

## ESTUDO DE AEROSSÓIS ATMOSFÉRICOS E APLICAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS

Cláudia Flores Braga e Elba Calesso Teixeira\*

Fundação Estadual de Proteção Ambiental, Rua Carlos Chagas, 55, 90030-020 Porto Alegre - RS

Rita de Cássia Marques Alves

Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, 9150-970 Porto Alegre - RS

Recebido em 11/7/03; aceito em 25/11/03; publicado na web em 27/05/04

**STUDY OF ATMOSPHERIC AEROSOLS AND APPLICATION OF NUMERICAL MODELS.** The main purpose of the present work is to study the concentration of atmospheric particles ( $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ) in the Candiota (RS) region using HV  $PM_{10}$  and dichotomous samplers. Four sampling sites at a distance of 50 km from the emission source were selected: Aceguá, Aeroporto, 8 de Agosto and Pedras Altas. Samples were collected from December 2000 to December 2001. The values obtained with the ISCST (Industrial Source Complex Term) model and with the samplers were compared on January 21<sup>st</sup>, April 5<sup>th</sup>, July 14<sup>th</sup>, August 1<sup>st</sup>, and October 13<sup>th</sup> 2001, and are representative of frontal systems occurring in the study area.

Keywords: particulate matter; atmospheric aerosols; numeric models.

### INTRODUÇÃO

O aumento das emissões atmosféricas tem sido provocado pelo crescimento da população urbana e dos níveis de industrialização. Dentre os diversos poluentes originados pelas fontes antropogênicas destacam-se as emissões de particulados, onde as partículas mais finas são reconhecidas por terem um forte impacto sobre o ambiente.

Atualmente, o monitoramento de aerossóis  $PM_{2.5}$  tem sido mais recomendado que  $PM_{10}$ , devido a estas partículas apresentarem relação direta com efeitos à saúde e pelo fato deste tipo de amostragem evitar a interferência de partículas naturais ( $<100 \mu m$ ). Entretanto, atividade industrial com alta emissão tem grande impacto sobre a qualidade do ar, devido à emissão intensa de particulados na faixa de  $10 - 2,5 \mu m^1$ .

As partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) contém espécies químicas potencialmente prejudiciais como ácidos, metais pesados e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos. Comparadas com partículas de diâmetro maior que  $10 \mu m$ , estas partículas estão diretamente relacionadas com as emissões antropogênicas<sup>2</sup>. As fontes e a composição química do particulado  $PM_{10}$  e  $PM_{2.5}$  podem ser diferentes. O tamanho das partículas, assim como suas propriedades físicas e químicas afetam seu tempo de residência na atmosfera. O particulado menor que  $10 \mu m$  é gerado por processos mecânicos e consiste de partículas de poeira do solo, sal marinho, cinzas volantes, além de outras fontes<sup>3</sup>.

Essas partículas podem ser geradas por veículos automotores, termoeletricas, siderúrgicas, fábricas de cimento e papel, refinarias e queimadas em florestas, dentre outros. Em particular, os processos de produção de energia termoeletrica com utilização de carvão pulverizado são responsáveis pela produção de partículas menores que  $5 \mu m$ . Segundo estudos recentes<sup>4</sup>, a composição química destas partículas constituiu-se em uma característica importante para o estudo dos efeitos provocados na saúde.

No sul do Brasil, a queima de combustíveis fósseis, principalmente carvão, está entre as fontes industriais que têm provocado alterações da qualidade ambiental em determinadas áreas, como ocor-

re na região de Candiota, localizada ao sudoeste do estado Rio Grande do Sul.

Estudos na região têm evidenciado emissões atmosféricas<sup>5,6</sup> devido ao processo de produção de energia termoeletrica, com utilização de carvão pulverizado e queimado em caldeiras de geração de vapor.

Ao longo dos últimos anos, diversas ações foram desenvolvidas no sentido de procurar caracterizar o ambiente na área de influência da usina termoeletrica de Candiota. Isto vem acontecendo desde 1989, e o Brasil e o Uruguai vêm tentando encontrar uma forma de avaliar a qualidade do ar, realizando estudos<sup>6,7</sup> para verificar a possibilidade de existência ou não de chuva ácida na região.

Além dos dados experimentais, é fundamental a utilização de modelos matemáticos nestes estudos, considerados como ferramentas importantes na avaliação da qualidade do ar. Através das simulações é possível obter a dispersão de poluentes em vários pontos de uma grade, além disso a modelagem numérica fornece informações importantes sobre o transporte e a difusão de poluentes na camada limite planetária.

Neste contexto, a proposta deste trabalho foi estudar as partículas menores que  $10 \mu m$  ( $PM_{10}$ ) em quatro pontos de amostragem na região de Candiota. Os resultados de concentração de Dicotômico e HV  $PM_{10}$  foram comparados. Foram selecionados cinco dias de amostragem para realização das simulações numéricas, utilizando-se o modelo de dispersão ISCST recomendado pela "Environmental Protection Agency – Users Network for Applied Modelling of Air Pollution (EPA – UNAMAP)" para estudos de dispersão. Este modelo utiliza a aproximação Gaussiana para dispersão horizontal e vertical.

### PARTE EXPERIMENTAL

#### Área de estudo

A região de Candiota, situada no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul - coordenadas geográficas  $54^{\circ}10'58'' / 53^{\circ}18'35''$  longitude Oeste e  $31^{\circ}17'35'' / 31^{\circ}02'41''$  latitude Sul - distante da capital Porto Alegre cerca de 420 km, abrange total ou parcialmente os

\*e-mail: gerpro.pesquisa@fepam.rs.gov.br

municípios de Aceguá, Bagé, Candiota, Herval, Hulha Negra, Pedras Altas e Pinheiro Machado (Figura 1).

