

O efeito da camada de mistura na poluição do ar

Silvio de Oliveira¹

RESUMO A partir de dados de radiossonda, coletados num período de três anos (1976-1978), estudou-se a evolução da altura média da camada de mistura durante os meses de inverno, e a sua influência na concentração do dióxido de enxofre (SO_2) e do material particulado (MP). Os dados de qualidade do ar, medidos na área metropolitana da Grande São Paulo foram usados para determinar diversos coeficientes de correlação de várias equações de regressão. Verificou-se que o melhor ajuste foi obtido com uma equação de regressão parabólica. Observou-se, também, que o mês de julho foi o mais crítico para o aumento da concentração de SO_2 e do MP.

Palavra-Chave: Radiossonda, Altura da Mistura, Fumigação, Dispersão Atmosférica.

ABSTRACT From the data collected by radiosonde during a period of three years (1976-1978), the average height evolution of the mixing layer during the winter months and its influence on the concentration of the sulphur dioxide and particulate matter have been studied. The air quality data, measured in São Paulo Metropolitan area, were used to determine coefficients of correlation of various regression equations. It was noted that the best adjustment was obtained with parabolic fit. It was also observed that the most critical increase of the sulphur dioxide and particulate matter concentration occurred in July.

Key words: Radiosonde, Mixing height, Fumigation, Atmospheric Dispersion.

Nos meses de verão, na parte da tarde, a transferência de calor da superfície do solo para a atmosfera estabelece a formação de correntes convectivas que provocam intensa mistura na vertical, formando uma camada cuja extensão depende da temperatura inicial, podendo atingir alturas elevadas. Na latitude de São Paulo, a intensa insolação neste período tende a expandir o volume de ar disponível para a diluição dos poluentes na troposfera inferior.



Nos meses de inverno esse processo é inibido devido à excessiva estabilidade atmosférica dominante nesta época do ano (Oliveira e Ferrari²).

A espessura da camada de mistura, também denominada altura de mistura, exerce grande influência na concentração do dióxido de enxofre (SO_2) e do material particulado (MP), sendo que quanto menor ou mais baixa, mais críticas se tornam as condições da qualidade do ar.

Segundo Slade, a propriedade física do ar que governa a dispersão e diluição dos contaminantes é a turbulência. O movimento médio do ar indica a transferência de poluentes de uma região para outra e a flutuação turbulenta determina a diluição dos mesmos, enquanto se deslocam no ar. Portanto, a dispersão da poluição depende dos processos naturais de mistura em diversas escalas do movimento, espacial e temporal. (Pasquill e Smith³). Os parâmetros meteorológicos medidos na área metropolitana de São Paulo, que combinados podem ser utilizados como elementos indicadores da turbulência, são: o vento de superfície; a camada de inversão térmica; o perfil térmico vertical e a temperatura da superfície. A combinação desses parâmetros define o volume de ar disponível sobre a região urbana, onde as fontes emitem os poluentes. Dada a complexidade do estudo simultâneo entre todos os parâmetros meteorológicos e a qualidade do ar, selecionou-se a altura média da camada da mistura, por

¹ Meteorologista — Mestre pelo Instituto de Pesquisas Espaciais — Diretor do 7.º Distrito do Instituto Nacional de Meteorologia.

existir uma defasagem entre os períodos horários da amostragem da concentração média dos poluentes e aqueles das duas radiossondagens diárias. A medição da concentração dos poluentes é contínua para reproduzir médias de 24 horas e, com isso, seu início e seu término diferem daqueles dos lançamentos das radiossondas já mencionados. Portanto, foi necessário estabelecer um ajuste no levantamento dos dados, para se obter a altura média diária de mistura compatibilizada com os horários da coleta dos dados da qualidade do ar, conforme é mostrado na **Figura 2**.

