

Análise do fluxo do vento visando ao transporte de poluentes na região da Grande São Paulo (*)

Meteorologista Silvio de Oliveira (**)

Estatístico Antonio de Castro Bruni (**)

Geógrafa Maria Angélica Lopes de Almeida Sagula (**)

RESUMO

A atuação da circulação de meso-escala e microescala do ar, sobre uma determinada região, sofre influência das condições locais, que tendem a alterar o fluxo de vento próximo da superfície. Objetivando estudar detalhadamente o comportamento do vento de superfície visando ao conhecimento do transporte de poluentes na região urbana da Grande São Paulo, construíram-se as trajetórias de vento com base em dados horários de velocidade e direção do vento amostrados em diversos pontos da região. Observou-se um comportamento diferenciado por períodos e então efetuou-se a análise para cada um desses períodos para obter-se um melhor nível de informação. Concluiu-se que o fluxo de ar local assume diferentes direções no período de 24 horas, sendo que na madrugada e à noite a circulação local é função da estabilidade e da irregularidade do terreno, permitindo maior acúmulo de poluentes; à tarde e ao anoitecer, devido à maior atividade turbulenta do ar, o vento sofre pouca influência da topografia. Conforme se pode observar, o presente estudo é de grande importância para a estratégia de controle da poluição do ar, planejamento ambiental e para a aplicação de modelos matemáticos de simulação da qualidade do ar.

INTRODUÇÃO

No planejamento da ação de controle da poluição do ar e no zoneamento territorial para instalação de novas indústrias dentro de áreas urbanas, é importante considerar-se o fluxo de vento dominante na região em estudo; visto que a emissão de poluentes na baixa atmosfera oriundos da atividade industrial é transportada principalmente pelo vento de superfície (Skibin, 1975).

Para determinar o transporte de poluentes de uma região particular para outra é necessário acompanhar-se o fluxo do vento e os possíveis locais a serem atravessados pelas plumas, pois a informação obtida através da rosa dos ventos é baseada na assumida de que as trajetórias seguidas pelo vento são retas (Scholtz and Brouckaert, 1978). O fluxo de vento dentro da Camada Limite Planetária (CLP) é determinado pelas condições dinâmicas da atmosfera a interação entre as escalas meso e micrometeorológicas. A influência da penetração da brisa marítima e os efeitos de canalização gerados pela irregularidade da topografia local tornam o movimento do ar bastante complexo, principalmente em condições de atmosfera estável (Tyson and Preston-Whyte, 1972). De acordo com Johnson (1959) o padrão regional do campo do vento de superfície e suas flutuações pode ser obtido utilizando-se dados de direção e velocidade média, medidos remotamente de uma rede de anemógrafos distribuídos na região em estudo. Na rede de estações automáticas da Cetesb foram instalados 13 anemógrafos distribuídos dentro da Grande São Paulo que monitoram continuamente a direção e velocidade do vento médio de superfície.

O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um estudo preliminar sobre o comportamento do fluxo do vento médio de superfície, utilizando-se as técnicas da análise de linhas de corrente para visualizar-se o transporte e os pontos de convergência e divergência da região. Estudar o vento médio horário mensal a fim de determinar-se as influências locais sobre alguns pontos de medição; e verificar-se os efeitos de canalização causados pela topografia sobre o vento médio de superfície.

Este estudo, além de fornecer subsídios para estratégia de planejamento e controle da qualidade do ar, é de importância na utilização dos seguintes casos:

- episódio agudo de poluição do ar;
- controle de incêndio em florestas;

— planejamento e controle de lançamento de pesticidas em áreas agrícolas;

— projetos de estudos de instalação de aeroportos e sistemas de controle de voo;

— projetos de instalação de reatores nucleares.

TOPOGRAFIA

Para entender-se a estrutura do fluxo de vento superficial e as forças que atuam sobre ele é necessário conhecer a topografia da área. A região da Grande São Paulo com uma área de 8 mil/km² aproximadamente, está localizada no Planalto Atlântico e a topografia da região é dominada por colinas com altitudes que variam de 650 m a 1.200 m. Essa área possui ao Sul, como limites, as escarpas da serra do Mar e as da serra de Parapiacaba representada na figura 1, com todos os acidentes geográficos que a limitam.

As mais importantes formações serranas do Planalto Paulistano são: ao Norte a serra da Cantareira; a Oeste a serra de Taxaquara e Itaqui; e a Nordeste a serra de Itapeti. O morro do Jaraguá, na serra da Cantareira, atinge altitudes de 1.100 m a 1.250 m e o Centro-Norte é dominado por bacia de origem tectônica em torno da qual se formaram as planícies. Essa região é drenada pela Bacia do Tietê que corta a região de Leste para Oeste e tem como seus dois principais afluentes da margem esquerda os rios Pinheiros e Tamanduateí. Ao longo desses rios ficam as várzeas com altitudes entre 720 m e 725 m, ladeadas por terrações que variam entre 725 m e 735 m e, mais acima, ficam as colinas atingindo 750 m (AB Saber, 1957).

DADOS E MÉTODOS DE ANÁLISE

Dados

Para o desenvolvimento da pesquisa selecionaram-se os dados dos meses de maio a agosto referentes ao período de 1981 a 1982.

Estes dados são medidos a cada minuto e enviados remotamente para

(*) Trabalho apresentado no 12.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, novembro de 1983, em Camboriú, SC

(**) Da gerência de Pesquisas de Ar e Ruído, da Diretoria de Pesquisa da Cetesb

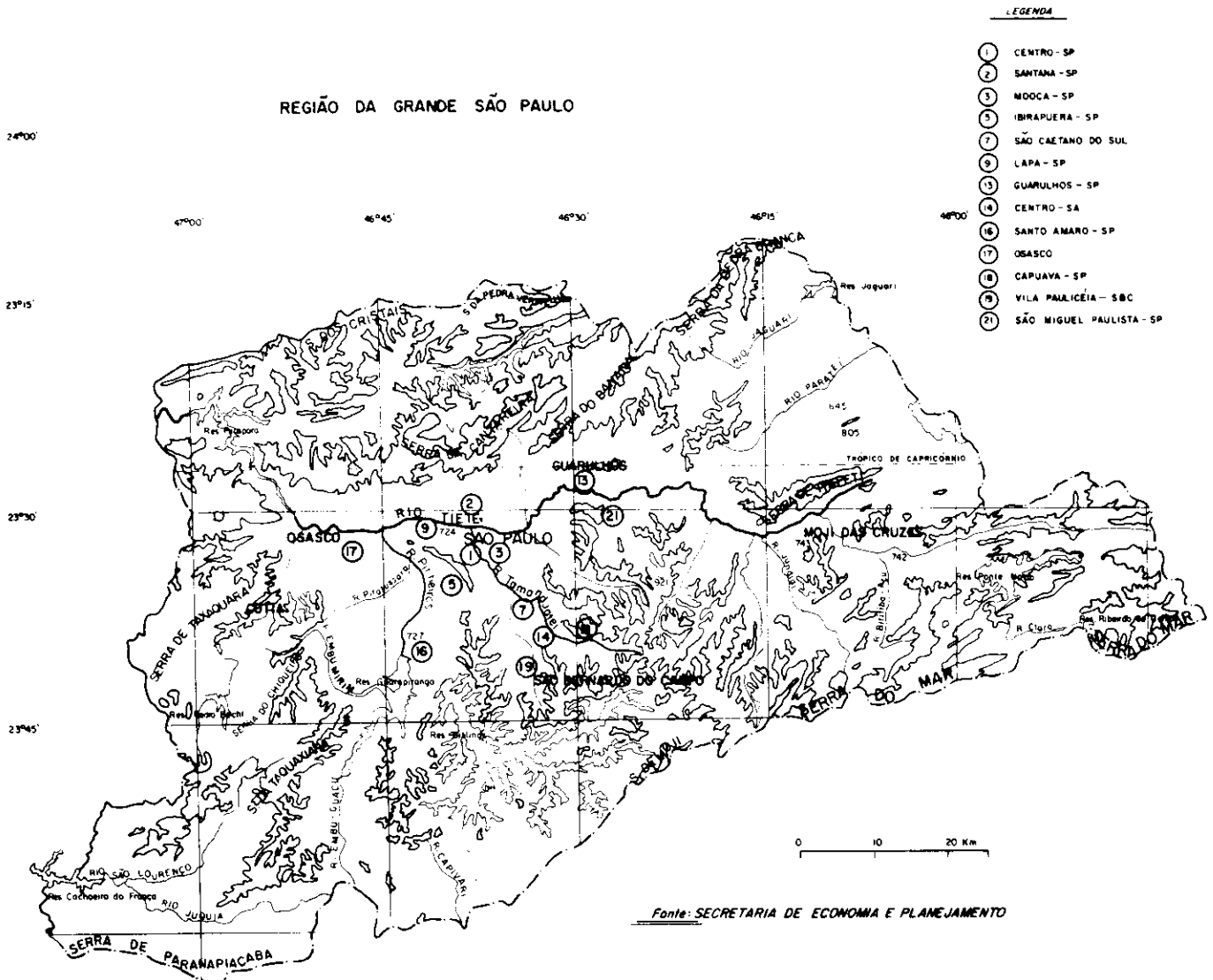


Figura 1 — Região da Grande São Paulo e a distribuição das estações meteorológicas.

a central do sistema telemétrico que ao final de cada hora imprime um relatório com as informações da velocidade média, mínima, máxima e a direção do vento, mais persistentes, no intervalo de uma hora.

