

## Validação de modelos digitais de terreno do sensor Aster no estudo da dispersão de poluentes na região de Candiota

Sheila Radmann da Paz<sup>1</sup>  
Rita de Cássia Marques Alves<sup>1</sup>  
Silvia Beatriz Alves Rolim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia  
Caixa Postal 91501-970 – Porto Alegre – RS, Brasil  
sheilapaz@gmail.com;  
rita.cma@terra.com.br;  
silvia.rolim@ufrgs.br

**Abstract:** This work presents a study of the behavior of pollutant emitted by the Thermoelectrical Plant President Médici, in Candiota - RS, associating the path and concentration of these materials, to the local topographic characteristics, through the use of digital terrain model (DTM) extracted of stereoscopic pairs of ASTER sensor (EOS-AM1). The elevation, slope and aspect data generated by DTM were added in the numeric model RAMS (Regional Atmospheric Modeling System). Information about soil humidity were integrated in this model to simulate the behavior of the atmosphere in the dispersion processes of pollutant emitted in the area. The results showed the outstanding contribution of the topography and soil humidity for the regime of rains in the area. ASTER DTM presented a better performance related to the original RAMS DTM. However, it presented a larger time of processing. Based on the progress of the computer science and in the easiness of acquisition of ASTER data, we suggest the use of digital terrain models of high precision as an alternative to the existent models.

**Palavras-chaves:** Digital Terrain Model, Atmospheric Modeling, Behavior of Pollutant, Modelo Digital de Terreno, Modelagem Atmosférica, Dispersão de Poluentes.

### 1. Introdução

O impacto ambiental das emissões de poluentes está associado aos processos de dispersão dos materiais na atmosfera. A trajetória dos poluentes atmosféricos, e conseqüentemente, sua concentração ambiental são determinadas pelas condições climáticas, meteorológicas e micrometeorológicas as quais estão interligadas à topografia, uso e ocupação do solo.

O caminho dos contaminantes é um processo extremamente complexo devido a grande quantidade de variáveis envolvidas. Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores modernos é possível realizar "simulações" do comportamento dos sistemas reais e, assim, fazer previsões com diversos graus de aproximação. A previsão através de modelos físico-matemáticos está baseada no estado de um sistema num dado momento e sua solução através das equações adequadas. Desta forma pode-se caracterizá-lo em outro instante.

No que se refere à previsão de dispersão de poluentes, os modelos meteorológicos buscam representar a interação entre os processos de dispersão do material emitido e o comportamento deste diante o estado atmosférico e as características físicas do ambiente. Estas características podem ser: a cobertura do terreno, umidade do solo, presença de centros urbanos, proximidade com áreas lacustres e marítimas e influência da topografia.

O presente trabalho tem como objetivo a análise espacial de dados topográficos com base em modelos digitais de terreno (MDT) extraídos de pares estereoscópicos do sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) através das bandas 3N e 3B, no estudo da dispersão de poluentes na Usina Termoeletrica Presidente Médici (UTPM,

Candiota, RS. Os dados de elevação, declividade e aspecto gerados pelo MDT foram inseridos no modelo numérico RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*). A modelagem contou também com manipulação de dados de umidade do solo, que juntamente com os dados de terreno, buscaram simular o comportamento da atmosfera nos processos de dispersão de poluente emitidos na região.

## 2. Material e Métodos

O período selecionado para o desenvolvimento do trabalho foi de 20 a 24 de abril de 2004, caracterizado inicialmente pela atuação de um sistema frontal sobre a região de estudo. O modelo meteorológico RAMS utilizado para as simulações atmosféricas é constituído de diferentes sub-rotinas passíveis de alteração e recompilação. Neste estudo são realizadas alterações em duas sub-rotinas existentes no modelo. A primeira, referente à topografia, é alterada a partir de uma nova malha de dados, com informações de resolução espacial modificada para 500m extraídas do sensor ASTER do satélite TERRA. A segunda sub-rotina modificada é a de dispersão do material poluente, visando o estudo da trajetória e deposição do material emitido pela usina, associada às condições atmosféricas e de terreno.

