



Concentração Superficial de Contaminantes Simulada por um Modelo Euleriano de Dispersão Utilizando Perfis de Vento Obtidos Pelos Modelos OML e RAMS
Ground Level Cross-wind Integrated Concentration Simulated by an Eulerian Dispersion Model Using Wind Profiles Generated by OML and RAMS Models

Cláudia Rejane Jacondino de Campos¹; James Adryani Avelar de Jesus² & Luciana Barros Pinto³

¹UFPEL - Campus Universitário, cp. 354, 96010-900 - Pelotas, RS.

E-mail: cjcampos@ufpel.edu.br

²INPE Av. dos Astronautas, 1758, Jd. da Granja, 12227-010, São José dos Campos, SP.

E-mail: james@cptec.inpe.br

³FURG, Campus Carreiros, Av. Itália, km 8, 96201-900, Rio Grande, RS.

E-mail: luciana.meteoro@gmail.com

Recebido em: 27/06/2007 Aprovado em: 10/08/2007

Resumo

Neste trabalho testou-se o uso de saídas do modelo de mesoescala Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) como entrada para um Modelo Euleriano de Dispersão (MED). Especificamente comparou-se a concentração superficial de contaminantes simulada pelo MED, utilizando um coeficiente de difusão turbulento válido para uma Camada Limite Convectiva (CLC) e dois perfis de vento: o primeiro obtido pelo modelo Operationelle Meteorologiske Luftkvalitetsmodeller (OML) e o segundo gerado pelo modelo de mesoescala RAMS. Para realizar as simulações com o MED foram utilizados dados coletados no dia 06/07/1979 durante o experimento de traçadores de Copenhagen (taxa de emissão, altura da fonte, escala de velocidade convectiva, altura da CLC, velocidade de fricção, comprimento de Monin-Obukhov na camada superficial e parâmetro e rugosidade aerodinâmica da superfície). O desempenho das duas simulações foi testado confrontando as concentrações superficiais de contaminantes geradas com aquelas observadas no referido experimento. Para uma região de topografia simples, como é o caso da região de estudo, os resultados mostraram que o uso de um modelo diagnóstico (OML) ou de um modelo prognóstico (RAMS) para simular o perfil de vento não gerou grandes diferenças entre as concentrações superficiais de contaminantes simuladas pelo MED.

Palavras-chave: Modelo Euleriano de Dispersão; dispersão de poluentes; sistema de modelos

Abstract

In this work was tested the use of output data from Regional Atmospheric Modeling System (RAMS) as input to an Eulerian Dispersion Model (EDM). Specifically was compared the ground level cross-wind integrated concentration simulated by EDM, using an eddy diffusivity valid to the Convective Boundary Layer (CBL) and two wind profiles: the first obtained by the Operationelle Meteorologiske Luftkvalitetsmodeller model (OML) and the second generated by RAMS mesoscale model. To accomplish the simulations with EDM were used data collected on the 07/06/1979 during Copenhagen tracer experiment (emission rate, source height, convective velocity scale, CBL height, friction velocity, Monin-Obukhov length in the surface layer and roughness length). The performance of the two simulations was tested confronting the ground level cross-wind integrated concentration generated with those observed in referred experiment. For simple topography area, such as the study area, the results showed that the use of a diagnosis model (OML) or a prognostic model (RAMS) to simulate the wind profile didn't generate great differences between ground level cross-wind integrated concentration simulated by EDM.

Keywords: Eulerian Dispersion Model; pollutants dispersion; modeling system

1 Introdução

É de fundamental importância entender os processos de dispersão de contaminantes na atmosfera para prever o impacto destes sobre os diversos ecossistemas. Estudos deste tipo podem ser feitos utilizando observações de campo ou simulações numéricas. As observações de campo são muitas vezes dificultadas por problemas operacionais e pelos altos custos envolvidos, conseqüentemente, as simulações numéricas tornam-se uma fonte de informação fundamental para descrever os processos de dispersão na atmosfera.