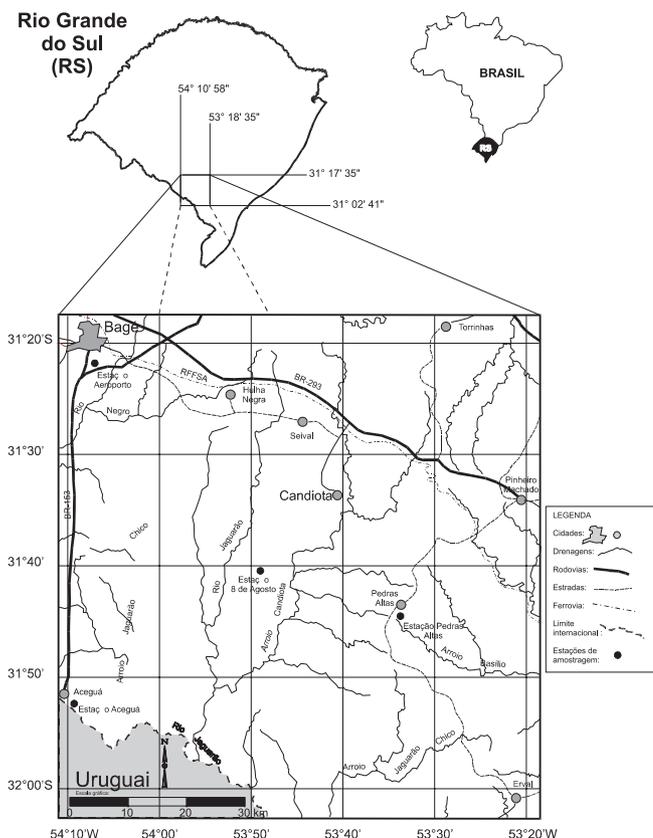


Figura 1. Mapa de localização da região de Candiota

O maior complexo termoeletrico a carvão do Rio Grande do Sul está localizado em Candiota, a Usina Termoeletrica Presidente Médici (UPME), operada pela Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE). Existem planos para aumentar, em pouco tempo, sua capacidade instalada de 350 para 500 MW. A Usina Termoeletrica do Seival, sob a responsabilidade da COPELMI - Companhia de Pesquisa e Lavra Mineral, também está prevista.

Na região de estudo encontra-se a maior reserva carbonífera brasileira. As reservas da Jazida Grande Candiota, dispostas segundo direção norte/sul, abrangem uma área aproximada de 2500 km<sup>2</sup>. Representam cerca de 38% das reservas de carvão do Brasil, totalizando aproximadamente 12,3 bilhões de toneladas, das quais 30% são mineráveis a céu aberto. Na UPME, o carvão é pulverizado em moinhos e queimado em grandes caldeiras de geração de vapor e estas alimentam as turbinas geradoras de eletricidade.

Esta região insere-se no tipo climático Cfa (clima subtropical com precipitações durante todo o ano, segundo a classificação de Von Koepen), com uma precipitação total média anual registrada entre 1961 e 1990 de 1.465 mm, bem distribuída durante o ano, e temperatura média anual de 18 °C, conforme os normais climatológicos obtidos para a estação meteorológica de Bagé. As temperaturas mínimas ocorrem no inverno, nos meses de junho e julho, e as máximas no verão, de dezembro a fevereiro<sup>8</sup>.

### Modelo de dispersão

Existem diversos modelos de difusão para se determinar a variação espacial e temporal dos poluentes<sup>9</sup>. O modelo Gaussiano recomendado é usado para calcular a concentração de PI<sub>10</sub> originado de

emissões contínuas de fontes localizadas acima de altos níveis. A concentração de PI<sub>10</sub>, C, nas estações receptoras, é dada pela seguinte expressão:

$$C = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[ \exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

onde Q representa a taxa de emissão da fonte, h é a altura da fonte, os parâmetros de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são os desvios padrões da concentração da pluma nas direções horizontal e vertical, respectivamente, z é a altura do receptor, u a velocidade do vento e y a distância horizontal. Os coeficientes de difusão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  foram calculados conforme Briggs<sup>10</sup>. A elevação da pluma a diferentes distâncias da fonte é calculada e as distâncias horizontais e verticais do receptor em relação à termoeletrica são calculadas pela expressão  $x = \sin T + R \sin T$  e  $y = S \sin T - R \cos T$ , respectivamente, onde R e S são as coordenadas Leste e Norte do receptor e T, a direção do vento. É assumido que os poluentes não são reativos e suas taxas de transformação e remoção não são consideradas.

Para uma chaminé que emite o poluente continuamente, a pluma contínua (fumaça que sai da chaminé) pode ser aproximada como uma superposição de "puffs". Isto é, a pluma é vista como resultado da adição de um número infinito de "puffs" médios superpostos, carregados ao longo de um eixo x pelo vento médio  $\mu$ . Sabendo-se ainda que, na prática, a difusão ao longo do eixo x é negligenciada, pois considera-se a homogeneidade horizontal e que o transporte é feito apenas pelo vento médio u, então,  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  são funções de x.