Fazendo uso destas informações, foram efetuadas quatro simulações distintas no modelo numérico RAMS, interagindo os fatores topografia e umidade do solo de maneiras diferentes. As simulações referem-se a quatro ensaios variados, onde se intercala a utilização dos dois fatores. O resultado é a contribuição individual de cada uma das variáveis e o efeito da interação entre elas em relação à dispersão de poluentes.

### 2.1. Geração do Modelo Digital do Terreno gerado com Imagens ASTER

O instrumento ASTER faz parte de um conjunto de 5 sensores alocados na plataforma EOS AM-1, sendo constituído por três subsistemas de telescópios distintos perfazendo um total de 14 bandas com diferentes resoluções espaciais, espectrais e radiométricas, imageando cenas da superfície terrestre em uma área de 60 X 60 km (Abrams *et al.*, 2004). O MDT utilizado neste trabalho foi gerado com dados do subsistema VNIR (*visible and near infrared*) com 15m de resolução espacial. Este módulo registra imagens nos intervalos de 0,52 a 0,60  $\mu\text{m}$  (banda 1), 0,63-0,69  $\mu\text{m}$  (banda 2) e 0,78-0,86  $\mu\text{m}$  (banda), sendo que este último registra 2 cenas: uma com visadas em nadir (banda 3N) e outra fora do nadir num ângulo de aproximadamente 28° (banda 3B-*backdoor*). A diferença de paralaxe entre as bandas 3N e 3B permite a geração de pares estereoscópico e, conseqüentemente, a construção de modelos tridimensionais de elevação.

Um MDT consiste num conjunto de dados com informações de elevação da área são representados através de uma matriz numérica referenciada a um sistema de coordenadas espaciais. A geração do MDT foi desenvolvida no módulo AsterDTM do programa ENVI com base nas informações do ângulo de visada da imagem, altura da órbita do sensor e da área de abrangência, e resolução do pixel. Com estas informações podem-se calcular as altitudes relativas entre diferentes regiões com precisão nominal dos dados altimétricos de aproximadamente 12m, e precisão nominal dos dados efeméricos planimétricos de 25m. A **Figura 1** apresenta o mosaico ASTER (RGB 231) utilizado para a geração do MDT da região estudada.

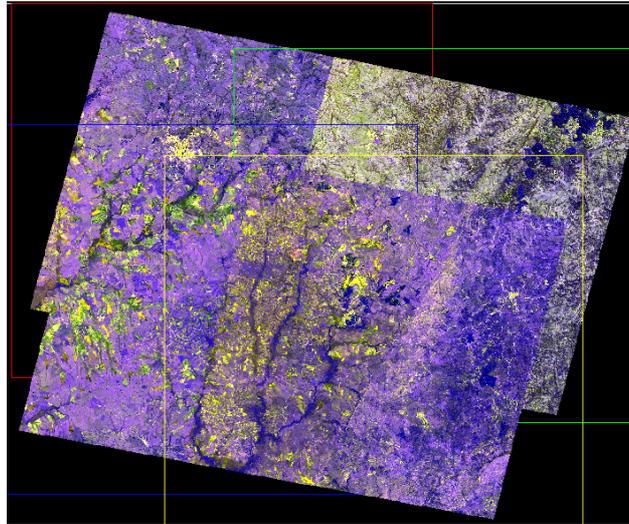


Figura 1 - Mosaico ASTER (RGB231) utilizado para a geração do MDT da região estudada.