Dentre os modelos de dispersão de contaminantes existentes os mais utilizados são os modelos Eulerianos, cujo esquema principal é a solução da equação de difusão-advecção, que é baseada na teoria K, onde o fluxo de qualquer propriedade é proporcional ao gradiente de seu campo médio. Este tipo de modelo emprega perfis de vento médio e coeficientes de difusão turbulenta. Como o perfil de vento é uma variável de entrada importante neste tipo de modelo, o objetivo deste trabalho foi comparar a concentração superficial de contaminantes simulada por um MED a partir de duas metodologias de obtenção do perfil de vento, com dados experimentais.

2 Material e Métodos

Neste trabalho, para simular a concentração superficial de contaminantes, utilizou-se o MED, proposto por Moreira (1996) e Vilhena *et al.* (1998). Este modelo necessita de quatro dados de entrada, a saber: Q (taxa de emissão da fonte), Hs (altura da fonte), K (coeficiente de difusão turbulento) e perfil de vento médio. A taxa de emissão e a altura da fonte foram obtidas do experimento de traçadores de Copenhagen. O coeficiente de difusão turbulento vertical utilizado foi aquele proposto por Degrazia *et al.*, (1997), válido para uma CLC. O perfil de vento médio foi obtido de duas formas: a primeira, a partir do modelo Operationelle Meteorologiske Luftkvalitetsmodeller - OML (Berkowicz *et al.*, 1986) e a segunda, a partir do modelo de mesoescala RAMS (Pielke *et al.*, 1992; Cotton *et al.*, 2003). Assim foram feitas duas simulações utilizando o MED: na primeira, utilizou-se o perfil de vento gerado pelo modelo OML (Simulação 1) e na segunda o perfil de vento gerado pelo RAMS (Simulação 2). As concentrações superficiais de contaminantes simula-

das pelo MED foram confrontadas com as concentrações coletadas no dia 06/07/1979 durante o experimento de traçadores de Copenhagen.

2.1 Experimento de traçadores COPENHAGEN

O experimento de traçadores de Copenhagen ocorreu nos anos de 1978 e 1979 (Gryning, 1981; Gryning & Lyck, 1984; Gryning *et al.*, 1987; Olesen, 1995; Gryning & Lyck, 2002), no bairro de Glad-saxe, na cidade de Copenhagen, na Dinamarca, sob condições de instabilidade atmosférica variando de moderada a forte. Essa região possui uma altitude média de 49 m. O traçador usado no experimento foi o hexafluoreto de enxofre (SF₆), liberado de uma torre de 115 m de altura (Hs). Os coletores tinham de 2 a 3 m de altura, eram posicionados em arcos distantes 2 a 6 km da fonte de liberação. A concentração foi medida em três intervalos consecutivos de 20 min, totalizando 1 h de tempo de amostragem. O local era principalmente residencial, com um comprimento de rugosidade de 0,6 m. No total foram dez dias de medições, entre 1978 e 1979.

As medições meteorológicas executadas durante os experimentos, incluíram medidas padrão ao longo da torre de liberação do traçador, assim como as flutuações tridimensionais da velocidade do vento na altura da liberação. A Tabela 1 apresenta os dados de entrada utilizados neste trabalho, observados no dia 06/07/1979 caracterizado por apresentar condições de instabilidade atmosférica forte.

Q (g.s ⁻¹)	Hs (m)	w* (m.s ⁻¹)	z _i (m)	u* (m.s ⁻¹)	L (m)	z ₀ (m)
100	115	2,2	810	0,69	-56	0,6

Tabela 1 Dados do experimento de traçadores de Copenhagen utilizados neste trabalho, referentes ao dia 06/07/1979. Onde Q é a taxa de emissão, H_s é a altura da fonte, w* é a escala de velocidade convectiva, z_i é a altura da CLC, u* é a velocidade de fricção, L é o comprimento de Monin-Obukhov na camada superficial e z₀ é o parâmetro e rugosidade aerodinâmica da superfície

