

**Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas**

**RELAÇÕES ENTRE EVENTOS METEOROLÓGICOS
E CHUVA ÁCIDA EM SÃO PAULO**

Ana Elizabethe da Silva

**São Paulo, SP
2005**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ANA ELIZABETHE DA SILVA

RELAÇÕES ENTRE EVENTOS METEOROLÓGICOS E CHUVA ÁCIDA EM SÃO PAULO

Dissertação apresentada ao Instituto de
Astronomia, Geofísica e Ciências
Atmosféricas da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia
Orientadora: Profa. Dra. Adalgiza Fornaro

São Paulo
2005

Sumário

DEDICATÓRIA	3
AGRADECIMENTOS	4
PENSAMENTOS	5
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	8
RESUMO	9
ABSTRACT	10
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO	11
1.1 Fundamentação teórica	14
1.1.1 Processos de remoção de poluentes	14
1.1.2 Estabilidade atmosférica	15
1.2 Meteorologia e poluição do ar	18
1.3 Meteorologia e composição química de águas de chuva	20
1.4 Características da região de estudo	24
1.4.1 Condições climáticas e geográficas	24
1.4.2 Poluição em São Paulo	26
1.5 Objetivo	26
Capítulo 2 – MATERIAIS E MÉTODOS	27
2.1 Dados de química	27
2.2 Dados meteorológicos	28
2.2.1 Parâmetros calculados	30
Capítulo 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
3.1 Análise dos dados de precipitação	31
3.2 Avaliação da concentração iônica entre os diferentes eventos	32
3.3 Condições meteorológicas entre os eventos	37
3.4 Estudo de dois casos	43
3.4.1 Primeiro caso – 12/02/1990	45
3.4.2 Segundo caso – 17/05/1990	54
3.5 Situação meteorológica em superfície nos dois casos	63
3.6 Variações intra-evento	66
Capítulo 4 – CONCLUSÕES	73
4.1 Sugestões para futuros trabalhos	74
Capítulo 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXO	81

DEDICATÓRIA

A minha mãe Margarida Tereza da Silva (em memória) pelo seu incentivo, dedicação, paciência, muito amor, carinho e pelo seu exemplo de vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter iluminado meu caminho e me ajudado tanto nas horas felizes quanto tristes, com seu apoio incondicional.

A todos meus irmãos, principalmente Maria José, Maria Gorete e Gema Galgani, pelo apoio, carinho e compreensão.

A FAPESP pela bolsa de mestrado (processo 03/03072-0).

Em especial a todos os meus amigos que conquistei no decorrer do mestrado e que estiveram presentes em todos os momentos, principalmente Taciana, América, Gyrlene, Fabiana, Mariana, Tatiana, Cristina, Michel, Santiago, Fabrício, Schneider e Igor, pelos momentos inesquecíveis que passamos.

A professora Maria de Fátima Andrade pela amizade.

A professora Adalgiza Fornaro pela orientação.

Aos professores, Rosmeri Rocha e Fábio Luiz Teixeira Gonçalves pela valiosa ajuda na elaboração da dissertação.

Aos meus amigos Michel, Odon, Rosana pela ajuda incondicional no desenvolvimento da dissertação e apoio.

Um agradecimento especial a Regina, Mariana, Jorge, Hallak e Leila pela ajuda na revisão da dissertação.

A todos os professores do departamento de Ciências Atmosféricas que contribuíram no fortalecimento do meu conhecimento.

A todos os funcionários do IAG-USP, especialmente a Marisa, Samuel, Fagner e Luciana, os bibliotecários e a todos do grupo LAPAt pelos momentos que passamos.

PENSAMENTOS

As coisas que amamos,
as pessoas que amamos
são eternas até um certo ponto.
Duram o infinito variável
no limite de nosso poder
de respirar a eternidade