Os anemógrafos estão espacialmente distribuídos dentro da área metropolitana da Grande São Paulo, conforme mostra a figura 1. Para elaboração do presente trabalho foram utilizados 560 mil dados médios horários de direção e velocidade de vento.

MÉTODO DE ANÁLISE

Para analisar o campo do vento através das linhas de corrente, foi necessário calcular as médias vetoriais e escalares e o vetor resultante do vento para cada anemógrafo em intervalos de tempo de seis em seis horas. O método de cálculo estatístico utilizado foi o desenvolvido por Brooks e Carruthers, (1953), cujas equações usadas foram:

velocidade média,

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{N}$$
 (1)

vetor médio,

$$\bar{V} = \sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2}$$
 (2)

onde,

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \sin(\theta_i)}{N}$$
 (3)

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i \cos(\theta_i)}{N}$$
 (4)

S_i = vetor resultante da hora i (5)

θ_i = é o ângulo formado entre a direção Norte (N) e o vetor velocidade do vento da hora i (6)

N = número total de dados utilizados no cálculo do vetor resultante

A direção do vento médio,

$$= \arctan(\bar{x}/\bar{y})$$
 (7)
 onde,

$$\theta^\circ < \theta < 360^\circ,$$

O desvio padrão da direção do vento em torno de θ , expresso em graus é dado por

$$(\bar{\theta}) = 81 \sqrt{1 - \bar{V}/\bar{S}}$$
 (8)

O grau de persistência da direção do vento predominante,

$$D_p = \frac{\bar{V}}{\bar{S}} \cdot 100 (\%)$$
 (9)

e para $\bar{V} \approx S$, $D_p = 100\%$ e a direção do vento é considerada aproximadamente constante.

O período de análise considerado foi de 24 horas dividido em quatro intervalos de seis horas cada, da seguinte forma:

- 1.º) 00 às 06 horas local (hl)
- 2.º) 06 às 12 horas local (hl)
- 3.º) 12 às 18 horas local (hl)
- 4.º) 18 às 24 horas local (hl)

O que significa a elaboração de quatro análises médias mensais.

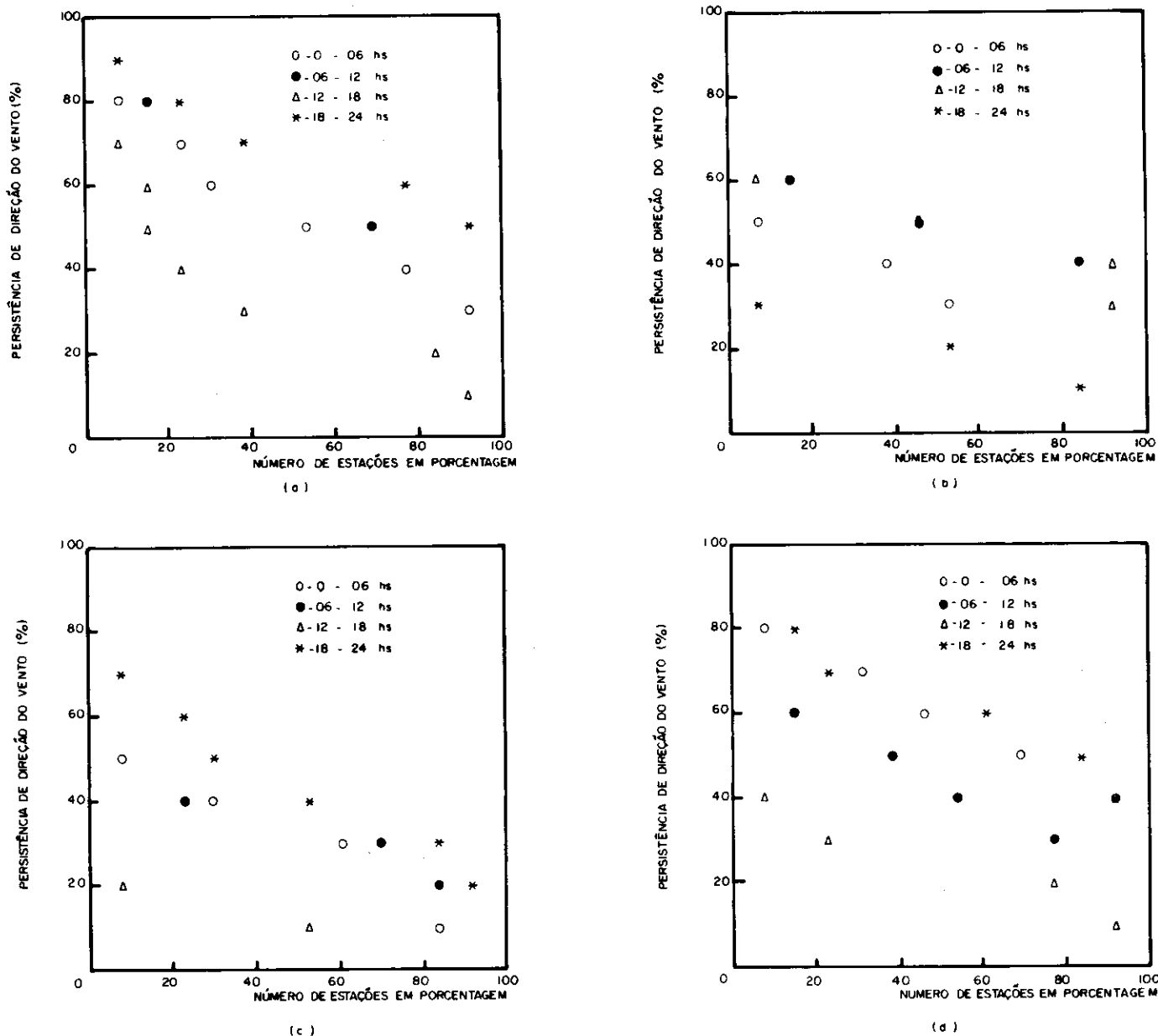


Figura 2 — Distribuição de frequência acumulada do grau de persistência da direção do vento 13 anemógrafos na Grande São Paulo para os meses de maio(a), junho(b), julho(c), agosto(d). Média de 1981 e 1982.

Para se conseguir o resultado desejado com o nível de detalhamento proposto, foi necessária a elaboração de um conjunto de programas de computação para calcular as médias horárias mensais da decomposição vetorial, os vetores médios resultantes; o desvio padrão das direções médias do vento; e o grau de persistência para cada direção média, bem como o uso do ploter para desenhar as rosas de vento.

RESULTADOS

O período de maio a agosto foi selecionado, devido à seguinte observação:

- o aumento da frequência do Anticiclone Subtropical Marítimo sobre a região;
- a maior persistência de inversões térmicas;

- a maior ocorrência de ventos calmos e fracos;
- o baixo índice pluviométrico e
- o domínio de condições de atmosfera estáveis nesta época do ano (Oliveira e Almeida, 1982). Estes fatores geram condições desfavoráveis para dispersão de poluentes sobre a região da Grande São Paulo.

O conjunto das condições meteorológicas acima, associado às irregularidades da rugosidade superficial, tende a distorcer radicalmente o fluxo do vento nos baixos níveis.

Esta distorção do escoamento do fluxo é acentuadamente maior na presença das inversões de subsidência de baixa altitude quando o vento de superfície, sob a inversão, independe do vento que sopra acima do topo da inversão (Godinho, R., Oliveira, S., Almeida, M. A. L., 1981).

Para observar-se a constância da direção do vento predominante, calculou-se a porcentagem da persistência usando-se a fórmula (9) cujos resultados são ilustrados na figura 2 (a, b, c e d). Nesta figura identificamos que os meses de maio a agosto mostram maior regularidade de persistência de direção de vento, do que os meses de junho e julho. No mês de maio, no horário de 00 às 6 h, 53% das estações apresentaram uma persistência de 50%, essa persistência foi observada no mês de agosto para 69% das estações meteorológicas. Para o horário de 6 às 12 h a porcentagem da persistência é a mesma do horário anterior, e atinge 69% e 40% das estações de maio e agosto, respectivamente.

