

Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics

Dispersão de Poluentes Durante o Período de Transição Dia-Noite Através de uma Descrição Analítica

Jéssica Kanopp dos Reis¹

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática (PPGMMat), UFPel, Pelotas, RS

Jonas da Costa Carvalho²

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática (PPGMMat), UFPel, Pelotas, RS

Daniela Buske³

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática (PPGMMat), UFPel, Pelotas, RS

Régis Sperotto de Quadros⁴

Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática (PPGMMat), UFPel, Pelotas, RS

Resumo. Neste estudo, um modelo analítico Euleriano foi 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-se ao modelo de dispersão parametrizado por coeficientes de difusão da camada limite estável e camada residual. As simulações da concentração foram realizadas considerando diferentes tempos no processo de transição durante o pôr do sol. Os resultados apresentados neste artigo 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.

Palavras-chave. Camada Limite Planetária, Camada Limite Estável, Camada Residual, Dispersão de Poluentes, Modelagem Euleriana, Solução Analítica.

1 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 [15]. 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.

¹jessicareis15@hotmail.com

²jonas.carvalho@ufpel.edu.br

³daniela.buske@ufpel.edu.br, autor-apresentador

⁴regis.quadros@ufpel.edu.br

O decaimento da turbulência na CR foi estudado por [8], usando a equação dinâmica para o espectro de densidade de energia, e por [3, 14, 15], empregando modelos LES (*Large-Eddy Simulation*), e por [5], utilizando um modelo de deslocamento aleatório. Os resultados experimentais foram avaliados por [1, 2, 6, 10, 11, 12].

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 CR, 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 CR.

Neste artigo é investigado o processo de dispersão turbulenta ocorrendo durante o período do pôr do sol, focando os padrões característicos da dispersão turbulenta de poluentes liberados de uma fonte pontual contínua em uma CLP caracterizada pelo decaimento convectivo. Esta análise considera uma solução analítica da equação de advecção-difusão, na qual os efeitos turbulentos são representados por coeficientes de difusão para a CLE, proposto por [8], e para o decaimento da turbulência na CLC, proposto por [9]. É 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 para modelar as validações, somente, em comparação com abordagens numéricas, onde, em geral, não é separado erros de modelo a partir de outros numéricos [4].

2 Parametrização do Tempo de Transição Dia-Noite

A dispersão turbulenta em uma CLE é gerada próxima à superfície por processo mecânico, que está relacionado ao cisalhamento do vento na superfície. Em uma CLE existe uma competição entre a turbulência gerada por cisalhamento do vento e o efeito da estratificação. Portanto, na descrição aqui apresentada, a CLE foi considerada com a coexistência de turbulência contínua e fluxo de calor negativo na superfície [14].

A seguinte relação para a difusividade turbulenta longitudinal, lateral e vertical, $K_i (i = u, v, w)$, derivada por [7], representa a difusão turbulenta em uma CLP dominada por cisalhamento:

$$K_i = C_i \frac{(1 - \frac{z}{h})^{\frac{3}{4}} (u_*)}{1 + 3.7 \left(\frac{z}{L(z - \frac{z}{h})^{\frac{5}{4}}} \right)}, \quad (1)$$

na qual $C_x = 4.94, C_y = 1.04$ e $C_z = 0.41$, L é o comprimento de Obukhov, u_* é a velocidade de atrito da camada de superfície e h é a altura da CLE.

Recentemente, um método geral para derivar difusividades turbulentas em ambiente de turbulência convectiva em decaimento foi proposto por [9]. O método é baseado no espectro de energia 3D e na Teoria de Difusão Estatística de Taylor. A seguinte relação algébrica proposta por [9] representa um ajuste para as difusividades convectivas em decaimento:

$$\frac{K_x}{w_* z_i} = \frac{0.069}{\sqrt{1+t_*^{1.44}}}, \quad \frac{K_y}{w_* z_i} = \frac{0.079}{\sqrt{1+t_*^{1.44}}}, \quad \frac{K_z}{w_* z_i} = \frac{0.079}{\sqrt{1+2t_*^{1.7}}}, \quad (2)$$

onde z_i é a altura da camada de mistura e $t_* = \frac{tw_*}{z_i}$.

3 Modelo Euleriano

A equação de advecção-difusão da poluição do ar é uma representação da conservação de massa na atmosfera. Assumindo um fechamento Fickiano da turbulência, pode-se escrever a equação bidimensional transiente da seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right), \quad (3)$$

onde \bar{c} indica a concentração média de um contaminante passivo (em unidades de g/m^3), \bar{u} representa o vento médio (em unidades de m/s) na direção x e K_z (em unidades m^2/s) é a difusividade turbulenta na direção z . Na primeira ordem de fechamento, toda a informação sobre a complexidade turbulenta está contida na difusividade turbulenta.

