

1. Classificação <i>INPE-COM.4/RPE</i> <i>C.D.U.: 551.510.42(816.12)</i>		2. Período	4. Distribuição
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor) <i>DISPERSÃO ATMOSFÉRICA; POLUIÇÃO DO AR;</i> <i>VALE DO PARAÍBA</i>			interna <input type="checkbox"/> externa <input checked="" type="checkbox"/>
5. Relatório nº <i>INPE-1890-RPE/233</i>	6. Data <i>Setembro, 1980</i>	7. Revisado por <i>Marco Antonio M. Lemes</i>	
8. Título e Sub-Título <i>CONSIDERAÇÕES SOBRE A DISPERSÃO DE POLUENTES</i> <i>ATMOSFÉRICOS NO MÉDIO VALE DO PARAÍBA, COM</i> <i>ÊNFASE À CAÇAPAVA</i>		9. Autorizado por <i>Nelson de Jesus Parada</i> Diretor	
10. Setor <i>DME</i>	Código	11. Nº de cópias <i>03</i>	
12. Autoria <i>Luiz Carlos Baldicero Molion</i>		14. Nº de páginas <i>24</i>	
13. Assinatura Responsável 		15. Preço	
16. Sumário/Notas <i>A poluição atmosférica no Médio Vale do Rio Paraíba agrava-se dia a dia com a crescente industrialização. Neste trabalho, foram feitas considerações sobre as circulações de macro, meso e microescalas, e suas interações, que estabelecem as condições de dispersão no Vale. Observou-se que as condições de calma e de estabilidade predominam durante o ano. Para a região de Caçapava, estimaram-se concentrações de particulados, emitidos por indústria de processamento de sucata de chumbo, utilizando-se o modelo gaussiano. As dosagens estimadas foram cerca de 4 vezes superiores ao padrão estabelecido pela Organização Mundial de Saúde. Evidenciaram-se, também, as limitações do modelo utilizado.</i>			
17. Observações			

ABSTRACT

The atmospheric pollution in the Mid-Paraíba River Valley is becoming worse with the increasing rate of industrialization. In this paper, the macro, meso and microscale atmospheric systems, which control the dispersion of pollutants over the Valley, are described. It was observed that calm and stable conditions are dominant throughout the year. For the Caçapava region, concentration of lead particulates, emitted by a large secondary smelter, were estimated, using the Gaussian model. The estimated dosages were about 4 times higher than the standards of the World Health Organization. The limitations of the model are, also, considered.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	<i>iv</i>
LISTA DE TABELAS	<i>v</i>
1. INTRODUÇÃO	1
2. CLIMATOLOGIA DA CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA SOBRE O VALE DO RIO PARAÍBA	1
2.1 - Circulação atmosférica de grande escala	2
2.2 - Circulação Atmosférica de mesoescala	6
2.3 - Circulação atmosférica de microescala	11
2.4 - Resumo	11
3. ALGUNS CÁLCULOS DE CONCENTRAÇÕES E DOSAGENS E SUAS LIMITAÇÕES	12
3.1 - Considerações sobre o modelo de Holland	14
4. CONCLUSÃO	18
AGRADECIMENTOS	18
REFERÊNCIAS	19

LISTA DE TABELAS

- 1 - Dados acumulados de frequência do vento - 1961 a 1970
Estação 83784 - Taubaté
Latitude: 23°01'S Longitude: 45°34'W
Frequência - %/10 anos 8

- 2 - Dados acumulados de frequência do vento - 1961 a 1970
Estação 83809 - S.J. Campos
Latitude: 23°11'S Longitude: 45°53'W 9

LISTA DE FIGURAS

- 1 - Cobertura de nuvens sobre a América do Sul, no meio da tarde. Há cinco graduações de escala de cinza com a seguinte correspondência em octas: preto: 0 a 2; cinza escuro: 3; cinza: 4; cinza claro: 5; branco: 6 a 8. Período da média: 1º de janeiro de 1967 a 31 de dezembro de 1970..... 4
- 2 - Precipitação média mensal no período de 1961 a 1970 para a cidade de São José dos Campos, SP. Note-se a estação seca bem definida durante os meses de abril a setembro..... 5
- 3 - Circulação atmosférica idealizada de um vale 7
- 4 - Seis topos de comportamento de pluma sob várias condições de estabilidade. As linhas tracejadas são a taxa de variação vertical da temperatura (TVVT) adiabática. As linhas sólidas são da TVVT do meio ambiente..... 13
- 5 - Distância de concentração máxima e mínima de $\chi U/Q$ em função de categorias de instabilidade (curvas) e altura efetiva (metros) de emissão (números)..... 16

1. INTRODUÇÃO

O objetivo do presente trabalho é estudar as condições de dispersão atmosférica da região de Caçapava. A cidade de Caçapava localiza-se no Vale do Rio Paraíba, um vale de direção NE-SW, com altitude variando de 500 a 600 m dentro do território paulista. À esquerda encontra-se a Serra da Mantiqueira, com elevações superiores a 2.000 m de altitude, e, à direita, as Serras do Mar e de Quebra Cangalha, com elevações superiores a 1.000 m de altitude. As condições de dispersão atmosférica de uma dada localidade dependem primeiramente da topografia e das condições meteorológicas predominantes, ou, mais precisamente, da circulação atmosférica em suas três escalas: macro, meso e microescalas, e da interação entre elas. Inicialmente, abordar-se-á a climatologia da circulação atmosférica sobre o Vale do Paraíba, tendo-se em vista os problemas de poluição atmosférica; em seguida, serão apresentados alguns cálculos de concentração, utilizando-se formulações encontradas na literatura mais recente.

2. CLIMATOLOGIA DA CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA SOBRE O VALE DO RIO PARAÍBA

Segundo o autor, não existem na literatura estudos sobre a circulação atmosférica sobre o Vale do Paraíba, os quais requerem não só dados meteorológicos de superfície, mas também dados da atmosfera superior, obtidos através de radiossondagens regulares. As estações de radiossondagens mais próximas são as de São Paulo (Aeroporto de Congonhas) e a do Rio de Janeiro (Aeroporto do Galeão), não havendo estações de radiossondagens no Vale. Essas estações só podem ser utilizadas para estudos de grande escala, tornando-se impossível uma descrição completa e detalhada da circulação sobre o Vale. Para a presente discussão, utilizaram-se imagens de satélites meteorológicos, recebidas no Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE/CNPq), e observações de superfície, no período de 1961 a 1970, coletadas pelas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET/MA). Utilizaram-se, também, dados de uma campanha de radiossondagens, feita na Estação Meteorológica de Cachoeira Paulista (pertencente ao INPE) a 80 km a nordeste de Caçapava, no período de 23/06/80 a 01/07/80. É importante registrar que Caçapava não possui nem mesmo uma estação meteorológica de superfície.

