



**Dispersão de Poluentes em Ambiente de Camada
Pré-Residual e Estável Usando um Modelo Lagrangeano de Velocidade Aleatória**
Pollutants Dispersion in a Pre-Residual and Stable
Layer Environment Using a Lagrangean Random-Speed Model

Ana Lucia Nascimento¹; Jonas da Costa Carvalho¹ & William Duarte Jacondino¹

¹Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia,
Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas, Av. Ildefonso Simões Lopes, 2751, 96060-290, Pelotas, RS, Brasil
E-mails: analuciasne@gmail.com; jonas.carvalho@ufpel.edu.br; williamjacondino@hotmail.com

Recebido em: 12/11/2018 Aprovado em: 25/01/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_32_40

Resumo

A Camada Limite Planetária sofre influência direta das forçantes superficiais e do aquecimento/resfriamento devido aos fluxos de radiação. Por consequência, quando este fluxo se torna negativo, ocorre o desenvolvimento de uma camada limite estável junto à superfície e uma camada pré-residual acima. O objetivo deste trabalho é simular os padrões da dispersão de poluentes emitidos a partir de duas fontes pontuais contínuas (60 m e 120 m), utilizando um modelo de partículas Lagrangeano de Velocidade Aleatória, durante o pôr do sol. Para a fonte pontual contínua de 60 m, os resultados mostram que inicialmente a pouca profundidade da camada limite estável, associada à energia convectiva em decaimento no interior da camada pré-residual contribuíram para a entrada efetiva do poluente em seu interior e sua concentração em superfície. Quando o poluente passa a ser emitido em ambiente totalmente estável, diminui sua concentração na superfície, formando uma pluma do tipo fanning. Para a fonte pontual contínua com altura de 120 m, as simulações mostram que para o poluente emitido sempre em ambiente de camada pré-residual, inicialmente há concentração em superfície e aumento da mesma distanciando-se da fonte. Posteriormente, com o aumento da profundidade da camada limite estável, os máximos de concentração se deslocam para próximo de seu topo, onde ocorre aumento dos valores de concentração.

Palavras-chave: camada limite planetária; camada limite estável; camada residual

Abstract

The Planetary Boundary Layer is directly influenced by the the surface forcing and the heating/cooling due to radiation fluxes. Consequently, when this flow becomes negative, the development of a stable boundary layer near the surface and a pre-residual layer above occurs. The aim of this paper is to simulate the dispersion patterns of pollutants emitted from two continuous point sources (60 m and 120 m) using a model of Lagrangian particles of Random Speed during sunset. For the continuous point source of 60 m, the results show that initially the low depth of the stable boundary layer associated to the decaying convective energy inside the pre-residual layer contributed to the effective entry of the pollutant into its interior and its surface concentration. When the pollutant is emitted in a totally stable environment, it decreases its concentration on the surface, forming a fanning plume type. For the continuous point source with a height of 120 m, the simulations show that for the pollutant emitted always in a pre-residual layer environment, there is initially a concentration on the surface and an increase as it keeps distance from the source. Subsequently, with the increase of the depth of the stable boundary layer, the maximum concentration moves towards to near its top, where the concentration values increase.

Keywords: planetary boundary layer; stable boundary layer; residual layer

1 Introdução

A Camada Limite Planetária (CLP) é a parte da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra e responde aos forçantes superficiais com uma escala de tempo de uma hora ou menos (Stull, 1988). Considerando uma condição sinótica em que predomina a atuação de um sistema de alta pressão, a evolução da CLP é induzida por transportes turbulentos devido a diferença de temperatura entre a atmosfera e a superfície terrestre. Após o pôr do sol, o fluxo de calor sensível na superfície torna-se negativo e dá origem a uma Camada Limite Estável (CLE).

Acima da CLE está a Camada Residual (CR), a qual se desenvolve completamente somente depois da CLE estar consolidada com forte estratificação estável; a CR apresenta características de uma camada estaticamente neutra com turbulência fraca ou inexistente. A camada que precede a CR é chamada de Camada Pré - Residual (CP-R) (Nilson *et al.*, 2016), ocorrendo nos primeiros 90 – 120 minutos após o pôr do sol, onde é caracterizada pela presença de turbilhões convectivos remanescentes da Camada de Mistura (CM) existente durante o dia. Com o passar do tempo os turbilhões convectivos diminuem de intensidade em função da falta de fonte de energia e, por conseguinte, a sua Energia Cinética Turbulenta (ECT) começa a decair, formando a CP-R. Esse processo ocorre diariamente na CLP durante o período de transição dia-noite e o estudo da dispersão de poluentes na CP-R é incipiente em ciências da atmosfera.