A equação (3) está sujeita as condições de contorno de fluxo nulo no solo e no topo da CLP, $K_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = 0$. É considerado que a atmosfera está limpa no tempo inicial, $c(x, z, 0) = 0$. A condição de fonte é representada por $\bar{u}c(0, z, t) = Q\delta(z - H_s)$ onde Q é a taxa de emissão (em unidades de g/s), z_i a altura da CLP (em unidades de m), o H_s é a altura da fonte (em unidades de m) e δ representa a função delta de Dirac.

O problema (3) tem solução conhecida e é resolvida pela transformada de Laplace e pelo método GILTT [13]. Aplicando a transformada de Laplace na variável temporal, obtemos um problema estacionário, cuja solução é 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, chamado de problema transformado. Tal problema já foi resolvido pela técnica de transformada de Laplace e diagonalização.

4 Resultado da Simulação

Seguindo a metodologia proposta por [5], o objetivo é discutir os resultados da simulação da concentração derivadas do modelo Euleriano fornecida pela equação (3) utilizando os coeficientes de difusão dados pelas equações (1) e (2). Para o período de transição dia-noite são discutidas as características de dispersão dos poluentes liberados por uma fonte pontual contínua de $60m$. A simulação do campo de concentração integrado de poluentes é analisada.

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

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

Os parâmetros micrometeorológicos $z_i = 1350 \text{ m}$, $w_* = 2.3 \text{ m s}^{-1}$, $L = 4.8 \text{ m}$, $u_* = 0.26 \text{ m s}^{-1}$ [14] são considerados para gerar os perfis de difusividade turbulenta durante a simulação. As simulações foram iniciadas no momento do pôr do sol quando o fluxo de calor de superfície decresce progressivamente e uma CLE se desenvolve perto do solo. Perfis dos coeficientes de difusão sugeridos por [7] (equação (1)) foram utilizadas para simular a dispersão turbulenta na superfície da CLE. Por outro lado, coeficientes de difusão derivados por [9] (equações (2)) foram utilizadas para simular o transporte turbulento elevado na CR. A altura da CLP foi calculada de acordo com a expressão obtida a partir de medições experimentais realizadas por [2]. Durante a simulação, os novos perfis de coeficientes de difusão e os novos valores de altura da CLE foram fornecidos para o modelo em intervalos de acordo com a Tabela 1.

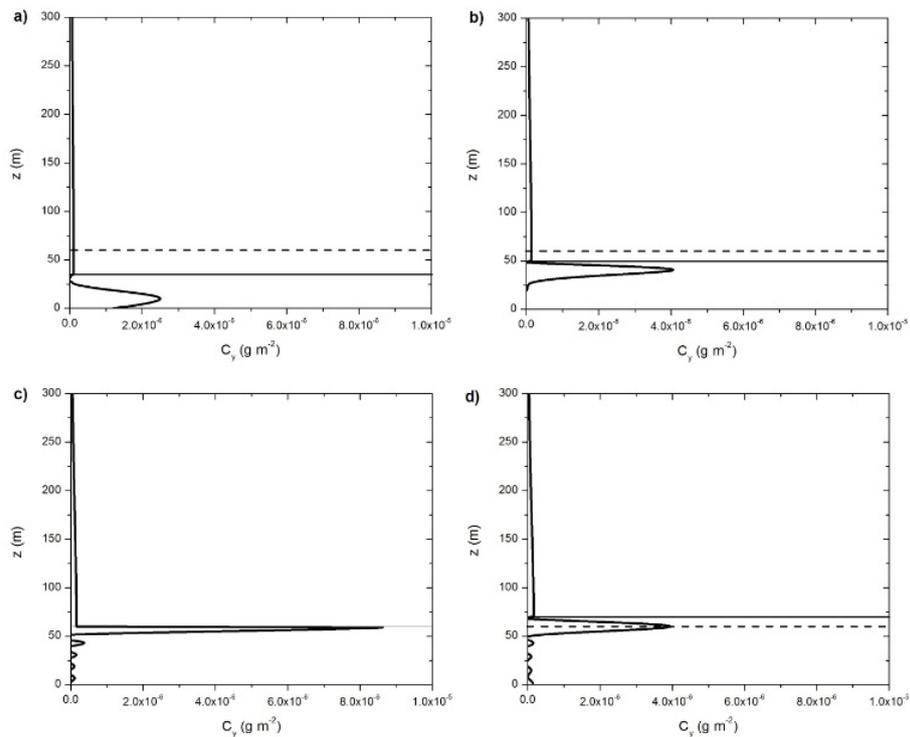


Figura 1: Perfil de concentração em $x = 1000 \text{ m}$. Fonte de 60 m de altura. A linha pontilhada indica a altura da fonte, enquanto a linha contínua indica a altura da CLE. a) altura da CLE de 35 m . b) altura da CLE de 50 m . c) altura da CLE de 60 m . d) altura da CLE de 70 m .

