

## Estudo preliminar da influência da concentração de material particulado no ar sobre dados de imagens de satélite

Marcus Andre Fuckner<sup>1,2</sup>  
Elisabete Caria Moraes<sup>2</sup>  
Teresa Gallotti Florenzano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sistema de Proteção da Amazônia – SIPAM  
Avenida Júlio César, 7060 – Val-de-Cans – 66617-420 – Belém – PA, Brasil  
{marcus.fuckner@sipam.gov.br}

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE  
Avenida dos Astronautas, 1758 – 12245-970 – São José dos Campos – SP, Brasil  
{marcus, bete, teresa}@dsr.inpe.br

**Abstract.** The influence of water vapor and others atmosphere constituents on remote sensing images has been widely studied. Nonetheless, the effects of the air pollution on the radiation balance in the local scale and, therefore, on the data recorded by sensors in the visible spectrum and the thermal infrared spectrum are scarcely known yet. The goal of this paper was to verify the relation between concentration of particulate matter data in air, collected by automatic monitoring stations in the Metropolitan Regions of São Paulo and Rio de Janeiro, and spectral data acquired by the ASTER sensor. The relation was examined based on data available for different study areas and information obtained from fieldwork, using multivariate statistical methods. Departing from the results found in the literature, there was no correlation between the concentration of particulate matter and the image data. This can be a result of the low number and density of monitoring stations, their inadequate localization, captation area, and of characteristics of remote sensing images, discussed in this paper. Nevertheless, considering the importance of the air quality to health and human activities, new studies on this subject, integrating air quality data with remote sensing data from medium or high spatial resolution, are important.

**Palavras-chave:** air quality, particulate matter, apparent temperature, ASTER, qualidade do ar, material particulado, temperatura aparente, ASTER.

### 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, entretanto a modernização da indústria foi responsável pela diversificação dos poluentes que compõem o ar das cidades. Os poluentes presentes na atmosfera podem ser classificados em relação à sua origem em poluentes primários e poluentes secundários. Os primários são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão, e os 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.

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). 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. 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). Partículas superiores a 10 µm geralmente permanecem suspensas na atmosfera por um período inferior a 24 h, enquanto partículas menores que 1 µm podem permanecer por semanas (MATTHIAS, 1996).

Estações de monitoramento da qualidade do ar encontram-se instaladas em inúmeras aglomerações urbanas do mundo, e elas determinam as concentrações de poluentes por métodos de amostragem. Este trabalho tem por objetivo verificar a relação entre dados de concentração de material particulado no ar coletados por estações automáticas de monitoramento nas Regiões Metropolitanas de São Paulo (RMSP) e do Rio de Janeiro (RMRJ) e dados espectrais adquiridos pelo sensor *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo da plataforma espacial Terra. Esta relação é analisada com base nos dados disponíveis para as diferentes áreas de estudo e demais informações obtidas a partir de trabalho de campo, usando métodos estatísticos multivariados.

## 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 envolvem medições da espessura dos aerossóis na atmosfera, análise visual das imagens orbitais, medições de 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 1, 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).



Figura 1. Efeitos da poluição atmosférica sobre o balanço de radiação.

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. 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 localizada nas dependências de uma Usina Termelétrica foram considerados como dados de referência.

Em Geografia, a maioria dos trabalhos envolvendo qualidade do ar são estudos multitemporais que utilizam dados de estações manuais ou automáticas, mas não de sensoriamento remoto. O problema da poluição atmosférica é analisado considerando sua distribuição espacial e associações com o sítio urbano, densidade demográfica, atividades econômicas, eixos de transporte e ritmos dos tipos de tempo (DANNI-OLIVEIRA, 1999; GALLEGOS, 1972; OLIVEIRA et al., 2006; RUSSO, 2002; SERRA, 1988). Diferentemente dessas abordagens, neste estudo foram correlacionados dados de 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.

### 3. Material e Métodos

As imagens dos cinco canais termais ASTER foram convertidas de emitância para temperatura aparente pela Equação 1, com base na Lei de Planck, que descreve a distribuição espectral da radiação emitida por um corpo-negro (SLATER, 1980; IQBAL, 1983):

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

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 da RMSP foram fornecidos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e da RMRJ pela Fundação Estadual de Engenharia de Meio Ambiente (FEEMA) e Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro (SMAC). Como as imagens de satélite adquiridas no período matutino, por volta de 10:30 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 a cada seis dias, e representam a concentração em um período de 24 horas, das 00:00 às 23:59 h.