Atualmente não existem muitos estudos voltados para a dispersão de poluentes na CP-R devido a sua complexidade. Entretanto, o decaimento da turbulência na Camada Limite Convectiva (CLC) foi investigado por Goulart *et al.* (2003), usando a equação para o espectro de energia turbulenta e por Nieuws-tadt & Brost (1986) e Sorbjan (1997), empregando modelo de simulação dos grandes turbilhões LES (Large-Eddy Simulation). Além disso, Caughey & Kaimal (1977), Grant (1997), Anfossi *et al.* (2004), Pino *et al.* (2006), Carvalho *et al.* (2010) e Nadeau *et al.* (2011) apresentaram alguns resultados experimentais durante o período de transição dia-noite. Recentemente, Nilsson *et al.* (2016)

utilizaram um modelo simples para estudar o efeito da ECT em ambiente de CP-R e Reis (2016), utilizou um modelo analítico Euleriano para simular a dispersão de poluentes na CP-R. O objetivo deste trabalho é simular os padrões característicos da dispersão de poluentes emitidos a partir de uma fonte pontual contínua em uma CLP caracterizada pelo decaimento de energia convectiva na CP-R. Para isso, um modelo de partículas Lagrangeano de velocidade aleatória é aplicado para estudar a dispersão de poluentes durante o período de transição dia-noite. A maior motivação para a realização deste estudo se dá pela escassez de informações e dados sobre a dispersão de poluentes no período de transição dia-noite.

2 Metodologia

O modelo de velocidade aleatória é usado para simular a concentração de contaminantes perpendicular à direção preferencial do vento (cross-wind concentration). A emissão é realizada a partir de uma fonte pontual contínua em duas alturas diferentes: fonte baixa (60 m) e fonte alta (120 m). A turbulência é parametrizada para descrever o efeito da difusão produzida pelo decaimento da turbulência convectiva na CP-R e pela turbulência mecânica na CLE.

2.1 Modelo de Velocidade Aleatória (Modelo de Langevin)

A Equação 1 é baseada no cálculo da velocidade turbulenta pela equação de Langevin tridimensional, e o cálculo da posição de cada partícula dado por:

$$\frac{du_i}{dt} = a_i(x_i, u_i)dt + b_i(x_i, u_i)\xi_i(t) \quad (1a)$$

$$dx_i = (U_i + u_i)dt \quad (1b)$$

onde $i, j = 1, 2, 3$, \mathbf{x} é o deslocamento, \mathbf{u} é a velocidade turbulenta, \mathbf{a} é um coeficiente determinístico, \mathbf{b} é um coeficiente de difusão, U é a velocidade média do vento e $\xi_i(t)$ é um incremento aleatório conhecido como “ruído branco”, tal que o processo incremental de Wiener é a integral no tempo de $\xi_i(t)$.

Os coeficientes $a_i(x_i, u_i)$ e $b_i(x_i, u_i) = (C_0 \varepsilon)^{1/2}$ dependem do cálculo das variâncias de velocidade turbulenta (σ_i^2) e das escalas de tempo de decorrelação Lagrangeana (τ_{L_i}).

2.2 Parametrização da CLE

Em uma CLE existe uma competição entre a turbulência gerada por cisalhamento do vento e o efeito da estratificação. Portanto, a CLE é considerada com a coexistência de turbulência contínua e fluxo de calor negativo na superfície (Nieuwstadt, 1984). Degrazia *et al.*, (2000) derivaram parametrizações para as variâncias de velocidade turbulenta (σ_i^2) e para as escalas de tempo de decorrelação Lagrangeana (τ_{L_i}). As expressões gerais para σ_i^2 (Equação 3) e τ_{L_i} (Equação 4) ($i = u, v, w$) na CLE são escritas da seguinte forma:

$$\sigma_i^2 = \frac{2.32 c_i (\varphi_\varepsilon^{n+s})^{2/3} u_*^2}{[(f_m^*)_i^{n+s}]^{2/3}} \quad (2)$$

$$\tau_{L_i} = \frac{z}{\sqrt{c_i}} \left\{ \frac{0.059}{[(f_m^*)_i^{n+s}]^{2/3} (\varphi_\varepsilon^{n+s})^{1/3} u_*} \right\} \quad (3)$$

onde u_* é a velocidade de fricção, $\varphi_\varepsilon^{n+s} = \varepsilon \kappa z / u_*^3$ é a taxa de dissipação molecular adimensional associada à produção mecânica da turbulência, $(f_m^*)_i^{n+s}$ é a frequência associada ao pico espectral neutro ou estável e $c_i = \alpha_i (0.5 \pm 0.05) (2\pi k)^{-2/3}$ com $\alpha_i = 1, 4/3, 4/3$ para u, v e w , respectivamente.

2.3 Parametrização da CP-R

Um método geral para derivar difusividades turbulentas em ambiente de turbulência convectiva em decaimento foi proposto por Goulart *et al.*, (2007). As relações para σ_i^2 (Equações 4a, 4b e 4c) e τ_{L_i} (Equações 5a, 5b e 5c) na CP-R são escritas da seguinte forma:

$$\frac{1}{2} \frac{\sigma_u^2}{w_*^2} = \frac{0,14}{1+1,2t_*^{1,85}} \quad (4a)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\sigma_v^2}{w_*^2} = \frac{0,14}{1+1,2t_*^{1,85}} \quad (4b)$$

$$\frac{1}{2} \frac{\sigma_w^2}{w_*^2} = \frac{0,15}{1+2t_*^{1,7}} \quad (4c)$$

$$\frac{w_* \tau_{Lu}}{z_i} = 0.27 + 0.34t_* - 0.007t_*^2 \quad (5a)$$

$$\frac{w_* \tau_{Lv}}{z_i} = 0.23 + 0.29t_* - 0.005t_*^2 \quad (5b)$$

$$\frac{w_* \tau_{Lw}}{z_i} = 0.24 + 0.34t_* - 0.007t_*^2 \quad (5c)$$

onde z_i é a altura da CM, w_* é a escala de velocidade convectiva e $t_* = t w_* / z_i$.

