

## DISPERSÃO DE POLUENTES NA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA EMPREGANDO O MODELO LAGRANGEANO NO PERÍODO DE TRANSIÇÃO DIA-NOITE

LAIZ CRISTINA RODRIGUES MELLO<sup>1</sup>; MARLON TOMASCHEWSKI<sup>2</sup>; JONAS DA  
COSTA CARVALHO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – laiz.cristina.96@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – Marlon.tomascheswski1@hotmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas – jonas.carvalho@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

A Camada Limite Planetária (CLP) é a região da atmosfera que é diretamente influenciada pela superfície, de acordo com STULL (1988). A energia térmica da CLP é descrita em forma de fluxo de calor sensível, que ocorre quando a superfície do solo aquece a camada de ar imediatamente adjacente por condução e esta, por convecção, acaba por aquecer a CLP por inteiro, favorecendo a formação de um escoamento tipicamente turbulento. (NUNES, 2008). A variação temporal da CLP provoca mudanças no comportamento físico durante o período diurno e noturno devido a redução da energia solar.

Ao entardecer, o pôr-do-sol particulariza o período de transição dia-noite com a redução da radiação incidente, provocando a inversão térmica e o fluxo vertical de calor negativo, gerando uma taxa de decaimento da energia cinética turbulenta (ECT). Em consequência do resfriamento da superfície, ocorre a formação da Camada Limite Estável (CLE) e o desenvolvimento dos turbilhões mecânicos devido ao cisalhamento vertical do vento. Nota-se a presença da formação da Camada Residual (CR), acima da CLE, onde ainda há resquícios da camada diurna, com atuação dos turbilhões convectivos remanescentes. Devido à complexa estrutura da CLP, a aplicação de modelos de partículas estocásticas Lagrangeano tem sido sugerida e o estudo da dispersão de poluentes no período de transição é reduzido devido a sua complexidade.

Resultados experimentais de simulações foram aplicados por alguns autores. GOULART (2004) derivou coeficientes de difusão para o decaimento da turbulência convectiva na CR.; CARVALHO (2010) utilizou um modelo de partículas estocástico Lagrangeano para avaliar a dispersão de escalares causada pelo decaimento da turbulência durante o processo de transição que ocorre o período do pôr-do-sol; NASCIMENTO (2019) simulou os padrões de dispersão de poluentes emitidos a partir de duas fontes pontuais contínuas, aplicando-se o modelo de partículas Lagrangeano de Velocidade Aleatória.

O presente estudo tem por objetivo melhorar o entendimento do processo de difusão de poluentes no período noturno na CLP. Para isso, é realizada a simulação numérica da concentração de contaminantes, empregando-se um Modelo Lagrangeano para o período de transição dia-noite. O modelo é parametrizado com uma nova formulação para os coeficientes de difusão turbulenta, que levam em conta o decaimento da ECT na CR.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Modelo Lagrangeano de Deslocamento Aleatório

Para determinar o posicionamento das partículas, a solução para a equação de deslocamento aleatório é dada por:

$$dx_i = \left[ U_i(x, t) + \frac{\partial K_i(x, t)}{\partial t} \right] dt + [2K_i(x, t)]^{\frac{1}{2}} dW_j(t) \quad (1)$$

onde  $x$  é o vetor deslocamento,  $t$  é o tempo,  $U_i$  é a velocidade média do vento,  $K_{ij}$  é o tensor difusividade turbulenta e  $dW_j$  é o processo de Wiener incremental. A equação de deslocamento aleatório é escrita em termos de coeficientes de difusão, resultando em uma relação entre os modelos de dispersão de Lagrangeano e Euleriano.

### 2.2 Coeficiente de Difusão para a Camada Limite Estável

Atendendo as características e a estrutura da CLP, Degrazia et al. (2000) derivaram parametrizações para o coeficiente de difusão para a CLE:

$$K_i = \frac{\pi \beta \sigma_i^2}{3 U k_\rho} \quad (2)$$

onde  $u_*$  é a velocidade de fricção local e  $\phi_\varepsilon^n = (\varepsilon k z)/u_*^3$  é a função taxa de dissipação molecular adimensional,  $(f_m^*)_i$  é a frequência reduzida do pico espectral  $K$ , é a constante de Von Karman e  $c_i = \alpha_i \alpha_u (2\pi k)^{-\frac{2}{3}}$  com  $\alpha_u = 0,5 \pm 0,05$  e  $\alpha_i = \frac{1,4}{3}, \frac{4}{3}$  para as componentes  $u, v, w$ , respectivamente. Estas parametrizações geram valores contínuos em todas as elevações na CLP.