Os parâmetros medidos na RMSP e na RMRJ são: partículas inaláveis ( $PI_{10}$   $PI_{2,5}$ <sup>1</sup>), partículas totais em suspensão ( $PTS$ <sup>2</sup>), óxidos de enxofre ( $SO_x$ ), dióxido de enxofre ( $SO_2$ ), óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), monóxido de nitrogênio (NO), dióxido de nitrogênio ( $NO_2$ ), monóxido de carbono (CO), metano ( $CH_4$ ), hidrocarbonetos (HC), hidrocarbonetos menos metano (HCMM), ozônio ( $O_3$ ), 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).

Das 23 estações automáticas da CETESB na RMSP, 14 estão instaladas em São Paulo, duas em Santo André, e uma em Diadema, Guarulhos, Mauá, Osasco, São Bernardo do

<sup>1</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>2</sup> Partículas menores que  $100 \mu\text{m}$ .

Campo, São Caetano do Sul e Taboão da Serra (CETESB, 2005). As estações móveis são deslocadas para locais onde não existem estações ou para estudos complementares à própria rede. Na RMRJ encontram-se instaladas oito estações automáticas fixas, seis no Rio de Janeiro e uma em Nova Iguaçu e São Gonçalo, e há uma estação móvel (FEEMA, 2004b; SMAC, 2006). Nas duas regiões, as diversas estações não monitoram todos os parâmetros.

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.

Foram visitadas todas as 23 estações automáticas de monitoramento fixas localizadas na RMSP durante o trabalho de campo. Na RMRJ foram visitadas somente as oito estações automáticas fixas e móveis localizadas no município do Rio de Janeiro. O trabalho de campo foi efetuado nos meses entre abril e setembro de 2006 e permitiu o reconhecimento dos equipamentos utilizados para a medição dos parâmetros, da localização e observação do uso e cobertura da terra no entorno das estações, visita aos escritórios das agências oficiais responsáveis pelo monitoramento, obtenção de fotografias e de coordenadas geográficas<sup>3</sup>.

Os dados de interesse foram extraídos dos arquivos originais solicitados aos órgãos de monitoramento 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 organização dos dados (Tabela 1) demandou a adoção de conversões em função da aplicação de diferentes unidades de medida pelos órgãos responsáveis (SMAC e FEEMA) para a divulgação dos parâmetros de qualidade do ar monitorados na RMRJ. Nas datas do estudo algumas estações apresentaram problemas com os monitores, não registraram dados no horário, ou encontravam-se desativadas. Não foi possível detectar a validade do dado registrado pela estação de São Cristóvão em 25/04/2003 (235), pois seu valor foi muito superior aos demais. Conforme a FEEMA (2004b), no ano de 2003 não foi verificada concentração superior a 150 µg/m<sup>3</sup> em qualquer uma de suas estações na RMRJ.

Para a análise da relação entre os poluentes e os dados das imagens foi calculada a correlação entre a concentração de PI<sub>10</sub>, medida pela estação, e o valor de temperatura aparente registrado na imagem. Adotaram-se como variáveis dependentes os dados (na localização das estações<sup>4</sup>) de temperatura aparente, e como variáveis explicativas os índices de concentração medidos pelas estações de monitoramento.

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 sua dispersão. 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, e fatores como as características da estrutura física urbana são relevantes para explicar as concentrações verificadas em determinadas áreas. Foram obtidos dados meteorológicos coletados por estações automáticas devido à necessidade de correspondência de horários com o imageamento<sup>5</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. No Rio de Janeiro, as universidades locais não dispõem de estações meteorológicas automáticas ou convencionais.

<sup>3</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.

<sup>4</sup> Segundo os órgãos de monitoramento, 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.

<sup>5</sup> O INMET não possui estações meteorológicas automáticas nas áreas de estudo.

Tabela 1. Concentração de  $PI_{10}$  monitorada (em *itálico*, estações fora da área de estudo).