2.1 - CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA DE GRANDE ESCALA

A Circulação Geral da atmosfera é um dos principais fatores formadores do clima de uma região e regula, portanto, as circulações de escala menor. Os sistemas de grande escala que atuam sobre o Vale são os ciclones extratropicais migratórios, ou massas de ar polar, que se deslocam em direção ao equador (frentes frias). No inverno, a frequência de massas polares é maior; geralmente, antes da entrada de uma frente fria, o vento à superfície é do quadrante NW-NE, com temperaturas mais elevadas. Após a passagem da frente, o vento vira para o quadrante SW-SE e as temperaturas sofrem um declínio. Associados às massas de ar polar estão os sistemas de alta pressão (anticiclones polares) que se sucedem à passagem das frentes. Enquanto a passagem de frentes frias fornece boas condições para a dispersão de poluentes atmosféricos, a situação sinótica associada aos anticiclones polares é totalmente desfavorável à mesma, pois existem formações de inversões de radiação e de advecção, com ventos fracos.

A campanha de radiossondagens, realizada em Cachoeira Paulista de 23/06/80 a 01/07/80, mostrou uma situação típica de inverno. Após a passagem da frente fria, estabeleceu-se uma inversão de temperatura com base a cerca de 1.000 m de altura, altura essa que depende da intensidade da massa de ar polar. A atmosfera tornou-se estável e, os ventos eram fracos ou inexistentes (calmarias). Durante o dia, o céu claro (isto é, sem cobertura de nuvens) permitiu um aquecimento das camadas de ar próximas à superfície; esse aquecimento diurno, porém, não foi suficiente para quebrar a inversão frontal. À noite, com céu claro e calmaria, a superfície se resfriou devido à emissão de radiação terrestre para o espaço; formou-se então uma segunda inversão térmica, com base na superfície, e topo a uma altura aproximada de 300m, portanto abaixo da crista da Serra da Mantiqueira. Após alguns dias, a inversão frontal desapareceu, mas a da radiação esteve sempre presente durante as horas noturnas, a uma altura entre 200 a 500m, desaparecendo durante o dia, devido ao aquecimento da superfície.

No verão, a frequência de frentes frias é menor e estas apresentam menores contrastes de temperatura. Nessa estação, os movimentos convectivos predominam, devido ao forte aquecimento da superfície, permitindo uma maior mistura na baixa troposfera.

O verão é também a estação chuvosa e a atmosfera sofre "lavagens" constantes. Em alguns anos, tem ocorrido o "estacionamento" de uma frente fria sobre o Vale, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso. Kousky (comunicação pessoal) explica que este fenômeno está relacionado com a circulação geral da média e alta troposfera. Normalmente, o escoamento atinge a América do Sul entre 40°S e 50°S, e a baixa de pressão em altitude, reforçada pelo efeito topográfico dos Andes, tende a se posicionar sobre o oceano, próxima a 25°S. Porém, se o escoamento incide entre 30°S e 40°S, a baixa de pressão em altitude tende a se posicionar ao norte de 20°S, e a frente fria à superfície, associada a ela, permanece estacionária por um período de 2 a 6 semanas. Esse sistema, alimentado pelo ar tropical úmido, ocasiona precipitações contínuas sobre a região.

A Figura 1, extraída de Miller (1971), mostra a cobertura média de nuvens sobre a América do Sul no período de 1961 a 1970, feita a partir de imagens de satélites meteorológicos de órbita heliossíncrona. A média do verão (dezembro a fevereiro), centrada em janeiro, mostra que a região do Vale apresenta 6 a 8 oitavos de cobertura. A média de inverno, centrada em julho, indica que a cobertura de nuvens é bastante reduzida (3/8), sugerindo a não existência de movimentos convectivos, e, portanto, de condições desfavoráveis à dispersão atmosférica. A Figura 2 apresenta a distribuição mensal da precipitação média no período de 1961 a 1970, para a cidade de São José dos Campos, a 20 km a sudoeste de Caçapava, que pode ser considerada uma estação representativa da parte alta do Vale. Nota-se a estação seca bem definida (abril a setembro), coincidindo com as médias de cobertura de nuvens (Figura 1).