2.2 Modelo Euleriano de dispersão

O transporte e a dispersão de poluentes na atmosfera são, muitas vezes, descritos pela equação de difusão-advecção, que é obtida pela parametrização dos fluxos turbulentos na equação da continuidade pelo emprego do modelo de transporte por gradiente

ou teoria K. Segundo Moreira (1996) e Vilhena *et al.* (1998), a solução da equação de difusão advecção após algumas simplificações, tem a forma:

$$\bar{c}_n(x,z) = \sum_{j=1}^{N_i} A_j \frac{P_j}{x} \left(D_n e^{-\left(\frac{P_j U_n}{\sqrt{x K_n}}\right) z} + B_n e^{\left(\frac{P_j U_n}{\sqrt{x K_n}}\right) z} \right)$$

(1)

$$\bar{c}_n^y(x,z') = \sum_{j=1}^{N_i} A_j \frac{P_j}{x} \left[D_n e^{-\left(\frac{P_j U_n}{\sqrt{x K_n}}\right) z} + B_n e^{\left(\frac{P_j U_n}{\sqrt{x K_n}}\right) z} + \frac{1}{2} \frac{Q}{\sqrt{\frac{P_j K_n U_n}{x}}} \left(e^{-\left(z'-H_s\right) \sqrt{\frac{P_j U_n}{x K_n}}} - e^{\left(z'-H_s\right) \sqrt{\frac{P_j U_n}{x K_n}}} \right) \right]$$

(2)

onde $\bar{C}_n^y(x,z)$ é a concentração de contaminantes integrada lateralmente, A_j e P_j são os pesos e as raízes do esquema de quadratura Gaussiana e são tabulados (Stroud & Secrest, 1966), D_n e B_n são constantes de integração que aparecem no desenvolvimento do cálculo, x é a distância horizontal, U_n é o vento médio em cada subcamada da CLC, z é a altura acima do solo, z' é a altura da subcamada que contém a fonte, j é o número de inversões, cujos melhores resultados foram obtidos para $j=N_i=8$ (Vilhena & Barichello, 1991; Vilhena & Streck, 1992) e K_n é o coeficiente de difusão turbulenta na subcamada n . A Eq. 1 é válida para camadas que não contêm a fonte de contaminantes e a Eq. 2 é usada para estimar o campo

de concentração na camada que contém a fonte de contaminantes.

2.3 Coeficiente de difusão turbulento válido para a CLC

O coeficiente de difusão turbulenta vertical (K_z) válido para a CLC, proposto por Degrazia *et al.* (1997) utilizado neste trabalho, foi construído a partir da teoria da difusão estatística de Taylor e pelo emprego do espectro de energia cinética turbulenta, e tem a seguinte forma:

$$\frac{K_z}{w_* z_i} = 0,22 \left(\frac{z}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \left(1 - \frac{z}{z_i} \right)^{\frac{1}{3}} \left[1 - \exp\left(-4 \frac{z}{z_i} \right) - 0,0003 \exp\left(8 \frac{z}{z_i} \right) \right]$$

(3)

2.4 Parametrização do campo de vento médio

2.4.1 Campo de vento obtido pelo Modelo OML

O perfil de vento foi parametrizado, inicialmente, seguindo a teoria de similaridade de Monin-Obukhov e o modelo OML (Berkowicz *et al.*, 1986):

$$U = \frac{u_*}{\kappa} [\ln(z/z_0) - \Psi_m(z/L) + \Psi_m(z_0/L)] \text{ se } z \leq z_b$$

(4)

$$U = U(z_b) \text{ se } z > z_b$$

(5)

o n d e $z_b = \min[L; 0,1z_i]$ e Ψ_m é a função de

estabilidade dada por Paulson (1970):

$$\Psi_m = 2 \ln \left[\frac{1+A}{2} \right] + \ln \left[\frac{1+A^2}{2} \right] - 2 \tan^{-1}(A) + \frac{\pi}{2}$$

(6)

$$\text{com, } A = (1 - 16z/L)^{1/4}$$

(7)

onde $k = 0,4$ é a constante de Von Karman.

