

Simulação das emissões atmosféricas sobre o município de Araucária com uso do modelo AERMOD

Simulation of atmospheric emissions over Araucaria municipality using the AERMOD model

Amarildo Barbon

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Especialista em Planejamento e Gerenciamento Estratégico pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR). Mestre em Gestão Ambiental pela Universidade Positivo

Júlio Gomes

Engenheiro Civil pela UFPR. Mestre em Engenharia Hidráulica pela UFPR.

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor do Programa de Mestrado em Gestão Ambiental da Universidade Positivo

Resumo

O objetivo do presente trabalho foi avaliar o uso de um modelo computacional de dispersão de poluentes em meio atmosférico, modelo AERMOD, na modelagem da dispersão das emissões atmosféricas produzidas pelas principais indústrias do município de Araucária. Os dados estimados de emissões de poluentes na atmosfera referem-se às fontes estacionárias da refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) e das principais indústrias que compõem o distrito industrial de Araucária. Não foram utilizados dados das fontes móveis por representarem uma pequena parcela da carga total de poluentes. Inicialmente, o modelo AERMOD foi avaliado pela comparação entre concentrações simuladas e concentrações observadas de óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), monóxido de carbono (CO) e materiais particulados (MP) na estação de amostragem de qualidade do ar existente na REPAR. Realizou-se uma análise de sensibilidade do modelo AERMOD em diferentes cenários de emissões, procurando avaliar a influência da variação dos parâmetros de entrada do modelo sobre as concentrações simuladas para a estação REPAR e para a região central do município de Araucária.

Palavras-chave: qualidade do ar; poluição do ar; AERMOD; município de Araucária.

Abstract

The present paper aims to evaluate the use of the air quality model AERMOD to simulate the dispersion of atmospheric emissions produced by the main industries located in the Araucária municipality area. Pollutant emissions were estimated for both stationary sources in the President Getúlio Vargas Refinery (REPAR) and stationary sources in the main industries located at the industrial district of Araucária municipality. As the pollutant emissions from mobile sources are small in comparison to stationary sources, the simulations were performed using only emissions from the stationary sources. Initially, the AERMOD model was evaluated by comparing simulated concentrations and observed concentrations from the air quality station located inside the REPAR. The observed data concerns the following pollutants: nitrogen oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x), carbon monoxide (CO) and particulate matter (MP). A sensitivity analysis was performed to evaluate the influence of input data variations on the simulated concentrations for two air quality stations located at REPAR and downtown Araucária.

Keywords: air quality; air pollution; AERMOD; Araucaria municipality.

Introdução

O crescimento acelerado da população no último século e as alterações nas necessidades do homem produziram um expressivo aumento na demanda energética, cuja principal fonte é o petróleo. O petróleo, porém, não é uma energia renovável, de

forma que se faz necessário um melhor aproveitamento dessa matéria prima, com programas de utilização máxima de derivados. Concomitantemente a isso, a legislação ambiental introduziu alterações nos padrões de emissões por fontes fixas e móveis que exigiram adequações da indústria e inovação nos combustíveis utilizados, visando à redução de compostos de enxofre e nitrogênio

Endereço para correspondência: Júlio Gomes – Rua Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, 5.300 – 81280-330 – Curitiba (PR), Brasil – Fone: (41) 3317-3277 – e-mail: jgomes@up.edu.br

Recebido: 4/6/08 – Aceito: 3/3/10 – Reg. ABES: 088 08

em sua composição e, conseqüentemente, das quantidades de gases poluentes lançados na atmosfera. Visando à adequação do parque de refino a esta realidade, faz-se necessária a construção de novas unidades de refino de petróleo e derivados, o que implica a introdução de novas fontes emissoras fixas de poluentes decorrentes da ampliação das refinarias.

Caputo, Gimenez e Schlamp (2003) ressaltam a importância especial atribuída aos possíveis riscos aos quais a população está submetida durante a dispersão atmosférica de poluentes gerados por diversas fontes, como, por exemplo, indústrias petroquímicas, indústrias siderúrgicas, indústrias de papel e celulose e indústrias cimenteiras e que estão sendo desenvolvidos modelos para a avaliação dos impactos decorrentes das emissões, modelos estes que constituem ferramentas úteis para assessorar estudos de minimização de riscos e gerenciamento dos recursos disponíveis em caso de acidentes.

Schlink *et al* (2006) destacam que um aspecto fundamental a ser considerado em pesquisas atmosféricas envolvendo a dispersão de poluentes é a preservação da saúde humana, ou seja, o desenvolvimento do conhecimento com vistas à aplicação em benefício da saúde e bem-estar do ser humano. Considerando o exposto, pode-se afirmar que o uso de uma ferramenta de simulação de dispersão de poluentes em meio atmosférico é bastante útil na medida em que permite fazer simulações e previsões das concentrações de um determinado poluente, podendo oferecer à população a oportunidade de evitar exposições a concentrações elevadas; às empresas, condições de prever investimentos em equipamentos que permitam reduzir emissões na atmosfera; e aos órgãos públicos, a possibilidade de realizar questionamentos acerca de novos empreendimentos, cujos efluentes atmosféricos contribuam para a degradação das condições de qualidade do ar.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o uso do modelo de qualidade do ar AERMOD na modelagem da dispersão das emissões atmosféricas produzidas pelas principais indústrias do distrito industrial do município de Araucária, tendo como foco de interesse a qualidade do ar na região central do referido município. O modelo AERMOD foi utilizado para simular concentrações dos poluentes NO_x , SO_x , CO e Materiais Particulados. O trabalho foi desenvolvido principalmente com vistas a permitir uma futura avaliação do impacto do programa de modernização da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) sobre a qualidade do ar na região central do município de Araucária. Além disso, apresenta-se também uma análise de sensibilidade dos resultados das simulações com relação a: representação das emissões das fontes externas à área da REPAR; variação nas razões das contribuições das fontes internas e externas à área da REPAR; representação de edificações existentes na REPAR; e representação da distribuição espacial das fontes internas à área da REPAR.

Revisão bibliográfica

O problema de dispersão de poluentes no meio atmosférico constitui um tema bastante explorado, podendo-se citar, como referências, Craxford e Weatherley (1971), Lee e Irwin (1997) e Venkatran *et al* (2004). Quanto à modelagem matemática da dispersão de poluentes na atmosfera, são referências os trabalhos de Paine *et al* (1998), Hanna *et al* (2001), Cimorelli *et al* (2004) e Perry *et al* (2005).

