

Universidade de São Paulo  
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas  
Departamento de Ciências Atmosféricas  
Grupo de Micrometeorologia

**Investigação da camada limite  
planetária noturna na região  
metropolitana de São Paulo  
utilizando o modelo LES**

ALUNO: EDUARDO WILDE BÁRBARO

ORIENTADOR: PROF. DR. AMAURI PEREIRA DE OLIVEIRA

BOLSA FAPESP N° 2008/07532-0

Vigência: 2009/2011

Relatório para o departamento de ciências atmosféricas IAG/USP

Período: Março de 2009 a Setembro de 2009

Outubro de 2009

## Resumo do projeto

O projeto tem como objetivo investigar a evolução temporal e espacial da camada limite planetária na cidade de São Paulo durante o período noturno, utilizando o modelo LES (*Large Eddy Simulation*). Serão realizadas simulações numéricas dos campos tridimensionais de vento, temperatura potencial, umidade específica e concentração de monóxido de carbono. As simulações numéricas serão preparadas para representar a evolução da camada limite sobre uma superfície de uma região urbana com topografia plana e ocupação do solo horizontalmente homogênea, com características similares a da região metropolitana da cidade de São Paulo. Para atingir este objetivo geral, pretende-se desenvolver e incorporar à versão atual do modelo LES um algoritmo de tratamento estatístico de dados para eliminação do pós-processamento dos dados gerados nas simulações da CLP urbana pelo modelo LES. Basicamente, as estatísticas geradas dizem respeito a todos os momentos estatísticos de primeira e segunda ordem para os campos médios de temperatura, umidade específica e velocidade. Todos os termos do balanço de energia também foram implementados. É importante frisar que todas as estatísticas foram desenvolvidas também para a escala de subgrade. Serão investigados os períodos diurno, onde as produções térmica e mecânica são importantes e noturno, quando a evolução vertical da camada limite planetária urbana é determinada pela produção mecânica de turbulência e o fluxo de calor sensível é negativo. Atenção especial será dada ao comportamento do monóxido de carbono no início do período noturno, quando os dados de superfície indicam a presença de um máximo relativo. Este projeto de mestrado faz parte do projeto “Estudo da camada limite planetária sobre superfícies com topografia complexa e ocupação do solo heterogênea” (Proc. CNPq No. 476807/2007-7), com vigência até 2009 e que visa investigar as propriedades da camada limite planetária sobre a região metropolitana da cidade de São Paulo.

---

# Índice

<b>Introdução</b>	<b>1</b>
A camada limite planetária . . . . .	1
Geração e manutenção da turbulência . . . . .	2
Modelagem da CLP . . . . .	3
<b>Metodologia</b>	<b>6</b>
O Código LES e os recursos computacionais . . . . .	6
Descrição dos parâmetros do modelo . . . . .	8
<b>Resultados</b>	<b>10</b>
Perfis verticais e temporais . . . . .	10
Propriedades do escoamento . . . . .	15
<b>Conclusão</b>	<b>17</b>
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>20</b>
<b>Outras atividades</b>	<b>21</b>
<b>Perspectivas</b>	<b>22</b>

---

# Introdução

Devido a grande complexidade dos processos turbulentos associados à camada limite planetária (CLP), modelos teóricos genéricos ou experimentos de campo tornam-se de difícil realização. Segundo [20], para desenvolver-se um modelo empírico seria necessária uma quantidade muito grande de dados sobre diferentes condições de larga escala. Estes dados, por sua vez, são de difícil obtenção, e.g. dados oceânicos. O modelo Large-eddy Simulation (LES) é uma ferramenta bem estabelecida para o estudo de fluxos turbulentos, [27]. Basicamente os modelos do tipo LES calculam explicitamente os grandes turbilhões e parametrizam os menores.

Este trabalho apresenta o objetivo de utilizar o modelo LES para caracterizar as propriedades da camada limite planetária (CLP), num primeiro estágio convectiva e posteriormente neutra e estável, sobre uma região urbana com topografia plana e ocupação do solo região horizontalmente homogênea com características similares a da região metropolitana da cidade de São Paulo. Serão realizadas simulações numéricas dos campos tridimensionais de vento, temperatura potencial, umidade específica e concentração de monóxido de carbono.

## A camada limite planetária

A CLP pode ser definida como a camada inferior da troposfera que está sobre influência direta da superfície e é caracterizada por turbilhões em um amplo intervalo de escalas temporais e espaciais. A complexidade dos processos envolvidos na evolução da atmosfera, principalmente os associados à descrição da turbulência na CLP, requer o uso de modelos matemáticos para determinar o transporte de poluentes na atmosfera. Na camada limite planetária (CLP), também chamada de camada limite atmosférica (CLA), os fluxos turbulentos de momento, calor ou massa são gerados por meio de movimentos turbulentos com escala característica de comprimento da ordem de grandeza da extensão vertical da camada limite ou menor. [8], [1], [24].

## Geração e manutenção da turbulência

Não é fácil identificar, muito menos definir turbulência tampouco seus efeitos. Os dois mecanismos mais evidentes de geração de turbulência são a produção térmica (B) e a produção mecânica (S). A equação da energia cinética turbulenta, 1, mostra estes dois mecanismos, além da dissipação (D) e o transporte de energia (T) de(para) outros locais do fluido. O processo de transferência espectral de ECT é denominado de cascata de energia, como observa-se no esquema da figura 1.