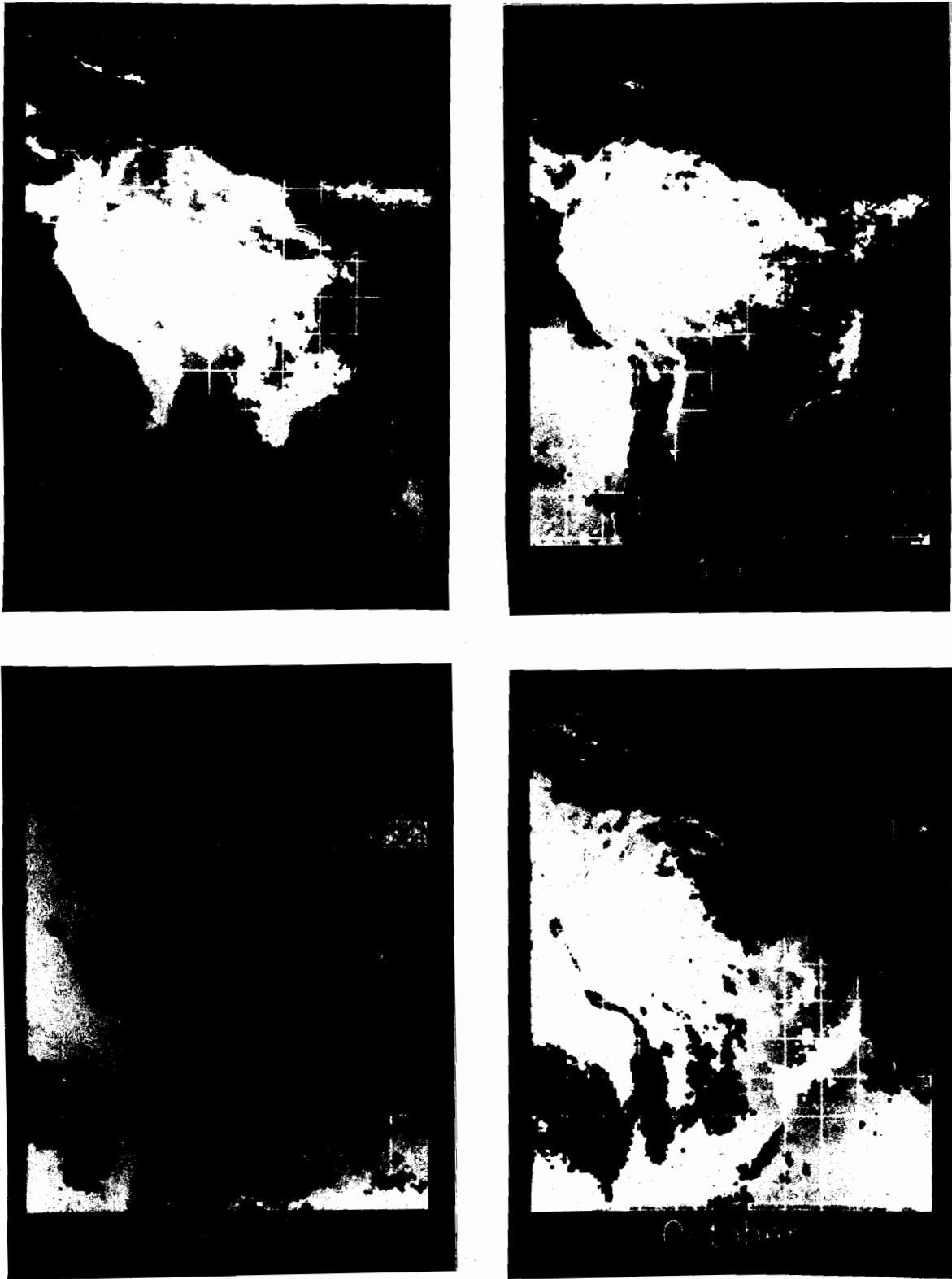


Fig. 1 - Cobertura de nuvens sobre a América do Sul, no meio da tarde. Há cinco graduações de escala de cinza com a seguinte correspondência em octas: preto: 0 a 2; cinza escuro: 3; cinza: 4; cinza claro: 5; branco: 6 a 8. Período da média: 1º de janeiro de 1967 a 31 de dezembro de 1970. Fonte: MILLER (1971).

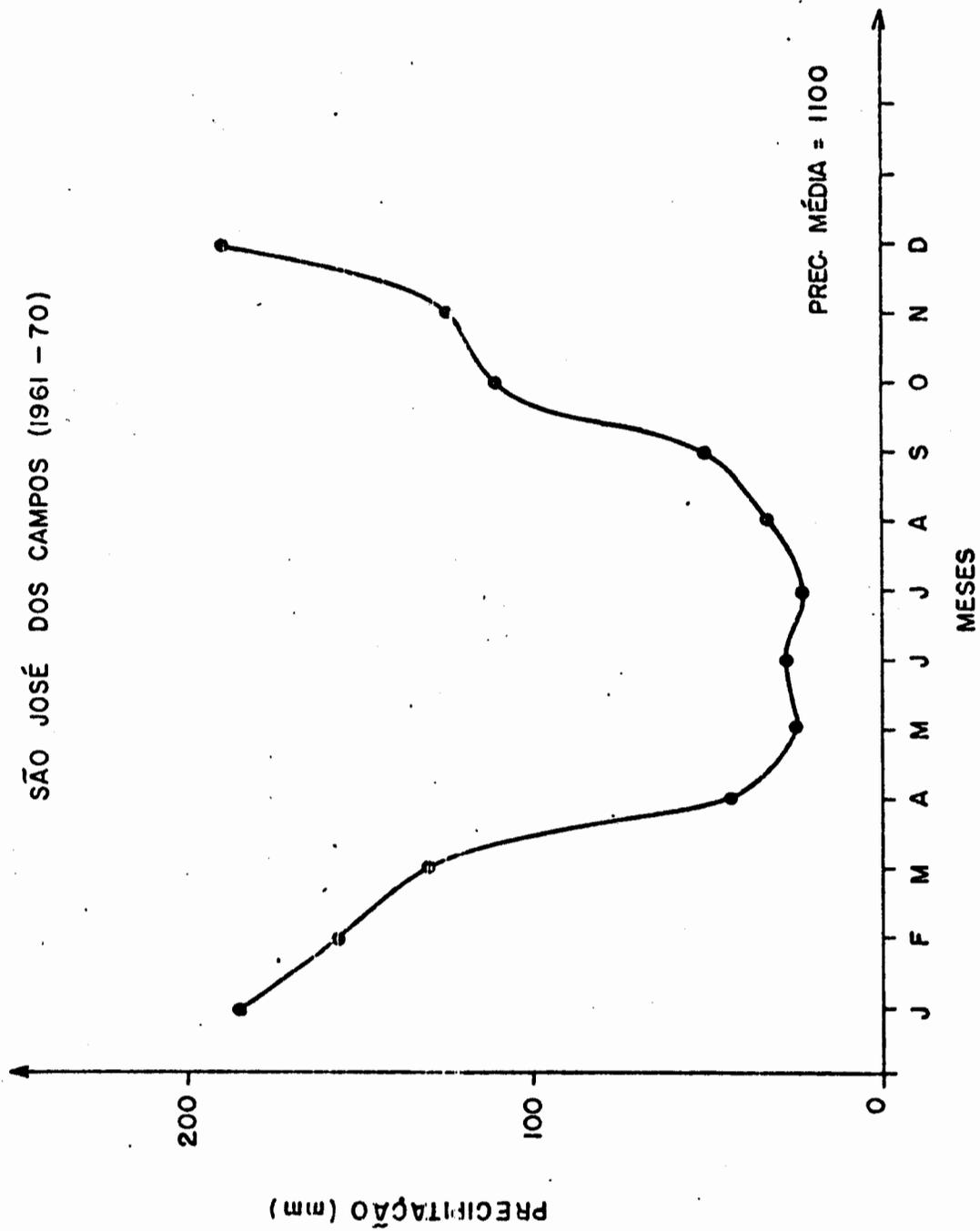


Fig. 2 - Precipitação média mensal no período de 1961 a 1970 para a Cidade de São José dos Campos, SP. Note-se a estação seca bem definida durante os meses de abril a setembro.

2.2 - CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA DE MESOESCALA

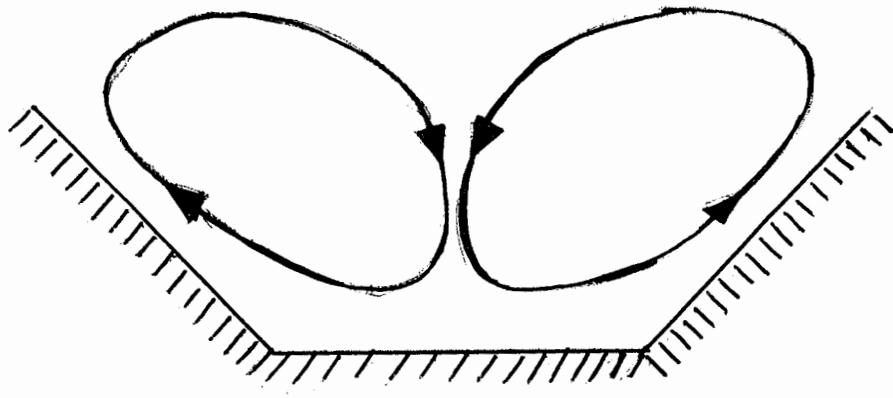
Como citado anteriormente, uma descrição detalhada da circulação do Vale do Rio Paraíba é impossível no presente momento. Contudo, na literatura encontra-se a descrição clássica de vales de dimensões apreciáveis, como o do Rio Paraíba.