Na atmosfera, os processos de dispersão de poluentes desempenham papel fundamental, pois permitem a “renovação” do ar no ambiente, fazendo com que a concentração dos poluentes provenientes das fontes naturais ou antropogênicas assumam nível aceitável para a vida humana.

A equação diferencial que descreve o transporte de poluentes em meio atmosférico é obtida por meio do conceito de conservação de massa, sendo expressa na sua forma tridimensional, a partir de Fischer *et al* (1979) e Seinfeld e Pandis (1997), como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = D \left[\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right] + R(C,t) + S(x, y, z, t)$$

Equação 1

na qual:

C: concentração da espécie de poluente considerada [ML^{-3}];

u: componente da velocidade segundo a direção x [LT^{-1}];

v: componente da velocidade segundo a direção y [LT^{-1}];

w: componente da velocidade segundo a direção z [LT^{-1}];

D: coeficiente de difusão molecular da espécie de poluente [L^2T^{-1}];

R: taxa de geração de determinada espécie através de reações químicas [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$];

S: taxa de geração/extinção de determinada espécie no interior do volume de controle em um determinado ponto x no intervalo de tempo t [$\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$];

x, y, z: distância ao longo dos respectivos eixos coordenados [L];

t: tempo [T].

Analisando-se as parcelas que compõem a soma de termos à esquerda da igualdade na Equação 1, verifica-se que a primeira parcela representa a variação da concentração de determinado poluente em relação ao tempo, enquanto as outras três parcelas representam a quantidade de poluente que entra/sai de um dado volume de controle por advecção, ou seja, por deslocamento da massa de poluente, segundo as direções dos eixos coordenados x, y e z em razão da velocidade.

Analisando-se agora as parcelas que compõem os termos da soma à direita da igualdade na Equação 1, verifica-se que a primeira parcela representa a contribuição decorrente dos processos difusivos moleculares, descritos em detalhe, por exemplo, por Fischer *et al* (1979). A segunda parcela representa as reações químicas que acontecem no interior do volume de controle e, finalmente, a terceira parcela representa uma fonte interna de poluentes, que pode ser decorrente das emissões provenientes de uma chaminé localizada no interior do volume de controle, ou de extinção de poluentes, que pode, por exemplo, ser função dos processos de deposição.

A concentração de um poluente atmosférico sobre um determinado receptor depende de uma série de fatores associados à tipificação das fontes de emissão, regime de vento e condições de estabilidade atmosférica e topografia da região estudada.

A literatura apresenta diversos estudos envolvendo a utilização de modelos computacionais como apoio ao entendimento de problemas de dispersão de poluentes na atmosfera. Dentre os trabalhos mais recentes, podem ser citados Hanna *et al* (2001), Caputo, Gimenez e Schlamp (2003), Sax e Isakov (2003), Cimorelli *et al* (2004), Perry *et al* (2005), Venkatran *et al* (2004), Baroutian, Mohebbi e Goharrizi (2006), Holmes e Morawska (2006) e Isakov *et al* (2007). Alguns destes estudos são descritos resumidamente a seguir.

Hanna *et al* (2001) desenvolveram um trabalho comparativo entre os modelos computacionais AERMOD (*American Meteorology Society, Environmental Protection Agency, Regulatory Model*), ISCST3 (*Industrial Source Complex Short-Term Model*) e o ADMS (*Advanced Dispersion Model System*), visando a avaliar as melhorias que os novos modelos ADMS e AERMOD apresentavam em relação ao ISCST3, considerando-se diferentes padrões de emissões e características geográficas dos locais de estudo. Para as condições avaliadas, os autores concluíram que, do ponto de vista de desempenho geral dos modelos, o ADMS apresentou o melhor resultado, seguido do AERMOD, e os piores resultados foram apresentados pelo modelo ISCST3. Considerando-se o desempenho médio entre todos os locais avaliados, os autores concluíram que o ADMS e o AERMOD apresentaram desempenho similar e mostraram leve tendência a subestimarem a máxima concentração prevista em relação à máxima concentração observada.

Sax e Isakov (2003) desenvolveram um estudo de caso para avaliação das incertezas na aplicação de modelos regulatórios de qualidade do ar, por meio da aplicação de técnicas estatísticas de análise de incertezas, visando a demonstrar um método geral de avaliação de variabilidade e incerteza em sistemas gaussianos de modelagem de dispersão de poluentes no ar. O trabalho foi desenvolvido levando-se em consideração quatro contribuintes para a incerteza: a caracterização das emissões; a distribuição temporal e espacial das emissões; as estimativas dos parâmetros dos modelos;

e os dados meteorológicos. As técnicas foram aplicadas aos modelos AERMOD e ISCST3 e, como conclusão, os autores destacam que abordagens simplificadas de modelagem podem levar a erros nas estimativas de concentração de poluentes, especialmente em locais próximos das fontes de emissão, onde ocorrem os maiores valores de concentração.

Caputo, Gimenez e Schlamp (2003) realizaram uma comparação entre quatro modelos de dispersão atmosférica: AERMOD, HPDM (*Hybrid Plume Dispersion Model*), PCCOSYMA (*PC Code System for Maria*) e HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*). Foram utilizados dados atmosféricos obtidos do RAMS (*Regional Atmospheric Modelling System*), que consiste em um sistema numérico para simulação e previsão de fenômenos meteorológicos, e assumiu-se, por hipótese, terreno plano. Os autores concluíram que os modelos citados apresentaram resultados similares para o local estudado em condições instáveis da atmosfera e que, na condição de atmosfera estável, a comparação mostrou uma importante discrepância nos resultados do HPDM em relação aos demais modelos gaussianos.

Cimorelli *et al* (2004) apresentam a descrição das principais equações utilizadas na formulação do modelo de dispersão AERMOD, incluindo equações para: caracterização da camada limite; representação da influência do tipo de terreno sobre a dispersão do poluente; e o algoritmo utilizado para a previsão da concentração em condições de estabilidade e de instabilidade.

Holmes e Morawska (2006) citam o modelo GRAL (*Graz Lagrange Model*), desenvolvido pelo Instituto para Engenharia de Combustão Interna e Termodinâmica de Graz, Áustria, para modelar a dispersão de compostos inertes em um campo de vento não-homogêneo.