A Figura 1a mostra os efeitos de dispersão da turbulência convectiva em decomposição e o desempenho estável da turbulência contínua sobre os poluentes para um período de transição inicial, quando a altura da camada estável é de apenas 35 m ($t = 0.25 \text{ h}$). Ao analisar o padrão de difusão associado a esta figura, é possível perceber que os poluentes liberados a partir da fonte de emissão na CR sofrem uma ação de mistura causada pela decomposição dos turbilhões convectivos. Este nível de intensidade de dispersão associados à turbulência de composição inicial rápida garante a entrada de poluentes no interior do

CLE. A Figura 1a também mostra os poluentes penetrados no interior da CLE onde eles atingem o solo e começam a dispersar sob a ação dos turbilhões estáveis. Pode ser visto que, para uma distância de fonte de $1000m$ há uma altura máxima C_y de ordem de $20m$, o que significa uma considerável penetração dos poluentes em relação à altura da CLE.

A Figura 1b mostra os efeitos de dispersão da turbulência convectiva em decomposição e o desempenho estável da turbulência contínua sobre os poluentes para um tempo de transição inicial, quando a altura da camada estável é de cerca de $50m$ ($t = 0.5h$). O crescimento da CLE tende a engolfar a região da CR e, conseqüentemente, a fonte de emissões dos poluentes. Este aprofundamento da CLE reduz o processo de dispersão que é causada pelos turbilhões convectivos decedentes da ação dos poluentes na CR. Desta forma, a Figura 1b mostra um padrão de difusão no qual o nível do máximo de concentração tende a afundar-se lentamente na CLE. É possível observar que a altura máxima C_y ocorre aproximadamente em $40m$, obtendo-se uma penetração da ordem de $10m$ para a CLE. Ao contrário do que acontece quando a altura é de $35m$, os poluentes não chegam na superfície.

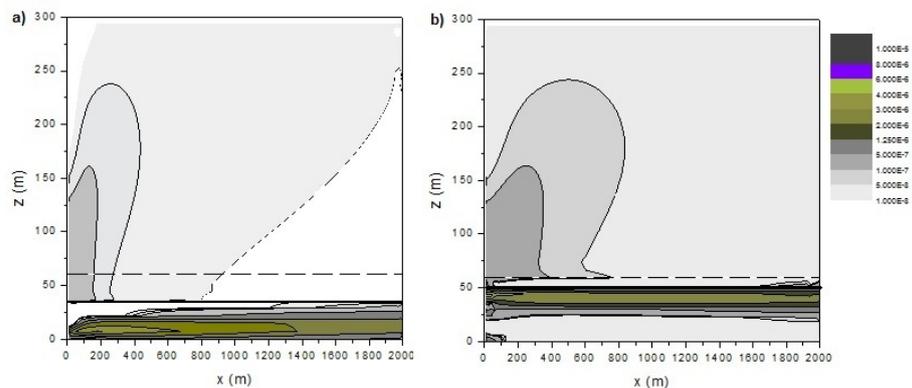


Figura 2: Isolines de concentração (plano $x-z$). A linha pontilhada indica a altura da fonte , enquanto a linha contínua indica a altura da CLE. A concentração é dada em gm^{-2} . Fonte de $60m$ de altura e a) altura da CLE de $35m$ e b) altura da CLE de $50m$.

A Figura 1c mostra os efeitos de dispersão da turbulência convectiva em decomposição e o desempenho estável da turbulência contínua sobre os poluentes para um tempo de transição intermediária, quando a altura da camada estável é de cerca de $60m$ ($t = 0.73h$). Pode-se analisar que para uma distância de $1000m$ da fonte, a altura máxima C_y ocorre entre $50m$ e $60m$, não havendo uma concentração significativa de poluentes na superfície.

A Figura 1d mostra os efeitos de dispersão da turbulência convectiva em decomposição e o desempenho estável da turbulência contínua sobre os poluentes para um tempo final de evolução, quando a altura da camada estável é de cerca de $70m$ ($t = 1h$). Nesta fase final do período de transição, a altura na CLE fica acima da fonte, que, conseqüentemente, ocorre a dispersão em um ambiente estável com turbulência estendida, sendo caracterizado por pequenos redemoinhos. Nesta situação, é possível observar que para longas distâncias há uma altura máxima elevada em C_y na fonte.

Na Figura 2a é possível observar que os poluentes liberados a partir da fonte de emissão

na CR sofre uma forte ação de mistura de decomposição dos grandes vórtices convectivos. Este nível de intensidade de dispersão associado à turbulência inicial na CR é o mecanismo responsável pela entrada de poluentes no interior da CLE no momento em que os poluentes atingem o solo na proximidade da fonte pontual contínua. A Figura 2b nos mostra um padrão de difusão no qual a altura máxima da concentração tende a afundar-se lentamente na CLE, havendo assim, a redução da concentração de poluentes na superfície.

