

# INVESTIGAÇÃO DO MONÓXIDO DE CARBONO NA RMSP USANDO LES

*Georgia Codato<sup>a</sup>, Amauri P. de Oliveira<sup>a</sup>, Jacyra Soares<sup>a</sup>,  
Edson P. Marques Filho<sup>b</sup> e Umberto Rizza<sup>c</sup>*

<sup>a</sup>Universidade de São Paulo, SP, Brasil ([georgia@model.iag.usp.br](mailto:georgia@model.iag.usp.br); [apdolive@usp.br](mailto:apdolive@usp.br); [jacyra@usp.br](mailto:jacyra@usp.br))

<sup>b</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil ([emarques@acd.ufrj.br](mailto:emarques@acd.ufrj.br)).

<sup>c</sup>Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima, Lecce, Itália ([urizza@gmail.com](mailto:urizza@gmail.com)).

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo simular a evolução do monóxido de carbono na região metropolitana de São Paulo (RMSP) durante o período convectivo utilizando o modelo LES. O conjunto de simulações numéricas foram realizadas com passo de tempo de 1 segundo e uma grade de  $128^3$  pontos distribuídos igualmente sobre um domínio de 10 km por 10 km na direção horizontal e de 2 km na direção vertical. Nestas simulações foram utilizados, como condições de contorno e inicial, um conjunto de parâmetros compatíveis com as condições meteorológicas típicas do inverno na RMSP observadas durante o mês de junho. Os resultados numéricos mostraram que, além da emissão veicular, o processo de entranhamento de ar limpo no topo da camada limite planetária (CLP) é o mecanismo que determina a evolução da CO na RMSP durante boa parte do período diurno.

## ABSTRACT

The main objective of this work is to simulate the evolution of carbon monoxide in the metropolitan region of São Paulo (MRSP) during the convective period using LES model. A set of numerical simulations was carried out with time step of 1 second and  $128^3$  grid points, distributed equally over a domain of 10 km by 10 km in the horizontal direction and 2 km in the vertical direction. The boundary and initial conditions used in these simulations were characterized by a set of parameters compatible with typical winter meteorological conditions observed in MRSP during June. Besides vehicle emission at the surface, the numerical results indicated that entrainment of clean air in the top of the planetary boundary are the main mechanisms that determines the evolution of carbon monoxide in MRSP during daytime in the winter.

**Palavras chave:** LES, camada limite atmosférica, monóxido de carbono, poluição

## 1. INTRODUÇÃO

A cidade de São Paulo (Fig. 1), com cerca de 11 milhões de habitantes, junto com 39 outras cidades menores, foram a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Esta região é ocupada por 20,5 milhões de habitantes e tem aproximadamente 7 milhões de veículos. A RMSP está localizada cerca de 60 km do oceano Atlântico. A RMSP tem uma área de  $8.051 \text{ km}^2$  e é uma das maiores áreas urbanas da América do Sul e uma das maiores do mundo (Codato *et al.*, 2008). Uma das conseqüências mais importantes da urbanização é o aumento do número de veículos e conseqüentemente a emissão de poluentes na atmosfera. Cerca de 98% do monóxido de carbono emitido em áreas urbanas é produzido por veículos. A RMSP emite 1,48 milhões de toneladas de monóxido de carbono por ano (CETESB, 2007). A poluição do ar é um dos mais importantes problemas ambientais em São Paulo. Existem indicações de que um longo tempo de exposição para altos níveis de poluições tem causado dramáticos problemas de saúde publica. Existe também evidencias que a poluição em São Paulo pode alterar o clima local afetando a evolução diurna das componentes da irradiância solar difusa, direta e global na superfície (Codato *et al.*, 2007a).

O objetivo deste trabalho é investigar as propriedades estatísticas da camada limite planetária (CLP) convectiva sobre uma superfície homogênea e urbana usando o modelo “large eddy simulation” (LES) desenvolvido por Moeng (1984). Será dada uma atenção especial à caracterização do transporte turbulento do poluente no topo da CLP durante o dia (Codato, 2008).