Durante os dias claros, pela manhã, as encostas são aquecidas pela radiação solar. O ar adjacente, aquecido, sobe e ocasiona ventos encosta acima, forçando movimento descendente (subsidência) sobre o centro do Vale (Figura 3a).

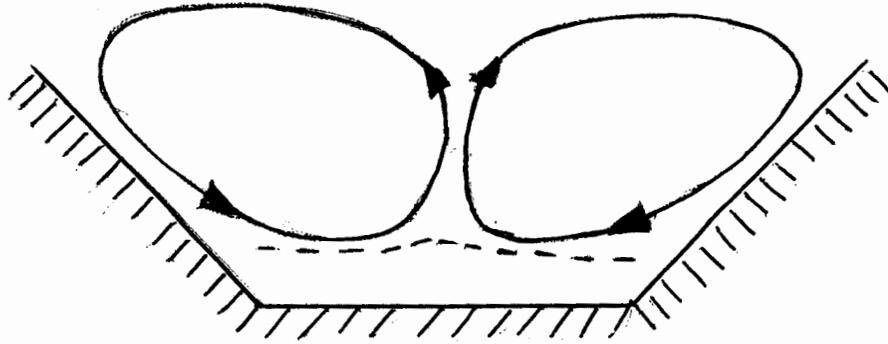
O vento, no fundo do vale, tem direção "vale acima". Esse fato é evidenciado nas Tabelas 1 e 2, que apresentam, em porcentagem, a frequência de direção do vento, para as estações meteorológicas de São José dos Campos e Taubaté, no período de 1961 a 1970. Lembrando-se que o Vale tem orientação NE-SW, pode-se notar que os horários de 9:00 h e 15:00 h locais apresentam uma predominância secundária de ventos de NE, nas duas estações.

Ao entardecer, as encostas começam a se resfriar mais rapidamente que o fundo do vale, e a circulação se inverte. No início da noite (Figura 3b), os ventos descem as encostas (ventos catabáticos) sob a ação da gravidade, pois o ar resfriado próximo à superfície torna-se mais denso; porém, ao descer as encostas, o ar se aquece adiabaticamente na razão aproximada de 10°C/km. O ar mais frio no fundo do vale pode agravar as condições de dispersão, propiciando concentrações de poluentes mais altas. Isto ocorre porque o ar, mais quente (e, portanto, menos denso) que desce a encosta coloca-se sobre o ar do vale, resultando num aumento da estabilidade, causando uma inversão com base na superfície, ou reforçando uma inversão de radiação já existente. Dessa forma a dispersão de poluentes, liberados próximos ao chão, é seriamente prejudicada.

O vento, no fundo do Vale, deveria apresentar direção dominante de SW; analisando-se as Tabelas 1 e 2, vê-se que isto não



a) durante o dia



b) durante a noite

Fig. 3 - Circulação atmosférica idealizada de um vale.

TABELA 1 - DADOS ACUMULADOS DE FREQUÊNCIA DO VENTO - 1961 a 1970
 ESTAÇÃO 83784 - TAUBATÉ
 LATITUDE: 23°1'S LONGITUDE: 45°34'W
 FREQUÊNCIA - %/10 anos

DIREÇÕES HORÁRIOS	C			N			NE			E			SE			S			SW			W			NW		
	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21
JANEIRO	78.4	63.2	84.2	1.0	4.5	0.3	11.6	10.0	3.9	1.6	0.6	1.0	4.5	6.7	6.5	1.3	1.3	1.0	0.6	4.2	2.3	0.3	2.0	0	0.6	7.4	1.0
FEVEREIRO	74.8	60.3	83.3	1.1	3.9	0.4	14.2	13.8	2.1	3.9	1.1	1.1	2.8	4.6	6.7	1.4	1.0	2.8	1.8	5.7	1.8	0	1.8	0.4	0	8.3	1.4
MARÇO	71.9	62.3	80.0	0.3	3.5	0	15.2	10.6	1.9	1.9	1.3	0.3	5.8	6.7	9.0	0.6	1.6	4.5	3.5	5.5	2.9	0.3	1.3	0.3	0.3	7.1	1.0
ABRIL	71.6	65.3	79.3	1.0	1.7	0.7	13.3	11.7	2.0	3.7	2.3	0	5.3	6.7	9.3	1.3	0.3	3.3	3.3	6.7	3.0	0	1.7	1.3	0.3	3.6	1.0
MAIO	78.4	62.9	85.2	0	2.9	0.3	9.7	11.9	1.0	2.6	3.9	0.3	3.9	2.6	7.4	1.9	2.6	1.3	2.3	3.5	2.9	0.3	4.8	0.6	1.0	4.8	1.0
JUNHO	75.7	55.7	81.7	1.0	3.7	0.3	14.3	23.0	2.3	2.3	1.0	1.7	4.0	4.0	8.3	1.0	0	1.0	1.0	6.3	4.3	0	2.0	0.3	1.0	4.3	0.3
JULHO	73.2	53.5	79.0	0.3	5.5	0	14.2	23.5	1.9	2.9	0.6	1.9	5.2	4.5	9.4	1.6	1.0	3.9	1.3	5.2	1.0	0	1.6	0	1.3	4.5	2.9
AGOSTO	63.2	55.2	72.9	1.0	4.5	0.6	20.6	23.5	4.2	4.5	1.0	1.0	2.9	3.9	8.7	1.6	1.3	2.6	3.2	2.3	4.5	1.3	2.6	2.9	1.6	5.8	2.6
SETEMBRO	62.0	55.3	66.3	0.3	4.3	1.0	28.7	22.3	7.0	2.3	1.3	2.0	2.3	4.0	11.3	0.7	1.3	2.3	2.3	3.7	5.7	0.3	1.7	2.7	1.0	6.0	1.7
OUTUBRO	64.5	60.3	75.8	0	3.2	0	25.5	15.5	3.9	1.6	1.3	1.6	2.6	6.1	9.4	1.3	2.3	2.3	3.2	5.8	5.5	0.6	1.0	1.0	0.6	4.5	1.6
NOVEMBRO	67.7	56.7	73.7	1.0	2.7	0.3	20.3	11.0	3.7	3.7	2.0	1.7	3.7	10.3	12.7	1.0	2.3	2.7	1.3	6.3	3.7	0.3	1.3	0.7	1.0	7.3	1.0
DEZEMBRO	72.9	56.1	81.0	0.6	3.9	0.3	18.7	11.9	1.9	2.6	1.3	1.3	1.9	9.7	9.7	0.6	1.0	3.9	1.6	5.2	1.9	0.3	2.6	0	0.6	7.7	0

