

DISPERSÃO DE POLUENTES NA CAMADA LIMITE ESTÁVEL: O CASO DE UMA FONTE SUPERFICIAL

FERNANDA MAFFACIOLLI VALENTINI¹, WELLINGTON LINHARES CASTRO², PAULO RICARDO SONNEMANN³,
DAVIDSON MARTINS MOREIRA⁴

RESUMO

Atualmente, a compreensão acerca da estrutura física da Camada Limite Estável noturna (CLE) é muito limitada, tornando o estudo da dispersão de poluentes nesta camada muito importante. Isto se deve, em parte, ao fato de que esta camada raramente encontra-se em estado de equilíbrio estacionário. Esta ausência de equilíbrio em relação às mudanças nas condições de contorno provoca uma contínua evolução na sua estrutura. Como uma consequência tem-se à noite uma turbulência menos intensa do que durante o dia. O objetivo deste trabalho é obter uma formulação semi-empírica para o parâmetro de dispersão vertical que é função da distância da fonte, da velocidade turbulenta vertical e da escala de tempo integral Lagrangeana provenientes do espectro da turbulência. Para testar a influência deste parâmetro de dispersão é utilizado o modelo de pluma Gaussiana e os resultados de concentrações superficiais são confrontados com dados observacionais do experimento de dispersão atmosférica de Prairie Grass.

Palavras-chave: *parâmetro de dispersão vertical; camada limite estável; modelo Gaussiano.*

¹Acadêmica do Curso de Engenharia de Plásticos - Bolsista PROICT/ULBRA

³Acadêmico do Curso de Matemática - Bolsista PROICT/ULBRA

²Acadêmico do Curso de Biologia - Bolsista PROICT/ULBRA

⁴Professor – orientador do Curso Engenharia Ambiental/ULBRA

ABSTRACT

Nowadays, the understanding concerning the physical structure of the Stable Boundary Layer (SBL) it is very limited, turning the study of the dispersion of pollutant in this layer very important. This is due, partly, to the fact that this layer rarely meets in state of stationary balance. This balance absence in relation to the changes in the outline conditions provokes a continuous evolution in his structure. As a consequence is had a turbulence less intense at night than during the day. The objective of this work is to obtain a semi-empiric formulation for the parameter of vertical dispersion that it is function of the distance of the source, of the vertical turbulent speed and of the Lagrangian time scale coming of the spectrum of the turbulence. To test the influence of this dispersion parameter the feather model it is used the Gaussian model and the results of superficial concentrations are confronted with observed data of the experiment of atmospheric dispersion of Prairie Grass.

Key words: vertical dispersion parameter; stable boundary layer; Gaussian model.

INTRODUÇÃO

Na ausência do fluxo de calor causado pelo aquecimento solar, ocorre um resfriamento da superfície e uma conseqüente mudança nas propriedades da atmosfera próxima à superfície. Nestas condições esta região é denominada camada limite planetária estável (CLE). Na camada limite planetária estável ocorre um fluxo de calor negativo que extrai energia cinética dos grandes turbilhões, permitindo somente que turbilhões de pequeno comprimento de onda sobrevivam. Como uma conseqüência tem-se à noite uma turbulência menos intensa do que durante o dia. A turbulência na camada limite estável é produzida pelo cisalhamento do vento, mas destruída pelo fluxo de calor negativo e dissipação viscosa. Atualmente a compreensão acerca da estrutura física da CLE é muito limitada. Isto se deve em parte ao fato de que esta camada raramente encontra-se em estado de equilíbrio estacionário. Esta ausência de equilíbrio em relação as mudanças nas condições de contorno provoca uma contínua evolução na sua estrutura. A CLE é

formada por pequenos turbilhões que agem localmente. Desta maneira, as variações nos forçantes superficiais propagam-se lentamente ao longo da camada. Os tempos de relaxação na camada limite planetária estável são de varias horas. Muito do que conhecemos acerca da física da CLE diz respeito à situação na qual a turbulência é continua no espaço e no tempo. Para esta situação que ocorre com ventos fortes, pode-se definir uma altura para a camada limite turbulenta estável. Neste caso as intensidades e os comprimentos típicos da turbulência são expressos em termos de parâmetros e escalas locais.