Este perfil de vento, obtido com resolução vertical de 10 m até o topo da CLC (810 m), foi então usado no MED para simular a concentração superficial de contaminantes.

2.4.2 Campo de vento fornecido pelo Modelo RAMS

Para obter-se o campo de vento médio simulado pelo modelo RAMS, assimilou-se os dados de reanálise do NCEP (temperatura do ar, umidade relativa, altura geopotencial e vento horizontal) do dia 06/07/1979 das 06 e 12 UTC, fornecidos com

uma resolução horizontal de 2,5° de malha global, em dezessete (17) níveis verticais padrões de pressão.

A simulação com o modelo RAMS foi realizada com três grades aninhadas e fixas (Figura 1), centradas em 55,735° N e 12,494° E, ponto este que corresponde ao local de realização do experimento onde o traçador SF₆ foi liberado.

As grades 1, 2, 3 e 4, têm resolução horizontal de 16 km (~800x450km²), 4 km (~400x250 km²), 1 km (~200x100 km²) e 250 m (~100x50 km²), respectivamente (Figura1). Utilizou-se em ambas as grades uma resolução vertical de 10 m até o topo da CLC. A partir daí, assumiu-se outros valores de resolução vertical, com intervalo máximo de até 1000 m, alcançando um domínio de 14 km. Os passos no tempo para as grades 1, 2, 3 e 4 foram de 10 s; 3,333 s; 1,666 s e 0,833 s, respectivamente.

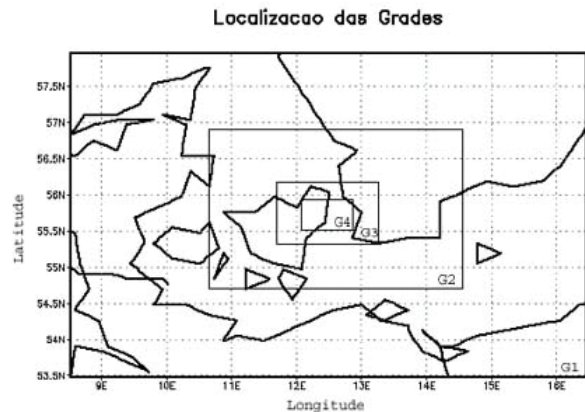


Figura 1 Localização das grades utilizadas na simulação com o modelo RAMS. As 4 grades estão centradas no ponto 55,735° N e 12,494° E, que corresponde ao local onde foram realizadas as medidas de concentração (bairro Gladsaxe)

A simulação teve início às 06UTC do dia 06/07/1979 e terminou às 18 UTC do mesmo dia, compreendendo um total de 12 h de simulação, com saídas de 1 em 1 h. O período de simulação foi escolhido por conter o horário em que os amostradores coletaram os dados de concentração de SF₆, que aconteceu entre 11:50 e 12:50 UTC.

Os dados de inicialização foram informados ao modelo a cada 1 h através do esquema de nudging nos limites laterais da grade maior. Para as quatro grades foram utilizadas as seguintes opções: tri-dimensional,

coordenada vertical seguindo o terreno, coordenadas horizontais estereográficas tangente ao plano, diferenciação finita do tempo, fronteira lateral de Klemp & Wilhelmson (1978), parâmetros de radiação segundo Mahrer & Pielke (1977), parametrização cumulus ativada, parametrização dos coeficientes de difusão segundo Mellor & Yamada (1974) e topografia com resolução de 10 km, na grade 1 e 1 km nas grades 2, 3 e 4.

Após a simulação, utilizou-se o campo de vento horizontal em superfície simulado para a grade 4, para as 12 UTC (horário próximo ao horário de coleta dos dados de concentração de SF₆ pelos amostradores) para extrair, no ponto 55,735° N e 12,494° E (que corresponde ao local onde o traçador foi liberado), o perfil de vento médio até 810 m de altura com resolução de 10 m. Este perfil foi usado no MED para simular a concentração superficial de contaminantes.