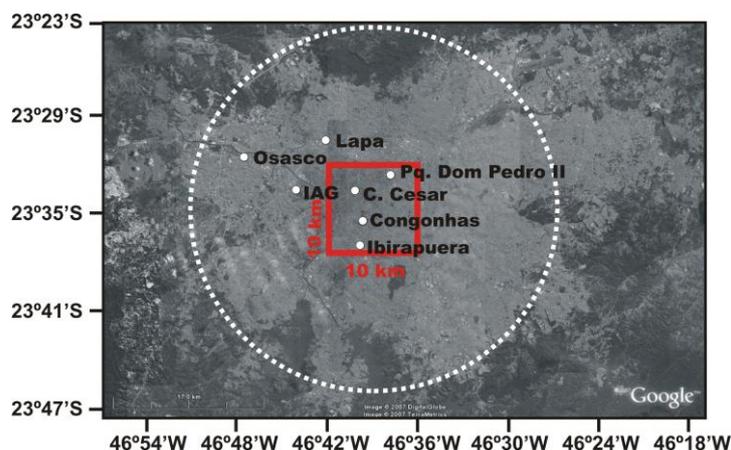


Figura 1: Macha urbana da RMSP. O limite entre a área urbana e não urbana é indicado por um círculo branco tracejado. O domínio horizontal da grade utilizada no modelo LES é indicado por um quadrado vermelho.

## 2. MONÓXIDO DE CARBONO

O primeiro máximo ocorre entre 08:30 e 09:30 HL na maioria das estações da CETESB (Tab.1). O segundo máximo ocorre entre 19:30 e 21:30 HL. Os valores mínimos por sua vez ocorrem em torno das 05:30 HL e entre 14:30 e 16:30 HL.

Tabela 1: Estação da CETESB.

Estação	Localização (Lat, Long)	Altura (metros)	Tipo
IAG	23°33'34''S, 46°44'01''W	742	M
C. Cesar	23°33'11''S 46°40'20''W	817	CO
Congonhas	23°36'57''S 46°39'46''W	760	CO
Ibirapuera	23°35'30''S 46°36'43''W	750	CO/W
Pq. Dom Pedro II	23°32'40''S 46°37'45''W	730	CO/W
Lapa	23°30'32''S 46°42'04''W	720	CO/W
Osasco	23°31'34''S 46°47'29''W	740	CO/W

M indica medidas de parâmetros meteorológicos (Temperatura, umidade relativa, radiação solar); CO indica medidas de concentração de monóxido de carbono; W indica medidas de velocidade e direção do vento.

O progressivo decréscimo da concentração de CO na superfície durante a madrugada atingindo um mínimo em torno de 0,35 ppm, em torno das 05:30 HL, é uma característica de todas as estações (Fig. 2). Este valor corresponde à concentração de fundo do CO para a região de São Paulo, que pode ser observado na RMSP em virtude da diminuição da intensidade do tráfego de veículos.

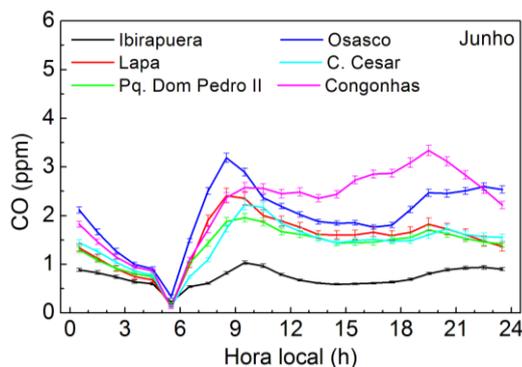


Figura 2: Evolução diurna do monóxido de carbono, em junho. Período: 1996-2005.

A intensificação da concentração de CO durante o começo da noite esta relacionada com a intensidade do tráfego de veículos e a com menor eficiência apresentada pela turbulência em dispersar os poluentes na atmosfera. Neste horário, a CLP torna-se estável e a sua intensidade passa a ser determinada pela intensidade da produção mecânica de ECT.

Assim, uma parte do ciclo diurno do CO na superfície está associada com o ciclo de emissões veiculares bi-modal. O padrão bi-modal apresentado no ciclo das emissões veiculares é mais intenso nos meses de inverno do que nos meses de verão. No entanto, o mínimo de concentração de CO em torno das 05:30 HL ocorre em todos os meses do ano, neste horário a fonte de emissão é pequena.

Os menores valores de CO na estação do Ibirapuera estão relacionados com a localização dentro de um parque florestado com pequeno tráfego de veículos. A alta concentração de CO em Osasco e Congonhas são devido ao fato destas estações estarem localizadas próximas a ruas com intenso tráfego de veículos. As outras estações apresentam um comportamento intermediário.