2.3 Caracterização da Simulação

O procedimento para as simulações segue a metodologia apresentada em Carvalho *et al.* (2010). Para as simulações, o escoamento turbulento é assumido não-homogêneo somente na vertical ($\partial/\partial x_1 = 0, \partial/\partial x_2 = 0, \partial/\partial x_3 \neq 0$) e o transporte é realizado pela componente longitudinal do vento médio ($U_1 \neq 0, U_2 = 0, U_3 = 0$). O domínio horizontal está configurado com 2 km e o domínio vertical igual à altura da CLE. O passo no tempo é mantido constante, sendo obtido a partir da escala de tempo de decorrelação Lagrangeana ($\Delta t = \frac{\tau_L}{c}$), onde τ_L deve ser o menor valor entre $\tau_{Lu}, \tau_{Lv}, \tau_{Lw}$ e C é um coeficiente empírico igual a 10. A concentração do contaminante emitido é determinada através da contagem das partículas em um volume imaginário na posição x, y, z . Os parâmetros micrometeorológicos $z_i = 1350$ m, $w_* = 2.3$ ms⁻¹, $L = 4.8$ m e $u_* = 0.26$ ms⁻¹ (Nieuwstadt & Brost, 1986) são utilizados para gerar os perfis de σ_i^2 e τ_{L_i} (Equações 2 e 3) durante as simulações.

As simulações iniciam no momento da transição dia-noite, quando o fluxo de calor diminui

progressivamente e uma CLE desenvolve-se junto à superfície. A evolução da altura da camada limite é calculada de acordo com a expressão $h = 70\sqrt{t}$, onde h é dado em metros e t em horas (Anfossi *et al.*, 1974). Durante a simulação, novos perfis de σ_z^2 e τ_{Lz} e novos valores de altura da CLE são fornecidos ao modelo nos intervalos de tempo apresentados na Tabela 1.

t (s)	900	1800	2700	3600
h (m)	35	50	60	70

Tabela 1 Tempo de simulação (t) e altura da CLE de acordo com $h = 70\sqrt{t}$.

3 Resultados e Discussões

Pelo padrão de difusão observado nos resultados das simulações, é possível notar que o contaminante emitido dentro da CP-R sofre forte mistura turbulenta devido à energia convectiva em decaimento, remanescente da camada de mistura que ocorreu durante o dia. Quando as partículas experimentam este ambiente, são transportadas para o topo da CLE e penetram no seu interior, sendo inseridas em um ambiente estável, no qual a dispersão é caracterizada pelo transporte através do vento médio e pela difusão gerada por turbulência mecânica. Para uma turbulência estável contínua dentro da CLE, a variância da velocidade vertical turbulenta diminui com a altura, resultando em uma aceleração que tende a transportar o poluente em direção à superfície e dispersá-lo sob a ação da turbulência estável (Carvalho *et al.*, 2010).

Serão apresentados resultados das simulações, considerando a análise de campos bidimensionais e

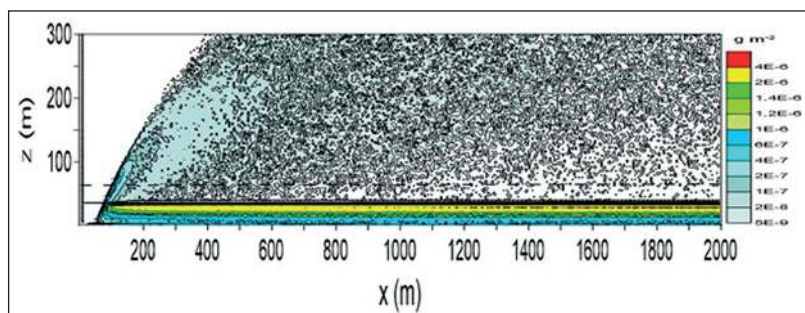
perfis verticais de concentração integrada (C_y). Os campos de concentração são gerados para os instantes da Tabela 1 e os perfis de concentração são gerados nas distâncias horizontais de 100 m, 1000 m e 2000 m a partir da fonte.

3.1 Fonte Baixa

De acordo com o padrão de dispersão na CP-R é possível observar que a pluma do poluente experimenta forte mistura turbulenta em função do processo de difusão convectiva em decaimento presente na CP-R, que tende a homogeneizar a concentração do poluente. Devido ao transporte na vertical, provocado pelos ramos descendentes (downdrafts) do processo convectivo, parte da pluma do poluente penetra dentro da CLE (Figura 1), porém, sua maior concentração permanece próximo ao seu topo. Com a evolução no passo de tempo e o aumento da altura da CLE (Tabela 1) é possível notar que há uma redução na difusão dentro da CP-R, devido ao decaimento da ECT. A diminuição da concentração do poluente em superfície está relacionada em parte ao aumento da altura da CLE, e em parte à diminuição do transporte vertical do poluente da CP-R para dentro da CLE (Figura 3 e 5). Quando emitido totalmente em ambiente de CLE (Figura 7), sofre influência da estratificação estável e turbulência mecânica, onde a abertura da pluma é inibida.