### 2.3 Coeficiente de Difusão para a Camada Residual

Para a CR, parametrizações para os coeficientes foram sugeridas por GOULART et al. (2003):

$$K_x(z, t) = \frac{0.55}{4\pi} U \sigma_u(z, t) E_u(0, z, t) \quad (3.a)$$

$$K_y(z, t) = \frac{0.55}{4\pi} U \sigma_v(z, t) E_v(0, z, t) \quad (3.b)$$

$$K_z(z, t) = \frac{0.55}{4\pi} U \sigma_w(z, t) E_w(0, z, t) \quad (3.c)$$

Para aplicação na camada residual, a simulação inicia cerca de 1 hora e meia antes do pôr do sol, o que implica que toda a camada limite planetária estará sob condição convectiva bem desenvolvida. Com o pôr do sol, inicia o fenômeno que é de interesse deste projeto: junto à superfície ocorre a evolução da camada limite estável e, acima, a camada residual. Perfis de coeficientes de difusão sugeridos por Degrazia et al. (2000) (Equação 2) são usados para simular a dispersão turbulenta na camada limite estável. Por outro lado, a difusividade turbulenta derivada por Goulart et al. (2003) (Equação 3) é usada para simular o transporte na camada pré-residual. Durante as simulações, novos valores para os coeficientes de difusão são fornecidos ao modelo de deslocamento aleatório a cada hora ou a cada meia hora. A evolução da altura da camada limite foi calculada de acordo com a expressão  $h = 70\sqrt{t}$ , onde  $h$  é dado em metros e  $t$  em horas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação da concentração integrada perpendicularmente à direção preferencial do vento ( $C_y$ ) é gerada para uma emissão pontual contínua de altura igual a 120 m. Na Figura 1 é apresentado o campo de concentração  $C_y$  no plano (x-z), a qual demonstra que a emissão de poluentes, posicionada acima da CLE, está submetida à presença da atividade convectiva na CR. O resultado apresentado (Figura 1) mostra que o contaminante penetra no interior da CLE e alcança a superfície. O transporte para a superfície pode ser explicado como segue: as partículas, sofrendo o efeito da dispersão da turbulência convectiva dentro da camada residual alcançam o topo da CLE e são, então, capturadas por um novo ambiente de turbulência estável, contendo propriedades de transporte muito diferentes da CR. A Figura 2 apresenta o perfil vertical de  $C_y$ , na qual pode ser visto que na distância de 250 m existe um máximo de  $C_y$  na altura aproximada de 120 m e uma significativa fração do máximo pode ser observada na superfície.