O mosaico gerado originalmente com resolução de 15m, foi reamostrado para 500m para evitar instabilidade durante o processamento computacional do modelo RAMS. Uma vez que a implementação no modelo numérico é feita somente em grades regulares, o mosaico teve sua estrutura irregular transformada para uma grade regularmente espaçada. Uma nova grade foi construída englobando a original, atribuindo valor “zero” aos pixels correspondentes às áreas sem informação. A grade regular resultante é um modelo digital que aproxima superfícies através de um poliedro de faces retangulares, do tipo linha, convenientemente preparados para sua futura modelagem. A grade também pode ser representada com através de programas específicos (**Figura 2**).

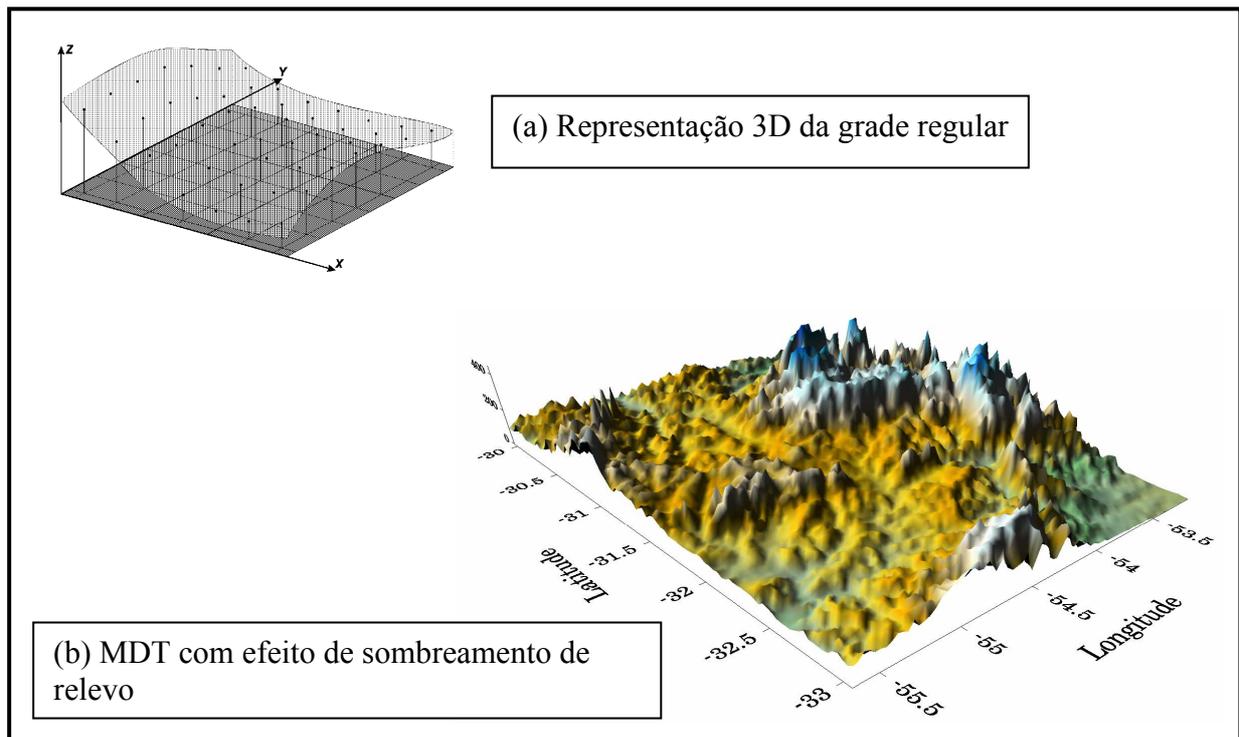


Figura 2. Exemplo de representação de grade regular (a) e espacialização tridimensional por sombreamento de relevo da região de Candiota (b).

