

# ESTUDO EULERIANO DO DECAIMENTO DA CLP

Jéssica Kanopp dos Reis<sup>1</sup>, Jonas da Costa Carvalho<sup>2</sup>, Daniela Buske<sup>3</sup> e Régis Sperotto de Quadros<sup>4</sup>

## Resumo

Neste estudo, um modelo analítico Euleriano é utilizado para simular a concentração de poluentes emitidos a partir de uma fonte pontual contínua durante o período de transição dia-noite. A análise aplica o modelo de dispersão parametrizado por coeficientes de difusão da camada limite estável e camada pré-residual. As simulações da concentração são realizadas considerando diferentes intervalos de tempos no processo de transição durante o pôr do sol. Os resultados apresentados neste trabalho mostram similaridade com aqueles encontrados na literatura onde a ação da mistura turbulenta gerada pelo decaimento da energia convectiva na camada residual causa uma transferência efetiva dos poluentes para o interior da camada limite estável. Durante o estágio inicial do período de transição, no qual a camada estável apresenta pouca profundidade, a combinação entre turbilhões convectivos e estáveis age eficientemente para transportar os poluentes em direção à superfície. Para o estágio posterior, a altura da camada estável alcança a altura da fonte pontual tal que a dispersão ocorre numa extensão vertical mais profunda que é dominada pela turbulência estável. A falta de uma mistura turbulenta efetiva, agindo sobre a extensão vertical da camada limite estável, impede que os poluentes cheguem à superfície. Este trabalho tem no seu foco principal uma descrição analítica da dispersão de poluentes ocorrendo em torno do pôr do sol, a qual permite simular o transporte turbulento de forma computacionalmente eficiente.

**Palavras-Chave:** Camada Pré-residual, Camada Limite Estável, Modelo Analítico Euleriano.

## Abstract

In this study, an analytical Eulerian model was employed to simulate the pollutants concentration released from continuous point source during the sunset transition period. The analysis applies the dispersion model parameterized by the stable and decaying convective eddy diffusivities, representing the turbulent mixing in the stable boundary layer and pre-residual layer. The concentration simulations were calculated considering different times in the transition process through the sunset period. The results presented In this work show similarity with ones reported by literature, where the mixing strong action caused by the decaying convective energy-containing eddies in the RL causes an effective entrance of pollutants to the interior of the recently established SBL. During the initial stage of the transition period, in which the SBL presents a small depth, the combination between residual convective and stable eddies acts efficiently to transport the pollutants in direction to the ground surface. For the later stages, the height of the SBL depth reaches the point source height so that the dispersion occurs in a large vertical extension that is dominated by a stable turbulence. The lack of an effective turbulent mixing, acting over the vertical extension of the SBL, prevents that pollutants do reach

---

<sup>1</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática pela UFPel; e-mail: jessicareis15@hotmail.com.

<sup>2</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática pela UFPel; e-mail: jonas.carvalho@ufpel.edu.br.

<sup>3</sup> Professora do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática pela UFPel; e-mail: daniela.buske@ufpel.edu.br.

<sup>4</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática pela UFPel; e-mail: regis.quadros@ufpel.edu.br.

the surface. In the present contribution was focused on an analytical description of the pollutant dispersion occurring around the evening transition, which allows simulate the turbulent transport in a computationally efficient procedure.

**Keywords:** Pre-residual layer, Stable boundary layer, Eulerian Analytical Model.

## Introdução

A turbulência na camada limite planetária (CLP) é um fenômeno físico complexo controlado pela ação de diferentes forçantes. Um exemplo importante está associado ao processo que ocorre diariamente na CLP durante o período de transição dia-noite. Aproximadamente 1 hora antes do pôr do sol, o fluxo de calor na superfície diminui progressivamente e, então, torna-se negativo durante a noite e, conseqüentemente, uma camada limite estável (CLE) desenvolve-se junto à superfície. Acima da CLE, na camada residual (CR), os turbilhões convectivos começam a perder intensidade e capacidade de mistura e, assim, a camada limite convectiva (CLC) começa a decair. A CR é definida como uma camada estaticamente neutra, caracterizada por turbulência esporádica fraca, que encontra-se acima da CLE e abaixo da inversão de temperatura (capa de inversão), separando a camada limite da atmosfera livre. Por definição, ela desenvolve-se somente após a superfície começar a se estratificar de forma estável. Portanto, é usual denominar a região de turbulência fraca que existe durante condições instáveis, precedendo a CR, como camada pré-residual (NILSSON et. al., 2016).

A dispersão de poluentes por escoamentos turbulentos é de importância central em um número de problemas ambientais. Porém, menos atenção tem sido dada à dispersão na camada pré-residual, onde a difusão de poluentes ocorre em condições de decaimento da turbulência convectiva. O decaimento da energia dos grandes turbilhões na CLC é o mecanismo físico que pode sustentar o processo de dispersão na camada pré-residual.