Para a determinação da altura média da camada de mistura, foram usados três anos de dados diários de radiossondagens referentes aos meses de maio a agosto de 1976 a 1978, obtidos no Aeroporto de Congonhas, em São Paulo, cuja Estação Meteorológica está localizada a 23°03' de latitude Sul e 46°37' de longitude Oeste, e a 802m de altitude. As radiossondagens, realizadas pela Força Aérea Brasileira, são feitas normalmente nos horários de 12 TMG (9h de Brasília) e 00h TMG (21h de Brasília).

Para se obter a altura média de mistura que reproduzisse um ciclo médio de 24 horas, procedeu-se da seguinte forma: adotou-se como altura mínima da camada de mistura, na parte da manhã (9h), a altura das bases das primeiras inversões nos perfis de temperatura referentes às radiossondagens das 21h do dia anterior e a das 9h do dia considerado. A altura máxima de mistura na parte da tarde (15h) foi calculada a partir da temperatura máxima, estimada segundo os critérios de Holzworth¹, completando assim um período de dados de 24 horas. A altura média foi obtida da média desses valores.

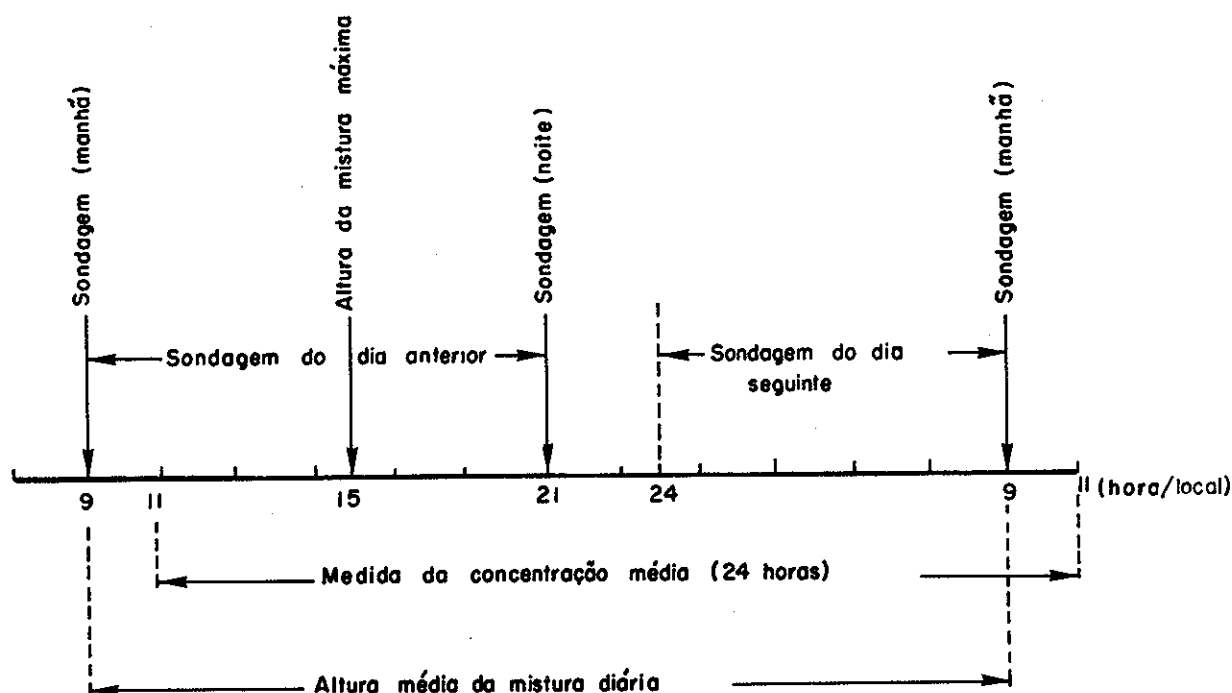
Na análise desses dados foram utilizados apenas os dias sem precipitação, que são dias cuja evolução na coluna atmosférica é considerada ser adiabática seca e a resposta do aumento da concentração se faz mais rapidamente devido à predominância das condições atmosféricas estáveis, Holzworth¹.