## 2.2 Inicialização do modelo RAMS

O RAMS foi inicializado com os dados meteorológicos do modelo global do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), com resolução de  $0,9^\circ$  para os horários das 00 e 12 TMG (Tempo Médio de Greenwich), referentes ao período das análises. Quatro grades centradas na coordenada da usina (31.5 S e 53.7W) foram aninhadas, com espaçamento de grade horizontal de 32, 8, 4 e 0,5 km para as grades 1, 2, 3 e 4, respectivamente, **Figura 3**.

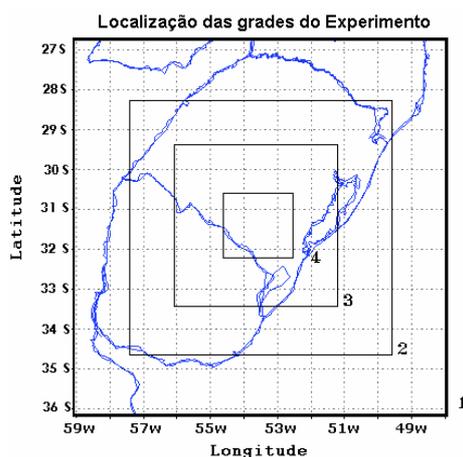


Figura 3 - Aninhamento das quatro grades utilizadas na modelagem, centrado em -53,68 de longitude e -31,5 de latitude da área de estudo.

As simulações foram realizadas em processamento paralelo através da composição de vários microcomputadores interligados, compartilhando seus processadores e controlados por uma unidade principal. Este conjunto recebe a denominação de “cluster” de PC’s. A estrutura física do cluster utilizado está instalada no laboratório do Grupo de Estudos em Previsão Regional Atmosférica (GEPRA) da Fundação Universidade Federal de Rio Grande (FURG).

## 2.3. Sub-rotina de dispersão do Modelo

O monitoramento da qualidade do ar depende de parâmetros que se apresentam de forma aleatória e de comportamento não homogêneo, sendo definido pela influência das variáveis atmosféricas. Com isso, a avaliação temporal e espacial da concentração de um determinado constituinte presente na atmosfera é efetuada através da solução da equação da conservação de massa deste constituinte, o que pode ser resolvido numericamente. Estes modelos de dispersão consideram o peso que as variáveis meteorológicas (temperatura da atmosfera, velocidade e direção dos ventos, grau de estabilidade ou instabilidade da atmosfera, etc) influenciam no cálculo do comportamento de contaminantes.

Para a determinação do transporte de uma substância presente numa massa de ar, a sub-rotina implementada no modelo RAMS resolve a seguinte equação de transporte para um constituinte atmosférico (Freitas, 1999 e Alves, 2000):

$$\bar{Q}_{[c]} = \frac{Q_o}{\rho_o V} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde  $\bar{Q}_{[c]}$  é o termo fonte inserido no modelo, expresso por unidades  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ;  $c$  é um constituinte atmosférico genérico;  $Q_o$  representa a taxa de emissão da Usina, que em Candiota é de 750 g/s;  $\rho_o$  é a densidade do ar no estado básico; e  $V = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ , o volume da altura da fonte.

### 3. Resultados e Discussão

Inicialmente foram realizadas as análises das condições atmosféricas atuantes no período selecionado (20 a 24 de abril de 2004), obtidas através da estação meteorológica automática, instalada em Aceguá, RS, assim como dados da rede de coleta do INMET- Estação Bagé. Estas informações serão utilizadas para a validação dos resultados da modelagem numérica.