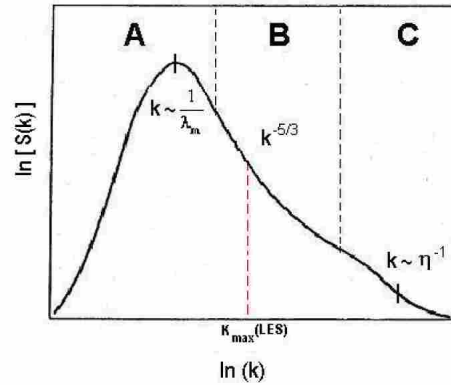


Figura 1: Esquema do espectro de energia na CLP; as três regiões representam (A) produção, (B) subintervalo inercial e (C) dissipação.  $k$  representa o número de onda,  $\lambda_m$  o comprimento de onda associado ao turbilhão com mais energia e  $\eta$  a microescala de Kolmogorov. O número de onda máximo resolvido pelo modelo LES é representado por  $k_{max}(LES)$ . Adaptado de [14].

$$\frac{\partial(ECT)}{\partial t} = \underbrace{-\overline{u''w''}\frac{\partial\bar{u}}{\partial z} - \overline{v''w''}\frac{\partial\bar{v}}{\partial z}}_S + \underbrace{\frac{g}{\theta}\overline{w''\theta''}}_B - \underbrace{\frac{\partial}{\partial z}\left(\overline{e''w''} + \frac{\overline{w''p''}}{\rho_0}\right)}_T - \underbrace{\epsilon}_D \quad (1)$$

Onde  $ECT$  e  $e$  podem ser calculados através da equação 2:

$$e = \frac{1}{2} \left( \overline{u''^2} + \overline{v''^2} + \overline{w''^2} \right) \quad ECT = \bar{e} \quad (2)$$

Onde:

$\overline{u''w''}$  é o fluxo vertical turbulento da componente zonal do vento;

$\overline{v''w''}$  é o fluxo vertical turbulento da componente meridional do vento;

$\overline{\theta''w''}$  é o fluxo vertical turbulento da temperatura;

$\overline{e''w''}$  é o fluxo vertical turbulento de energia cinética;

$\overline{w''p''}$  é o fluxo vertical turbulento da flutuação de pressão;

$\epsilon$  é o taxa de dissipação de energia, dada pela subgrade.

## Modelagem da CLP

Existem basicamente três tipos de métodos numéricos para o estudo da turbulência:

- Reynolds-Averaged Navier-Stokes - RANS
- Direct Numerical Simulation - DNS
- Large Eddy Simulation - LES

Os equações dos modelos RANS são médias temporais das equações de momento para o escoamento de um fluido. São utilizadas como soluções simplificadas de alguns processos turbulentos. Estas equações podem ser utilizadas como aproximações baseadas no conhecimento de propriedades da turbulência para fornecer soluções médias aproximadas das equações de Navier-Stokes, [4].

Uma *simulação numérica direta*, ou DNS, é uma simulação em que as equações de Navier-Stokes são numericamente resolvidas sem nenhum tipo de parametrização. Isto significa que todo o range de escalas temporal e espacial da turbulência precisa ser resolvido. Todas as escalas espaciais da turbulência precisam ser resolvidas na malha computacional, desde as escalas dissipativas, e.g. microescalas de Kolmogorov, até as maiores escalas associadas com movimentos com maior energia cinética associada, [9]. Apesar de extremamente eficiente, o processo torna-se impossível quando a malha torna-se razoavelmente grande, ou a quantidade de processos aumenta um pouco, [20].

O LES é uma técnica muito popular para simulação de fluxos turbulentos. Uma das implicações da teoria da similaridade de Kolmogorov, (1941), é o fato de os turbilhões

maiores serem dependentes da geometria, enquanto os de menor escalas apresentam características mais universais. Daí a vantagem dos modelos LES, visto que ele resolve as escalas maiores e parametriza somente as escalas menores, [27], [21]. Uma forma de determinar o transporte turbulento na CLP é o emprego destes modelos. No LES, as propriedades da CLP convectiva são simuladas com precisão suficiente para gerar um conjunto de dados das variáveis meteorológicas e da dispersão de poluentes. Para as escalas menores o LES utiliza um modelo de subgrade (SGS), [20],[21] [18], [6].

Os modelos tipo LES e RANS, são duas técnicas hoje muito empregadas, muitas vezes até em conjunto [3], [23], [4].

Como os recursos computacionais existentes atualmente, os modelos tipo LES atingiram uma resolução espacial bastante grande. Hoje em dia, simulações são realizadas com espaçamento da grade da ordem de 4 metros e número de pontos de grade da ordem de  $10^6$ , [2], [25], [10], [11]. Este fato, aliado ao melhor desempenho apresentado pelos modelos LES na simulação da turbulência atmosférica, credencia estes modelos como a melhor ferramenta disponível na atualidade para simular numericamente as propriedades da CLP.

A grande vantagem dos modelos LES é que, diferentemente dos modelos média de Reynolds, o problema de fechamento fica confinado a parte do espectro de turbulência localizada entre o subdomínio inercial e a região de dissipação molecular, [1], [20], [21]. Nesta região do espectro os turbilhões apresentam características mais universais, permitindo com isso o desenvolvimento de parametrizações com características mais gerais. Os modelos do tipo LES têm tido grande aceitação, visto que resolvem os turbilhões mais importantes explicitamente e parametrizam os turbilhões com menos energia, i.e. de subgrade, utilizando um modelo SGS com equacionamento empírico, [14], [20], [21], [18], [11].

