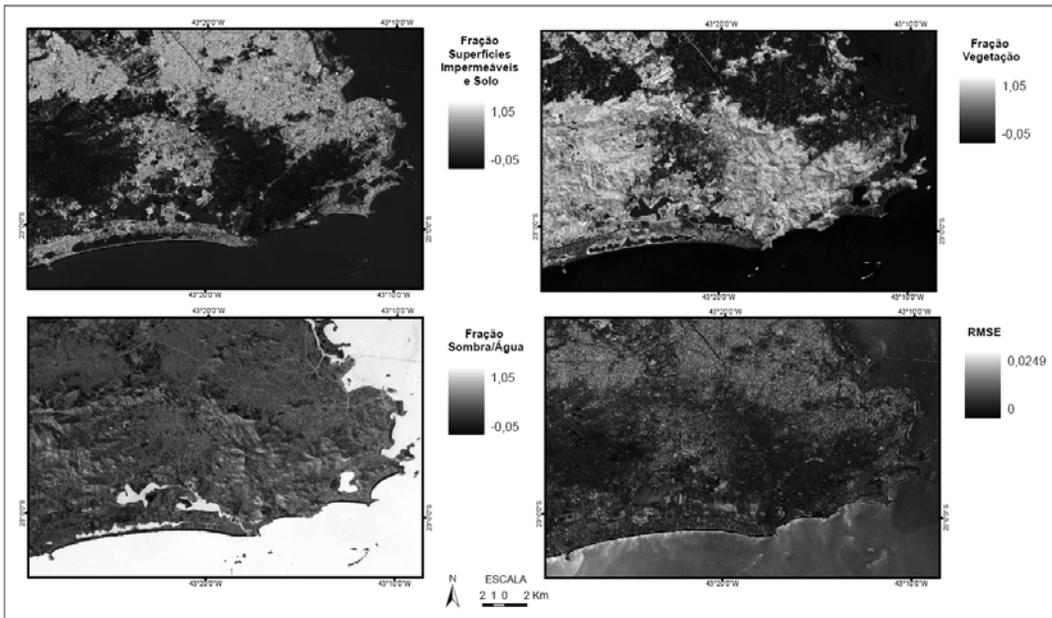


Figura 5.18 – Imagens-fração da área de estudo do Rio de Janeiro para 02/09/2004.

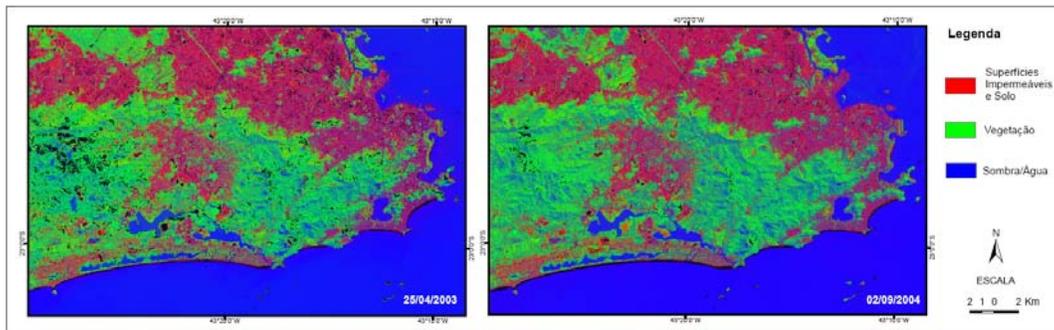


Figura 5.19 – Composição colorida das imagens-fração (Rio de Janeiro).

A imagem-fração superfícies impermeáveis e solo apresenta uma situação praticamente inversa à fração vegetação. Uma diferença notável entre ambas é que as frações registradas para as áreas de água próximas à costa, embora muito baixas, foram maiores para a fração de superfícies impermeáveis, o que provavelmente se deve ao material em suspensão presente na água. A imagem-fração sombra modelou adequadamente as áreas de águas interiores e oceânicas, para ambas as datas, o que pode ser confirmado pela análise da Figura 5.20.

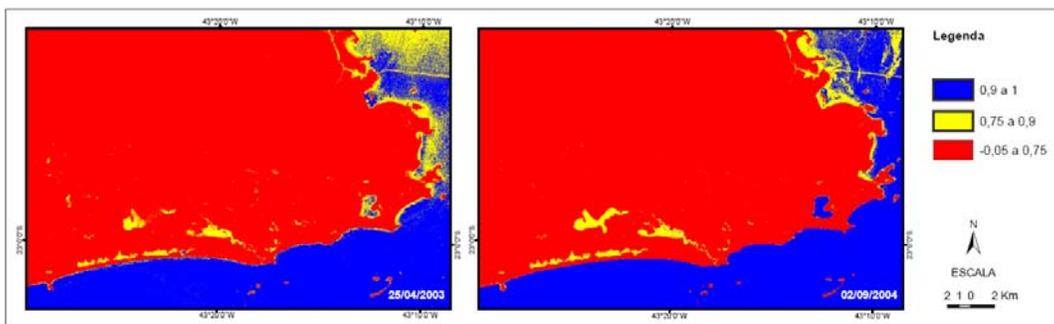


Figura 5.20 – Frações observadas para a componente sombra/água.

Os pixels não modelados pelo MESMA foram os pixels muito brilhantes em áreas de cobertura vegetal, com valores em média acima de 50% de reflectância na banda 3, correspondente ao infravermelho próximo, assim como pixels correspondentes à areia das praias costeiras e da zona de arrebentação, no caso do Rio de Janeiro. Na imagem de 02/09/2004, tampouco foram modelados alguns pixels que representam afloramentos rochosos, a exemplo

da Pedra Bonita, em São Conrado. Na imagem de 25/04/2003, a situação se repetiu, com maior intensidade para os pixels mais brilhantes de áreas com cobertura vegetal. Na tentativa de melhor modelar esta imagem (25/04/2003), foi empregado um número maior de componentes. Conseqüentemente, foi processado um número maior de modelos (Tabela 5.5). No entanto, esta imagem permaneceu com um percentual acima de 5% de pixels não modelados. O fato de os componentes utilizados terem sido selecionados através da técnica EAR pode ter contribuído para esses resultados.

A Tabela 5.6 apresenta os percentuais de pixels não modelados em cada imagem, assim como descreve os modelos que apresentaram melhor desempenho modelando um número maior de pixels da imagem<sup>27</sup>. Os maiores erros verificados, considerando a limitação imposta de 2,5 % de reflectância (0,025), e os pixels não modelados para cada imagem, são destacados na Figura 5.21.

Tabela 5.6 – Percentual não modelado por imagem e modelo(s) de melhor desempenho.

Imagem	% da imagem não modelada	Modelo(s) de melhor desempenho		
		Componente I+S	Componente V	% da imagem
13/10/2002 (SP)	1,07	Ginásio (Anhembi)	Mata (Pico do Jaraguá) seca	8,34
17/05/2006 (SP)	2,28	Cobertura (Terminal Capelinha)	Mata (M'Boi Mirim)	10,00
25/04/2003 (RJ)	6,31	Areia (Praia de Copacabana)	Mata (próximo ao PROJAC)	23,54
		Rocha (Grajaú)	Mata (próximo ao Jardim Botânico)	16,93
02/09/2004 (RJ)	2,68	Solo (Del Castilho)	Mata (próximo ao PROJAC)	15,01
		Ginásio (Maracanãzinho)	Gramma (estádio do Maracanã)	12,27

<sup>27</sup> Para as imagens de São Paulo, foram subtraídos do total de pixels não modelados, aqueles correspondentes aos valores nulos nas laterais da imagem (de formato diagonal).

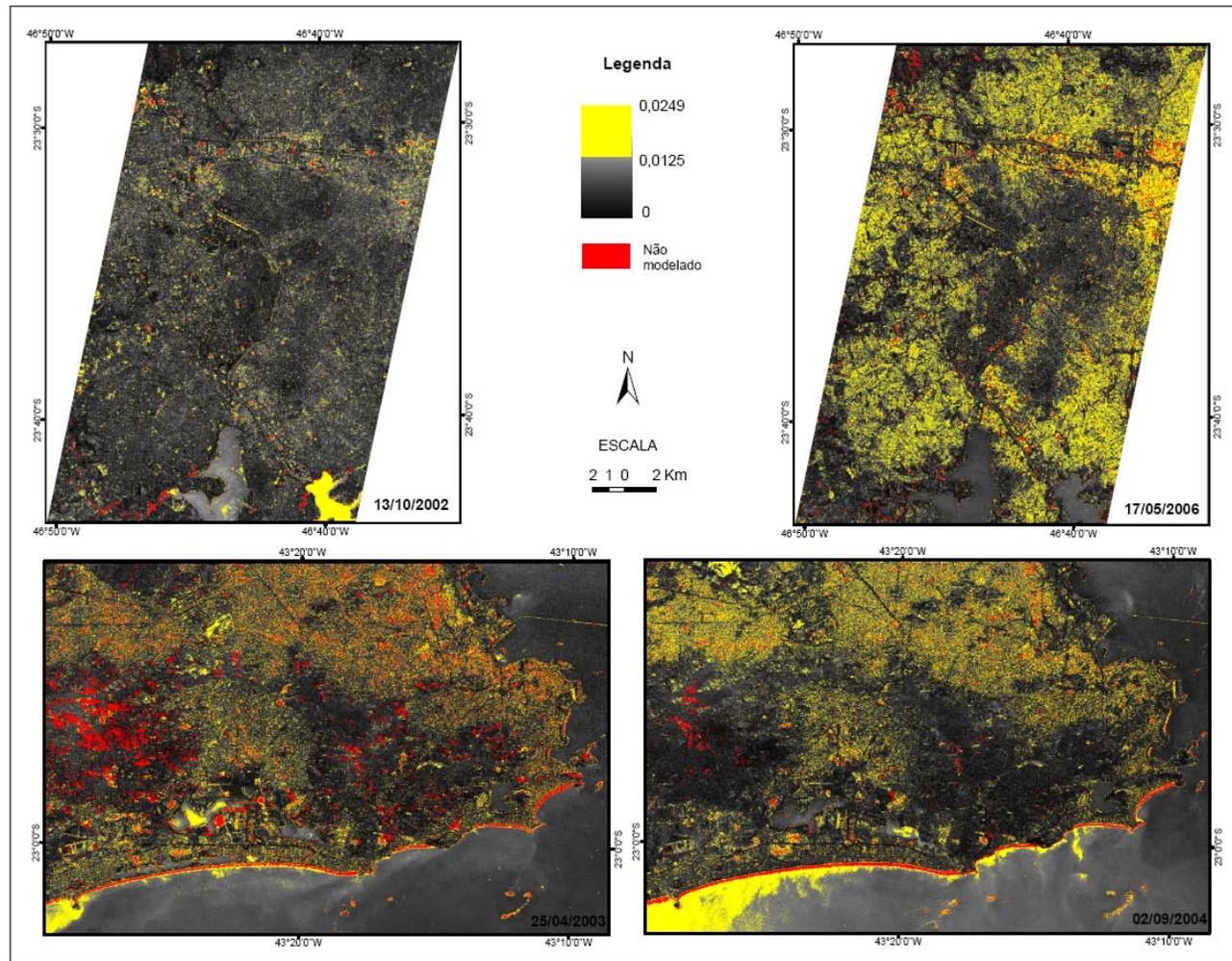


Figura 5.21 – Maiores erros e pixels não modelados por imagem.

De maneira geral, verificou-se que os valores de reflectância na banda do infravermelho próximo foram superiores para a imagem de abril de 2003 (em alguns casos de até 10%), se comparados aos valores encontrados na imagem de setembro de 2004 (Figura 5.22). Embora os efeitos da correção atmosférica sobre os dados não tenham sido adequadamente analisados, ressalta-se que tais diferenças, que dificultaram a aplicação do MESMA, podem estar associadas ao maior vigor da cobertura vegetal na imagem de 2003, adquirida no início do outono, enquanto a imagem de 2004 foi adquirida no final do inverno, após o período mais frio e mais seco conforme o clima da região. Pela análise da Figura 5.22 pode-se observar nas superfícies impermeáveis, por exemplo, que essa diferença não diz respeito unicamente à escala de valores, pois os valores de reflectância na banda 2 (vermelho) para esses alvos se assemelham em ambas as datas.

De modo semelhante ao que foi verificado para a área de estudo no Rio de Janeiro, para São Paulo os pixels não modelados foram principalmente aqueles muito brilhantes referentes à cobertura vegetal. Os demais pixels não modelados representam pixels muito brilhantes de áreas cobertas por vegetação de várzea nas proximidades das represas de Guarapiranga e Billings, e diferentes tipos de materiais de respostas espectrais muito distintas correspondentes à cobertura de edificações industriais, galpões e outros edifícios.

#### **5.4 Conclusões**

Após a realização dos testes visando ao ajuste de parâmetros, o modelo MESMA foi aplicado com sucesso, utilizando-se o aplicativo *VIPER Tools*. O MESMA apresentou bons resultados, pois permitiu detectar a diversidade de materiais pertencentes a uma mesma classe como, por exemplo, a de superfícies impermeáveis.

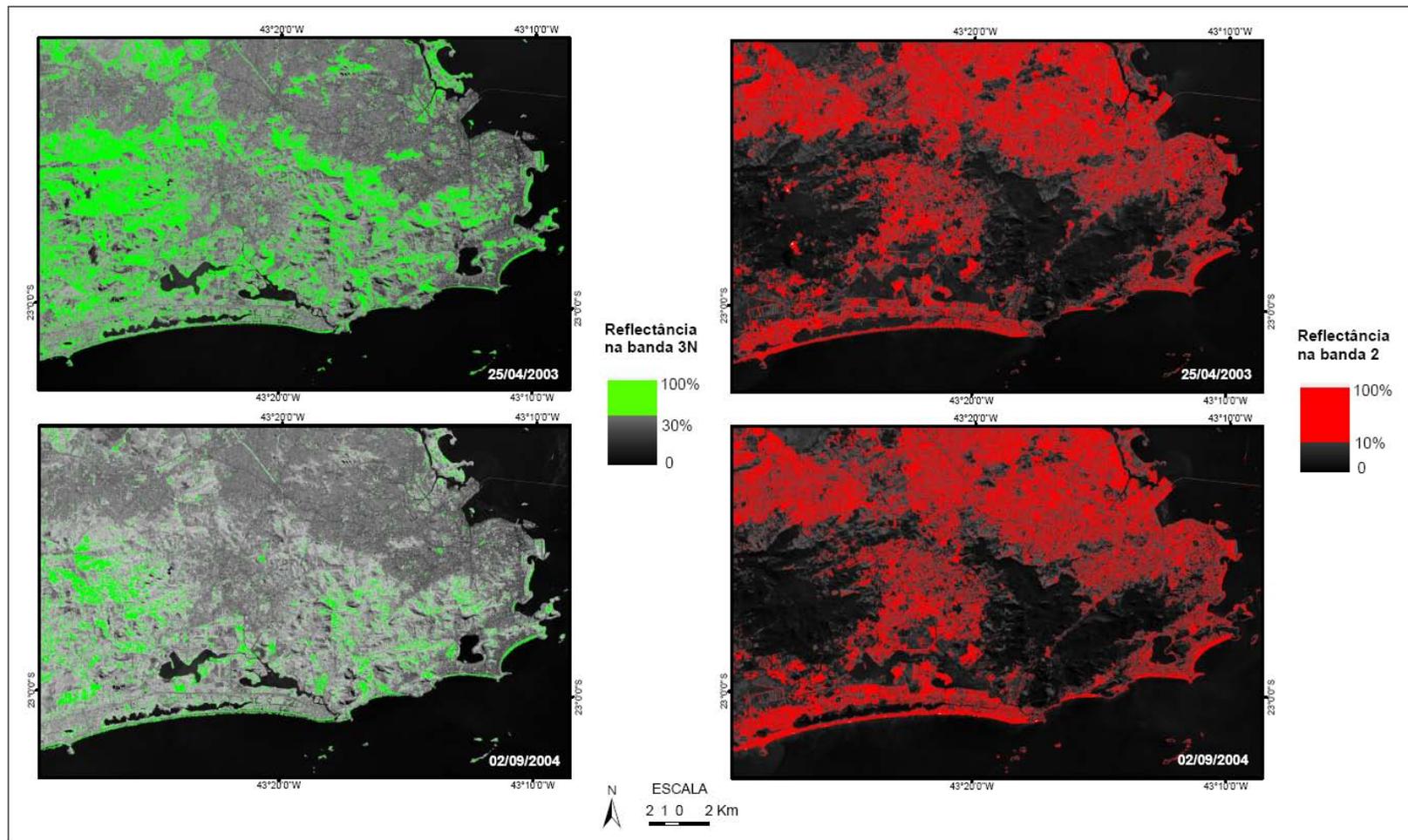


Figura 5.22 – Comparação entre a proporção de pixels de maior reflectância nas bandas 3N e 2 nas imagens de 25/04/2003 e 02/09/2004 do Rio de Janeiro.

O maior problema verificado na aplicação do MESMA foi a seleção dos componentes, com uma ponderada dosagem de espectros generalistas e especialistas. Quando se prioriza espectros especialistas em uma biblioteca espectral, há a tendência de a imagem ficar submapeada (alto percentual de pixels não modelados). Por outro lado, quando se utiliza mais os espectros generalistas ocorre o sobremapeamento dos alvos de interesse para a respectiva fração. Como o interesse, *a priori*, era modelar toda a imagem, foram selecionados como referência espectros generalistas que, entretanto, eram espectros de materiais específicos representativos das cenas.

Em geral, um pixel de uma imagem com resolução espacial de 30 m é mais misturado espectralmente se comparado a um pixel de uma imagem com a resolução espacial de 15 m. No entanto, um pixel de 15 m representa ao longo da cena espectros mais diferenciados, resultantes da interação entre um maior número de elementos que são perceptíveis e influenciam o sinal detectado na resolução espacial específica.

Conforme Roberts e Halligan (2006) o erro verificado é maior em áreas urbanas se comparado a outros ambientes, devido à forte heterogeneidade espectral inerente. Pixels de superfícies impermeáveis estão em geral misturados espectralmente intra-classe, aumentando a confusão (como, por exemplo, diferentes tipos de telhados). Por sua vez, cidades maiores e de construção mais antiga são compostas por materiais muito mais diferentes espectralmente, embora a combinação de materiais seja mais complexa em aglomerados recentes, com maior presença de solo.

Na validação dos resultados obtidos com o MESMA é imprescindível haver disponibilidade de dados de alta resolução espacial e ocorrência de trabalho de campo. A análise dos resultados foi efetuada exclusivamente a partir de interpretação visual. Para as áreas de estudo de São Paulo e do Rio de Janeiro, concluiu-se que a imagem-fração vegetação é quase o inverso da imagem-fração de superfícies impermeáveis e que as frações físicas mapeadas

sofrem influência da iluminação da cena. O ângulo de apontamento do sensor e a sazonalidade (período de aquisição da imagem) influenciam os resultados das frações físicas mapeadas, principalmente de sombra.

Embora diferentes testes tenham sido feitos com a aplicação do MESMA nesta pesquisa, seu potencial ainda não foi esgotado, tanto no que diz respeito à construção e/ou adequação de bibliotecas espectrais e seleção de componentes, que poderão ser efetuadas a partir de outras técnicas disponíveis, quanto na aplicação de opções de pós-processamento, tais como a normalização para os efeitos de sombra e a correção para os efeitos do terreno.



## **6 SENSORIAMENTO REMOTO E QUALIDADE DO AR**

### **6.1 Introdução**

As atividades econômicas provocam impactos no espaço urbano que comprometem a sua qualidade ambiental. À medida que a população, a industrialização, o número e o tráfego de veículos aumentam, o ar tende a se tornar mais poluído. Este fenômeno não é recente, sendo verificado desde a utilização do carvão vegetal para o aquecimento das residências, passando pelos usos do carvão mineral e dos derivados do petróleo. A modernização da indústria foi responsável pela diversificação dos poluentes que compõem o ar das cidades. Diversos episódios críticos já ocorreram em diferentes cidades do mundo e ocasionaram um elevado número de mortes.

Um poluente atmosférico é qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características acima dos níveis estabelecidos pelo poder público. Esse poluente pode ser nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança e às atividades normais da comunidade (CETESB, 2005).

Os poluentes presentes na atmosfera podem ser classificados em relação à sua origem em poluentes primários e poluentes secundários. Os poluentes primários são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão, e os poluentes secundários são aqueles formados através da reação química entre poluentes primários e/ou constituintes naturais da atmosfera (OKE, 1978). Como exemplo de poluente primário pode ser citado o material particulado, e de poluente secundário o ozônio, produzido fotoquimicamente pela radiação solar incidente sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis (CETESB, 2005). Os poluentes atmosféricos são provenientes de fontes estacionárias, móveis ou naturais.

Em virtude do comprometimento da qualidade do ar nas cidades, muitos países têm adotado normas para controle da poluição atmosférica e instalado redes para o seu monitoramento a partir de metodologias padronizadas. Uma das agências de maior representatividade internacional é a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA (*Environmental Protection Agency*). Apesar de atuar em um único Estado, o órgão de referência nacional no Brasil é a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB).

Os padrões nacionais de qualidade do ar foram definidos pela Resolução CONAMA nº 03, de 28/06/90, que estabelece o controle sobre sete parâmetros a serem medidos: ozônio (O<sub>3</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), partículas totais em suspensão (PTS) e partículas inaláveis (PI) (IBAMA, 1990). As partículas com tamanho superior a 10 µm geralmente permanecem suspensas na atmosfera por um período inferior a 24 horas, enquanto partículas menores que 1 µm podem permanecer suspensas por semanas (MATTHIAS, 1996). As principais características, fontes e efeitos dos principais poluentes presentes na atmosfera são apresentadas na Tabela 6.1.

Um dos avanços obtidos no controle da qualidade dos combustíveis e das emissões veiculares no Brasil ocorreu com o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), regulamentado pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) n.º 18, de 06/05/1986 (IBAMA, 1986). Entretanto, além dos vários fatores que contribuem para o aumento da poluição do ar no Brasil, como, por exemplo, a frota muito antiga de veículos, a fiscalização não é contínua.

Tabela 6.1 – Características, fontes e efeitos dos principais poluentes presentes na atmosfera.

Poluente	Características	Fontes principais	Efeitos gerais sobre a saúde	Efeitos gerais ao meio ambiente
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc. Faixa de tamanho <100 µm.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Quanto menor o tamanho da partícula, maior o efeito à saúde. Causam efeitos significativos em pessoas com doença pulmonar, asma e bronquite.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Partículas Inaláveis (MP <sub>10</sub> ) e Fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc. Faixa de tamanho < 10 µm.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Aumento de atendimentos hospitalares e mortes prematuras.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> )	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. Pode ser transformado a SO <sub>3</sub> , que na presença de vapor d'água, passa rapidamente a H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> . É importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, polpa e papel.	Desconforto na respiração, doenças respiratórias, agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares já existentes. Pessoas com asma ou portadoras de doenças cardíacas e pulmonares crônicas são mais sensíveis ao SO <sub>2</sub> .	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação: folhas e colheitas.
Dióxido de Nitrogênio (NO <sub>2</sub> )	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (que contribuem para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Aumento da sensibilidade à asma e à bronquite, diminuição da resistência às infecções respiratórias.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e colheitas.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta de veículos automotores.	Altos níveis estão associados a prejuízo dos reflexos, da capacidade de estimar intervalos de tempo, de aprendizagem, de trabalho e visual.	
Ozônio (O <sub>3</sub> )	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente à atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Irritação nos olhos e vias respiratórias, diminuição da capacidade pulmonar. Exposição a altas concentrações pode resultar em sensações de aperto no peito, tosse e chiado na respiração.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas e plantas ornamentais.

Fonte: CETESB (2005).

Estações de monitoramento da qualidade do ar que determinam as concentrações de poluentes por métodos de amostragem encontram-se instaladas em inúmeras aglomerações urbanas do mundo. No Brasil, há redes de estações automáticas nos Estados do Espírito Santo, Paraná, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e São Paulo. No Distrito Federal, há estações, porém não automáticas. Em Minas Gerais está sendo estudada a implantação de uma rede de monitoramento pelos órgãos públicos ligados ao meio ambiente. Segundo a Fundação Estadual de Engenharia de Meio Ambiente (FEEMA, 2004) a qualidade do ar no município do Rio de Janeiro é monitorada desde 1967, quando foram instaladas as primeiras estações manuais de amostragem da qualidade do ar pelo então Instituto de Engenharia Sanitária.

Desde 1981 a CETESB possui uma rede automática de monitoramento da qualidade do ar na RMSP e em Cubatão. Nos municípios de Campinas, Paulínia, São José dos Campos e Sorocaba, o monitoramento iniciou-se no ano 2000. A rede manual de monitoramento mede os teores de SO<sub>2</sub> e fumaça na RMSP desde 1973 e no interior desde 1986, além das partículas totais em suspensão na RMSP e em Cubatão desde 1983. O monitoramento sistemático de partículas inaláveis finas (PI<sub>2,5</sub>) na RMSP teve início em 1999. A rede de monitoramento inclui ainda estações de medição manual de PTS em Cordeirópolis e de PI em Limeira, Piracicaba, Ribeirão Preto e Santa Gertrudes, e estações automáticas móveis (CETESB, 2005).