Os perfis verticais de concentração (C_y) mostram que o poluente emitido dentro da CP-R sofre forte difusão convectiva e é transportado verticalmente em direção à superfície, onde é observado concentração próxima da fonte, diminuindo ao se distanciar (Figura 2 A, B e C). O máximo de concentração permanece próximo ao topo da CLE, mesmo nos próximos passos de tempo, porém, a concentração em superfície é inexistente (Figuras 4, 6 e 8 A, B e C).

Figura 1 Concentração (plano x-z).
 Altura da fonte de 60 m (linha tracejada)
 e altura da CLE de 35 m (linha contínua).



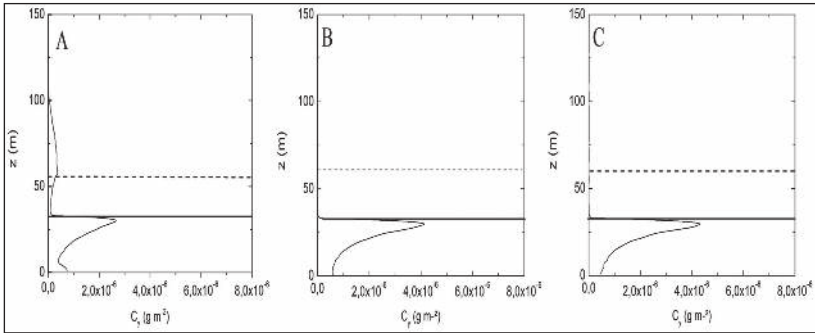


Figura 2 Perfil vertical de concentração (gm^{-2}) em (A) $x = 100$ m, (B) $x = 1000$ m, (C) $x = 2000$ m. Altura da fonte de 60 m (linha tracejada) e altura da CLE de 35 m (linha contínua).

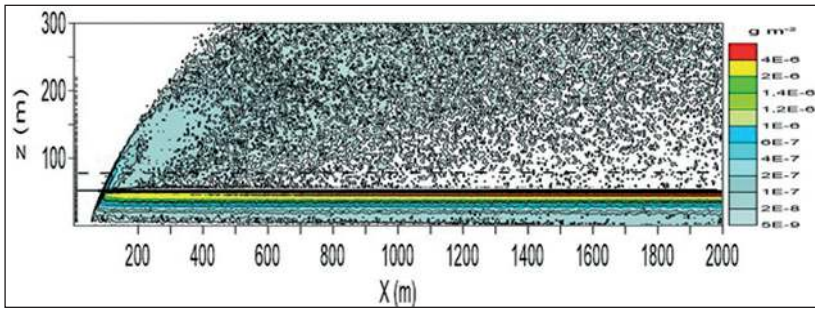


Figura 3 Concentração (plano x-z). Altura da fonte de 60 m (linha tracejada) e altura da CLE de 50 m (linha contínua).

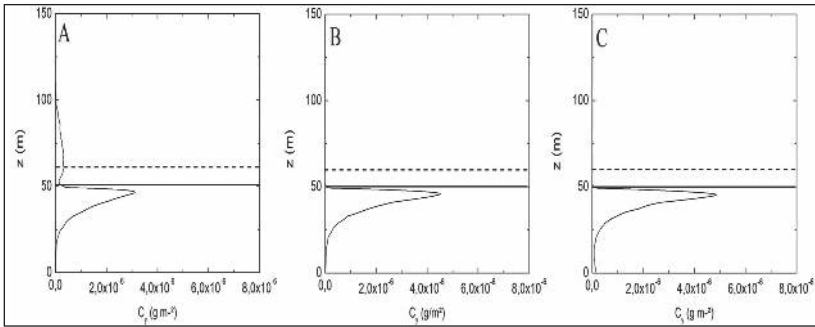


Figura 4 Perfil vertical de concentração (gm^{-2}) em (A) $x = 100$ m, (B) $x = 1000$ m, (C) $x = 2000$ m. Altura da fonte de 60 m (linha tracejada) e altura da CLE de 50 m (linha contínua).

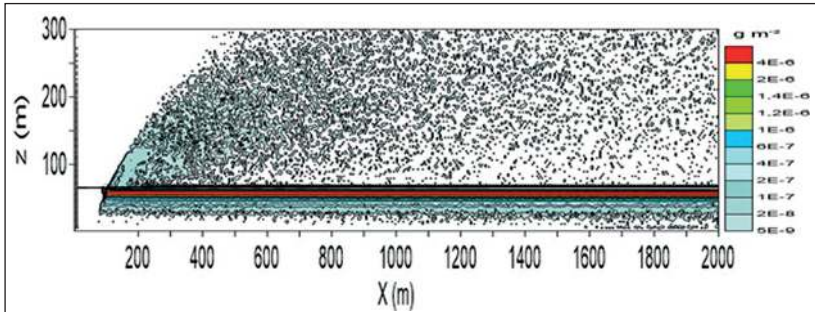


Figura 5 Concentração (plano x-z). Altura da fonte de 60 m (linha tracejada) e altura da CLE de 60 m (linha contínua).

