

Previsão de concentração de ozônio na Camada Limite Planetária na Região Metropolitana de São Paulo no contexto de um projeto de políticas públicas. Parte I: sondagens de ozônio e de parâmetros meteorológicos.

Maria de Fátima Andrade<sup>1</sup>, Adalgiza Fornaro<sup>1</sup>, Neusa Paes Leme<sup>2</sup>, Plínio Alvalá<sup>2</sup>, Carlos Lacava<sup>3</sup>, Maria Lucia Guardani<sup>3</sup>.

### Resumo

Neste trabalho serão apresentados resultados experimentais de sondagem atmosférica realizados no escopo do projeto de políticas públicas com recursos da FAPESP “Modelos de Qualidade do Ar Fotoquímicos: Implementação para Simulação e Avaliação das Concentrações de Ozônio Troposférico em Regiões Urbanas” (Processo 03/06414-0), envolvendo o DCA-IAG (Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas), a CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo) e o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). No escopo do projeto estão sendo realizados experimentos de medidas de gases e aerossóis e sondagens atmosféricas. Serão apresentados os objetivos do projeto como exemplo de uma parceria bem sucedida entre as instituições de pesquisa (USP e INPE) e um órgão público (a CETESB), e alguns exemplos de resultados da sondagem de ozônio.

Palavras-chave: sondagens de ozônio, poluição fotoquímica, modelos de qualidade do ar.

### Abstract

In the scope of a project funded by FAPESP (“Modelos de Qualidade do Ar Fotoquímicos: Implementação para Simulação e Avaliação das Concentrações de Ozônio Troposférico em Regiões Urbanas”, Processo 03/06414-0), ozone and meteorological soundings were performed in the São Paulo city. The main objectives were to evaluate the ozone behavior in the atmospheric boundary layer, and to calibrate the modeling results. The project is being conducted by the Atmospheric Sciences Department of IAG-USP, the INPE and CETESB. The objective of the main project is to implement a photochemical eulerian model to evaluate air quality in the Metropolitan Area of Sao Paulo.

### Introdução

As sondagens atmosféricas de ozônio e de parâmetros meteorológicos realizadas no escopo do projeto de políticas públicas com recursos da FAPESP “Modelos de Qualidade do Ar Fotoquímicos: Implementação para Simulação e Avaliação das Concentrações de Ozônio Troposférico em Regiões Urbanas”, são apresentadas neste trabalho. Esse projeto tem como objetivo principal implantar de forma operacional na CETESB, um modelo fotoquímico euleriano que descreva as condições de formação e transporte de oxidantes fotoquímicos, como o O<sub>3</sub>, na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Entre os objetivos específicos pode-se citar: análise do impacto do uso de diferentes combustíveis na qualidade do ar urbano; aperfeiçoamento do diagnóstico ambiental, identificação dos locais de máximas concentrações de ozônio na região.

---

1- Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG – USP

2- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

3- CETESB – Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental

Ao final do projeto, como benefícios futuros, o modelo poderá ser uma ferramenta importante para o estabelecimento de políticas de monitoramento, controle e licenciamento ambiental pela CETESB, tais como: prevendo a qualidade do ar com relação ao poluente ozônio, identificando a possibilidade de ocorrência de episódios críticos; identificando as políticas mais eficazes de redução do ozônio a partir do controle de seus precursores emitidos por fontes móveis e fixas; auxiliando no planejamento da rede de estações de monitoramento do ozônio e de seus precursores na região; auxiliando no planejamento urbano através da elaboração de cenários futuros; e auxiliando nas políticas e estudos relacionados à saúde pública.

O projeto de políticas públicas tem como eixo central o uso de modelos de qualidade do ar, cujas maiores incertezas estão associadas com a representação das fontes de emissão dos precursores de oxidantes fotoquímicos e a representação do transporte na Camada Limite Planetária. Essas duas vertentes estão sendo atacadas com a melhoria do inventário de emissões (a partir de medidas em túneis) e com a realização de um experimento para fornecimento de dados para a calibração do modelo (as sondagens). Esse experimento envolve medidas em superfície dos poluentes, medidas em altitude de ozônio e de parâmetros meteorológicos como vento, temperatura e umidade relativa. A parte experimental de sondagem atmosférica tem como metas: i-) verificação da acurácia dos modelos em representar os campos de ozônio, ii-) entender os processos de transporte do ozônio entre diferentes níveis e de camadas mais elevadas para a superfície. O primeiro experimento de sondagens foi realizado entre 15 e 18 de maio de 2006, constituindo na base de dados que será analisada neste trabalho.