Segundo a União Européia, a qualidade do ar representa o mais importante dentre treze indicadores de qualidade de vida (TULLOCH; LI, 2004). Estudos apontam que a poluição do ar em países como a Áustria, a França e a Suíça é provocada principalmente por emissões de veículos automotores e é responsável por 6% da mortalidade total, o que equivale a mais de quarenta mil mortes por ano (CIFUENTES et al., 2001). Na estação de inverno, por causa da forte inversão de temperatura, que limita a espessura da camada de mistura, os poluentes são concentrados nos níveis baixos da atmosfera, agravando a saúde das pessoas, principalmente de idosos e crianças com problemas respiratórios (OLIVEIRA et al., 2006). A Figura 6.1 apresenta os

resultados de uma pesquisa elaborada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) que mostra a distribuição espacial de mortes no mundo devido à poluição do ar urbana.

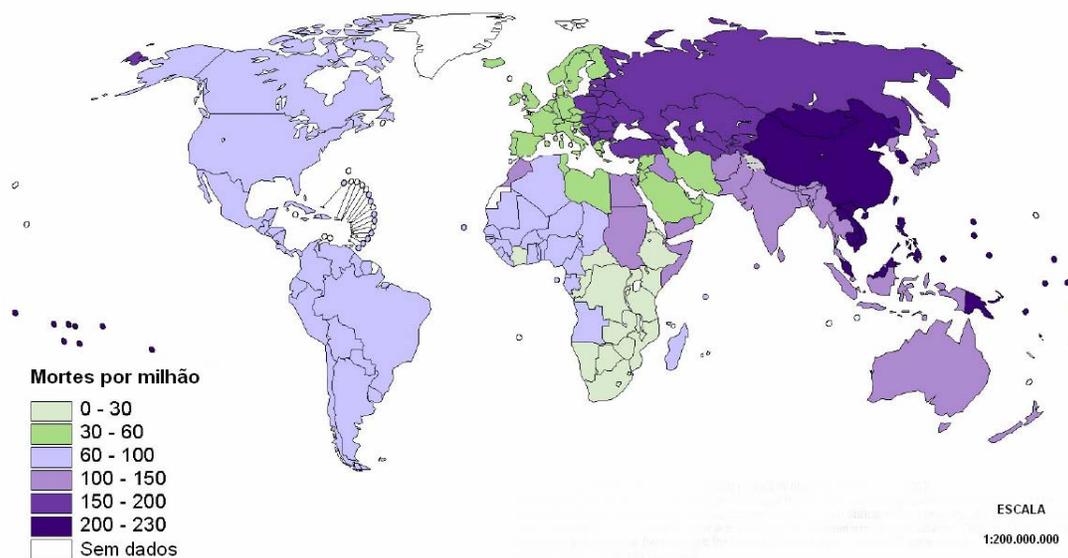


Figura 6.1 – Mortes por poluição do ar urbana no mundo (2000).

Fonte: WHO (2002).

Tanto a RMSP quanto a RMRJ sofrem com a poluição do ar devido principalmente ao intenso tráfego de veículos e atividades industriais, destacando-se, em São Paulo, a refinaria de petróleo localizada no município de Mauá (SP) e, no Rio de Janeiro, a refinaria em Duque de Caxias (RJ). A Operação Rodízio é uma das medidas criadas em São Paulo que pode minimizar a poluição do ar, embora seu principal objetivo seja reduzir o número de veículos em circulação e, conseqüentemente, os índices de congestionamento. A Figura 6.2 ilustra uma situação de atmosfera altamente poluída verificada na cidade de São Paulo.



Figura 6.2 – Poluição do ar na cidade de São Paulo em 23/08/2007 (16:00 h).

Os estudos da CETESB (2005) afirmam que a deterioração da qualidade do ar na RMSP é ocasionada por emissões atmosféricas de cerca de duas mil indústrias de alto potencial poluidor e por uma frota de aproximadamente 7,4 milhões de veículos, frota esta que representa um quinto do total nacional. De acordo com as estimativas de 2005, essas fontes de poluição são responsáveis pelas emissões dos seguintes poluentes para a atmosfera: 1,46 milhão de t/ano de monóxido de carbono (CO), 354 mil t/ano de hidrocarbonetos (HC), 317 mil t/ano de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), 28 mil t/ano de material particulado total (MP) e 12 mil t/ano de óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ). Desses totais, os veículos são responsáveis por 97% das emissões de CO, 97% de HC, 96%  $\text{NO}_x$ , 40% de MP e 42% de  $\text{SO}_x$ .

A migração para o transporte individual é um dos grandes agravantes da poluição do ar. A médio prazo faz-se necessária uma política que priorize o transporte público. Estudos da FEEMA (2004a) indicaram que a Avenida Brasil, devido ao imenso fluxo de veículos, é responsável por 25 a 30% do total de poluentes do ar emitidos pelas vias de tráfego na RMRJ.

Embora o material particulado seja o componente mais visível da poluição do ar, ele é apenas uma parte do problema, pois, segundo Godish (1997), aproximadamente 90% das emissões antropogênicas para a atmosfera são gasosas. Em São Paulo, cerca de 80% do ozônio e 40% do material particulado advém da frota de veículos a diesel. Conforme Howitt (1987, citado por DANNI-OLIVEIRA, 1999) a emissão de material particulado nos veículos a diesel é aproximadamente cem vezes maior que nos demais combustíveis. Estes motores ocasionam também uma maior produção de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$ . Neste sentido, deve-se incentivar a produção e o uso de veículos movidos por energia com menor potencial poluidor, especialmente aqueles dos sistemas de transporte coletivo, bem como, investir na produção de óleo diesel de melhor qualidade.

## **6.2 Sensoriamento Remoto em Estudos de Qualidade do Ar**

Segundo Tulloch e Li (2004) os principais estudos que envolvem sensoriamento remoto e qualidade do ar podem ser agrupados da seguinte forma: medições da espessura dos aerossóis na atmosfera, análise visual das imagens orbitais, medições das partículas negras (material particulado) e análise das mudanças de uso e cobertura da terra. Para os autores, ainda não é possível efetuar um mapeamento detalhado da poluição do ar nas cidades devido à escassa rede de estações de monitoramento.

Os canais de menor comprimento de onda são mais susceptíveis à influência de aerossóis devido ao espalhamento atmosférico. O espalhamento da radiação solar pelo material particulado afeta a visibilidade (GODISH, 1997). Conforme ilustra a Figura 6.3, o aparecimento de uma camada de poluição tende a diminuir a transmitância da atmosfera (mais absorção e espalhamento) resultando em um decréscimo na incidência de radiação solar direta na superfície e, conseqüentemente, em uma menor emissão de radiação termal, o que contribui para a redução dos valores de temperatura aparente registrados pelos sensores orbitais. Por outro lado, a camada de poluição também absorve

e re-emite a radiação emitida, o que intensifica ainda mais esse processo (WALD; BALEYNAUD, 1999).

Poli et al. (1994) e Wald e Baleynaud (1999) obtiveram resultados satisfatórios na análise da correlação entre a temperatura aparente e a concentração de material particulado em suspensão (total diário). O coeficiente de correlação encontrado foi de -0,97 e -0,95, respectivamente. A correlação com monóxidos e dióxidos de nitrogênio foi mais baixa. Uma das justificativas apontadas foi a volatilidade desses gases, que são altamente reagentes e sofrem advecção facilmente, apresentando uma alta variabilidade espaço-temporal.



Figura 6.3 – Efeitos da poluição atmosférica sobre o balanço de radiação.

No Brasil, o trabalho de Saldanha e Alves (2005) foi um dos poucos que aplicaram o sensoriamento remoto no estudo da qualidade do ar. Os autores utilizaram imagens do satélite *Geostacionary Operational Environmental Satellite* (GOES) e modelagem numérica a fim de determinar dias favoráveis à dispersão de poluentes. Dados da estação de monitoramento da qualidade do ar localizada nas dependências de uma Usina Termelétrica foram considerados como dados de referência.

Em Geografia, a maioria dos trabalhos envolvendo dados de qualidade do ar são estudos multitemporais que utilizam dados de estações manuais ou automáticas, mas não dados de sensoriamento remoto. O problema da poluição atmosférica é analisado considerando sua distribuição espacial e associações com o sítio urbano, a densidade demográfica, as atividades econômicas implantadas, os eixos de transporte e os ritmos dos tipos de tempo (BRANDÃO, 1996; DANNI-OLIVEIRA, 1999; GALLEGO, 1972; OLIVEIRA et al., 2006; RUSSO, 2002; SERRA, 1988). Diferentemente dessas abordagens, neste estudo foram correlacionados dados obtidos por estações de monitoramento com dados de sensoriamento remoto. O objetivo experimental foi verificar a influência do material particulado presente na atmosfera sobre os dados registrados pelas imagens.

### 6.3 Material e Métodos

Para a análise da relação entre dados adquiridos por sensoriamento remoto e a concentração de material particulado foram utilizadas as imagens do sensor ASTER especificadas na Tabela 6.2. Foram utilizados os programas *ENVI 4.2* para o processamento das imagens, os programas *Microsoft Excel 2003* e *Statistica 6.0* para a análise estatística multivariada, e o programa *GPS Track Maker* para a manipulação dos dados adquiridos em trabalho de campo. A síntese dos procedimentos empregados é apresentada na Figura 6.4.

Tabela 6.2 – Especificações das imagens ASTER.

Satélite (Sensor)	Resolução Espacial	Bandas	Datas de aquisição	Dia da semana
Terra (ASTER)	15 m (VNIR) 30 m (SWIR)	1, 2, 3 (VNIR) 4, 5, 6, 7, 8 e 9 (SWIR) 10, 11, 12, 13 e 14 (TIR)	13/10/2002 (SP) 25/04/2003 (RJ) 02/09/2004 (RJ) 17/05/2006 (SP)	Domingo Sexta Quinta Quarta

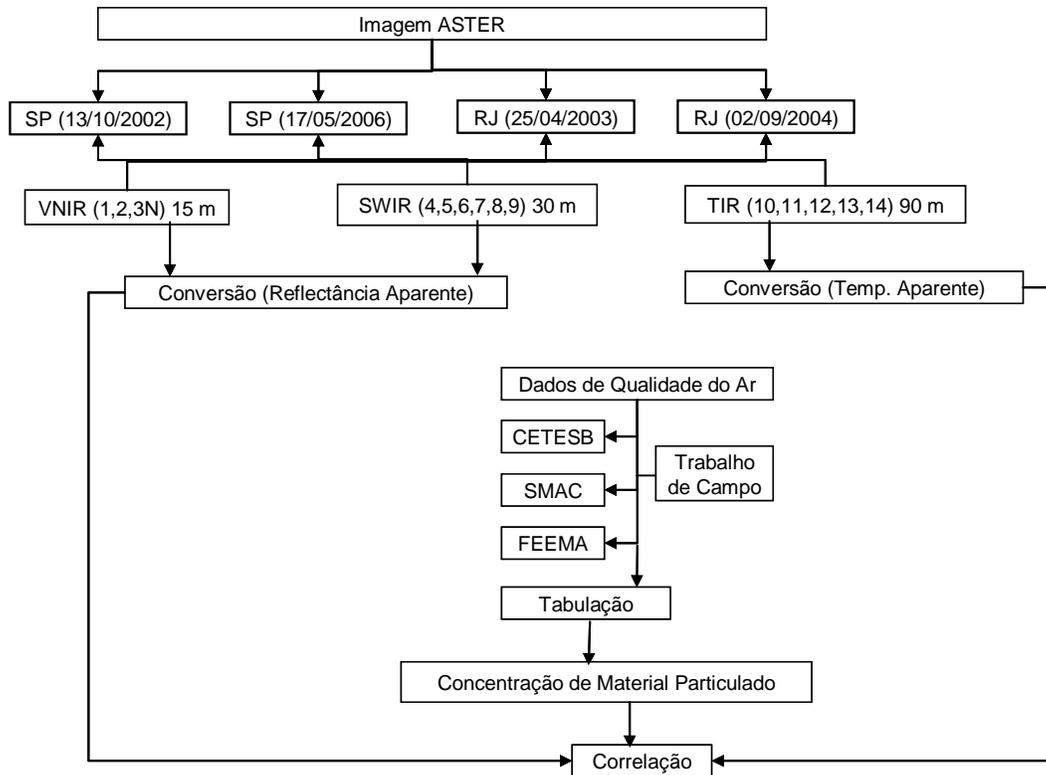


Figura 6.4 – Fluxograma metodológico.

As imagens ASTER foram transformadas de radiância espectral para reflectância aparente utilizando valores de irradiância solar espectral no topo da atmosfera, sem aplicação de correção atmosférica. A reflectância aparente ou no topo da atmosfera pode ser calculada usando a Equação 6.1 (WOOSTER, 1996):

$$R_{TDA} = \frac{\pi \times L_{rad} \times d^2}{E_{sun_i} \times \cos(z)} \quad (6.1)$$

em que:  $R_{TDA}$  é a reflectância no topo da atmosfera;

$L_{rad}$  é a radiância espectral da banda do sensor;

$E_{sun_i}$  é a irradiância solar média no topo da atmosfera da  $i$ -ésima banda espectral;

$z$  é o ângulo solar zenital<sup>28</sup>; e

$d$  é a distância entre o Sol e a Terra, medida em unidades astronômicas.

<sup>28</sup> O ângulo solar zenital é igual a 90 subtraído do ângulo de elevação solar informado no arquivo descritor das imagens.

A distância entre o Sol e a Terra é calculada a partir da Equação 6.2 (EVA; LAMBIN, 1998):

$$d = (1 - 0,01672 \times \cos(\text{RADIANOS}(0,9856 \times (\text{Dia Juliano}^{29} - 4)))) \quad (6.2)$$

Para a aplicação dessa transformação são necessários valores de  $ESUN_i$ . Esses valores podem ser encontrados com facilidade para as bandas Landsat através do respectivo guia de usuários (WILLIAMS, 2004). A documentação para os usuários ASTER não contempla esta informação; contudo ela pode ser encontrada em Smith (2006). Este autor calculou os valores de  $ESUN_i$  através de convolução da função de resposta espectral das bandas ASTER com a função de irradiância solar espectral no topo da atmosfera (considerando o intervalo de 1 nm). Os valores calculados para as bandas ASTER e utilizados na conversão de radiância espectral para reflectância aparente de cada banda do VNIR e SWIR das imagens ASTER encontram-se na Tabela 6.3. Os valores da distância entre o Sol e a Terra ( $d$ ) calculados para cada data são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.3 – Irradiância solar espectral no topo da atmosfera para as bandas ASTER.

<b>Banda ASTER</b>	<b><math>ESUN(W.m^{-2}.\mu m^{-1})</math></b>
1	1845,99
2	1555,74
3N	1119,47
4	231,25
5	79,81
6	74,99
7	68,66
8	59,74
9	56,92

Fonte: Smith (2006).

---

<sup>29</sup> O Dia Juliano é o número correspondente ao dia do ano em ordem cronológica. Varia de 0 a 365 ou 366.

Tabela 6.4 – Distância entre o Sol e a Terra.

<b>Dia</b>	<b><i>d</i></b>
25/04	1,00555
17/05	1,01099
02/09	1,00898
13/10	0,99769

Observa-se que os valores de *d* são menores quanto mais próximo o dia se encontra do periélio, e maiores quanto mais próximo o dia se encontra do afélio. Estes valores, embora consideravelmente semelhantes, devem ser calculados e empregados com distinção, pois respeitam a elipticidade do movimento de translação terrestre.

As imagens termais foram convertidas de emitância para temperatura aparente por meio da Equação 6.3, definida com base na Lei de Planck, que descreve a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo-negro (SLATER, 1980; IQBAL, 1983):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \times \ln \left[ 1 + \frac{c_1}{\lambda^5} \times \pi \times L_\lambda \right]} \quad (6.3)$$

em que:  $c_1$  corresponde a  $3,7427 \times 10^8 \text{ W.m}^{-2}.\mu\text{m}^4$ ;

$c_2$  corresponde a  $1,4388 \times 10^4 \mu\text{m.K}$ ;

$\lambda$  é o comprimento de onda em  $\mu\text{m}$ ;

$T$  é a temperatura aparente em Kelvin.

Os dados de qualidade do ar foram fornecidos pela CETESB, FEEMA e Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro (SMAC). Como as imagens de satélite adquiridas no período matutino, por volta de 10:00 (Landsat) ou 10:30 h (Terra), não contêm informação sobre a concentração diária de poluentes, somente foram utilizados dados coletados pelas estações automáticas, que efetuam medidas a cada hora (CETESB e FEEMA) ou a cada 15 minutos (SMAC). No período vespertino, a concentração de poluentes é maior; no entanto, a passagem dos satélites não ocorre nesse período. Dados

de estações manuais não foram utilizados porque as medidas são efetuadas somente a cada seis dias, e representam a concentração em um período de 24 horas, das 00:00 às 23:59 h. Esta frequência de amostragem, embora não regulamentada na legislação ambiental brasileira, segue os procedimentos recomendados pela EPA, que podem ser encontrados em Dias e Frondizi (2006).

Os parâmetros de qualidade do ar medidos na RMSP e na RMRJ são: partículas inaláveis (PI<sub>10</sub> ou MP<sub>10</sub> e PI<sub>2,5</sub> ou MP<sub>2,5</sub><sup>30</sup>), partículas totais em suspensão (PTS<sup>31</sup>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), metano (CH<sub>4</sub>), hidrocarbonetos (HC), hidrocarbonetos menos metano (HCMM), ozônio (O<sub>3</sub>), fumaça (FMC) e dados meteorológicos (MET): temperatura (T), umidade relativa do ar (URA), pressão atmosférica (PA) velocidade (VV) e direção do vento (DV) (CETESB, 2005; FEEMA, 2004b; SMAC, 2006). Estes poluentes constituem, na maioria dos casos, elementos nocivos à saúde pública, podendo contribuir para o aparecimento de doenças como as do trato respiratório.

A rede automática da CETESB é composta por 29 estações fixas de amostragem na RMSP (23 estações), Cubatão (duas estações), Campinas (uma estação), Paulínia (uma estação), São José dos Campos (uma estação) e Sorocaba (uma estação), e três estações móveis. As estações móveis são deslocadas para locais onde não existem estações de amostragem ou para estudos complementares à própria rede. Das 23 estações automáticas da RMSP, 14 estão instaladas no município de São Paulo, duas em Santo André, e uma estação em Diadema, Guarulhos, Mauá, Osasco, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul e Taboão da Serra (CETESB, 2005). A Tabela 6.5 apresenta os parâmetros monitorados por cada estação da RMSP.

---

<sup>30</sup> Os valores “<sub>10</sub>” e “<sub>2,5</sub>” correspondem ao diâmetro médio da partícula em  $\mu\text{m}$  [ $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m}$ ].

<sup>31</sup> Partículas menores que  $100 \mu\text{m}$ .

Tabela 6.5 – Parâmetros monitorados na RMSP por estações automáticas (cinza escuro) e manuais (cinza claro).

Estação	Parâmetros												
	PI <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	HC	O <sub>3</sub>	MP <sub>2,5</sub>	FMC	PTS	MET
Parque Dom Pedro II <sup>1,2</sup>													
Santana <sup>1</sup>													
Mooca <sup>1</sup>													
Cambuci <sup>1</sup>													
Ibirapuera <sup>1,2</sup>													
Nossa Senhora do Ó <sup>1</sup>									**				**
São Caetano do Sul <sup>1,2</sup>													
Congonhas <sup>1</sup>													
Lapa <sup>1</sup>													
Cerqueira César <sup>1,2</sup>													
Penha <sup>1</sup>													
Centro <sup>1</sup>													
Guarulhos <sup>1</sup>													
Santo André – Centro <sup>1</sup>													
Diadema <sup>1</sup>													
Santo Amaro <sup>1,2</sup>													
Osasco <sup>1,2</sup>													
Santo André – Capuava <sup>1,2</sup>													
São Bernardo do Campo <sup>1,2</sup>													
Taboão da Serra <sup>1</sup>					**	**							
São Miguel Paulista <sup>1</sup>													
Mauá <sup>1</sup>													
Pinheiros <sup>1,2</sup>													
Aclimação <sup>2</sup>		*											
Campos Elíseos <sup>2</sup>		*											
Moema <sup>2</sup>		*											
Mogi das Cruzes <sup>2</sup>		*											
Praça da República <sup>2</sup>		*											
Tatuapé <sup>2</sup>		*											

<sup>1</sup> Estações da rede automática.

<sup>2</sup> Estações da rede manual.

\* Operação a partir de 2003.

\*\* Operação a partir de 2004.

Fonte: CETESB (2005).

Na RMRJ encontram-se oito estações automáticas fixas, seis localizadas no município do Rio de Janeiro, uma em Nova Iguaçu e outra em São Gonçalo, e uma estação móvel (FEEMA, 2004b; SMAC, 2006). Os parâmetros

monitorados e a localização das estações na RMRJ são apresentados na Tabela 6.6. A localização das estações de monitoramento da qualidade do ar na RMSP e na RMRJ é apresentada na Figura 6.5.

Tabela 6.6 – Parâmetros monitorados na RMRJ por estações automáticas (cinza escuro) e manuais (cinza claro).

Estação	Parâmetros							
	SO <sub>2</sub>	PTS	PM <sub>10</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	HCM	CO	MET
Barra da Tijuca <sup>1*</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Belford Roxo <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Benfica <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Bonsucesso <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Botafogo <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Cascadura/Engenho da Rainha <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Centro <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Centro <sup>1</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Centro <sup>1</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Coelho Neto <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Copacabana <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Copacabana <sup>1</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Duque de Caxias <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Itaguaí <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Jacarepaguá <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Jacarepaguá <sup>1</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Lagoa <sup>1**</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Maracanã <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Nilópolis <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Niterói <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Nova Iguaçu <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Nova Iguaçu <sup>1</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Praça Saens Peña <sup>1</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Realengo <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Santa Tereza <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
São Cristóvão <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
São Cristóvão <sup>1</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
São Gonçalo <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
São Gonçalo <sup>1</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
São João de Meriti <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Sumaré <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■
Tijuca <sup>2</sup>	■	■	■	■	■	■	■	■

<sup>1</sup> Estações da rede automática.

<sup>2</sup> Estações da rede manual.

\* Estação móvel da SMAC em operação desde junho de 2004.

\*\* Estação móvel da FEEMA em operação na Lagoa de 16/07/2004 a 06/06/2005.

Fonte: FEEMA (2004b); SMAC (2006).

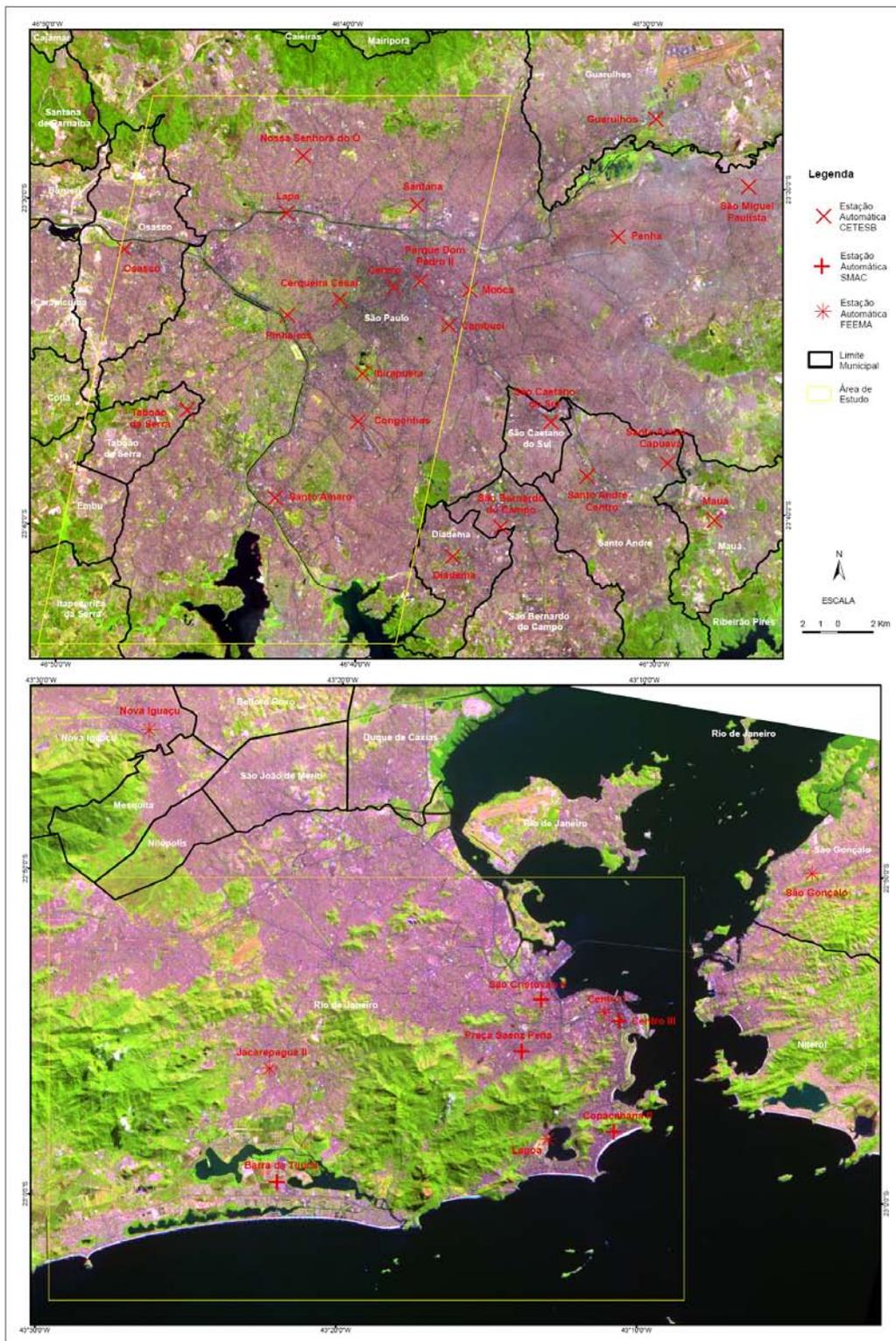


Figura 6.5 – Localização das estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar nas Regiões Metropolitanas de São Paulo (superior) e do Rio de Janeiro (inferior).