Neste trabalho, a partir da teoria estatística de Taylor (1921), da teoria de similaridade estável e da teoria de similaridade local derivam-se expressões gerais para os parâmetros de dispersão em função de quantidades físicas ligadas à estrutura do fluxo turbulento da camada limite planetária no regime de estabilidade estável. O parâmetro de dispersão vertical é utilizado em um modelo de dispersão Gaussiano para estimar o campo de concentração integrado calculado na superfície.

MÉTODO DE OBTENÇÃO DO PARÂMETRO DE DISPERSÃO VERTICAL

Venkatram (1988) sugere uma expressão para o parâmetro de dispersão vertical a partir de dados experimentais podendo ser escrita como:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_w t}{1 + \left(\frac{t}{2T_L}\right)^{1/2}} \quad (1)$$

onde σ_w é o desvio padrão da componente vertical turbulenta da velocidade do vento,

$t = \frac{x}{U}$ é o tempo de viagem e T_L é a escala de

tempo Lagrangeana. A partir desta equação sugerimos uma similar:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_w t}{1 + \left(\frac{t}{T_L}\right)^\alpha} \quad (2)$$

onde α é um expoente que varia entre 0 e 0.5. Para definição do expoente α foi utilizado

o parâmetro $\bar{x} = \frac{x}{L}$ (Stull, 1988). Para $\bar{x} \leq 1.4$,

$\alpha = 0$ e para $\bar{x} \geq 1.4$, $\alpha = 0.5$.

O desvio padrão da componente vertical turbulenta da velocidade e a escala de tempo Lagrangeana serão derivados a partir do espectro da turbulência seguindo a expressão obtida por Degrazia (1992):

$$\frac{nS_i(n)}{U_*^2} = \frac{1,5c}{(f_m)_{n,i}^{5/3}} \left[\frac{f/q}{1 + \frac{1,5}{(f_m)_{n,i}^{5/3}} (f/q)^{5/3}} \right] \left(\frac{\Phi_\varepsilon}{q} \right)^{2/3} \quad (3)$$

onde $(f_m)_{n,i}$ é a frequência do pico espectral

na estratificação neutra, $f = \frac{nz}{U}$ é a frequên-

cia reduzida derivada a partir da frequência absoluta n , q é um parâmetro de estabilidade que, considerando o experimento de Cabauw, é dado por:

$$q = 1 + 3,7 \frac{z}{h} \frac{L}{h} \left(1 - \frac{z}{h} \right)^{-5/4} \quad (4)$$

onde U_* é uma velocidade de fricção local, $\Phi_\varepsilon = 1,25q$ é uma função de dissipação adimensional, c é uma constante ($c = \alpha_1(2\pi K)^{-2/3}$) que é igual a 0,3 para a componente u da velocidade ($\alpha_1 = 0,5$) e 0,4 para as componentes v e w (Champagne et. al., 1997).

Integrando $S_i(n)$ em (3) sobre todo intervalo de frequência, obtém-se uma expressão generalizada para a variância da componente turbulenta da velocidade:

$$\sigma_i^2 = \frac{2,33c}{(f_m)_n^{2/3}} \left(\frac{\Phi_\varepsilon}{q} \right)^{2/3} U_*^2 \quad (5)$$

Considerando $\Phi_\varepsilon = 1.25q$, obtém-se:

$$\sigma_i^2 = \frac{2,6c}{(f_m)_n^{2/3}} U_*^2 \quad (6)$$

onde. $U_* = \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{3/4} u_*$

Para a componente vertical $i = w$ tem-se $(f_m)_n = 0,33$ e $c = 0,4$. Substituindo esses valores em (3) obtém-se uma expressão para desvio padrão da componente vertical da velocidade turbulenta:

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = 1,5 \left(1 - \frac{z}{h}\right)^{3/4} \quad (7)$$

Deste mesmo trabalho foi obtida uma expressão para a escala de tempo Lagrangiana vertical:

$$T_{L_w} = \frac{0,64\sqrt{\pi}(L/h)h}{16a_w(1-z/h)^{\alpha_1/2}(f_m)_w u_*} \quad (8)$$

onde L é o comprimento de Monin-Obukov, h é a altura da camada limite estável e $a_w = 1,5$.

Como um teste para a parametrização (2) foi usado um modelo Gaussiano para simular a concentração observada nos experimentos estáveis de Prairie Grass (Barad, 1958).

O MODELO GAUSSIANO

Os modelos Gaussianos são muito utilizados, porém, aplicam-se somente no limite de grandes tempos de difusão e para condições homogêneas

e estacionárias, para as quais o problema da difusão pode ser tratado de forma mais simples.

A função distribuição normal ou Gaussiana fornece uma solução fundamental da equação de difusão, e tem sido assumido como um modelo de difusão em muitos trabalhos (Hanna, 1982) dada por:

$$\overline{c^y}(x, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_z U} \left[\exp\left(-\frac{(z-H_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (9)$$

onde $\overline{c^y}$ é a concentração integrada lateralmente, e σ_z a dispersão vertical da pluma.

RESULTADOS E AVALIAÇÃO DO MODELO

A performance da presente parametrização (Eqs. 2 e 9) tem sido confrontada com dados experimentais de concentração usando SO_2 dos experimentos de dispersão realizados em O'Neill, Nebraska, 1956, descritos em Barad (1958). O poluente foi emitido sem empuxo a uma altura de 0.5 m e foi medido pelos amostradores a uma altura de 1.5 m em cinco distâncias (50, 200 e 800m). O sítio de Prairie Grass foi plano com um comprimento de rugosidade de 0.6 cm. A Figura 1 mostra o diagrama de espalhamento de concentração usando a aproximação Gaussiana (9) com o parâmetro de dispersão vertical dado pela Eq. (2). Os resultados gerados pelo presente modelo (Eqs. 2 e 9) são comparados com valores de concentração observados durante o experimento de Prairie Grass.

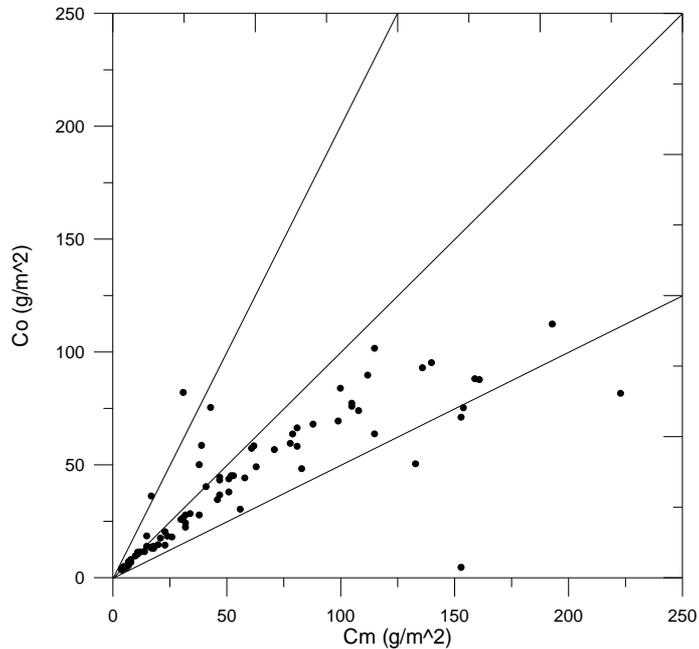


Figura 1 – Diagrama de espalhamento das concentrações observadas e previstas usando a aproximação (9) com o parâmetro de dispersão vertical dado a pela Eq. (2).