O modelo LES parte de:

- Grandes turbilhões têm muita energia e são explicitamente calculados
- Pequenos turbilhões têm pouca energia e são parametrizados por um modelo SGS

Entretanto, como todo o modelo matemático, o LES apresenta algumas limitações, principalmente na CLS quando observam-se as limitações impostas pela grade. Outros

problemas seriam próximo às paredes, onde pequenos turbilhões não são bem resolvidos, regiões de alta estabilidade, pois os turbilhões apresentam-se intermitentes. Ainda, nuvens, radiação e química introduzem mais incertezas ao modelo.

O primeiro que aplicou o modelo LES em estudos meteorológicos, particularmente na dispersão de poluentes na CLP, foi Deardoff em 1972, [6]. Diversos outros estudos já foram realizados e demonstraram a habilidade do modelo LES em simular as características dos escoamentos turbulentos, principalmente os casos convectivos, [14], [21]. Segundo Moeng [20], Jiménez [10], Sullivan [27] e Mason [18] os modelos do tipo LES são os mais indicados para as simulações das propriedades da camada limite planetária.

Neste trabalho será utilizada uma versão paralelizada do LES, modificada por Moeng, [20] e Sullivan, [27]. Esta versão paralelizada foi implementada no cluster *R900 Intel 2-quad (8 nós) 12Gb de memória e 1.2 Tb de HD* e permite realizar simulações numéricas da CLP convectiva de maneira bastante eficiente.



---

# Metodologia

## O Código LES e os recursos computacionais

O modelo LES tem sido utilizado pelo Grupo de Micrometeorologia da USP para simular a evolução espacial da CLP convectiva sobre uma superfície plana e homogênea [14] e simular a evolução diurna do monóxido de carbono na RMSF para uma CLP convectiva [5]. Primeiramente, este foi implementado no *CRAY-J90* e no *CRAY-SV1* do LCCA da USP em 2000 e 2003, respectivamente, [14]. Entre 2000 e 2003, essa versão do modelo permitiu também simular a dispersão de fontes do tipo área, tipo pontual e para investigar a validade da hipótese de Taylor na CLP altamente convectiva, [13],[15],[16],[17]. Deve ser ressaltado que todas estas simulações com a versão serial do modelo LES ficaram restritas a períodos de no máximo 1 hora. Com o processamento em paralelo, a capacidade computacional foi aumentada de maneira significativa, com a simulação de até 8 horas para o caso convectivo. Os primeiros testes para a parte estável já foram realizados com sucesso.

As simulações com o LES exigem computadores de alta capacidade de processamento além de uma estrutura que possibilite a transmissão destes dados de maneira rápida. Todas as simulações desenvolvidas neste trabalho foram realizadas utilizando o modelo LES desenvolvido originalmente por Moeng, [20] e aprimorado por Sullivan *et.al.*, [27]. O código original LES foi cedido pelo Dr. Umberto Rizza do *Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima* (CNR-ISAC) de Lecce, Itália. A versão que está sendo utilizada neste trabalho conta ainda com os aprimoramentos realizados pelo Dr. Edson Marques Filho da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Recentemente esta versão do modelo LES foi implementada com sucesso na servidora *R900 Intel 2-quad (8 nós) 12Gb de memória e 1.2 Tb de HD*, adquirida através do projeto CNPQ (*Proc. No. 476807/2007-7*). Esse computador permitirá rodar o modelo LES utilizando 8 nós em processamento paralelo. Além da velocidade no processamento, esse

novo computador será utilizado exclusivamente para o modelo LES, permitindo enfim efetuar-se modificações no código e ainda executar simulações para o período estável.

No modelo LES utilizado neste trabalho, as equações do movimento são resolvidas numericamente utilizando um método pseudoespectral nas direções horizontais i.e. utiliza uma FFT para resolver os operadores derivativos em  $x$  e  $y$ , (ao invés de inversão matricial) e um esquema de diferenças finitas de segunda ordem centrado no espaço, na direção vertical, [12].

As derivadas temporais são discretizadas através do esquema de  $2^a$  ordem *Adams-Bashforth*, estável para pequenos passos de tempo [19], [7]. A estabilidade do sistema numérico é determinada através do cálculo do número de Courant para cada passo de tempo, i.e. a condição de CFL é testada a cada  $dt$ . As condições de fronteiras laterais são assumidas como sendo cíclicas. Esse tipo de fronteira é apropriado para representar escoamentos turbulentos da CLP sobre superfícies homogêneas, [19]. A teoria da similaridade de Monin-Obukhov é empregada para estimar os fluxos turbulentos de momento em superfície. Essa fronteira é considerada rígida e com velocidade vertical nula. A condição de fronteira superior é radiativa, com gradientes verticais nulos para as componentes horizontais de velocidade do vento e fluxos turbulentos de subgrade. Por consistência, a velocidade vertical também é nula no topo da grade.