O número de estações de monitoramento é insuficiente devido a fatores como o alto custo de implantação e manutenção destas estações, além de problemas como o constante furto de equipamentos. Ung et al. (2001) afirmam que na Europa o número de estações também é escasso. Dado tal problema, um estudo com exatidão da concentração e distribuição espacial dos poluentes em áreas urbanas é praticamente impossível.

Os dados são registrados em boletins diários para divulgação das condições de qualidade do ar. Os valores medidos são agrupados em classes que representam os seguintes índices: boa, regular, inadequada, má, péssima e crítica, de acordo com a concentração dos poluentes. Esses índices da rede de amostragem da CETESB, FEEMA e SMAC contemplam os parâmetros utilizados como indicadores para a qualidade do ar estabelecidos pelo CONAMA e seguem o padrão internacional.

Foram visitadas todas as 23 estações automáticas de monitoramento fixas localizadas na RMSP durante o trabalho de campo. Na RMRJ foram visitadas somente as estações automáticas fixas e móveis localizadas no município do Rio de Janeiro, em um total de oito: três mantidas pelo Estado através da FEEMA, e cinco pela prefeitura, através da SMAC. O trabalho de campo foi efetuado nos meses de abril, julho, agosto e setembro de 2006 e permitiu o reconhecimento dos equipamentos utilizados para a medição dos parâmetros de qualidade do ar, da localização e observação da cobertura e do uso da terra na região de entorno das estações de monitoramento, visita aos escritórios das agências oficiais responsáveis pelo monitoramento, obtenção de fotografias e coleta de coordenadas geográficas<sup>32</sup>. Para a coleta das coordenadas de localização das estações foi utilizado um GPS modelo *Garmin III*. A Figura 6.6 apresenta alguns exemplos de equipamentos utilizados para o monitoramento da qualidade do ar nas estações da FEEMA e da CETESB.

---

<sup>32</sup> Ressaltamos que o tempo transcorrido desde o período de aquisição das imagens não invalida o presente estudo, cujo objetivo envolve a análise geográfica do fenômeno e não propriamente a avaliação do grau de poluição.



Vista externa da estação Pinheiros em São Paulo

Equipamentos da estação Pinheiros em operação (SP)

Quadro de status da rede da CETESB

Equipamentos da estação Centro I em operação (RJ)

Material particulado amostrado

Equipamentos de estação convencional da FEEMA

Figura 6.6 – Exemplos de equipamentos utilizados para o monitoramento da qualidade do ar.

Os dados de qualidade do ar registrados pelas estações da CETESB no ano de 2002 foram obtidos a partir de arquivos de texto disponibilizados em mídias digitais para a Biblioteca do INPE. Os dados relativos a 17/05/2006 foram recebidos após solicitação à Divisão de Tecnologia de Avaliação da Qualidade do Ar da Diretoria de Engenharia, Tecnologia e Qualidade Ambiental da CETESB. Os dados registrados pelas estações da FEEMA foram recebidos após solicitação à Divisão de Qualidade do Ar do Departamento de Planejamento Ambiental da FEEMA. Os dados registrados pelas estações da SMAC foram recebidos após solicitação encaminhada a este órgão. Os dados de interesse foram extraídos dos arquivos originais e organizados conforme as datas, horário, parâmetros e estações em planilhas eletrônicas. Foram preservados somente os dados registrados pelas estações automáticas no horário das 10:00 h (estações da SMAC e CETESB) ou 10:30 h da manhã (estações da FEEMA). A Tabela 6.7 apresenta os dados organizados para a área de estudo de São Paulo para a data de 13/10/2002, e a Tabela 6.8 para a data de 17/05/2006.

Tabela 6.7 – Parâmetros monitorados em 13/10/2002 (domingo) na RMSP (em itálico para as estações localizadas fora da área de estudo).

Estação		Parâmetro**									
N.º	Nome	URA (%)	T (°C)	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NOx (ppb)	NO (µg/m <sup>3</sup> )	CO (ppm)	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PA (mBar)	PI <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
1	Parque Dom Pedro II	-	26,1	14,6	55,3	38,6	11,4	-	96,2	-	44,6
2	Santana	-	-	-	-	-	-	-	99,5	-	-
3	Moóca	-	-	-	-	-	-	-	113	-	-
4	Cambuci	-	-	-	-	-	-	-	-	-	31,5
5	Ibirapuera	-	-	-	33,7	20,2	2,9	-	139,0	-	-
6	Nossa Senhora do Ó*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	<i>São Caetano do Sul</i>	-	27,0	-	50	32,7	7,6	-	128,7	-	47,6
8	Congonhas	-	-	13,6	70,1	47,2	12,1	-	-	-	61,3
9	Lapa	-	-	-	82,7	65,1	25,9	-	-	-	45,3
10	Cerqueira César	-	-	-	74,7	50,8	13,6	-	-	-	35,4
11	<i>Penha*</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	Centro	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71,2
13	<i>Guarulhos*</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	<i>Santo André - Centro</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	71,9
15	<i>Diadema</i>	-	-	-	-	-	-	-	91,2	-	-
16	Santo Amaro	-	-	-	-	-	-	0,8	81,6	-	41,4
17	Osasco	-	-	22,9	-	-	-	1,8	42,7	-	47,9
18	<i>Santo André - Capuava</i>	-	-	-	-	-	-	-	88,8	-	46,9
19	<i>São Bernardo do Campo</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	<i>Taboão da Serra*</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	<i>São Miguel Paulista</i>	-	24,4	-	-	-	-	-	105,8	-	114,4
22	<i>Mauá</i>	-	-	-	29,2	18,2	3,3	-	90,2	-	60,6
27	Pinheiros	-	-	-	-	-	-	1,1	99,1	-	6,7
50	Pico do Jaraguá***	-	-	-	-	-	-	-	124,1	-	-
-	IAG	51	25,4	-	-	-	-	-	-	926,6	-

\* Na ocasião as estações de Nossa Senhora do Ó e Penha apresentaram problemas com os monitores, a estação de Guarulhos não registrou dados no horário e a estação de Taboão da Serra encontrava-se desativada temporariamente.

\*\* Dados registrados às 10:00 h da manhã.

\*\*\* Estação móvel.

Tabela 6.8 – Parâmetros monitorados em 17/05/2006 (quarta-feira) na RMSP (em itálico para as estações localizadas fora da área de estudo).

Estação		Parâmetro**											
N.º	Nome	VV (m/s)	URA (%)	T (°C)	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NOx (ppb)	NO (µg/m <sup>3</sup> )	CO (ppm)	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PA (mBar)	DV (°)	PI <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
1	Parque Dom Pedro II	-	-	-	-	-	-	-	0,7	29,6	-	-	51,2
2	Santana	2,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73	8
3	Moóca	1,6	-	-	-	-	-	-	-	19,2	-	70	-
4	Cambuci	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42,2
5	Ibirapuera	2,1	72,8	18,8	9,1	-	-	-	-	-	935	80,4	12,9
6	Nossa Senhora do Ó	-	-	-	-	-	-	-	-	18,9	-	-	13,3
7	<i>São Caetano do Sul</i>	2,4	76,2	17,8	26,4	48,8	73,8	61,2	0,8	28,6	-	48	35,1
8	Congonhas	-	-	-	9,2	-	-	-	0,9	-	-	-	21,5
10	Cerqueira César	-	-	-	12,4	51,9	140	140,9	1,4	-	-	-	-
12	Centro	-	-	-	-	71,1	98,2	74,1	0,9	-	-	-	-
13	<i>Guarulhos*</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	<i>Santo André - Centro</i>	-	-	-	-	-	-	-	0,5	-	-	-	18,9
15	<i>Diadema</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	27,9	-	-	27,5
16	Santo Amaro	2,8	-	-	-	-	-	-	0,6	29,0	-	6	7,7
17	Osasco	3,3	-	-	11,2	-	-	-	1,9	-	-	90	61,9
18	<i>Santo André - Capuava</i>	3,3	-	-	-	-	-	-	-	23,3	-	49	24,2
19	<i>São Bernardo do Campo</i>	2,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64	28,7
20	Taboão da Serra	-	58,3	19,3	-	-	-	-	1,3	-	-	-	21,0
22	<i>Mauá</i>	-	-	-	-	22,5	20,9	11	-	18,5	-	-	17,2
27	Pinheiros	-	64,1	17,8	-	-	-	-	1,3	-	-	-	44,0
47	Horto Florestal***	-	-	-	-	8,8	9,0	5,3	-	33,7	-	-	-
-	IAG	-	69	18,5	-	-	-	-	-	-	932	-	-

\* Na ocasião as estações da Lapa e de São Miguel Paulista encontravam-se desativadas temporariamente e a estação de Guarulhos apresentou problemas com a energia elétrica.

\*\* Dados registrados às 10:00 h da manhã.

\*\*\* Estação móvel.

A Tabela 6.9 apresenta os dados obtidos junto à SMAC e FEEMA para a área de estudo no Rio de Janeiro da data de 25/04/2003, e a Tabela 6.10 da data de 02/09/2004. A organização desses dados demandou maior trabalho em virtude da adoção de diferentes unidades de medida pelos órgãos responsáveis (SMAC e FEEMA) para a divulgação dos parâmetros de qualidade do ar monitorados na RMRJ. Por essa razão, foi necessário transformar os dados em partículas por bilhão (PPB) ou partículas por milhão (PPM) para  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e/ou vice-versa, utilizando coeficientes fornecidos por técnicos da FEEMA.

Tabela 6.9 – Parâmetros monitorados em 25/04/2003 (sexta-feira) na RMRJ (em itálico para as estações localizadas fora da área de estudo).

Estação		Parâmetro*							
Nome	Órgão	CO (ppm)	SO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	PM <sub>10</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	T <sub>ambiente</sub> (°C)	URA (%)	O <sub>3</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO <sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	NO ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
São Cristóvão II	SMAC	0,34	30	235	33,0	56	-	-	-
Praça Saenz Peña	SMAC	0,61	35	85	-	65	-	-	-
Centro III	SMAC	0,94	21	72	32,0	55	-	-	-
Copacabana II	SMAC	0,20	36	78	34,8	52	-	-	-
Barra da Tijuca**	SMAC	-	-	-	-	-	-	-	-
Lagoa**	FEEMA	-	-	-	-	-	-	-	-
Centro I	FEEMA		37,6	62,1	-	-	9,6	84,5	180,3
Jacarepaguá	FEEMA		5,2	31	-	-	23,4	41,1	11
<i>Nova Iguaçu</i>	<i>FEEMA</i>		10,2	81	-	-	22,9	155,8	14,3
<i>São Gonçalo</i>	<i>FEEMA</i>	-	2,6	19	-	-	15,6	33,6	70,6

\* Os dados da SMAC foram registrados às 10:00 h e os dados da FEEMA às 10:30 h.

\*\* Na ocasião a estação móvel da SMAC encontrava-se desativada e a da FEEMA encontrava-se operante em outro município do Estado do Rio de Janeiro localizado na região do Vale do Paraíba.

Não foi possível detectar a validade do dado de concentração de material particulado registrado pela estação da SMAC em São Cristóvão em 25/04/2003 (235), pois seu valor foi muito superior aos demais. Conforme a FEEMA (2004b), durante todo o ano de 2003 não foi verificada concentração superior a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$  em qualquer uma de suas estações automáticas na RMRJ.

Tabela 6.10 – Parâmetros monitorados em 02/09/2004 (quinta-feira) na RMRJ (em itálico para as estações localizadas fora da área de estudo).

Estação		Parâmetro										
Nome	Órgão	CO (ppm)	SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	PI <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	VV (m/s)	T <sub>ambiente</sub> (°C)	URA (%)	O <sub>3</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	NO (µg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>x</sub> (ppb)	PA (mBar)
São Cristóvão II	SMAC	0,29	31	65	-	28,2	56	-	-	-	-	-
Praça Saenz Peña	SMAC	0,46	21	65	-	27,5	51	-	-	-	-	-
Centro III	SMAC	0,69	35	-	-	29,4	46	-	-	-	-	-
Copacabana II	SMAC	0,53	37	49	-	29,6	48	-	-	-	-	-
Barra da Tijuca**	SMAC	-	-	113	-	31,0	48	48,1	78	-	-	1017
Lagoa**	FEEMA	0,6	-	28	1	24,5	65	2,74	47,7	24,7	45,5	-
Centro I	FEEMA	1,34	87,8	43	-	-	-	6,7	102,2	295,9	-	-
Jacarepaguá	FEEMA	0,45	19,5	40,9	-	-	-	-	43,3	7,8	-	-
<i>Nova Iguaçu</i>	<i>FEEMA</i>	<i>0,25</i>	<i>11,5</i>	<i>46,2</i>	-	-	-	<i>60,5</i>	<i>42,9</i>	<i>40</i>	-	-
<i>São Gonçalo</i>	<i>FEEMA</i>	<i>0,64</i>	<i>16,6</i>	<i>44,4</i>	-	-	-	<i>31,6</i>	-	-	-	-

\* Os dados da SMAC foram registrados às 10:00 h e os dados da FEEMA às 10:30 h.

\*\* Estação móvel.

Para a análise da relação entre os poluentes e os dados das imagens foi calculada a correlação entre a concentração do poluente, medida pela estação, e o valor de temperatura aparente e de reflectância aparente registrado na imagem. A correlação foi analisada somente com a concentração de material particulado (PI<sub>10</sub>) porque os demais poluentes foram medidos em poucas estações, o que inviabiliza ainda mais a representatividade do estudo. Adotaram-se como variáveis dependentes os dados (na localização das estações<sup>33</sup>) de reflectância aparente do visível, infravermelho próximo e médio, bem como de temperatura aparente do infravermelho termal, e como variáveis explicativas os índices de concentração medidos pelas estações de

<sup>33</sup> Segundo os técnicos envolvidos com o monitoramento da qualidade do ar, os dados coletados pelas estações automáticas correspondem à representatividade média de uma área de raio considerável, variando entre 200 e 500 m, caso inexistam barreiras que impeçam a captação.

monitoramento. Também foi testada a correlação com a reflectância aparente reamostrada para a resolução espacial dos canais termais do ASTER (90 m).

A qualidade do ar está indissociavelmente ligada às condições meteorológicas e, por conseguinte, à sazonalidade. A concentração de CO, PI e SO<sub>2</sub> aumenta no inverno, quando as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão dos poluentes. Quanto ao ozônio, maiores concentrações são verificadas na primavera e verão, devido à maior intensidade da radiação solar. A interação entre as fontes de poluição e a atmosfera define o nível de qualidade do ar que, por sua vez, determina o surgimento de efeitos adversos da poluição do ar sobre os receptores (CETESB, 2005). Além disso, outros fatores como as características da estrutura física urbana são relevantes para explicar as concentrações verificadas em determinadas áreas. No Brasil, o exemplo mais clássico de poluição advinda de processos industriais, intensificada por atributos geocológicos, é o da cidade de Cubatão, localizada na Região Metropolitana da Baixada Santista, Estado de São Paulo.

Foram obtidos dados meteorológicos coletados por estações automáticas devido à necessidade de correspondência de horários com o imageamento<sup>34</sup>. O IAG/USP forneceu os dados meteorológicos registrados por sua estação em São Paulo nos meses de outubro de 2002 e maio de 2006<sup>35</sup>. No Rio de Janeiro, as universidades locais não dispõem de estações meteorológicas automáticas ou convencionais.

#### **6.4 Resultados e Discussão**

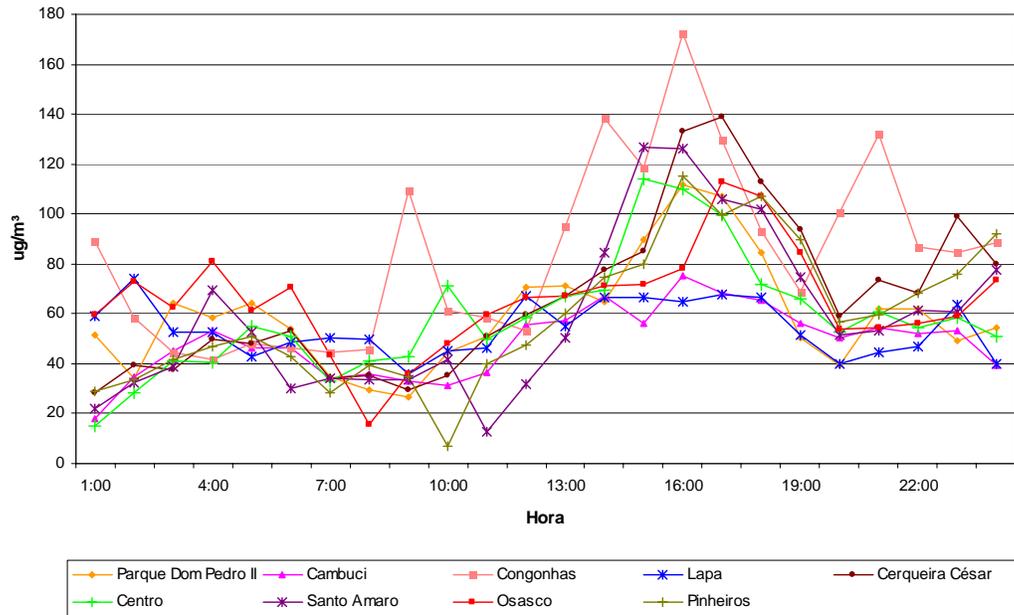
Os dados da concentração de material particulado registrados pelas estações de monitoramento localizadas na área de estudo de São Paulo nas datas de aquisição das imagens (24 horas) são apresentados na Figura 6.7.

---

<sup>34</sup> O INMET não possui estações meteorológicas automáticas nas áreas de estudo.

<sup>35</sup> Os dados meteorológicos disponibilizados pelo IAG/USP foram incluídos nas Tabelas 6.7 e 6.8.

**Concentração de Material Particulado (MP<sub>10</sub>) por Estação (13/10/2002)**



**Concentração de Material Particulado (MP<sub>10</sub>) por Estação (17/05/2006)**

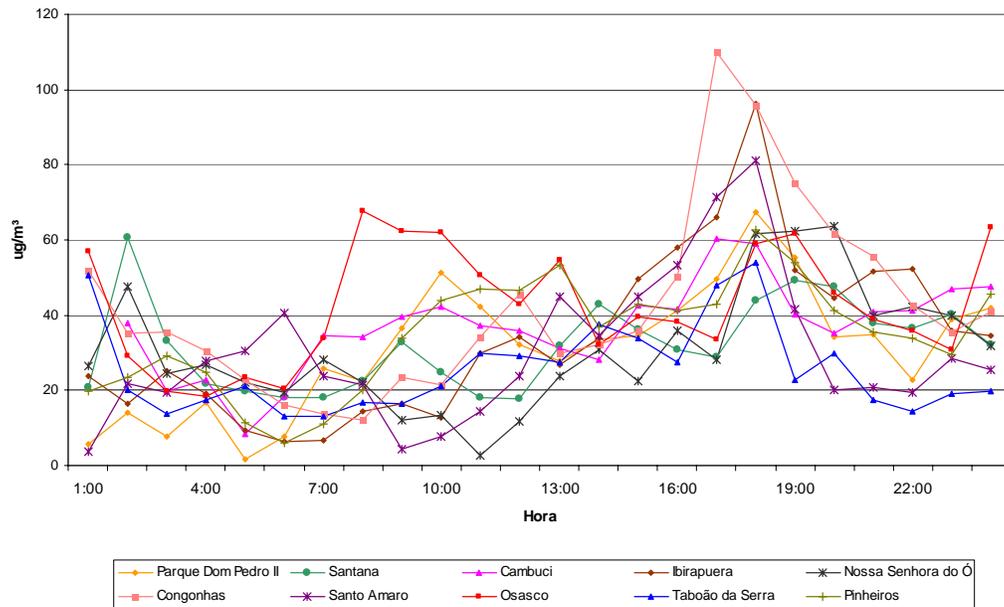


Figura 6.7 – Concentração de material particulado registrada pelas estações automáticas da área de estudo de São Paulo.

Na maioria das estações, as maiores concentrações de material particulado foram registradas no período vespertino. As concentrações mais baixas em

13/10/2002 foram registradas no período matutino, com exceção da estação de Congonhas. Esta data corresponde a um dia de domingo, o que justifica tal resultado. Os maiores valores em 17/05/2006 foram verificados na estação de Osasco (Figura 6.8), para o período matutino, e na estação de Congonhas, para o período vespertino. Em 13/10/2002 a estação de Congonhas registrou as maiores concentrações em ambos os períodos. As estações de Osasco e Congonhas localizam-se próximo a grandes vias de circulação, as Avenidas dos Autonomistas e dos Bandeirantes, respectivamente, cuja contribuição é significativa para os índices de poluição registrados. Os elevados índices da estação de Congonhas também são conseqüências das emissões provenientes do aeroporto de mesmo nome. Outra estação cercada por vias de trânsito intenso é aquela localizada no Parque Dom Pedro II (Figura 6.8).

Por estar cercada pela cobertura vegetal, a estação do Parque do Ibirapuera deveria registrar baixos índices de poluentes. No entanto, isso não ocorre, pois o Parque encontra-se totalmente envolvido por vias de trânsito intenso e está localizado em uma área com altitude ligeiramente inferior às áreas circundantes. Nos últimos anos, esta estação tem registrado um dos índices médios mais elevados de ozônio (CETESB, 2005).

De acordo com a CETESB (2005) o período de maio a agosto é o de maior agravamento da poluição atmosférica em São Paulo em função das condições meteorológicas, e o período outubro-abril é o mais favorável à dispersão de poluentes na atmosfera. Segundo registros da estação meteorológica do IAG/USP, localizada no Parque Estadual das Fontes do Ipiranga, extremo sudeste da área de estudo, nos quatro dias anteriores a 17/05/2006 não houve registro de precipitação. Na data de 13/10/2002, não ocorreu precipitação apenas nos dois dias anteriores. Também não foram registrados ventos fortes nos horários de aquisição das imagens, o que indica que o tempo em ambas as datas encontrava-se estável. Portanto, ambas as datas não se encontravam em situação crítica. Os boletins da CETESB (2002; 2006) elaborados para o horário das 15:00 h confirmam esta análise, pois apontam as condições meteorológicas verificadas como sendo favoráveis à dispersão dos poluentes.