### 3. MODELO NUMÉRICO

A simulação numérica do escoamento turbulento utilizando o LES, resolve diretamente os grandes turbilhões (escala resolvida). E a pequena escala do escoamento turbulento (subgrade) é resolvido indiretamente usando a técnica de parametrização. Esta versão do modelo LES foi desenvolvida pela Moeng (1984). O código do LES tem sido utilizado pelo grupo de micrometeorologia da Universidade de São Paulo para simular as propriedades da CLP para condições altamente convectivas e para investigar a dispersão de poluentes considerando uma fonte do tipo área e pontual localizadas na superfície (Marques Filho, 2004; Marques Filho *et al.*, 2007). A simulação numérica apresentada neste trabalho foi realizada utilizando uma versão paralela do LES. E foi rodada no cluster do Laboratório de Computação Científica Avançada da Universidade de São Paulo. (LCCA- USP).

O domínio utilizado na simulação numérica foi de 128 x 128 x 128 pontos de grades na direção x, y e z, respectivamente, cobrindo 10 x 10 km<sup>2</sup> na horizontal e 2 km na vertical (Fig. 1). O modelo foi utilizado para simular 10 horas (referente ao período diurno), correspondendo a 3600 passos no tempo. Foi necessário cerca de 100 horas de processamento, para realizar esta simulação usando 8 nós do cluster do LCCA e passo de tempo igual a 1segundo.

A condição inicial para a concentração do poluente e temperatura potencial corresponde a camada de mistura com extensão vertical de 300m. A temperatura potencial e a concentração do poluente inicial foram 300K e 2,5 ppm, respectivamente. Acima de 300m, a temperatura potencial decresce cerca de 8 K na camada de inversão térmica (~100m). Na atmosfera livre o gradiente vertical de temperatura potencial foi considerado constante e igual a 5 K km<sup>-1</sup> e a concentração de CO foi considerada constante e igual a 0,2 ppm. Os perfis verticais das componentes da velocidade do vento horizontal são assumidos como constantes e iguais ao vento geostrófico, sendo a componente zonal é igual a 2 ms<sup>-1</sup> e meridional igual a 0 ms<sup>-1</sup>. O parâmetro de rugosidade foi considerado igual a 0,16 m, correspondendo ao valor urbano de rugosidade (Marques *et al.*, 2007).

O fluxo de calor sensível e de monóxido de carbono na superfície foi calculado através das seguintes expressões

$$\overline{\theta' w'_0} = B_\theta \cdot \text{sen} \cdot 2\pi \left( \frac{t - 6,69}{21,29} \right) \quad (1)$$

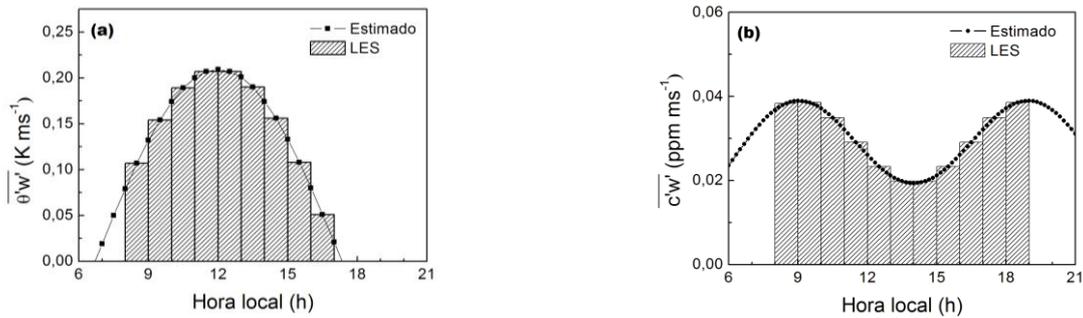
$$\overline{c' w'_0} = \frac{B_{CO}}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_1}{\sigma_t}\right)^2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-t_2}{\sigma_t}\right)^2} \right) \quad (2)$$

Onde  $B_\theta$  é igual a 0,209 K ms<sup>-1</sup>,  $B_{CO}$  igual a 0,024 ppm ms<sup>-1</sup>,  $t_1 = 9$  horas,  $t_2 = 19$  horas e  $\sigma_t = 3$  horas.

Estas condições foram definidas a fim de simular a evolução da CLP durante o dia (entre 08:00 e 18:00 HL). A evolução diurna dos fluxos de calor sensível e de CO utilizadas nas simulações foi obtida a partir das equações 1 e 2 para cada hora conforme indicado na figura 3.