Para a análise da topografia, foram considerados os resultados obtidos através da saída do modelo RAMS referentes à quarta grade do modelo (50km x 50km), centrada na usina (31.5S e 53.68W). Para a topografia, duas situações distintas foram consideradas, sendo que na primeira a inicialização foi realizada a partir de informações extraídas do sensor ASTER, com resolução espacial de 500m (**Figura 4**), e a segunda considerou a topografia exatamente plana e ao nível do mar. De semelhante modo, o efeito da umidade presente no solo foi analisada com resultados de simulações numéricas em que estas eram consideradas e quando o campo da variável apresenta-se nulo. Com isso, denominou-se experimento C<sub>1</sub>, o modelo integrado com umidade do solo igual a zero e com a topografia plana; no experimento C<sub>2</sub> o modelo é inicializado com o solo seco inicialmente, porém considerando o efeito da topografia regional. Novamente a topografia é desconsiderada no experimento C<sub>3</sub>, contudo apresenta a umidade do solo estabelecida em um valor inicial de 42%, isolando o efeito da contribuição local. No quarto e ultimo ensaio, C<sub>4</sub>, é obtida uma avaliação da contribuição integrada entre a umidade presente no solo e a topografia da região. A **Tabela 1** apresenta uma representação dos ensaios realizados no experimento.

Tabela 1 – Esquema dos ensaios montados para a análise da topografia e umidade do solo.

Ensaio	Topografia	Umidade do solo	Concentração
1	Plana	Seco	C <sub>1</sub>
2	Original	Seco	C <sub>2</sub>
3	Plana	Úmido	C <sub>3</sub>
4	Original	Úmido	C <sub>4</sub>

No dia 20/04 poucas nuvens eram vistas sobre o Estado, porém áreas de instabilidades surgidas no noroeste do RS no dia 21/04, ganharam força e se espalharam para as demais áreas e no dia 22/04 deram início ao sistema frontal, responsável pelo avanço de muitas nuvens para a região, assim como registros de precipitação, chegando a 130mm em Bagé (INMET) registrados no dia 22. Na Estação Meteorológica de Aceguá registros de até 22 mm/h (**Figura 5**) foram coletados na passagem desta frente fria. Após a passagem do sistema, um núcleo de alta pressão atingiu o RS, deixando o tempo seco nos demais períodos da simulação.

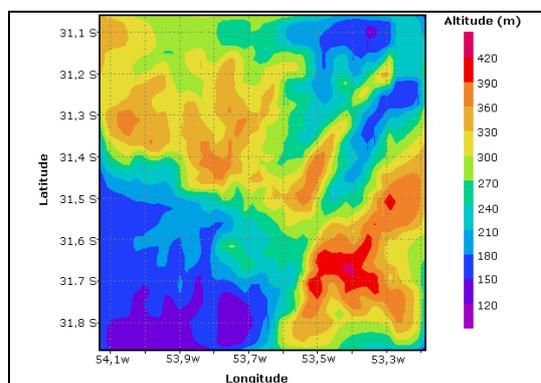


Figura 4 – Campo de topografia obtido pelo RAMS, com resolução de 500m.

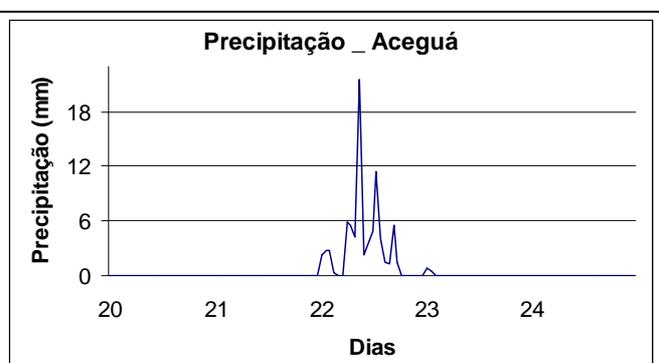


Figura 5 – Campo de precipitação, obtido pela Estação Meteorológica de Aceguá, RS.