The map displays the São Paulo metropolitan area with 14 numbered stations and surrounding municipalities. The stations are numbered 1 through 14, and the municipalities are labeled with their names. The stations are located in the following municipalities: 1 (Aclimação) in São Paulo; 2 (Campos Elíseos) in São Paulo; 3 (Cerqueira César) in São Paulo; 4 (Moema) in São Paulo; 5 (Pq da República) in São Paulo; 6 (Tatuapé) in São Paulo; 7 (Vila Anastácio) in São Paulo; 8 (Cap. Residencial) in Santo André; 9 (Cap. Industrial) in Santo André; 10 (Guarulhos) in Guarulhos; 11 (Osasco) in Osasco; 12 (S. Caetano do Sul) in São Caetano do Sul; 13 (Santo André) in Santo André; 14 (Pinheiros) in São Paulo.

ESTACIONES

① ACLIMAÇÃO	⑧ CAP. RESIDENCIAL
② CAMPOS ELÍSEOS	⑨ CAP. INDUSTRIAL
③ CERQUEIRA CESAR	⑩ GUARULHOS
④ MOEMA	⑪ OSASCO
⑤ Pq DA REPÚBLICA	⑫ S. CAETANO DO SUL
⑥ TATUAPÉ	⑬ SANTO ANDRÉ
⑦ VILA ANASTÁCIO	⑭ PINHEIROS

Figura 2 — Horários de lançamentos da radiossondagem, da ocorrência da altura da mistura máxima, da medida da concentração média dos poluentes e do período da altura média da mistura.



Equações de Regressão

O objetivo de testar diversas equações de regressões foi o de obter a melhor estatística sobre a relação entre a altura média da mistura e a qualidade do ar, ou seja, determinar uma equação de regressão que represente um bom ajuste, tanto para o SO_2 como para o MP. Para tanto, foram calculadas várias regressões cujos coeficientes de correlação estão sumarizados na Tabela 1. O melhor ajuste dos mínimos quadrados foi obtido com a equação de regressão parabólica. Neste cálculo de correlação foram utilizados os valores de altura máxima da camada de mistura, abaixo do nível de 700mb (ou 2.200m), em São Paulo.

RESULTADOS

As Figuras 3 e 4 apresentam as observações individuais usadas no desenvolvimento das equações de regressão, e os limites de confiança de 90% para as relações entre a altura média da mistura (H) e a qualidade do ar.

Nas Figuras 3 e 4, observou-se que, mantendo a altura média da camada de 900m, o valor da concentração de SO_2 é 50% maior do que o do MP. Essa porcentagem cai para 25% quando se reduz a altura da camada para 200m. Portanto, para qualquer nível, o efeito da camada média sobre o SO_2 é sempre maior do que para o MP.

Existem alguns fatores que determinam a diferença do efeito da altura média da mistura sobre o SO_2 e o MP. Na ausência de ventilação, abaixo da altura mínima da camada de mistura no período noturno e matutino, os

gases lançados continuamente ocupam todo o espaço entre o topo da camada e a superfície, encontrando um ambiente favorável para aumentar a concentração. No horário da sondagem da manhã, às 9 horas local, a superfície está se aquecendo pela radiação solar que produz completa mistura convectiva na atmosfera inferior, iniciando o fenômeno da fumigação. Com isto, a concentração dos gases aumenta mais rapidamente do que a das partículas que se mantêm muito perto do chão, dentro de uma lâmina de ar, onde o transporte do calor dominante é por movimentos turbulentos, mecanicamente induzidos. No entanto, embora persistindo todas as condições anteriormente relatadas, mas na presença de ventilação, e principalmente se houver rajadas de vento muito fortes, os gases serão arrastados e dispersados mais facilmente. A poeira, ao contrário, será turbilhonada e levantada da superfície, provocando uma nuvem de partícula, limitada entre o topo da camada de mistura e a superfície, acusando, nos amostradores, valores elevados de concentração de partículas, superiores aos estabelecidos no padrão permitido por lei. Este padrão é de $240 \mu\text{g m}^{-3}$ para poeira total, e de $365 \mu\text{g m}^{-3}$ para o dióxido de enxofre.