Os resultados dos índices estatísticos (Hanna, 1989) são comparados com os obtidos a partir do modelo Gaussiano, e são mostrados na Tabela 1.

Os índices estatísticos aplicados são definidos do seguinte modo:

- Nmse (erro quadrático médio normalizado) = $\frac{\overline{(C_o - C_m)^2}}{\overline{C_o C_m}}$; informa sobre todos os desvios entre concentrações dos modelos e observadas. É uma estatística adimensional e seu valor deve ser o menor possível para um bom modelo.

- Fa2 = fração de dados (%) que estão entre $0.5 \leq (C_m / C_o) \leq 2$.

- Cor (coeficiente de correlação) = $\frac{\overline{(C_o - \overline{C_o})(C_m - \overline{C_m})}}{\sigma_o \sigma_m}$; descreve o grau de associação ou concordância entre as variáveis. Para um boa performance o seu valor deve ser 1.

- Fb = $(\overline{C_o} - \overline{C_m}) / 0.5(\overline{C_o} + \overline{C_m})$; informa a tendência do modelo de superestimar ou subestimar as concentrações observadas. O valor ótimo é zero.

- Fs = $(\sigma_o - \sigma_m) / 0.5(\sigma_o + \sigma_m)$.

Onde C_o e C_m são as concentrações observadas e previstas pelo modelo, respectivamente, e s é o desvio padrão.

Uma boa concordância com os resultados do modelo Gaussiano foi obtida com a proposta

aproximação considerando-se que neste trabalho estamos trabalhando com a CLE.

Tabela 1 - Índices estatísticos para avaliar a performance do modelo.

Modelo	Nmse	Fa2	Cor	Fb	Fs
Gaussiano com Eq. (2)	0.55	0.91	0.82	0.34	0.53

CONCLUSÕES

Um parâmetro de dispersão vertical dependente da distância da fonte para uma CLP estável proveniente do espectro da turbulência é proposto. Este parâmetro de dispersão vertical é válido em regiões próximas de uma fonte contínua baixa em condições estáveis.

A análise estatística dos resultados mostra uma boa concordância entre os resultados da aproximação proposta com os experimentais. Finalmente, é relevante mencionar que o modelo proposto para o parâmetro de dispersão expresso pela Eq. (6), dependente da distância da fonte, é adequado para aplicações em modelos de difusão atmosféricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul) pelo parcial suporte financeiro deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARAD, M. L. Project Prairie Grass: A Field

Program in Diffusion. **Geophysical Research**, Paper No. 59 (II) TR-58-235, 1958.

CHAMPAGNE, F. H.; FRIEHE, C. A.; LARVE, J. C; WYNGAARD, J. C. Flux measurements, flux estimation techniques, and fine scale turbulence measurements in the unstable surface layer over land. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v.34, p.515-520, 1977.

DEGRAZIA, G.A.; MORAES, O. L. L. A Model for Eddy Diffusivity in a Stable Boundary Layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v.58, p.205-214, 1992.

DRAXLER, R. R. Determination of atmospheric diffusion parameters. **Atmospheric Environment**, v.10, p.99-105, 1976.

HANNA, S. R., Applications in air pollution modeling. In: NIEUWSTAD, F. T. M.; DOP, H. von (Eds.). **Atmospheric turbulence and air pollution modeling**. D. Reidel Publishing, 1982. p.275-310.

HANNA, S. R. Confidence limit for air quality models as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods. **Atmospheric Environment**, v.23, p.1385-1395, 1989.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1988. 666 p.

TAYLOR, G. I. Diffusion by continuous movements. **Proceedings of the London Mathematical Society**, v.20, p.196-212, 1921.

VENKATRAN, A.; WYNGAARD, J. C.. **Lectures on Air Pollution Modeling**. Boston: American Meteorological Society, Boston, 1988. 390 pp.