Neste estudo é investigado o processo de dispersão turbulenta durante o período do pôr do sol, com o objetivo de avaliar os padrões característicos da dispersão turbulenta de poluentes liberados de uma fonte pontual contínua em uma camada limite planetária (CLP) caracterizada pelo decaimento convectivo. Esta análise considera uma solução analítica da equação advecção-difusão, na qual os efeitos turbulentos são representados por coeficientes de difusão para a CLE e para o decaimento da turbulência na CLC. A utilização destes coeficientes de difusão em modelos de qualidade do ar gera padrões de turbulência realistas associados ao tempo de transição dia-noite.

Para simular a dispersão turbulenta durante o período do pôr do sol é utilizado um procedimento analítico, sendo fornecida uma solução de forma fechada, que pode ser adaptada para aplicações em métodos numéricos para reproduzir a solução dentro de uma precisão prescrita. Como consequência, a análise de erro é reduzida em comparação as aproximações numéricas (BUSKE et. al., 2012).

O decaimento da turbulência na CLC foi investigado por Goulart et. al. (2003), usando a equação para o espectro de energia turbulenta, e por Nieuwstadt et. al. (1986), Sorbjan (1997), Bear et. al. (2006), Pino et. al. (2006) e Sorbjan (2007) empregando modelo de simulação dos grande turbilhões LES (*Large-Eddy Simulation*). Além disso, Caughey et. al. (1977), Grant (1997), Anfossi (2004), Carvalho et. al. (2010) e Nadeau et. al. (2011) apresentaram alguns resultados experimentais durante o período de transição dia-noite.

## 1 Modelo euleriano

O modelo Euleriano aqui considerado é representado pela equação de advecção-difusão. Deve-se lembrar que esta equação é obtida combinando a equação de continuidade com o fechamento Fickiano da turbulência. Podendo assim, escrever a equação de advecção-difusão em geometria cartesiana como (BLACKADAR, 1997):

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) + S \quad (1)$$

onde  $\bar{c}$  indica a concentração média de um contaminante passivo (em unidades de  $gm^{-3}$  e  $S$  é o termo fonte. A difusividade turbulenta  $K = diag(K_x K_y K_z)$  (em unidades de  $m^2/s$ ) é representada por uma matriz diagonal com as componentes cartesianas nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Na primeira ordem de fechamento, todas as informações sobre a complexidade turbulenta estão contidas na difusividade turbulenta.

A equação (1) é considerada válida no domínio delimitado por  $0 < x < L_x$ ,  $0 < y < L_y$  e  $0 < z < z_i$  e sujeito às seguintes condições (contorno, inicial e fonte):

$$K \nabla \bar{c}|_{(0,0,0)} = K \nabla \bar{c}|_{(L_x, L_y, z_i)} = 0 \quad \text{para } t > 0 \quad (2)$$

$$\bar{c}(x, y, z, 0) = 0 \quad \text{em } t = 0 \quad (3)$$

$$\bar{u} \bar{c}(0, y, z, t) = Q \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) \delta(z - H_s) \quad \text{em } x = 0 \quad (4)$$

onde  $Q$  é a taxa de emissão (em unidades de  $g/s$ ),  $z_i$  é a altura da CLP (em unidades de  $m$ ),  $H_s$  é a altura da fonte (em unidades de  $m$ ),  $L_x$  e  $L_y$  são os limites horizontais do domínio (em unidades de  $m$ ) e  $\delta(x)$  representa a função delta de Dirac. O problema (1) já foi resolvido em Buske et. al. (2012) através do método 3D-GILTT (*Three-dimensional Generalized Integral*

*Laplace Transform Technique*) aplicando o método de Transformada de Laplace, o método 3D-GILTT é aplicado em problemas de dispersão de poluentes na atmosfera, onde inclui os problemas que consideram o coeficiente de dispersão dependente do tempo.

Neste artigo, é assumido inicialmente, sem perda de generalidade, que o transporte do poluente é realizado pela componente longitudinal da velocidade média do vento ( $U_1 \neq 0, U_2 = 0, U_3 = 0$ ), o fluxo turbulento é não homogêneo apenas em relação à vertical  $\partial/\partial x_1 = 0, \partial/\partial x_2 = 0, \partial/\partial x_3 \neq 0$ , e o tensor de difusividade turbulenta é diagonal ( $K_{ij} = 0$  se  $i \neq j$ ), obtendo assim o seguinte problema bidimensional:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \quad (5)$$

O problema (5) é resolvido pela transformada de Laplace e pelo método de GILTT. Aplicando a transformada de Laplace na variável temporal, obtém-se um problema estacionário, com solução conhecida e encontrada pelo método GILTT. Basicamente, a solução do problema proposto pelo método GILTT se dá nas seguintes etapas: Na etapa inicial a concentração de poluentes é expandida em série, em termos de um conjunto de funções ortogonais, obtidas da solução de um problema auxiliar de Sturm-Liouville. Substituindo esta expansão na equação de advecção-difusão estacionária, e integrando em todo o domínio, resulta em um sistema de EDO's (equações diferenciais ordinárias), chamado de problema transformado. Tal problema já foi resolvido pela técnica de transformada de Laplace e diagonalização. Detalhes no trabalho de Moreira et. al. (2009).