3 Resultados e Discussão

Segundo Gryning (1981), o dia 06 de julho de 1979 foi regido por um sistema de baixa pressão situado sobre a parte leste dos países Bálticos e uma alta pressão na parte oeste da Europa, ou seja, sobre a Dinamarca havia um fluxo ascendente de ar (Figura 2). O vento de grande escala era de NO na região do experimento (Figura 3). A cobertura de nuvens variava de 5/8 a 6/8, por volta de 13 h local (12U TC + 1 h), e esta nebulosidade consistia de cumulus, altocumulus e cirrus. Em torno de 30% do experimento deste dia (11:50 - 12:50 UTC) foi registrada a ocorrência de raios solares com incidência direta, ou seja, sem influência de nuvens. Utilizando a classificação de Pasquill, a estabilidade atmosférica foi determinada entre B-C, isto é, este dia caracterizou-se por apresentar condições de instabilidade forte. A simulação com o RAMS para as 4 grades reproduziu o padrão NO do vento. Aqui é mostrado somente a simulação para a grade 4 (Figura 4).

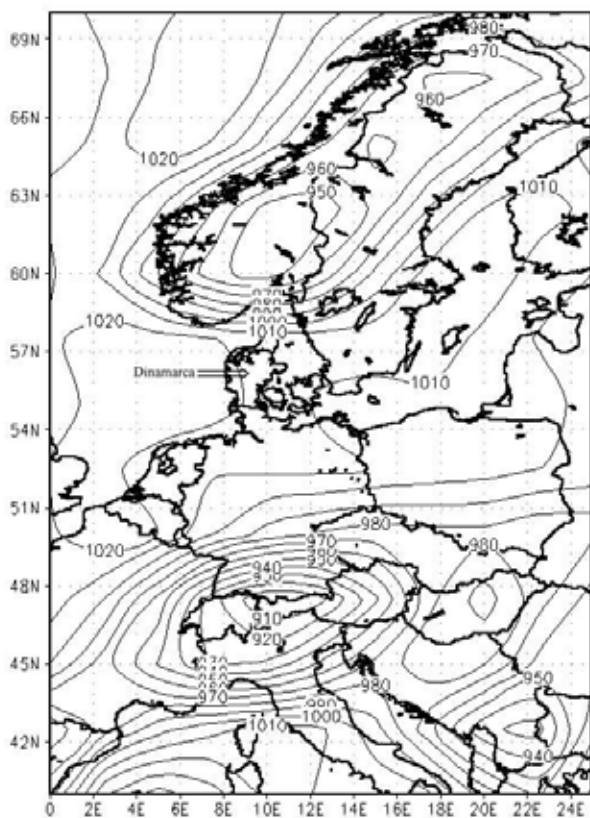


Figura 2 Campo de pressão ao nível médio do mar (hPa) para as 12 UTC do dia 06/07/1979, obtido a partir das reanálises do NCEP. A seta indica a localização da Dinamarca