O Departamento de Ciências Atmosféricas encontra-se envolvido no entendimento da formação do ozônio troposférico em São Paulo através da abordagem de aplicação de um modelo de qualidade do ar. Os resultados da modelagem somente podiam ser validados através da comparação com dados de medida em superfície, mas ainda há a falta de avaliação dos perfis verticais dos poluentes. Estudos utilizando modelos eulerianos de formação de oxidantes fotoquímicos em São Paulo, iniciaram-se em 1994 e resultados têm sido publicados em congressos e periódicos nacionais e internacionais.

Os primeiros trabalhos concentraram-se na simulação da formação de ozônio durante os eventos medidos em experimentos meteorológicos realizados em 1989 (Andrade et al., 1996 e Cardoso, 1998). Várias dissertações foram realizadas por alunos de mestrado – Ynoue (1999) implementou os campos meteorológicos prognósticos extraídos do modelo de mesoscala RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) no modelo fotoquímico; Martins (2002) avaliou o impacto das emissões biogênicas de compostos orgânicos voláteis na formação do ozônio na RMSP e Borges (2003) estudou o impacto de aumento da resolução espacial (de 5x5km para 3x3 km) do modelo fotoquímico na representação das concentrações de ozônio. Ynoue (2004) introduziu um módulo de descrição de formação e crescimento de aerossóis secundários no modelo fotoquímico CIT. Martins (2006) avaliou a reatividade de compostos orgânicos voláteis (COVs) emitidos da queima de combustível para a formação do ozônio na RMSP, tendo como metodologia a amostragem desses compostos em túneis e a modelagem com o modelo fotoquímico. Vários trabalhos têm sido publicados relacionados ao entendimento da formação do ozônio: Ulke e Andrade (2001) estudaram a parametrização da turbulência no modelo CIT, Andrade et al. (2004) estudaram o inventário das emissões de NO<sub>x</sub> na RMSP a partir da avaliação da concentração de ozônio; Freitas et al. (2005) avaliaram a inclusão de um módulo químico simplificado no modelo meteorológico RAMS para representação da concentração de ozônio, Sanchez-Ccoyllo et al. (2005) avaliaram o impacto do PROCONVE (Programa

Controle de Veículos Automotores) para a formação dos oxidantes fotoquímicos. Vivanco e Andrade (2006) verificaram o inventário oficial para os precursores do ozônio para a RMSP.

Deve-se ainda destacar que com os estudos realizados tornou-se clara a necessidade de um melhor conhecimento do inventário de emissões para a região metropolitana de São Paulo, tanto a especificação dos hidrocarbonetos quanto a distribuição espacial das fontes móveis. Para suprir essas informações, foram elaborados experimentos de amostragem de compostos orgânicos voláteis e material particulado em túneis com a colaboração de outros grupos de pesquisa envolvidos nessas questões (Martins et al., 2006).

Em um levantamento de dados de ozônio realizado com medidas a bordo do avião Bandeirante do INPE, em agosto de 1999, foi observado que podem ser detectadas altas concentrações de ozônio à medida que se afasta da área urbana, e em camadas mais elevadas. Esse processo pode ser explicado pela mudança na razão COV para NO<sub>x</sub> que ocorre à medida que o ar se desloca e o NO<sub>x</sub> apresenta reatividade mais alta que os COVs. É interessante observar que nas sondagens realizadas existe um aumento da concentração de ozônio em altitude na camada limite planetária, tanto nas sondagens realizadas no período diurno quanto noturno.

## 2. Metodologia:

### 2.1 Experimental:

Foram realizadas sondagens a cada 6 horas durante quatro dias e duas noites com sondas de ozônio lançadas do IAG cidade Universitária (coordenadas 23,559°S 46,733°O). Os lançamentos e recepção dos dados foram realizados pelo grupo de ozônio do INPE, com a coordenação da Dr. Neusa Paes Leme. Na tabela 1 são apresentadas as datas e horários de lançamento e o alcance das sondas.

Tabela 1. Datas e horários de lançamentos das sondas de ozônio na Cidade Universitária e alcance aproximado.