A simulação obtida neste ponto do projeto foi gerada sob um domínio espacial de  $5 \times 5 \times 2Km$ , utilizando  $96^3$  pontos de grade. Simplificando, os turbilhões da escala resolvida devem ser maiores do que  $\approx 52$  na horizontal e  $\approx 21m$  na vertical. O tempo total de simulação foi de 9000 segundos,  $\Delta t = 1s$ . O tempo de máquina foi de 17000 segundos. O objetivo principal desta simulação foi validar o novo código, com todas as implementações utilizando para tanto resultados de um artigo clássico de Moeng e Sullivan, [22]. Ênfase especial será dada ao balanço de energia cinética turbulenta com uma avaliação de todas as componentes. Todos os parâmetros implementados foram desenvolvidos para a escala de subgrade também.

## Descrição dos parâmetros do modelo

O símbolo  $(\prime)$  representa a variável de subgrade, ou escala residual, e,  $\langle \rangle$  a média no plano, (horizontal) i.e. escala resolvida, (média de volume).

Para a parte de subgrade, o modelo é chamado de SGS, *sub-grid scale* e é proposto por Smagorinsky, [26] e aprimorado por Sullivan, [27]. Segundo ele, há uma forte necessidade de novas estimativas de modelos de subgrade visto que em determinados casos, e.g. próximo a paredes ou CLPs neutras e estáveis, a parte SGS é tão importante quanto a escala resolvida. O problema é que os modelos SGS são sempre muito caros computacionalmente.

Os modelos SGS assumem que o tensor de Reynolds  $\tau_{ij}$ , o qual representa o stress num fluido devido à turbulência, obtido de uma média sobre as flutuações, pode ser aproximadamente relacionado com a escala resolvida pela adoção de um coeficiente turbulento de viscosidade  $\nu_t$ . Segundo Sullivan, [27], modelos SGS são desenvolvidos assumindo primeiramente que o escoamento está no sub-intervalo inercial, portanto os movimentos na subgrade podem ser considerados isotrópicos. Segundo [21], as constantes são determinadas através de um espectro isotrópico de energia. Isso indica que o efeito do cisalhamento próximo à superfície, o qual é determinante para tornar o escoamento não-isotrópico, é desconsiderado. O modelo proposto por Sullivan, considera que a turbulência apresentam uma parte não-isotrópica, pois considera os efeitos do cisalhamento próximo à superfície, além da homogeneidade, enquanto que o modelo inicial propunha apenas que a turbulência dependia da homogeneidade, i.e. considerava a turbulência sempre isotrópica.

$$\tau_{ij} = -2\nu_t \gamma S_{ij} - 2\nu_T \langle S_{ij} \rangle \quad (3)$$

Onde o fluxo resolvido é dado por:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

Para os escalares têm-se:

$$\tau_{\theta i} = -2\nu_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \quad (5)$$

Onde:

- $\nu_t$  é a flutuação do termo de viscosidade turbulenta;
- $\nu_T$  é o campo médio do termo de viscosidade turbulenta;
- $\nu_\theta$  é o coeficiente de difusividade;
- $\gamma$  é um fator associado à isotropia.

O fator de isotropia  $\gamma$ , é também responsável pela transição entre escala resolvida e SGS, para tanto, depende da constante de Smagorinsky, a qual é proporcional ao espectro inercial, i.e. quanto maior, mais dissipativo [27].

Com as principais informações definidas as modificações no código foram implementadas, com o intuito de, em tempo real e eliminando todo o tipo de pós-processamento, conhecer os perfis verticais e temporais de todos os momentos estatísticos de primeira e segunda ordem para  $u, v, w, \theta, CO$ , além de todas as componentes da ECT. Todos os parâmetros foram implementados para a escala resolvida e subgrade. Os resultados são apresentados na próxima seção.

---

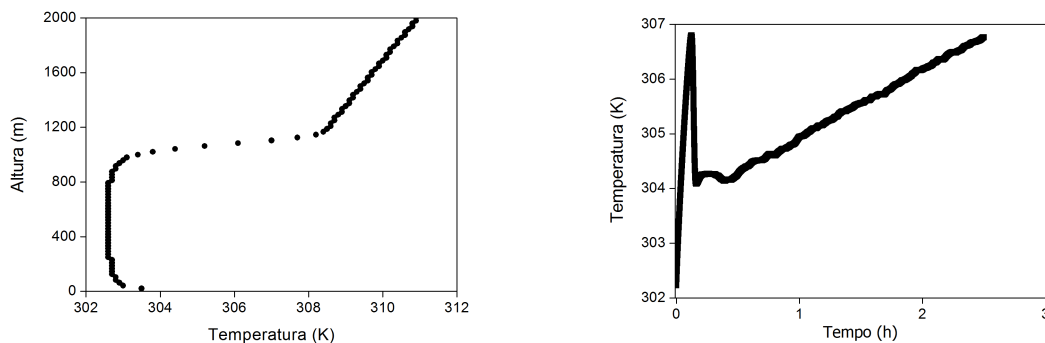
# Resultados

## Perfis verticais e temporais

O conhecimento do perfil vertical de temperatura bem como sua evolução temporal é de fundamental importância para o aprimoramento e melhor conhecimento das propriedades da CLP. Os resultados apresentados serão todos normalizados pelas escalas características.

Os resultados serão apresentados para o último time-step, i.e.  $t = 9000s$ . O perfil vertical de CO está em fase de implementação, pois alguns testes precisam ser efetuados para o caso estável. Desta maneira, para este relatório, serão exibidas somente as estatísticas referentes à temperatura e ao balanço de energia.