Baroutian, Mohebbi e Goharrizi (2006) investigaram as condições de dispersão do material particulado inalável (PM_{10}) emitido por uma indústria de produção de cimento Portland (*Kerman Cement Plant*), localizada na cidade de Kerman, Califórnia, comparando os valores de concentração medidos aos valores previstos através de simulações realizadas com apoio de um modelo de pluma gaussiana. A partir deste estudo, concluíram que se verifica boa aderência entre os dados medidos e os valores simulados, sugerindo-se que o modelo pode ser uma boa ferramenta para a previsão de concentração de PM_{10} na direção do vento, especialmente para regiões distantes do ponto de geração.

Considerando-se os trabalhos citados, verifica-se a existência de vários modelos para o estudo da dispersão dos poluentes na atmosfera, cada qual apresentando limitações inerentes às suas hipóteses simplificadoras, implicando determinadas vantagens e desvantagens. No contexto do presente trabalho, a opção pelo uso do modelo AERMOD decorreu do fato de ser o modelo recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency, U.S. EPA*) para fins

regulatórios. No Brasil alguns trabalhos já realizados tratam da utilização do modelo AERMOD na modelagem da concentração de poluentes em meio atmosférico, dentre os quais são citados Pimentel *et al* (2003), Ferreira (2005), Velloso *et al* (2007), Cunha e Pimental (2007).

O modelo AERMOD é um modelo estacionário de pluma gaussiana desenvolvido, segundo Hanna *et al* (2001), a partir de um projeto de cooperação científica entre a Sociedade de Meteorologia dos Estados Unidos (*American Meteorological Society*, AMS) e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency*, U.S. EPA). A formulação matemática e as características técnicas do AERMOD são descritas por Cimorelli *et al* (2004). Paine *et al* (1998) apresentam algumas avaliações do modelo, utilizando dados observados em campo.

O modelo AERMOD, segundo Hanna *et al* (2001), foi concebido para substituir o modelo ISC3 para fins regulatórios, e contém algoritmos avançados para descrever os processos turbulentos de mistura que ocorrem na camada limite planetária para condições de camadas estratificadas estáveis ou convectivas. O modelo apresenta também algoritmos novos e aprimorados para a representação da ascensão de plumas. A formulação da dispersão de poluentes na camada limite convectiva, segundo Cimorelli *et al* (2004), representa um dos mais importantes avanços do modelo AERMOD em comparação aos demais modelos regulatórios existentes.

Caputo *et al* (2003) realizaram um estudo de comparação entre diferentes modelos de qualidade do ar, considerando condições meteorológicas transientes reais e terreno plano. Em função dos resultados obtidos, os autores sugerem que modelos estacionários de pluma gaussiana, como o AERMOD, devem ser usados para pequenas distâncias, inferiores a algumas dezenas de quilômetros, porque para esta ordem de grandeza as alterações nos parâmetros atmosféricos podem ser negligenciadas e a condição de escoamento permanente pode ser assumida. No referido estudo, as velocidades de vento observadas e utilizadas nas simulações variaram entre aproximadamente 0,5 m/s e 2,0 m/s, o que sugere que as hipóteses assumidas são válidas também para velocidades de vento relativamente baixas.

O sistema computacional usado para a simulação da dispersão dos poluentes consiste em um programa principal, o AERMOD (Cimorelli *et al*, 2004), e dois pré-processadores AERMET e AERMAP (EPA, 2004a; 2004b; 2004c).

O AERMET, segundo EPA (2004b), consiste em um pré-processador de dados meteorológicos. O processamento dos dados meteorológicos ocorre em três estágios distintos: o primeiro deles consiste na extração dos dados do arquivo de dados meteorológicos e em seu processamento. Em seguida, o AERMET agrupa os dados disponíveis em períodos de 24 horas e grava em um único

arquivo. Finalmente, o terceiro estágio consiste na leitura dos dados agrupados e na estimativa dos parâmetros da camada limite necessários para o AERMOD.

A principal função do AERMET é a determinação dos parâmetros da camada limite para posterior uso pelo AERMOD, que utiliza estes parâmetros para gerar o perfil de variáveis meteorológicas necessário à simulação da dispersão dos poluentes. São fornecidas ao AERMET características de superfície como reflexibilidade (albedo), rugosidade da superfície e informações de observações meteorológicas, tais como: velocidade e direção do vento, temperatura e cobertura de nuvens. O AERMET calcula os parâmetros da camada limite: velocidade de fricção, comprimento de Monin-Obukhov, escalas de velocidade convectiva e de temperatura, altura de mistura e fluxo de calor. Estes valores são passados à interface meteorológica do AERMOD através de dois arquivos: *aermet.pfl* e *aermet.sfc*, utilizados na determinação do perfil vertical de velocidades do vento, do coeficiente de turbulência vertical e lateral e do gradiente de temperaturas, utilizados pelo AERMOD no processo de cálculo da dispersão atmosférica de poluentes (EPA, 2004a).

O AERMET pode processar vários formatos diferentes de dados, como, por exemplo, os formatos CD144 (*Card Deck 144 format*), SCRAM (*Support Center for Regulatory Models*) e SAMSON (*Solar and Meteorological Surface Observation Network*). Informações sobre os referidos formatos podem ser obtidas em EPA (2004a).

Já o pré-processador AERMAP faz o pré-processamento dos dados de terreno e de localização das fontes e receptores para posterior uso pelo AERMOD. As principais funções do AERMAP são a determinação da elevação da base das fontes e dos receptores, fornecendo estas informações ao AERMOD para posterior determinação da concentração de poluentes (EPA, 2004c).

O AERMAP requer dois tipos de dados de entrada: a localização das fontes e dos receptores e um arquivo com os dados de terreno. É programado, ainda, para ler apenas o formato DEM, que é disponibilizado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey*, USGS) (EPA, 2004c).

Materiais e métodos

O presente estudo foi desenvolvido tendo como região de interesse o município de Araucária, situado na região leste do Estado do Paraná, na área de influência da região metropolitana de Curitiba. O município de Araucária está localizado na latitude 25° 35' 35" S e longitude 49° 24' 37" W e faz divisa ao Norte com Campo Largo, ao Sul com Contenda e Quitandinha, à Leste com Curitiba, Mandirituba e Fazenda Rio Grande, e à Oeste com Campo Largo, Contenda e Balsa Nova. Está a 27 km de distância da capital do estado, Curitiba, e a 25 km do

Aeroporto Internacional Afonso Pena, em São José dos Pinhais (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, 2007a).