SONDA	DATA/HORA LOCAL	ALCANCE
SP1505F	15/05/06 – 14:50h	11,5 km
SP1505F1	15/05/06- 21:18h	21,5 km
SP1605F	16/05/06 – 05:00h	3 km
SP1605F1	16/05/06- 14:30h	30 km
SP1605F2	16/05/06 – 18:00h	30 km
SP1705F	17/05/06 – 00:50h	31 km
SP1705F1	17/05/06 – 10:50h	7,5 km
SP1705F2	17/05/06 – 14:50h	7,0 km
SP1805F	18/05/06 – 6:00h	32 km
SP1805F1	18/05/06 – 11:00h	32 km

A sondagem consistiu no lançamento de uma sonda que envia para um receptor em superfície os dados de concentração de ozônio e de outros parâmetros meteorológicos: temperatura, pressão, e umidade relativa. Os lançamentos foram realizados no terraço do Edifício Principal do IAG, campus da Cidade Universitária.

As Ozoniosondas ECC (Electrochemical Concentration Cell), têm sido usadas em várias partes do mundo desde 1960 para fornecer dados de densidade de ozônio em função da altura da superfície até cerca de 35 Km. A ozoniosonda é lançada num

pequeno balão, sendo um equipamento desenvolvido pela NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration. O sensor consiste de uma pequena célula com dois eletrodos de platina imersos em uma solução de iodeto de potássio, numa câmara de cátodo e ânodo. Quando o ar contendo  $O_3$  é bombeado para dentro do cátodo, uma corrente elétrica é gerada e convertida em um sinal compatível com radiosondas meteorológicas padrões, de modo que ambos os dados de  $O_3$  e meteorológicos são transmitidos para uma estação receptora. As radiosondas meteorológicas contêm sensores meteorológicos, os quais fornecem medidas de pressão, de temperatura e umidade. Estudos detalhados sobre a precisão da ozoniosonda ECC foram realizados por (Torres e Bandy, 1978; Barnes et al., 1985).

Exemplos de resultados desses lançamentos podem ser observados na Figura 1.