### Parâmetros de entrada

#### Fonte emissora

O município de Candiota (31°28'S, 53°40'W), onde a Usina Presidente Médici está localizada, fica a 250 m acima do nível do mar. A superfície é razoavelmente plana, com suaves declives nas direções norte e leste. O consumo diário de carvão para queima é cerca 3,02 x 10<sup>3</sup> t, a taxa de emissão de PI<sub>10</sub> é 944 g s<sup>-1</sup>, liberados através de uma chaminé de 150 m. A taxa de emissão está baseada no conteúdo de enxofre, em torno de 2%, o que representa os carvões tipicamente encontrados no Brasil. Uma das características do carvão queimado na UPME é o alto conteúdo de cinzas (52-59%), sendo que 1% dessa cinza escapa dos precipitadores eletrostáticos, cuja consequência é uma liberação anual de 14000 t de cinzas para a atmosfera, além de outros poluentes<sup>11</sup>.

#### Parâmetros de entrada da fonte

Os parâmetros de entrada correspondentes à fonte emissora consistem de altura da fonte, taxa de emissão de PI<sub>10</sub>, temperatura e velocidade de saída dos gases, além do diâmetro interno da chaminé (Tabela 1).

Tabela 1. Parâmetros de entrada da fonte emissora

| Parâmetros   | Dados da Fonte |
|--|----------------|
| Altura da fonte (m)                                | 150            |
| Taxa de emissão (g s <sup>-1</sup> )               | 944            |
| Temperatura de saída dos gases (K)                 | 410            |
| Velocidade de saída dos gases (m s <sup>-1</sup> ) | 20             |
| Diâmetro interno da fonte (m)                      | 5              |

Foi utilizado sistema de coordenadas cartesianas X-Y na elaboração da grade e espaçamento de 100 km x 100 km. A grade compreende 100 km nas direções Leste-Oeste, e 100 km na Norte-Sul e a fonte emissora está localizada no centro da grade.

Este modelo calcula a concentração para cada ponto da grade, entretanto, alguns pontos foram escolhidos para uma observação mais aprofundada, devido à localização das estações de amostragem de  $PI_{10}$ . A fonte emissora está localizada no ponto 0,0 sobre a grade e os pontos receptores foram distribuídos de acordo as suas correspondentes coordenadas em metros (Tabela 2).

**Tabela 2.** Coordenadas da fonte emissora e das estações receptoras, em metros

| Principais Pontos da Grade | Coordenada X (m) | Coordenada Y (m) |
|----------------------------|------------------|------------------|
| Termoelétrica              | 0                | 0                |
| Aceguá                     | -46177           | -45546           |
| Aeroporto                  | 46177            | 7954             |
| 8 de Agosto                | -14842           | -23139           |
| Pedras Altas               | 8712             | -29268           |

#### Parâmetros meteorológicos utilizados no modelo

Os parâmetros meteorológicos utilizados para inicialização do modelo de dispersão ISCST foram direção e velocidade do vento, temperatura e altura da camada limite. Optou-se pela utilização do RAMS (“Regional Atmospheric Modeling System”) para gerar estes parâmetros meteorológicos horários para o período de 24 h. Para simulação com o RAMS o modelo foi centrado em 31,3 S e 53,5 W, representando a localização do município de Candiota. O tempo de simulação foi de 24 h, com saída a cada hora.

O modelo RAMS constituiu-se em um código numérico desenvolvido na Universidade do Estado do Colorado para produzir simulações diagnósticas do estado atmosférico. As equações usadas no modelo supõem uma atmosfera não hidrostática e, portanto, é capaz de descrever processos físicos nos quais a velocidade vertical é intensa. Os processos de superfície são representados numericamente de forma bem detalhada e simulam aqueles associados à difusão turbulenta, radiação solar, formação e interação de nuvens, convecção de cúmulus, troca de calor sensível e latente entre a superfície e a atmosfera e transporte de calor no solo<sup>12</sup>. O RAMS é inicializado de maneira homogênea e utilizam-se dados de radiossondagens, ou seja, perfis verticais de vento, temperatura do ar, umidade relativa e pressão.

Métodos práticos de classificação de estabilidade atmosférica usados nos modelos de dispersão tipo Pluma Gaussiana (ISCST) levam em consideração o aquecimento da superfície. Contudo, os dados disponíveis na maioria das aplicações das rotinas são parâmetros tais como velocidade dos ventos, cobertura de nuvens e, em alguns casos, insolação.

No presente estudo foi utilizada a classificação Pasquill-Gifford para determinar a estabilidade atmosférica. Este sistema classifica o estado turbulento da atmosfera em seis diferentes categorias que são determinadas através da velocidade do vento na superfície, insolação e cobertura de nuvens. As seis classes variam de A (fortemente instável) a F (moderadamente estável)<sup>13</sup>.

Uma das características mais importantes da atmosfera é sua estabilidade, isto é, a influência sobre a capacidade da atmosfera de dispersar os contaminantes que são emitidos, procedentes de fontes naturais ou antropogênicas. Define-se uma atmosfera estável como aquela que não apresenta altas variações de mistura ou movimentos verticais intensos. Para que haja mistura a uma escala significativa, necessita-se das seguintes condições: o gradiente de temperatura e a turbulência mecânica devido à ação do vento<sup>14</sup>.

As amostragens de aerossóis ( $PI_{10}$ ) seguiram os critérios estabelecidos pela USEPA<sup>15</sup>. Os dados foram coletados por um período contínuo de 24 h a cada 15 dias, utilizando amostradores HV  $PM_{10}$  e Dicotômico.

O amostrador HV  $PM_{10}$  é um coletor de grande volume para partículas menores que  $10 \mu\text{m}$  no ar ambiente (Figura 2). Seu princípio de funcionamento é por impactação, e as partículas são dirigidas para um filtro de microquartzo (Whatman QM-A -  $20,3 \text{ cm} \times 25,4 \text{ cm}$ ) onde ficam retidas. O equipamento mantém-se a uma vazão operacional de  $1,13 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$  (com tolerância de 10%) em condições reais de temperatura e pressão<sup>16</sup>.