O episódio da passagem da frente fria observada no dia 22 provocou registros de precipitação na área de estudo. A ocorrência desta variável mostra-se importante no estudo da dispersão dos poluentes, pois a chuva remove impurezas presentes no ar diminuindo a concentração os poluentes suspensos na atmosfera. Contudo, as simulações realizadas no RAMS apresentaram resultados peculiares a cada um dos ensaios. Na **Figura 6** estão representados os resultados da evolução temporal da precipitação nos dias da simulação, posicionada na coordenada da UTPM (-53.68 lon, -31.5 lat). A contribuição da topografia somada ao efeito da umidade presente no solo se mostra representativa na quantidade de precipitação no ensaio C<sub>1</sub>, onde foi estimado apenas 1.5mm a mais de chuva em relação aos dados observados pela Estação de Aceguá, quando comparado com o valor máximo de chuva acumulada em 1 hora. Em C<sub>3</sub>, a simulação obteve intensidade reprimida 24% seguidos de índices ainda maiores em C<sub>2</sub> e C<sub>4</sub>, que tiveram 50% (11,8mm) e 69% (7mm), respectivamente, de seus valores subestimados. Estas características demonstram a grande contribuição dos efeitos orográficos para a precipitação local.

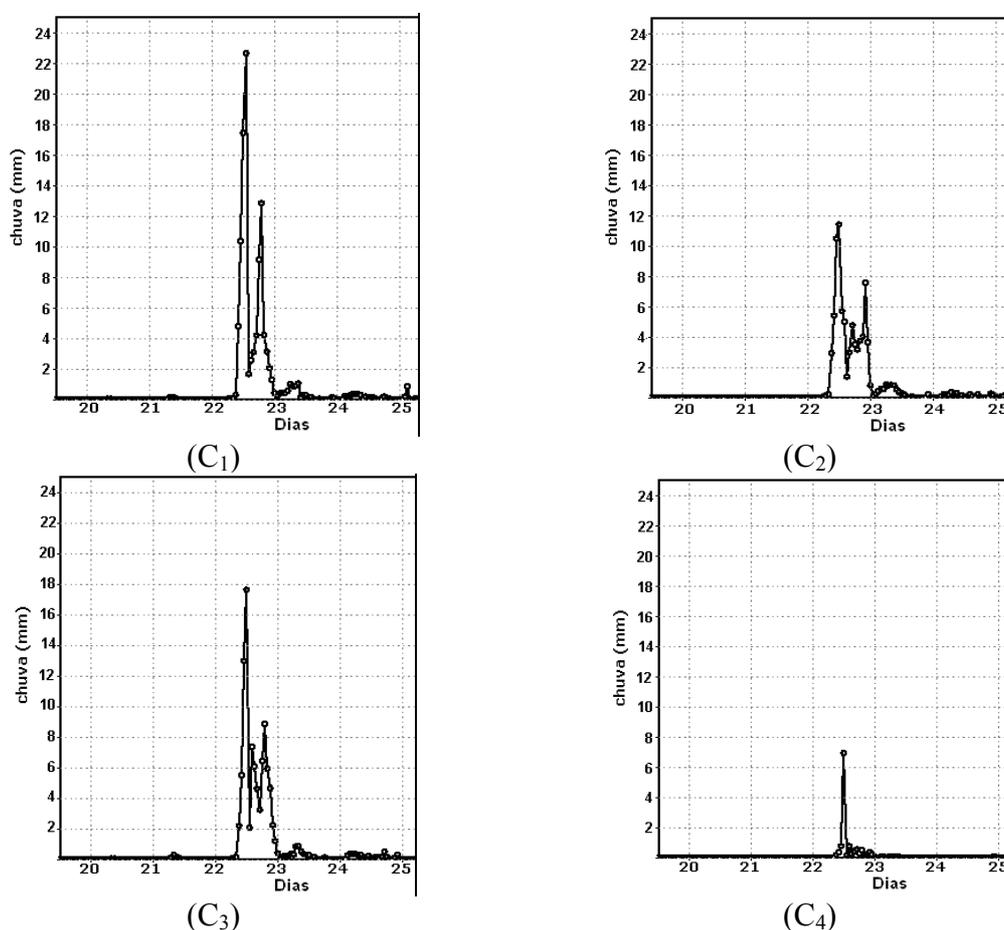


Figura 6 – Evolução temporal da precipitação para o período da simulação, obtido pela modelagem numérica. Unidade expressa em milímetros (mm/h).