No horário das 12 às 18 h a persistência de direção diminui bastante

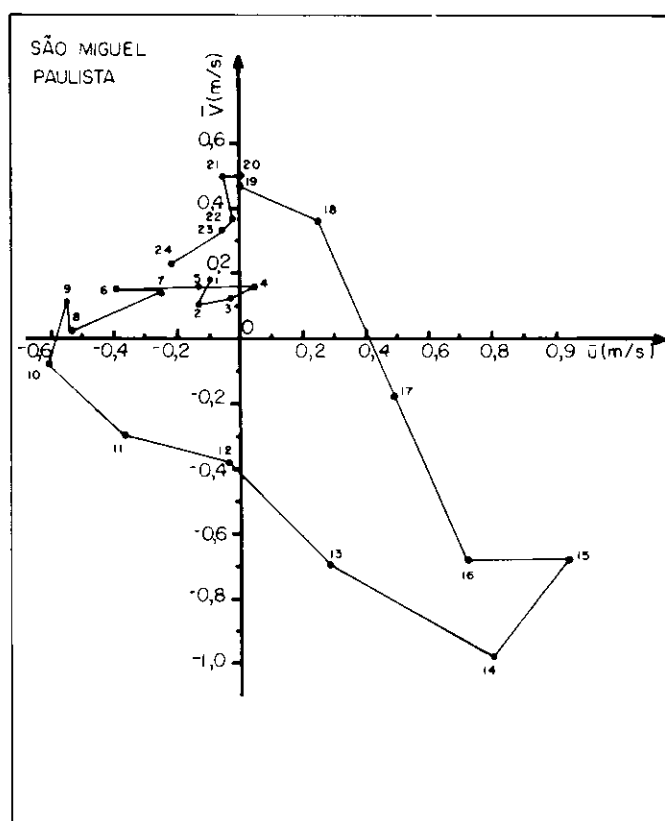
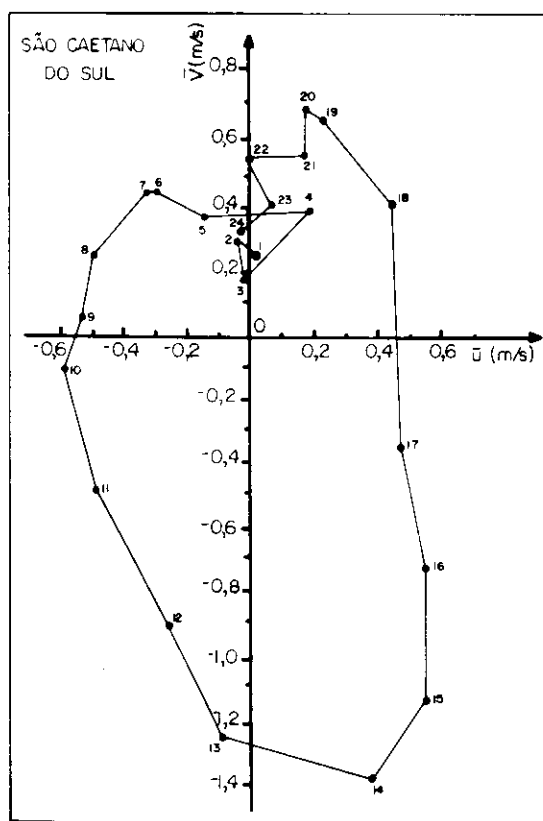
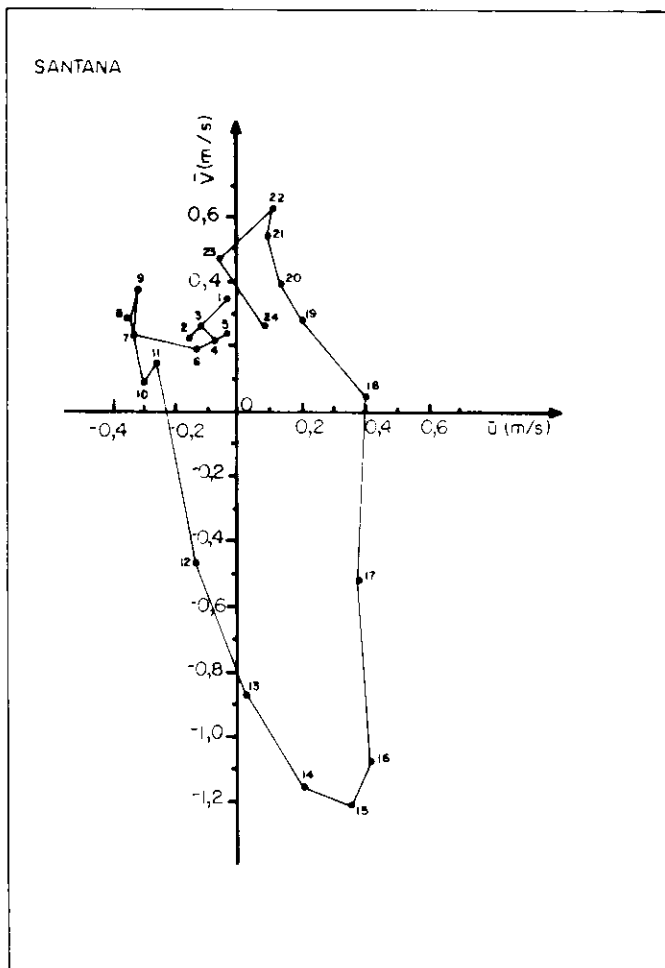
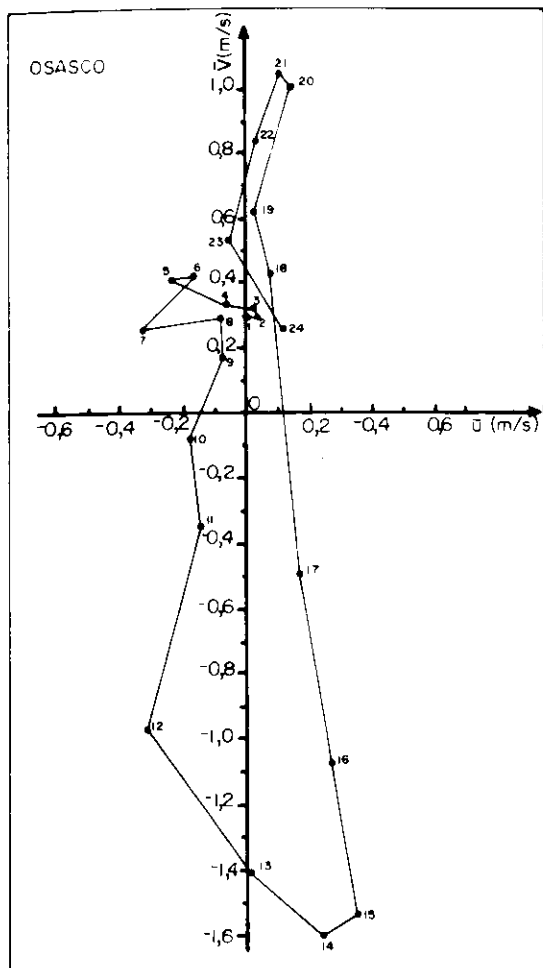


Figura 3 — Vento médio horário mensal menos o vento mensal (m/s), referente ao mês de junho (1981/1982) distribuído por estação meteorológica.

em maio e agosto, denunciando a flutuação da direção do vento devido ao aumento da influência térmica no fluxo. No entanto, à noite, a persistência de 50% retorna novamente para mais de 80% das estações nos dois meses em estudo, caracterizando o domínio da estabilidade atmosférica no período noturno e da manhã.

O mês de junho, no período diurno, apresenta maior regularidade no fluxo do que no mês de julho, no mesmo período.

No entanto, o mês de julho mostrou-se mais regular no período noturno do que junho, apesar da baixa porcentagem da persistência em todos os horários.

A observação dos gráficos nos mostrou que não existe uma regularidade no fluxo devido aos efeitos da topografia local, as mudanças peculiares da dinâmica local, como variação térmica local, mais os efeitos oscilatórios dos sistemas de brisas marítimas e terrestres.

Análise Local do Regime de Vento

Essa etapa do trabalho tem como objetivo principal avaliar as influências nas estações sobre as mudanças da circulação local, e comparar entre as estações, a predominância do fluxo do vento em diversos períodos do dia.

A análise do vento consistiu em duas etapas; o estudo da variação horária do vento representado pelas hodógrafas da figura 3 e a análise do vento por períodos de seis horas de acordo com as rosas de vento da figura 4. Estas análises deveriam ser desenvolvidas em torno das 13 estações automáticas, para o período de quatro meses. Entretanto, devido ao elevado número de hodógrafas, 62, e de rosas de vento, 218, selecionamos as estações de Santana, Osasco, São Caetano do Sul e São Miguel Paulista. Assumiu-se o mês de junho como representativo do inverno, a fim de sumarizar os resultados da análise global. Deve ser ressaltada a continuidade deste estudo, ocasião em que os demais meses do ano serão analisados.