O domínio horizontal foi configurado com 2x2 km e o domínio vertical igual à altura da CLE. Os parâmetros micrometeorológicos  $z_i = 1350m$ ,  $w_* = 2.3 ms^{-1}$ ,  $L = 4.8m$ , e  $u_* = 0.26 ms^{-1}$  foram considerados para gerar os perfis de difusividade turbulenta (NIEUWSTADT et. al., 1986). A altura da CLP é calculada de acordo com a expressão  $h = 70\sqrt{t}$ , obtida a partir de medições experimentais realizados por Anfossi et. al. (1974), onde  $h$  é dado em metros e  $t$  em horas. Durante a simulação, os novos perfis de coeficientes de difusão e os novos valores de altura de CLE são fornecidos de acordo com a sequência apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1** - Evolução da altura da CLE de acordo com a expressão  $h = 70\sqrt{t}$ .

t(s)	900	1800	2700	3600	4500
h(m)	35	50	60	70	80

Fonte: Elaborada pelos autores.

## 2 Parametrização do tempo da transição do pôr do sol

Nos modelos de difusão atmosféricas a escolha correta da parametrização turbulenta desempenha um papel chave para calcular a concentração de contaminantes na CLP. Portanto, a precisão de cada modelo para simular corretamente o campo de concentração de contaminantes é uma função direta dos parâmetros turbulentos que estão relacionados às propriedades dinâmicas e termodinâmicas da CLP. Como consequência, os coeficientes de difusão são propriedades do fluxo turbulento e são descritos em termos de características físicas e magnitude da difusão em uma CLP (VENKATRAM et. al., 2001). Nesta seção serão apresentadas uma formulação para a parametrização da turbulência na CLE e na camada pré-residual. Estas parametrizações serão aplicadas nos modelos de partículas Eulerianos para realizar as simulações de poluentes durante o período do pôr do sol.

### 2.1 Parametrização da turbulência na camada limite estável

A dispersão da turbulência é gerada junto a superfície através de processos mecânicos que estão relacionados com o cisalhamento do vento. Em uma CLP estável existe uma relação entre a turbulência gerada pelo cisalhamento do vento e pelos efeitos de estratificação em uma camada estável. Portanto, nesta descrição da dispersão dos poluentes no período de transição dia-noite, uma camada superficial estável é considerada, na qual uma turbulência contínua e um fluxo de calor turbulento negativo coexistem (NIEUWSTADT, 1984). As seguintes relações para os coeficientes de difusão longitudinal, lateral e vertical, derivadas por Degrazia et. al. (2000), representam a difusão turbulenta dominadas por cisalhamento em uma CLP estável:

$$K_i = C_i \frac{(1-z/h)^{3/4} u_*}{1+3,7 \left( \frac{z}{L(z-z/h)^{5/4}} \right)} \quad (6)$$

onde ( $i = uvw$ ), em que  $C_x = 4,94$ ,  $C_y = 1,04$  e  $C_z = 0,41$ ,  $L$  é o comprimento de Obukhov,  $u_*$  é a velocidade de fricção da camada de superfície e  $h$  é a altura da camada estável. As magnitudes de  $C_i$  indicam que o movimento vertical é fortemente limitado pela estratificação na CLP noturna.

### 3.2 Parametrização da turbulência na camada pré-residual

Recentemente, um método geral para derivar os coeficientes de difusão turbulentos em uma CLC em decaimento foi proposto por Goulart et. al. (2007). O método baseia-se em um modelo para a densidade de energia de uma equação dinâmica 3D e a teoria de difusão

estatística de Taylor. Por conseguinte, é obtida uma solução analítica da equação em termos de um espectro inicial 3D, a qual se descreve o espectro da turbulência observada na CLC. Além disso, como consequência da decomposição da turbulência não isotrópica, este espectro é calculado a partir do espectro 1D, através da utilização de uma metodologia desenvolvida por Kristensen et. al. (1989). Na obtenção dos coeficientes de difusão longitudinal e lateral, o campo turbulento é considerado isotrópico. Já para o coeficiente de difusão vertical, a turbulência é considerada não-isotrópica. A seguinte relação algébrica proposta por Goulart et. al. (2007) representa um ajuste para as difusividades convectivas em decaimento:

$$\frac{K_x}{z_i w_*} = \frac{0,069}{\sqrt{1+t_*^{1,44}}} \quad (7)$$

$$\frac{K_y}{z_i w_*} = \frac{0,079}{\sqrt{1+t_*^{1,44}}} \quad (8)$$

$$\frac{K_z}{z_i w_*} = \frac{0,079}{\sqrt{1+2t_*^{1,7}}} \quad (9)$$

onde  $z_i$  é a altura da camada de mistura ( $m$ ) e  $t_* = tw_*/z_i$ ,  $w_*$  representa a velocidade convectiva ( $m/s$ ) e  $t$  é o tempo ( $s$ ).