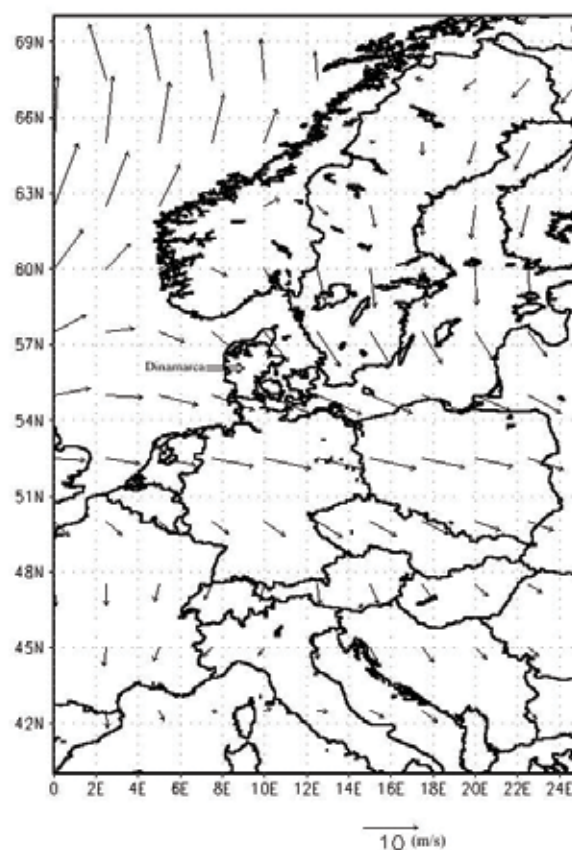


Figura 3 Campo de vento horizontal em superfície ($m s^{-1}$) para as 12 UTC do dia 06/07/1979, obtido a partir das reanálises do NCEP. A seta indica a localização da Dinamarca

Concentração Superficial de Contaminantes Simulada por um Modelo Euleriano de Dispersão Utilizando Perfis de Vento Obtidos Pelos Modelos OML e RAMS

Cláudia Rejane Jacondino de Campos; James Adryani Avelar de Jesus & Luciana Barros Pinto

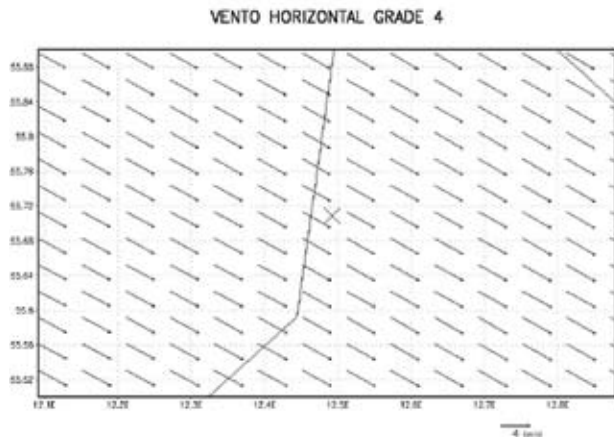


Figura 4 Campo de vento horizontal em superfície ($m\ s^{-1}$), na grade 4, para as 12 UTC do dia 06/07/1979. O X, nesta figura, corresponde ao ponto onde foi extraído o perfil de vento ($55,735^\circ$ N e $12,494^\circ$ E)

O resultado da simulação da concentração superficial de contaminantes que usou o campo de vento advindo do modelo OML (Simulação 1), com resolução vertical de 10m até o topo da CLC, é mostrado na Tabela 2 para diferentes distâncias da fonte. O confronto entre os valores simulados e os observados mostra que a concentração superficial de contaminantes foi superestimada para as três distâncias da fonte (1900, 3200 e 5300 m). Mais próximo a fonte (1900 m) a concentração observada foi de $4,16 \times 10^{-4}$ s m^{-2} , ao passo que a simulada foi de $4,56 \times 10^{-4}$ s m^{-2} , com uma superestimação da ordem de 9,7%. Nas outras duas distâncias da fonte, a concentração teve uma porcentagem de superestimação maior, conforme já havia sido mostrado por outros autores (Moura *et al.*, 2000; Moreira *et al.*, 2000).

Distância da fonte (m)	Observado	OML	RAMS
1900	4,16	4,56	4,61
3600	2,02	3,12	3,20
5300	1,52	2,50	2,56

Tabela 2 Concentrações superficiais de contaminantes observada no dia 06/07/1979 e simuladas pelo MED utilizando perfis de vento gerados pelos modelos OML e RAMS