Estação (RMSP)	$PI_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		Estação (RMRJ)	$PI_{10}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	13/10/02 (Dom)	17/05/06 (Qua)		25/04/03 (Sex)	02/09/04 (Qui)
Parque Dom Pedro II	44,6	51,2	São Cristóvão II <sup>1</sup>	235	65
Santana	47,6	8,0	Praça Saenz Peña <sup>1</sup>	85	65
Cambuci	31,5	42,2	Centro III <sup>1</sup>	72	-
Ibirapuera	-	12,9	Copacabana II <sup>1</sup>	78	49
Nossa Senhora do Ó	-	13,3	Barra da Tijuca <sup>1,3</sup>	-	113
<i>São Caetano do Sul</i>	<i>47,6</i>	<i>35,1</i>	Lagoa <sup>2,3</sup>	-	28
Congonhas	61,3	21,5	Centro P <sup>2</sup>	62,1	43
Lapa	45,3	-	Jacarepaguá <sup>2</sup>	31	40,9
Cerqueira César	35,4	-	<i>Nova Iguaçu</i> <sup>2</sup>	<i>81</i>	<i>46,2</i>
Centro	71,2	-	<i>São Gonçalo</i> <sup>2</sup>	<i>19</i>	<i>44,4</i>
<i>Santo André - Centro</i>	<i>71,9</i>	<i>18,9</i>	<sup>1</sup> Estação da SMAC.		
<i>Diadema</i>	-	<i>27,5</i>	<sup>2</sup> Estação da FEEMA.		
Santo Amaro	41,4	7,7	<sup>3</sup> Estação móvel.		
Osasco	47,9	61,9			
<i>Santo André - Capuava</i>	<i>46,9</i>	<i>24,2</i>			
<i>São Bernardo do Campo</i>	-	<i>28,7</i>			
Taboão da Serra	-	21,0			
<i>São Miguel Paulista</i>	<i>114,4</i>	-			
<i>Mauá</i>	<i>60,6</i>	<i>17,2</i>			
Pinheiros	6,7	44,0			

#### 4. Resultados

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. Segundo registros da estação do IAG, nos quatro dias anteriores a 17/05/2006 não houve registro de precipitação. Na data de 13/10/2002, não ocorreu precipitação 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 elaborados para o horário das 15:00 h confirmam esta análise, pois apontam as condições verificadas como favoráveis à dispersão dos poluentes.

Conforme Gallego (1972) e FEEMA (2004a) na cidade do Rio de Janeiro o período de maior poluição corresponde aos meses de maio a setembro. Devido à atuação de sistemas de alta pressão, ocorrem com frequência situações de estagnação atmosférica, que contribuem para o agravamento da poluição. Além desses fatores, a região está sujeita às características do clima tropical, com intensa radiação solar e altas temperaturas, favorecendo os processos fotoquímicos e outras reações na atmosfera, com geração de poluentes secundários como o ozônio. 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 do interior, tal como a zona norte. 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 2 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. O coeficiente de correlação também foi calculado 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 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 2. Correlação entre a concentração de material particulado e as imagens termais brutas e em temperatura aparente.

Imagem		Banda ASTER				
		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

Para a inclusão de um número maior de observações na análise de correlação, Ung et al. (2001) utilizaram o método das estações virtuais. As estações virtuais corresponderiam aos pixels que apresentassem os mesmos números digitais (em todas as bandas) que os pixels nos quais estão localizadas as estações. 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 virtuais poderia facilitar o mapeamento da distribuição dos poluentes sobre a área de interesse através de interpolação. Este método não foi utilizado, pois há muitas outras variáveis que influenciam a resposta espectral do pixel nas diferentes bandas, e não apenas a concentração de material particulado.

## 5. Discussão

Durante o trabalho de campo foi observado que tanto na RMSP quanto no Rio de Janeiro várias estações encontram-se instaladas sob árvores frondosas, o que possivelmente influencia nos dados registrados, de acordo com a circulação do ar no local, e no sinal detectado pelo sensor, tanto no visível quanto no termal. Em muitos casos, as estações não são instaladas nos locais mais adequados por não haverem locais públicos. É importante citar que há conflitos de medição, pois um local adequado para medir material particulado pode não ser o mais adequado para ozônio. Em geral é mais viável, prático e barato, que os diversos equipamentos sejam instalados em uma mesma estação. Além disso, a instalação deve ser feita em locais onde há vigilância, para se evitar problemas como furtos, verificados em São Paulo.

O fato de não se encontrar 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. Além disso, conforme informações repassadas por técnicos que operam os sistemas, os dados coletados pelas estações 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, pois se trata de análises pontuais e experimentais.