Para o presente trabalho, considerou-se preferencialmente a época do inverno, onde, nos períodos prolongados de anticiclones estacionários, ocorre calmaria — ausência de ventilação com porcentagem superior a 50% —, o que justifica o maior efeito da altura média da camada de mistura sobre o SO_2 do que sobre o MP.

Após verificar-se a influência direta da altura média da mistura sobre a qualidade do ar, procurou-se analisar os dados a nível médio mensal, para se detectar qual o mês mais crítico para dispersão. Os resultados são mos-

Figura 3 — Relação entre a altura média da camada de mistura e a concentração média do dióxido de enxofre no período do inverno 1976 a 1978, em São Paulo.

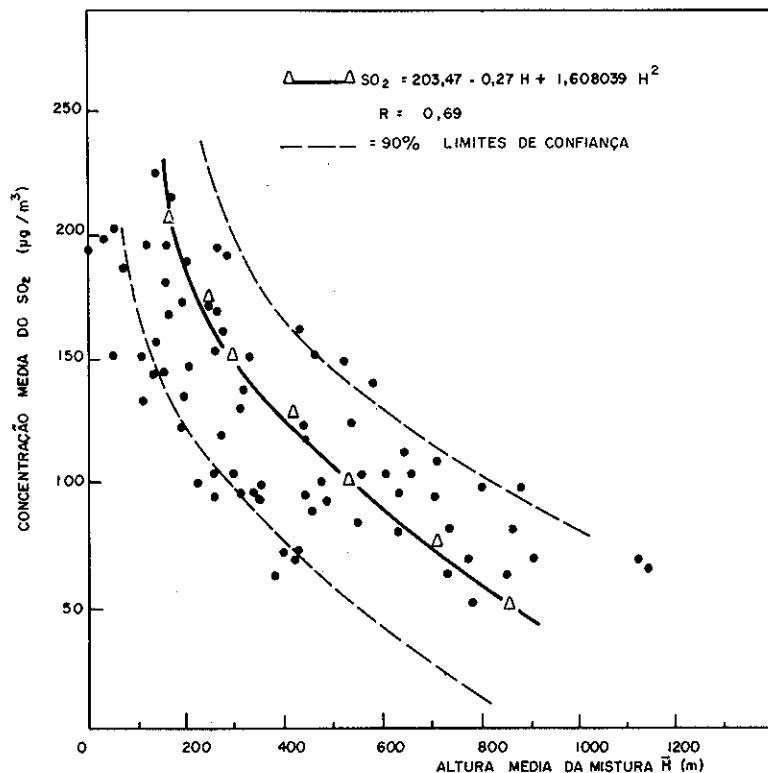


Figura 4 — Relação entre a altura média da camada e a concentração média do material particulado no período de 1976 a 1978, em São Paulo.