Aspectos climatológicos e topográficos do município de Araucária

O município de Araucária possui área aproximada de 471,337 km² e localiza-se a uma altitude de 897 m em relação ao nível médio do mar (IPARDES, 2007). A área apresenta um relevo relativamente suave, com altitudes variando entre 860 e 940 m de altitude (MINISTÉRIO DA DEFESA, 2003).

O clima local, segundo a classificação de Köppen, é Cfb, que corresponde a um clima temperado úmido, com verão temperado. Os ventos predominantes incidem de Leste-Nordeste para Oeste-Sudoeste e a maior velocidade média dos ventos ocorre segundo a direção de Leste-Sudeste para Noroeste-Norte, com aproxima-

damente 2,7 m/s (FUNCATE, 2007). Estes valores referem-se ao período de 1999 a 2007.

Levantamento e caracterização das fontes de emissão

O município de Araucária constitui um importante pólo industrial do Estado do Paraná. Dentre as atividades industriais mais significativas do município, pode-se destacar: a área petroquímica, cujas principais representantes são: a refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR) e a Fertilizantes Fosfatados S.A. (FOSFERTIL); a indústria siderúrgica, que tem a Companhia Siderúrgica Nacional Filial Araucária (CISA/CSN) como principal representante; a indústria papelreira, representada principalmente pela Companhia de Celulose e Papel do Paraná (COCELPA); e a geração termoeletrica, cuja principal representante é a Usina Elétrica a Gás de Araucária



Fonte: Google Earth, 2010.

Figura 1 – Localização das principais fontes de emissão de poluentes em relação ao centro da cidade de Araucária

(UEG) (PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, 2007b). Estas indústrias representam as principais fontes estacionárias contribuintes para a poluição do ar no município.

A Figura 1 apresenta a localização das principais fontes em relação ao centro da cidade de Araucária. Como referência de escala, a distância entre a estação REPAR e o centro da cidade de Araucária é de aproximadamente 5 km.

Além das fontes fixas, há também a contribuição das fontes móveis, cujos principais contribuintes são os veículos que trafegam na rodovia BR-476. Todavia, estima-se que a contribuição das fontes móveis seja inferior a 1% quando comparada às emissões por fontes estacionárias e, portanto, não foi considerada no presente estudo. A Tabela 1 apresenta as taxas estimadas de emissão de poluentes pelas diferentes fontes usadas no estudo.

As taxas de emissão referentes à REPAR, apresentadas na Tabela 1, são citadas no estudo como fontes internas pelo fato de estarem localizadas dentro da planta industrial da REPAR. As referidas taxas foram obtidas a partir de uma campanha de medição de gases na saída de chaminés, cujos dados podem ser obtidos em NATRONTEC (2007). Os valores relativos à condição atual da REPAR referem-se à soma das contribuições de todas as fontes internas atualmente existentes (total de 18). Em relação à condição futura da REPAR, os valores referem-se à soma das contribuições de todas as fontes internas previstas após a implantação do programa de modernização (total de 36).

Ainda em relação às fontes internas, destaca-se que as simulações foram feitas considerando-se as taxas de emissão observadas em cada uma das fontes atualmente existentes, e as taxas de emissão previstas para as fontes a serem implantadas, segundo apresentado

em NATRONTEC (2007). Para as simulações, foram também utilizados os dados físicos das chaminés (diâmetro interno, altura e localização) e os dados de lançamento dos gases (velocidade e temperatura de saída) de cada uma das fontes atuais e futuras.

As demais fontes apresentadas na Tabela 1 são citadas no estudo como fontes externas por estarem localizadas fora da planta industrial da REPAR. As taxas de emissão destas fontes foram estimadas a partir de FEEMA (2004), onde são apresentados valores-padrão de emissão por tipo de indústria. Cada fonte externa foi representada como uma fonte única, independentemente do número de chaminés existentes. Os dados físicos da “chaminé única” de cada fonte externa foram definidos como iguais aos valores médios observados para as fontes internas atualmente existentes. A justificativa para este procedimento foi a dificuldade encontrada na obtenção das informações relativas à emissão de gases e às características físicas das chaminés junto às indústrias localizadas fora da REPAR.

Destaca-se que foi adotada, no presente trabalho, a denominação genérica de NO_x e SO_x para representar os gases NO_2 (dióxido de nitrogênio) e SO_2 (dióxido de enxofre), que são os gases efetivamente monitorados pela estação amostradora de qualidade do ar, localizada na REPAR.

A Tabela 2 apresenta um resumo das características físicas das chaminés e das características relativas ao lançamento dos gases das fontes internas para as condições atual e futura da REPAR.

Dados meteorológicos utilizados no estudo

Para o presente estudo, foram utilizados dados meteorológicos referentes ao aeroporto Afonso Pena (estação 83840),

Tabela 1 – Taxas estimadas de emissão de poluentes utilizadas no estudo

Fonte	Taxas de emissão			
	MP (g/s)	CO (g/s)	NOx (g/s)	SOx (g/s)
UEG	0,18	23,75	37,88	91,69
FOSFÉRTIL	22,06	72,68	119,7	9,2
CISA	20,29	5,71	19,02	9,2
IMCOPA	0,63	0,32	3,17	364,3
COCELPA	0,63	0,32	3,17	9,2
REPAR (condição atual)	11,18	34,87	83,13	183
REPAR (condição futura)	22,06	72,68	119,65	408

Tabela 2 – Características das chaminés e do lançamento de gases das fontes internas da REPAR

Parâmetro	Valores característicos			
	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
Diâmetro da chaminé (m)	1,90 (atual)	0,62 (atual)	0,99 (atual)	3,00 (atual)
	1,89 (futura)	0,76 (futura)	0,99 (futura)	3,50 (futura)
Altura da chaminé (m)	65,0 (atual)	22,0 (atual)	30,0 (atual)	118,0 (atual)
	70,3 (futura)	21,0 (futura)	30,0 (futura)	118,0 (futura)
Velocidade de lançamento dos gases (m/s)	7,31 (atual)	6,86 (atual)	1,13 (atual)	23,52 (atual)
	7,17 (futura)	5,84 (futura)	0,27 (futura)	23,52 (futura)
Temperatura de lançamento dos gases (K)	603 (atual)	268 (atual)	441 (atual)	1366 (atual)
	613 (futura)	225 (futura)	423 (futura)	1366 (futura)

localizado no município de São José dos Pinhais, distante aproximadamente 25 km da área estudada. Os dados foram adquiridos junto a uma empresa com base nos Estados Unidos da América e foram obtidos já no formato de entrada exigido pelo modelo AERMOD. Basicamente, são dois arquivos de dados contendo dados relativos ao perfil vertical da atmosfera para o cálculo dos parâmetros da camada limite e dados meteorológicos de superfície.