Na figura 3 apresentamos as hodógrafas do vento médio de superfície, onde os eixos u e v correspondem às direções zonal e meridional, respectivamente. Nestes diagramas foram plotadas as componentes do vento médio horário, menos o vento médio mensal para o mês de junho (1981/1982). Este procedimento foi

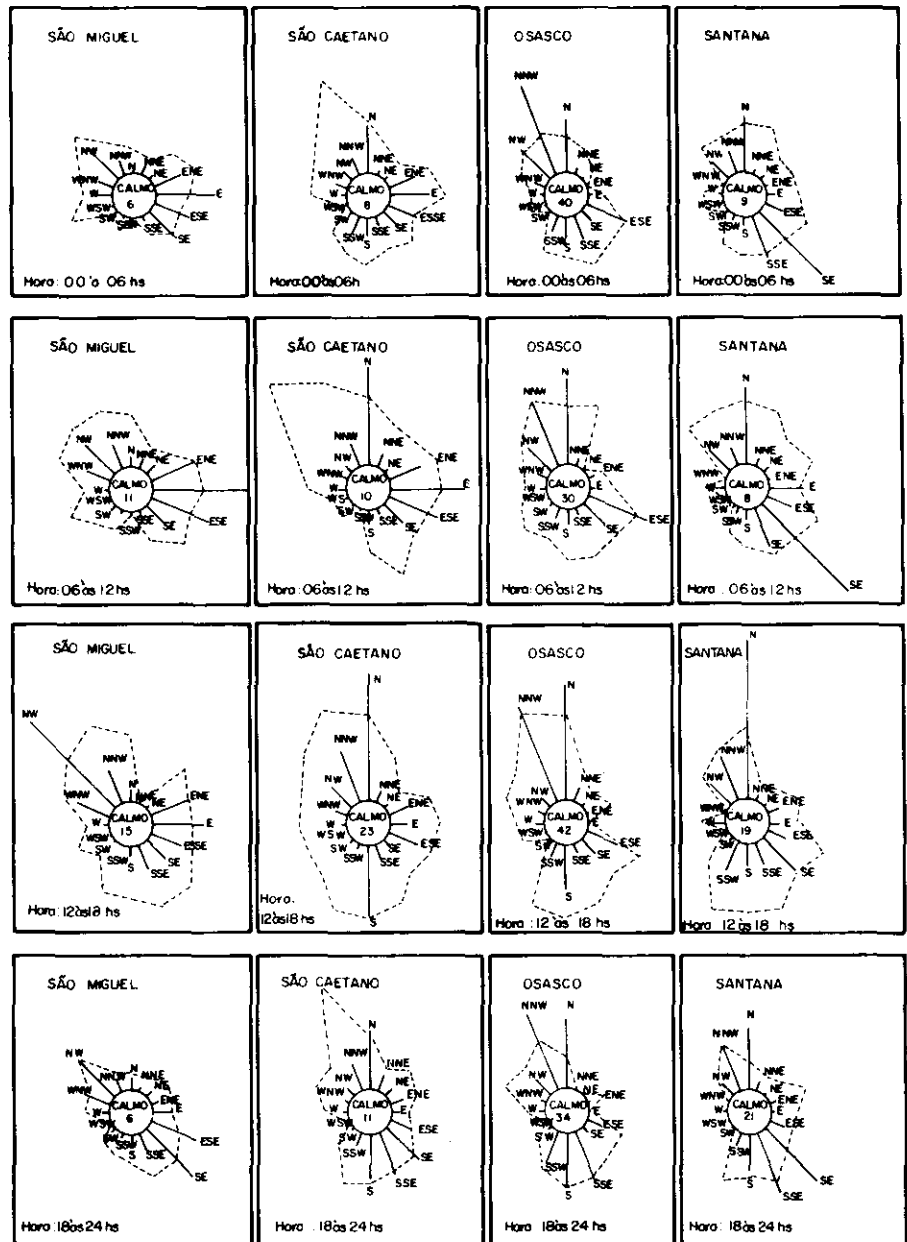


Figura 4 — Análise da direção e velocidade média do vento de superfície, em quatro localidades subdividida em quatro faixas de horários na Região da Grande São Paulo, para o mês de junho (1981).

adotado para garantirmos a eliminação da circulação geral no campo do vento de mesoescala associada à alta subtropical (Dias, 1983).

Em seguida uniram-se os segmentos de reta dos pontos consecutivos e obtiveram-se os polígonos cujos vértices correspondem ao horário local. Os diagramas do vento médio revelam a seguinte característica; o sentido anti-horário de rotação do vento durante um dia (24 horas), para o mês de junho e para todos os meses do ano em todas as estações dentro da cidade. Esta característica mostra a importância do efeito da rotação da terra (Força de Coriolis) sobre a circulação de mesoescala na região,

mesmo levando em conta a baixa latitude de 23,5°S. Esta circulação aumenta a atividade turbulenta local que compete com outros efeitos, como as perturbações de escalas micrometeorológicas e sinóticas, a ilha de calor e a penetração de brisa marítima. Um tratamento sobre a atuação simultânea desses efeitos sobre a circulação local é abordado por Oliveira e Dias, (1982), e Lombardo, (1983). Observou-se, ainda, que os diagramas assumem uma configuração quase elipsoidal simetricamente distribuídos sobre as direções das componentes \bar{v} e \bar{u} , respectivamente. E as maiores amplitudes do vento ocorrem entre as 13 e 17 h; o de

Tabela 1 — Distribuição de frequência do vento médio de superfície por quadrante para o mês de junho de 1981/1982

ESTACÃO	NOROESTE			SUDESTE			SUDESTE			NOROESTE		
	FREQ. %	Nº DE HORAS	PER. HORAS	%	Nº DE HORAS	PER. HORAS	%	Nº DE HORAS	PER. HORAS	%	Nº DE HORAS	PER. HORAS
Santana	21	5	13 às 17	29	7	18 às 24	46	11	01 às 11	4	1	12 às 13
Osasco	21	5	13 às 17	29	7	18 às 24	38	9	01 às 09	12	3	10 às 12
São Caetano do Sul	17	4	14 às 17	29	7	18 às 24	38	9	01 às 09	17	4	10 às 13
São Miguel Paulista	21	5	13 às 17	12	3	18 às 20	54	13	21 às 09	12	3	10 às 12

manhã durante os meses em estudo, essas amplitudes se intensificam proporcionalmente nos meses mais quentes do ano.

Na tabela 1 encontramos um quadro da distribuição de frequência do vento médio por quadrante em função do horário para os locais em estudo. Verificamos que o fluxo de Noroeste ocorre entre as 13 e 17 h; o de Sudoeste entre as 18 e 24 horas; o de Sudeste entre as 01 e 11 h com a maior porcentagem de duração (cerca de mais de 30% do dia); e finalmente o de Nordeste, entre as 10 e 13 h, com baixa porcentagem cerca de 12%. É importante ressaltar que estes resultados representam o comportamento do vento para o mês de junho. A extensão para os outros meses será desenvolvida na continuidade desta pesquisa.

Voltando à figura 3, a configuração das elipses mostra os efeitos da topografia local, como, por exemplo: em Osasco e Santana o fluxo é bastante influenciado pelos efeitos de canalização ao longo da direção Norte-Sul, sendo que em Santana existe uma componente de Nordeste menos acentuada do que em Osasco. Em São Miguel os efeitos da topografia se faz ao longo da direção Noroeste-Sudeste provocada pelo Vale do Tietê, observaram-se, ainda, desvios ao longo da direção Nordeste-Sudeste detectando a influência de mesoescala do Vale do Paraíba na região. Entretanto, em São Caetano do Sul revela ser um local que registra tanto os efeitos das brisas terrestre e marítima como os transportes de Nordeste e Noroeste devido ao aquecimento diferencial na região que induz a influência da circulação térmica; todos os diagramas mostram os efeitos do

atrito durante a noite, pois, estando a atmosfera mais estável os processos de transferência vertical de calor limitam-se às camadas mais próximas da superfície, enfraquecendo a velocidade do vento médio. O contrário ocorre durante o período da manhã quando o vento inicia sua intensificação atingindo a amplitude máxima no período da tarde.

Informações adicionais, que contribuíram para análise do fluxo, foram as rosas de vento, para cada faixa de horário separadamente e para as quatro estações meteorológicas, conforme mostra a figura 4.

Na estação de Santana observou-se que o vento do quadrante Sul-Sudeste tem um domínio a partir das 00 h e atinge seu valor máximo até as 12 h. A direção do quadrante Norte-Noroeste inicia seu domínio a partir das 6 h e atinge seu valor máximo até as 18 horas.

O vento do quadrante Sul-Sudoeste inicia seu domínio a partir das 18 h e se mantém até a 00 h, caracterizando a influência do resfriamento e da topografia, que tem ao Sul da estação o espigão da Paulista. A estação de Osasco apresenta uma predominância do quadrante Noroeste em quase todos os horários, porém, a maior frequência ocorreu no período da tarde, e à noite, iniciou a predominância dos quadrantes Sudoeste-Sudeste. Esta predominância é motivada pela localização da estação que está próxima do rio Tietê, o qual, nesta região, se estende ao longo da direção Noroeste-Sudoeste.

Na estação de São Caetano observou-se que o vento se distribui ao longo dos quadrantes Nordeste-Noroeste e Sul-Sudoeste a Sudeste, sendo o vento do quadrante Norte-

Noroeste mais persistente, durante o dia, e à noite dominam as direções Sudeste-Sudoeste que persistem até o amanhecer. As influências sobre a estação para o vento destes quadrantes, em parte são devidas à diferença de conta de 96 m entre a altitude da estação e uma elevação ao Norte-Nordeste distante 3 km. O outro efeito é a influência das brisas terrestre e marítima que se somam à circulação térmica local. Na estação de São Miguel Paulista o vento também se canaliza ao longo da direção Noroeste-Sudoeste. Ao anoitecer até boa parte da manhã, a predominância é do quadrante Sudeste com um desvio para Este-Nordeste pela manhã e à tarde, o vento do quadrante Noroeste assume um domínio total na estação. Nesta estação a influência sobre a circulação é devida basicamente aos fluxos oriundos do Vale do Tietê (Sudeste-Noroeste) e o fluxo residual do Vale do Paraíba.