O amostrador Dicotômico ( $PI_{10}$  e  $PI_{2,5}$ ) separa as partículas do ar ambiente em duas frações distintas: grossas, de  $10$  a  $2,5 \mu\text{m}$  e finas, menores que  $2,5 \mu\text{m}$ <sup>17</sup> (Figura 3). A entrada do amostrador permite que apenas partículas menores que  $10 \mu\text{m}$  entrem, sejam separadas em duas frações e coletadas em filtros de membrana policarbonato,



**Figura 2.** Amostrador HV  $PM_{10}$  utilizado para coleta de  $PI_{10}$



**Figura 3.** Amostrador Dicotômico utilizado para coleta de  $PI_{10}$  e  $PI_{2,5}$

tipo HTTP 37 mm de diâmetro e 0,4  $\mu\text{m}$  de porosidade. Este amostrador opera a uma vazão de 16,7  $\text{L min}^{-1}$ , com tolerância de 10%. No tubo receptor de partículas grossas, são coletadas a um fluxo de  $1,67 \pm 10\%$   $\text{L min}^{-1}$ , enquanto que as partículas finas seguem para o filtro de coleta a um fluxo de 15  $\text{L min}^{-1}$ <sup>15</sup>.

Para determinação da concentração em massa do material particulado do HV  $\text{PM}_{10}$  e Dicotômico foram utilizados filtros de fibra de quartzo e policarbonato, respectivamente, os quais foram identificados e acondicionados em câmara de pesagem, antes e após a coleta, por um período contínuo de 24 h, com a finalidade de evitar a hidratação da superfície dos filtros, seguindo norma da USEPA<sup>15</sup>. Os filtros foram pesados em uma balança analítica (Metler Toledo – AG 245) com precisão de 0,001 mg.

As coletas de  $\text{PI}_{10}$  foram realizadas do período de dezembro de 2000 a dezembro de 2001, nas quatro estações de amostragem (Tabela 3). Foi instalado, em cada uma das quatro estações de amostragem, um amostrador HV  $\text{PM}_{10}$ . Entretanto, como foi adquirido somente um amostrador Dicotômico, este ficou instalado durante períodos pré-determinados em cada uma das estações.

**Tabela 3.** Localização das estações de amostragem de material particulado

| Estação de amostragem | Coordenadas geográficas    | Distância de localização das estações em relação à UPME |
|-----------------------|----------------------------|---|
| Aceguá                | 31°52,52' S<br>54°08,81' W | 57 km a Sudoeste  |
| Aeroporto de Bagé     | 31°23,86' S<br>54°07,10' W | 44 km a Noroeste  |
| 8 de Agosto           | 31°40,31' S<br>53°49,74' W | 18 km a Sudoeste  |
| Pedras Altas          | 31°43,94' S<br>53°34,94' W | 20 km a Sudeste   |

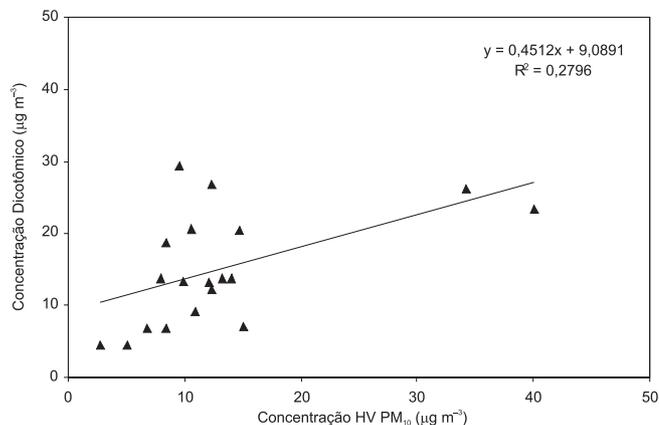
Primeiramente, no período de 16/12/00 à 20/03/01 foi instalado na estação Aceguá, que faz fronteira com o Uruguai e localiza-se mais distante da Usina Termoeletrica. No período de 05/04 a 01/08/01 o equipamento esteve instalado na estação 8 de Agosto, que está mais próxima da Usina. Na estação Pedras Altas, o amostrador permaneceu de 07/09 a 13/10/01 e, na estação Aeroporto, de 31/10 a 05/12/01, totalizando um ano de amostragem.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados correspondem à amostragem de 24 h em um intervalo de 15 dias entre dezembro de 2000 e 2001. As concentrações médias de  $\text{PI}_{10}$  obtidas através de ambos amostradores são apresentadas: 13,09  $\mu\text{g m}^{-3}$  para HV  $\text{PM}_{10}$ , 14,85  $\mu\text{g m}^{-3}$  para Dicotômico: 5,19  $\mu\text{g m}^{-3}$  (particulado fino –  $\text{PI}_{2,5}$ ) e 9,66  $\mu\text{g m}^{-3}$  (particulado grosso – fração de 10 a 2,5  $\mu\text{m}$ ).

O gráfico “scatterplot” (Figura 4) foi utilizado para a melhor visualização e interpretação do comportamento das concentrações em massa de HV  $\text{PM}_{10}$  e Dicotômico no período de amostragem, verificando valores menores de HV  $\text{PM}_{10}$  (cerca de 45%) e similares ao do Dicotômico (cerca de 30%).