5 Conclusões

Neste estudo, um modelo Euleriano analítico foi empregado para simular a concentração de poluentes liberados a partir de uma fonte de ponto contínuo durante o período de transição dia-noite. A análise aplica-se ao modelo de dispersão parametrizado pelos coeficientes de difusão convectivos estáveis e em decomposição, representando a mistura turbulenta na CLE e CR. As simulações de concentração foram calculadas considerando diferentes momentos do processo de transição durante o período do sol. Os resultados apresentados neste artigo mostram similaridade com aqueles relatados por [5], onde a forte ação de mistura provocada pelos redemoinhos contendo energia convectiva deteriorando na CR provoca uma entrada eficaz de poluentes para o interior da CLE recentemente estabelecida. Durante a fase inicial do período de transição, em que a CLE apresenta uma pequena profundidade, a combinação entre residual convectivo e os turbilhões estáveis atuam eficientemente para o transporte dos poluentes em direção à superfície do solo. Para as fases posteriores, a altura da profundidade da CLE atinge a altura da fonte pontual, de modo que a dispersão ocorre numa grande extensão vertical que é dominada por uma turbulência estável. A falta de uma mistura turbulenta eficaz, atuando sobre a extensão vertical da CLE, impede que os poluentes cheguem à superfície. A presente contribuição foi focada em uma descrição analítica da dispersão de poluentes que ocorrem em torno da transição à noite, que permite simular o transporte turbulento em um processo computacionalmente eficiente.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela CAPES.

Referências

- [1] O. C. Acevedo and D. R. Fitzjarrald. The early evening surface layer transition: temporal and spatial variability, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58: 2650–2667, 2001.
- [2] D. Anfossi, G. A. Degrazia and A. G. Goulart. Atmospheric turbulence decay during the solar total eclipse of 11 August 1999, *Boundary-Layer Meteorology*, 111: 301–311, 2004.

- [3] R. J. Bear, J. M. Edwards and A. J. Lapworth. Simulation of the observed evening transition and nocturnal boundary layer: Large-eddy modeling, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 132: 81–99, 2006.
- [4] D. Buske, M. T. Vilhena, T. Tirabassi and B. Bodmann. Air Pollution Steady-State Advection-Diffusion Equation: The General Three-Dimensional Solution, *Journal of Environmental Protection*, 3: 1124–1134, 2012.
- [5] J. C. Carvalho, G. A. Degrazia, D. Anfossi, A. G. Goulart, G. C. Cuchiara and L. Mortarini. Simulating characteristic patterns of the dispersion during sunset PBL. In *Atmospheric Research*, 98: 274–284, 2010.
- [6] S. J. Caughey and J. C. Kaimal. Vertical heat flux in the convective boundary layer, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 103: 811–815, 1977.
- [7] G. A. Degrazia, D. Anfossi, J. C. Carvalho, C. Mangia and T. Tirabassi. Turbulence parameterization for PBL dispersion models in all stability conditions, *Atmospheric Environment*, 34: 3575–3583, 2000.
- [8] A. G. Goulart, G. A. Degrazia, U. Rizza and D. Anfossi. A theoretical model for the study of the convective turbulence decay and comparison with LES data, *Boundary-Layer Meteorology*, 107: 143–155, 2003.
- [9] A. G. Goulart, G. A. Degrazia, M. T. Vilhena and D. Flores. Vertical, lateral and longitudinal eddy diffusivities for a decaying turbulence in the convective boundary layer, *Ecological Modelling*, 204: 516–522, 2007.
- [10] A. L. M. Grant. An observational study of the evening transition boundary-layer, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123: 657–677, 1997.
- [11] A. W. Grimsdell and W. M. Angevine. Observations of the afternoon transition of the convective boundary layer, *Journal of Applied Meteorology*, 41: 3–11, 2002.
- [12] A. J. Lapworth. Factors determining the decrease in surface wind speed following evening transition, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 129: 1945–1968, 2003.
- [13] D. M. Moreira, M. T. Vilhena, D. Buske and T. Tirabassi. The state-of-art of the GILTT method to simulate pollutant dispersion in the atmosphere, *Atmospheric Research*, 92: 1–17, 2009.
- [14] F. T. M. Nieuwstadt and R. A. Brost. The decay of convective turbulence, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43: 532–546, 1986.
- [15] D. Pino, H. J. J. Jonker, A. J. Vilà-Guerau and A. Dosio. Role of shear and the inversion strength during sunset turbulence over land: Characteristic length scales, *Boundary-Layer Meteorology*, 121: 537–556, 2006.