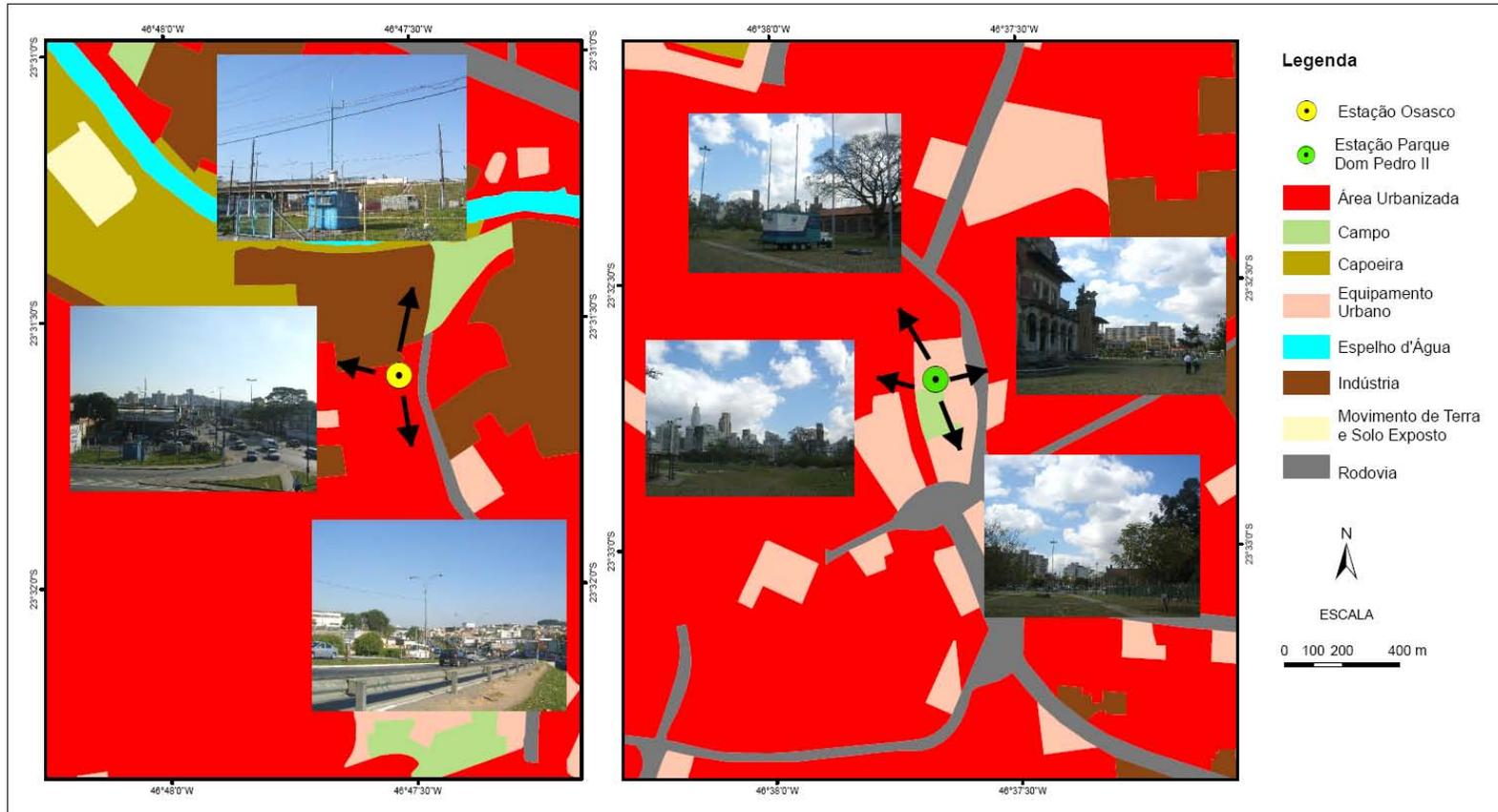


Figura 6.8 – Localização das estações de monitoramento de Osasco e Parque Dom Pedro II.

Fonte: Dados de uso do solo obtidos de EMLASA (2005).

Para as imagens do Rio de Janeiro a análise da concentração diária de material particulado é menos consistente, pois os valores registrados nas datas de aquisição destas imagens (Figura 6.9) foram fornecidos apenas pela FEEMA para duas estações em 25/04/2003 e três estações em 02/09/2004.

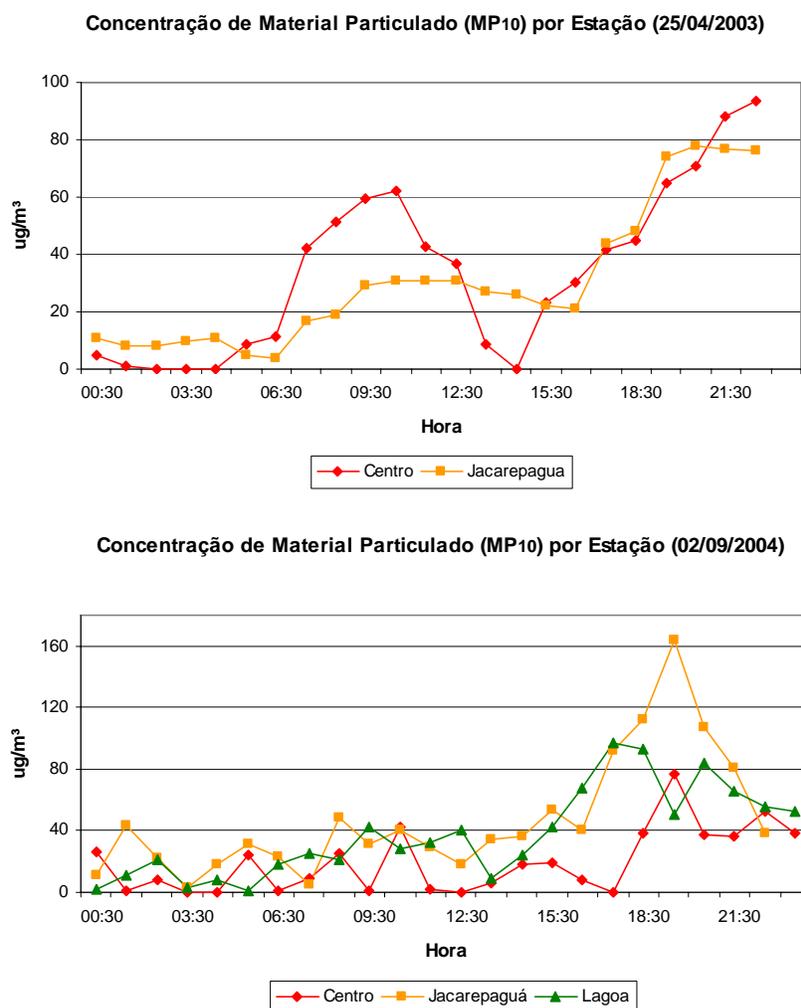


Figura 6.9 – Concentração de material particulado registrada pelas estações automáticas da área de estudo do Rio de Janeiro.

Conforme Gallego (1972) e FEEMA (2004a) na cidade do Rio de Janeiro o período de maior poluição corresponde aos meses de maio a setembro. Neste período, devido à atuação dos sistemas de alta pressão que dominam a região, ocorrem com frequência situações de estagnação atmosférica, que contribuem

para o agravamento da poluição. Além desses fatores, deve ser considerado ainda que a região está sujeita às características do clima tropical, com intensa radiação solar e elevadas temperaturas, favorecendo os processos fotoquímicos e outras reações na atmosfera, com geração de poluentes secundários tal como o ozônio. Quanto ao Rio de Janeiro, cabe destacar ainda que os maciços da Tijuca e da Pedra Branca, paralelos à orla marítima, atuam como barreira física à brisa marinha impedindo a ventilação de áreas situadas no interior, tal como a zona norte do município. Por outro lado, dependendo do horário, as brisas podem transportar poluentes em diversas direções (OLIVEIRA et al., 2006).

Tanto as imagens de São Paulo quanto as do Rio de Janeiro não foram adquiridas no período considerado crítico de poluição. Há datas em que os índices de poluição registrados são ainda maiores, o que reforça a gravidade deste problema nas metrópoles nacionais.

A Tabela 6.11 mostra que não existe alta correlação entre a concentração de material particulado registrada e a temperatura aparente, ou a correlação não é linear, pois não se verificou uma tendência definida. Também foi calculado o coeficiente de correlação com os dados das imagens termais brutas. No total, foram considerados dados de seis estações para a data de 25/04/2003, sete para 02/09/2004, nove para 13/10/2002, e dez para a data de 17/05/2006.

Nenhuma banda apresentou, em todos os casos, valores superiores em relação às demais. Nas imagens de temperatura aparente para São Paulo, foi observado que as maiores correlações ocorreram com a banda 10. Para as imagens do Rio de Janeiro, as maiores correlações foram encontradas com a banda 12. Diferentemente dos resultados de Poli et al. (1994) e Wald e Baleynaud (1999), as correlações encontradas foram baixas e apenas para uma das imagens (13/10/2002) foram verificadas correlações negativas. É importante lembrar que os autores citados utilizaram dados de concentração diária.

Tabela 6.11 – Correlação entre a concentração de material particulado e as imagens termais brutas e em temperatura aparente.

Imagem		Banda				
		10	11	12	13	14
13/10/2002 (SP)	Temperatura aparente	-0,2323	-0,2023	-0,1839	-0,2127	-0,2174
	Termal bruto	-0,2260	-0,1966	-0,1781	-0,2077	-0,2131
17/05/2006 (SP)	Temperatura aparente	0,2583	0,2296	0,1053	0,1798	0,2384
	Termal bruto	0,2504	0,2235	0,1019	0,1769	0,2338
25/04/2003 (RJ)	Temperatura aparente	0,3658	0,4096	0,3588	0,3724	0,2328
	Termal bruto	0,3688	0,4122	0,3608	0,3746	0,2336
02/09/2004 (RJ)	Temperatura aparente	0,4184	0,4279	0,4448	0,4124	0,3964
	Termal bruto	0,4212	0,4314	0,4414	0,4162	0,3998

A Tabela 6.12 apresenta os testes efetuados com as imagens de reflectância aparente na continuidade da pesquisa em busca de possíveis tendências. Esta tabela apresenta os coeficientes de correlação com dados das imagens de reflectância aparente e reflectância aparente reamostrada para a resolução de 90 m. Para a maioria dos casos, a reamostragem aumentou os índices de correlação, pois atua como um “filtro passa-baixa” na imagem, ao considerar um valor médio dos pixels e minimizar as altas frequências.

Tabela 6.12 – Correlação entre a concentração de material particulado e as imagens de reflectância aparente.

Imagem		Banda								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
13/10/2002 (SP)	Refl. Ap.	0,073	-0,057	-0,232	-0,241	-0,006	-0,083	-0,154	-0,090	-0,007
	Refl. Ap. (90 m)	-0,319	-0,255	-0,739	-0,580	-0,384	-0,394	-0,461	-0,412	-0,370
17/05/2006 (SP)	Refl. Ap.	-0,163	0,024	-0,098	0,015	0,124	0,136	0,081	0,099	0,148
	Refl. Ap. (90 m)	-0,285	-0,269	-0,402	-0,348	-0,207	-0,264	-0,249	-0,238	-0,183
25/04/2003 (RJ)	Refl. Ap.	0,225	0,214	0,400	0,589	0,385	0,392	0,488	0,418	0,137
	Refl. Ap. (90 m)	0,455	0,371	-0,230	0,442	0,524	0,378	0,341	0,324	0,221
02/09/2004 (RJ)	Refl. Ap.	-0,176	-0,098	0,502	0,604	0,470	0,593	0,437	0,436	0,471
	Refl. Ap. (90 m)	-0,145	-0,211	-0,093	0,459	0,381	0,490	0,396	0,484	0,364

Visando contribuir à análise dos resultados, as Figuras 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 são coletâneas de fotografias que representam os locais em que estão instaladas as estações de monitoramento da qualidade do ar na RMSP e no município do Rio de Janeiro. Há várias estações instaladas sob árvores frondosas, o que possivelmente influencia nos dados registrados, de acordo com a circulação do ar no local. Em muitos casos, as estações não são instaladas nos locais mais adequados por causa da necessidade de serem instaladas em locais públicos. É importante também citar que há conflitos de medição, pois um local adequado para medir material particulado pode não ser o mais adequado para medir ozônio. Na maioria dos casos é mais viável, prático e barato, que os diversos equipamentos que monitoram poluentes sejam instalados em uma mesma estação. Além disso, é importante que a instalação seja feita em locais onde haja vigilância, para se evitar problemas como furtos, verificados em São Paulo. A Figura 6.12 mostra a estação da CETESB de São Miguel Paulista que, mesmo estando localizada no interior de uma unidade escolar, foi arrombada para furto de equipamentos.

Para a inclusão de um número maior de observações na análise de correlação, Ung et al. (2001) e Weber et al. (2001) utilizaram o método das estações virtuais. As estações virtuais ou pseudo-estações corresponderiam aos pixels que apresentassem os mesmos números digitais (em todas as bandas) que os pixels nos quais estão localizadas as estações de monitoramento da qualidade do ar. Conseqüentemente, a concentração de poluentes para esses pixels poderia ser predita tomando como referência as concentrações registradas pelas estações reais. Caso fosse encontrada uma alta correlação com as estações reais, a inclusão das estações virtuais poderia facilitar o mapeamento da distribuição dos poluentes sobre a área de interesse através de interpolação. Preferiu-se não utilizar o método das estações virtuais, pois há muitas outras variáveis que influenciam a resposta espectral do pixel nas diferentes bandas, e não apenas a concentração de material particulado.



Figura 6.10 – Estações de monitoramento da qualidade do ar na área de estudo de São Paulo.



Figura 6.11 – Estações de monitoramento da qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo localizadas fora da área de estudo.



Figura 6.12 – Estação de São Miguel Paulista após furto que conduziu à sua desativação temporária.



Figura 6.13 – Estações de monitoramento da qualidade do ar no Rio de Janeiro.

## 6.5 Conclusões

O fato de não se encontrar qualquer tendência definida neste estudo – maiores coeficientes de correlação obtidos para a mesma banda ou maiores coeficientes obtidos utilizando a mesma imagem – pode estar relacionado ao reduzido número de estações e à diversidade de locais em que elas se encontram. Tanto na RMSF quanto no Rio de Janeiro foi observado que algumas estações encontram-se instaladas embaixo de árvores frondosas, o que influencia os dados registrados e o sinal detectado pelo sensor, tanto no visível quanto no termal. Além disso, conforme informações repassadas por técnicos que operam os sistemas de monitoramento, os dados coletados pelas

estações automáticas correspondem à representatividade média de uma área de raio considerável. A alta frequência das imagens de áreas urbanas, considerando a resolução dos canais ASTER e a grande diversidade de alvos nessas áreas, é outro fator influente. Ainda que fosse encontrado um índice de correlação elevado para um determinado momento, isto não significa que os índices permaneceriam elevados em outras situações (multitemporal), pois se trata de análises muito pontuais.

O uso de dados de sensoriamento remoto nos estudos de qualidade do ar é um campo de pesquisa ainda pouco explorado e dificultado pela escassez e má distribuição das estações de monitoramento, o que inviabiliza análises efetuadas de modo contínuo e ininterrupto. Por outro lado, os estudos nessa linha de pesquisa podem trazer uma grande contribuição, tendo em vista o elevado custo de implantação e manutenção dessas estações.

Dado o reduzido número de estações e as baixas correlações encontradas, não foi possível mapear a distribuição dos poluentes. Caso a correlação encontrada fosse alta, poderia ser testada a aplicação de uma equação de regressão sobre as imagens de temperatura. Em novos estudos, técnicas como a regressão logística poderão ser testadas visando encontrar um melhor ajuste para o modelo, assim como a análise de regressão considerando os pixels localizados dentro da área de influência do monitoramento (raio de captação).

Tanto em São Paulo quanto no Rio de Janeiro é necessária grande atenção do poder público para a questão da poluição atmosférica. Para tanto, é importante definir os locais apropriados para a instalação de novas estações de monitoramento. A escolha dessas áreas poderia privilegiar aquelas que vêm apresentando os maiores índices de crescimento demográfico. Como subsídio a esta análise, o incremento populacional verificado no período 1991 a 2000 por distrito (município de São Paulo) ou bairro (município do Rio de Janeiro) é apresentado na Figura 6.14 com a sobreposição da localização atual das estações de monitoramento da qualidade do ar. Principalmente em São Paulo,

verifica-se que as áreas de maior expansão demográfica não possuem estações de monitoramento. Estas áreas constituem, portanto, locais recomendados para a implantação de novas estações.

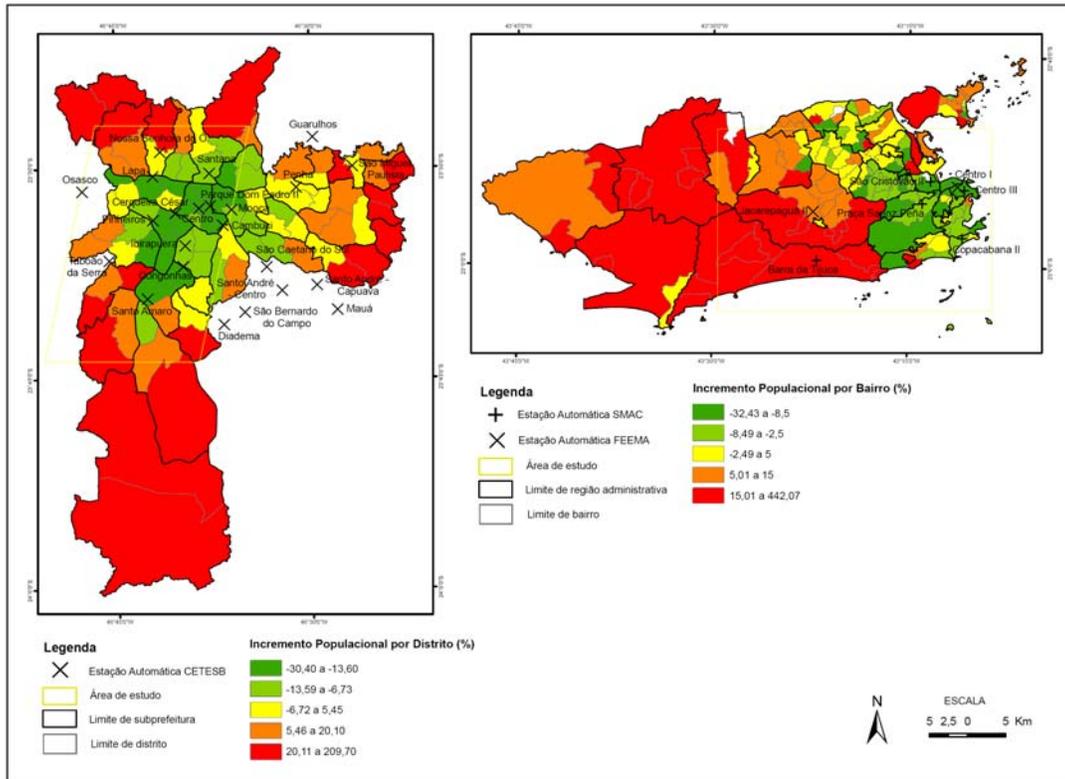


Figura 6.14 – Incremento populacional nos municípios de São Paulo e Rio de Janeiro (1991 a 2000).



## 7 ANÁLISE INTEGRADA DO AMBIENTE URBANO

### 7.1 Introdução

A análise integrada dos atributos do meio físico urbano, tais como a topografia, o clima e a cobertura vegetal, associados ao uso e à ocupação do solo, possibilita a elaboração de um diagnóstico ambiental mais consistente de uma determinada área. Este tipo de análise é recomendada por autores como Lu e Weng (2006), Mascaró (1996) e Weng et al. (2004), entre outros. Os diferentes usos do solo são fatores que auxiliam à caracterização do clima urbano e influenciam a configuração espacial da ilha de calor. Mudanças no uso e cobertura da terra não alteram apenas a abundância de vegetação e biomassa, mas também as propriedades termais. De acordo com Mascaró (1996), em escala mesoclimática, o clima urbano pode ser estudado com o auxílio da topografia, visando compreender a organização climática espacial.

Weng et al. (2004) aprofundaram os estudos da relação entre a temperatura da superfície e a cobertura vegetal, tendo como referência trabalhos anteriores desenvolvidos por autores como Lambin e Ehrlich (1996). Com aplicação na cidade de Indianópolis (EUA), para todas as classes de uso consideradas, Weng et al. (1994) encontraram correlação linear negativa, ou seja, para maiores valores de temperatura existe uma tendência à cobertura vegetal ser menos representativa, e vice-versa. Nessa pesquisa, considerando diferentes resoluções espaciais e para diferentes classes de uso e ocupação do solo, a correlação encontrada entre a temperatura e a imagem-fração vegetação verde, resultante da aplicação de um modelo de mistura espectral, foi superior àquela obtida com o uso do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). As maiores correlações foram encontradas com a resolução espacial de 120 m, considerando 30, 60, 120, 240, 480 e 960 m. Segundo os autores, a partir da resolução de 120 m a correlação não aumenta porque as superfícies tornam-se espacialmente homogêneas e as texturas menos complexas, devido à mistura dos alvos de áreas urbanas.

Lu e Weng (2006) verificaram correlação positiva entre a temperatura de superfície com a fração superfícies impermeáveis e correlação negativa com a fração vegetação em áreas construídas. Isto atesta o papel das superfícies impermeáveis em aquecer, e o da vegetação em resfriar o meio urbano.

Weng et al. (2004) observaram ainda que há um campo amplo para os estudos em sensoriamento remoto envolvendo modelos de mistura espectral, com enfoque sobre a fração vegetação, como um indicador da ocorrência de ilhas urbanas de calor. Isto porque, diferentemente do NDVI, a fração vegetação considera o vetor completo da reflectância espectral, conforme o número de bandas do sensor e a faixa do espectro selecionada. Embora não tenham integrado a topografia (representação da superfície terrestre) ao seu estudo, esses autores supõem haver um refinamento da análise caso ela seja considerada. Por sua vez, Lu e Weng (2006) apontam que o uso do MESMA em análises integradas pode levar a uma maior distinção entre vários tipos de superfícies impermeáveis em relação à análise de mistura espectral convencional. Nesse sentido, é apresentada a seguir uma análise integrada das variáveis temperatura, altitude e imagens-fração produto da aplicação do MESMA, por diferentes classes de uso e ocupação do solo encontrados nas áreas de estudo de São Paulo e do Rio de Janeiro.

## **7.2 Material e Métodos**

Após a aplicação de diferentes técnicas de processamento das imagens ASTER visando à obtenção de modelos digitais de elevação, à espacialização da temperatura da superfície e ao mapeamento das frações físicas da estrutura urbana, estas variáveis foram analisadas segundo a média e desvio padrão apresentados, e correlacionadas entre si por diferentes tipos de uso e ocupação do solo, no intuito de analisar a relação entre elas e efetuar uma caracterização geocológica do ambiente urbano das áreas de estudo. A Figura 7.1 apresenta os procedimentos empregados nesta etapa da pesquisa.

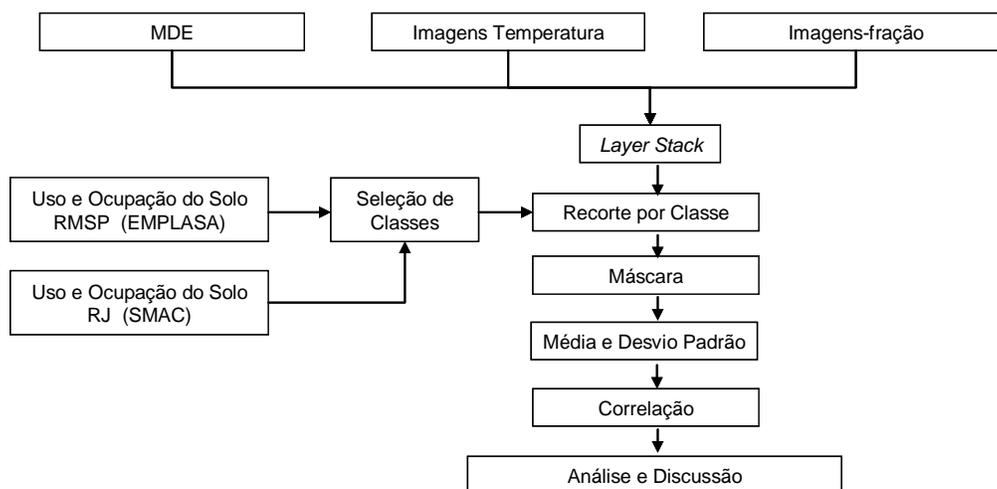


Figura 7.1 – Fluxograma metodológico.

Com relação às classes de uso e ocupação do solo, optou-se pela utilização de mapas já existentes. Para São Paulo foi adotado como referência o mapa de uso e ocupação do solo em formato digital da RMSP (arquivo vetorial em formato “.shp”). Este mapa foi elaborado em escala 1:100.000<sup>36</sup> pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A (EMPLASA) a partir da interpretação visual de imagens IKONOS, com resolução espacial de até 1 m, adquiridas em 2002, com o apoio de trabalho de campo (EMPLASA, 2005). Para o município do Rio de Janeiro foi adotado o mapa em escala 1:50.000 elaborado pela SMAC (SMAC, 2001). Os mapas contemplam um total de 20 (São Paulo) e 16 classes (Rio de Janeiro), listadas na Tabela 7.1.

Considerando a representatividade em área de cada classe (no recorte das áreas de estudo), bem como sua semelhança quanto ao tipo de uso ou cobertura, foram selecionadas para a integração e análise estatística nove classes de São Paulo (Tabela 7.2) e oito do Rio de Janeiro (Tabela 7.3). As Figuras 7.2 e 7.3 apresentam os mapas de uso e ocupação do solo das áreas de estudo de São Paulo e Rio de Janeiro, respectivamente.

<sup>36</sup> O mapeamento da EMLASA foi elaborado em escala 1:25.000 com a divisão da área da Região Metropolitana de São Paulo e Bacia Hidrográfica do Alto Rio Tietê em 64 folhas. Para a apresentação do mapeamento em um único arquivo, foi executado um processo de generalização cartográfica do produto para a escala 1:100.000.

Tabela 7.1 – Classes de uso e ocupação do solo dos mapas de referência utilizados.

São Paulo	Rio de Janeiro
Área urbanizada	Águas interiores
Aterro sanitário	Área úmida
Campo	Área urbana
Capoeira	Afloramento rochoso
Chácara	Apicum
Equipamento urbano	Campo antrópico
Espelho d'água	Cultura/Pastagem
Favela	Floresta
Hortifrutigranjeiro	Floresta Alterada
Indústria	Mangue
Lixão	Mar
Loteamento desocupado	Parques
Mata	Praia
Mineração	Restinga
Movimento de terra e solo exposto	Solo exposto
Outro uso	Urbano não consolidado
Reflorestamento	
Reservatório de retenção	
Rodovia	
Vegetação de várzea	

Fonte: EMPLASA (2005); SMAC (2001).

