

EFEITO DA TOPOGRAFIA NA EXTENSÃO VERTICAL DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA SOBRE A REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Olívia Nunes Pereira de Sousa¹, Amauri Pereira de Oliveira²

RESUMO

Neste trabalho, foi utilizado um modelo numérico de mesoescala não-hidrostático, TVM-NH, para investigar o efeito topográfico na estrutura vertical da camada limite planetária (CLP) convectiva na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). As simulações foram realizadas para o verão, representado pelo dia 15 de janeiro, com topografia realística, ocupação do solo heterogênea idealizada e vento de norte com intensidade inicial igual a 5 m s^{-1} . Os resultados mostram que a presença da topografia intensifica a produção mecânica de Energia Cinética Turbulenta (ECT) através do aumento da geração de ECT pelo cisalhamento vertical do vento média, condicionando a distribuição espacial da CLP em toda a RMSP. Nas regiões mais baixas a CLP é menor, conseqüentemente é mais fria e úmida do que nas regiões altas onde a CLP é maior.

ABSTRACT

In this work a non-hydrostatic version of the mesoscale model TVM is applied to investigate the topographic effects on the vertical structure of the convective planetary boundary layer (PBL) at the Metropolitan Region of São Paulo (MRSP). The simulation were carried out for January 15th day, representing the summer conditions in MRSP, with realistic topography, idealized heterogeneous land-use and a wind field initially from North and intensity of 5 m s^{-1} . The results show that the presence of topography intensifies the mechanical production of Turbulent Kinetic Energy (TKE) by increasing the vertical mean wind shear, conditioning the PBL spatial distribution to the topography of MRSP. At lowest places the PBL is shallower, consequently it is colder and the specific humidity is larger than higher places, where the PBL is deeper.

Palavras-chave: Topografia; Camada Limite Planetária; São Paulo; Energia Cinética Turbulenta.

INTRODUÇÃO

A topografia tem um papel importante no clima de uma região. Do ponto de vista sinótico, a existência de elevação no terreno, dependendo da altura, afeta sistematicamente o campo de vento. Geralmente observa-se a presença de um máximo relativo na intensidade do vento sobre a parte mais alta do relevo e um mínimo na parte mais baixa (Wood, 2000). A topografia é responsável por

¹ Grupo de Micrometeorologia – IAG/USP, Rua do Matão, 1226 – Cidade Universitária – São Paulo – SP – CEP 05508-090 – Tel.: +55 11 3091 4701 – e-mail: olivia@climatempo.com.br

² (apdolive@usp.br)

circulações atmosféricas de mesoescala, que estão fortemente relacionadas com as modificações da CLP (Lee e Kimura, 2001). A simulação das circulações locais através de modelos numéricos permite determinar os efeitos topográficos na estrutura da CLP.

A variação sazonal do campo de vento em São Paulo é dependente da posição e da intensidade do anticiclone do Atlântico Sul e da Baixa Continental. No verão, os ventos induzidos por estes sistemas se mantêm nas direções N-NE. No entanto, este padrão é afetado por frentes frias, pela circulação de brisa marítima, pela circulação gerada pela topografia e pela ocupação do solo.

Evidências observacionais indicam que os ventos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) são afetados por efeitos topográficos (Oliveira *et al.*, 2003; Karam *et al.*, 2003). Quando a intensidade do vento em São Paulo é pequena, observa-se divergência horizontal do vento durante o dia (Oliveira *et al.*, 2003). Como uma parte da RMSP é formada pelos vales dos rios Tietê, Pinheiros e Tamanduateí, existe uma grande possibilidade de que o padrão diurno de divergência horizontal observado na superfície esteja associado à circulação tipo vale-montanha.

O objetivo deste trabalho é investigar o papel da topografia na extensão vertical da CLP convectiva na RMSP (Pereira de Sousa, 2006). Para tanto, foram efetuadas simulações numéricas das propriedades da CLP através do modelo numérico de mesoescala, não hidrostático, denominado TVM-NH (*Topographic Vorticity-Mode Model Non-Hydrostatic*). As características da topografia foram determinadas a partir dos dados do *Global Topographic 30 arc seconds* (GTOPO30) através de um algoritmo de interpolação desenvolvido por Pereira (2004).