Na figura 2(a) e 2(b), têm-se as evoluções vertical e temporal de temperatura:



(a) perfil vertical de temperatura potencial

(b) Evolução temporal de temperatura em superfície

Figura 2: *Evoluções vertical e temporal*

A evolução vertical apresenta o perfil esperado para uma CLP convectiva. Ocorre diminuição da temperatura na camada limite superficial (CLS), na camada de mistura (CM) ocorre maior homogeneidade da propriedade devido obviamente à mistura turbulenta. Na camada de entranhamento (CE) ocorre a penetração de ar da atmosfera livre

ocorrendo um aumento significativo de temperatura, devido à intrusão de ar mais quente. O topo da CLP é definido em  $Z/Z_i = 1$ .

A evolução temporal apresenta aumento da temperatura com o passar do tempo, (sempre em superfície). Observa-se também a instabilidade inicial do modelo; isto deve-se ao ponto onde foi determinado que o modelo deveria estar absolutamente estável. Acredita-se que este valor está muito superestimado e o modelo atinge a estabilidade muito antes. Outros testes devem ser realizados para determinar este tempo com maior acurácia.

Estes resultados gerados pelo LES são basicamente devido às forçantes do modelo. Para este trabalho, os resultados foram encontrados com fluxo de calor latente e sensível constante. Esta condição, obviamente hipotética, caracteriza este aumento de temperatura. Estes valores, por serem de superfície, foram calculados baseados na teoria da similaridade de Monin-Obukov, (válida com segurança para toda a CLS).

A ECT também é calculada pelo algoritmo e aparece na figura 3.

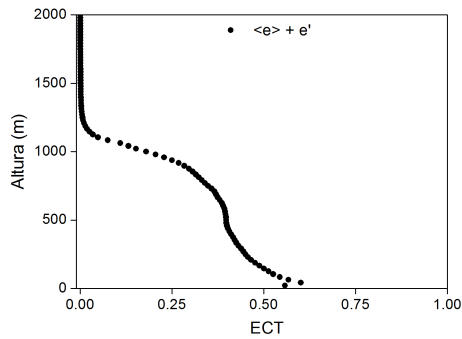


Figura 3: Energia cinética turbulenta normalizada por  $w_*^2$

O resultado indica a evolução da ECT (normalizada) com o passar das horas e também é esperado para uma CLP convectiva. A ECT é produzida pelos movimentos turbulentos e é mais intensa da CLS.

Foram ainda gerados os momentos estatísticos de primeira e segunda ordem para velocidade. Alguns gráficos também serão omitidos por praticidade.

Primeiramente os perfis de velocidade são mostrados na figura 4.

A figura apresenta ambas as componentes convergindo para os valores geostróficos. As maiores variações dão-se na CLS havendo uma maior homogeneidade na CM e por

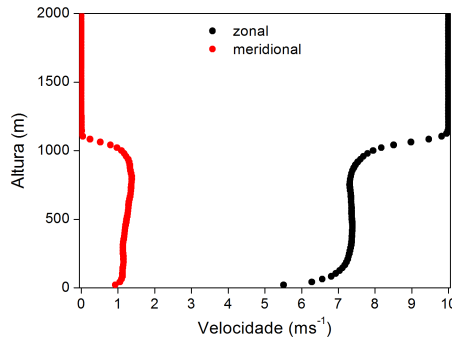


Figura 4: Componentes zonal e meridional da velocidade

fim outra variação mais pronunciada na CE. A partir deste ponto, atmosfera livre, as velocidades convergem para seus valores geostróficos.

Os momentos de segunda ordem para as velocidade aparecem na figura 5.

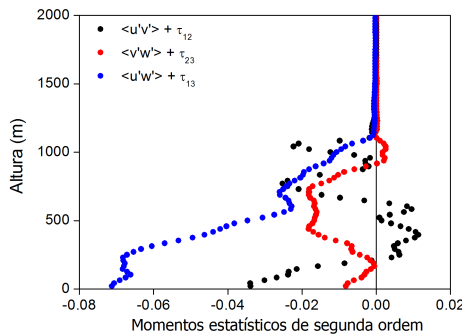


Figura 5: Momentos estatísticos de segunda ordem para escala horizontal e vertical normalizados por  $w_*^2$

Os momentos de segunda ordem para  $u$  e  $v$ , horizontal e vertical, contém a escala resolvida e subgrade e são normalizados pela escala característica de velocidade  $w_*$ . Para o momento horizontal, nota-se uma tendência ao campo tornar-se positivo com a altura até em torno de 500 metros. A partir deste valor, observa-se um decréscimo e os valores tornam a oscilar na camada de entranhamento. Este perfil será mais bem avaliado no decorrer do projeto. Para todos os perfis, atingido o topo da camada, o resultado tende a zero rapidamente pela extinção da turbulência. Os perfis obtidos para os momentos verticais indicam que as correntes ascendentes são predominantes no escoamento. Isso é

um perfil esperado para uma CLP convectiva. Para uma melhor interpretação física dos resultados visualizações instantâneas dos campos serão implementadas futuramente.