Em todas as estações observou-se que em média o fluxo se desloca ao longo das direções Norte-Noroeste a Sul-Sudeste.

O vento do quadrante Norte-Noroeste predomina à tarde com uma velocidade bastante intensa e com pouca persistência, enquanto o vento dos quadrantes Sudoeste a Sudeste predomina entre o anoitecer e o amanhecer, com velocidade fraca, porém com maior persistência. O vento que sopra ao anoitecer e ao amanhecer inicia-se forte devido ao componente da brisa que se soma ao fluxo e vai enfraquecendo à medida que se inicia o resfriamento noturno estabilizando a circulação local. No período da manhã inicia o domínio da curvatura anticiclônica que persiste até no máximo às 12 horas, quando os efeitos da área metropolitana dá origem à ilha de calor, que se intensificam após às 12 horas se refletindo através do fluxo de Noroeste e o desenvolvimento da convergência. Estes efeitos são reduzidos ao anoitecer, com a penetração da circulação sinótica através do enfraquecimento do gradiente de pressão.

Análise do Fluxo do Vento Médio de Superfície

O fluxo do vento médio superficial foi analisado usando-se o método desenvolvido por Sandstrom (ver Peterssen, 1956).

No estágio inicial da análise plotaram-se, sobre um mapa, as direções do

Tabela 2 — Variação diária da velocidade média do vento no período de maio a agosto (1981-1982), na região da Grande São Paulo

HORA	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
VELOCIDADE MÉDIA (m/s)	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,7	1,7	2,0	2,3	2,5	2,5	2,7	2,6	2,7	2,7	2,2	1,9	1,6	1,2	1,6	1,5	1,5

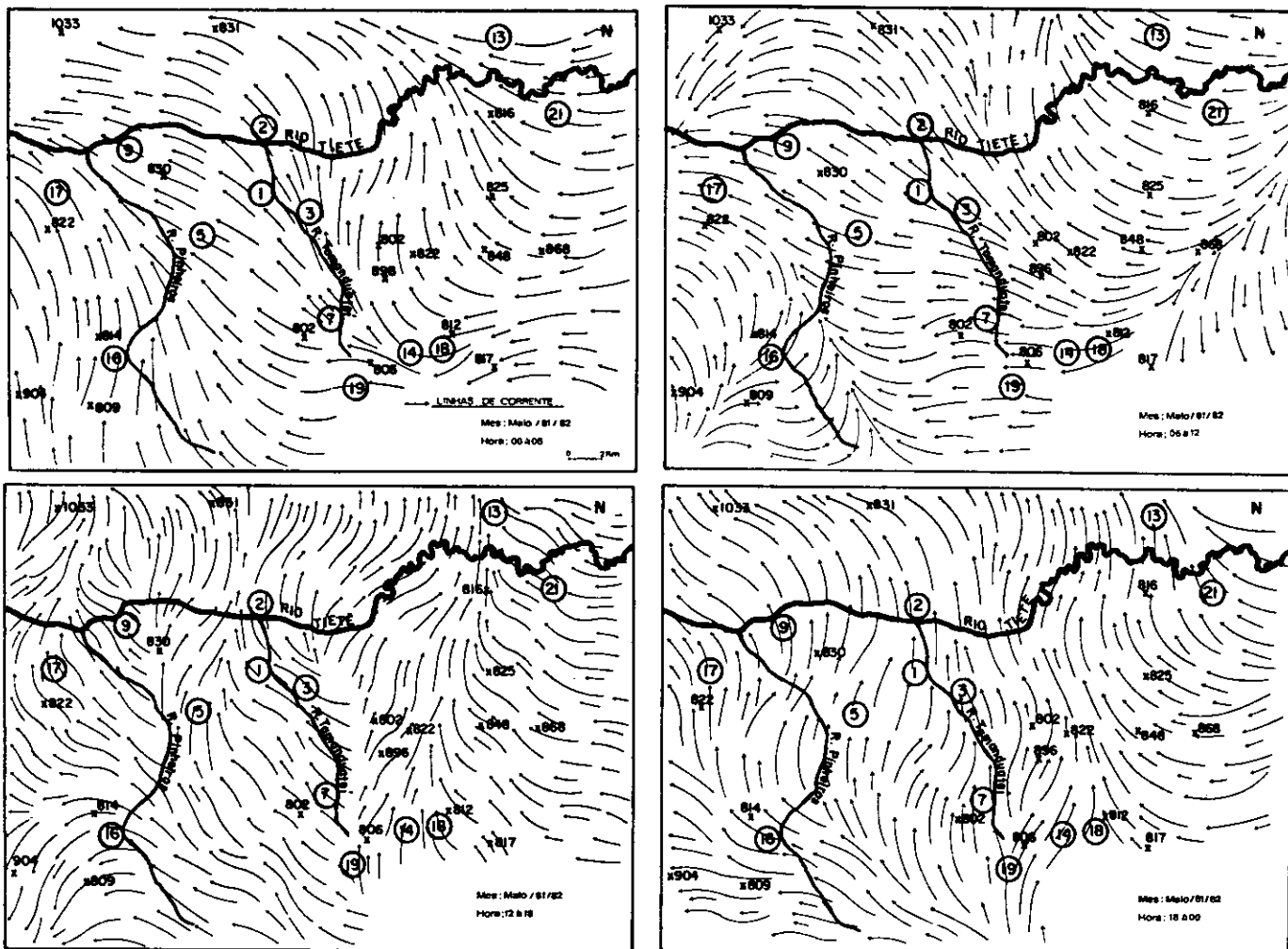


Figura 5 — Análise das linhas de corrente do campo do vento médio de superfície para o mês de maio (1981/1982) na região da Grande São Paulo. X — Altitudes O — Estações

vetor médio, o qual foi calculado para os intervalos de tempo prefixados e traçaram-se as isôgonas (linhas de mesma direção de vento). Em seguida, traçaram-se pequenos segmentos de retas paralelas sobre as isôgonas; a fim de se determinar o delineamento do fluxo. Finalmente, construíram-se as linhas de corrente que determinaram o fluxo do vento superficial.

Para o desenvolvimento desta análise assumiu-se que o vento sopra paralelo à camada limite superficial e não se consideram os efeitos da tensão de cisalhamento vertical.

A tabela 4.2 fornece a variação diária da velocidade média do vento para a área metropolitana de São Paulo, referente ao período de maio

Tabela 3 — Estações meteorológicas do sistema telemétrico na região da Grande São Paulo

Nº	LOCAL E Nº DAS ESTAÇÕES	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		ALT. (M)	EQUIPAMENTOS
		LAT. SUL	LONG. OESTE		
1	Parque Dom Pedro	23º32'43"	46º37'45"	730	Anemôgrafo, higrômetro, pluviômetro, termômetro
2	Santana	23º30'20"	46º38'10"	730	Anemôgrafo
3	Moóca	23º32'50"	46º36'00"	740	Anemôgrafo
5	Ibirapuera	23º34'55"	46º39'25"	750	Radar acústico, anemôgrafo
7	São Caetano do Sul	23º36'10"	46º34'20"	740	Anemôgrafo
9	Lapa	23º30'40"	46º41'40"	720	Anemôgrafo
13	Guarulhos	23º27'30"	46º29'30"	730	Anemôgrafo
14	Santo André (Centro)	23º38'30"	46º32'10"	760	Anemôgrafo
16	Santo Amaro	23º39'10"	46º42'20"	730	Anemôgrafo
17	Osasco			725	Anemôgrafo
18	Santo André (Capuava)	23º38'20"	46º29'30"	800	Anemôgrafo
19	São Bernardo do Campo			760	Anemôgrafo
21	São Miguel Paulista	23º30'00"	46º27'30"	800	Anemôgrafo