Tabela 7.2 – Classes de uso e ocupação do solo selecionadas (São Paulo).

Classe	Área (km <sup>2</sup> )	% da área de estudo
Área urbanizada + Rodovia	390,785	63,60
Indústria	43,8	7,13
Mata + Reflorestamento	34,265	5,58
Campo	28,598	4,65
Corpo d'água	24,106	3,92
Capoeira	20,36	3,31
Favela	15,521	2,53
Movimento de terra e solo exposto + Mineração	6,032	0,98
Vegetação de várzea	4,077	0,66
<b>Total</b>	<b>567,544</b>	<b>92,37</b>
<b>Área de Estudo</b>	<b>614,425</b>	<b>100</b>

Tabela 7.3 – Classes de uso e ocupação do solo selecionadas (Rio de Janeiro).

Classe	Área (km <sup>2</sup> )	% da área de estudo
Mar + Águas interiores	266,152	31,49
Área urbana	247,363	29,27
Floresta	105,261	12,45
Campo antrópico	99,791	11,81
Floresta alterada + Restinga	41,908	4,96
Urbano não consolidado	40,48	4,79
Área úmida + Mangue	22,279	2,64
Afloramento rochoso	4,72	0,56
<b>Total</b>	<b>827,954</b>	<b>97,96</b>
<b>Área de Estudo</b>	<b>845,193</b>	<b>100</b>

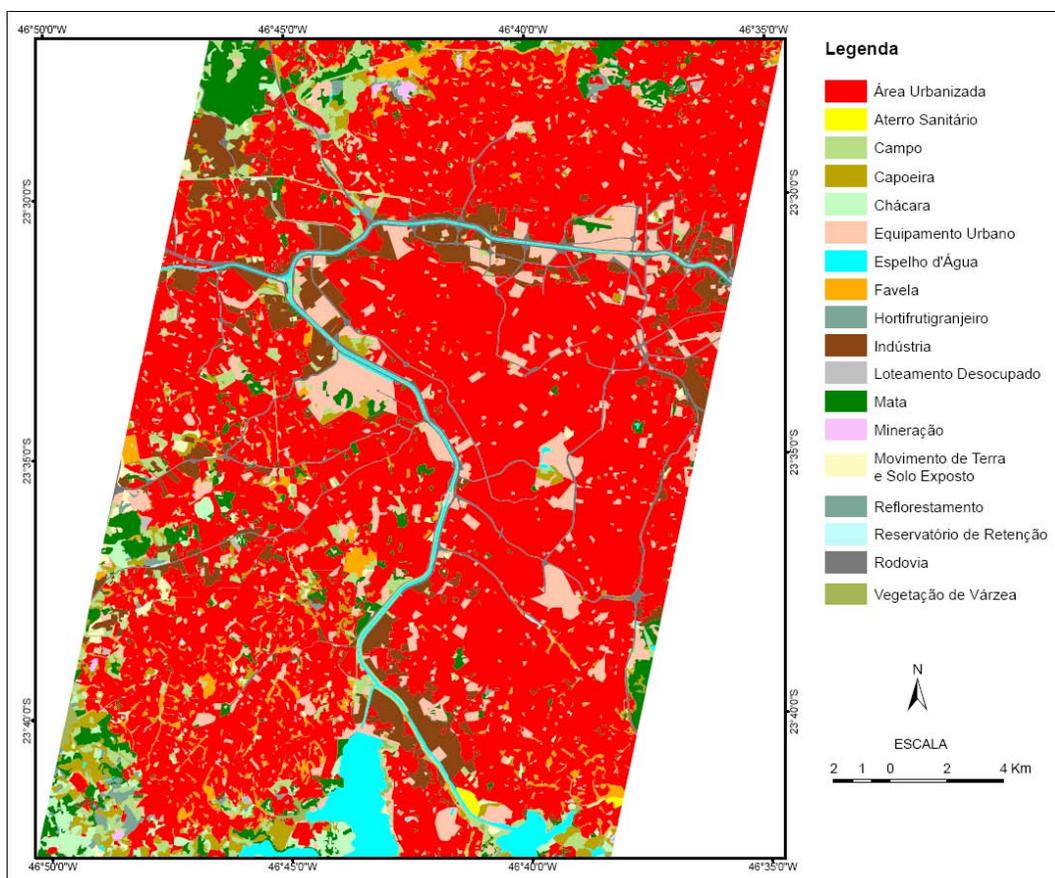


Figura 7.2 – Uso e ocupação do solo na área de estudo de São Paulo.

Fonte: EMPLASA (2005).

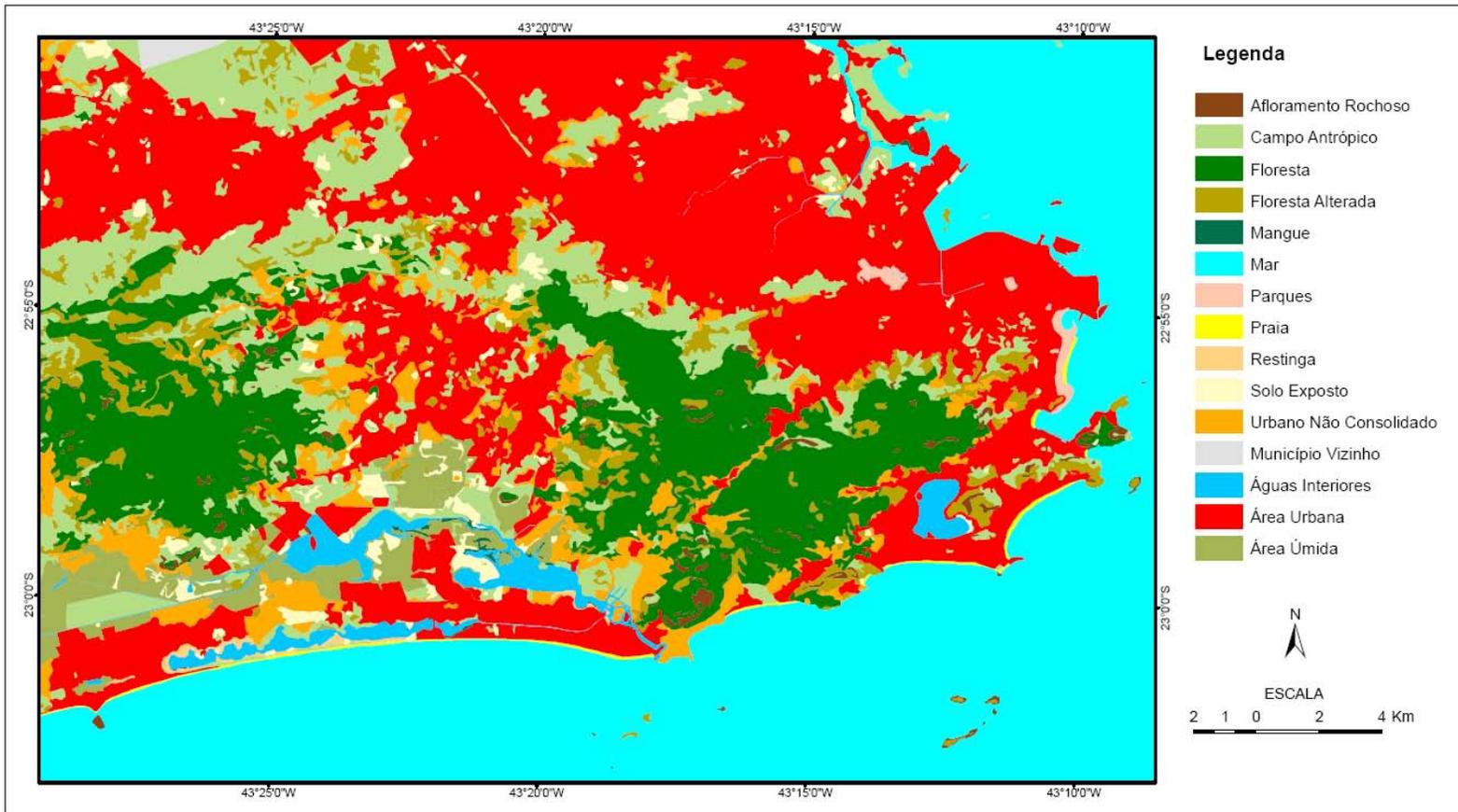


Figura 7.3 – Uso e ocupação do solo na área de estudo do Rio de Janeiro.

Fonte: SMAC (2001).

Em São Paulo as classes de Área urbanizada e Rodovia foram agrupadas por representarem, em ambos os casos, superfícies impermeáveis. Áreas de cobertura vegetal de porte arbóreo, correspondentes às classes Mata e Reflorestamento, também foram agrupadas. O mesmo ocorreu com as classes de Movimento de terra e solo exposto e Mineração, representativas de áreas de solo. A classe Loteamento desocupado não foi incluída neste grupo, pois representa áreas mistas de solo e cobertura vegetal. As demais classes mistas, a exemplo de Equipamento urbano, não foram consideradas na análise.

Na área de estudo do Rio de Janeiro foram agrupadas as classes de Floresta alterada e Restinga, Mar e Águas interiores, e Área úmida e Mangue. Na classe Urbano não consolidado estão incluídas áreas com baixa densidade de ocupação urbana, ou por estarem em processo de ocupação ou por serem áreas onde existem limitações físicas e/ou legais para esse processo. Esta categoria inclui também áreas onde há concentração de pequenas propriedades com atividade agropecuária e chácaras para lazer (IPP, 2005).

Cada classe selecionada foi extraída do arquivo vetorial para compor um novo plano de informação individual. Concomitantemente, as imagens em temperatura da superfície, modelos digitais de elevação e imagens-fração foram agrupadas em um único arquivo. Este procedimento foi executado para cada área de estudo e data. Em seguida, os planos de informação individuais (polígonos correspondentes a cada classe) foram sobrepostos aos arquivos de imagens. A área localizada no interior dos polígonos de cada plano de informação foi considerada como região de interesse e os arquivos de imagens foram recortados preservando apenas esta área e aplicando-se uma máscara sobre os pixels localizados fora dos limites da classe considerada. Este procedimento foi executado para as quatro datas conforme as nove classes de São Paulo e oito do Rio de Janeiro.

Após o recorte das imagens por classe foram calculadas a média e o desvio padrão de cada arquivo (modelo digital de elevação, temperatura da superfície

pelo método de Normalização da Emissividade (NE), temperatura da superfície pelo método da Banda de Referência (BR), fração superfícies impermeáveis e solo, fração vegetação, fração sombra e imagem-erro (RMSE)), excluindo-se do cálculo todos os valores nulos (localizados fora dos limites da classe considerada). Nas imagens-fração, para evitar a tendenciosidade dos resultados, além dos pixels nulos também foram excluídos os pixels não modelados (com valores iguais a zero). Em seguida foram calculados os índices de correlação linear entre as variáveis (pixel a pixel) por classe de uso e ocupação do solo selecionada, excluindo-se novamente os valores nulos e/ou iguais a zero, conforme aplicado no procedimento anterior.

### **7.3 Resultados e Discussão**

#### **7.3.1 Análise da Média e Desvio Padrão**

Os valores de média e desvio padrão calculados para as imagens de São Paulo considerando as classes de uso e ocupação do solo selecionadas, são apresentados na Tabela 7.4. Em São Paulo a vegetação densa está mais restrita às áreas elevadas, pois a classe Mata + Reflorestamento apresenta a maior altitude média. Em segundo lugar encontra-se a classe Favela, também ocupando áreas mais elevadas se comparadas à área urbanizada em geral. O terceiro maior valor médio de altitude foi observado para a classe Movimento de Terra e solo exposto + Mineração.

Os menores valores de altitude foram verificados para a classe Corpo d'água e para a classe Indústria, que ocupa na área de estudo de São Paulo as áreas próximas à rede de drenagem e corredores viários de suas margens. Em seguida aparece a classe Vegetação de várzea, presente próxima aos rios e represas. Estas três classes apresentaram os menores valores de desvio padrão. Os valores mais altos foram observados para as classes de Mata + Reflorestamento e Capoeira, com maior variação altimétrica. A Figura 7.4 apresenta de forma gráfica a altitude média calculada por classe.

Tabela 7.4 – Média e desvio padrão da altitude, temperatura e imagens-fração por classe de uso e ocupação do solo de São Paulo (desvio padrão em itálico).

Classe	MDE	Temperatura				Imagem-fração*							
		13/10/2002		17/05/2006		13/10/2002				17/05/2006			
		NE**	BR**	NE	BR	Sup. Imp. e Solo	Veg.	Sombra	RMSE	Sup. Imp. e Solo	Veg.	Sombra	RMSE
Área urbanizada + Rodovia	769,167	34,384	34,054	24,450	24,158	0,627	0,236	0,137	0,006	0,717	0,124	0,158	0,009
	<i>28,304</i>	<i>2,454</i>	<i>2,566</i>	<i>1,589</i>	<i>1,652</i>	<i>0,192</i>	<i>0,229</i>	<i>0,119</i>	<i>0,003</i>	<i>0,197</i>	<i>0,164</i>	<i>0,159</i>	<i>0,005</i>
Campo	772,073	32,535	32,136	23,391	23,145	0,290	0,657	0,053	0,006	0,329	0,511	0,160	0,006
	<i>47,801</i>	<i>3,077</i>	<i>3,196</i>	<i>2,028</i>	<i>2,147</i>	<i>0,215</i>	<i>0,253</i>	<i>0,155</i>	<i>0,003</i>	<i>0,261</i>	<i>0,272</i>	<i>0,185</i>	<i>0,003</i>
Capoeira	775,825	31,736	31,147	22,671	22,427	0,185	0,743	0,071	0,005	0,205	0,596	0,199	0,006
	<i>29,454</i>	<i>2,920</i>	<i>3,061</i>	<i>2,077</i>	<i>2,172</i>	<i>0,181</i>	<i>0,212</i>	<i>0,137</i>	<i>0,002</i>	<i>0,239</i>	<i>0,254</i>	<i>0,169</i>	<i>0,003</i>
Corpo d'água	727,678	27,347	26,299	21,264	20,983	0,233	0,107	0,660	0,011	0,225	0,059	0,716	0,007
	<i>18,131</i>	<i>3,692</i>	<i>3,991</i>	<i>1,714</i>	<i>1,741</i>	<i>0,120</i>	<i>0,197</i>	<i>0,223</i>	<i>0,004</i>	<i>0,125</i>	<i>0,127</i>	<i>0,174</i>	<i>0,002</i>
Favela	787,391	34,675	34,445	24,527	24,270	0,686	0,191	0,123	0,006	0,781	0,087	0,132	0,010
	<i>31,609</i>	<i>2,437</i>	<i>2,498</i>	<i>1,708</i>	<i>1,785</i>	<i>0,175</i>	<i>0,218</i>	<i>0,111</i>	<i>0,002</i>	<i>0,176</i>	<i>0,160</i>	<i>0,149</i>	<i>0,005</i>
Indústria	743,721	35,159	34,948	25,389	25,118	0,635	0,227	0,138	0,008	0,716	0,129	0,155	0,010
	<i>25,529</i>	<i>3,083</i>	<i>3,199</i>	<i>2,072</i>	<i>2,113</i>	<i>0,202</i>	<i>0,231</i>	<i>0,137</i>	<i>0,004</i>	<i>0,203</i>	<i>0,181</i>	<i>0,161</i>	<i>0,006</i>
Mata e Reflorestamento	803,471	30,327	29,536	21,695	21,430	0,098	0,799	0,103	0,005	0,090	0,657	0,253	0,005
	<i>50,343</i>	<i>3,014</i>	<i>3,058</i>	<i>2,167</i>	<i>2,267</i>	<i>0,142</i>	<i>0,187</i>	<i>0,120</i>	<i>0,002</i>	<i>0,166</i>	<i>0,241</i>	<i>0,172</i>	<i>0,003</i>
Movimento de terra e solo exposto + Mineração	776,451	33,237	32,987	23,757	23,598	0,554	0,464	-0,019	0,008	0,559	0,338	0,103	0,008
	<i>32,688</i>	<i>3,322</i>	<i>3,393</i>	<i>2,439</i>	<i>2,541</i>	<i>0,251</i>	<i>0,261</i>	<i>0,166</i>	<i>0,005</i>	<i>0,261</i>	<i>0,235</i>	<i>0,185</i>	<i>0,004</i>
Vegetação de várzea	745,103	29,301	28,644	21,599	21,385	0,133	0,797	0,070	0,006	0,134	0,555	0,312	0,006
	<i>11,839</i>	<i>3,807</i>	<i>4,154</i>	<i>2,035</i>	<i>2,078</i>	<i>0,160</i>	<i>0,187</i>	<i>0,141</i>	<i>0,003</i>	<i>0,148</i>	<i>0,344</i>	<i>0,258</i>	<i>0,003</i>

\*Os pixels não modelados foram excluídos dos cálculos estatísticos em cada data.

\*\*NE = Normalização da Emissividade; BR = Banda de Referência.

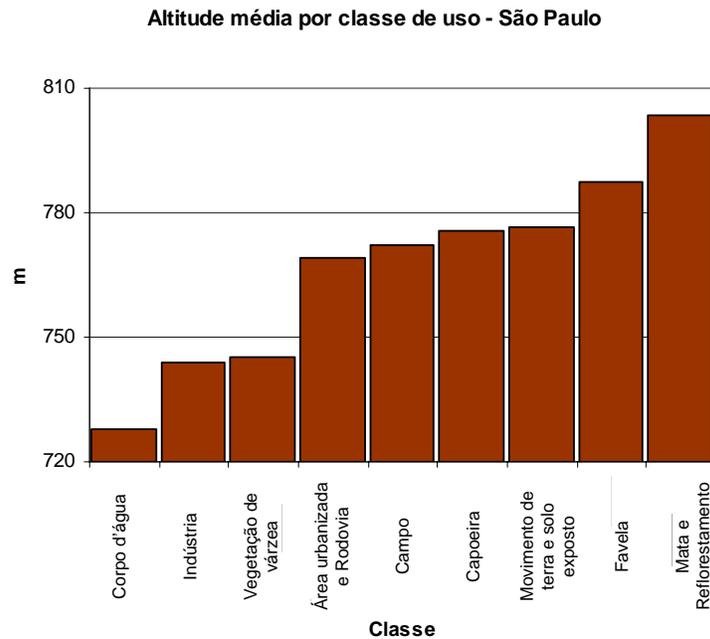


Figura 7.4 – Altitude média por classe de uso em São Paulo.

Nos resultados obtidos para as imagens temperatura da superfície, organizados na Figura 7.5, observa-se que em 17/05/2006, inverno, os valores foram cerca de 10° C inferiores aos de 13/10/2002, primavera. As maiores temperaturas médias foram verificadas nas classes Indústria, Favela e Área urbanizada + Rodovia, para ambas as imagens e métodos empregados: Normalização da Emissividade (NE) e Banda de Referência (BR). Nessas classes, é comum a presença de grandes superfícies impermeáveis, principalmente em indústrias e favelas, onde a cobertura vegetal também é reduzida, o que favorece o aquecimento. Em São Paulo a maioria das habitações incluída na categoria favela é de alvenaria: em 1980, apenas 2,4% das moradias eram de material durável. Em 1993, o percentual atingia 74,2%. O tipo de cobertura também mudou com um aumento das moradias com laje de 7% (1987) para 24,5% (1993) (IPEA, 2001c).

A classe Favela apresentou os menores valores de desvio padrão da temperatura para 13/10/2002. Considerando a imagem de 17/05/2006, os menores valores foram verificados para a classe Área urbanizada e Rodovia.

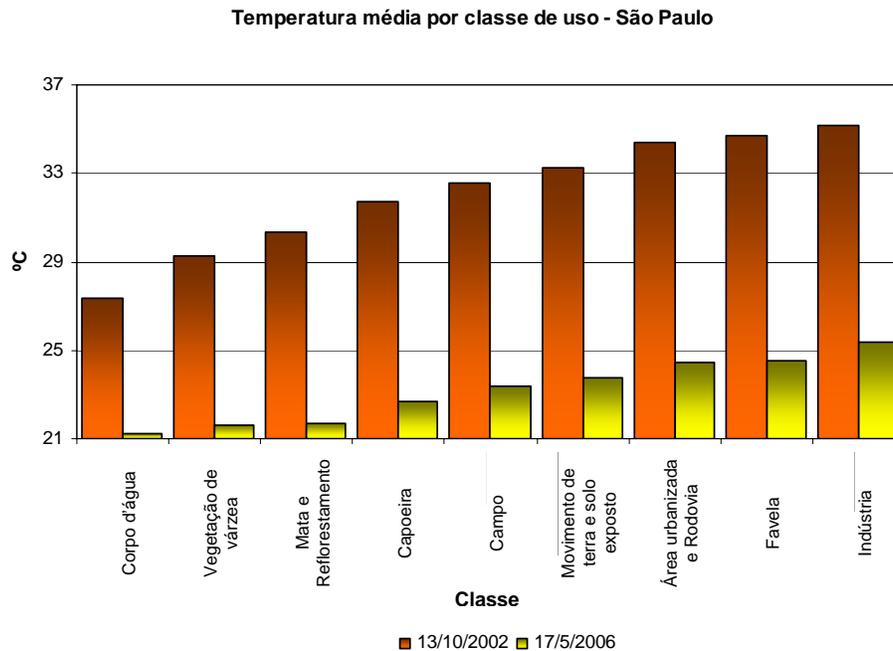


Figura 7.5 – Temperatura média por classe de uso em São Paulo.

As classes de Corpo d'água, Vegetação de várzea e Mata + Reflorestamento apresentaram as menores temperaturas médias, o que confirmou a importância da água e da cobertura vegetal na manutenção do conforto térmico em áreas urbanas tropicais. Desta forma, e de acordo com os resultados apresentados nos Capítulos 4 e 5, os distritos ou bairros mais arborizados tendem a ter temperaturas mais amenas.

Valores mais elevados de temperatura média foram obtidos a partir dos dados dos cinco canais termais do ASTER (aplicação do método da Normalização da Emissividade) em relação à imagem processada utilizando a banda 13 como referência. Isto foi observado para todas as classes, nas duas datas analisadas. Por outro lado, verificou-se um aumento no desvio padrão para o método da Banda de Referência.

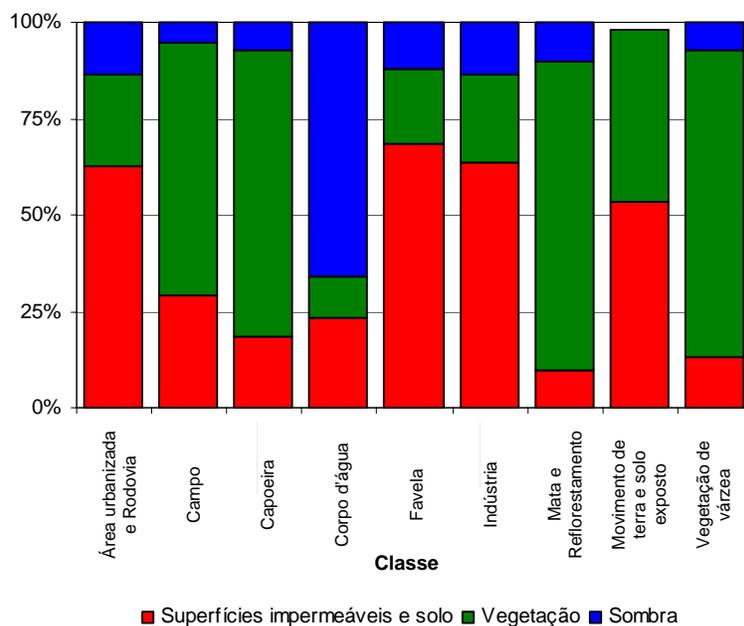
Os resultados para as imagens-fração também são apresentados de forma gráfica na Figura 7.6. Os valores médios das frações físicas mapeadas (superfícies impermeáveis e solo, vegetação e sombra) para cada classe foram

condizentes com os resultados esperados. As classes Favela, Indústria e Área urbanizada + Rodovia apresentaram, nessa ordem, as maiores frações de superfícies impermeáveis e solo e as menores frações de vegetação, caso fosse desconsiderada a classe Corpo d'água, que apresentou as menores frações de vegetação dentre todas as classes. Nesta análise, as classes Indústria e Área urbanizada + Rodovia alternam-se na ordem para cada data. As maiores frações de vegetação e as menores de superfícies impermeáveis e solo foram verificados nas classes Mata + Reflorestamento, Vegetação de várzea, Capoeira e Campo, nessa ordem, novamente desconsiderando a média de frações de superfícies impermeáveis e solo calculadas para a classe Corpo d'água. Na imagem de 17/05/2006, a classe Capoeira apresentou maior média de fração vegetação em relação à classe Vegetação de várzea.

