

SIMULAÇÃO ANALÍTICA DA DISPERSÃO DE POLUENTES EM CONDIÇÕES DE VENTO NORTE

RENATA CEZIMBRA¹; RÉGIS QUADROS²; GLÊNIO GONÇALVES³; DANIELA BUSKE⁴

¹Universidade Federal de Pelotas – UFPel – renatacezimbra@hotmail.com

²Universidade Federal de Pelotas – UFPel – regis.quadros@ufpel.edu.br

³Universidade Federal de Pelotas – UFPel – gleniogoncalves@yahoo.com.br

⁴Universidade Federal de Pelotas – UFPel – danielabuske@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho vamos apresentar um modelo de difusão turbulenta em escala regional, para um fenômeno que ocorre na região central do Rio Grande do Sul, durante alguns períodos do inverno, durando de 1 a 4 dias em média, denominado vento norte.

O vento norte é caracterizado por um escoamento quente com velocidades elevadas. Este evento apresenta umidade relativa baixa, associado a sistemas frontais meteorológicos, com turbulência por cisalhamento dominante, configurando-se uma camada limite superficial (CLS), aproximadamente neutra.

Por esse evento ocorrer frequentemente é importante o estudo da dispersão de contaminantes associados a ele. Foi utilizado o método GILTT (Generalized Integral Laplace Transform Technique) para que fosse resolvida analiticamente a equação de advecção-difusão, esse modelo foi escolhido por ser analítico e por apresentar bons resultados quando comparado a modelos existentes na literatura.

2. METODOLOGIA

A equação de advecção-difusão transiente, em coordenadas cartesianas, que modela a dispersão de poluentes na atmosfera pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = - \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} + S \quad (1)$$

onde \bar{c} é a concentração média de contaminantes, \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} são as componentes médias da velocidade do vento nos eixos x, y e z, respectivamente, e S é o termo da fonte. Os termos $\overline{u'c'}$, $\overline{v'c'}$ e $\overline{w'c'}$ representam, respectivamente, os fluxos turbulentos de contaminantes nas direções longitudinal, lateral e vertical.

A eq. (1) tem quatro variáveis desconhecidas (a concentração \bar{c} e os três fluxos turbulentos), e para resolver este problema de fechamento utilizamos a teoria K (fechamento de primeira ordem), onde:

$$\overline{u'c'} = -K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x}; \overline{v'c'} = -K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y}; \overline{w'c'} = -K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \quad (2)$$

Combinando a equação da continuidade de massa com as expressões (2) reescreve-se a equação de advecção-difusão como (BLACKADAR, 1997):

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) + S \quad (3)$$

A equação de advecção-difusão (3) pode ser resolvida analiticamente pela abordagem 3D-GILTT (Buske et al. (2011, 2012), Vilhena et al. (2012)). Neste

trabalho faremos hipóteses simplificativas e apresentaremos resultados utilizando a equação de advecção-difusão bidimensional, em coordenadas cartesianas, escrita como:

$$\frac{\partial \bar{c}^y}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}^y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{c}^y}{\partial z} \right) \quad (4)$$

para $0 < z < h$, $x > 0, t > 0$, sujeita às condições de contorno de fluxo nulo no solo e no topo da camada limite:

$$\frac{\partial \bar{c}^y}{\partial z} = 0 \text{ em } z = 0, h \quad (5)$$

e com uma condição de fonte representada por uma delta de Dirac:

$$\bar{u} \bar{c}^y(0, z, t) = Q \delta(z - H_s) \quad (6)$$

onde Q é a taxa de emissão de contaminantes, \bar{u} é o vento médio na direção x e H_s é a altura da fonte. Consideramos também que no tempo inicial ($t=0$) a atmosfera está limpa.

O problema (4) é resolvido analiticamente pela técnica GILTT. Este método combina uma expansão em série com uma integração. Na expansão, é usada uma base trigonométrica determinada com o auxílio de um problema associado de Sturm-Liouville. A integração é feita em todo o intervalo da variável transformada, utilizando-se a propriedade de ortogonalidade da base usada na expansão. A solução do sistema de equações diferenciais ordinárias, resultante da aplicação da GILTT, é feita analiticamente via transformada de Laplace e diagonalização. A derivação da solução do problema é analítica exceto pelo erro de truncamento de um somatório.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O experimento que utilizamos para mostrar o comportamento do modelo apresentado foi o de Prairie Grass, realizado em O'Neil, Nebraska, em 1956 (BARAD, 1958). O poluente SO_2 foi emitido de uma altura de $0,5m$, de uma fonte baixa, sem empuxo e coletado por amostradores a $1,5m$ de altura em cinco distâncias na direção preferencial do vento (50, 100, 200, 400, 800m). O experimento foi realizado em uma região plana com rugosidade de $0,6cm$. Do experimento de Prairie Grass selecionaram-se treze casos em que a velocidade média do vento foi superior a $6,0m/s$ e que apresentaram valores de u_{*0} superiores a $0,4m/s$, que caracterizam uma camada limite atmosférica dominada pela turbulência mecânica.