### 3 Resultados

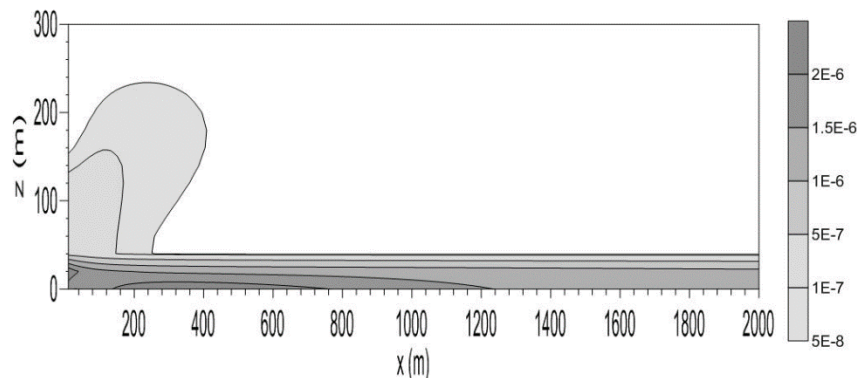
O objetivo desta seção é discutir os resultados das simulações da dispersão de poluentes na camada pré-residual e na camada limite estável (CLE). São apresentados resultados da concentração de contaminantes integrada perpendicular à direção preferencial do vento ( $C_y$ ), emitidos a partir de uma fonte pontual contínua na altura de 60m.

As simulações iniciam no momento do pôr do sol quando o fluxo de calor na superfície diminui progressivamente e uma CLE desenvolve-se perto da superfície. Os resultados das simulações são gerados pelo modelo analítico Euleriano (Eq. 5), empregando perfis de coeficientes de difusão turbulenta para a CLE, sugeridos por Degrazia et. Al. (2000), Eq. (6), e perfis de coeficientes de difusão turbulenta para a camada pré-residual, derivados por Goulart et. al. (2007) (dadas nas Eqs. (7), (8) e (9)).

A Fig. 1 mostra o efeito da dispersão para o tempo inicial de  $t=900s$  e altura da camada estável de 35m. Analisando o padrão de difusão associado a esta figura, pode-se notar que os contaminantes liberados na camada pré-residual sofrem uma forte ação de mistura ocasionada pela turbulência convectiva em decaimento. A intensidade do transporte associado à turbulência é responsável pela entrada de contaminantes para o interior da CLE até alcançar a superfície. O

efeito da dispersão na camada pré-residual sobre a pluma age no sentido de transportar os contaminantes para baixo em direção ao topo da CLE e, na sequência, é capturado por este novo ambiente com diferentes propriedades de difusão. Em seguida, a pluma de contaminantes se dispersa sob a ação da turbulência estável dominada por cisalhamento no interior da CLE. A turbulência de origem mecânica é gerada pelo cisalhamento do vento na superfície e, conseqüentemente, os turbilhões contendo energia estão localizados nas proximidades da superfície. Para uma turbulência contínua estável, a variância da velocidade vertical turbulenta diminui com a altura e esta assimetria de variância (turbulência vertical não homogênea) induz a uma aceleração que transporta os contaminantes em direção à superfície, onde o cisalhamento do vento é dominante. Este transporte para baixo, associada à turbulência mecânica, é particularmente dominante na CLE, que apresenta pouca profundidade. Observa-se, ainda, que o padrão de dispersão da pluma gerado pelo modelo Euleriano, mostrando forte mistura turbulenta na camada pré-residual e o transporte de contaminantes para dentro da CLE, assemelha-se ao padrão de dispersão gerado pelo modelo de partículas Lagrangeano, presente na literatura.

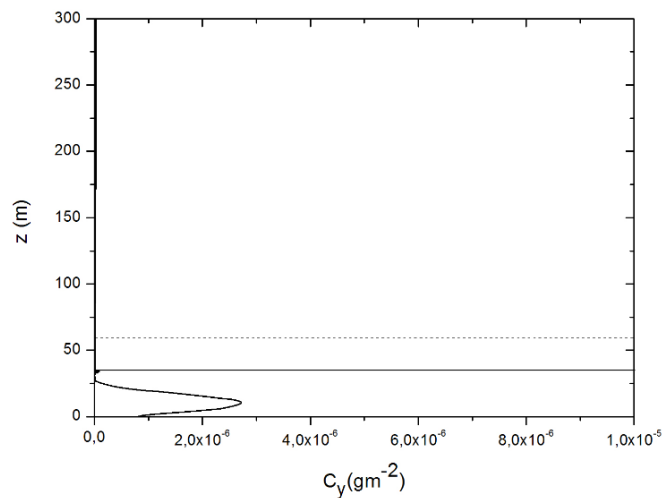
**Figura 1** - Campo de concentração integrada (plano x-z) para emissão na altura de 60m e altura da camada limite estável de 35 m



Fonte: Elaborada pelos autores.