A **Figura 7** descreve a evolução temporal de NO<sub>x</sub> calculados com o modelo RAMS, considerando a latitude de -31.61 e longitude de -53.74. Em todos os ensaios está evidente a concentração praticamente nula deste material, justamente no período da passagem do sistema frontal. Porém dias que antecedem ao evento, observa-se que as concentrações foram altas devido à estagnação do ar, imposto pela presença de nebulosidade. O aquecimento da atmosfera próxima à superfície está definido pela radiação direta que atinge o solo. A energia

solar que chega até a superfície, aquece a camada de ar próxima e ela, fazendo com que esta parcela ascenda e forme turbilhões, que misturam o ar. Quanto maior a disponibilidade de calor, mais intensos serão estes vórtices turbulentos. Os movimentos do ar, relacionados pelo aquecimento desigual da atmosfera, são responsáveis pela estrutura da camada em contato direto com a superfície, a Camada Limite Planetária (CLP). A estrutura desta camada é função dos processos físicos que nela ocorrem, assim num período de 24 horas, esta camada sofre uma grande variação, imposta pelos movimentos que ocorrem no interior dela. No caso estudado, observou-se que dia 21, as áreas de instabilidades presentes foram responsáveis pelo grande aumento de nebulosidade e pouca atividade turbulenta nas áreas próximas a UTPM. Contudo no início da tarde deste dia, observa-se concentrações maiores nos ensaios C<sub>2</sub> e C<sub>4</sub>. Como o solo foi considerado seco nestas situações, a principal causa para o aumento das concentrações em relação aos outros ensaios está ligada à deficiência de evapotranspiração, responsável por transferir umidade à atmosfera e então “alimentar” os vórtices turbulentos na CLP.

Após a passagem da frente fria, uma massa de ar seca e mais fria se estabeleceu sobre o Estado e ventos mais intensos foram sentidos, chegando a 9m/s no dia 24, facilitando a dispersão para localidades distantes da fonte.