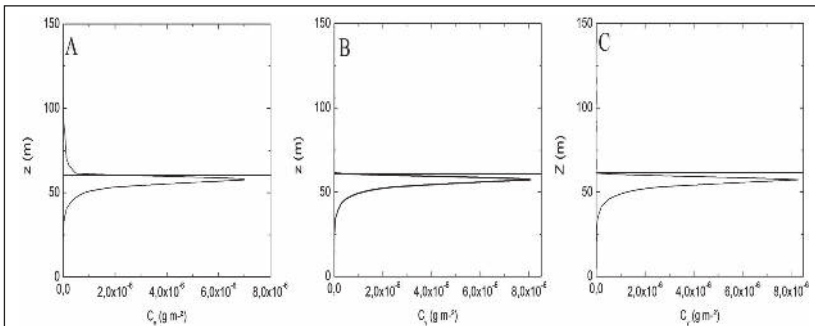


Figura 6 Perfil vertical de concentração (gm^{-2}). (A) $x = 100$ m, (B) $x = 1000$ m, (C) $x = 2000$ m. Altura da fonte de 60 m (linha tracejada) e altura da CLE de 60 m (linha contínua).

Figura 7 Concentração (plano x-z).
 Altura da fonte de 60 m (linha tracejada)
 e altura da CLE de 70 m (linha contínua).

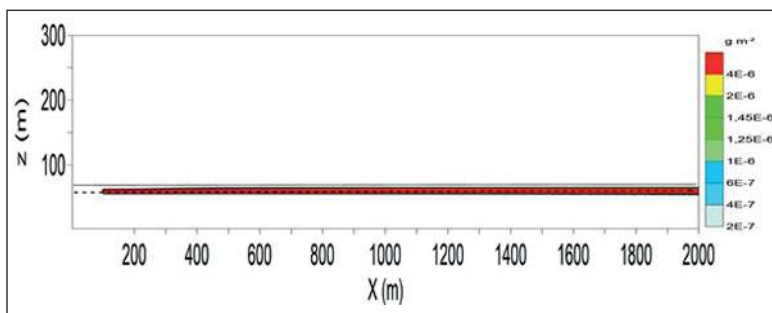
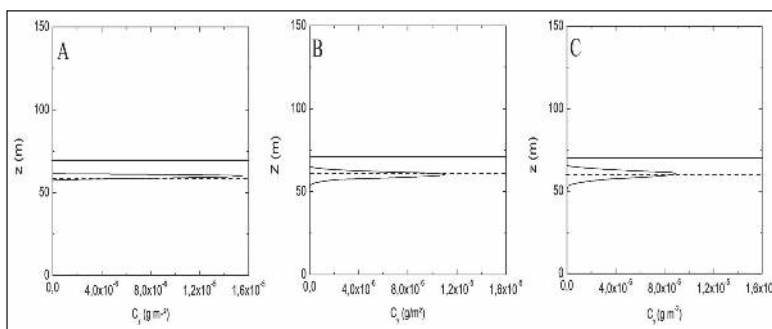


Figura 8 Perfil vertical de concentração
 ($g\ m^{-2}$) em (A) $x = 100$ m, (B) $x = 1000$ m,
 (C) $x = 2000$ m. Altura da fonte de 60 m
 (linha tracejada) e altura da CLE de 70 m
 (linha contínua).



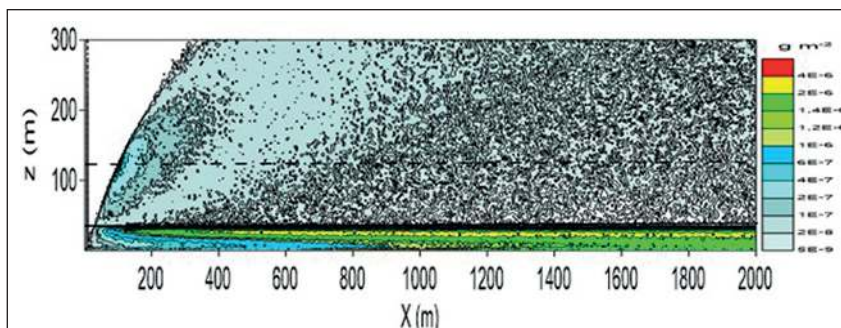
3.2 Fonte Alta

Os resultados das simulações mostram uma fonte pontual contínua emitindo contaminantes diretamente em ambiente de CP-R (Figura 9, 11, 13, 15), onde, devido ao transporte vertical provocado pelos ramos descendentes (downdrafts) do processo convectivo provocaram a entrada do poluente no interior da CLE, passando a experimentar um novo ambiente de estratificação estável. A alta intensidade da turbulência convectiva na CP-R gera uma pluma sujeita a forte mistura, com distribuição altamente homogênea e baixa concentração. A baixa intensidade da turbulência na CLE gera uma pluma do poluente com pouca abertura e alta concentração. Mesmo que a emissão ocorra a partir de uma altura bem acima no topo da CLE, a convecção dentro da CP-R é suficientemente forte para transportar o poluente para o interior da CLE e gerar concentrações em superfície. Os próximos passos de tempo mostram uma

diminuição gradual da concentração do poluente em superfície; isto ocorre devido ao decaimento da ECT dentro da CP-R e ao aumento da profundidade da CLE, que resulta simultaneamente na diminuição da capacidade de difusão na CP-R e no deslocamento da máxima concentração do poluente para próximo do topo da CLE.