TABELA 2 - DADOS ACUMULADOS DE FREQUÊNCIA DO VENTO - 1961 a 1970
 ESTAÇÃO 83809 - S.J. CAMPOS
 LATITUDE: 23°11'S LONGITUDE: 45°53'W

DIREÇÃO HORARIOS	C			N			NE			E			SE			S			SW			W			NW		
	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21	9	15	21			
JANEIRO	30.7	14.2	59.4	19.0	11.0	1.3	12.3	4.5	1.9	8.1	3.5	2.9	6.1	23.2	27.1	6.8	13.2	22.6	3.7	13.5	3.9	6.8	11.3	1.0	1.6	5.5	0
FEVEREIRO	30.5	15.2	59.9	20.2	9.6	1.4	12.0	3.9	3.2	5.3	2.1	1.4	5.0	18.4	24.1	6.4	14.5	4.6	9.9	20.6	3.5	8.9	10.6	0.7	1.8	5.0	1.1
MARÇO	30.6	21.0	59.0	18.7	10.3	0.6	11.9	2.9	1.6	7.1	3.9	1.9	9.7	17.1	28.1	9.7	13.2	3.9	6.1	19.3	2.9	3.9	9.0	1.6	2.3	3.2	0.3
ABRIL	25.3	19.3	52.0	17.7	7.3	0.7	11.7	6.0	1.0	7.7	4.0	4.0	12.7	15.0	32.0	10.7	18.3	6.0	8.0	16.7	4.0	4.7	10.3	0.3	1.7	3.0	0
MAIO	28.4	21.6	64.2	8.1	10.3	0.3	13.2	8.1	0.3	8.1	3.5	2.9	9.7	12.3	25.5	13.2	11.9	3.5	14.5	17.1	2.3	3.9	11.9	0.6	1.0	3.2	0.3
JUNHO	27.0	17.3	61.7	10.3	15.0	1.0	15.0	9.3	2.7	8.5	4.3	0.7	10.0	3.7	25.7	9.7	10.0	3.7	11.3	16.0	4.0	6.3	13.3	0	2.0	6.0	0.7
JULHO	16.8	8.4	46.8	11.0	19.0	1.0	17.1	11.6	4.2	10.0	5.2	3.2	19.4	14.2	31.9	9.7	11.6	4.8	10.6	15.5	5.8	4.5	10.3	1.9	1.0	4.2	0.3
AGOSTO	12.6	9.4	46.5	17.7	13.9	1.0	23.9	10.0	1.6	6.8	5.8	2.6	11.0	10.6	35.2	10.0	14.2	5.8	11.6	17.1	6.5	5.2	12.6	0.6	1.3	6.5	0.3
SETEMBRO	13.7	15.4	37.0	17.0	11.3	2.0	23.7	8.7	2.7	9.3	7.7	2.0	9.7	18.0	39.3	9.7	13.7	5.3	11.0	15.7	10.7	5.0	6.7	1.0	1.0	3.0	0
OUTUBRO	15.8	11.6	44.2	20.6	8.4	0.6	20.0	5.5	1.3	8.7	5.2	2.6	11.6	27.1	41.3	7.4	19.4	4.2	9.0	11.6	3.9	5.5	8.1	1.0	1.3	3.2	1.0
NOVEMBRO	19.3	7.3	45.0	20.3	6.3	0.3	19.7	4.0	2.0	4.0	2.0	2.3	10.7	33.0	41.0	10.3	16.3	2.7	8.7	16.7	5.7	5.7	7.3	1.0	1.3	7.0	0
DEZEMBRO	28.1	16.1	54.5	20.3	6.5	1.3	13.2	3.9	9.9	7.7	2.3	2.6	5.8	24.2	26.3	9.0	12.9	4.2	7.7	20.3	5.2	5.8	9.0	1.3	2.3	4.8	1.3

ocorre. A maior predominância no horário de 21:00 h locais é de SE. Segundo Kousky (1980), isso se deve ao fato de que, no período de 15:00 h às 21:00 h, existe a entrada de uma brisa marítima, proveniente do Oceano Atlântico, a qual também ficou evidente nas radiossondagens, feitas em Cachoeira Paulista. No início da tarde, entre 15:00 e 17:00 h, a brisa - uma massa de ar mais úmido e mais fresco - penetra no Vale, aumentando a estabilidade da atmosfera e ocasionando uma inversão de temperatura (inversão de advecção) a cerca de 1.000 a 1.500 m de altura.

Um outro fenômeno observado no Vale, durante o inverno, é a formação de um denso nevoeiro ou de uma camada de estrato entre 500 a 1.000 m de altura. A provável explicação para esse fenômeno é a seguinte: durante a tarde, a brisa marítima carrega umidade para dentro do Vale. Além disso, nos últimos 15 anos, foram construídas quatro grandes represas na cabeceira do Vale (Jaguari, Santa Branca, Paraibuna e Paraitinga) o qual foi altamente industrializado nessa região. Durante os dias claros, existe evaporação desses espelhos d'água; ao entardecer, a temperatura começa a cair, e condensação ocorre nos núcleos de condensação provenientes de efluentes industriais. Dependendo do estado de turbulência atmosférica e da quantidade de umidade presente no ar, pode-se formar neblina ou uma camada de estrato cujo topo coincide com o da inversão de radiação. Essa situação dificulta a dispersão atmosférica, propiciando maiores concentrações de poluentes. Isso porque, pela manhã, a quebra da inversão noturna pode ser consideravelmente retardada, uma vez que o topo da camada da neblina ou de estrato reflete a maior parte da radiação solar incidente.

Na análise das Tabelas 1 e 2, deve-se atentar para o fato de que a porcentagem de calmarias (C) é dominante em, praticamente, todos os meses do ano. Na estação de Taubaté, principalmente, o valor mínimo encontrado é 53.5%, ao passo que na de São José dos Campos, os valores estão compreendidos entre 7.3% e 64.2%. Porém, a frequência de calmaria é extremamente alta para o horário de 21:00 h, sendo que os menores valores ocorridos em São José dos Campos e Taubaté, em setembro, são respectivamente, 37.0% e 66.3%. Sabe-se que raramente o vento é verdadeiramente calmo; usualmente, existem certas flutuações que não

podem ser detetadas por um anemômetro, mas que podem ser vistas pelo movimento da fumaça. Portanto, seria impossível para um efluente, liberado num período de uma hora ou mais, permanecer nas vizinhanças imediatas da fonte. Quando se estiver considerando a liberação de material poluente próximo da superfície, deve-se lembrar que as horas noturnas, principalmente em um vale, se caracterizam pelas restrições ao espalhamento por difusão turbulenta, pois o desenvolvimento de uma inversão de radiação, com base na superfície, inibe tanto a turbulência vertical como a horizontal.