Os maiores valores de  $\text{PI}_{10}$  amostrados pelo Dicotômico podem ser explicados pelas velocidades elevadas de vento que ocorreram nos dias cujo ponto de corte do equipamento para partículas grossas diminuiu, conseqüentemente aumentaram as concentrações em massa para as partículas menores. Contudo, as concentrações de  $\text{PI}_{2,5}$  não ultrapassaram o padrão diário de qualidade do ar estabelecido pela



**Figura 4.** Gráfico “scatterplot” que mostra a distribuição das concentrações de Dicotômico em relação ao HV  $\text{PM}_{10}$

USEPA (65  $\mu\text{g m}^{-3}$ )<sup>18</sup>. Geralmente, a maior velocidade dos ventos e o tipo de entrada do amostrador pode reduzir o ponto de corte em 50%, afetando significativamente a faixa de amostragem de partículas de 6 a 10  $\mu\text{m}$ <sup>19</sup>. Alguns autores<sup>20</sup> sugerem a modificação do sistema de entrada do amostrador Dicotômico, a fim de reduzir a entrada de água e, também, testes com diferentes velocidades de vento, visando a eficiência de coleta do particulado.

A Tabela 4 mostra valores de concentração de  $\text{PI}_{10}$  mínimos, máximos e médios de HV  $\text{PM}_{10}$  para as estações Aceguá (12,54  $\mu\text{g m}^{-3}$ ), Aeroporto (12,45  $\mu\text{g m}^{-3}$ ), 8 de Agosto (15,30  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) e Pedras Altas (16,27  $\mu\text{g m}^{-3}$ ). Observa-se que os valores médios das concentrações em massa das partículas entre os locais estudados foram similares e se apresentaram abaixo do padrão anual de qualidade do ar estabelecido pela legislação brasileira para  $\text{PI}_{10}$  (50  $\mu\text{g m}^{-3}$ ), assim como abaixo do padrão diário de qualidade (150  $\mu\text{g m}^{-3}$ )<sup>21</sup>.

**Tabela 4.** Valores mínimos, máximos e médios das concentrações de  $\text{PI}_{10}$  ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) de HV  $\text{PM}_{10}$  nas estações Aceguá, Aeroporto, 8 de Agosto e Pedras Altas

| Estações de amostragem | Mínimo | Máximo | Média |
|------------------------|--------|--------|-------|
| Aceguá (n=21)          | 3,73   | 40,32  | 12,54 |
| Aeroporto (n=21)       | 2,80   | 41,54  | 12,45 |
| 8 de Agosto (n=20)     | 5,70   | 40,10  | 15,30 |
| Pedras Altas (n=20)    | 3,35   | 43,17  | 16,27 |

Segundo alguns estudos que utilizaram a avaliação de condições sinóticas para diferentes locais<sup>22</sup>, os resultados podem ser explicados pela variação das condições meteorológicas de mesoescala ocorridas na região, causada pela entrada de massas de ar que fazem com que os ventos mudem suas direções e velocidades, propiciando um aumento na dispersão do particulado em todos os quadrantes.

Os dados meteorológicos obtidos através da modelagem numérica, modelo de mesoescala RAMS, juntamente com o modelo de dispersão ISCST que descreve simulações diagnósticas e prognósticas<sup>23</sup> permitiram observar que os dias 21/01, 05/04, 14/07, 01/08 e 13/10/01 utilizados para simulação da dispersão de  $\text{PI}_{10}$  emitida pela UPME foram representativos da ocorrência de sistemas frontais passando pela área de estudo. Os sistemas frontais constituem-se do encontro de massas de ar com propriedades distintas. São compostos classicamente por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão.

A Tabela 5 mostra os valores de concentração de  $\text{PI}_{10}$  modelados e amostrados. Verifica-se que os valores modelados se apresentaram abaixo dos valores de concentração de particulado medidos pelo HV

$PM_{10}$ , embora o valor de  $PI_{10}$  amostrado pelo Dicotômico ( $23,45 \mu g m^{-3}$ ) e o valor de concentração modelado ( $21,00 \mu g m^{-3}$ ) tenham se aproximado dos resultados para o dia 01/08/01. Os resultados para este dia podem ser explicados pela maior velocidade dos ventos, conforme citado anteriormente, o ponto de corte do amostrador decresce para partículas maiores, aumentando a concentração em massa para partículas finas<sup>19</sup>.

A partir dos parâmetros meteorológicos simulados pelo modelo RAMS, foi possível ilustrar a predominância da direção leste do vento na data 21/01/01 (Figura 5). A Figura 6 mostra as isolinhas de concentração de  $PI_{10}$  para o período médio de 24 h de amostragem para o dia 21/01/01. Através da modelagem ocorreram valores máximos de concentração próximos à fonte emissora ( $32,26 \mu g m^{-3}$ ) e aproximadamente  $1,0 \mu g m^{-3}$  para valores nos pontos de grade onde localizavam-se as estações receptoras. Esta diferença pode ter ocorrido devido à passagem de um sistema frontal, visto que na região estudada a altura da camada limite planetária atingiu um máximo de 500 m durante a tarde, pois em outras situações esse máximo chega a 1500 m por se tratar de uma região rural. A camada limite planetária é definida como a região da atmosfera que é afetada pela superfície, sofrendo transformações em uma escala de tempo inferior a 1 h. Nela os poluentes lançados sofrem as primeiras transformações fotoquímicas e são transportados pelo vento<sup>24</sup>. A camada limite apresenta valores mais elevados de altura nas regiões urbanas que nas rurais. Os contrastes entre as camadas urbana-rural podem ter importantes implicações na qualidade do ar regional, limitando a dispersão dos poluentes lançados na atmosfera e influenciando no comportamento da pluma lançada pela chaminé<sup>24</sup>.