Para a classe Corpo d'água, considerando as duas datas, em 17/05/2006 (data mais próxima do final do período de maior precipitação) as frações de sombra calculadas foram maiores, e as frações de superfícies impermeáveis e solo e vegetação foram menores. Um dos prováveis fatores que contribuíram para esse resultado é o fato de o reservatório de Guarapiranga (maior polígono desta classe) estar com um nível de água mais elevado para esta data em relação à 13/10/2002 (data próxima do final do período mais seco), o que pode ser visualizado na Figura 7.7. Além da vegetação, outro indicador da diferença no nível da água são as ilhas localizadas no interior da represa.

A partir das imagens-fração seria possível testar uma classificação, considerando as diferenças apresentadas conforme as classes de uso e ocupação do solo selecionadas. A confusão maior ocorreria entre as classes de Mata + Reflorestamento e Vegetação de várzea, pois as frações médias são muito parecidas, conforme é possível observar na Figura 7.6.

**Porcentagem média de fração por classe de uso -  
São Paulo (13/10/2002)**



**Porcentagem média de fração por classe de uso -  
São Paulo (17/05/2006)**

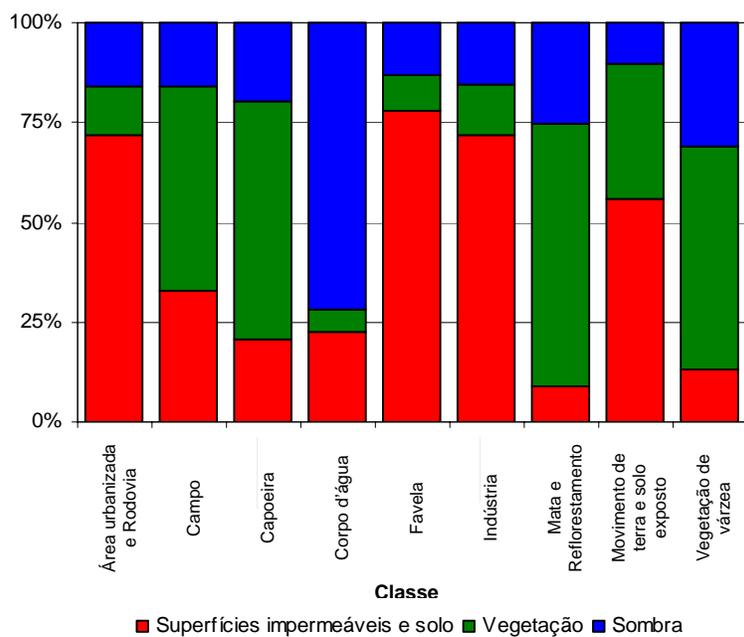


Figura 7.6 – Porcentagem média de fração por classe de uso em São Paulo.

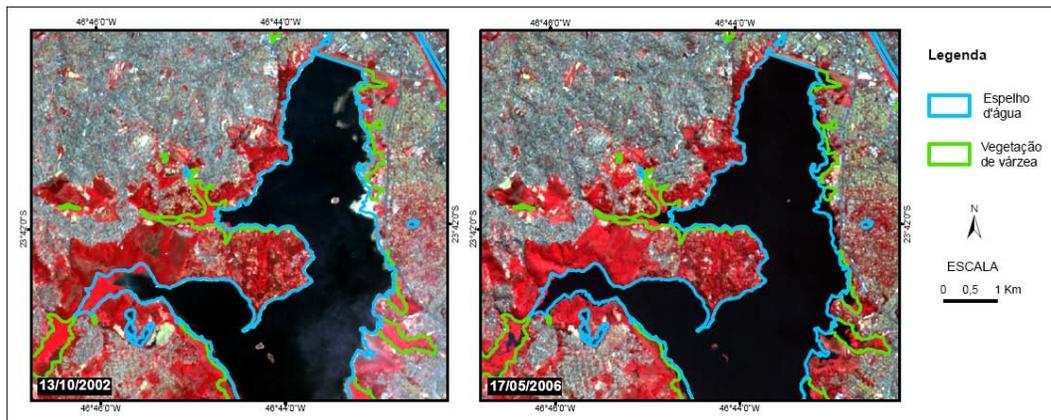


Figura 7.7 – Reservatório de Guarapiranga em 13/10/2002 e 17/05/2006.

Nas imagens-fração sombra de São Paulo pode ser observado que em 17/05/2006 os valores estimados foram consideravelmente superiores para todas as classes. Conforme apresentado na Tabela 3.2, esta imagem foi adquirida com o posicionamento dos subsistemas do sensor com um ângulo de apontamento que, embora pequeno ( $-2,8^\circ$ ), ocasiona um maior sombreamento dos alvos na imagem. Além disso, esta data é mais próxima do solstício de inverno (que geralmente ocorre em 21 de junho) em relação a 13 de outubro e, conseqüentemente, o ângulo de elevação solar era menor no momento de sua aquisição. A imagem de 13/10/2002 foi adquirida com um ângulo de apontamento do instrumento nulo e em data próxima ao equinócio de primavera.

As maiores frações de sombra foram verificadas na classe Corpo d'água, e as menores, na classe Movimento de terra e solo exposto + Mineração, nas duas datas, o que está associado às características físicas destas classes. Outras classes que se destacaram com maiores frações de sombra foram Indústria e Área urbanizada + Rodovia, resultado este que pode ser atribuído ao sombreamento ocasionado pelas edificações. Dentre as classes de cobertura vegetal, os maiores valores foram verificados para Mata + Reflorestamento, devido ao sombreamento natural do estrato arbóreo e por estarem localizadas em áreas de maior declividade em relação às demais. Para a imagem de

17/05/2006, a segunda maior fração média de sombra foi verificada na classe de Vegetação de várzea, seguida pela Mata + Reflorestamento. Para esta data, a classe Vegetação de várzea também apresentou o maior desvio padrão. Novamente, o nível do reservatório de Guarapiranga parece ter influenciado os resultados.

Os maiores erros médios foram encontrados para a classe Corpo d'água em 13/10/2002, o que pode estar associado ao baixo nível do reservatório de Guarapiranga. A área ocupada pela superfície da água em 17/05/2006 é mais semelhante à área delimitada como Corpo d'água no mapa de uso e ocupação do solo utilizado como referência, conforme pode ser observado na Figura 7.7<sup>37</sup>. Em 17/05/2006 as classes Indústria e Favela apresentaram os maiores erros médios, o que pode estar associado à alta refletividade dos alvos destas classes influenciada pelo tipo de materiais empregados nas edificações. Os maiores valores de desvio padrão obtidos entre todas as imagens-fração referem-se à classe Movimento de Terra e solo exposto, nas duas datas, com exceção da fração sombra em 13/10/2002, com maior desvio padrão calculado para Corpo d'água, e da fração vegetação em 17/05/2006, com maior desvio padrão para Vegetação de várzea.

Os valores de média e desvio padrão calculados para as imagens do Rio de Janeiro considerando as classes de uso e ocupação do solo selecionadas para esta área de estudo são apresentados na Tabela 7.5.

---

<sup>37</sup> Para o processamento das imagens não foi feita edição vetorial dos polígonos das classes Corpo d'água e Vegetação de várzea.

Tabela 7.5 – Média e desvio padrão da altitude, temperatura e imagens-fração por classe de uso e ocupação do solo do Rio de Janeiro (desvio padrão em itálico).

Classe	MDE	Temperatura				Imagem-fração*							
		25/04/2003		02/09/2004		25/04/2003				02/09/2004			
		NE	BR	NE	BR	Sup. Imp. e Solo	Veg.	Sombra	RMSE	Sup. Imp. e Solo	Veg.	Sombra	RMSE
Afloramento rochoso	291,802	27,977	27,951	27,399	26,848	0,211	0,425	0,364	0,009	0,140	0,492	0,368	0,008
	204,124	2,932	2,930	3,266	2,910	0,205	0,284	0,317	0,005	0,161	0,259	0,270	0,005
Área úmida + Mangue	15,134	29,740	29,425	29,944	29,677	0,158	0,705	0,137	0,007	0,170	0,614	0,216	0,006
	7,095	1,380	1,375	1,687	1,620	0,183	0,213	0,174	0,004	0,189	0,230	0,178	0,003
Área urbana	43,420	32,601	32,314	32,951	32,686	0,587	0,215	0,197	0,009	0,569	0,188	0,243	0,009
	26,169	1,656	1,641	2,021	2,010	0,208	0,225	0,162	0,005	0,211	0,208	0,151	0,005
Campo antrópico	139,445	30,273	30,043	31,475	31,189	0,240	0,732	0,028	0,007	0,209	0,651	0,140	0,007
	157,353	1,981	1,974	2,615	2,528	0,193	0,225	0,175	0,004	0,199	0,240	0,178	0,004
Floresta	396,297	26,383	26,185	26,574	26,256	0,024	0,735	0,241	0,006	0,040	0,665	0,295	0,005
	209,901	1,565	1,542	1,950	1,759	0,077	0,196	0,176	0,003	0,057	0,163	0,156	0,002
Floresta alterada + Restinga	239,895	28,183	27,896	28,779	28,343	0,112	0,743	0,145	0,006	0,096	0,652	0,253	0,006
	235,459	2,013	1,991	2,697	2,427	0,145	0,212	0,168	0,003	0,134	0,198	0,166	0,003
Mar + Águas interiores	-0,329	26,651	26,484	24,182	23,990	0,051	0,038	0,911	0,008	0,081	-0,006	0,924	0,009
	9,955	1,423	1,513	1,903	1,807	0,058	0,076	0,091	0,002	0,039	0,068	0,078	0,003
Urbano não consolidado	73,668	30,242	29,913	30,261	30,261	0,329	0,557	0,113	0,007	0,307	0,495	0,197	0,007
	88,496	2,054	2,072	2,311	2,311	0,243	0,259	0,180	0,004	0,244	0,243	0,171	0,004

\*Os pixels não modelados foram retirados para os cálculos estatísticos em cada data.

No Rio de Janeiro as classes Floresta, Afloramento rochoso e Floresta Alterada + Restinga apresentaram a maior altitude média, nessa ordem (Figura 7.8). As áreas de floresta encontram-se restritas basicamente aos Maciços da Tijuca e da Pedra Branca, e os afloramentos rochosos encontram-se geralmente no topo dos picos destes maciços. A menor média de altitude foi verificada, logicamente, para a classe Mar + Águas interiores. Excluindo-se tal classe da análise, a menor média foi verificada para Área úmida + Mangue, seguida de perto pela média da Área urbana e, com um valor um pouco superior, da classe Urbano não consolidado. Este resultado aponta para a tendência da expansão urbana em direção às áreas mais elevadas. É importante salientar nesta análise que, ao contrário do mapa de uso e ocupação do solo de São Paulo, o mapa do Rio de Janeiro utilizado como referência não discrimina as áreas de favela em uma classe específica, porém as insere, na maioria dos casos, na classe Área urbana.

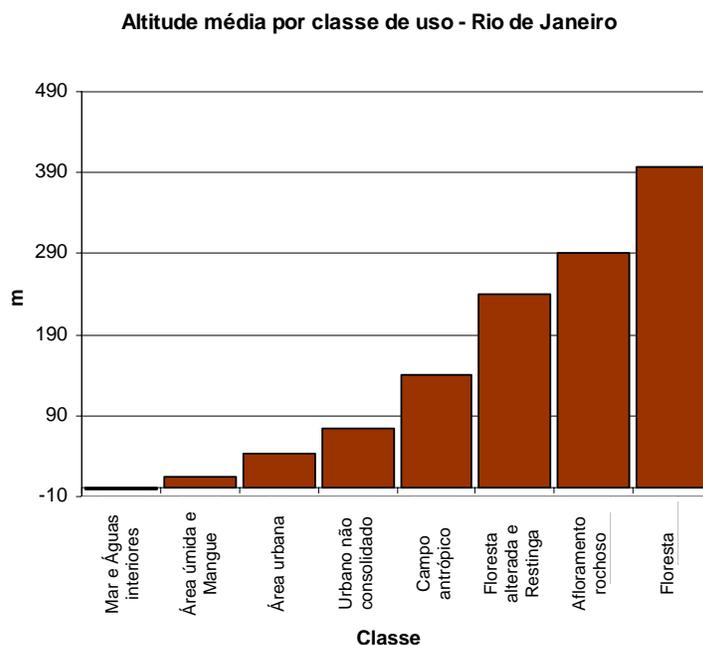


Figura 7.8 – Altitude média por classe de uso no Rio de Janeiro.

Floresta alterada + Restinga, Floresta e Afloramento Rochoso apresentaram os maiores valores de desvio padrão. No primeiro caso, um dos fatores que

contribuiu para esse resultado foi o agrupamento, na análise, da classe Restinga, em geral localizada em baixas altitudes, com a classe Floresta alterada. Os altos valores de desvio padrão encontrados para as classes Floresta e Afloramento rochoso são consequência da grande amplitude topográfica verificada no Rio de Janeiro. Desse modo, os valores de desvio padrão registrados para o Rio de Janeiro foram consideravelmente superiores aos de São Paulo, que está localizada em área de planalto e apresenta menor variação altimétrica. Os menores desvios padrão foram verificados para Área úmida + Mangue e Mar + Águas interiores.

As maiores temperaturas médias, referentes às duas datas (Figura 7.9) e a ambos os métodos utilizados, foram encontradas para as classes Área urbana, Campo Antrópico e Urbano não consolidado. A classe Floresta apresentou a menor temperatura média, seguida de Mar + Águas interiores na imagem de 25/04/2003. O inverso ocorreu na imagem de 02/09/2004. Aparentemente, este resultado está de acordo com o maior resfriamento das águas oceânicas verificado na data de 02/09/2004 em relação à outra data (Figura 4.11).

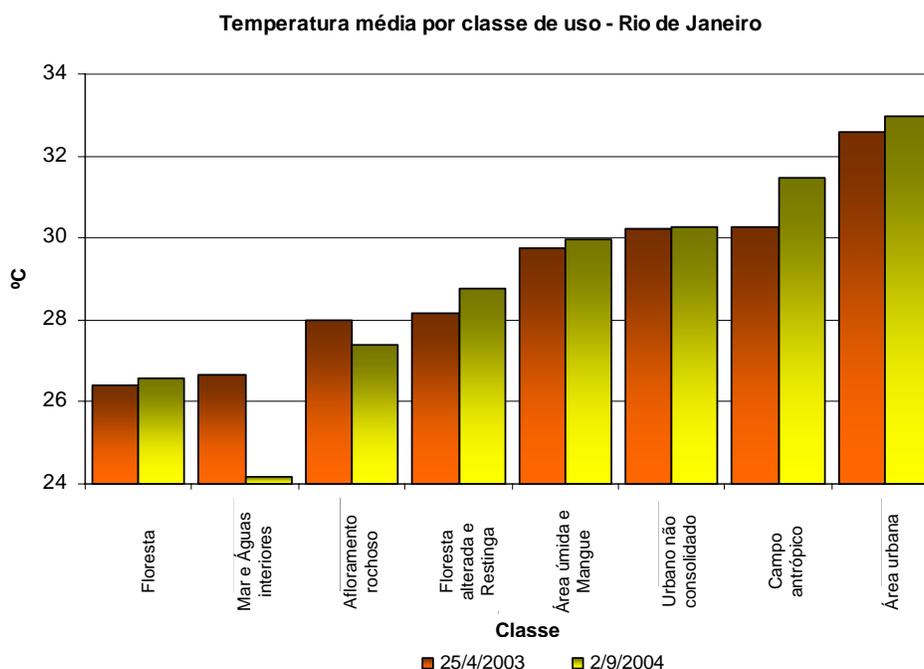


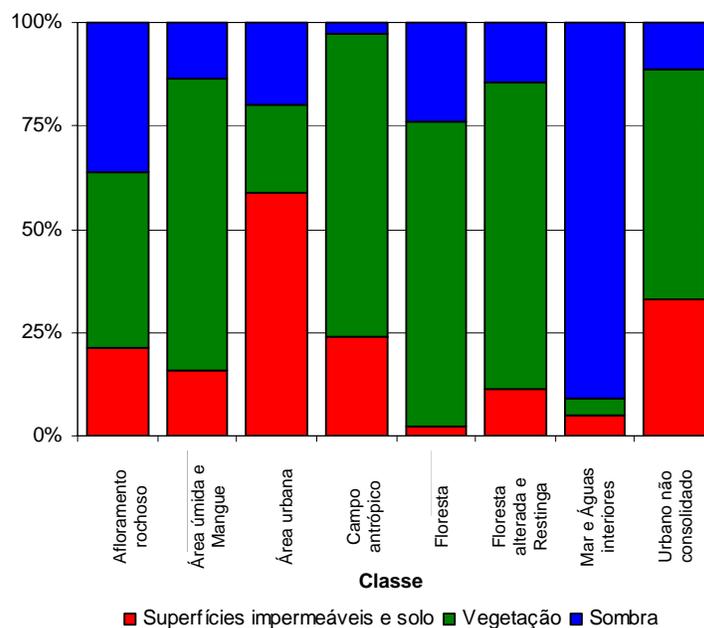
Figura 7.9 – Temperatura média por classe de uso no Rio de Janeiro (método NE).

O maior desvio padrão foi verificado para a classe Afloramento rochoso. Nesta classe, há um grande contraste termal entre o alto brilho dos pixels puros de rocha em relação às áreas próximas, em geral cobertas por vegetação densa ou rasteira. Os menores desvios padrão foram calculados para as classes de Área úmida + Mangue, Mar + Águas interiores e Floresta. Estas classes representam alvos relativamente homogêneos, o que contribui para uma resposta espectral mais uniforme. Como verificado para São Paulo, em todas as classes, em ambas as datas, os valores da temperatura média foram inferiores considerando o método da Banda de Referência em comparação com os resultados obtidos com o método da Normalização da Emissividade.

As classes Floresta alterada + Restinga, Floresta e Campo antrópico apresentaram as maiores médias de fração vegetação, nessa ordem, considerando a imagem de 25/04/2003. Para a imagem de 02/09/2004, a maior média foi encontrada na classe Floresta, seguida daquelas de Floresta alterada + Restinga e Campo antrópico. As classes Área urbana e Urbano não consolidado apresentaram nas duas datas as maiores médias de fração superfícies impermeáveis e solo. A classe Floresta apresentou a menor média de fração de superfícies impermeáveis e solo, enquanto o segundo menor valor foi verificado para Mar + Águas interiores, nas duas datas. Os menores valores médios de fração vegetação foram observados para as classes de Mar + Águas interiores, Área urbana e Afloramento rochoso, também para as duas datas. Estes resultados podem ser observados na Figura 7.10.

Considerando as frações de sombra, os maiores valores foram verificados para a classe Mar + Águas interiores, como esperado. O segundo lugar foi ocupado pela classe Afloramento rochoso, cujo resultado é devido, principalmente, à declividade destas áreas, e o terceiro lugar, pela classe de Floresta. Na classe de Floresta, há a influência da inclinação (declividade) das vertentes e da altura das árvores para o sombreamento. Campo antrópico e Urbano não consolidado apresentaram as menores médias. Esta análise das frações sombra é válida para as imagens de ambas as datas.

**Porcentagem média de fração por classe de uso -  
Rio de Janeiro (25/04/2003)**



**Porcentagem média de fração por classe de uso -  
Rio de Janeiro (02/09/2004)**

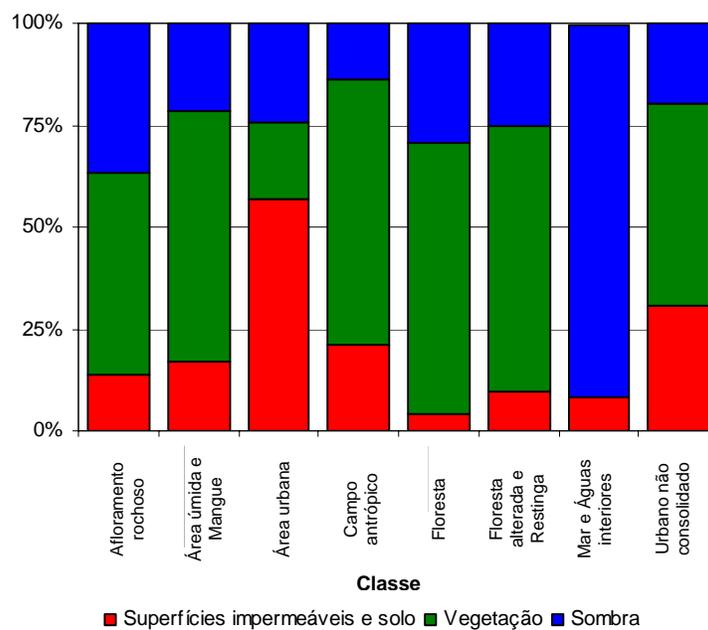


Figura 7.10 – Porcentagem média de fração por classe de uso no Rio de Janeiro.

Entre as duas imagens-fração sombra do Rio de Janeiro não foi verificada tanta diferença como em São Paulo, pois ambas foram adquiridas com ângulos de apontamento praticamente nulos e em datas próximas aos equinócios. Os maiores erros médios foram verificados para as classes Área urbana, Afloramento rochoso e Mar + Águas interiores. Por outro lado, os menores erros médios foram calculados para pixels das classes de Floresta e Floresta alterada. O resultado para estas classes confirma que as frações de vegetação tendem a ser mais bem modeladas por modelos de mistura espectral em relação a frações de superfícies impermeáveis, solo ou sombra.

### **7.3.2 Análise de Correlação**

A Tabela 7.6 apresenta os coeficientes de correlação linear de Pearson ( $r$ ) obtidos a partir da análise de correlação (pixel a pixel) dos dados de altitude, temperatura da superfície e imagens-fração de São Paulo. O objetivo desta análise foi verificar qual o sentido da correlação e a variação de sua intensidade por classe de uso e ocupação do solo. Desse modo, a análise de correlação não considerou a significância de seus valores.

A análise dos resultados partiu do pressuposto da existência de correlação negativa entre a altitude e a temperatura, ou seja, quanto maior a altitude, menor a temperatura. Para São Paulo, isto foi confirmado em todas as classes, com exceção de Vegetação de várzea e Corpo d'água, nas duas datas. Estas classes, na mesma ordem, são as que apresentaram menor desvio padrão médio de altitude (Tabela 7.4). Áreas com vegetação de várzea próximas aos corpos d'água sofrem influência dos mesmos, o que leva a uma redução na temperatura.

Para todas as classes e considerando ambos os métodos utilizados, correlações negativas mais altas ou correlações positivas mais baixas foram observadas para a imagem de 17/05/2006, que apresenta temperaturas mais baixas e menor desvio padrão dos dados de temperatura (Tabela 7.4). A única exceção foi verificada para a classe Favela segundo o método NE.

Tabela 7.6 – Correlação linear entre a altitude, temperatura e imagens-fração por classe de uso e ocupação do solo de São Paulo.

Classe	Imagem	Correlação										
		MDE e NE	MDE e BR	MDE e Sup. Imp. e Solo	MDE e Veg.	MDE e Sombra	NE e Sup. Imp. e Solo	BR e Sup. Imp. e Solo	NE e Veg.	BR e Veg.	NE e Sombra	BR e Sombra
Área urbanizada + Rodovia	13/10/2002	-0,056	-0,061	-0,036	0,038	-0,014	0,222	0,226	-0,210	-0,215	0,045	0,049
	17/05/2006	-0,162	-0,192	0,015	0,017	-0,036	0,360	0,331	-0,287	-0,270	-0,151	-0,133
Campo	13/10/2002	-0,035	-0,038	-0,194	0,222	-0,093	0,357	0,346	-0,291	-0,271	-0,023	-0,039
	17/05/2006	-0,192	-0,269	-0,179	0,241	-0,101	0,460	0,434	-0,304	-0,292	-0,202	-0,183
Capoeira	13/10/2002	-0,019	-0,039	-0,007	0,009	-0,005	0,437	0,457	-0,331	-0,346	-0,064	-0,068
	17/05/2006	-0,106	-0,153	-0,094	0,034	0,082	0,454	0,428	-0,315	-0,314	-0,170	-0,135
Corpo d'água	13/10/2002	0,060	0,095	-0,147	0,206	-0,102	0,273	0,258	0,400	0,401	-0,499	-0,491
	17/05/2006	0,036	0,019	-0,045	0,041	0,003	0,636	0,635	0,235	0,248	-0,631	-0,639
Favela	13/10/2002	-0,079	-0,109	0,027	0,009	-0,060	0,301	0,312	-0,347	-0,354	0,209	0,205
	17/05/2006	-0,070	-0,114	0,023	-0,008	-0,019	0,296	0,282	-0,278	-0,268	-0,051	-0,046
Indústria	13/10/2002	-0,138	-0,128	-0,204	0,276	-0,164	0,070	0,070	-0,115	-0,118	0,092	0,096
	17/05/2006	-0,225	-0,242	-0,198	0,276	-0,061	0,213	0,194	-0,233	-0,208	-0,006	-0,010
Mata + Reflorestamento	13/10/2002	-0,120	-0,163	-0,266	0,222	-0,029	0,411	0,435	-0,305	-0,328	-0,014	-0,006
	17/05/2006	-0,230	-0,297	-0,197	0,140	-0,005	0,391	0,386	-0,224	-0,244	-0,065	-0,032
Movimento de terra e solo exposto + Mineração	13/10/2002	-0,156	-0,158	-0,081	0,189	-0,174	0,076	0,125	-0,103	-0,131	0,046	0,018
	17/05/2006	-0,239	-0,254	-0,154	0,223	-0,065	0,326	0,290	-0,168	-0,162	-0,247	-0,204
Vegetação de várzea	13/10/2002	0,228	0,242	-0,065	0,052	0,006	-0,041	-0,023	-0,078	-0,084	0,150	0,137
	17/05/2006	0,206	0,179	-0,100	0,297	-0,338	0,105	0,071	0,175	0,182	-0,293	-0,284

As correlações entre a altitude e as imagens-fração superfícies impermeáveis e solo foram negativas para todas as classes e imagens, com exceção de Área urbanizada + Rodovia na imagem de 17/05/2006 e Favela, nas duas datas. Isto significa que, em altitudes maiores, menores são as frações de superfícies impermeáveis e solo. Caso seja considerado o resultado apresentado na Tabela 7.4, de que a classe Mata + Reflorestamento é a que apresenta a maior altitude média, este resultado é coerente, ou seja, as superfícies impermeáveis e as áreas de solo exposto tendem a ocupar níveis mais baixos da topografia local. Com esta mesma classe (Mata + Reflorestamento) foram encontradas as correlações negativas mais altas. As correlações positivas encontradas com a classe Favela justificam-se porque ela apresenta valores altos de frações de superfícies impermeáveis e solo, os mais altos dentre todas as classes para as duas datas, e a segunda maior média de altitude.