O balanço de energia cinética turbulenta, subgrade e escala resolvida, também foi implementado no algoritmo estatístico desenvolvido e o resultado é apresentado a seguir:

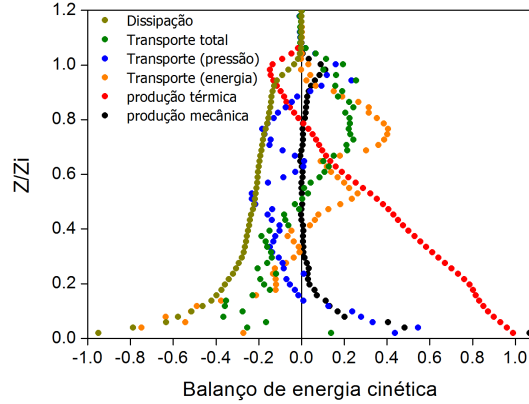


Figura 6: Balanço de energia cinética turbulenta normalizado por  $\frac{Z}{w_*^3}$

Todos os perfis apresentam os perfis esperados para uma CLP convectiva. A produção mecânica é sempre mais importante nos locais onde o cisalhamento do vento é mais intenso, i.e. no topo da camada de mistura e próximo à superfície. O efeito de subgrade é bastante importante para todos os casos, principalmente no cisalhamento, produção térmica e obviamente dissipação. O termo dissipativo é dado pela equação 6:

$$\epsilon = -C_k \frac{e^{1.5}}{l} \quad (6)$$

Onde:

$C_k$  é uma constante dependente da estabilidade. Para uma atmosfera convectiva seu valor é 0.93

$e$  é a energia cinética turbulenta de subgrade

$l$  é escala de comprimento de Monin-Obukhov.

Como o modelo LES preserva a cascata de energia, a dissipação somente ocorrerá



na escala de subgrade, quando os turbilhões já estiverem menores e menos energéticos. Observa-se valores intensos de dissipação próximo à superfície, visto que os pequenos turbilhões interagem de maneira significativa com a superfície e produzem uma quantidade de energia importante.

O termo de transporte foi dividido em 2 partes: transporte devido à pressão e à energia. Ambos apresentam os perfis esperados para uma CLP convectiva. O transporte total é simplesmente a soma dos dois e indica valores negativos negativos na CLS, indicando que existe transferência de energia desta camada para as adjacentes, e, valores positivos acima de  $\approx 0.5Z_i/Z$  indicando há energia entrando nesta camada. No primeiro ponto observa-se um valor positivo no termo de transporte. Isto deve-se ao fato de o termo de pressão ser muito significativo nesta região devido à interação com a superfície.

Detalhando-se para o caso de produção térmica; a subgrade desempenha um papel expressivo, principalmente na interação superfície-atmosfera como observa-se na figura 7.

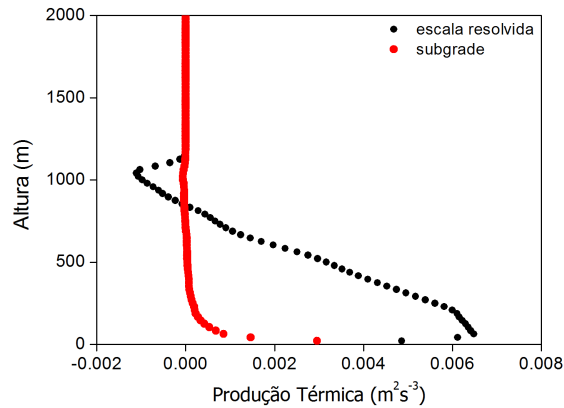


Figura 7: Produção Térmica - Escalas resolvida e subgrade

A produção térmica apresentada mostra a importância da subgrade nos modelos do tipo LES. Daí a necessidade de desenvolvimentos cada vez mais significativos para a melhoria destas estimativas e por conseguinte uma melhor explicação dos fenômenos de superfície.

## Propriedades do escoamento

Foram calculadas também outros parâmetros que fornecem uma idéia da estabilidade atmosférica, relação entre o cisalhamento e produção térmica além das escalas características de temperatura, velocidade, umidade. Será apresentado o gráfico do desenvolvimento da camada limite com o passar do tempo.

Como já dito na metodologia, o perfil proposto inicialmente indica uma atmosfera instável com ventos moderados,  $5m/s$ . Uma boa idéia da relação entre as produções térmica e mecânica é fornecida pelo parâmetro  $L$ , conhecido como comprimento de Monin-Obukhov para a CLS. Sua evolução temporal é apresentada na figura 8.

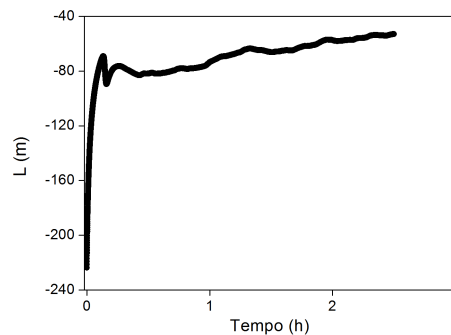


Figura 8: Comprimento de Monin-Obukov

$L$  por ser negativo indica uma CLP convectiva, e, seu módulo até que altura a produção térmica é menor do que a mecânica. Nas evoluções temporais é interessante observar o comportamento do modelo antes de começar a seguir um padrão devido ao problema de estabilidade inicial do modelo. Caso a estabilidade seja imposta muito cedo, as condições estáveis serão falsas e o modelo apresentará divergência numérica, ou resultados errôneos. Caso a estabilidade seja definida muito tarde, perde-se muito tempo de simulação para o equilíbrio do modelo.

O parâmetro de estabilidade  $\zeta = \frac{z}{L}$  também foi determinado. Ele indica se a atmosfera apresenta condições convectivas, neutras ou estáveis.

- $\zeta = 0$  neutro
- $\zeta < 0$  instável

- $\zeta > 0$  estável

O resultado é apresentado na figura 9.