O perfil de concentração integrada ( $C_y$ ) apresentado na Fig. 2 evidencia o movimento da pluma de contaminantes em direção à superfície. A partir desta figura pode ser visto que, na distância de 1000 m a partir da fonte, existe um máximo de  $C_y$  dentro da CLE, o que significa uma considerável entrada de contaminantes para dentro desta camada. O modelo analítico Euleriano gera um perfil com configuração semelhante ao modelo Lagrangeano, mas com valores menores de  $C_y$ . Além disso, o máximo de concentração localiza-se mais próximo da superfície.

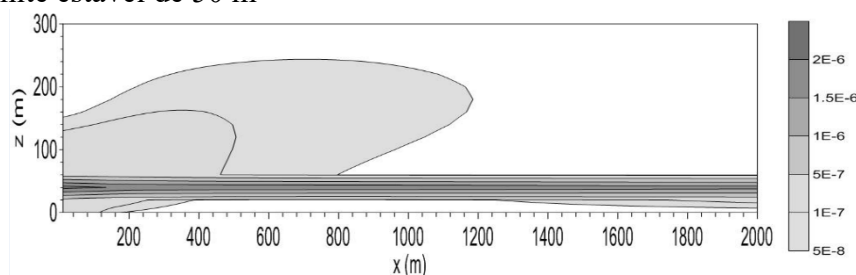
**Figura 2** - Perfil de concentração na distância  $x = 1000$  m para altura da fonte de 60 m e altura da CLE de 35m. A linha tracejada indica a altura da fonte enquanto a linha contínua indica a altura da CLE.



Fonte: Elaborada pelos autores.

As Figs. 3 e 4 apresentam os resultados da simulação para os tempos  $t=1800$ s e  $t=2700$ s, e alturas da camada estável de 50m e 60m, respectivamente. Estas figuras mostram uma redução notável da concentração de contaminantes na superfície devido à evolução da altura da CLE e a perda da capacidade de difusão dos turbilhões contendo energia convectiva dentro da camada pré-residual; a perda da capacidade de difusão contribui para reduzir a entrada de contaminantes na superfície. O aprofundamento da CLE tende a engolfar a região da CR, reduzindo o processo de dispersão gerado pelos turbilhões convectivos em decaimento. Esse aumento da altura da CLE faz com que os contaminantes passem a ser emitidos em um ambiente de turbulência mecânica, gerado pelo atrito do vento na superfície. É possível observar na Fig. 3 uma configuração na qual o máximo de concentração está cada vez mais no interior da CLE. Analisando a Fig. 4, a altura da CLE cobre a fonte de emissão e, conseqüentemente, os contaminantes são liberados no limite entre a camada pré-residual e a CLE. Dentro da CLE, os contaminantes podem percorrer longas distâncias sem tocar a superfície e, como resultado, a concentração no solo é reduzida.

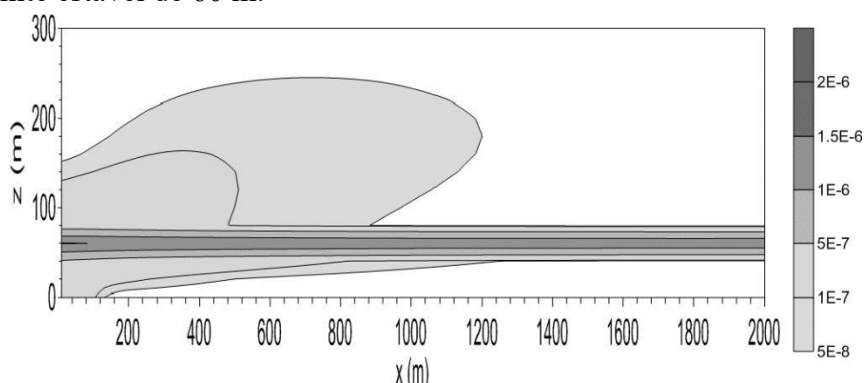
**Figura 3** - Campo de concentração integrada (plano x-z) para emissão na altura de 60m e altura da camada limite estável de 50 m



Fonte: Elaborada pelos autores.



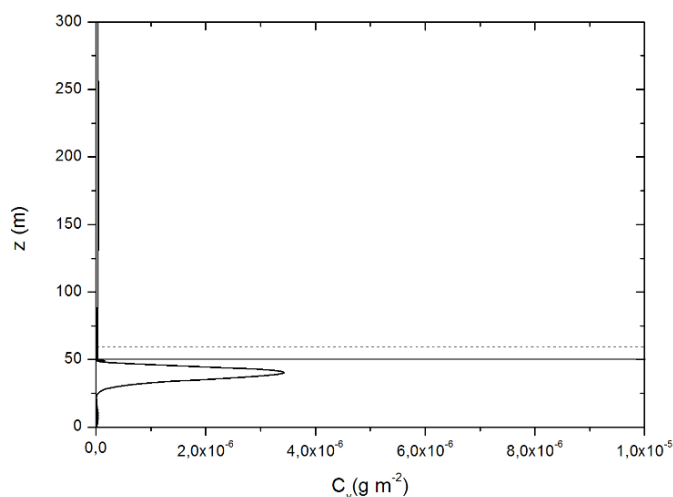
**Figura 4** - Campo de concentração integrada (plano x-z) para emissão na altura de 60m e altura da camada limite estável de 60 m.