2.3 - CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA DE MICROESCALA

Resta ainda comentar que a região de Caçapava apresenta um relevo de escala menor, com terreno ondulado e pequenos vales. Nessas condições micrometeorológicas, inversões de radiação podem se formar a partir de alguns metros até cerca de 50 a 100 m de altura, durante o entardecer e à noite. Material poluente, liberado de chaminés cuja altura efetiva é menor do que da inversão, ficará aprisionado em um volume menor de ar, causando riscos de concentrações ainda maiores. Existe, ainda a possibilidade de pequenos vales "canalizarem" o escoamento de material poluente para regiões residenciais ou de atividades agro pastoris.

2.4 - RESUMO

Em suma, o Alto do Vale do Rio Paraíba não parece propício para a implantação de indústrias potencialmente poluentes. A Circulação Geral da atmosfera, principalmente durante o inverno, como evidencia a Figura 1, não é favorável à dispersão de poluentes. As Tabelas 1 e 2, mostram a ocorrência de frequência maior de calmarias em Taubaté e São José dos Campos. A presença de uma camada de neblina ou de estrato comprova a presença sempre constante da inversão de radiação, durante o inverno, favorecendo altas concentrações. A maior parte das cidades do Vale encontram-se à esquerda da Rodovia Presidente Dutra, no sentido São Paulo-Rio. Qualquer ocupação industrial ao lado direito dessa rodovia, próxima às cidades, implicará um aumento da con

centração de poluentes nas cidades, pois durante o período da tarde, entre 15:00 e 21:00 h, o vento dominante é de SE, devido ao fenômeno da brisa marítima. A situação atual do Vale, com relação à concentração de poluentes, é notável e sensível nas cidades de São José dos Campos, Jacareí, Aparecida e Guaratinguetá, sendo desnecessário que Caçapava se torne mais um exemplo.

3. ALGUNS CÁLCULOS DE CONCENTRAÇÕES E DOSAGENS E SUAS LIMITAÇÕES

Pasquill (1974) afirma que, em geral, não se pode as es timativas confiáveis, nas seguintes circunstâncias:

- a. quando o escoamento é indefinido, isto é, em condições de cal maria;
- b. quando existem aparentes distúrbios locais no escoamento, is to é, na vizinhança imediata de edifícios e obstáculos, a me nos que a nuvem de dispersão já tenha atingido proporções con sideravelmente maiores que as dos distúrbios;
- c. quando o escoamento é canalizado, ou quando contêm circulações ou drenagens estabelecidas por aquecimento ou resfriamento de terreno ondulado ou encostas.

Voltando-se para as Tabelas 1 e 2, vê-se que, em média, as situações de calmaria são predominantes; observa-se também que pelo fato das indústrias estarem estabelecidas no Vale, com topografia de menor escala ondulada, ocorrem canalização no escoamento e drenagens das encostas. Essas duas circunstâncias tornam difícil estimar concen trações na região de Caçapava. A Figura 4 mostra seis tipos de comportamen to da pluma sob várias condições de estabilidade atmosférica. A li nh a sólida é a variação vertical da temperatura, e a tracejada é a taxa de variação vertical de temperatura (TVVT) adiabática seca. Os dois úl timos casos (4e, 4f) podem ocorrer com frequência no Vale, durante o inverno.

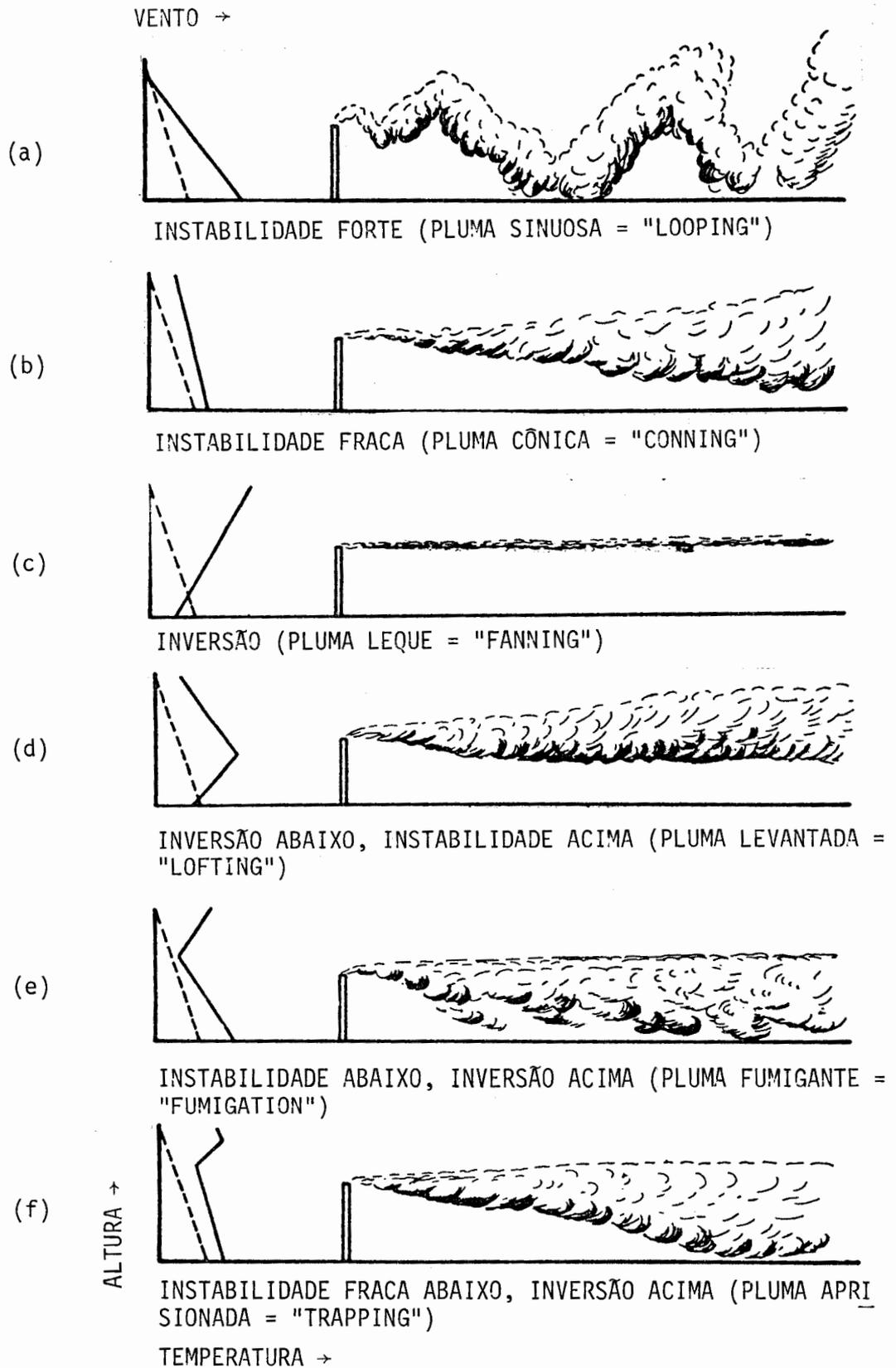


Fig. 4 - Seis tipos de comportamento de pluma sob várias condições de estabilidade. As linhas tracejadas são a taxa de variação vertical da temperatura (TVVT) adiabática. As linhas sólidas são da TVVT do meio ambiente. Fonte: SELLERS (1965).