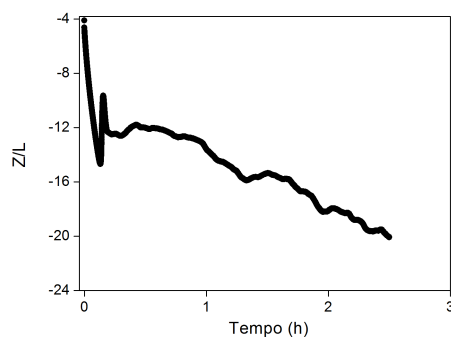


Figura 9: parâmetro de estabilidade

Observa-se que o modelo apresenta uma instabilidade mais acentuada enquanto se torna numericamente estável e após tal ponto apresenta valores em torno de  $\approx [-20, -12]$ , indicando um perfil típico para uma atmosfera convectiva.

Por fim a altura da CLP é apresentada na figura 10.

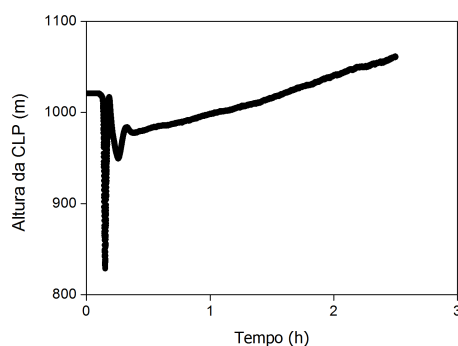


Figura 10: Evolução temporal da altura da CLP

A evolução temporal da altura da camada limite indica um caso típico convectivo. O crescimento deu-se durante todo o período simulado alcançando os 1060m no final da simulação. A instabilidade inicial do modelo também pode ser observada.

---

# Conclusão

A modelagem numérica da atmosfera consiste em uma importante ferramenta de previsão do tempo e do clima. Os processos turbulentos associados à CLP não são bem representados na maioria dos modelos dificultando a reprodução adequada da interação entre a atmosfera e a superfície. Esta reprodução é mais complicada em regiões com topografia complexa e ocupação do solo heterogênea. Uma forma importante de melhorar o conhecimento destes processos é a simulação numérica da turbulência de grande escala através de modelos tipo LES.

As rotinas de análise estatística implementadas foram validadas para casos conhecidos de CLP convectiva já explorados por outros autores. A validação do código é fundamental para a garantia de resultados consistentes no desenvolver deste projeto. Em etapas futuras estes resultados serão validados para uma CLP estável e neutra.

Basicamente, as estatísticas geradas dizem respeito a todos os momentos estatísticos de primeira e segunda ordem para os campos médios de temperatura, CO e velocidade. Além destes termos, foi implementado também uma nova parte no código que calcula explicitamente, em tempo real, os termos do balanço de energia, i.e. produções térmica e mecânica, dissipação e transporte. Todos os termos citados apresentam importância fundamental no melhor entendimento das propriedades físicas da CLP e são apresentados para escalas resolvida e subgrade.

A caracterização de uma CLP convectiva é o primeiro passo para análises posteriores mais complexas, visando a obtenção dos perfis já caracterizados neste trabalho para o período de transição, neutro, e camada estável. A grande dificuldade inerente a esse tipo de simulação é o tempo computacional e os tipos de parametrizações utilizadas para a subgrade. Para estes casos a escala subgrade torna-se vital pois o tamanho dos turbilhões é muito reduzido, se comparado ao caso convectivo. Para resolver este aparente problema, a grade de integração deve ser bastante refinada, e.g. 192 ou 256 pontos, para um domínio menor,  $\approx 2Km$ , visto o tamanho dos turbilhões.

---

# Referências Bibliográficas

- [1] ARYA, S.P. Introduction to Micrometeorology, Academic Press, Second Edition, **79**, 404 pp, 2001.
- [2] ANDRÉN, A. The Structure of Stably Stratified Atmospheric Boundary Layers: A Large-Eddy Simulation Study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **121**, 961-985, 1995.
- [3] BAIK, J.J., KIM, J.J., FERNANDO, H.J.S. A CFD model for Simulation Urban Flow and Dispersion *Journal of Applied Meteorology* **42**: 1636-1648, 2003.
- [4] BAGGETT, J.S. On the Feasibility of Merging LES with RANS for the near-wall Region of Attached Turbulent Flows. *Annual Research Briefs* 267-277, 1998.
- [5] CODATO, G., OLIVEIRA, A.P. Dissertação de Mestrado intitulada: Simulação Numérica da Evolução Diurna do CO na CLP sobre a RMSP com o Modelo LES, 2008.
- [6] DEARDOFF, J.W. Numerical Investigation of Neutral and Unstable Planetary Boundary Layers. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **29**, 91-115, 1972.
- [7] FORTUNA, A.O. Técnicas Computacionais Para a Dinâmica dos Fluidos. *EDUSP*, 2001.
- [8] GARRAT, J.R. The atmospheric boundary layer. Cambridge University Press. 316p, 1994.
- [9] GLOWINSKI, R., PAN, T.W., HESLA, T.I., JOSEPH, D.D., PÉRIAUX, J., Numerical Simulation of Incompressible Viscous Flow past Moving Rigid Bodies: Application to Particulate Flow, *Journal of Computational Physics* **169**: 363-426, 2001.