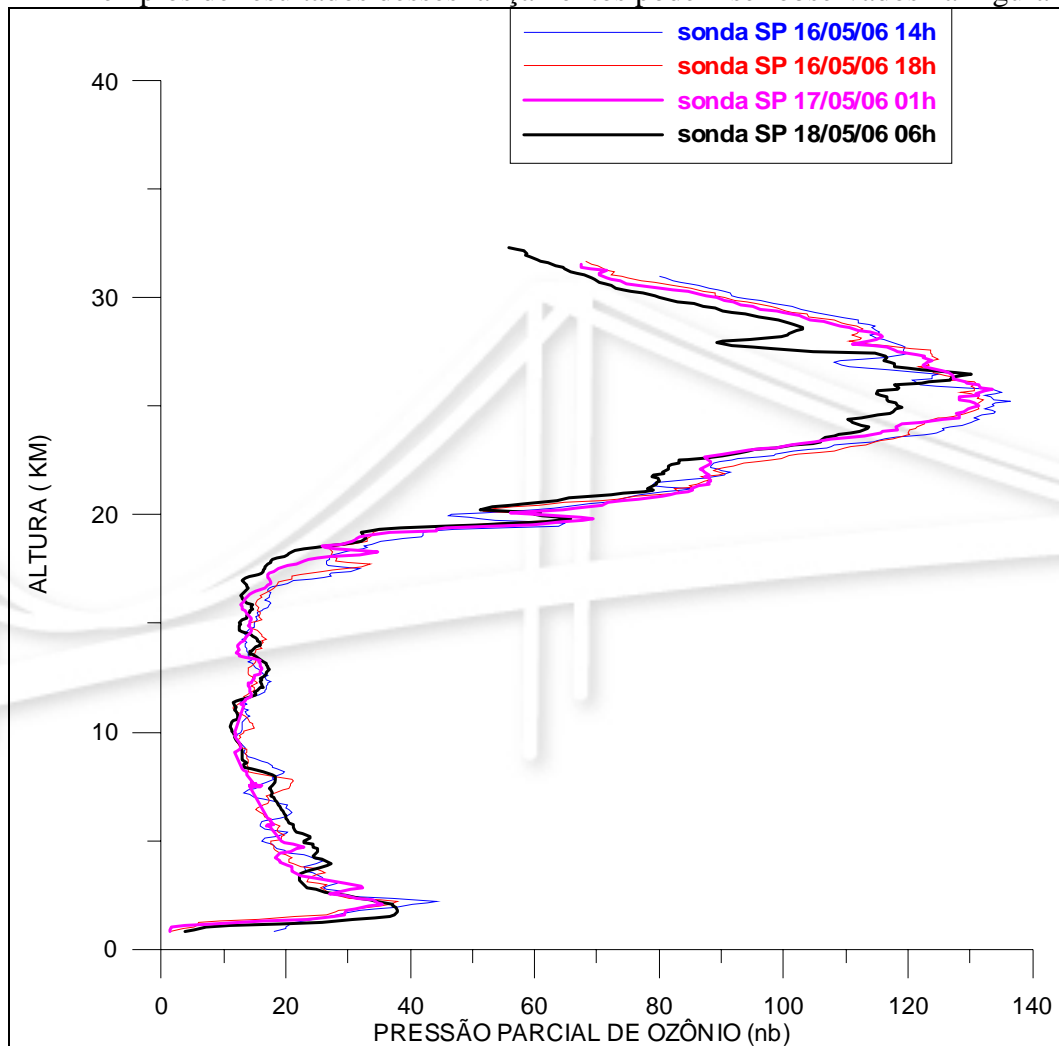


Figura 1 – Perfil vertical do ozônio obtido nas sondagens realizadas na Cidade Universitária, em 17 e 18 de maio de 2006.

A partir desses dados de sondagem de ozônio estão sendo realizados estudos que estão sendo apresentados neste congresso: análise do transporte na Camada Limite Planetária por Pinheiro e colaboradores, determinação das trajetórias em diversos níveis por Vasconcellos e colaboradores. Com relação à análise dos dados de sondagem meteorológica temos, também, a apresentação dos trabalhos de Silva Júnior e colaboradores utilizando o WRF e a comparação com a variação da camada limite a partir do perfil vertical do LIDAR obtido por Landulfo e colaboradores.

## 2.2 O modelo de qualidade do ar

Para estudo da formação de ozônio e outros oxidantes fotoquímicos na atmosfera está sendo utilizado o modelo euleriano fotoquímico CIT, desenvolvido no California Institute of Technology e Carnegie Mellon University. O modelo CIT inclui os mecanismos de reações fotoquímicas, difusão turbulenta, processos de remoção na superfície, técnicas de solução numérica e procedimentos de análise objetiva (McRae et al., 1982; Harley et al., 1993). Esse modelo calcula a distribuição de qualidade do ar em uma região resolvendo a equação de conservação das espécies para um sistema reagente.

O modelo de qualidade do ar contém a representação dos seguintes fenômenos: emissões dos precursores (especialização dos compostos orgânicos voláteis, CO e NO<sub>x</sub>) são inseridas como input dos modelos; transporte dos poluentes (o modelo necessita da preparação de campos tri-dimensionais para velocidade e direção do vento, para cada ponto da grade); difusão turbulenta (os poluentes estão sujeitos aos processos de dispersão relacionados com a turbulência); reações químicas (um mecanismo de cinética química representando as importantes reações atmosféricas envolvendo compostos orgânicos reativos e NO<sub>x</sub>); processos de remoção (os poluentes são removidos da atmosfera via interações com superfícies, e pela precipitação).

## 2.3 Modelagem dos campos meteorológicos

No projeto estão sendo considerados dois modelos meteorológicos para geração dos campos prognósticos e diagnósticos – o modelo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) e o modelo MM5 (Mesoscale Model Version 5). Também estão sendo realizadas análises dos transportes de parcelas de ar com modelos de trajetórias.

O RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) foi desenvolvido pela Universidade do Estado do Colorado, nos Estados Unidos (Trípoli e Cotton, 1982; Mahrer e Pielke, 1977; Walko et al., 2000), e teve várias implementações realizadas no Departamento de Ciências Atmosféricas, desenvolvendo um grupo de especialistas no modelo. O modelo incorpora o conjunto completo das equações primitivas que governam o movimento da atmosfera, possuindo parametrizações dos diversos processos físicos presentes nestas equações. O código é dividido em módulos, de modo que a evolução temporal das quantidades físicas simuladas é obtida a partir da contribuição individual de cada processo físico. O modelo RAMS é rodado de forma operacional no MASTER (Meteorologia aplicada aos sistemas de tempo regionais) do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG. As trajetórias serão obtidas a partir dos campos de vento simulados com o RAMS na resolução de 5 km para comparação com a trajetória das sondas.