O inverso do que foi verificado nas frações de superfícies impermeáveis e solo ocorreu com as frações de vegetação, ou seja, nas classes de maior altitude média, maiores foram as médias de fração vegetação encontradas. A única exceção foi verificada para a classe Favela na imagem de 17/05/2006. Este resultado mais uma vez aponta que, em São Paulo, a cobertura vegetal está restrita, principalmente, às áreas mais elevadas.

Embora para a grande maioria dos casos tenha sido verificada correlação negativa entre a altitude e a fração sombra, em geral estas correlações foram muito baixas. Este resultado era esperado, pois as áreas mapeadas com as maiores frações de sombra nas imagens ocupam tanto as áreas mais baixas (rios e reservatórios) quanto as mais elevadas (vertentes de maior declividade).

A correlação verificada entre as frações de superfícies impermeáveis e solo e as frações de vegetação com a temperatura apresentou comportamento inverso ao verificado com a altitude, ou seja, correlações positivas com superfícies impermeáveis e solo e correlações negativas com vegetação. Conforme afirmado anteriormente, para maiores altitudes, menores foram os

valores de temperatura verificados. A única exceção refere-se à classe Vegetação de várzea, para a qual se verificou correlação negativa entre a temperatura e frações de superfícies impermeáveis e solo, na imagem de 13/10/2002, e positiva com as frações de vegetação para 17/05/2006. Correlações positivas também foram verificadas entre a temperatura e as frações de vegetação para a classe Corpo d'água nas duas datas.

As correlações negativas mais altas entre as frações de vegetação e a temperatura foram encontradas para as classes Favela, Capoeira, Mata + Reflorestamento e Campo. Estas quatro classes encontram-se dentre as cinco que apresentam a maior altitude média (Tabela 7.4).

Para a grande maioria das classes foi verificada correlação negativa entre a temperatura e as frações de sombra. Considerando todas as classes e coeficientes de correlação calculados, os maiores valores foram verificados para a classe Corpo d'água, uma vez que áreas com altas frações de sombra, como é o caso dos corpos d'água, apresentam baixa temperatura. As segundas maiores correlações negativas foram verificadas para a classe Vegetação de várzea em 17/05/2006. Este resultado também pode ter sido influenciado pelo nível do reservatório de Guarapiranga (Figura 7.7).

Considerando todos os resultados e datas das imagens, as maiores variações para uma mesma classe foram verificadas entre as frações de sombra e a temperatura. A diferença nos ângulos de apontamento dos sensores na aquisição das imagens em cada data, bem como a diferença no ângulo de elevação solar são fatores que provavelmente influenciaram este resultado.

Quanto aos dois métodos empregados para a obtenção das imagens temperatura, não foi verificada nenhuma tendência de aumento da correlação com as frações físicas mapeadas de um em relação ao outro. Para todas as classes, as maiores correlações de imagens-fração com a temperatura não foram obtidas sempre quando utilizado o método da Normalização da

Emissividade ou o método da Banda de Referência. No entanto, para nenhuma classe e em nenhuma data foi verificada mudança no sentido da correlação.

A Tabela 7.7 apresenta os coeficientes de correlação linear de Pearson ( $r$ ) obtidos a partir da análise de correlação (pixel a pixel) dos dados de altitude, temperatura da superfície e imagens-fração do Rio de Janeiro. A obtenção de correlações negativas mais altas entre a altitude e a temperatura, verificada para diversas classes do Rio de Janeiro, tais como Floresta alterada + Restinga, Floresta, Urbano não consolidado e Campo antrópico, era esperada em virtude da maior variação altimétrica desta área de estudo. Estas quatro classes citadas apresentaram, nessa ordem, as correlações negativas mais altas. Como ocorreu em São Paulo, duas classes apresentaram correlações positivas: Mar + Águas interiores e Área úmida + Mangue. Estas classes também apresentaram o menor desvio padrão médio e a menor altitude média (Tabela 7.5) (no caso de São Paulo, a classe Indústria possui altitude média um pouco inferior à Vegetação de várzea). Para todas as classes e ambos os métodos empregados para o cálculo da temperatura, as correlações negativas mais altas foram observadas para a imagem de 25/04/2003.

Com exceção da classe Mar + Águas interiores nas duas datas e de Área urbana para a imagem de 25/04/2003, para todas as demais classes o sentido da correlação calculada entre a altitude e as frações de superfícies impermeáveis e solo foi negativo, a exemplo do que ocorreu em São Paulo. Além da classe Mar + Águas interiores, as demais classes de relevo muito plano (de menor desvio padrão da altitude), correspondentes à Área úmida + Mangue e à Área urbana, apresentaram correlação praticamente nula. Floresta alterada + Restinga foi a classe que apresentou a maior correlação negativa. Nesta, assim como para grande parte das demais classes, quanto maior a altitude, menor foi a representatividade de superfícies impermeáveis e solo por pixel.

Tabela 7.7 – Correlação linear entre a altitude, temperatura e imagens-fração por classe de uso e ocupação do solo do Rio de Janeiro.

Classe	Imagem	Correlação										
		MDE e NE	MDE e BR	MDE e Sup. Imp. e Solo	MDE e Veg.	MDE e Sombra	NE e Sup. Imp. e Solo	BR e Sup. Imp. e Solo	NE e Veg.	BR e Veg.	NE e Sombra	BR e Sombra
Afloramento rochoso	25/04/2003	-0,227	-0,209	-0,093	0,197	-0,116	0,465	0,460	0,205	0,165	-0,484	-0,445
	02/09/2004	-0,071	-0,098	-0,184	0,239	-0,120	0,345	0,326	0,355	0,333	-0,547	-0,515
Área úmida + Mangue	25/04/2003	0,015	0,023	-0,003	0,028	-0,031	0,338	0,308	-0,173	-0,163	-0,143	-0,125
	02/09/2004	0,023	0,025	-0,013	0,006	0,006	0,193	0,259	-0,021	-0,040	-0,178	-0,224
Área urbana	25/04/2003	-0,176	-0,160	0,007	0,035	-0,058	0,355	0,358	-0,253	-0,260	-0,104	-0,099
	02/09/2004	-0,045	-0,056	-0,012	0,044	-0,045	0,316	0,341	-0,216	-0,235	-0,144	-0,154
Campo antrópico	25/04/2003	-0,396	-0,368	-0,110	0,194	-0,127	0,379	0,366	-0,214	-0,214	-0,144	-0,130
	02/09/2004	-0,251	-0,245	-0,142	0,179	-0,083	0,238	0,306	-0,045	-0,059	-0,207	-0,265
Floresta	25/04/2003	-0,599	-0,560	-0,089	-0,083	-0,031	0,127	0,143	0,245	0,252	-0,168	-0,184
	02/09/2004	-0,477	-0,544	-0,145	-0,024	0,078	0,201	0,205	0,147	0,192	-0,228	-0,277
Floresta alterada + Restinga	25/04/2003	-0,647	-0,624	-0,228	0,180	-0,031	0,405	0,397	-0,143	-0,125	-0,168	-0,184
	02/09/2004	-0,502	-0,532	-0,176	0,288	-0,202	0,219	0,261	-0,100	-0,123	-0,057	-0,064
Mar + Águas interiores	25/04/2003	0,127	0,149	0,194	0,109	-0,214	0,516	0,531	0,328	0,297	-0,601	-0,584
	02/09/2004	0,194	0,187	0,204	0,152	-0,234	0,332	0,331	0,586	0,585	-0,675	-0,674
Urbano não consolidado	25/04/2003	-0,507	-0,473	-0,207	0,116	0,111	0,436	0,442	-0,262	-0,266	-0,210	-0,213
	02/09/2004	-0,417	-0,462	-0,221	0,121	0,143	0,385	0,401	-0,193	-0,196	-0,273	-0,292

A correlação positiva entre superfícies impermeáveis e solo e a altitude para a classe Mar + águas interiores pode ser explicada pela existência de material particulado em suspensão, principalmente arenoso, nas águas oceânicas menos profundas, próximas à costa, e argiloso, nas lagoas e lagunas costeiras.

A correlação entre altitude e frações de vegetação foi positiva, como ocorreu também em São Paulo. A única exceção, não esperada, foi verificada em ambas as datas para a classe Floresta. Isto pode ter sido consequência do maior sombreamento de áreas elevadas e de maior declividade dos maciços do Rio de Janeiro se comparado ao sombreamento de vales e talvegues florestados, em geral localizados em menores altitudes. O resultado também pode ter sido influenciado pela exclusão dos pixels mais brilhantes desta classe para o cálculo da correlação, pois não foram modelados pelo MESMA. As classes Floresta alterada + Restinga, Campo antrópico e Afloramento rochoso foram as que apresentaram as correlações positivas mais altas entre a altitude e as frações de vegetação. No caso de Afloramento rochoso, este resultado, também não esperado, pode ter sido influenciado pela presença de vegetação rasteira sobre as bordas de alguns paredões rochosos, a qual não se encontra discriminada no mapa de uso e ocupação do solo utilizado como referência (elaborado em escala 1:50.000), pela pequena representatividade em área desta classe (Afloramento Rochoso), ou por erros na delimitação vetorial.

No Rio de Janeiro, a correlação entre a altitude e as frações de sombra também foi negativa, na maioria dos casos. A maior correlação foi verificada na classe Mar + Águas interiores. Na imagem de 02/09/2004 foi obtida correlação positiva para a classe Floresta, devido ao sombreamento nas áreas mais elevadas. Embora tenham sido modelados altos valores de sombra nos pixels correspondentes às áreas mais elevadas, as maiores frações de sombra foram verificadas no Oceano Atlântico, Baía de Guanabara e lagoas costeiras, localizadas nas altitudes mais baixas (Tabela 7.5) e de grande expressão em área (Tabela 7.3).

A correlação entre a temperatura e as frações de superfícies impermeáveis e solo foi positiva para todas as classes do Rio de Janeiro, nas duas datas e segundo os dois métodos utilizados para obtenção das imagens de temperatura. Por apresentarem maiores correlações, destacaram-se as classes Mar + Águas interiores e Afloramento rochoso. No primeiro caso, embora a influência possa ser pequena, é natural que áreas mais quentes, mais próximas à costa ou de águas interiores, apresentem maiores frações de superfícies impermeáveis e solo, uma vez que a componente solo influencia a resposta espectral, seja pelo material particulado em suspensão na água, ou pela influência do fundo. No caso da classe de Afloramento rochoso, a presença de rocha exposta contribui para o aumento da temperatura, devido ao maior aquecimento deste tipo de superfície. Entretanto, o resultado para esta classe específica foi inconsistente porque, embora mais baixa, também foi verificada correlação positiva da temperatura com a fração de vegetação.

A correlação entre a temperatura e as frações de vegetação foi positiva para três classes: Mar + Águas interiores, Floresta e Afloramento rochoso, e negativa para as demais. O resultado para a classe Floresta pode ser explicado pelo sombreamento e declividade, já mencionados, e dos pixels de floresta não modelados na aplicação do MESMA (Tabela 5.8). Além disso, a correlação positiva foi mais alta para a data de 25/04/2003, assim como ocorreu com a correlação negativa entre a altitude e a fração vegetação. A influência dos pixels não modelados (excluídos da estatística) sobre este resultado pode ser significativa, pois esta imagem teve aproximadamente 4% a mais de pixels não modelados em relação à imagem de 02/09/2004. No caso da classe Mar + Águas interiores, a tendência de pixels mais quentes apresentarem maiores frações de vegetação pode ser atribuída à presença de matéria orgânica, decorrente da existência de aguapés ou outra espécie de vegetação aquática, principalmente nas lagoas costeiras, ou da própria contaminação hídrica por dejetos provenientes do esgotamento sanitário. Durante o trabalho de campo

esta situação foi observada de forma mais nítida na parte oeste da Baía de Guanabara.

As classes Área urbana e Urbano não consolidado foram as que apresentaram os maiores índices de correlação negativa entre a temperatura e as frações de vegetação. Este resultado confirma que a vegetação exerce um papel de extrema importância na manutenção do conforto térmico, pois a maior representatividade deste elemento da estrutura física urbana foi associada à ocorrência de temperaturas mais amenas.

Para a área de estudo do Rio de Janeiro, a correlação entre as frações de sombra e a temperatura também foi negativa, para todas as classes, datas e métodos empregados (NE e BR). As classes Mar + Águas interiores e Afloramento rochoso se destacaram. Para Afloramento rochoso, este resultado era esperado, pois maiores temperaturas ocorrem em superfícies sem qualquer sombreamento. O resultado para Mar + Águas interiores é coerente com os valores positivos verificados na correlação com as demais frações, já discutido anteriormente. Águas mais profundas tendem a apresentar maiores frações de sombra e menores temperaturas. Com exceção da classe Floresta alterada + Restinga, as maiores correlações foram encontradas para a imagem de 02/09/2004.

Semelhantemente ao que foi verificado em São Paulo, as maiores correlações entre as frações mapeadas e a temperatura da superfície não foram verificadas sempre quando considerados os resultados da aplicação do método da Normalização da Emissividade ou do método da Banda de Referência.

#### **7.4 Conclusões**

As classes de uso e ocupação do solo selecionadas a partir dos mapas elaborados pela EMPLASA e SMAC foram representativas para caracterizar o comportamento dos indicadores altitude, temperatura e frações de elementos da estrutura física urbana, e para efetuar uma análise integrada dos mesmos.

Entretanto, as classes poderiam ser mais bem definidas a partir da interpretação direta das imagens ASTER (mesma data e escala compatível) ou a partir de uma classificação visual ou automática de imagens de outro sensor, adequadamente validada, para uso como referência. Como algumas classes selecionadas foram muito pontuais, pequenos erros de posicionamento podem justificar correlações não esperadas e de difícil justificação.

Com exceção das classes que representam corpos d'água, não foram encontradas correlações altas (acima de 0,6) entre a temperatura e as imagens-fração. Dessa forma, novos estudos poderão ser realizados no intuito de aplicar modelos de regressão linear para a predição de temperaturas da superfície, caso as frações físicas sejam conhecidas, por exemplo.

Em novos trabalhos poderá ser testada uma classificação com base nas frações mapeadas. O grande desafio permanece sendo: como conseguir a diferenciação entre as classes de uso e ocupação do solo, para evitar confusões e facilitar a classificação de imagens?

Os resultados obtidos por Weng et al. (2004) indicaram correlações negativas mais altas para a classe Culturas, seguida de Floresta e de área Residencial. Estes resultados são semelhantes aos deste estudo quanto ao sentido da correlação. Entretanto, não é possível tecer comparações entre eles. Isto porque foi utilizado outro tipo de dado (imagem Landsat ETM+ de Indianápolis, EUA, com resolução espacial de 30 m para os seis canais do visível ao infravermelho médio e 60 m para o canal termal); a área de estudo apresenta outras características de uso e ocupação do solo (classificado pelos autores a partir da imagem ETM+ utilizada); e foi empregada análise de mistura espectral simples (SMA) para a obtenção da imagem-fração vegetação. Além disso, embora Weng et al. (2004) tenham encontrado correlações mais altas, não aplicaram correção dos efeitos da atmosfera nos dados termal. Segundo Voogt e Oke (1998), a falta de correção atmosférica pode introduzir um erro de

aproximadamente 4 a 7°C no cálculo da temperatura, considerando um modelo de atmosfera de verão de médias latitudes.

Embora o percentual de pixels não modelados pelo MESMA para cada imagem não tenha sido muito elevado (Tabela 5.8), a perda destes dados influenciou os resultados do cálculo dos valores médios e desvio padrão e, principalmente, das correlações, principalmente se for levado em conta que, conforme apresentado no Capítulo 5, a maior parte destes pixels representa áreas de cobertura vegetal densa (fração vegetação alta) ou telhados de edificações (fração superfícies impermeáveis alta), tanto em São Paulo quanto no Rio de Janeiro.

A altitude, a estrutura física urbana e o uso do solo influenciam a temperatura da superfície. As áreas urbanas contribuem, em geral, para o aumento da temperatura, enquanto a cobertura vegetal mantém o conforto térmico. Os resultados por classe indicaram uma maior temperatura média para as classes de ambiente construído, como áreas urbanas, em relação às classes de ambiente natural, como as florestas. A variação encontrada foi de 3 a 4°C em São Paulo e de aproximadamente 6°C no Rio de Janeiro.

Nas duas áreas de estudo, face à especulação imobiliária e implantação de equipamentos urbanos, deve ser dada atenção especial, tanto pelo poder público quanto pelos empreendedores privados, à conservação e/ou implantação de áreas verdes, notadamente aquelas voltadas ao lazer da população, tais como praças e parques. As árvores não apresentam somente função estética, mas também função climática. O mercado imobiliário aproveita-se dos atributos naturais da paisagem, muitas vezes inexistentes, para divulgar imagens ilustrativas dos empreendimentos, como edifícios sempre cercados por cobertura vegetal, ainda que, na realidade, isso não ocorra. Os gestores municipais e a sociedade devem se preocupar com a arborização das vias urbanas, pois ela beneficia o conforto térmico, principalmente em regiões tropicais. Infelizmente, em geral, a arborização viária

encontra-se restrita somente às áreas de ocupação urbana residencial antiga. Campanhas de arborização também são recomendadas por autores como Small e Miller (2000), para amenizar os efeitos da ilha de calor urbana bem como remover poluentes do ar. Diferentemente do que ocorre em São Paulo e no Rio de Janeiro, é importante que as áreas florestadas não estejam concentradas somente nas áreas de altitudes mais elevadas e/ou de maior declividade, alvos da expansão urbana tanto por favelas quanto por condomínios horizontais de alto padrão. Além disso, não devem estar concentradas espacialmente, e a sua distribuição deveria levar em conta a densidade populacional.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. Os resultados obtidos mostraram o potencial de aplicação dos dados de sensoriamento remoto na geração de subsídios ao Planejamento Urbano e Metropolitano de São Paulo e Rio de Janeiro, classificados pela hierarquia urbana brasileira como metrópoles nacionais. O objetivo geral do trabalho: explorar o potencial de todas as bandas do ASTER/Terra, inclusive as cinco termiais, no estudo do ambiente urbano de São Paulo e Rio de Janeiro, bem como avaliar novas técnicas de análise desses dados, foi atingido. As técnicas de análise de imagens ASTER adotadas se mostraram viáveis para estudos urbanos em mesoescala, aproveitando-se do baixo custo relativo desses dados.

2. Dados de todas as bandas ASTER foram explorados na pesquisa. Os dados das bandas 3N e 3B foram utilizados para a obtenção dos MDEs, os dados das cinco bandas do subsistema TIR foram utilizados para a obtenção das imagens em temperatura, dados das três bandas do VNIR e das seis bandas do SWIR foram utilizados na aplicação do MESMA, e a análise de correlação com a concentração de material particulado requereu dados de todos os 14 canais. Os dados termiais multiespectrais foram explorados aproveitando-se de modernas técnicas existentes em programas de processamento de imagens.

3. É importante considerar a respeito do futuro do sensor ASTER, por enquanto atrelado à continuidade do programa espacial *Earth Observing System* (EOS) e operando somente por programação, pois o tempo de operação disponível por órbita do satélite Terra é dividido entre seus cinco sensores. Outros estudos urbanos poderão ser desenvolvidos utilizando dados adquiridos por sensores orbitais ou aerotransportados com um maior número de bandas espectrais, tanto nos comprimentos de onda do espectro refletido quanto do emitido. Para tanto, ressalta-se o elevado potencial de aplicabilidade do sensor *Hyperspectral Scanner System* (HSS) do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM).

4. Os algoritmos selecionados para o processamento das imagens (FLAASH, ISAC, *AsterDTM* e *VIPER Tools*) foram empregados com sucesso após os ajustes necessários para reconhecimento e refinamento dos modelos. É importante que pesquisas futuras apliquem e avaliem estes algoritmos em outros ambientes e/ou utilizando outras fontes de dados, como também busquem um melhor refinamento dos parâmetros e a validação dos resultados.

5. Os modelos foram sensíveis às imagens das duas datas, após a realização dos testes para ajuste dos parâmetros de entrada específicos para cada área e data. Embora a análise multitemporal não tenha sido o objetivo do estudo e, apesar do intervalo entre o tempo de aquisição das duas imagens de cada área não ter sido grande, verificou-se a necessidade da construção de bibliotecas espectrais específicas. De uma data para outra, não houve grande alteração nos resultados da análise de correlação entre as variáveis altitude, temperatura da superfície e imagens-fração. Para quase todos os casos, o sentido da correlação e o *ranking* por classe permaneceram inalterados, o que permitiu concluir que a relação entre as variáveis se mantém.

6. Os modelos digitais de elevação obtidos após a correção do módulo *AsterDTM* apresentaram alta correlação com dados topográficos do mapeamento oficial. Entretanto, foi necessário o ajuste dos resultados, pois seus valores foram em média 20 m inferiores aos de referência. Recomenda-se que em novos estudos, utilizando o *AsterDTM* ou outro módulo para o processamento, os MDEs sejam avaliados através da aplicação de equações de regressão linear, ou com a integração de dados de outras fontes, a exemplo do SRTM, e/ou apoio de pontos de controle adquiridos em campo.

7. Os resultados do processamento de dados dos cinco canais termais do ASTER permitiram caracterizar os contrastes termais do espaço intra-urbano, detectando tanto a presença de ilhas de calor quanto a de ilhas de frio em São Paulo e no Rio de Janeiro, em ambas as datas e considerando os diferentes métodos utilizados no processamento. Em novos estudos estes resultados

poderão ser comparados com a aplicação de outros algoritmos, com dados de outros sensores ou com outros ambientes.

**8.** A aplicação de modelos de mistura espectral, em particular do modelo MESMA, representa uma inovação para a caracterização da estrutura física urbana no Brasil. Novas pesquisas com MESMA são necessárias, envolvendo principalmente a seleção de componentes de solo e superfícies impermeáveis. Esta recomendação é válida para dados ASTER e dados de outros sensores, com aplicação do *VIPER Tools* ou de outros programas. O algoritmo MESMA pode ser útil na primeira etapa da modelagem de áreas urbanas para ajudar a selecionar o(s) melhor(es) modelo(s). Entretanto, e de acordo com Powell (2006) e Nunes e Souza Júnior (2007), seus resultados devem ser avaliados para definir se as frações de um dado material, geradas por diversos modelos, são ou não consistentes.

**9.** Considerando a influência da circulação do ar, dos diferentes ambientes onde se situam as estações de monitoramento, área de captação, baixa quantidade e densidade, localização inadequada etc., bem como particularidades inerentes às imagens de sensores remotos, não foi verificada alta correlação entre a concentração de material particulado e dados das imagens, semelhante aos resultados apresentados na bibliografia (POLI et al., 1994; WALD; BALEYNAUD, 1999). Entretanto, dada a importância da qualidade do ar para a vida humana e atividades econômicas, é necessário que novos estudos sejam realizados nesse campo de pesquisa, integrando dados de qualidade do ar com dados de sensoriamento remoto de média ou alta resolução espacial.