- [10] JIMÉNEZ, M. A. e CUXART, J. Large-eddy simulations of the stable boundary layer using the standard Kolmogorov theory: range of applicability. *Boundary-Layer Meteorology*, **115**, 241-261, 2005.
- [11] LESIEUR, M. e MÉTAIS, O. New Trends in Large-Eddy Simulation of Turbulence. *Annual Review Fluids Mechanics*, **28**, 45-82, 1996.
- [12] LUO, E., KREISS, H-O. Pseudospectral vs Finite Difference Methods for Initial Value Problems with Discontinuous Coeficients *Journal on Scientific Computing*, **20**, 148-163, 1998.
- [13] MARQUES-FILHO, E.P., OLIVEIRA, A.P., KARAM, H. A. e RIZZA, U. Simulação Numérica do Transporte de um Poluente Inerte e Passivo na CLP Convectiva através de um modelo LES. *Revista Ciência e Natura*, **1**, 83-96, 2003.
- [14] MARQUES-FILHO, E.P., OLIVEIRA, A.P. Tese de Doutorado intitulada: Investigação da Camada Limite Planetária Convectiva com Modelo LES Aplicado à Dispersão de Poluentes, IAG-USP, 2004.
- [15] MARQUES-FILHO, E.P., OLIVEIRA, A.P., RIZZA, U., e PEREIRA, M.M.R. Verificação da aplicação da Hipótese de Taylor em uma CLP em condições altamente convectivas. *Anais do IV Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 14 a 16 de dezembro de 2005, Santa Maria, RG, Revista Ciência e Natura, Santa Maria, RG, Universidade Federal de Santa Maria*, 339-342, 2005.
- [16] MARQUES-FILHO, E.P., OLIVEIRA, A.P. Simulação numérica do transporte de poluentes na camada limite atmosférica. *Observar e pensar, antes de modelar. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada, São Carlos, São Paulo*, **19**, 15-44, 2005.
- [17] MARQUES-FILHO, E.P., OLIVEIRA, A.P., KARAM, H.A., e RIZZA, U. Pollutant transport in a convective boundary layer with LES. *Revista Brasileira de Geofísica*, **24(4)**: 547-557, 2006.
- [18] MASON, P.J. Large-Eddy Simulation: A Critical Review of the Technique. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **120**, 1-26, 1994.

- [19] MESINGER, F., ARAKAWA, A. Numerical Methods use in Atmospheric Models. *Garp Publications Series* **17**, 1976.
- [20] MOENG, C.H. A Large Eddy Simulation Model for the Study of Planetary Boundary Layer Turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences* **41-13**: 2052-2062, 1984.
- [21] MOENG, C.H., WYNGAARD, J.C. Spectral Analysis of Large-Eddy-Simulations of the Convective Boundary Layer. *Journal of Atmospheric Sciences*, **45-23**: 3573-3587,1988.
- [22] MOENG, C.H., SULLIVAN, P. A comparison of Shear- and Buoyancy-Driven Planetary Boundary Layer Flows. *Journal of Atmospheric Sciences*, **51-7**: 999-1022,1994.
- [23] OBERKAMPF, W.L., TRUNCANO, T.G. Verification and Validation in computational fluid dynamics *Progress in Aerospace Sciences* **38**: 209-272, 2002.
- [24] STULL, R.B. An introduction to boundary layer meteorology *Ed. Springer*, 670 pp, 1988.
- [25] SU, H., SHAW, R.H., PAW U.K.T., MOENG, C.H., SULLIVAN, P.P. Turbulent Statistics of Neutrally Stratified Flow within and above a Sparse Forest from Large-Eddy Simulation and Field Observations. *Boundary-Layer Meteorology*, **88**, 363-397, 1998.
- [26] SMAGORINSKY, J. General Circulation Experiments with the Primitive Equations. I. The Basic Experiment, *Monthly. Weather Review.* **91**, 99-164, 1963.
- [27] SULLIVAN, P., McWILLIAMS, J.C., MOENG, C.H. A subgrid-scale model for large-eddy simulation of planetary boundary-layer flows. *Boundary-Layer Meteorology*, **71**, 247-276, 1994.

---

# Outras atividades

Participação no I Summerschool de Interação Atmosfera-Superfície da UFRJ, realizado no Rio de Janeiro durante os dias 23-27 de Março de 2009.

*Título do trabalho:* A DEVELOPMENT OF A STATISTIC ALGORITHM APPLIED TO LES MODEL - Apresentação Oral.

**Aprovação no exame de proficiência em língua inglesa em 02/09/2009**

Foram cursadas as seguintes disciplinas:

AGM5713-7 DINÂMICA DA ATMOSFERA I: **Conceito: A**

AGM5716-7 TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA: **Conceito: A**

AGM5822-8 RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA I: **Conceito: A**

Estão sendo cursadas as seguintes disciplinas:

AGG5900-9 PREPARAÇÃO PEDAGÓGICA

AGM5804-8 MICROMETEOROLOGIA



---

# Perspectivas

<b>Atividade</b>	<b>Período</b>
Cursos, pesquisa bibliográfica. Determinação do espaçamento da grade necessária para as simulações numéricas da turbulência em condições estáveis. Realizações de simulações de 1 hora de evolução da CLP estável.	Março de 2009 a março de 2010
Exame de Qualificação.	Abril de 2010
Realização das simulações da evolução temporal da CLP estável. Análise dos resultados e redação da dissertação.	Mai de 2010 a fevereiro de 2011.