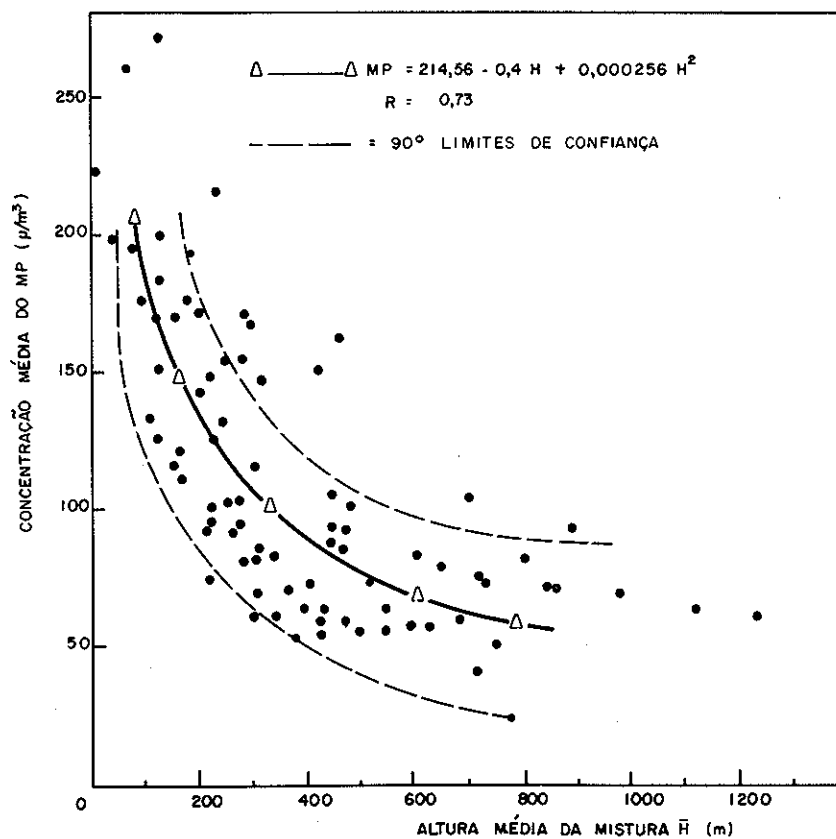
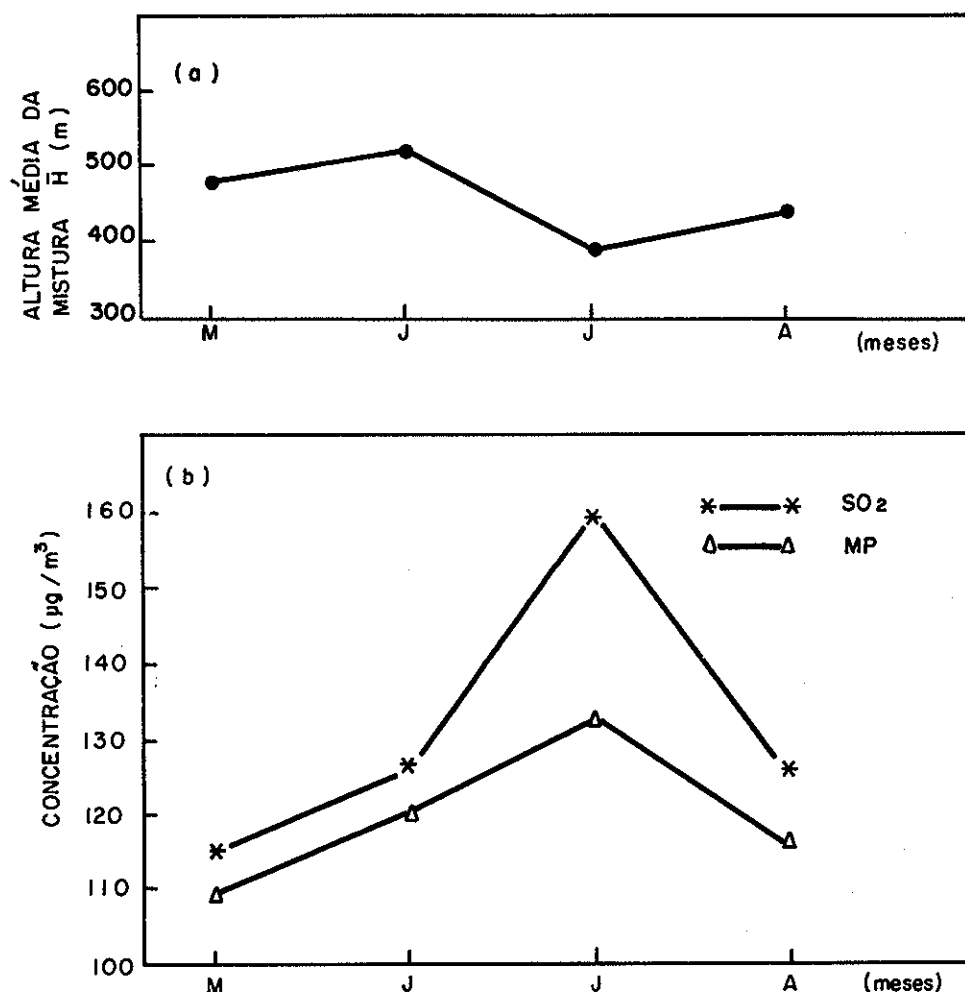


Figura 5 — Comparação entre a altura média mensal da mistura (a); e a concentração média dos poluentes MP, SO_2 (b). Período de inverno de 1976 a 1978, em São Paulo.



trados na Figura 5, onde pode-se observar que, em qualquer mês, os valores de SO_2 foram sempre superiores aos do MP.