Fumigação ("Fumigation") e Aprisionamento ("Trapping") : pouco tempo após o sol nascer, em manhãs claras, a inversão de radiação existente começa a se dissipar e é vagarosamente repostada por uma camada neutra ou instável, que normalmente começa à superfície e aos poucos se eleva. Depois de um certo tempo de aquecimento, a inversão está presente imediatamente acima do topo da chaminé e funciona como uma tampa, impedindo a difusão no sentido vertical. Os vórtices convectivos, abaixo da inversão, misturam a pluma efluente dentro da camada instável próxima ao chão. Estas condições podem também se desenvolver com a brisa marítima no final da manhã ou começo da tarde. Estas duas condições - fumigação e aprisionamento - podem apresentar as maiores concentrações, a nível de superfície, possíveis de serem observadas nas vizinhanças da chaminé. Além disso, se o crescimento da camada neutra ou instável for vagaroso ou inexistente - como no caso de cobertura de estrato, neblina ou brisa marítima - condições de fumigação e de aprisionamento podem persistir por muitas horas, aumentando ainda mais as concentrações.

Com essas considerações preliminares em mente, fizeram-se algumas estimativas de concentrações descritas a seguir.

3.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO DE HOLLAND

O Modelo de Holland, mencionado no "Relatório referente à Instalação de Indústrias no Município de Caçapava", foi utilizado para estimar as concentrações de poluentes emitidos pela FAE S.A.

A formulação proposta por Holland para cálculo de elevação de pluma (ΔH) é dada por:

$$\Delta H = \frac{Ve \cdot D}{\bar{U}} \left(1.5 + 2.68 \times 10^{-3} p \frac{Te - Ta}{Te} D \right) \quad (M) \quad (1)$$

onde

Ve = velocidade de saída dos efluentes ($m \cdot s^{-1}$);

D = diâmetro interno da chaminé (m);

\bar{U} = velocidade média do vento ($m.s^{-1}$);

p = pressão atmosférica (mb);

T_e = temperatura absoluta do efluente (K);

T_a = temperatura absoluta do ambiente (K).

A altura efetiva da chaminé (H_e) é dada pela soma de ΔH com a altura física da chaminé (H_f), ou seja:

$$H_e = \Delta H + H_f \quad (2)$$

No relatório da CETESB (1980) consta que a altura efetiva da chaminé, utilizada no modelo de dispersão, foi $H_e = 50$ m. A Figura 5, extraída de Turner (1970) dá valores de $(\chi \bar{u} / Q)_{\max}$ em função da distância (x), tomada na direção do vento médio (\bar{u}) predominante e da altura efetiva da fonte, onde χ é a concentração, dada em microgramas por metro cúbico ($\mu g/m^3$), e Q é o poder de emissão da fonte, dado em gramas por segundo (g/s). Entrando no gráfico com $H_e = 50$ m para a classe de estabilidade E, obtêm-se

$$\left(\frac{\chi \bar{u}}{Q}\right)_{\max} = 2.4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-2}$$

e

$$x_{\max} \cong 3.7 \text{ km}$$

ou seja, a distância da fonte, onde a concentração será máxima à superfície, será aproximadamente 3.7 km. O poder de emissão da fonte, com controle de 99%, foi calculado como sendo $Q = 0.88$ g/s (Vieira, comunicação pessoal), e a velocidade média do vento $\bar{u} = 3.0$ m/s (Relatório CETESB, 1980) a concentração máxima nessa distância será $\chi = 7.0 \mu g/m^3$. Essa concentração é aproximadamente 4.5 vezes maior do que os padrões de qualidade do ar adotados pelo estado da Califórnia em 1971 (Williamson, 1973) e cerca de 3.5 vezes maior que o padrão adotado pela Organização Meteorológica Mundial. A distância onde ocorrerá a concentração máxima é cerca de 3 vezes maior do que a sugerida pela