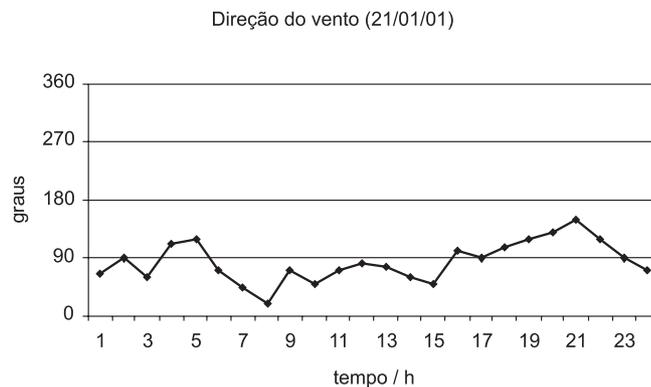


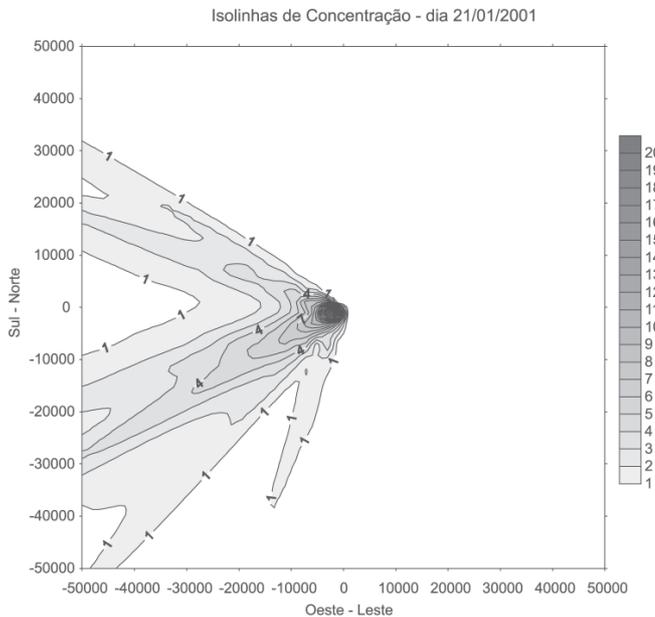
Figura 5. Direção do vento simulada pelo modelo RAMS durante o período de 24 h de amostragem, para o dia 21/01/01

Os dados de camada limite coletados em áreas rurais são distintos, não podendo ser aplicados para áreas urbanas, além disso variáveis necessárias para a definição da camada limite (fluxos de calor, altura de mistura) não são medidas rotineiramente<sup>25</sup>.

Os parâmetros meteorológicos obtidos através da simulação com o modelo RAMS, ilustraram a predominância da direção do vento de quadrante Sul/Sudoeste para o dia 5/04/01. Os resultados nulos de concentração nas estações receptoras (Tabela 4) podem ser explicados pelas isolinhas de concentração de  $PI_{10}$  no período médio de 24 h, cuja pluma de poluentes deslocou-se para o norte da fonte emissora.

Tabela 5. Valores de concentração de  $PI_{10}$  ( $\mu g m^{-3}$ ) coletados pelo HV  $PM_{10}$  e Dicotômico e os simulados pelo modelo ISCST nas estações Aceguá, Aeroporto, 8 de Agosto e Pedras Altas

| Data       | Concentrações de $PI_{10}$ ( $\mu g m^{-3}$ ) – Estação Aceguá       |                     |                  |
|------------|--|---------------------|------------------|
|            | Medida - HV $PM_{10}$  | Medida - Dicotômico | Modelada – ISCST |
| 21/01/2001 | 12,14  | 13,22               | 1,5              |
| 05/04/2001 | 3,73   | -                   | -                |
| 14/07/2001 | 16,86  | -                   | -                |
| 01/08/2001 | 40,32  | -                   | 11,0             |
| 13/10/2001 | 10,97  | -                   | -                |
| Data       | Concentrações de $PI_{10}$ ( $\mu g m^{-3}$ ) – Estação Aeroporto    |                     |                  |
|            | Medida - HV $PM_{10}$  | Medida - Dicotômico | Modelada – ISCST |
| 21/01/2001 | 11,01  | -                   | -                |
| 05/04/2001 | 4,15   | -                   | -                |
| 14/07/2001 | 18,64  | -                   | 1,5              |
| 01/08/2001 | 41,54  | -                   | 16,00            |
| 13/10/2001 | 9,670  | -                   | 3,00             |
| Data       | Concentrações de $PI_{10}$ ( $\mu g m^{-3}$ ) – Estação 8 de Agosto  |                     |                  |
|            | Medida - HV $PM_{10}$  | Medida - Dicotômico | Modelada – ISCST |
| 21/01/2001 | 14,09  | -                   | 1,0              |
| 05/04/2001 | 8,40   | 18,77               | -                |
| 14/07/2001 | 10,65  | 20,65               | -                |
| 01/08/2001 | 40,10  | 23,45               | 21,00            |
| 13/10/2001 | -  | -                   | -                |
| Data       | Concentrações de $PI_{10}$ ( $\mu g m^{-3}$ ) – Estação Pedras Altas |                     |                  |
|            | Medida - HV $PM_{10}$  | Medida - Dicotômico | Modelada – ISCST |
| 21/01/2001 | 36,56  | -                   | -                |
| 05/04/2001 | 4,73   | -                   | -                |
| 14/07/2001 | 25,66  | -                   | -                |
| 01/08/2001 | 43,17  | -                   | 26,00            |
| 13/10/2001 | 10,94  | 9,04                | -                |