Fonte: Elaborada pelos autores.

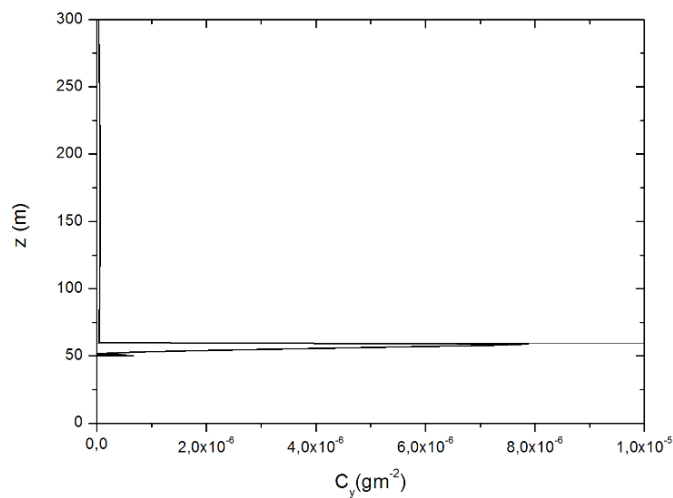
Estes comportamentos do padrão de dispersão também podem ser verificados nas Figs. 5 e 6, que apresentam os perfis de concentração  $C_y$  para as alturas de CLE de 50m e 60m, respectivamente. Quando a altura da CLE é 50m observa-se que, para a distância de 1000m a partir da fonte de emissão, o máximo de concentração ocorre em aproximadamente 40m de altura, evidenciando que existe entrada de contaminantes no interior da CLE e o transporte de contaminantes para a superfície. Já para a altura da CLE de 60 m, o máximo de concentração desloca-se um pouco mais para cima, ocorrendo uma diminuição significativa da concentração na superfície.

**Figura 5** - Perfil de concentração na distância  $x = 1000$  m para altura da fonte de 60 m e altura da CLE de 50m. A linha tracejada indica a altura da fonte enquanto a linha contínua indica a altura da CLE.



Fonte: Elaborada pelos autores.

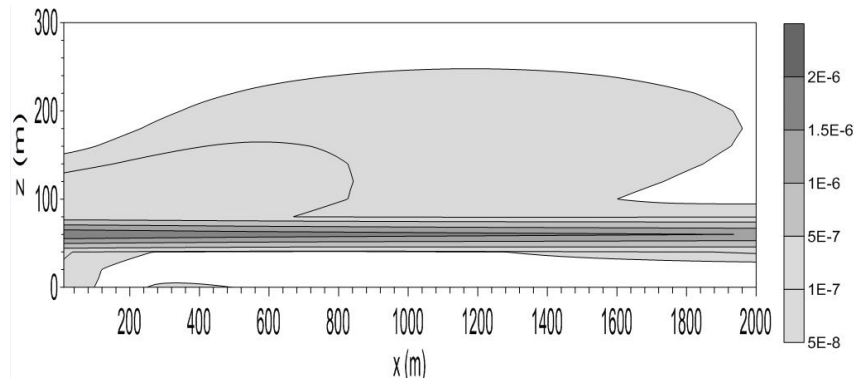
**Figura 6** - Perfil de concentração na distância  $x = 1000$  m para altura da fonte de 60 m e altura da CLE de 60m. A linha tracejada indica a altura da fonte enquanto a linha contínua indica a altura da CLE



Fonte: Elaborada pelos autores.

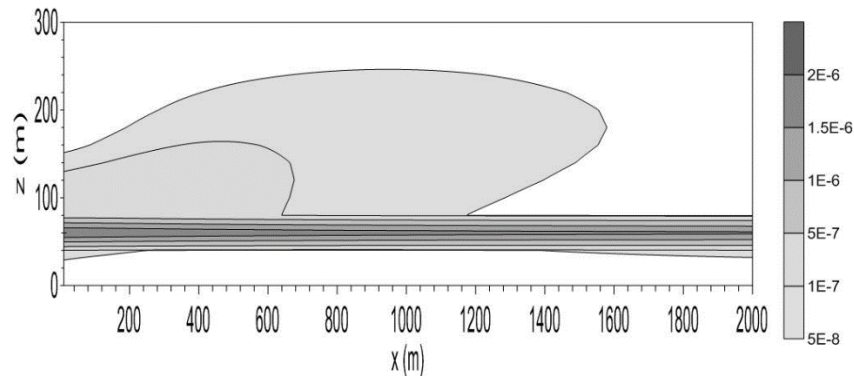
Na fase final do período do pôr do sol, a altura da CLE ultrapassa a altura da fonte de emissão e, portanto, a dispersão ocorre totalmente no ambiente estável. Neste ambiente, caracterizado pela atuação de pequenos turbilhões mecânicos, a baixa amplitude dos coeficientes de difusão gera pouca difusão tanto na direção horizontal quanto na direção vertical. Estas condições produzem uma pluma de contaminantes no formato *fanning*, frequentemente observada na camada limite estável, que sofre um transporte horizontal a grandes distâncias, por ação do vento médio. Este formato de pluma ocorre normalmente durante a noite, onde condições de vento fraco e inversão de temperatura na superfície são frequentemente observadas. Este padrão de dispersão é reproduzido nas Figs. 7 e 8, que mostram o campo de concentração para a evolução final com tempos de  $t=3600$ s e  $t=4500$ s, respectivamente. Para estes tempos de evolução, os turbilhões convectivos em decaimento ainda têm energia suficiente para dispersar a pluma dentro da camada pré-residual quando a altura da CLE for menor do que a altura da fonte. Dentro da CLE, a pluma de contaminantes viaja a uma longa distância, com máximo de concentração no nível da fonte de emissão. Nesse ambiente, a baixa magnitude dos coeficientes de difusão gera pouca difusão na direção vertical, impossibilitando o transporte de contaminantes para a superfície. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Carvalho et. al. (2010), na abordagem numérica, utilizando um modelo de partículas Lagrangeano.