Os perfis de concentração integrada (C_v) mostram que há concentração em superfície próximo da fonte quando a altura da CLE é de 35 m, aumentando a concentração ao se distanciar (Figura 10 A, B, C). Com a evolução da altura da CLE e associado ao decaimento dos processos convectivos, é possível observar pouca ou nenhuma concentração em superfície (Figura 10, 12, 14 e 16); o máximo se desloca para próximo do topo da CLE, onde ocorre aumento nos valores de concentração. Este aumento está relacionado a baixa difusão vertical, devido ao aumento da estabilidade. O padrão de pluma observado em ambientes estáveis é do tipo fanning (Arya, 1999).

Figura 9 Concentração (plano x-z).
 Atura da fonte de 120 m (linha tracejada)
 e altura da CLE de 35 m (linha contínua).



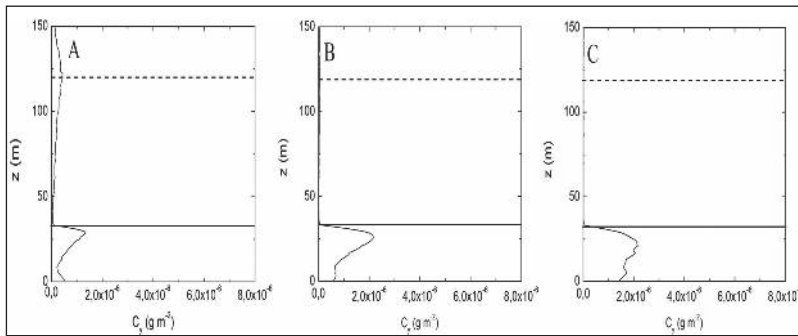


Figura 10 Perfil vertical de concentração (gm^{-3}) em (A) $x = 100$ m, (B) $x = 1000$ m, (C) $x = 2000$ m. Altura da fonte de 120 m (linha tracejada) e altura da CLE de 35 m (linha contínua).

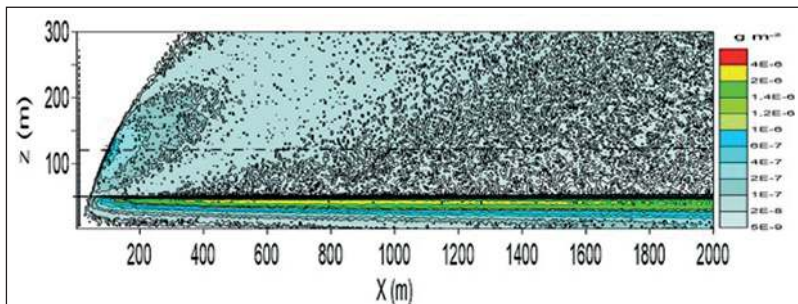


Figura 11 Concentração (plano x-z). Atura da fonte de 120 m (linha tracejada) e altura da CLE de 50 m (linha contínua).

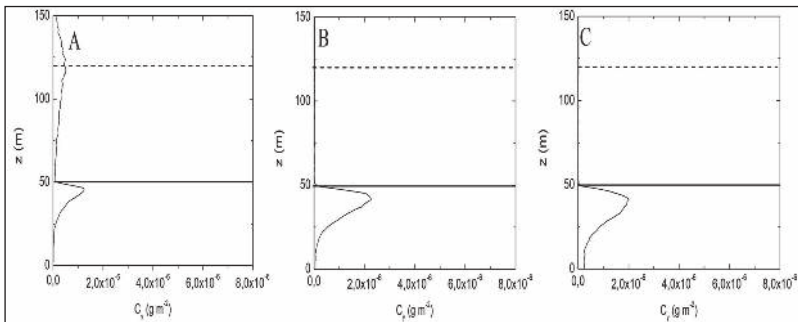


Figura 12 Perfil vertical de concentração (gm^{-3}) em (A) $x = 100$ m, (B) $x = 1000$ m, (C) $x = 2000$ m. Altura da fonte de 120 m (linha tracejada) e altura da CLE de 35 m (linha contínua).

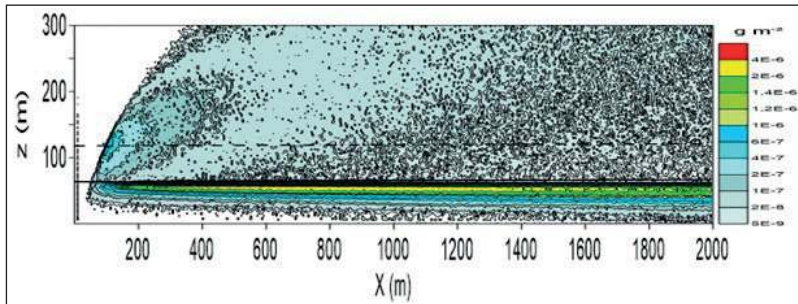


Figura 13 Concentração (plano x-z). Atura da fonte de 120 m (linha tracejada) e altura da CLE de 60 m (linha contínua).