**10.** Concordamos com Bruna et al. (2004) ao afirmar que soluções individualizadas para os problemas ambientais urbanos perdem significado frente à necessidade de soluções à coletividade, embora o comportamento individual interesse a todos, pois os efeitos da degradação ambiental não são seletivos, mas imprevisíveis e globais. O meio ambiente urbano exige soluções

de massa e não pode ser compartimentado por muros e portões, pois eles não seguram a poluição hídrica, atmosférica, etc. Acima de tudo, é importante que os modelos de desenvolvimento adotados no Brasil e no mundo sejam repensados à luz da necessidade de melhoria na qualidade ambiental urbana e não à lógica do crescimento econômico a qualquer custo. Já se foi o tempo em que os fins justificavam os meios e em que o hoje era mais importante do que o amanhã.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. **ASTER users handbook**. Pasadena: JPL, 1999. 93p. Disponível em: <[asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_Documents/aster\\_user\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf)>. Acesso em: 18 jul. 2007.
- ACHARYA, P. K.; BERK, A.; ANDERSON, G. P.; LARSEN, N. F.; TSAY, S.; STAMNES, K. H. MODTRAN4: multiple scattering and bi-directional reflectance distribution function (BRDF) upgrades to MODTRAN. **SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III**, v. 3756, 1999. Disponível em: <[www.spectral.com/sr115.pdf](http://www.spectral.com/sr115.pdf)>. Acesso em: 18 jul. 2007.
- ARTIS, D. A.; CARNAHAN, W. H. Survey of emissivity variability in thermography of urban areas. **Remote Sensing of Environment**, v. 12, n. 4, p. 313-329, Sept. 1982.
- BAPTISTA, G. M. M. Ilhas urbanas de calor. **Scientific American Brasil**, v. 01, n. 08, p. 55-59, Jan. 2003.
- BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M. Avaliação da altimetria do modelo digital de elevação do SRTM. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 1243-1250. Disponível em: <<http://mar.te.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.13.17/doc/1243-1250.pdf>> Acesso em: 18 jul. 2007.
- BATTY, M.; HOWES, D. Predicting temporal patterns in urban development from remote imagery. In: DONNAY, J. P.; BARNSLEY, M. J.; LONGLEY, P. A. (Ed.) **Remote sensing and urban analysis**. London: Taylor and Francis, 2001, p. 185-204.
- BEAVERSTOCK, J. V.; TAYLOR, P. J.; SMITH, R. G. A roster of world cities. **Cities**, v. 16, n. 6, p. 445-458, Dec. 1999.
- BEZERRA, T. S.; BRANDÃO, A. M. P. M. Análise gerencial do espaço urbano sob a ótica climática: um estudo de caso aplicado ao bairro Maracanã. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 7, 1997, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UFPR, 1997. v. 1, p. 283-283.
- BOARDMAN, J. W.; KRUSE, F. A.; GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. FIFTH JPL AIRBORNE EARTH SCIENCE WORKSHOP, **JPL Publications 95-1**, n. 1, 1995, p. 23-26. Disponível em: <<http://www.hgimaging.com/PDF/boardman95.PDF>> Acesso em: 18 jul. 2007.
- BRAGA, R. Sobre o conceito de cidade média. **Território & Cidadania**, v. 4, n. 2, Jul. 2004. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/planejamento/territoriocidadania/Artigos/Braga%207.htm>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

BRANDÃO, A. M. P. M. **O Clima urbano da cidade do Rio de Janeiro**. 1996. 362p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1996.

BRUNA, G. C.; ROMÉRO, M. A.; PHILIPPI JÚNIOR, A. Ecologia urbana no panorama ambiental metropolitano. In: ROMÉRO, M. A.; PHILIPPI JÚNIOR, A.; BRUNA, G. C. (Ed.) **Panorama ambiental da metrópole de São Paulo**. São Paulo: Universidade de São Paulo/Faculdade de Saúde Pública/Faculdade de Arquitetura e Urbanismo/Signus Editora, 2004. p. 1-9.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R. Desenvolvimento de um procedimento simplificado do método *multiple endmember spectral mixture analysis* (MESMA) para o tratamento de imagens hiperespectrais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1249-1256. Disponível em: <mar.te.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.20.17.36/doc/goto-/dpi.inpe.br/lise/2001/09.20.17.38>. Acesso em: 18 jul. 2007.

CHEN, W.; ZHOU, G. Comparison of satellite measured temperatures using Terra ASTER and Landsat ETM+ data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 3, Sept. 2004, p. 1723-1726.

CHUVIECO, E. **Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio**. Barcelona: Ariel, 2002. 586p.

CIFUENTES, L.; BORJA, A. V. H.; GOUVEIA, N.; THURSTON, G.; DAVIS, D. L. Assessing the health benefits of urban air pollution reductions associated with climate change mitigation (2000 – 2020): Santiago, São Paulo, Mexico City and New York. **Environmental Health Perspectives**, v. 109, n. 3, p. 419-425, June 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Índice de qualidade do ar: RMSP: 13/10/2002**. São Paulo: CETESB, 2002. 2p.

\_\_\_\_\_. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo: 2004**. São Paulo: CETESB, 2005. 128p.

\_\_\_\_\_. **Índice de qualidade do ar: RMSP: 17/05/2006**. São Paulo: CETESB, 2006. 2p.

DANNI-OLIVEIRA, I. M. **A cidade de Curitiba/PR e a poluição do ar: implicações de seus atributos urbanos e geoecológicos na dispersão de poluentes em períodos de inverno**. 1999. 320p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1999.

DENNISON, P. E.; ROBERTS, D. A. Endmember selection for multiple endmember spectral mixture analysis using endmember average RMSE. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 2-3, p. 123-135, Oct. 2003

DENNISON, P.E.; HALLIGAN, K. Q.; ROBERTS, D. A. A comparison of error metrics and constraints for multiple endmember spectral mixture analysis and spectral angle mapper. **Remote Sensing of Environment**, v. 93, n. 3, p. 359-367, Nov. 2004.

DIAS, J. W. C.; FRONDIZI, C. A. **Frequência de coleta de dados da qualidade do ar ambiente nas estações de monitoramento de SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> e MP<sub>10</sub>**: conforme a US EPA/40 CFR 58, Seção 58.13: "Operating Schedule". Rio de Janeiro: Energética Qualidade do Ar, 2006. 7p.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO DO EXÉRCITO (DSG). MINISTÉRIO DA GUERRA. **Vila Militar**. 1. ed. Rio de Janeiro: DSG, 1963, Folha SF-23-Q-IV-3. Escala 1: 50.000.

\_\_\_\_\_. **Baía de Guanabara**. 1. ed. Rio de Janeiro: DSG, 1965, Folha SF-23-Q-IV-4. Escala 1: 50.000.

EARTH REMOTE SENSING DATA ANALYSIS CENTER (ERSDAC). **Cross-Talk correction software user's guide**. Tokyo: ERSDAC, 2003. 21p.  
Disponível em: <[http://www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds\\_www2002/service\\_e/u.tools\\_e/cross/GUIDEED.PDF](http://www.gds.aster.ersdac.or.jp/gds_www2002/service_e/u.tools_e/cross/GUIDEED.PDF)> Acesso em: 18 jul. 2007.

EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A (EMPLASA). **Mapa de uso e ocupação do solo da região metropolitana de São Paulo e bacia do Alto Tietê**. São Paulo: EMPLASA, 2005, 1 CD-ROM. Escala 1: 100.000.

EVA, H.; LAMBIN, E. F. Burnt area mapping in Central África using ATSR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 18, p. 3473-3497, Dec. 1998.

FEAGLE, R. G.; BUSINGER, J. A. **An introduction to atmospheric physics**. 2<sup>nd</sup> ed. Orlando: Academic Press, 1980. 432p.

FERNANDES, C. L. L.; MEDEIROS, C. M. O Elemento regional no processo nacional de desenvolvimento. In: CINTRA, A. O.; HADDAD, P. R. (Org.) **Dilemas do planejamento urbano e regional no Brasil**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1978. p. 51-70.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE (FEEMA). DEPARTAMENTO DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL. DIVISÃO DE QUALIDADE DO AR. **Inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos da região metropolitana do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: FEEMA, 2004a. 19p.

\_\_\_\_\_. **Relatório anual da qualidade do ar**: 2003. Rio de Janeiro: FEEMA, 2004b. 97p.

FURLAN, S. A. Paisagens sustentáveis: São Paulo e sua cobertura vegetal. In: CARLOS, A. F. A.; OLIVEIRA, A. U. (Ed.) **Geografias de São Paulo**: a metrópole do século XXI. São Paulo: Contexto, 2004. p. 255-283.

GALLEGO, L. P. **Tipos de tempo e poluição atmosférica no Rio de Janeiro**: um ensaio em climatologia urbana. 1972. 104p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1972.

GALVÃO, L. S. Espectros e imagens. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.) **Sensoriamento remoto**: reflectância dos alvos naturais. Brasília: UnB; Planaltina: EMBRAPA, 2001. p. 251-262.

GODISH, T. **Air quality**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Lewis Publishers, 1997. 448p.

GODOY, S. C.; DIAZ, E. G. Aplicación del modelo digital de elevaciones de ASTER en geomorfología. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2405-2412. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.19.50/doc/2405-2412.pdf>> Acesso em: 18 jul. 2007.

HALLIGAN, K. Q. **Multiple endmember spectral mixture analysis of vegetation in the northwest corner of Yellowstone National Park**. 2002. Dissertação (Mestrado em Geografia) – University of California Santa Barbara (UCSB), Santa Barbara, 2002.

HEROLD, M.; GOLDSTEIN, N. C.; CLARKE, K. C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 286-302, Aug. 2003.

HOOK, S. J.; GABELL, A. R.; GREEN, A. A.; KEALY, P. S. A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geologic studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 42, n. 2, p. 123-135. Nov. 1992

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Resolução CONAMA/n.º 018**, de 06 de maio de 1986. Publicada no D.O.U, de 17/06/86. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res1886.html>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA/n.º 003**, de 28 de junho de 1990. Publicada no D.O.U, de 22/08/90. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>>. Acesso em: 10 fev. 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). DIRETORIA DE GEODÉSIA E CARTOGRAFIA. **Osasco**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1984a, Folha SF-23-Y-C-VI-1. Escala 1: 50.000.

\_\_\_\_\_. **São Paulo**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1984b, Folha SF-23-Y-C-VI-2. Escala 1: 50.000.

\_\_\_\_\_. **Censo demográfico 1991**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censodem/default\\_censo1991.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censodem/default_censo1991.shtm)>. Acesso em: 10 fev. 2006.

\_\_\_\_\_. **Censo demográfico 2000**: características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2000/default.shtm>>. Acesso em: 10 fev. 2006.

\_\_\_\_\_. **Cidades@**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 10 fev. 2006.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. **Caracterização e tendências da rede urbana do Brasil**: configuração atual e tendências da rede urbana. Brasília: IPEA, 2001a. 396p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. **Gestão do solo e disfunções do crescimento urbano**: volume 3: Brasília e Rio de Janeiro. Brasília: IPEA, 2001b. 254p.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. **Gestão do solo e disfunções do crescimento urbano**: volume 4: São Paulo e Campinas. Brasília: IPEA, 2001c. 224p.

INSTITUTO MUNICIPAL DE URBANISMO PEREIRA PASSOS (IPP). SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO DO RIO DE JANEIRO. SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO. **Indicadores ambientais da cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IPP, 2005. 180p.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1983. 390p.

JANNUZZI, P. M. São Paulo, século XXI: a maior metrópole das Américas. **Ciência e Cultura**, v. 56, n. 2, p. 30-32, Abr./Jun. 2004.

JENSEN, J. R.; COWEN, D. C. Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 65, n. 5, p. 611–622, May 1999.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL). CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. **ASTER overview**. Disponível em: <<http://edcdaac.usgs.gov/aster/asteroverview.asp>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

KAHLE, A. B.; ALLEY, R. E. Separation of temperature and emittance in remotely sensed radiance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 42, n. 2, p. 107-111, Nov. 1992.

KEALY, P. S.; HOOK, S. J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: implications for recovering land surface temperatures. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 6, p. 1155-1164. Nov. 1993.

LAMBIN, E. F.; EHRLICH, D. The surface temperature-vegetation index space for land cover and land-cover change analysis. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 3, p. 463-487, Feb. 1996.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 724p.

LO, C. P.; QUATTROCHI, D. A. Land-use and land-cover change, urban heat island phenomenon, and health implications: a remote sensing approach. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 69, n. 9, p. 1053-1063, Sept. 2003.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Hucitec, 1985. 244p.

LU, D.; WENG, Q. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, n. 2, p. 157-167. Sept. 2006.

LUCCA, E. V. D. **Imageamento por sensores infravermelhos**. Apresentação de slides. In: SISTEMAS E SENSORES AVANÇADOS PARA OBSERVAÇÃO DA TERRA E DE SEUS AMBIENTES. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Jul. 2005.

MASCARÓ, L. R. de. **Ambiência urbana: urban environment**. Porto Alegre: Sagra/DC Luzzatto, 1996. 199p.

MATTHIAS, A. D. Atmospheric pollution. In: PEPPER, I. L.; GERBA, C. P.; BRUSSEAU, M. L. (Ed.) **Pollution science**. San Diego: Academic Press, 1996. p. 171-187.

MELGAÇO, L. M.; SOUZA FILHO, C. R.; STEINMEYER, M. Comparação entre modelos digitais de elevação gerados por sensores ópticos e por radar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1215-1220. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.23.00.56/doc/1215.pdf>> Acesso em: 18 jul. 2007.

MESEV, V. T.; LONGLEY, P. A. The role of classified imagery in urban spatial analysis. In: ATKINSON, P. M.; TATE, N. J. (Ed.) **Advances in remote sensing and GIS analysis**. Chichester: John Wiley e Sons, 1999, p. 185-206.

MÖLLER-JENSEN, L. Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat-TM imagery. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 56, n. 6, p. 899-904, June 1990.

MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo: Instituto de Geografia da USP, 1976. 180p.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). **Terra: the EOS flagship**. Disponível em: <<http://terra.nasa.gov/>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

NETER, J.; KUTNER, M. N.; NACHTSSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. 4<sup>th</sup> ed. Boston: WCB/McGraw-Hill, 1996. 791 p.

NICHOL, J. E. High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, n. 1, p. 135-146, Jan. 1996.

NUNES, S. S.; SOUZA JÚNIOR, C. M. Avaliação de modelos de mistura de pixel para áreas urbanas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6885-6892. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.13.18.11/doc/6885-6892.pdf>> Acesso em: 18 jul. 2007.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands, **Atmosphere**, v. 14, n. 4, p. 268-277, 1976.

\_\_\_\_\_. **Boundary layer climates**. London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book; New York: John Wiley & Sons, 1978. 372p.

\_\_\_\_\_. The energetic basis of the urban heat island. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 108, n. 455, p. 1-24, Jan. 1982.

OLIVEIRA, C. G. **Avaliação de modelos digitais de elevação gerados a partir de sensores remotos orbitais óptico (ASTER) e radar (RADARSAT-1, SRTM): um estudo para a região da Serra de Carajás (PA).** 2005. 184p. (INPE-13168-TDI/1027). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

OLIVEIRA, J. L. F.; SANTOS, I. A.; ROSAS, R. O.; LANDAU, L. Bacia aérea III: uma unidade de gerenciamento da qualidade do ar da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO ACADÊMICO SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO DO RIO DE JANEIRO, 2, 2006, Rio de Janeiro. **Anais...** Disponível em: <<http://www.ebape.fgv.br/radma/doc/FET/FET-034.pdf>> Acesso em: 18 jul. 2007.

PARMA, G. C. Processamento de imagem ASTER para obtenção do MDE e da imagem ortoretificada do município de Palhoça, SC, Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6019-6026. Disponível em: <<http://mar.te.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.23.57/doc/6019-6026.pdf>> Acesso em: 18 jul. 2007.

PENHALBER, E. F.; KOHLER, M. C. M.; CORTES, M. T. M.; CABRAL, V. B. Aspectos urbanísticos de espaços públicos e áreas verdes. In: ROMÉRO, M. A.; PHILIPPI JÚNIOR, A.; BRUNA, G. C. (Ed.) **Panorama ambiental da metrópole de São Paulo.** São Paulo: Universidade de São Paulo/Faculdade de Saúde Pública/ Faculdade de Arquitetura e Urbanismo/Signus Editora, 2004. p. 305-349.

POLI, U. F.; PIGNATORO, F.; ROCCHI, V.; BRACCO, L. Study of the heat island over the city of Rome from Landsat-TM satellite in relation with urban air pollution. In: VAUGHAN, R. (Ed.). **EARSeL SYMPOSIUM: Remote sensing – from research to operational applications in the new Europe**, 13, 1994. **Proceedings...** Dundee, Scotland, UK Springer Hungarica, 1994. p. 413-422.

POWELL, R. L. **Long-term monitoring of urbanization in the Brazilian Amazon using remote sensing.** 2006. 257p. Tese (Doutorado em Geografia) – University of California Santa Barbara (UCSB), Santa Barbara, 2006.

RASHED, T.; WEEKS, J. R.; ROBERTS, D. A.; ROGAN, J.; POWELL, R. L. Measuring the physical composition of urban morphology using multiple endmember spectral mixture models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 69, n. 9, p. 1011-1020, Sep. 2003.

RASHED, T. **Multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) of ASTER data for Cairo.** Presentation. In: WORKSHOP ON APPLIED URBAN REMOTE SENSING. Arizona State University, Tempe, AZ, Apr. 2004. Disponível em: <<http://elwood.la.asu.edu/grsl/UEM/>> Acesso em: 10 fev. 2006.

REIS, N. G.; TANAKA, M. S. (Ed.) **Brasil: estudos sobre dispersão urbana**. São Paulo: FAU/USP, 2007. 429 p.

RESEARCH SYSTEMS INCORPORATED (RSI). **ENVI user's guide**. Version 4.2. Boulder: RSI, 2005.

RIDD, M. K. Exploring a V-I-S (vegetation – impervious surface – soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, n. 12, p. 2165-2185, Aug. 1995.

RIO DE JANEIRO. PREFEITURA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO. **Armazém de dados**. Disponível em: <<http://www.armazemdedados.rio.rj.gov.br/>> Acesso em: 10 fev. 2006.

ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture model. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p. 267-279, Sept. 1998.

ROBERTS, D. A.; HALLIGAN, K. **VIPER Tools user manual**. Version Beta 6.0. Santa Barbara: University of California Santa Barbara, 2006. 52p. Disponível em: <[http://www.vipertools.org/download/VIPER\\_Tools\\_user\\_manual\\_v12.pdf](http://www.vipertools.org/download/VIPER_Tools_user_manual_v12.pdf)> Acesso em: 18 jul. 2007.

RUSSO, P. R. **A Distribuição das concentrações de partículas em suspensão na atmosfera da porção centro-oriental do município do Rio de Janeiro**: considerações preliminares sobre a correlação saúde pública e poluição atmosférica. 2002. 158p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2002.

SALDANHA, C. B.; ALVES, R. C. M. Utilização de imagens de satélite e modelagem numérica para determinação de dias favoráveis a dispersão de poluentes. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3301-3308. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/ltd.inpe.br/sbsr/2004/11.17.14.16/doc/3301.pdf>> Acesso em: 18 jul. 2007.

SALISBURY, J. W.; D'ÁRIA, D. M. Emissivity of terrestrial materials in the 8-14  $\mu\text{m}$  atmospheric window. **Remote Sensing of Environment**, v. 42, n. 2, p. 83-106, Nov. 1992.

SÃO PAULO. PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Atlas ambiental do município de São Paulo**. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo/Secretaria Municipal do Meio Ambiente/Secretaria Municipal de Planejamento Urbano, 2002. Disponível em: <<http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/index.php?id=13>>. Acesso em: 10 fev. 2006.

\_\_\_\_\_. **Município em dados**. Disponível em: <<http://www9.prefeitura.sp.gov.br/sempla/md/index.php>> Acesso em: 10 fev. 2006.

SCARLATO, F. C. População e urbanização brasileira. In: ROSS, J. L. S. (Org.) **Geografia do Brasil**. São Paulo: Edusp, 1998. p. 381-463.

SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE DO RIO DE JANEIRO (SMAC). **Mapa de uso e cobertura da terra na cidade do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: SMAC, 2001, 1 CD-ROM. Escala 1: 50.000.

\_\_\_\_\_. **Relatório mensal da qualidade do ar: dezembro de 2005**. Rio de Janeiro: SMAC, 2006. 150p.

SERRA, A. Poluição atmosférica no Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 50, n. 1, p. 93-99, Jan/Mar. 1988.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16-21, Jan. 1991.

SIFAKIS, N.; DESCHAMPS, P. Mapping of air pollution using SPOT satellite data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 58, n. 10, p. 1433-1437, Oct. 1992.

SLATER, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1980. 593p.

SMALL, C. A global analysis of urban reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 4, p. 661–681, Feb. 2005.

SMALL, C.; MILLER, R. B. Spatiotemporal monitoring of urban vegetation. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, Capetown, África do Sul, 2000. **Proceedings...** Disponível em: <[www.ldeo.columbia.edu/~small/PDF/ISRSE\\_SmallMiller.pdf](http://www.ldeo.columbia.edu/~small/PDF/ISRSE_SmallMiller.pdf)>. Acesso em: 10 fev. 2006.

SMITH, A. M. S. **How to convert ASTER radiance values to reflectance: an online guide**. Disponível em: <<http://www.cnrhome.uidaho.edu/default.aspx?pid=85984>> Acesso em: 18 jul. 2007.

SNYDER, W. C.; WAN, Z.; ZHANG, Y.; FENG, Y. Z. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. **International Journal of Remote Sensing**, v. 19, n. 14, p. 2753-2774, Sept. 1998.

SOUSA, C. J. S. **Carta de vulnerabilidade à erosão como subsídio ao zoneamento ecológico-econômico em área intensamente antropizada**. 1999. 172p. (INPE-7030-TDI/662). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1999.

SOUSA, D. O.; BAPTISTA, G. M. M. Análise da influência da resolução espacial na determinação das ilhas urbanas de calor em São Paulo, por meio dos sensores ASTER e MODIS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4525-4530. Disponível em: <<http://martem.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.18.16.41/doc/4525.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

SULSOFT. **AsterDTM 2.2: instalation & user's guide**. Porto Alegre: Sulsoft, 2005. 24p. Disponível em: <[http://www.envi.com.br/asterdtm/download/AsterDTM\\_UserGuide\\_V2\\_2.pdf](http://www.envi.com.br/asterdtm/download/AsterDTM_UserGuide_V2_2.pdf)> Acesso em: 18 jul. 2007.

TARIFA, J. R.; ARMANI, G. Unidades climáticas urbanas da cidade de São Paulo. In: PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. SECRETARIA DO VERDE E DO MEIO AMBIENTE. SECRETARIA DE PLANEJAMENTO. **Atlas ambiental do município de São Paulo – Fase I: “Diagnósticos e bases para a definição de políticas públicas para as áreas verdes no município de São Paulo”**. São Paulo: PMSP, 2000. 86p.

TEZA, C. T. V.; BAPTISTA, G. M. M. Identificação do fenômeno ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER *on demand* 08 – *Kinetic Temperature* (III): metrópoles brasileiras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3911-3918. Disponível em: <[martem.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.01.17.52/doc/3911.pdf](http://martem.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.01.17.52/doc/3911.pdf)>. Acesso em: 18 jul. 2007.

TULLOCH, M.; LI, J. Applications of satellite remote sensing to urban air-quality monitoring: status and potential solutions to Canada. **Environmental Informatics Archives**, v. 2, chap. 7, p. 846-854, 2004.

UNG, A.; WALD, L.; RANCHIN, T.; WEBER, C.; HIRSCH, J.; PERRON, G.; KLEINPETER, J. Satellite data for air pollution mapping over a city – Virtual stations. In: EARSeL SYMPOSIUM: Observing our environment from space: new solutions for a new millennium, 21, 2001, Paris. **Proceedings...** Tokyo, 2001, p. 147-151.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Imprensa Universitária da UFV, 1991. 449p.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 370-384, Aug. 2003.

WALD, L.; BALEYNAUD, J. M. Observing air quality over the city of Nantes by means of Landsat thermal infrared data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 20, n. 5, p. 947-959, Mar. 1999.

WEBER, C.; HIRSCH, J.; PERRON, G.; KLEINPETER, J.; RANCHIN, T.; UNG, A.; WALD, L. Urban morphology, remote sensing and pollutants distribution: an application to the city of Strasbourg, France. In: WORLD CLEAN AIR & ENVIRONMENT CONGRESS, 12, 2001, Seul. **Proceedings...** Seul: [s.n], 2001. 5p.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 69, n. 5, p. 555-566, May 2003.

WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. **Remote Sensing of Environment**, v. 89, n. 4, p. 467-483, Feb. 2004.

WILLIAMS, D. **Landsat-7 science data user's handbook**. NASA: 2004. Disponível em: <[http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html)>. Acesso em: 18 jul. 2007.

WOOSTER, M. J. In orbit calibration of the ATSR-I 1.6 $\mu$ m channel using high resolution data from the JERS-1 (Fuyo-1) optical sensor. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, n. 5, p. 1069-1074, Mar. 1996.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **The World Health Report 2002** – reducing risks, promoting healthy life. Geneva, WHO, 2002. 268p. Disponível em: <<http://www.who.int/heli/risks/urban/urbanenv/en/>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

YOUNG, S. J.; JOHNSON, B. R.; HACKWELL, J. A. An in-scene method for atmospheric compensation of thermal hyperspectral data. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D24, 4774, ACH 14, 2002.

ZALOTI JÚNIOR, O. D.; FREITAS, C. C.; SANT'ANNA, S. J. S.; ANDRADE, R. A. M. Avaliação do modelo digital do terreno extraído de dados do SRTM – uma abordagem baseada na declividade, aspecto e uso/cobertura do solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 5043-5050. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.18.43/doc/5043-5050.pdf>>. Acesso em: 18 jul. 2007.

## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programa de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. São aceitos tanto programas fonte quanto executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.