**Figura 7** - Campo de concentração integrada (plano x-z) para emissão na altura de 60m e altura da camada limite estável de 70 m



Fonte: Elaborada pelos autores.

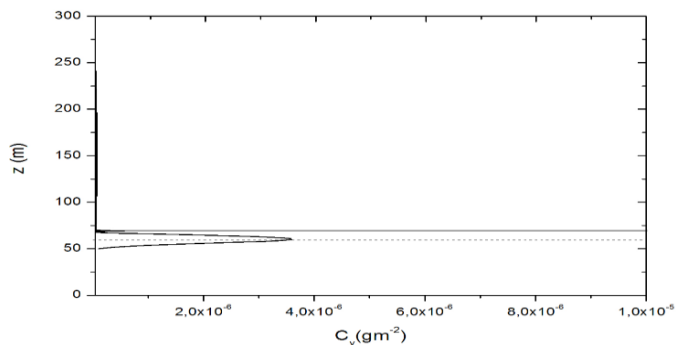
**Figura 8** - Campo de concentração integrada (plano x-z) para emissão na altura de 60m e altura da camada limite estável de 80 m.



Fonte: Elaborada pelos autores.

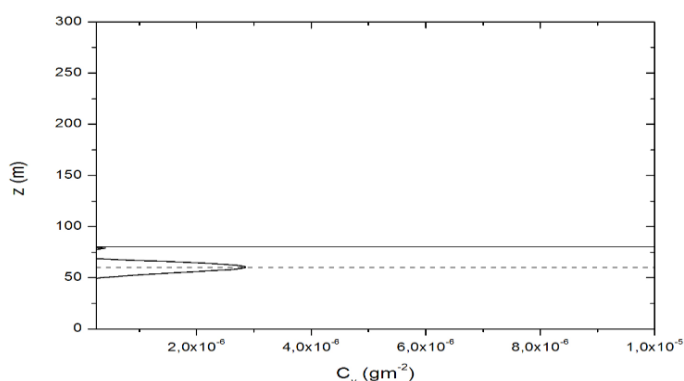
As Figs. 9 e 10 mostram os perfis de concentração  $C_y$  para as alturas de CLE 70m e 80m, respectivamente, a uma distância de 1000m a partir da fonte. Os perfis confirmam o comportamento dos campos de concentração, evidenciando o formato *fanning* da pluma de contaminantes devido à baixa magnitude dos coeficientes de difusão. Este padrão é o mesmo apresentado pelo modelo Lagrangeano, porém com valores menores de  $C_y$ .

**Figura 9** - Perfil de concentração na distância  $x = 1000$  m para altura da fonte de 60 m e altura da CLE de 70m. A linha tracejada indica a altura da fonte enquanto a linha contínua indica a altura da CLE



Fonte: Elaborada pelos autores.

**Figura 10** - Perfil de concentração na distância  $x = 1000$  m para altura da fonte de 60 m e altura da CLE de 80m. A linha tracejada indica a altura da fonte enquanto a linha contínua indica a altura da CLE



Fonte: Elaborada pelos autores.

#### 4 Conclusão

Neste estudo, foi utilizado um modelo Euleriano analítico para simular a concentração de poluentes liberados a partir da fonte pontual contínua durante o período de transição do pôr do sol. A análise aplica-se ao modelo de dispersão parametrizado por coeficientes de difusão convectivos estáveis e em decomposição, que representa a mistura turbulenta na CLE e na camada pré-residual. As simulações de concentração são calculadas considerando diferentes momentos no processo de transição dia-noite. As simulações analisadas no campo de concentração de vento cruzado de contaminantes e dos perfis dessas concentrações são lançadas a partir de uma fonte pontual contínua a uma altura de 60m.