Por outro lado, a concentração superficial de contaminantes simulada pelo MED usando o perfil de vento oriundo do modelo RAMS (Simulação 2),

também com resolução vertical de 10 m até o topo da CLC, é mostrado na Tabela 2 para diferentes distâncias da fonte. O perfil de vento usado na simulação 2 foi extraído do campo de vento horizontal em superfície gerado para a grade 4 (Figura 4) no ponto $55,735^\circ$ N e $12,494^\circ$ E. Pode-se observar na Figura 4 que esse campo de vento é regido pelo vento de grande escala, ou seja, NO (ver Figura 2). Os resultados da simulação 2 mostraram que a concentração simulada pelo MED superestimou a concentração observada para as três distâncias da fonte (1900, 3200 e 5300 m), conforme mostra a Tabela 2. A 1900 m da fonte esta superestimação foi da ordem de 10,9%. Nas distâncias de 3200 e 5300 m da fonte a concentração teve uma porcentagem de superestimação maior, como ocorreu com a simulação utilizando o campo de vento gerado pelo modelo OML.

Vale ressaltar que os valores de concentração observados e simulados estão normalizados pela taxa de emissão (Q). Observou-se também que os dois modelos (OML e RAMS) subestimaram os valores de vento (Tabela 3), portanto como a concentração superficial de contaminantes depende da intensidade do vento, ou seja, quanto menor o vento, maior a concentração superficial, esse pode ter sido um dos fatores que levou o MED a superestimar tais valores.

Altura (m)	Observado	OML	RAMS
10	4,1	4,7	5,6
60	8,7	5,9	5,6
120	7,7	5,9	5,6
200	8,2	5,9	5,7
Média	7,17	5,65	5,64

Tabela 3 Vento (m/s) observado e simulado pelos modelos OML e RAMS, em 4 níveis de altura, as 12UTC do dia 06/07/1979, ao longo da torre de lançamento.

A margem de erro da concentração superficial de contaminantes gerada pela simulação 2 foi aceitável, ficando próxima daquela obtida com o uso do modelo OML (~10% próximo à fonte). Para uma região de topografia simples, como é o caso da região de estudo, os resultados mostraram que o uso de um modelo diagnóstico (OML) ou de um modelo prognóstico (RAMS) para simular o perfil de vento não geraram grandes diferenças entre as concentrações superficiais de contaminantes simuladas pelo MED.

Pode-se considerar que o campo de vento gerado pelo RAMS gerou bons resultados e portanto o acoplamento RAMS-MED foi validado para um caso de topografia simples. Para uma região de topografia complexa, espera-se que o uso do perfil de vento gerado pelo RAMS gere resultados de concentração superficial de contaminantes mais próximos aos observados do que aquele oriundo do modelo OML.

4 Conclusões

O confronto entre as concentrações superficiais de contaminantes observadas e as simuladas mostrou que o MED, utilizando as duas parametrizações do perfil de vento (OML e RAMS), foi capaz de gerar bons resultados. Tais simulações superestimaram os valores de concentração observados em torno de 10%, para a distância de 1900 m da fonte. Como a região de estudo é de topografia simples os resultados das simulações com os dois perfis de vento foram muito similares.

Para região com topografia complexa o perfil de vento oriundo do modelo RAMS fornecerá resultados mais realísticos do que aquele gerado pelo modelo OML. Portanto o acoplamento RAMS-MED testado para um caso de topografia simples poderá agora ser aplicado a uma região com topografia complexa gerando valores de concentração superficial de contaminantes mais realísticos.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro.