## 5. Referências:

- Andrade, M.F., Ynoue, R.Y., Harley, R., Miguel, A.H. (2004). Air-Quality Model Simulating Photochemical Formation of Pollutants: the São Paulo Metropolitan Area, Brazil. *International Journal of Environment and Pollution*, 22, no 4, 460-475.
- Barnes, R. A. et al. (1985). Electrochemical Concentration Cell Ozone Sonde Accuracy and Precision. *Journal of Geophysical Research*, v. 90, n. D5. pp. 7881-7887.
- Borges, A. S. (2003). Impacto do Refinamento da Grade Horizontal do Modelo Fotoquímico CIT nas Estimativas de Concentrações de Poluentes Atmosféricos.

- Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico e Geofísico – Universidade de São Paulo.
- Cardoso, M. F. (1997). Produção e Transporte de Ozônio Troposférico em Cubatão, São Paulo, Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico e Geofísico – Universidade de São Paulo.
- CETESB (2006). Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo em 2005.
- Freitas E. D., Martins L. D., Silva Dias P. L., Andrade M. F. (2005): A simple photochemical module implemented in RAMS for tropospheric ozone concentration forecast in the Metropolitan Area of São Paulo - Brazil: Coupling and validation. *Atmospheric Environment*. 39(34), 6352-6361.
- Martins L. D. (2002). Estimativas do Impacto das Emissões de Hidrocarbonetos pela Vegetação na Formação de Oxidantes Fotoquímicos em São Paulo, Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico e Geofísico – Universidade de São Paulo.
- Martins L.D., Andrade M.F., Freitas E.D., Pretto A., Gatti L.V., Albuquerque E.L., Tomaz E., Guardani M.L., Martins M.H.R., Junior O. M.A. (2006) Emission Factors for Gas-Powered Vehicles Traveling through Road Tunnels in São Paulo, Brazil. Aceito para publicação *Environmental Science and Technology*.
- Plaza J., Pujadas M. & Artinano B. (1997). Formation and transport of the Madrid Ozone Pluma. *Air & Waste Management Association*, 47: 766-774.
- Sanchez-Ccoyllo O.R., Andrade M.F. (2002): The influence of meteorological conditions on the behavior of pollution concentration in São Paulo, Brazil. *Environmental Pollution*, v. 116, pp. 257–263.
- Sánchez-Ccoyllo O.R., Silva Dias P.L., Andrade M.F., Freitas S.R., (2006): Determination of O<sub>3</sub>, CO and PM<sub>10</sub> transport in the metropolitan area of São Paulo, Brazil through synoptic-scale analysis of back trajectories. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 92, 83-93.
- Ulke G., Andrade M.F. (2001): Modeling urban air pollution in São Paulo: sensitivity of model predicted concentrations to different turbulence parameterizations. *Atmospheric Environment*, V 35 (10), pp. 1747-1763.
- Vivanco M. G. & Andrade M. F. (2006): Validation of the emission inventory in Sao Paulo Metropolitan Area of Brazil, based on ambient concentrations ratios of CO, NMOG and NO<sub>x</sub> and on a photochemical model. *Atmospheric Environment*, 40, 1189-1198.
- Ynoue R. (2004): Modelagem Numérica da Formação, Crescimento e Transporte das Partículas Inorgânicas Secundárias Constituintes do Aerossol Urbano na Região Metropolitana de São Paulo. Tese apresentada ao IAG para obtenção do título de doutor em ciências.
- Ynoue, R. Y. (1999). O impacto do Uso de Campos Meteorológicos Diagnósticos e Prognósticos na Produção e Dispersão dos Oxidantes Fotoquímicos em São Paulo, Dissertação de mestrado, Instituto Astronômico e Geofísico – Universidade de São Paulo.

## **AGRADECIMENTOS**

À FAPESP (financiadora do projeto de Políticas Públicas 03/06414-0); ao Laboratório de Ozônio do INPE; à toda equipe de profissionais e pesquisadores do Laboratório de Análise de Processos Atmosféricos (LAPAt-IAG/USP).