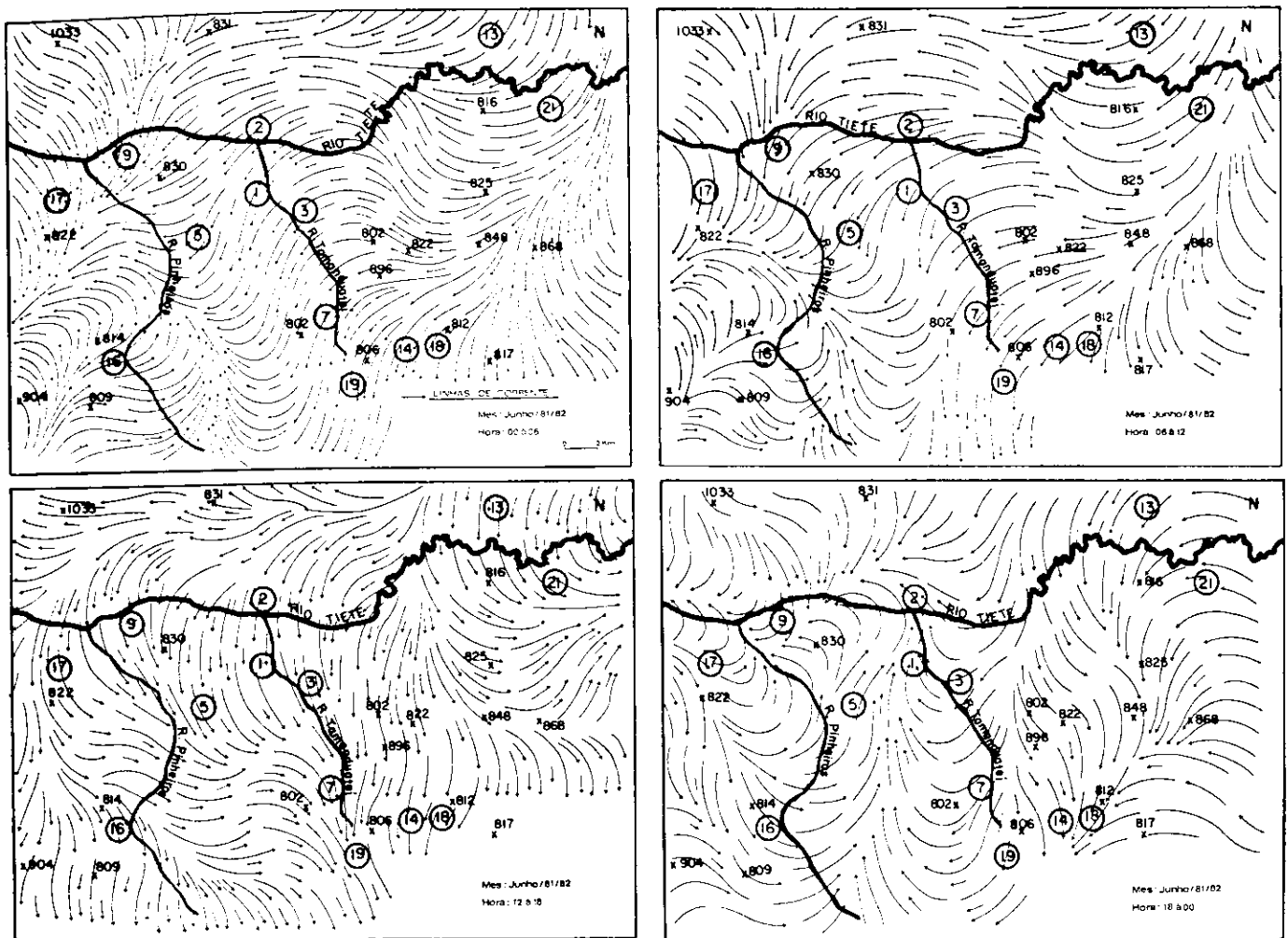


Figura 6 — Análise das linhas de corrente do campo do vento médio de superfície para o mês de junho (1981/1982) na região da Grande São Paulo. X — Altitudes O — Estações

a agosto (1981/1982). Para este período constatou-se que a direção média do vento está entre 10° e 230° para uma persistência de 70% à noite e entre 230° e 350° para uma persistência de 30% durante o dia. A tabela mostra que em mais de 58% do tempo o vento sopra com valores médios abaixo de 1,7 m/s representando a condição de mistura fraca permitindo acumulação de poluentes nos baixos níveis, no período noturno e boa parte da manhã. Logo o período que favorece a dispersão e transporte persiste durante um intervalo de 42% do tempo e deste, apenas 70% representam condições altamente favoráveis à dispersão de poluentes.

As figuras 5 e 8 ilustram a análise final das linhas de corrente do campo do vento médio de superfície, por intervalos de seis em seis horas, para os meses de maio a agosto (1981/1982).

Nos mapas das figuras 5 a 8 os números dentro dos pequenos círculos representam as estações automáticas onde se localizam os anemô-

metros da rede, e as suas coordenadas geográficas se encontram na tabela 3.

A descrição sobre o comportamento do fluxo será dividida em dois períodos:

- período diurno (06-12 hl) e (12-18 hl);
- período noturno (18-00 hl) e (00-06 hl).

Inicialmente será focalizado o período de 06 às 12 hl a partir do mês de maio comparando-se em seguida com os demais meses.

Período diurno (06-12 hl)

Esta faixa de horário representa um período de transição do dia, cujo fluxo é induzido principalmente pela distribuição da pressão sinótica do Anticiclone Subtropical Marítimo e a estratificação atmosférica é quase neutra ou ligeiramente instável. Para facilitar a análise e torná-la mais objetiva dividiu-se a região em quatro quadrantes a saber:

- Nordeste (Guarulhos, São Miguel Paulista);

- Sudeste (Aricanduva, Capuava, Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul);

- Sudoeste (Represas Billings e Guarapiranga, Santo Amaro e Parque Ibirapuera);

- Noroeste (Lapa, Osaso e adjacências).

A Mooca e o Parque D. Pedro como o Centro e Santana representam a região Norte.

Pelo mapa da figura 5 o fluxo vindo de Leste se bifurca seguindo duas direções: uma de Este-Sudeste (ESE) que atinge São Miguel Paulista e Guarulhos, e a outra de Nordeste (NE) que passa sobre todo quadrante Sudeste. Na altura de Santo André, São Caetano e São Bernardo (ABC), o fluxo de NE se bifurca dividindo a corrente em duas direções, uma de SE, para o Centro e outra de Leste (E). Em todos os setores Nordeste e Sudeste, da região, o fluxo se desloca com uma velocidade média de 1 m/s. Nos setores Sudoeste e Noroeste o fluxo é submetido a velocidades abaixo de 0,6 m/s. No entanto no

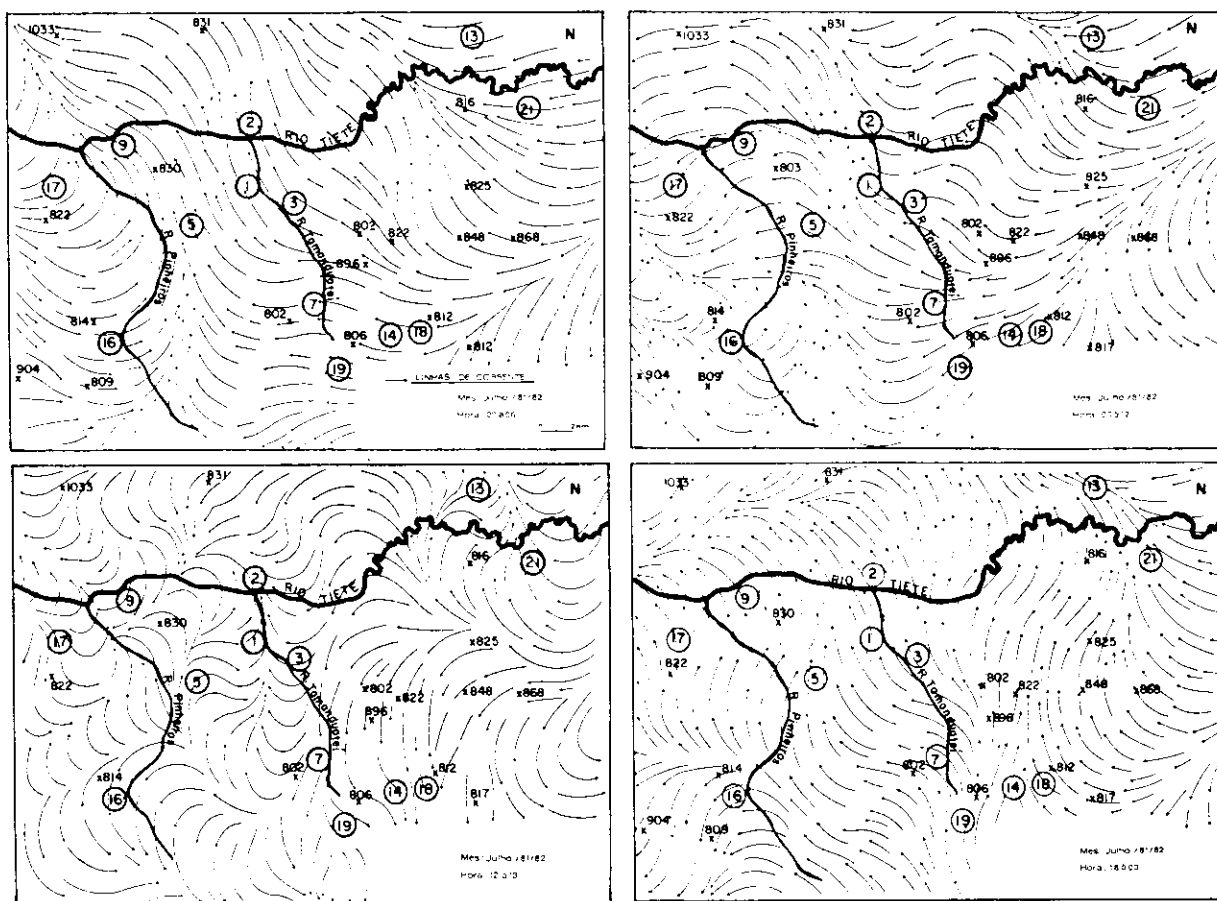


Figura 7 — Análise das linhas de corrente do campo do vento médio de superfície para o mês de junho (1981/1982) na Região da Grande São Paulo. X — Altitudes O — Estações