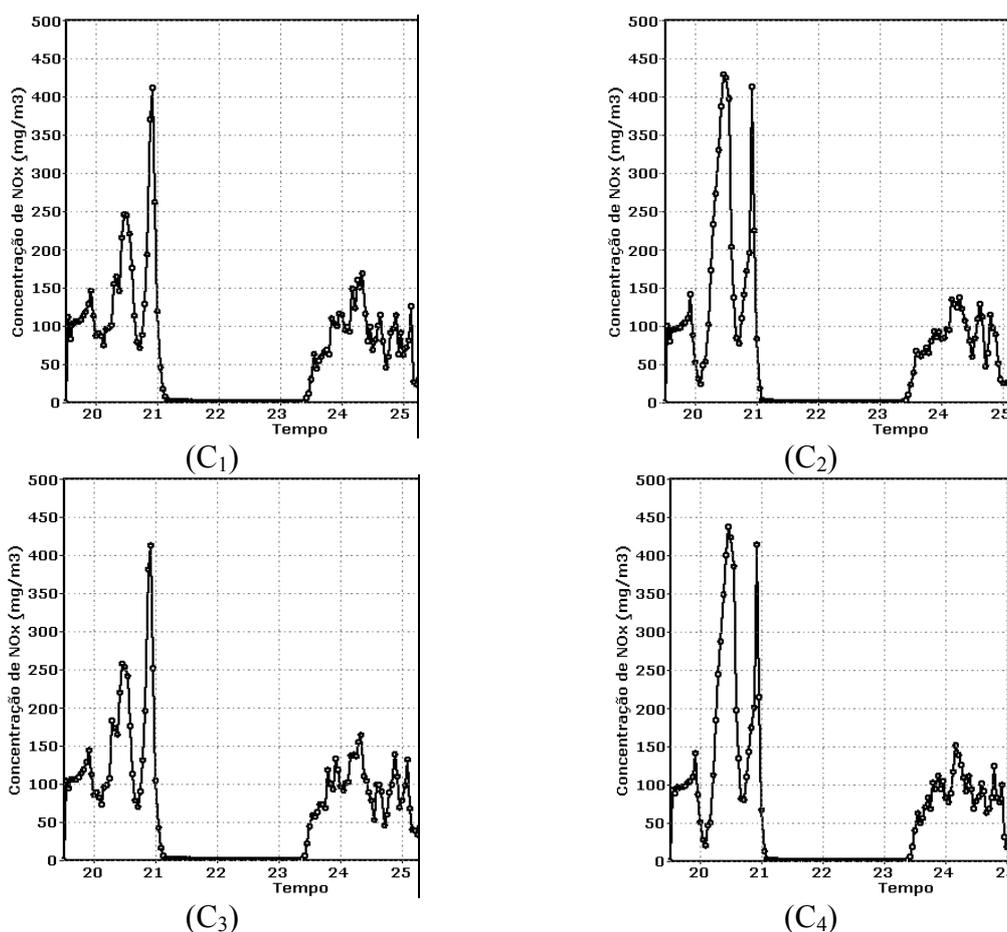


Figura 7 – Campo de variação temporal de concentração de Nox no nível do solo, obtido pela modelagem numérica. Concentrações expressas em  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### 3. Conclusões

Os resultados mostraram a contribuição marcante da topografia e umidade do solo para o regime de chuvas na região. O efeito orográfico local está relacionado ao fato de que a pequena elevação da topografia existente provoca o desvio da parcela de ar que encontra o desnível topográfico, em direção ao vale existente na região da UTPM. A umidade presente no solo representa um contribuinte marcante em processos advectivos na baixa atmosfera, como aqueles representados pelo efeito da evapotranspiração, sendo responsável por transferir umidade à atmosfera e desencadear o processo de dispersão do material suspenso na atmosfera.

Com base em estudos anteriores de simulação com o RAMS, na própria região do sudoeste gaúcho, justifica-se o uso de um refinamento da topografia, visto que resultados de simulações realizadas com a topografia original do modelo apresentaram uma subestimação na ordem de grandeza das variáveis, quando comparados com dados registrados em estações de superfície e até mesmo os dados simulados neste trabalho. Porém, entende-se que a simulação com inclusão de MDT, ao mesmo tempo em que otimiza os resultados, aumenta em tempo de processamento. Baseado no progresso da informática e na facilidade de aquisição de dados ASTER, sugere-se o uso de modelos digitais de terreno de alta precisão como uma alternativa para os modelos existentes.

### Referências

- ABRAMS, M.; HOOK, S; RAMACHANDRAN, B. 2004. **ASTER User Handbook – Version 2**. Jet Propulsion Laboratory/Califórnia Institute of Technology. Acesso em abril de 2004. [www.sulsoft.com.br/downloads/main.htm](http://www.sulsoft.com.br/downloads/main.htm).
- ALVES, R. C. M.. **Descrição das Circulações Locais na Região de Candiota-RS e seus efeitos no Transporte de Poluentes**. São Paulo, 2000. 130p. Tese de Doutorado submetida ao Departamento de Ciências IAG –USP.
- FREITAS, E. D. & SILVA DIAS, P. L. **O efeito da Ilha de calor urbana sobre os fluxos de calor através da utilização do modelo RAMS**. In: *Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 11, Rio de Janeiro. 2000.
- FREITAS, S. R. **Modelagem numérica do transporte e das emissões de gases e aerossóis de queimadas no cerrado e floresta tropical da América do Sul**. São Paulo, 1999. 185p. Tese de doutoramento do Instituto de Física da Universidade de São Paulo.