### 4. RESULTADOS

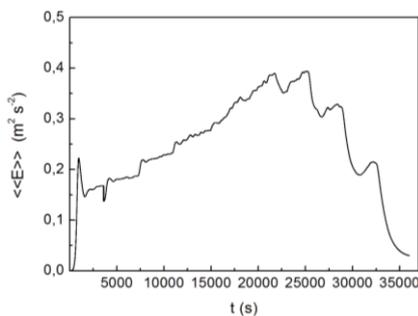
Os resultados apresentados a seguir estão baseados no campo tridimensional gerado depois de 1000 passos no tempo (20 minutos). A estatística foi obtida usando a saída do modelo depois da CLP entrar no estado de quase-equilíbrio (Fig. 4). Segundo Sorbjan, (1986), a condição de equilíbrio pode ser atingida quando as propriedades do escoamento turbulento na CLP variam com escala de tempo menor do que as escalas de tempo características das variações das condições de fronteira e das forçantes externas. Na figura 4, depois do salto inicial, a turbulência na CLP simulada pelo LES atinge o estado de quase-equilíbrio.



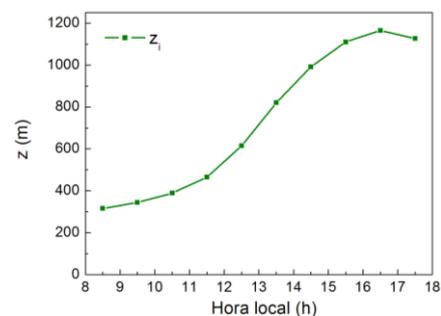
**Figura 3:** Fluxo vertical turbulento de (a) calor sensível CO para a RMSP durante o para junho. Os valores indicados por barras hachuradas foram utilizados como condição de contorno inferior nas simulações numéricas com o LES.

A altura da CLP está aumentando durante a maior parte da sua evolução diurna (Fig.5). Durante o período de crescimento, a altura da CLP variou de 316 m até 1165 m. Após as 16:30 HL, a CLP começa a diminuir, variando cerca de 39 m até o final da simulação as 17:30 HL. A diminuição da altura é resultado do decaimento da turbulência durante o período de transição entre o regime convectivo e estável.

Os perfis verticais simulados representaram adequadamente uma CLP convectiva (figuras não apresentadas).



**Figura 4:** Evolução temporal da ECT total integrada na CLP.



**Figura 5:** Evolução diurna da altura da CLP.

Os efeitos da evolução diurna do entranhamento no topo da CLP podem ser visualizados comparando-se a evolução da temperatura potencial observada e simulada (Fig. 6a) e dos fluxos verticais turbulentos de calor sensível na superfície e no topo da CLP (Fig. 6b).

O fluxo de calor sensível é intenso e positivo na superfície (Fig. 6b), isto indica que o transporte de calor sensível está ocorrendo da superfície para a camada de mistura (CM). Enquanto que o transporte de calor sensível no topo ocorre da atmosfera livre para a CM está associado ao entranhamento. Deve ser enfatizado que as observações usadas na figura 6a correspondem à média mensal dos valores horários em 13 anos de observações contínuas na plataforma micrometeorologica do IAG localizado no campus da universidade de São Paulo (Fig. 1). Mesmo considerando que existe pouco nebulosidade durante o mês de junho, a evolução observada foi afetada pelas nuvens, precipitação, brisa marítima, principalmente depois das 12:00 HL (Codato, 2008).

Na figura 7a, verifica-se que o entranhamento no topo da CLP entre 10:30 HL e 15:30 HL supera a emissão veicular na superfície (Fig. 7b). Nesse intervalo de tempo, de aproximadamente 6 horas, a concentração de CO simulada na superfície diminui sistematicamente (Fig. 7a). Somente depois das 10:30 HL a concentração CO simulada na superfície começa a diminuir.

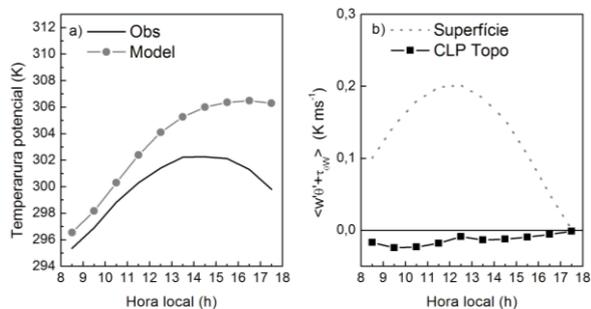
O fluxo de monóxido de carbono (Fig. 7b) no topo da CLP é positivo, isto indica que do ponto de vista da CLP o monóxido de carbono está sendo removido, contudo fisicamente o que ocorre é que ar limpo da atmosfera livre está sendo transportado (entranhado) para o interior da CLP na medida em que a CLP aumenta a sua extensão vertical (Fig. 5).