Metodologia

Em um primeiro momento, realizou-se uma avaliação inicial do modelo AERMOD, procurando-se comparar os valores de concentração observados aos valores de concentração simulados pelo modelo, considerando-se somente as fontes internas atualmente existentes. Os valores simulados de média horária máxima e de média anual dos poluentes NO_x , SO_x e MP e de média horária máxima e de média de 8 horas do poluente CO foram comparados aos valores observados na estação REPAR no período de janeiro a dezembro de 2007. O objetivo desta comparação, embora utilizando apenas as fontes internas, foi o de avaliar a ordem de grandeza das concentrações simuladas pelo modelo AERMOD.

Após esta avaliação inicial, procedeu-se a uma análise de sensibilidade do modelo AERMOD à representação das emissões das fontes externas com o objetivo de verificar a importância das emissões oriundas das fontes externas sobre as concentrações estimadas. Foram comparadas as concentrações máximas simuladas para as médias de 1 hora e de 24 horas dos poluentes NO_x , SO_x e MP e para as médias de 1 hora e de 8 horas do poluente CO entre um cenário com a representação de todas as fontes e um cenário com a representação apenas das fontes internas. Procurou-se também comparar as razões entre as emissões (fonte internas/fontes totais) com as razões das concentrações máximas simuladas para os dois cenários.

A etapa seguinte consistiu na análise de sensibilidade do modelo AERMOD quanto à variação nas razões de contribuição das fontes internas e externas. O objetivo foi avaliar se as concentrações máximas eram mais influenciadas por variações nas fontes internas ou nas fontes externas. Adotou-se um cenário de referência, no qual foram representadas todas as fontes (internas + externas). Compararam-se concentrações máximas simuladas para médias de 1 hora e de 24 horas do poluente NO_x , obtidas para o cenário de referência, com os valores obtidos para dois cenários distintos: um primeiro cenário onde as fontes internas foram majoradas em 10% e as fontes externas mantidas constantes, e um segundo cenário onde as fontes externas foram majoradas em 10% e as fontes internas mantidas constantes. A análise se restringiu ao poluente NO_x pelo fato de essa substância

apresentar as concentrações observadas ao longo do histórico da estação REPAR mais próximas das concentrações limites estabelecidas pela legislação.

A próxima etapa consistiu na análise de sensibilidade do modelo AERMOD à representação das edificações. Foram comparadas as concentrações máximas simuladas para médias de 1 hora e de 24 horas do poluente NO_x para as condições de representação ou não das edificações existentes na REPAR. Nesta etapa, foram utilizadas apenas as fontes internas. Adotou-se, para as edificações existentes, uma altura única de 30 m.

Como última etapa, realizou-se uma análise de sensibilidade do modelo AERMOD quanto à representação espacial das fontes internas. Foram comparadas as concentrações máximas simuladas para médias de 1 hora e de 24 horas dos poluentes NO_x , SO_x e MP e para médias de 1 hora e 8 horas do poluente CO entre um cenário com a representação espacial das fontes internas e um cenário onde as fontes internas eram substituídas por uma única “fonte interna equivalente” em substituição às 36 fontes internas previstas para o futuro. O objetivo da análise foi verificar a importância da representação espacial das fontes, uma vez que não foi possível obter informações que permitissem representar adequadamente as fontes externas.

A taxa de emissão da “fonte interna equivalente” foi definida como a soma das taxas de emissão de cada uma das fontes internas. As características de altura da chaminé, temperatura e velocidade de saída dos gases foram obtidas por média ponderada, sendo os pesos definidos pela razão entre a taxa de emissão de determinada fonte interna em relação à taxa total de emissão das fontes internas. O mesmo critério de ponderação foi usado para determinar a localização espacial da “fonte interna equivalente”. Já o diâmetro da chaminé da “fonte interna equivalente” foi obtido a partir da Equação 2, estabelecida de modo a preservar a ordem de grandeza do fluxo volumétrico, calculado a partir do fluxo mássico e da velocidade de lançamento dos gases:

$$D_{eq} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i D_i^2}{\bar{v}}} \quad \text{Equação 2}$$

na qual:

v_i : velocidade de lançamento dos gases da fonte i [LT^{-1}];

D_i : diâmetro interno da chaminé da fonte i [L];

\bar{v} : velocidade de lançamento dos gases da fonte interna equivalente [LT^{-1}];

D_{eq} : diâmetro interno da chaminé da fonte interna equivalente [L];

Destaca-se que, em todas as simulações relativas às análises de sensibilidade do modelo AERMOD, utilizaram-se as emissões referentes à condição futura da REPAR.

Resultados e discussão

Este item procura apresentar os resultados das simulações da dispersão dos poluentes monóxido de carbono (CO), material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) para a região central do município de Araucária e para a Estação REPAR, localizada no interior da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR), com o uso do modelo AERMOD na sua versão 5.7 (THÉ; THÉ; JOHNSON, 2007a; 2007b).

Avaliação inicial do modelo AERMOD

A avaliação inicial do modelo AERMOD teve por objetivo verificar os resultados do modelo em comparação às concentrações observadas na Estação REPAR. Foram considerados os dados meteorológicos de altitude e de superfície provenientes da estação aeroporto Afonso Pena (estação 83840) para o ano de 2007 e utilizaram-se somente as emissões provenientes das fontes internas atualmente em operação. Portanto, não foram consideradas as emissões provenientes das fontes externas, principalmente pela falta de informações detalhadas sobre as características das chaminés e do lançamento de gases. Desta forma, a avaliação teve um caráter mais qualitativo do que quantitativo. Os resultados

obtidos na avaliação inicial do modelo AERMOD são apresentados resumidamente na Tabela 3.

Verifica-se, a partir dos dados apresentados na Tabela 3, que os valores simulados são inferiores aos valores observados para os poluentes NO_x, SO_x e MP. Este comportamento era esperado em razão da representação apenas das fontes internas na avaliação do modelo. Já para o poluente CO, verificou-se que o modelo apresentou concentrações simuladas maiores do que as observadas, mesmo sem a representação da contribuição das fontes externas.