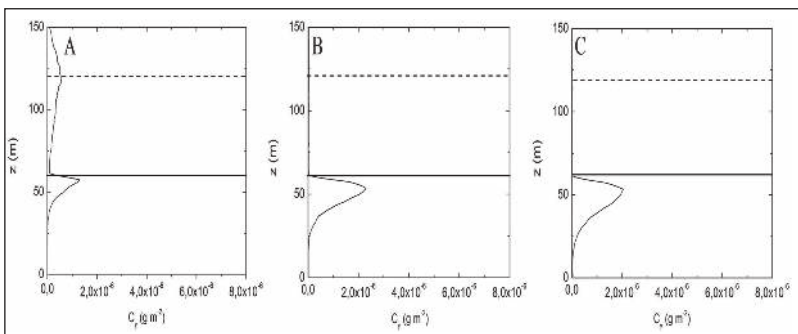


Figura 14 Perfil vertical de concentração (gm^{-3}) em (A) $x = 100$ m, (B) $x = 1000$ m, (C) $x = 2000$ m. Atura da fonte de 120 m (linha tracejada) e altura da CLE de 60 m (linha contínua).

Figura 15 Concentração (plano x-z). Altura da fonte de 120 m (linha tracejada) e altura da CLE de 70 m (linha contínua).

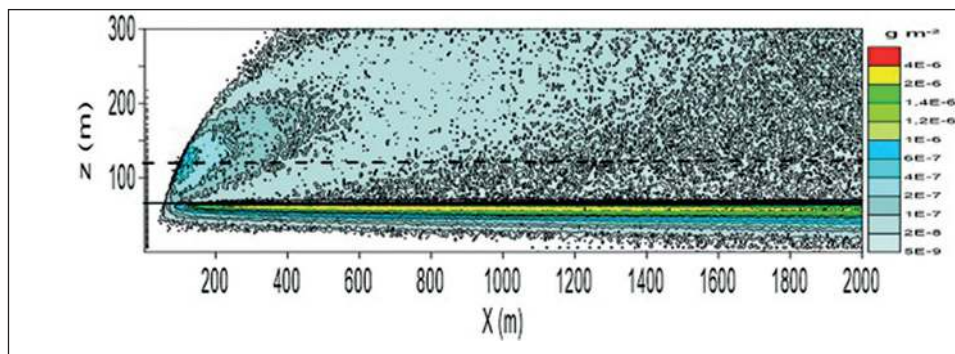
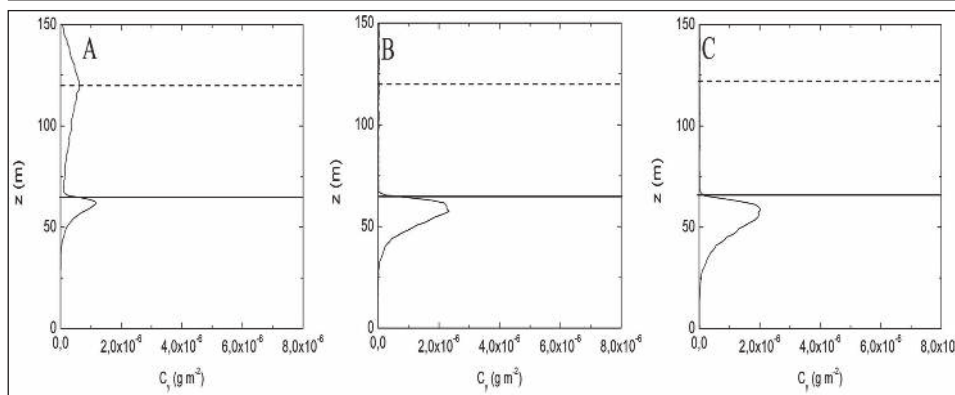


Figura 16 Perfil vertical de concentração (g m^{-3}) em (A) $x = 100$ m, (B) $x = 1000$ m, (C) $x = 2000$ m. Altura da fonte de 120 m (linha tracejada) e altura da CLE de 70 m (linha contínua).



4 Conclusão

Os resultados das simulações mostraram que a energia convectiva em decaimento na CP-R teve um papel fundamental no padrão de dispersão de contaminantes no período de transição do pôr do sol para ambas as fontes. O comportamento geral da dispersão, esperado durante este fenômeno de transição particular, foi reproduzido por estas simulações. Contudo, é importante esclarecer que desenvolvimentos adicionais são necessários para obter mais detalhes sobre este processo físico complexo para aplicações realísticas.