## 5. CONCLUSÃO

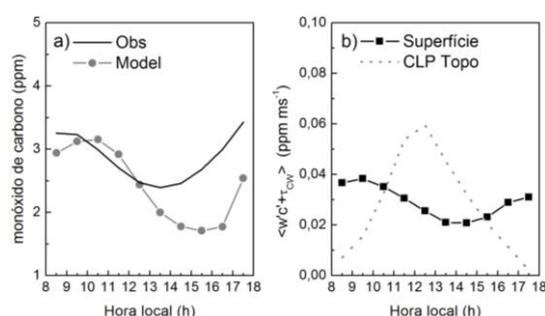
A evolução diurna do CO simulado numericamente reproduziu de forma bastante satisfatória as observações médias entre 8 a 18 horas em São Paulo. Os resultados numéricos também mostraram que o além da emissão veicular, o processo de entranhamento de CO é o mecanismo que determina a evolução da CO na RMSP durante boa parte do período diurno.

Assim, na maior parte da RMSP a evolução diurna do CO é determinada em grande parte pelo entranhamento de ar limpo no topo da CLP e pelas emissões veiculares na superfície. Nas regiões de transição entre ocupação não-urbana e urbana situadas nas fronteiras da RMSP, a advecção horizontal de CO pode contribuir de forma equivalente ao entranhamento e a emissão veicular. Esta questão deverá ser avaliada em um futuro trabalho.

**AGRADECIMENTOS:** Este trabalho é parte do projeto de mestrado do programa de pós-graduação do IAG da USP e financiado pela CAPES. Esta pesquisa foi também financiada pelo CNPq (Proc. No. 476807/2007-7).



**Figura 6:** Evolução diurna simulada e observada da (a) temperatura potencial e (b) fluxo vertical de calor sensível.



**Figura 7:** Evolução diurna simulada e observada da (a) concentração de CO na superfície e (b) fluxo vertical de CO.

## 6. REFERENCIAS

- CETESB (2007) Technical report on air quality in the State of São Paulo – Environmental State Secretary, ISSN 0103–4103, São Paulo, Brazil, 167pp. (Available in Portuguese at <http://www.cetesb.sp.gov.br>).
- Codato, G., 2008: Simulação numérica da evolução diurna do monóxido de carbono na camada limite planetária sobre a RMSP com modelo LES. *Dissertação de Mestrado*. Departamento de Ciências Atmosféricas IAG-USP, 96 pp.
- Codato, G., Oliveira, A.P., Soares, J., Marques Filho, E.P., and Rizza, U., 2008: Investigation of carbon monoxide in the city of São Paulo using large eddy simulation. *Proceedings of 15<sup>th</sup> Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the A&WMA, 88<sup>th</sup> Annual Meeting*, 20-24 January 2008, New Orleans, LA (CDROM).
- Codato, G., Oliveira, A. P., Soares, J., Escobedo, J.F., Gomes, E. N., and Pai, A. D., 2007a: Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil, *Theoretical and Applied Climatology (in press)*.
- Codato, G., Oliveira, A.P., Marques Filho, E.P., and Rizza, U., 2007b: Large eddy simulation of carbon monoxide in the city of São Paulo. *Proceedings of the 11th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 2-5 July, Cambridge, UK, Vol. 2, pp. 358-362.
- Marques Filho, E.P., 2004: Investigação da CLP convectiva com modelo LES aplicado a dispersão de poluentes. Tese de Doutorado, Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG-USP, 128 pp.
- Marques, E.P., Oliveira, A.P., Karam, H.A., and Rizza, U., 2006: Pollutant transport in a convective boundary layer with LES. *Revista Brasileira de Geofísica*, **24(4)**: 547-557.
- Moeng, C.A., 1984: Large-Eddy-Simulation Model for the Study of Planetary Boundary-Layer Turbulence. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **41(13)**, 2052-2062.
- Sorbjan, Z., 1986: On similarity in the atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, **35**, 377-397.