METODOLOGIA

O TVM-NH é um modelo de mesoescala, desenvolvido especificamente para simular a estrutura da CLP sobre regiões com topografia complexa. Ele é está baseado na solução numérica das equações das componentes horizontais da vorticidade do escoamento médio. No modelo a topografia é incluída de forma explícita através de um sistema de coordenadas σ , onde a coordenada vertical σ , depende da altura do topo do modelo (z_{max}), da altura da topografia (z_g) e de uma altura z da superfície da seguinte forma:

$$\sigma = \frac{z_{max} [z - z_g(x, y)]}{z_{max} - z_g(x, y)} \quad (1)$$

Utilizando o *software* de Tratamento de Dados do TVM-NH (Pereira, 2004), foi construída a topografia realística RMSP (Fig. 1), com espaçamento de grade horizontal regular de 4 km e 25 pontos nas direções x e y (100×100 km). Na direção vertical foram utilizados 25 pontos de grade, com espaçamento variando entre 10 m, na superfície, até aproximadamente 1800 m no topo do domínio do modelo, a 13000 m. Nos primeiros 2000 metros têm-se 11 pontos de grade.

O ponto central da grade está localizado na Plataforma Micrometeorológica do IAG da USP (23°33'35"S, 46°43'55"W) e está a 740 m de altura acima do nível médio do mar. Os demais pontos foram selecionados em função da sua posição geográfica e das características da topografia. O ponto ao Norte (PT_N) está localizado a 1087 m do nível do mar e ocupa o ponto mais alto do domínio. Por outro lado, o ponto ao Sul (PT_S) está localizado a 448 m acima do nível do mar e ocupa o ponto mais baixo do domínio. Os pontos a Leste e a Oeste (PT_E e PT_W) estão situados no vale do rio Tietê e têm 658m e 636 m de altura, respectivamente.

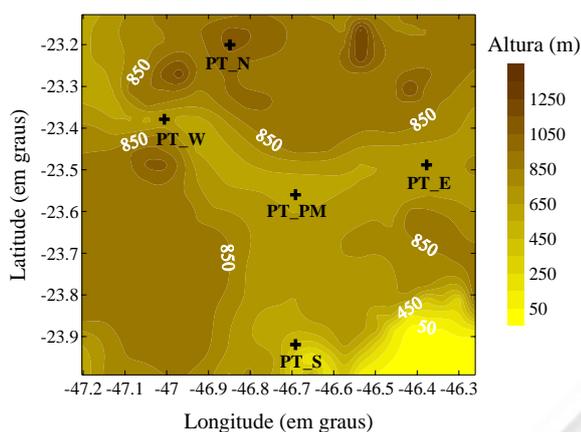


Figura 1 – Topografia da Região Metropolitana de São Paulo. Os pontos indicados correspondem aos pontos simulados no modelo TVM-NH.

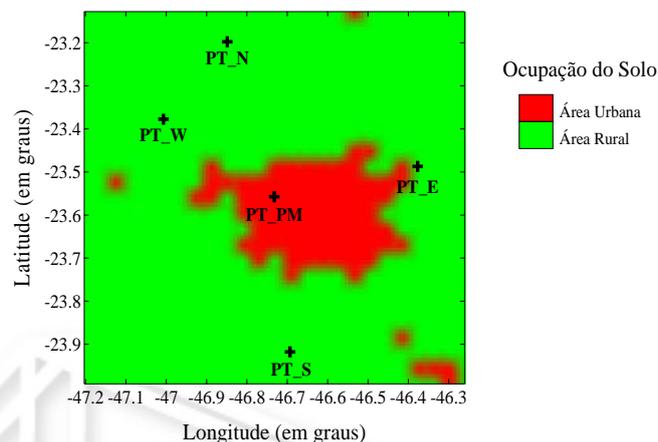


Figura 2 – Ocupação do solo idealizada heterogênea urbano-rural. Os pontos marcados representam os pontos simulados no modelo TVM-NH.