As simulações para a fonte pontual contínua de 60 m mostraram que a difusão gerada pelos turbilhões na CP-R foi efetiva no processo de transferência do poluente para o interior da CLE. No tempo de transição inicial, a pouca profundidade da CLE associada à energia convectiva em decaimento no interior da CP-R, contribuiu para a entrada do poluente no interior da CLE e para a concentração na superfície. Com a evolução da CLE o poluente passou a ser emitido em ambiente totalmente estável, o que gerou uma pluma no formato tipo fanning. Esta configuração

resultou em uma diminuição da concentração junto à superfície devido à baixa difusão vertical e ao transporte da pluma pelo vento horizontal. Notou-se que o máximo de concentração integrada (C_y) se deu quando o poluente foi emitido acima da altura do topo da CLE.

Para a fonte pontual contínua com altura de 120 m, as simulações mostraram que para o poluente emitido sempre em ambiente de CP-R, nos primeiros instantes de tempo, houve concentração em superfície e um aumento da mesma distanciando-se da fonte. Com o passar do tempo e a evolução na altura da CLE, observou-se que a linha do máximo de concentração integrada (C_y) se deslocou em direção ao topo da CLE e pluma apresentou o formato do tipo fanning. Mesmo com a emissão sendo realizada a partir de uma altura bem acima no topo da CLE, a convecção dentro da CP-R foi intensa para realizar o transporte do poluente até a superfície. Os padrões de dispersão gerados neste trabalho (avaliação qualitativa) são semelhantes aos encontrados na literatura (Carvalho *et al.*, 2010), a diferença se dá na avaliação quantitativa dos valores de concentrações em superfície.

5 Referências

- Anfossi, D. 1998. Estimation of the kolmogorov constant c_0 from classical statistical diffusion theory. *Atmospheric Environment*, 32: 3611-3614.
- Anfossi, D.; Bacci, P. & Longhetto, A. 1974. An application of Lidar technique to the study of nocturnal radiation inversion. *Atmospheric Environment*, 8: 537-541.
- Anfossi, D.; Degrazia, G.A. & Goulart, A.G. 2004. Atmospheric turbulence decay during the solar total eclipse of 11 August 1999. *Boundary-Layer Meteorology*, 111: 301-311.
- Anfossi D.; Ferrero E.; Tinarelli, G. & Alessandrini S. 1997. A simplified version of the correct boundary conditions for skewed turbulence in Lagrangian particle models. *Atmospheric Environment*, 31: 301-308.
- Arya, S.P. 1999. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. New York, USA: Oxford University Press, 310 p.
- Carvalho J.C.; Degrazia, G.A.; Anfossi, D.; Goulart A.G.; Cuchiara, G.C. & Mortarini, L. 1997. Simulating characteristic patterns of the dispersion during sunset PBL. *Atmospheric Research*, 98: 274-284.
- Caughey S. & Kaimal, J. Vertical heat flux in the convective boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103: 811-815, 1977.
- Degrazia, G.A.; Anfossi D.; Carvalho, J.C.; Mangia, C. & Tirabassi, T. 2000. Turbulence parameterization for PBL dispersion models in all stability conditions. *Atmospheric Environment*, 34: 3575-3583.
- Goulart, A.G.; Degrazia, G.A.; Rizza, U. & Anfossi, D. 2003. A theoretical model for the study of the convective turbulence decay and comparison with LES data. *Boundary-Layer Meteorology*, 107: 143-155.
- Goulart, A.G.; Vilhena, M.; Degrazia, G. & Flores, D. 2007. Vertical, lateral and longitudinal eddy diffusivities for a decaying turbulence in the convective boundary layer. *Ecological Modelling*, 204: 516-522.
- Grant, A.L.M. 1997. An observational study of the evening transition boundary-layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 23: 657-677.
- Nadeau, D. F.; Pardyjak, E. R.; Higgins, C. W.; Fernando, H. J. S. & Parlange, M. B. 2001. A simple model for the afternoon and early evening decay of convective turbulence over different land surfaces. *Boundary-Layer Meteorology*, 141: 301-324.
- Nieuwstadt, F.T.M. 1984. The turbulent structure of the stable nocturnal boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41: 2202-2216.
- Nieuwstadt, F.T.M., & Brost, R.A. 1986. The decay of convective turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43: 532-546.
- Nilsson, E.; Lohou, F.; Pardyjak, E.; Hartogensis, O. & Darbieu, C. 2016. Turbulence kinetic energy budget during the afternoon transition. *Atmospheric Chemistry Physics*, 16: 8873-8898.
- Pino, D.; Jonker, H.J.J.; Vilà-Guerau de Arellano, J. & Dosio, A. 2006. Role of shear and the inversion strength during sunset turbulence over land: Characteristic length scales. *Boundary-Layer Meteorology*, 121(3): 537-556.
- Reis, J. K. 2016. *Simulação Analítica da Dispersão de Poluentes Durante o Período de Dia-Noite*. Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Dissertação de Mestrado 110p.
- Sorbjan, Z. 1997. Decay of Convective Revisited. *Boundary-Layer Meteorology, Milwaukee*, 82: 501-515.
- Stull, B. R. 1992. *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht: Kluwer, 1988. University Press, 316 p.
- Thomson, J. D. 1987. Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows. *Journal of fluid*, Cambridge University press, 180: 529-556.