Para auxiliar na análise dos resultados, a Tabela 4 apresenta a razão entre a taxa atual de emissões das fontes internas e a taxa total de emissões (fontes internas + externas), calculada a partir dos dados apresentados na Tabela 1, e a razão entre os valores de concentração simulados e observados na estação REPAR no período de janeiro a dezembro de 2007, apresentados na Tabela 3.

Verifica-se, a partir dos dados da Tabela 4, que o poluente NO_x foi o que apresentou uma razão entre concentrações simuladas e observadas mais próxima à razão entre as taxas de emissão. Os poluentes SO_x e CO apresentaram razões entre concentrações simuladas e observadas superiores à razão entre as taxas de emissão, com destaque para o CO. Já o poluente MP apresentou razão entre concentrações simuladas e observadas inferior à razão entre as taxas de emissão.

Tabela 3 – Comparação entre concentrações simuladas e observadas na Estação REPAR no período de janeiro a dezembro de 2007

Poluente	Valores simulados		Valores observados ^a	
	Média horária máxima (µg/m ³)	Média anual (µg/m ³)	Média horária máxima (µg/m ³)	Média anual (µg/m ³)
NO _x	87	6,9	303,5	25
SO _x	190,6	12,9	326,4	18,9
CO	33	11,8 ^b	4,2	3,4 ^b
MP	11,5	0,8	240	43,2

^a Fonte: IAP (200x); ^b Média de 8 horas.

Tabela 4 – Relações entre taxas de emissão e entre concentrações simuladas e observadas na Estação REPAR no período de janeiro a dezembro de 2007

Poluente	Razão entre a taxa atual de emissões das fontes internas e a taxa total estimada de emissões	Razão entre concentrações simuladas e observadas	
		Média horária máxima (µg/m ³)	Média anual (µg/m ³)
NO _x	0,31	0,29	0,28
SO _x	0,27	0,58	0,68
CO	0,25	7,9 ^a	3,5 ^a
MP	0,2	0,05	0,02

^a Média de 8 horas.

Tabela 5 – Concentrações máximas simuladas para emissões das fontes internas e para emissões totais

Poluente	Concentrações máximas simuladas				Razão entre as concentrações		Razão entre as taxas de emissão (internas/totais)
	Fontes internas + fontes externas		Fontes internas		Média 1h (µg/m ³) (3)/(1)	Média 24h (µg/m ³) (4)/(2)	
	Média 1h (µg/m ³) (1)	Média 24h (µg/m ³) (2)	Média 1h (µg/m ³) (3)	Média 24h (µg/m ³) (4)			
NO _x	237,4	64,4	98,9	31	0,42	0,48	0,4
SO _x	630,2	186,3	249,2	68	0,4	0,37	0,46
CO	124,9	70,3*	41,4	14,7*	0,33	0,21	0,41
MP	52,6	14,4	13,5	4,1	0,26	0,28	0,34

* Média de 8 horas

Destaca-se, novamente, que esta análise deve ser entendida de modo qualitativo, uma vez que foram representadas somente as fontes internas no cálculo das concentrações simuladas, e que as emissões totais representam valores estimados e não observados, exceção feita às fontes internas. Além disso, a razão pura e simples entre as taxas de emissão não considera os possíveis efeitos de dispersão resultantes da distância entre as diferentes fontes em relação à estação amostradora de qualidade do ar localizada na REPAR.

De modo geral, os resultados da avaliação inicial indicam que, qualitativamente, o modelo AERMOD representou razoavelmente bem as concentrações observadas dos poluentes NO_x e SO_x . Verifica-se, também, uma tendência de obtenção de valores simulados significativamente superiores aos observados para o poluente CO e significativamente inferiores aos valores observados para o poluente MP.

Análise de sensibilidade quanto à representação das emissões das fontes externas

A análise de sensibilidade do modelo AERMOD à representação das emissões das fontes externas teve por objetivo avaliar a importância das emissões provenientes das fontes externas sobre as concentrações estimadas. Os resultados obtidos, em termos de concentrações máximas, são apresentados resumidamente na Tabela 5.

Os valores apresentados na Tabela 5 confirmam a necessidade da representação adequada das fontes externas como um fator importante para a comparação entre valores simulados e observados, uma vez que os valores máximos de concentração, quando consideradas as emissões totais, foram significativamente superiores aos valores obtidos quando consideradas apenas as fontes internas. Para a condição futura da REPAR, as fontes externas representam, respectivamente, 60, 54, 59 e 66% das emissões totais

dos poluentes NO_x , SO_x , CO e MP, conforme obtido a partir da Tabela 5.

Análise de sensibilidade quanto à variação nas razões de contribuição das fontes

A análise de sensibilidade quanto à variação nas razões de contribuição das fontes teve o objetivo de avaliar se as concentrações máximas eram mais influenciadas por variações nas fontes internas ou nas fontes externas. A Tabela 6 mostra os resultados de concentrações máximas do poluente NO_x simuladas pelo modelo AERMOD decorrentes de diferentes razões de concentrações entre as fontes internas e as fontes externas.

Considerando-se a comparação com o cenário base, verifica-se, a partir dos dados apresentados na Tabela 6, que os valores simulados pelo modelo AERMOD apresentaram-se mais sensíveis ao incremento de 10% nas emissões das fontes internas do que em relação ao incremento de 10% nas emissões das fontes externas. É importante destacar, tendo em vista os dados apresentados na Tabela 1, que as fontes externas representam 60% das emissões totais do poluente NO_x para a condição futura da REPAR.