O campo de vento horizontal inicial é homogêneo na vertical e na horizontal, com módulo igual a 5 m s^{-1} e direção norte. Estas características de vento são representativas das condições dominantes na RMSP durante o verão. Os campos iniciais de temperatura potencial e umidade específica foram considerados horizontalmente homogêneos. Na direção vertical a temperatura potencial foi assumida sendo igual a 300 K, no primeiro nível do modelo, aumentando com uma taxa de variação vertical igual a $0,002 \text{ K m}^{-1}$. No caso da umidade específica as simulações foram iniciadas com valor igual a 15 g kg^{-1} no primeiro nível do modelo, diminuindo com um taxa de variação vertical igual a $0,5 \text{ g kg}^{-1} \text{ m}^{-1}$. As simulações representam o dia 15 de janeiro e tiveram 24 h de duração. As simulações foram iniciadas às 18:00 HL do dia anterior. Aqui são apresentadas apenas as últimas 12 h de simulação, que correspondem ao período convectivo. As simulações foram realizadas com topografia plana idealizada a uma altura de 740 m e com topografia realística da RMSP (Fig. 1). Foi utilizada a ocupação do solo heterogênea (Fig. 2), idealizada a partir da distribuição das ocupações urbana e rural da RMSP disponíveis nos dados do *International Geosphere Biosphere Programme* (IGBP).

RESULTADOS

No modelo TVM-NH a altura da CLP é determinada através da altura onde a ECT é 5% do valor da ETC na superfície (Stull, 1988). As Figs. (3a) e (3b) mostram o perfil vertical de ECT para os pontos descritos na Figs. (1) e (2) às 15:00 HL.

Na simulação com topografia plana, vista na Fig. (3a), o ponto PT_PM, localizado na área urbana, apresentou intensidade máxima de ECT de aproximadamente $3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ em 230 m de altura. Os demais pontos, localizados na área rural, apresentaram máximo de aproximadamente $1,6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, também a 230 m de altura. Apenas o ponto PT_S teve o máximo de aproximadamente $1,3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, a 300 m de altura. Estes resultados indicam que a altura da CLP é praticamente a mesma em todos os pontos e chega a 1700 m de altura.

Na simulação com topografia realística (Fig. 3b), o ponto PT_PM, localizado na área urbana, apresenta a maior intensidade de ECT, com um máximo de $3,5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ em 600 m de altura. Para os outros pontos, localizados em área rural, o ponto PT_S, localizado na parte mais baixa do domínio, teve a menor intensidade de ECT, sendo de aproximadamente $0,8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ a 300 m de altura. A altura estimada da CLP variou de 700 m de altura no ponto PT_S a 2300 m de altura no ponto PT_PM.

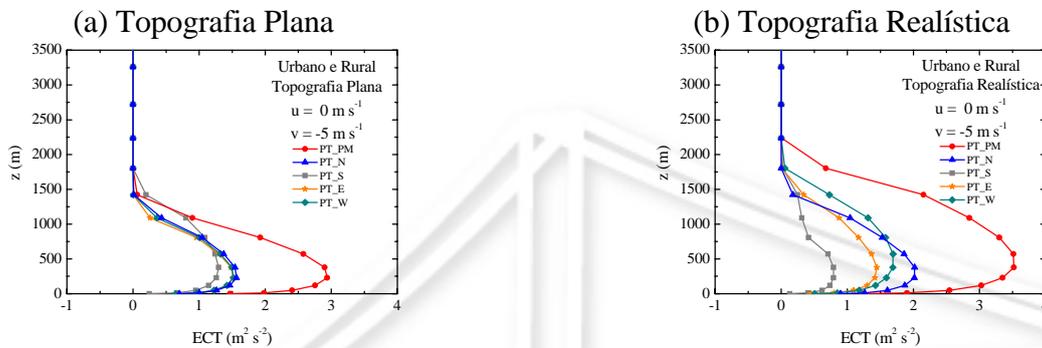


Figura 3 – Perfil vertical de energia cinética turbulenta para verão às 15:00 HL.