O mês de julho mostrou ser o mais crítico, com a maior concentração de poluentes no período estudado. Nesse mês, a concentração do SO_2 foi 15% maior do que a do MP, por razões já descritas anteriormente. Para se obter o melhor grau de certeza sobre os resultados anteriores, seria conveniente analisar outras variáveis meteorológicas para chegar a conclusões mais apuradas. Entretanto não sendo o objetivo do presente estudo estender a análise com outros parâmetros meteorológicos, se restringe apenas ao efeito da altura média da camada da mistura sobre a concentração média dos poluentes. Portanto, à luz dos resultados, ficou patente que o mês de julho se mostrou ser o mais crítico para dispersão, quando se considera apenas o parâmetro em estudo.

CONCLUSÕES:

A altura média foi correlacionada com os dados médios da qualidade do ar e obteve-se o melhor ajuste atra-

vés da equação de regressão parabólica. Deste resultado, verificou-se que o SO_2 é mais sensível aos efeitos da camada da mistura do que o material particulado.

Dos meses de inverno, o mais crítico é o de julho, onde a camada da mistura tem sua menor altura média.

O estudo da qualidade do ar com outras variáveis meteorológicas seria importante para se visualizar outros efeitos físicos que interagem no processo de dispersão. Entretanto, a extensão desta análise não faz parte do escopo essencial da presente investigação.

Ficou patente que a camada de mistura exerce um efeito bastante significativo sobre a qualidade do ar. Os resultados aqui alcançados demonstraram a necessidade de se utilizar esse parâmetro na previsão diária de potencial de poluição do ar. Portanto, a equação parabólica aqui encontrada poderá ser mais uma ferramenta importante na previsão diária, em dias críticos, para se estimar o aumento percentual do SO_2 e do MP, em função da altura média da mistura. Os resultados advindos do uso desta regressão, quando comparados com os resultantes das medições através das estações de amostragem, têm sido bastante satisfatórios.

REFERÊNCIAS

1. Holzworth, G.C. 1976. Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States. *J. of Appl. Meteor.*, 6:1039-1044.
2. Oliveira, S. de & Ferrari, C.M.D. 1984. A intensidade das inversões térmicas e a sua influência sobre a qualidade do ar. 36.ª Reunião Anual da SBPC, 4 a 11 de julho de 1984.
3. Pasquill, F. & Smith, F.B. 1983. *Atmospheric Diffusion* (3rd ed.). Ellis Horwood Ltd., Chichester, New York, p. 237.
4. Slade, D.H. (ed.). 1968. *Meteorology and Atomic Energy*. U.S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tenn.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Professor Paulo Marques dos Santos, do IAG-USP, pela colaboração do texto e à datilógrafa Solange Maria da Cruz pela datilografia. À desenhista Marisa Cury, pelas ilustrações das figuras; e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, tiveram sua participação neste trabalho.

Tabela 1 — Resumo das equações de regressão entre a altura da mistura média e a concentração média diária do SO_2 e do MP na Grande São Paulo — Inverno 1976/1978.

Regressão	Função	Coefficiente de correlação
parabólica	$MP = f(H)$	0,73
	$SO_2 = f(H)$	0,69
	$MP \cdot SO_2 = f(H)$	0,66
exponencial	$SO_2 = f(H T)$	0,62
	$MP = f(H T)$	0,61
potencial	$SO_2 = f(H)$	0,61
linear	$SO_2 \bullet f(H)$	0,53
	$MP = f(H)$	0,50
linear	$SO_2 = f(H T)$	0,51
múltipla	$MP = f(H T)$	0,40