Análise de sensibilidade quanto à representação das edificações

A análise de sensibilidade do modelo AERMOD, considerando-se o efeito das edificações (*building downwash*), foi desenvolvida simulando-se as concentrações provenientes apenas das emissões pelas fontes internas, com e sem a representação das edificações existentes na REPAR, para o poluente NO_x . Adotou-se uma altura de 30 m para representar todas as edificações e foram utilizadas as alturas de chaminé apresentadas na Tabela 2. O modelo AERMOD utiliza os algoritmos do modelo PRIME (SCHULMAN;

Tabela 6 – Análise de sensibilidade das concentrações máximas de NO_x em relação à razão entre as contribuições das fontes internas e externas

Cenário	Concentrações máximas		Cenário base	Concentrações máximas		Variação percebida	
	Média 1h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Média 1h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média 1h (%)	Média 24h (%)
Fontes internas acrescidas em 10%	245,7	67,1	Fontes internas e externas sem majoração	237,4	64,4	3,5	4,2
Fontes externas acrescidas em 10%	240,4	64,2					

Tabela 7 – Análise de sensibilidade das concentrações simuladas em relação à distribuição espacial das fontes internas

Poluente	Fontes distribuídas		Fonte única		Razão	
	Média 1h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (1)	Média 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (2)	Média 1h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (3)	Média 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (4)	(3) / (1)	(4) / (2)
NO_x	98,9	31	77,6	5,4	0,78	0,17
SO_x	249,2	68	65	9,7	0,26	0,14
CO	41,4	26,3*	14,7	5,7*	0,36	0,22
MP	13,5	4,1	3,7	0,6	0,27	0,15

* Média de 8 horas.

STRIMAITIS; SCIRE, 2000) para representar a interferência de edificações sobre o crescimento e deslocamento da pluma de contaminação.

O modelo PRIME foi originalmente concebido para representar o crescimento da pluma de contaminação usando a dispersão de Pasquill-Gifford. Como o crescimento da pluma no modelo AERMOD, segundo Cimorelli *et al* (2004), é baseado em parâmetros de dispersão obtidos a partir de perfis de turbulência, o modelo PRIME foi adaptado para usar o grau de turbulência do meio, derivado a partir do AERMOD, como dado de entrada para a estimativa das concentrações nas regiões que sofrem interferência das edificações (CIMORELLI *et al*, 2004).

Avaliando-se os valores simulados pelo modelo AERMOD, verificou-se que o efeito da representação das edificações foi desprezível, visto que as concentrações médias de 1 hora e de 24 horas, considerando ou não as edificações, apresentaram valores idênticos.

Análise de sensibilidade quanto à distribuição espacial das fontes internas

A análise de sensibilidade do modelo AERMOD em relação à distribuição espacial das fontes internas foi desenvolvida considerando-se a existência de uma única “fonte interna equivalente” em substituição às 36 fontes internas previstas após o programa de modernização da REPAR. A Figura 2 apresenta a distribuição espacial das fontes internas (atuais e futuras).

O objetivo desta análise foi verificar a importância da representação espacial das fontes, uma vez que não foi possível obter informações que permitissem representar adequadamente as fontes externas. A Tabela 7 ilustra os resultados das simulações para análise da influência da distribuição espacial das fontes internas.

Verificou-se, a partir dos dados apresentados na Tabela 7, que os valores de concentração simulados, considerando-se uma única

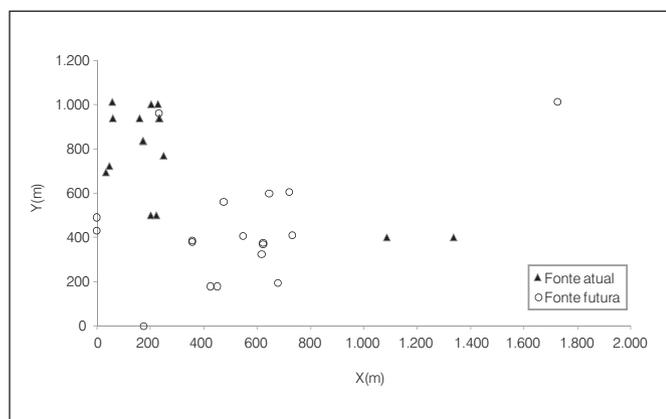


Figura 2 – Localização espacial das fontes internas (atuais e futuras)

“fonte interna equivalente”, resultaram significativamente inferiores aos obtidos quando se considera a distribuição espacial das fontes internas. Os resultados obtidos reforçam a importância de se representar adequadamente a distribuição espacial das fontes.

Conclusões e recomendações

A avaliação inicial do modelo AERMOD mostrou, de modo qualitativo, que as concentrações observadas dos poluentes NO_x e SO_x foram representadas razoavelmente bem. Verificou-se uma tendência de obtenção de valores simulados significativamente superiores aos observados para o poluente CO e significativamente inferiores aos valores observados para o poluente MP. As diferenças obtidas entre os valores simulados e observados têm como principal causa a não-representação das emissões das fontes externas na avaliação inicial do modelo.

A comparação entre cenários que consideram somente as fontes internas e cenários que consideram as fontes totais (internas + externas) confirmaram a necessidade da representação adequada das fontes externas como um fator importante para a comparação entre valores simulados e observados, uma vez que os valores máximos de concentração quando consideradas as emissões totais foram significativamente superiores aos valores obtidos quando consideradas apenas as fontes internas.

Já a análise da influência das diferentes razões de contribuição entre as fontes internas e as fontes externas permitiu concluir que os valores de concentração de NO_x simulados pelo modelo apresentaram-se mais sensíveis a variações nas emissões das fontes internas do que a variações nas emissões das fontes externas, mesmo considerando-se que as fontes externas representam cerca de 60% das emissões do poluente NO_x .

Quanto à análise de sensibilidade do modelo AERMOD à representação das edificações, verificou-se que o efeito foi desprezível para o caso em estudo, uma vez que os resultados das concentrações médias de 1 hora e de 24 horas, considerando ou não o efeito das edificações, foram idênticos.

Verificou-se, ainda, que a adoção de uma única “fonte interna equivalente” resultou na obtenção de valores simulados significativamente inferiores aos obtidos quando se considera a distribuição espacial das fontes internas. Os resultados obtidos reforçam a importância de se representar adequadamente a distribuição espacial das fontes.

Como sugestão para a continuidade dos trabalhos, indica-se a realização de uma avaliação mais criteriosa das informações das fontes emissoras, principalmente as fontes externas, em relação a: taxas de emissão, localização das fontes e parâmetros físicos das fontes, como, por exemplo, altura e diâmetro de chaminés. É importante destacar que esse tipo de informação, quando não é inexistente, é de difícil obtenção junto às indústrias.

O presente trabalho evidencia a importância de um inventário detalhado das emissões de gases por indústrias para subsidiar a

modelagem da dispersão de poluentes em meio atmosférico e a discussão sobre marcos regulatórios para a qualidade do ar.