O perfil vertical de ECT dá um bom indicativo da altura da CLP. Como em partes mais elevadas o vento é mais intenso, é coerente que a ECT seja mais intensa nas partes mais altas, no caso da topografia realística. Nos resultados apresentados, pode-se dizer que a topografia, juntamente com a ocupação do solo do tipo urbana, intensifica a geração de ECT.

As Figs. (4a) e (4b) mostram o perfil vertical de temperatura potencial às 15:00 HL. A estrutura vertical da temperatura potencial permite verificar as alturas das camadas que compõe a CLP: camada limite superficial (CLS), camada de mistura (CM) e camada de transição (CT). O topo da CM indica o topo da CLP.

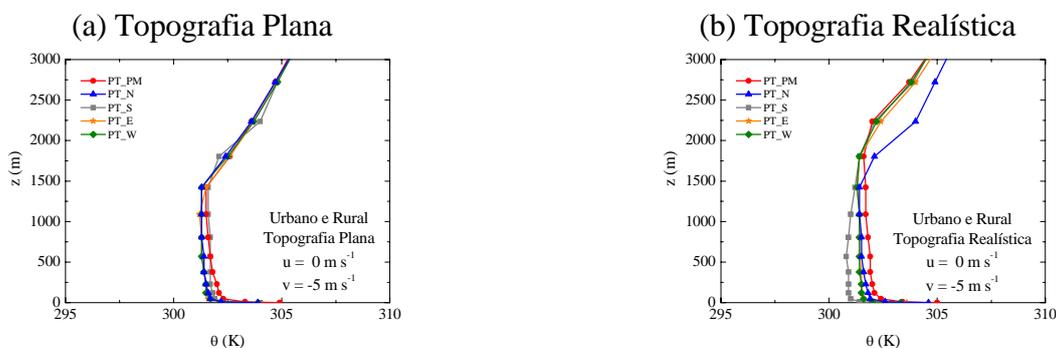


Figura 4 – Perfil vertical de temperatura potencial para verão às 15:00 HL.

Na simulação com topografia plana (Fig. 4a), todos os pontos apresentam temperatura média de 302 K e a CM atinge cerca de 1500 m de altura. Na simulação com topografia realística (Fig. 4b),

todos os pontos tiveram perfis com valores muito próximos, sendo o ponto PT_PM, na área urbana, com a maior temperatura e maior altura da CM, 302 K e 2000 m, e o ponto PT_S com a menor temperatura e a menor altura da CM, 301 K e 1000 m. A CM indica também se a topografia é uma forçante responsável pela circulação. Nas simulações, a CM foi alta tanto no caso com a topografia plana (Fig. 4a), quanto no caso com a topografia realística (Fig. 4b). No entanto, com a topografia realística, houve uma maior variação na altura da CM, dependendo da altura da elevação do terreno.

Outro perfil que mostra a estrutura vertical da CLP é o de umidade específica. As Figs. (5a) e (5b) mostram o perfil vertical de umidade específica às 15:00 HL.

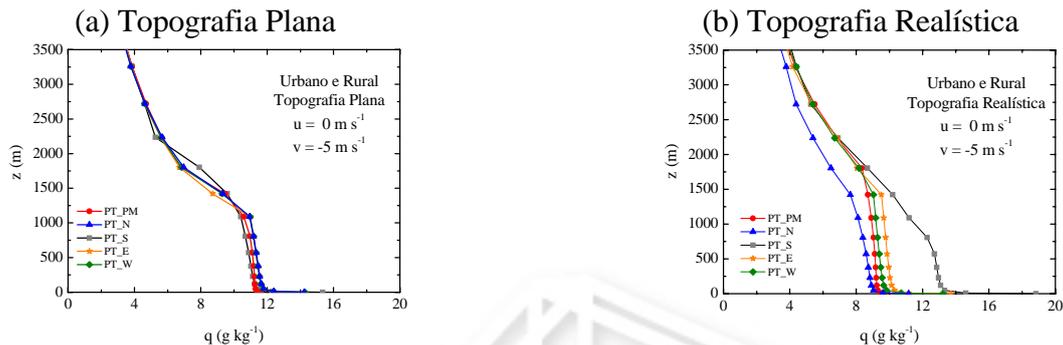


Figura 5 – Perfil vertical de umidade específica para verão às 15:00 HL.