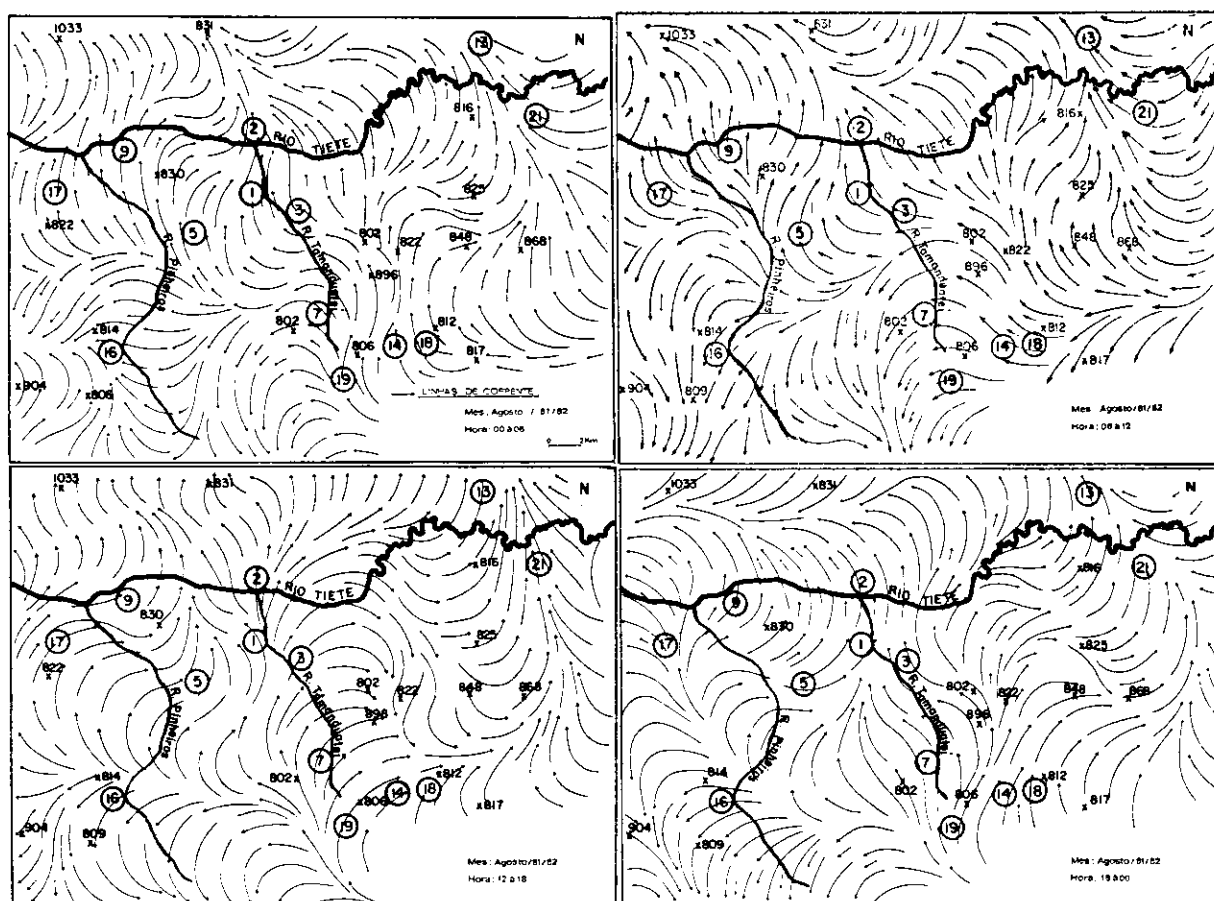


Figura 8 — Análise das linhas de corrente do campo de vento médio de superfície para o mês de agosto (1981/1982) na Região da Grande São Paulo. X — Altitudes O — Estações

Centro e na zona Norte a velocidade variou entre 1,0 m/s e 1,4 m/s. O setor Nordeste recebe o fluxo de SE que é bloqueado pela serra da Cantareira e se soma com a corrente que passa pelo Centro e Parque Ibirapuera.

Nesta análise observou-se a formação de uma zona de convergência à margem direita do alto Pinheiros e uma zona de divergência à margem esquerda do rio. A zona de convergência é resultante do efeito da brisa de pequena escala, provocada pelas represas Billings, Guarapiranga mais a fraca advecção marinha, o fluxo que desce dos relevos da margem esquerda do rio, e o transporte de Leste vindo da área mais industrializada. Esta zona de convergência se estende para o setor Noroeste até Osasco, transportando toda concentração de poluentes da zona industrial, cuja atividade turbulenta, neste horário, não é suficiente para diluir toda concentração, uma vez que o processo de emissão é contínuo. É importante considerar-se a emissão ao longo do rio Tamandateí que passa pelo Centro e se acumula também nos setores Noroeste e Norte da área metropolitana.

Comparando-se esta circulação, do mês de maio com a dos outros meses, verificamos que é semelhante a todos os meses.

A razão desta persistência nos meses de maio a agosto está diretamente ligada à influência do resfriamento do relevo a Nordeste e a Leste da área urbanizada, da advecção do ar frio do Vale do Paraíba e do maior avanço do anticiclone subtropical marítimo para o continente, cujo núcleo do sistema se encontra no oceano mantendo-se a uma distância média de 1 mil km.

No mês de agosto o centro do anticiclone recua do continente para o oceano e se posiciona a uma distância média superior a 2 mil km de São Paulo. O efeito deste deslocamento se reflete imediatamente na circulação local, nesta faixa de horário, conforme mostra a figura 8. Com isto o ar frio do relevo de Oeste e Norte, submetido ainda ao efeito da força gravitacional, desce invertendo todo fluxo mantido nos meses de maio a julho. O fluxo convergente da região de Santo Amaro é bloqueado pela circulação vinda de Osasco, a qual é distorcida para Leste transpondo o rio Tamandateí e atingindo a região do ABC, seguindo para Nordeste.

Logo, toda emissão da área industrializada é transportada para a região do vale do alto Tietê.

Período diurno (12-18 hl)

Nesta faixa de horário o fluxo é submetido aos seguintes mecanismos: desacoplamento da camada limite superficial; intensificação da ilha de calor; sobreposição do regime de vento de mesoescala e aumento da instabilidade térmica sobre a região. A interação desses efeitos torna o transporte do fluxo bastante caótico assumindo trajetórias de pouca persistência conforme mostram os gráficos da figura 2, e para cada mês assume um comportamento diferenciado, figura 6. Contudo, o fluxo do mês de maio se desloca em direção à zona Norte da área urbana. A zona de convergência na região do rio Pinheiros foi completamente destruída, porém surge outra que se estende entre o ABCM (Santo André, São Bernardo do Campo, São Caetano do Sul e Mauá) e Guarulhos. Esta zona de convergência assume melhor definição no mês de agosto, sendo que neste mês o fluxo é quase semelhante ao do mês de maio.

Os meses de junho e julho apresentaram uma circulação totalmente oposta aos meses de maio e agosto.

Observa-se uma mudança total no fluxo de junho, cuja direção predominante é a de Norte-Noroeste (NNW) em toda área metropolitana. A confirmação desta predominância pode ser investigada através das rosas de vento da figura 4. A velocidade média do fluxo variou entre 0,4 m/s e 1,6 m/s e as trajetórias sobre o setor Leste da cidade fluem mais rapidamente do que as que se deslocam sobre o setor Oeste.

A circulação do mês de junho é caracterizada pelo fluxo contínuo da parte Norte da cidade em direção à serra do Mar. No entanto toda emissão de veículos automotores do setor central deverá ser transportada para o Sul da cidade, onde, eventualmente, deverão ocorrer altas concentrações de oxidantes fotoquímicos. O inverso deverá acontecer nos meses de maio e agosto.

No mês de julho o fluxo assumiu um comportamento igual ao do período anterior, porém com diversos pontos de convergência e divergência, demonstrando a influência da atividade das células convectivas na região, conforme mostra o trabalho desenvolvido por Oliveira et al. (1983).

Período noturno (18-00 hl)

No começo da noite a região é submetida ao processo do resfriamento, dando início a estabilidade atmosférica, e o fluxo de mesoescala, oriundo da costa à tarde, avança rapidamente contribuindo cada vez mais para o desenvolvimento da estabilização noturna.

No mapa das figuras 5 a 8 para esta faixa de horário, o domínio do fluxo das direções Sul-Sudoeste (SSW) e Sul-Sudeste (SSE) é evidente em todos os meses, exceto para o mês de junho onde esta direção não atinge a área como um todo. Este fluxo do quadrante Sul é associado a um componente de velocidade média relativamente forte, uma vez que o ar quente e úmido que transpõe a serra do Mar é submetido ao efeito de subsidência adiabática e à perda de calor sensível, portanto, tornando-se mais pesado ao atingir a área metropolitana, na camada superficial.

Este mecanismo induz a formação de uma inversão de subsidência dentro da Camada Limite Planetária sobre outra inversão próxima da superfície, cujo desenvolvimento é mais lento.

A extensão vertical da brisa marítima em região de montanha varia entre 1.500 m e 2 mil m Munn (1971) e Kikuchi (1981).