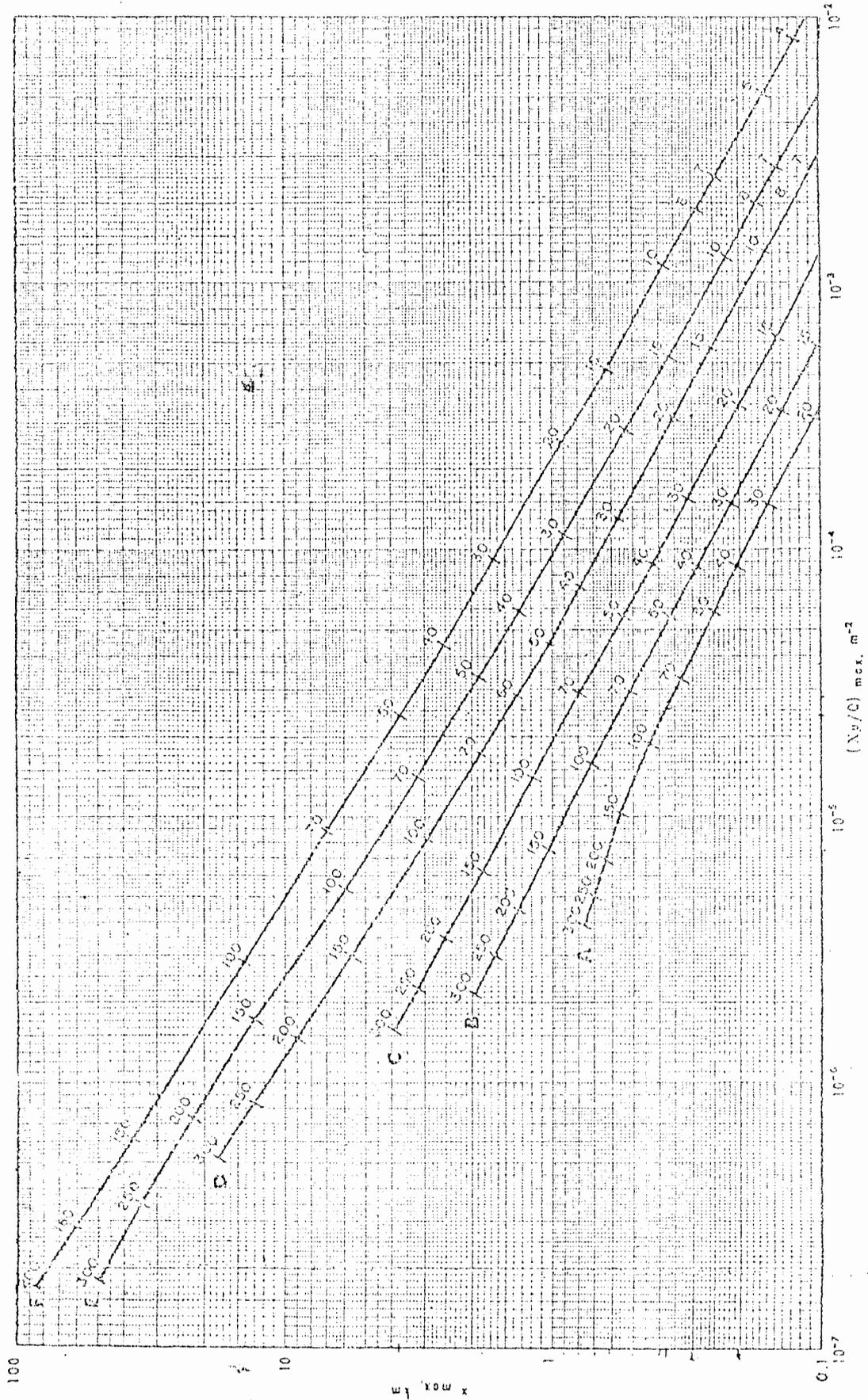


Fig. 5 - Distância de concentração máxima e máximo de xU/Q em função de categorias de instabilidade (curvas) e altura efetiva (metros) de emissão (números).
Fonte: TURNER (1970).

CETESB (1.200 m). A dosagem correspondente à concentração máxima é cerca de 30 $\mu\text{g}/\text{dia}$. Segundo Turner (1970), o modelo de Holland subestima o valor da altura de elevação da pluma (ΔH) de um fator entre 2 a 3 quando comparado com os outros modelos, tais como os de Moses e Carson, Task Group ASME, Brumage, Montgomery e Carpenter et al. (TVA). Uma outra consideração é que no cálculo de ΔH assume-se que o efluente tem a mesma densidade do ar, o que não é verdade, principalmente em se tratando de material particulado.

3.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO GAUSSIANO

O modelo Gaussiano, utilizado para a estimativa de concentração (ábaco de Turner, 1970), apresenta sérias limitações.

Primeiro, o modelo é inversamente proporcional à velocidade média do vento; isso significa que para velocidades próximas de zero, a concentração tende para infinito, a qualquer distância da fonte. Segundo, durante o período noturno, com cobertura total de nuvens e velocidades menores que 2 m/s, o modelo também não é aplicável, pois não existem categorias de estabilidade (ver Pasquill, 1974). Terceiro, além do modelo ter sido concebido para terreno plano e condições de turbulência homogênea, ele não leva em consideração a existência de camadas de inversão, sendo que as difusividade horizontal e vertical são função da distância à fonte apenas. Finalmente, a estimativa de concentrações assume que os efluentes têm a mesma densidade do ar; o material particulado, no entanto, é mais pesado e possui uma velocidade de deposição. Dessa maneira, as concentrações máximas encontrar-se-ão aquém das distâncias previstas pelo modelo.

Uma análise dos registros de vento no período de 1961 a 1970, para as cidades de São José dos Campos e Taubaté, mostrou que o vento médio é, em geral, inferior a 1.0 m/s. Além disso, conforme pode ser notado nas Tabelas 1 e 2, a predominância é de calmarias. Nessas condições e, considerando-se ainda que no inverno, durante o período noturno, o Vale está na maioria das vezes totalmente encoberto por uma camada de estrato e que inversões de radiação estão sempre presentes

entre 100 a 500 m de altura, torna-se impraticável estimar a concentração de poluentes que, sem dúvida, será maior do que as que possam ser estimadas pelos presentes modelos analíticos.

4. CONCLUSÃO

Não existem modelos analíticos capazes de prever concentrações quando os ventos são fracos. Um dos mais difíceis problemas em dispersão atmosférica continua sendo a determinação de altura efetiva da chaminé poluente. Presentemente, podem-se prever, ainda com certas limitações, concentrações com ventos fracos e calmaria através de modelos numéricos.

Demonstrou-se que a parte média do Vale do Rio Paraíba, apresenta sérios problemas de dispersão atmosférica, por apresentar uma frequência grande de calmarias, inversões de radiação e neblina ou cobertura de estrato, principalmente durante o inverno.

Finalmente, utilizando-se os modelos que são empregados aqui no Brasil e em outros países e considerando-se apenas uma fonte poluidora, estimou-se que a concentração máxima, para o pior caso possível dentro das limitações dos modelos, é 4.5 vezes maior que o padrão adotado pelo estado da Califórnia (EUA) em 1971; essa concentração, ocorre a cerca de 3.7 km da fonte, que corresponde a uma distância cerca de 3 vezes maior que a estimada pela CETESB (1200 m).

Agradecimentos

O autor agradece a colaboração dos Srs. Nelson Arai e José Aparecido Torsani, mestrandos do INPE na área de Dispersão Atmosférica; ao Dr. Vernon E. Kousky, pelas valiosas discussões sobre a Meteorologia Sinótica e Circulação Atmosférica sobre o Alto Vale do Rio Paraíba. Os agradecimentos são extensivos ao Dr. Nelson de Jesus Parada, diretor do Instituto de Pesquisas Espaciais, por ter tornado possível a realização deste relatório.

REFERÊNCIAS

- MILLER, D. *Global atlas of relative cloud cover 1967-1970*.
Washington DC, U.S. Department of Commerce, 1971.
- PASQUILL, F. *Atmospheric diffusion*. 2 ed., London, Ellis Horwood,
1974.
- SELLERS, W.D. *Physical climatology*. University of Chicago Press, 1965.
- SLADE, D.H. *Meteorology and atomic energy*. Washington D.C., U.S.
Atomic Energy Commission, 1968.
- STERN, A.C. *Air pollution*. 3 ed. New York Academic Press, 1976.
- TURNER, D.B. *Workbook of atmospheric dispersion estimates*.
Cincinnati, U.S. Department of Health and Education Welfare, 1970.
- VIEIRA, B. *Processamento de metais pesados e emissão de particulados
para a atmosfera*. ITA - São José dos Campos, S.P., 1980.
- WILLIAMSON, S.J. *Fundamentals of air pollution*. Massachusetts.
Addison Wesley, 1973.
- KOUSKY, V.E. *Circulação atmosférica sobre o Vale do Paraíba*.
Comunicação pessoal a L.C.B. Molion. São José dos Campos, 1980.