A simulação com topografia plana apresentou perfis verticais de umidade específica praticamente igual em todos os pontos (Fig. 5a), com umidade específica de aproximadamente $11,5 \text{ g kg}^{-1}$ e altura da CM em 1200 m.

Para a simulação com topografia realística (Fig. 5b), o ponto PT_N, localizado na parte mais alta do domínio, teve o menor valor de umidade específica, 9 g kg^{-1} , mas apresentou altura da CM em 1500 m. Já o ponto PT_S, localizado na parte mais baixa do domínio, apresentou o maior valor de umidade específica, 13 g kg^{-1} , e a menor altura da CM, com 700 m.

Numa CLP convectiva, que é a condição do período diurno, a umidade específica diminui com a altura. As simulações indicam que a ocupação urbana permite que a altura da CLP seja alta maior e a mostram que a topografia intensifica as misturas turbulentas, aumentando mais a altura da CLP.

CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho é investigar o efeito da topografia na estrutura vertical da CLP convectiva na Região Metropolitana de São Paulo. A metodologia utilizada consiste em simular as propriedades da CLP através do modelo numérica de mesoescala TVM-NH utilizando topografia realística. Para verificar o efeito que a topografia exerce na CLP, optou-se em utilizar como referencia as simulações numéricas obtidas com topografia plana. Utilizou-se nestas simulações uma ocupação do solo heterogênea composta de dois tipos de ocupação: urbana e rural, distribuídas espacialmente de forma realística. Todas as simulações foram realizadas com vento de norte e com intensidade inicial igual a 5 m s^{-1} . As simulações tiveram início às 18:00 HL e a duração de 24 h. Foram analisadas as

últimas 12 h, que correspondem ao período diurno, quando a CLP é convectiva. As condições atmosféricas foram idealizadas para representar uma situação de verão.

Apesar de pouca variação vertical, a topografia da RMSP tem um papel importante na estrutura vertical da CLP. A topografia intensifica a ECT, causando um aumento na extensão vertical da CLP. De um modo geral o aumento ECT é causado pela intensificação da produção mecânica de ECT, associada à intensificação do cisalhamento vertical do vento médio. A variação espacial da extensão vertical da CLP está, por sua vez, associada a variações significativas na estrutura termodinâmica e no conteúdo de umidade da CLP. Em geral, regiões mais baixas apresentam valores menores de temperatura potencial e maiores de umidade específica na CM, associados a uma menor extensão da CLP. Estes resultados numéricos serão comparados com observações da estrutura da CLP na RMSP.

AGRADECIMENTOS: Projeto de pesquisa financiado pela FAPESP (Proc. no. 03/10362-5) e pelo CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Karam, H. A.; Oliveira, A. P. e Soares, J., 2003: Application of Mass Conservation Method to Investigate the Wind Patterns over an Area of Complex Topography. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, **25** (2), 107-113.
- Lee, S. -H. and Kimura, F., 2001: Comparative Studies in the Local Circulations Induced by Land-Use and by Topography. *Boundary-Layer Meteorology*, **101**, 157-182.
- Oliveira, A. P., Bornstein, R. D. and Soares, J., 2003: Annual and Diurnal Wind Pattern in the City of São Paulo. *Wind, Air, and Soil Pollution: Focus*, **3**, 3-15.
- Pereira, M. M. R., 2004: Estudo do Transporte Local de Poluentes em Iperó por Meio de um Modelo Lagrangiano de Partículas, *Tese de Doutorado*, Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG/USP, 103 pp.
- Pereira de Sousa, O. N., 2006: Investigação do papel da topografia e ocupação do solo na camada limite planetária sobre a cidade de São Paulo, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG/USP, 116 pp.
- Stull, R. B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, Boston, 680 pp.
- Wood, N., 2000: Wind Flow Over Complex Terrain: a Historical Perspective and the Prospect for Large-Eddy Modelling. *Boundary-Layer Meteorology*, **96**, 11-32.