Ao anoitecer, a extensão vertical divide-se em dois ramos no topo da serra:

Um ramo desce a serra e é submetido ao efeito da ação da gravidade dando início mais cedo à formação da brisa terrestre no litoral; e o outro é advectado continente adentro mantendo o efeito da brisa marítima durante boa parte da noite sobre a região urbanizada, que se situa na altitude média de 750 m e distante 45 km do litoral. Segundo Estoque (1961) e Wellington (1961) a extensão horizontal da brisa marítima poderá atingir entre 100 km e 200 km.

No mapa da figura 5, no mês de maio, todo fluxo segue para a zona Norte da cidade transportando toda a emissão gerada em todos os pontos da área metropolitana. No mês de julho o comportamento das linhas de corrente é bastante semelhante, porém se nota um contrafluxo que desce suavemente da serra da Cantareira no quadrante Noroeste da cidade. Constatou-se ainda a formação de um fluxo divergente na direção de Taboão da Serra e Embu. E, finalmente, uma convergência sobre Guarulhos, devido ao fluxo de Leste (E) canalizado pelos relevos que formam a região do Vale do Paraíba.

No mês de agosto a configuração das linhas de corrente é semelhante à do mês de julho. O comportamento do fluxo é mais sensível à topografia local do que os outros meses, talvez, porque o efeito da estabilização do ar seja mais acentuado nesta época e o mês de agosto seja mais característico do inverno.

No mês de junho, nesta faixa de horário, a circulação local está se ajustando ao fluxo de Leste (E) e à influência da advecção marinha. Assina-

lou-se a formação de três fluxos convergentes: o primeiro originou-se entre os rios Tamanduaté e Pinheiros, e se estende até o rio Tietê; o segundo gerou-se pelo encontro deste fluxo e o divergente proveniente da serra da Cantareira; e o terceiro surgiu através do fluxo de Leste (E) e o de Norte (N); este fluxo iniciou-se na região de Guarulhos e se estendeu até Capuava. Esta convergência bloqueou qualquer transporte de poluentes na direção do centro.

Período noturno (00-06 h)

Para fechar o ciclo da análise, serão discutidas as variações do fluxo entre a noite e o amanhecer. As figuras 5 a 8 mostram esquematicamente a padronização do fluxo de Leste (E) para Oeste (W) com uma componente fraca do quadrante Sul (S). Durante este período o fluxo sofreu a influência direta do gradiente de pressão sinótica (que é menos efetivo durante a noite devido à estratificação estável) e do fluxo de Leste (E) trazido pela circulação de retorno da brisa terrestre costeira. Este mecanismo impediu a transferência de momentum na vertical, por isso o resfriamento da área urbana em relação à costa ficou limitado praticamente a uma camada muito próxima à superfície, onde os efeitos do atrito são muito importantes.

Em todos os meses existiu uma semelhança muito grande no comportamento do fluxo, exceto no mês de junho. Neste mês foi grande a influência dos ventos catabáticos de Norte-Nordeste (NNE) sobre a região que bloqueia todo o fluxo de Sul eliminando, com isto, a emissão de poluentes para a área central da cidade. No entanto a maior contribuição de poluentes foi proveniente do quadrante Este-Nordeste (ENE) com uma velocidade média entre 1 m/s e 1,6 m/s, a qual é 50% inferior à do fluxo que sopra sobre os quadrantes sudoeste e noroeste. Observou-se, também, a intensificação da convergência alimentada na região da represa Billings e que se estende paralelamente ao rio Pinheiros atravessando o mesmo e seguindo para as regiões de Taboão da Serra e Embu.

CONCLUSÃO

O fluxo do vento médio sobre a área metropolitana da Grande São Paulo foi analisado durante o período de maio a agosto. A análise foi conduzida durante um ciclo de 24 horas, dividido em intervalos de seis em seis horas, para permitir a visualização da distorção do fluxo pela topografia local, efeitos térmicos governados pelo aquecimento regional e a circulação de mesoescala

acoplado aos processos dinâmicos de microescala.

Para realização da análise utilizaram-se 560 mil dados médios horários de vento de superfície perfazendo um período de dois anos de dados de 1981 a 1982. Os resultados são resumidos como se segue:

— A direção do vento é mais regular nos períodos noturno e manhã e bastante irregular no período da tarde.

— A variação mensal e horária do vento médio mostrou que o sentido de rotação da direção, durante as 24 horas do dia, é anti-horário em todas as estações, sem exceção para todos os meses. O vento dos quadrantes Sul domina entre o anoitecer e o amanhecer, e o dos quadrantes Norte atua no período da manhã e parte da tarde. A informação adicional da rosa-dos-ventos mostrou claramente os efeitos de canalização próximo das estações, bem como a variação temporal da direção do vento médio.

— A análise das linhas de corrente mostrou uma padronização do fluxo do vento, bem definido, no período noturno e ao amanhecer em quase todos os níveis. No período da tarde o fluxo mostrou certa irregularidade, devido ao desacoplamento da Camada Limite superficial pela atividade convectiva local.

— O presente estudo mostrou que a medição do vento médio por um anemógrafo é representativo durante pequena porcentagem do tempo da área metropolitana como um todo. E que o vento analisado a partir de rosa-dos-ventos é inadequado para distinguir-se a padronização do fluxo, visto que a informação obtida da rosa-dos-ventos assume que as trajetórias são retas.

— As zonas de divergência e convergência, aqui determinadas, assumem um papel importante sobre a localização de novas indústrias nos diversos pontos da região. Portanto, a instalação de indústrias não dependerá exclusivamente do vento local e sim deverá incluir as trajetórias do fluxo-padrão de mesoescala do vento médio nos projetos de estudo.

Face aos comentários realizados, sugere-se uma reestruturação com relação à distribuição espacial das estações automáticas. Assim sendo constatou-se que os setores Leste e Oeste da região são áreas razoavelmente extensas com um pequeno número de estações. E conforme se observou existe um fluxo de Leste para Oeste bastante definido sobre a região.

Espera-se que os resultados obtidos possam servir de orientação para um melhor entendimento dos processos de transporte e dispersão de poluentes na região da Grande São Paulo e assim contribuir nas avaliações de pla-

nejamento e localização de fontes de potencial de poluição do ar.

Em se tratando de análise preliminar os resultados apresentados favorecem uma continuidade do presente estudo.

Para isto deverá se determinar o comportamento mensal do fluxo do vento médio para todos os meses e adicionar-se outros fatores climáticos para um melhor entendimento dos mecanismos de dispersão e transporte dentro da região urbana da Grande São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 — Brooks, C.E.P. & Carruthers, N. — *Handbook of Statistical Methods in Meteorology* London Her Majesty's Stationary Office — 1953, pp. 412.
- 02 — Estoque, M.A. — *A Theoretical Investigation of The Sea Breeze*. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., (87): 136-146, 1961.
- 03 — Godinho, R. Oliveira, S., Almeida, M.A.L., — *Estudo Preliminar sobre a Utilização da Sonda Acústica no Controle da Poluição do Ar*. 11º Cabes, Fortaleza — Ceará — 1981.
- 04 — Johnson, G.T. — *Estimation of Schemes for Estimating Surface Wind Strength*. Atmos. Environ., (13): 437-442, 1979.
- 05 — Kikuchi, Y., Arakawa, S., Kimura, F., Shirasaki, K., & Nagano, Y. — *Numerical Study on The Effects of Mountains on The Land and Sea Breeze Circulation in the Kanto District*. J. Met. Soc. Japan, 5 (56): 723-738, 1981.
- 06 — Lombardo, M.A., — *As Características da Ilha de Calor na Grande São Paulo*. (Tese de Doutorado não Publicada) IG-USP, 1983.
- 07 — Munn, R.E. — *Descriptive Micrometeorology*, Acad. Press. N.Y. 1966, pp. 245.
- 08 — Oliveira, A.P., & Dias, P.L.S. — *Climatologia de Ar Superior Associado à Brisa Marítima em São Paulo*. IAG-USP, 1982.
- 09 — Oliveira, S., Almeida, M.A.L., & Bruni, A.C. — *Determinação de Parâmetros Meteorológicos Críticos para Dispersão de Poluentes Utilizando a Sonda Acústica*, 12º Cong. Abes — Comboriú — Santa Catarina, 1983.
- 10 — Dias, P.L.S. — *Eliminação dos Efeitos de Circulação Geral no Fluxo de Mesoescala Local*. (Comunicação Pessoal). IAG-USP, 1983.
- 11 — Oliveira, S. & Almeida M.A.L. — *Estudos sobre Condições Sinóticas* — Divisão de Meteorologia — Cetesb (Não publicado) 1982.
- 12 — Pettersen, S. — *Weather Analysis and Forecasting*, 2nd Ed. McGraw-Hill, pp. 428, 1956.
- 13 — Sholtz, M.T. and Brouckaert, C.J. — *Modeling of Stable Air Flow Over a Complex Region*, J. Appl. Meteor., (9): 1249-1257, 1978.
- 14 — Skibin, D. — *Sitting of Industrial Zones Near Cities* Atmos. Env. (9): 543-547, 1975.
- 15 — Tyson, P.D., & Preston — Whyte, R. A. — *Observations of Regional Topographically — Induced Wind Systems in Natal*, J. Appl. Meteor. (11): 643-650, 1972.
- 16 — AB'Saber, Aziz Nacib — *Geomorfologia do Sítio Urbano de São Paulo*, USP, 1957, 343 p.