6 Referências

- Berkowicz, R.; Olesen, H. R. & Torp, U. 1986. The Danish Gaussian air pollution model (OML): description, test and sensitivity analysis in view of regulatory applications. In: DE WISPELAERE, V. C.; SCHIERMEIER, F. A. & GILLANI, N. V. (eds.). *Air pollution modeling and its application*. New York: Plenum Press, p. 453-480.
- Cotton, W. R.; Pielke, R.A.; Walko, R.L.; Liston, G.E.; Tremback, C.J.; Jiang, H.; Mcanelly, R. L.; Harrington, J. Y.; Nicholls, M. E.; Carrio, G. G. & Mcfadden, L. P. 2003. RAMS 2001: Current status and future directions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 82 (1-4): 5-29.
- Degrazia, G. A.; Rizza, U.; Mangia, C. & Tirabassi, T. 1997. Validation of a new turbulent parameterization for dispersion models in convective conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 85 (2): 243-254.
- Gryning, S. E. 1981. Elevated source SF6-tracer dispersion experiments in the Copenhagen area. Risø National Laboratory, Roskilde. 187 p. Relatório.
- Gryning, S. E. & Lyck, E. 1984. Atmospheric dispersion from elevated sources in an urban area: comparison between tracer experiments and model calculations. *Journal of Applied Meteorology*, 23 (4): 651-660.
- Gryning, S. E.; Holtslag, A. A. M.; Irwin, J. S. & Sivertsen, B. 1987. Applied dispersion modelling based on meteorological scaling parameters. *Atmospheric Environment*, 21 (1): 79-89.
- Gryning, S. E. & Lyck, E. 2002. The Copenhagen Tracer Experiments: reporting of measurements. Risø National Laboratory, Roskilde. 75 p. Relatório.
- Klemp, J. B. & Wilhelmson, R. B. 1978. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 35 (6): 1070-1096.
- Mahrer, Y. & Pielke, R. A. 1977. A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 50: 98-113.
- Mellor, G. L. & Yamada, T. 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31 (7): 1791-1806.
- Moreira, D. M. 1996. *Comparação entre um modelo Gaussiano atualizado e a equação de difusão no cálculo da concentração superficial de poluentes na camada limite convectiva: o caso de fontes pontuais contínuas elevadas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Física, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 53 p.
- Moreira, D. M.; Degrazia, G. A. & Vilhena, M. T. 2000. Modelo Euleriano semi-analítico para a dispersão de contaminantes na camada limite planetária. In: DEGRAZIA, G. A.; CAMPOS, C. R. J. & VILHENA, M. T. (eds.) *Tópicos especiais em física da camada limite planetária e modelagem de processos de dispersão*. Cap.

Concentração Superficial de Contaminantes Simulada por um Modelo Euleriano de Dispersão Utilizando Perfis de Vento Obtidos Pelos Modelos OML e RAMS

Cláudia Rejane Jacondino de Campos; James Adryani Avelar de Jesus & Luciana Barros Pinto

5. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária - UFPel, p. 83-93.
- Moura, A.; Degrazia, G. A. & Vilhena, M. T. 2000. Um modelo analítico bidimensional de dispersão: coeficiente de difusão turbulento dependente da distância da fonte. *In: DEGRAZIA, G. A.; CAMPOS, C. R. J.; VILHENA, M. T. (eds.). Tópicos especiais em física da camada limite planetária e modelagem de processos de dispersão. Cap. 6. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária - UFPel, p. 95-107.*
- Olesen, H. R. 1995. Model validation kit for the Workshop on Operational Short-Range Atmospheric Dispersion Models for Environmental Impact Assessments in Europe. Roskilde: Danmarks Miljøundersøgelser, 87p.
- Paulson, C. A. 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology*, 9 (6): 857-861.
- Pielke, R. E.; Cotton, W. R.; Walko, R.L.; Tremback, C.J.; Lyons, W. A.; Grasso, L. D.; Nicholls, M. E.; Moran, M. D.; Wesley, D. A., Lee, T. J. & Copeland, J. H. 1992. A comprehensive meteorological modeling system - RAMS. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 49: 69-91.
- Stroud, A. H. & Secrest, D. 1966. *Gaussian quadrature formulas*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 82p.
- Vilhena, M. T. & Barichello, L. B. 1991. A new analytical approach to solve the neutron transport equation. *Kerntechnik*, 56 (5): 334-336.
- Vilhena, M. T. & Streck, E. E. 1992. An approximate analytical solution of the one-group neutron transport equation. *Kerntechnik*, 57 (3): 196-198.
- Vilhena, M. T. 1998. An analytical air pollution model: development and evaluation. *Beiträge zur Physik der Atmosphäre*, 71 (3): 315-320.