Referências

- BAROUTIAN, S.; MOHEBBI, A.; GOHARRIZI, A.S. Measuring and modeling particulate dispersion: A case study of Kerman Cement Plant. *Journal of Hazardous Materials*, A136, n. 3, p. 468-474, 2006.
- CAPUTO, M.; GIMENEZ, M.; SCHLAMP, M. Intercomparison of atmospheric dispersion models. *Atmospheric Environment*, v. 37, n. 18, p. 2435-2449, 2003.
- CIMORELLI, A.J. *et al.* AERMOD description of model formulation. EPA-454/R-03-004. 2004.
- CRAXFORD, S.R.; WEATHERLEY, M.L.P.M. Dispersion of airborne effluents. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Great Britain, n. 269, p. 503-513, 1971.
- CUNHA, B.D. da; PIMENTEL, L.C.G. Modelagem da concentração de poluentes na bacia aérea III via modelo AERMOD considerando processos de deposição. *Ciência e Natura*, Volume especial, p. 359-362, 2007.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Users guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET)*. EPA-454/B-03-002. 2004a.
- _____. *Users guide for the AMS/EPA Regulatory Model - AERMOD*. EPA-454/B-03-001. 2004b.
- _____. *Users guide for the AERMOD terrain preprocessor (AERMAP)*. EPA-454/B-03-003. 2004c.
- FEEMA. *Inventário de fontes emissoras de poluentes atmosféricos da região metropolitana do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA), 2004. Disponível em: <http://www.feema.rj.gov.br/admin_fotos/INVENTARIO_%20Relatorio.pdf>. Acesso em: 19 fev 2010.
- FERREIRA, M.S. *Simulação do transporte de poluentes atmosféricos na bacia aérea III da região metropolitana do Rio de Janeiro via o modelo AERMOD*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- FISCHER, H. *et al.* *Mixing in inland and coastal waters*. 1ª Ed. San Diego, CA: Academic Press, 1979.
- FUNCATE. *Dados da estação meteorológica REPAR: período de 1999 a 2007*. São José dos Campos: Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologias Espaciais (FUNCATE), 2007. Disponível em <<http://www.funcate.org.br>> Acesso em: 19 set. 2007.
- HANNA, S.R. *et al.* Evaluation of the ADMS, AERMOD and ISC3 dispersion models with de Optex, Duke, Forest, Kinkaid, Indianapolis and Lovett Field data sets. *International Journal of Environment and Pollution*, v. 16, n. 1-6, p. 301-314, 2001.
- HOLMES, N.; MORAWSKA, L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. *Atmospheric Environment*, v. 40, n. 30, p. 5902-5928, 2006.
- INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). *Relatório de qualidade do ar na região metropolitana de Curitiba: ano 2007*. Curitiba: Instituto Ambiental do Paraná: Secretaria Estadual do Meio Ambiente, 200x.
- INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES). *Perfil municipal de Araucária*, IPARDES, 2007. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/perfil_municipal/MontaPerfil.php?Municipio=83700&btOk=ok> Acesso em: 11 mar. 2008.
- ISAKOV, V. *et al.* Evaluating the use of outputs from comprehensive meteorological models in air quality modeling applications. *Atmospheric Environment*, v. 41, n. 8, p. 1689-1705, 2007.
- LEE, R.F.; IRWIN, J.S. Improving concentration measures used for evaluating air quality models. *Journal of Applied Meteorology*. v. 36, n. 8, p. 1107-1112, 1997.
- MINISTÉRIO DA DEFESA. *Região sul do Brasil: Araucária*. Primeira Impressão. Ministério da Defesa: Exército Brasileiro: Secretaria da Tecnologia de Informação: Diretoria de Serviço Geográfico, 2003. (Escala 1:25000, Folha SG-22-X-D-IV-1-N, MI-2857-1-NO. Cobertura Aérea, 1996. Restituição, 2001).
- NATRONTEC. *Estudo de dispersão atmosférica: nova configuração da REPAR*. NATRONTEC Estudos e Engenharia de Processos, 2007.
- PAINE, R.J. *et al.* *Model Evaluation results for AERMOD – draft document*, 1998. Disponível em: <<http://www.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/evalrep.pdf>>. Acesso em 19 fev. 2010.
- PERRY, S.G. *et al.* AERMOD: a dispersion model for industrial source applications: part II: model performance against 17 field study databases. *Journal of Applied Meteorology*, v. 44, n. 5, p. 694-708, 2005.
- PIMENTEL, L.C.G. *et al.* Estudo da dispersão atmosférica de poluentes convencionais utilizando o modelo AERMOD. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 1, p. 57, 2003.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA. *Localização: Localização geográfica*. Araucária: Prefeitura do Município de Araucária, 2007a. Disponível em: <<http://www.araucaria.pr.gov.br/index.php?a=acessos.php/>>. Acesso em: 19 fev. 2010.
- _____. *Área Industrial*. CIAR, Centro Industrial de Araucária. Araucária: Prefeitura do Município de Araucária, 2007b. Disponível em: <http://www.araucaria.pr.gov.br/index.php?a=araucdados.php&b=menu_dados&tipo=ciar>. Acesso em: 19 fev. 2010.

SAX, T.; ISAKOV, V. A case study for assessing uncertainty in local-scale regulatory air quality modeling applications. *Atmospheric Environment*, v. 37, n. 25, p. 3481-3489, 2003.

SCHLINK, U. *et al.* *Air dispersion modeling workshop: Course Notes*, 2006.

SCHULMAN, L.L.; STRIMAITIS, D.G.; SCIRE, J.S. Development and evaluation of the PRIME plume rise and building downwash model. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 50, n. 3, p. 378-390, 2000.

SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate changes*. 1^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

THÉ, J.L.; THÉ, C.L.; JOHNSON, M.A. *ISC-AERMOD View Interface for the U.S. EPA ISC and AERMOD Models: Tutorials*. Lakes Environmental Software Inc., 2007a.

_____. *ISC-AERMOD View Interface for the U.S. EPA ISC and AERMOD Models: User's Guide*. Lakes Environmental Software Inc., 2007b.

VELLOSO, M.F.A. *et al.* Avaliação dos modelos de qualidade do ar AERMOD e ISC para a região de Nova Iguaçu, RJ. *Ciência e Natura*, Volume especial, p. 371-374, 2007.

VENKATRAM, A. *et al.* Modeling dispersion at distances of meters from urban sources. *Atmospheric Environment*, v. 38, n. 28, p. 4633-4641, 2004.