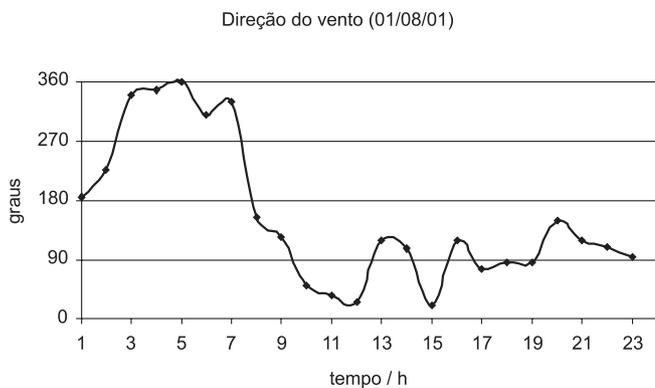


**Figura 6.** Isolinhas de concentração de  $PI_{10}$  ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ). Simulação realizada pelo modelo ISCST para uma grade de 100 km x 100 km em período médio de 24 h

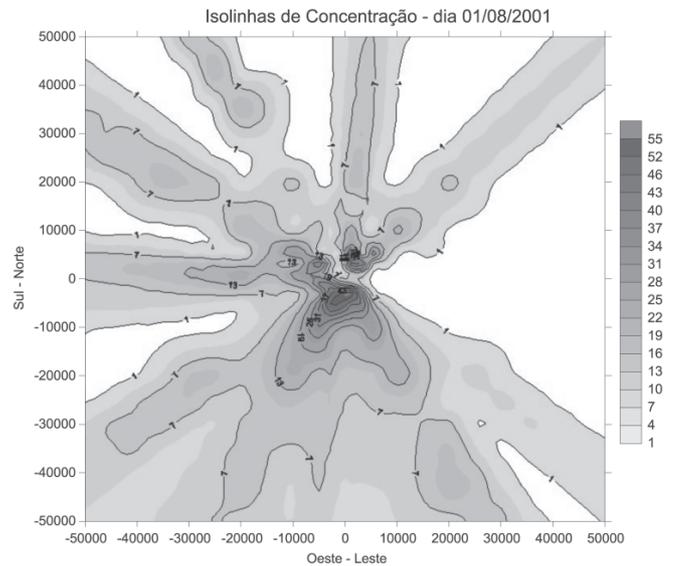
Os dados meteorológicos ilustraram a predominância da direção do vento de sudeste para a maior parte do período de amostragem na data 14/07/01. A estação Aeroporto apresentou concentração de  $PI_{10}$  em torno de  $1,5 \mu\text{g m}^{-3}$  a partir da modelagem numérica, enquanto os resultados medidos apresentaram nulos nas demais estações receptoras. Isto foi verificado através das isolinhas de concentração de aerossóis ( $PI_{10}$ ) para o período médio de 24 h, com dispersão da pluma de poluentes para a direção noroeste da fonte.

Conforme a variação do vento durante esse período, observa-se que houve a dispersão da pluma em todos os quadrantes da grade para o dia 01/08/01 (Figura 7). Aplicando o modelo, obteve-se como resultados para esta data a variação das concentrações ao longo da grade (Figura 8), sendo que valores maiores aconteceram próximos à fonte (valor máximo  $55 \mu\text{g m}^{-3}$ ) e os valores menores, mais distantes da fonte. Apesar de ser um dia de inverno, a temperatura foi considerada alta ( $28,7^\circ\text{C}$ ) e a umidade relativa média baixa (45,29%) para o período.

Em relação ao dia 13/10/01, os ventos predominaram de sudeste e fizeram com que a pluma de contaminantes se deslocasse para a direção noroeste, cuja concentração de  $PM_{10}$  modelada pelo ISCST,



**Figura 7.** Direção do vento simulada pelo modelo RAMS durante o período de 24 h de amostragem, para o dia 01/08/01



**Figura 8.** Isolinhas de concentração de  $PI_{10}$  ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ). Simulação realizada pelo modelo ISCST para uma grade de 100 km x 100 km em período médio de 24 h

na estação Aeroporto, resultou em aproximadamente  $3 \mu\text{g m}^{-3}$  para este dia, e que para as demais estações a concentração fosse nula. A dispersão de poluentes neste dia foi na direção oeste da usina, conforme foi ilustrado pelas isolinhas de concentração de  $PI_{10}$ .

Conforme estudos anteriores<sup>24</sup> e a partir dos dados obtidos no presente trabalho pode-se verificar que os modelos numéricos de dispersão, em geral, subestimam os valores de concentração quando comparados aos valores medidos, por utilizarem dados estimados relacionados às condições de estabilidade atmosférica.

## CONCLUSÕES

De acordo com o estudo das partículas menores que  $10 \mu\text{m}$  realizado em Candiota, pode-se afirmar que os padrões diários ( $150 \mu\text{g m}^{-3}$ ) e anual ( $50 \mu\text{g m}^{-3}$ ) de qualidade do ar estabelecidos pela legislação brasileira (CONAMA) para  $PI_{10}$  e para  $PI_{2,5}$  ( $65 \mu\text{g m}^{-3}$ ) da USEPA não foram ultrapassados durante os períodos das campanhas analisadas.

Ambos os métodos de amostragem estudados mostraram diferenças de concentrações em massa. Os valores de ambos foram similares para 30% dos resultados. Aproximadamente 45% dos valores de  $HV PM_{10}$  foram menores em relação às amostras de Dicotômico.