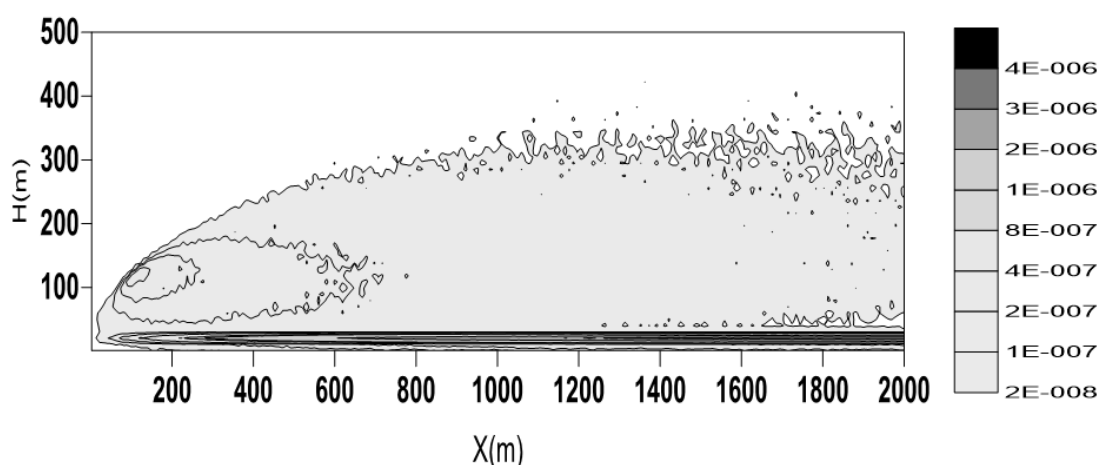


Figura 1: Concentração no plano (x-z). Altura da fonte 120m e altura da CLE 26 m.

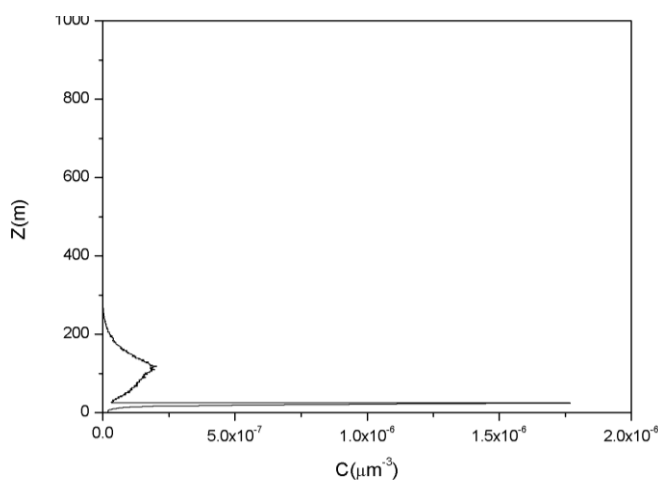


Figura 2: Perfil vertical de concentração na distância de 250 m. Altura da fonte 120m e altura da CLE 26 m.

#### 4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados, o entendimento do processo do decaimento de energia cinética turbulenta dentro da Camada Limite Noturna é um fator imprescindível para o conhecimento da dispersão durante o período de transição dia-noite. Nesse período, o comportamento particularizado, devido à presença de dois ambientes distintos, modifica a concentração do contaminante ao longo do tempo. Os resquícios da atividade convectiva do período diurno ainda atuam durante o processo de dispersão na Camada Residual, causando a entrada de poluentes dentro da Camada Limite Estável, de forma que ocasiona o aumento da concentração próximo a superfície.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao MEC pela bolsa PET.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEGRAZIA, G.A., ANFOSSI, D., CARVALHO, J.C., MANGIA, C., TIRABASSI, T. Turbulence parameterization for PBL dispersion models in all stability conditions. *Atmospheric Environment*, v.34, Cambridge, p.3575-3583, 2000

CARVALHO J.C.; DEGRAZIA, G.A.; ANFOSSI, D.; GOULART A.G.; CUCHIARA, G.C.; MORTARINI, L. Simulating characteristic patterns of the dispersion during sunset PBL. *Atmospheric Research*, v. 98, p. 274-284, 2010.

GOULART, A.G., DEGRAZIA; G.A., RIZZA, U., AFONSSI, D.A. **A theoretical model for the study of the convective turbulence decay and comparison with LES data. *Boundary-Layer Meteorology*. Springer,2003,107, 143-155.**

GOULART, A.G.;DEGRAZIA,G.A.;CAMPOS,C.J.,SILVEIRA, C.P.COEFICIENTES DE DIFUSÃO TURBUENTOS PARA A CAMADA RESIDUAL. **Revista Brasileira de Meteorologia**.v.19, n.2,123-128,2004.

NASCIMENTO,A.L.,CARVALHO,J.C.JACONDINO,W.D. Dispersão de Poluentes em Ambiente de Camada Pré-Residual Usando um Modelo Lagrangeano de Velocidade Aleatória. **Anuário do Instituto de Geociências**. Universidade Federal do Rio de Janeiro.v.41,32-40,2019.

NUNES, A. B. **Crescimento da Camada Limite Convectiva: Estudo analítico e numérico**. 2008, 194p. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

STULL, B. R. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht: Kluwer, 1988. University Press. KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1992,1-26.