Na Tabela 1, apresentamos os dados micrometeorológicos de 5 experimentos utilizados. Na Tabela, para cada distância da fonte, a primeira linha representa os valores observados de concentração no experimento Prairie Grass, enquanto a segunda linha logo abaixo representa os valores das concentrações calculados usando-se o coeficiente de difusão assintótico, dado pela eq.:

$$\frac{K_z}{(u_*)_0 h} = \frac{0,37 \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{0,85}}{\left(1 + 3,00 \frac{z}{h}\right)^{4/3}} \quad (7)$$

Expto	h (m)	$(u_*)_0$ (ms^{-1})	\bar{u}_{10m} (ms^{-1})	Q (gs^{-1})	50m (gm^{-2})	100m (gm^{-2})	200m (gm^{-2})	400m (gm^{-2})	800m (gm^{-2})
5	780	0,40	7	7,8	3,30	1,80	0,81	0,29	0,092
					3,16	2,01	0,95	0,30	0,24
9	550	0,48	8,4	9,2	3,70	2,20	1,00	0,41	0,13
					3,49	2,25	1,11	0,40	0,29
19	650	0,41	7,2	102	4,50	2,20	0,86	0,27	0,058
					4,30	2,74	1,33	0,45	0,36
20	710	0,63	11,3	102	3,40	1,80	0,85	0,34	0,13
					2,68	1,71	0,83	0,26	0,21
26	900	0,45	7,8	98	3,90	2,20	1,04	0,39	0,127
					3,30	2,12	0,99	0,29	0,24
27	1280	0,44	7,6	99	4,30	2,30	1,16	0,46	0,176
					2,82	1,84	0,81	0,24	0,20
30	1560	0,48	8,5	98	4,20	2,30	1,11	0,40	0,10
					2,20	1,47	0,63	0,17	0,15
43	600	0,40	6,1	99	5,00	2,40	1,09	0,37	0,12
					4,80	3,01	1,48	0,54	0,39
44	1450	0,42	7,2	101	4,50	2,30	1,09	0,43	0,14
					2,79	1,85	0,80	0,22	0,19
49	550	0,47	8,0	102	4,30	2,40	1,16	0,45	0,15
					4,02	2,59	1,28	0,47	0,34
50	750	0,46	8,0	103	4,20	2,30	0,91	0,39	0,11
					3,71	2,36	1,13	0,36	0,29
51	1880	0,47	8,0	102	4,7	2,40	1,00	0,38	0,084
					2,10	1,43	0,59	0,16	0,14
61	450	0,53	9,3	102	3,5	2,10	1,14	0,53	0,20
					3,65	2,40	1,22	0,44	0,34

Tabela 1: Valores dos parâmetros micrometeorológicos e das concentrações, selecionados, do experimento de Prairie Grass. Os valores de \bar{u} e $(u_*)_0$ na tabela, apresentam magnitudes características de uma CLP dominada pela turbulência mecânica (GARRAT, 1992).

O perfil de vento utilizado é descrito por uma lei de potência como dado por Panofsky e Dutton (1984):

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_1} = \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha \quad (10)$$

A Tabela 2 apresenta o resultado da análise estatística feita com os valores de concentração observados (Prairie Grass) e previstos pelo modelo GILTT. Os índices estatísticos são sugeridos por Hanna (1989) e observamos uma concordância razoável entre o modelo e os dados experimentais.

Modelo	NMSE	COR	FA2	FB	FS
GILTT	0,15	0,93	0,86	0,11	0,18

Tabela 2: Avaliação estatística do modelo em condições de vento norte.

4. CONCLUSÕES

Neste estudo, a equação de difusão-advecção foi resolvida por um método analítico (técnica GILTT), com a utilização de um coeficiente de difusão assintótico. Os resultados destas simulações foram confrontados com os dados

de concentração medidos no experimento clássico de Prairie Grass, conforme avaliação estatística mostrada na Tabela 2.

Os resultados originados da comparação entre resultados das concentrações simuladas e observadas mostram que o modelo empregado reproduz adequadamente as medidas experimentais.

Para uma fonte pontual contínua elevada, Degrazia et al. (2001) mostraram que a aplicação de um coeficiente de difusão dependente da distância simula melhor as concentrações, do que quando empregado um coeficiente de difusão assintótico. Assim, como próximo passo iremos incluir o efeito de memória no coeficiente de difusão, melhorando a descrição do fenômeno de transporte turbulento de contaminantes, liberadas por fontes baixas e elevadas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLACKADAR, A.K. **Turbulence and diffusion in the atmosphere**: lectures in Environmental Sciences, Springer-Verlag, 1997.

BUSKE, D. et al. A General Analytical Solution of the Advection-Diffusion Equation for Fickian Closure. In: **Integral Methods in Science and Engineering: Computational and Analytic Aspects**. Boston: Birkhäuser, pp. 25-34, 2011.

BUSKE, D. et al. Analytical Model for Air Pollution in the Atmospheric Boundary Layer. In: **Air Pollution.Croatia**. InTech, 2012, in press.

BARAD, M.L. **Project Prairie Grass**: A field program in diffusion - Geophys. Res. Pap. 59 (II) TR-58-235 (II), Air Force Cambridge Research Centre, USA, 1958.

PANOFSKY, H.A.; DUTTON, J.A. **Atmospheric Turbulence**. Wiley Interscience, New York, 397p. 1984.

HANNA S.R.; PAINE R.J. Hybrid plume dispersion model (HPDM) development and evaluation. **J. Appl. Meteorol.** 28: 206–224, 1989.

DEGRAZIA, G.A., MOREIRA, D.M. AND VILHENA, M.T., 2001. Derivation of an eddy diffusivity depending on source distance for vertically inhomogeneous turbulence in a convective boundary layer. **Journal of Applied Meteorology**, v. 40, p. 1233 - 1240, 2001.

GARRAT, J.R. **The Atmospheric Boundary Layer**. Cambridge: Cambridge Atmospheric and Space Science Series – University Press, 361p, 1992.