Os valores experimentais de  $PI_{10}$  e os modelados apresentaram diferenças significativas, pelo fato dos valores de concentração modelados estarem subestimados. Isto pode ser explicado pelo fato do modelo ISCST considerar a velocidade do vento e os coeficientes de difusão constantes no tempo, e que a pluma tem um comportamento gaussiano nas direções vertical e horizontal.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao PADCT/CIAMB e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo suporte financeiro, ao Serviço de Amostragem da Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luís Roessler/RS (FEPAM) e à Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE) pela sua contribuição neste estudo.

## REFERÊNCIAS

1. Querol, X.; Alastuey, A.; Rodriguez, S.; Plana, F.; Mantilla, E.; Ruiz, C. R.; *Atmos. Environ.* **2001**, *35*, 845.
2. Brooks, J. R.; Dann, T. F.; Burnett, R. T.; *J. Air Waste Manage.* **1997**, *47*, 2.
3. Seinfeld, J. H.; Pandis, S. N.; *Atmospheric Chemistry and Physics – From air pollution to climate change*, United States of America, 1998.
4. Ohlström, M. O.; Lehtinen, K. E. J.; Moisio, M.; Jokiniemi, J. K.; *Atmos. Environ.* **2000**, *34*, 3701.
5. Rosa, A. R.; Migliavacca, D. M.; Teixeira, E. T.; Porto, F. N. M.; *3<sup>rd</sup> International Symposium Environmental Geochemistry in Tropical Countries*, Nova Friburgo, Brasil, 1999; Sánchez, J. D.; Teixeira, E.C.; Fernandes, I.D.; *4<sup>th</sup> International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production*, Caligari, Italy, 1996; Sánchez, J. D.; Teixeira, E. C.; Isaia, T.; Vecchio, G.; Pestana, M. H. D.; Formoso, M. L. L.; *4<sup>th</sup> Congresso Brasileiro de Geoquímica e 3<sup>rd</sup> Congresso de Geoquímica dos Países de Língua Portuguesa*, Niterói, Brasil, 1995; Fiedler, H. D.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 1987; Moraes, O. L. L.; Tirabassi, T.; Alves, R. C. M.; *Air Pollut.* **1997**, *4*, 35; Moraes, O. L. L.; Oliveira, A. P.; Caetano Neto, E. S.; Degrazia, G.; *Workshop on Air Pollution and Acid Rain the Candiota Program*, Bauru, Brasil, 1996; Braga, C. F.; Alves, R. C. M.; Teixeira, E. C.; Pires, M.; *J. Environ. Monit.* **2002**, *4*, 897.
6. Migliavacca, D. M.; *Dissertação de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil, 2001.
7. Braga, C. F.; *Dissertação de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Brasil, 2002.
8. DNM - *Departamento Nacional de Meteorologia* (Brasil), 1992, p. 84.
9. Degrazia, G. A.; Moraes, O. L. L.; *Revista Brasileira de Meteorologia* **1989**, *4*, 275; Muñuzuri, V.; *J. Appl. Meteor.* **1998**, *37*, 1430; Souto, J. A.; Pérez-Muñuzuri, V.; Castro, M.; Casares, J. J.; Lucas, T.; *J. Appl. Meteor.* **1998**, *37*, 1068.
10. Briggs, G. A. *Em Atomic Energy Commission Review Series*; Beary, W. T., ed.; New York, 1969.
11. Zanella, R.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil, 1987.
12. Alves, R. C. M.; Moraes, O. L. L.; Silva, M. A. F. D.; Tirabassi, T.; *Air Pollut.* **1998**, *7*, 301.
13. Pasquill, F.; *Atmospheric Diffusion*, Ellis Horwood ed., Chichester, 1974.
14. Wark, K.; Warner, C. F.; *Contaminación del aire*, Noriega ed., México, 1994.
15. USEPA - Environmental Protection Agency; *Quality assurance handbook for air pollution measurement systems: Volume II: Ambient air specific methods*; Section 2.11; epa/600/r-94/038a; U. S. Government Printing Office Washington, DC, April 1994.
16. ENERGÉTICA, AGV MP10 (Amostrador de Grande Volume para partículas de até 10mm) – Modelo 1200/CVV; *Manual de operação – Energética*, Rio de Janeiro, 1998.
17. GRASEBY ANDERSEN, Andersen Instruments Dichotomous Sampler Operator's Manual, Model SA241 (SA246b inlet); Designation No. RFPS-0789-073; Graseby Andersen/Graseby GMW, Smyrna, GA, 1989.
18. USEPA - Environmental Protection Agency; *Revised Particulate Matter Standards*, United States, office of air quality planning and standards, Fact Sheet, July 17, 1997.
19. Ono, D. M.; Hardebeck, E.; Parker, J.; Cox, B. G.; *J. Air Waste Manage.* **2000**, *50*, 1144.
20. Tolocka, M. P.; Peters, T. M.; Vanderpool, R. W.; Chen, F.; Wiener, R. W.; *Aerosol Sci. Technol.* **2001**, *34*, 407.
21. CONAMA, Resolução n°. 003 de 28 de junho de 1990, 4ªed., Brasília, 1992.
22. Sánchez-Ccoyllo, O. R.; Andrade, M. F.; *Environ. Pollut.* **2002**, *116*, 257; Perez, P.; Reyes, J.; *Atmos. Environ.* **2002**, *36*, 4555; Barna, M. G.; Gimson, N. R.; *Atmos. Environ.* **2002**, *36*, 3531.
23. Seamam, N. L.; *Atmos. Environ.* **2000**, *34*, 2231.
24. Alves, R. C. M.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade de São Paulo, Brasil, 1996.
25. Fisher, B.; Kukkonen, J.; Schatzmann, M.; *Proceedings of the Sixth International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, Paris, France, 1999.