As simulações mostraram que, durante os tempos de evolução inicial durante a transição do sol, a difusão turbulenta gerada pelo decaimento convectivo na CR causou uma transferência eficaz de contaminantes para o interior da CLE. Durante a fase inicial, em que a CLE apresenta uma pequena profundidade, a combinação entre residual convectivo e turbilhões estáveis atuam de forma eficiente para o transporte dos poluentes em direção à superfície, aumentando a concentração no solo. Para a fase final do período de transição a altura da CLE chegou a uma altura de fonte pontual e a dispersão ocorreu em um ambiente estável. Esta condição gera uma pluma de forma *fanning*, que se caracteriza por uma grande disseminação na horizontal e com pouca propagação em relação à vertical. Os resultados mostram que em uma pluma de longa distância, o valor máximo da concentração permanece no mesmo nível da fonte de emissão. Como consequência desta falta de mistura turbulenta eficaz, os contaminantes não chegam à superfície.

Os resultados apresentados neste trabalho mostram similaridade com os relatados pela literatura, onde a ação da forte mistura gerada pelo decaimento dos turbilhões contendo energias convectivas na camada pré-residual provoca uma entrada eficaz de poluentes no interior da CLE recentemente criado.

Agradecimento: Os autores agradecem o apoio financeiro concebido pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

## 6 Referências

- ANFOSSI, D.; BACCI, P.; LONGHETTO, A. An application of lidar technique to the study of nocturnal radiation inversion. **Atmospheric Environment**, v. 8, p. 537–541, 1974.
- ANFOSSI, D.; DEGRAZIA, G. A.; GOULART, A. G. Atmospheric turbulence decay during the solar total eclipse of 11 august 1999. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 111, p. 301–311., 2004.
- BEAR, R.J.; EDWARDS, J. M.; LAPWORTH, A. J. Simulation of the observed evening transition and nocturnal boundary layer: Large-eddy modeling. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, p. 81–99, 2006.
- BLACKADAR, A. K. **Turbulence and diffusion in the atmosphere**: lectures in Environmental Sciences. Springer-Verlag, 1997.
- BUSKE, D.; VILHENA, M.T.; BODMANN, B.; TIRABASSI, T. **Analytical Model for Air Pollution in the Atmospheric Boundary Layer**, Air Pollution, v. 1, p. 39-58.
- 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., 2010.
- CAUGHEY, S.J.; KAIMAL, J.C. Vertical heat flux in the convective boundary layer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 103, p. 811–815, 1977.
- DEGRAZIA, G.A.; ANFOSSI, D.; CARVALHO, J.C.; MANGIA, C.; TIRABASSI, T.; VELHO, H.F.C. Turbulence parameterisation for pbl dispersion models in all stability conditions. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 3575–3583, 2000.
- GOULART, A.G.; DEGRAZIA, G.A.; RIZZA, U.; ANFOSSI, D. A theoretical model for the study of the convective turbulence decay and comparison with les data. **American Meteorological Society**, v. 107, p. 143–155, 2003.
- GOULART, A.G.; VILHENA, M.; DEGRAZIA, G.; FLORES, D. Vertical, lateral and longitudinal eddy diffusivities for a decaying turbulence in the convective boundary layer. **Ecological Modelling**, v. 204, 2007.
- GRANT, A.L.M. An observational study of the evening transition boundary-layer. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 123, p. 657–677, 1997.

- KRISTENSEN, L.; LENSCHOW, D.; KIRKEGAARD, P.; COURTNEY, M. The spectral velocity tensor for homogeneous boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 47, p. 149–193, 1989.
- MOREIRA, D.M.; VILHENA, M.T.; BUSKE, D.; TIRABASSI, T. The state-of-art of the gillt method to simulate pollutant dispersion in the atmosphere. **Atmospheric Research**, v. 92, p. 1–17, 2009.
- NADEAU, D.F.; PARDYJAK, E.R.; HIGGINS, C.W.; FERNANDO, H.J.S.; PARLANGE, M.B. A simple model for the afternoon and early evening decay of convective turbulence over different land surfaces. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 141, p. 301–324, 2011.
- NIEUWSTADT, F.T.M. The turbulent structure of the stable nocturnal boundary layer. **Atmospheric Sciences**, v. 41, p. 2202–2216, 1984.
- NIEUWSTADT, F.T.M.; BROST, R.A. The decay of convective turbulence. **Atmospheric Sciences**, v. 43, p. 532–546, 1986.
- NILSSON, E.; LOTHON, M.; LOHOU, F.; PARDYJAK, E.; HARTOGENSIS, O.; DARBIEU, C. Turbuence kinetic energy budget during the afternoon transition. **Atmospheric Chemistry Physics**, v.12, p. 2119-2124, 1978.
- PINO, D.; JONKER, H.J.J.; ARELLANO, J.V.G.; DOSIO, A. Role of shear and the inversion strength during sunset turbulence over land: Characteristic length scales. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 121, p. 537–556, 2006.
- SORBJAN, Z. Decay of convective revisited. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 82, p. 501–515, 1997.
- SORBJAN, Z. Numerical study of daily transitions in the atmospheric boundary layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 123, p. 365–383, 2007.
- VENKATRAM, A.; BRODE, R.; CIMORELLI, A.; LEE, R. A complex terrain dispersion model for regulatory applications. **Atmospheric Environment**, v.35/24, p.4211–4221, 2001.