## 6. Considerações Finais

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 2 com a sobreposição da localização atual das estações. Principalmente em São Paulo, as áreas de maior expansão demográfica não possuem estações. Estas áreas constituem, portanto, locais recomendados para a implantação de novas estações.

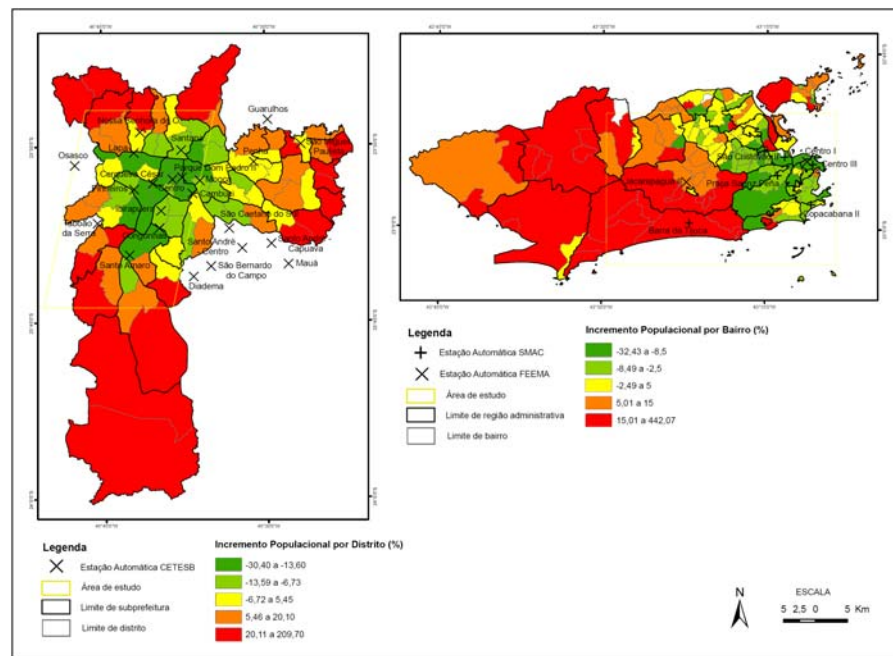


Figura 2. Incremento populacional nos municípios de São Paulo e Rio de Janeiro (1991 a 2000) e localização das estações de monitoramento da qualidade do ar.

## Agradecimentos

À CETESB, pela distribuição aberta de dados. Em especial ao apoio de Maria Guardani e Jesuíno Romano. À FEEMA, em especial à Alzira da Silva. À SMAC. À USP, pelos dados da estação do IAG. À Prefeitura de São Paulo, pela cessão de dados demográficos e vetoriais. À Prefeitura do Rio de Janeiro através do IPP. À Marisa Fonseca, pela revisão. Ao INPE e à Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto pelo financiamento do trabalho de campo e ao CNPq pela bolsa de estudo.

## Referências

- 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). **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo**: 2004. São Paulo: CETESB, 2005. 128p.
- Danni-Oliveira, I. M. **A cidade de Curitiba/PR e a poluição do ar**. 1999. 320p. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1999.
- Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA). **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.
- 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.
- Godish, T. **Air quality**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Lewis Publishers, 1997. 448p.
- Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). **Resolução CONAMA/n.º 003**, de 28 de junho de 1990. Publicada no D.O.U, de 22/08/90.
- Iqbal, M. **An introduction to solar radiation**. New York: Academic Press, 1983. 390p.
- 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.
- Oke, T. R. **Boundary layer climates**. London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book; New York: John Wiley & Sons, 1978. 372p.
- 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>>
- 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: Proceedings...** Dundee, Scotland, UK Springer Hungarica, 1994. p. 413-422.
- Russo, P. R. **A Distribuição das concentrações de partículas em suspensão na atmosfera da porção centro-oriental do município do Rio de Janeiro**. 2002. 158p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2002.
- Saldanha, A. 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.
- Secretaria Municipal de Meio Ambiente do Rio de Janeiro (SMAC). **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, 1988.
- Slater, P. N. **Remote sensing: optics and optical systems**. Reading: Addison-Wesley Publishing Co., 1980. 593p.
- 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: **Proceedings...** Tokyo, 2001, p. 147-151.
- 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.