(Calos Drummond de Andrade)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Condições de estabilidade para um ar não saturado: (a) estabilidade estática positiva e (b) estabilidade estática negativa.....	16
Figura 2. Totais mensais de precipitação da cidade de São Paulo, para os anos 1989 e 1990, e a média climatológica (\pm desvio padrão), referente a 68 anos de dados da Estação Meteorológica do IAG-AF. A pluviometria mensal referente aos eventos do presente estudo foi representada como IQ-USP.....	32
Figura 3. Concentrações médias ponderadas pelo volume (MPV) das diferentes espécies estudadas em águas de chuva coletadas no período entre julho de 1989 e maio de 1990...	33
Figura 4. Valores de pH e condutividade em águas de chuva amostrados na região oeste da cidade de São Paulo entre julho de 1989 e maio de 1990.....	34
Figura 5. Distribuição da frequência de pH para todas amostras de precipitação durante o período de julho de 1989 a maio de 1990.....	35
Figura 6. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 26 de julho de 1989.	39
Figura 7. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 25 de agosto de 1989.....	40
Figura 8. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 06 de março de 1990.	41
Figura 9. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 22 de março.	42
Figura 10. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 12 de fevereiro de 1990.....	43
Figura 11. Distribuição de precipitação durante os dias que antecederam os eventos extremos de precipitação, obtidos através da estação meteorológica do IAG-AF.	45
Figura 12. Imagens de satélite GOES-E em 12Z. (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro (às 21Z).....	46
Figura 13. Cartas sinóticas de pressão em superfície em 12Z. (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.....	47
Figura 14. Campos de pressão ao nível médio do mar e vento em superfície. (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.....	48
Figura 15. Advecção de temperatura em 850 hPa ($*10^4$). (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.....	49
Figura 16. Divergência de umidade em 850hPa ($*10^7$). (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.....	49
Figura 17. Campos de precipitação diária em superfície. (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.....	50
Figura 18. Médias e amplitudes diárias da Temperatura do ar.....	51
Figura 19. Médias diárias da componente meridional (v) do vento.	51
Figura 20. Diagramas Skew- T mostrando as sondagens da temperatura do ar (T) e da Temperatura do ponto de orvalho (T_d) em relação à pressão às 12 UTC, entre 8 a 13 de Fevereiro de 1990.	52

Figura 21. Perfil vertical de temperatura potencial (θ), da temperatura potencial equivalente (θ_e) e da temperatura potencial equivalente saturada (θ_{es}), para o dia 12 de fevereiro de 1990 às 12UTC.....	53
Figura 22. Imagens de satélite GOES-E em 12Z. (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.	55
Figura 23. Cartas sinóticas de pressão em superfície em 12Z. (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.	56
Figura 24. Campos de pressão ao nível médio do mar e vento em superfície. (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.....	57
Figura 25. Advecção de temperatura em 850 hPa ($*10^4$). (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.	58
Figura 26. Divergência de umidade em 850hPa ($*10^7$). (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.	58
Figura 27. Campos de precipitação diária em superfície. (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.	59
Figura 28. Médias e amplitudes diárias da Temperatura do ar.....	60
Figura 29. Médias diárias da componente meridional (v) do vento.	60
Figura 30. Diagramas Skew - T mostrando as sondagens da temperatura do ar (T) e da Temperatura do ponto de orvalho (T_d) em relação à pressão às 12 UTC, entre 13 a 18 de maio de 1990.....	61
Figura 31. Perfil vertical de temperatura potencial (θ), da temperatura potencial equivalente (θ_e) e da temperatura potencial equivalente saturada (θ_{es}), para o dia 12 de fevereiro de 1990 às 12UTC.....	62
Figura 32. Comparação entre os ciclos diurnos de Temperatura do Ar e Umidade Relativa para os dias 12 de fevereiro e 17 de maio de 1990. As linhas vermelhas tracejadas representam o intervalo de tempo da precipitação do dia 12 de fevereiro e as contínuas representam o evento do dia 17 de maio de 1990.....	64
Figura 33. Comparação entre os ciclos diurnos de Velocidade do Vento (a) e Direção do Vento (b) dos dias 12 de fevereiro e 17 de maio de 1990. As linhas vermelhas tracejadas representam o intervalo de tempo da precipitação do dia 12 de fevereiro e as contínuas representam o evento do dia 17 de maio de 1990.....	65
Figura 34. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do $SO_4^{2-} NO_3^-$ (b) para o dia 26 de julho de 1989.....	67
Figura 35. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do $SO_4^{2-} NO_3^-$ (b) para o dia 19 de dezembro de 1989.	68
Figura 36. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do $SO_4^{2-} NO_3^-$ (b) para o dia 10 de janeiro de 1990.....	69
Figura 37. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do $SO_4^{2-} NO_3^-$ (b) para o dia 08 de março de 1990.....	70
Figura 38. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do $SO_4^{2-} NO_3^-$ (b) para o dia 22 de março de 1990.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Identificação dos eventos de chuva amostrados na cidade de São Paulo no IQ-USP no período de julho/1989 a maio/1990.....	28
Tabela 2. Valores da correlação de Pearson entre as espécies químicas durante o período entre Julho de 1989 a Maio de 1990 (223 amostras e $p < 0,05$).....	35
Tabela 3. Valores das concentrações médias aritméticas (\pm desvio padrão) para as espécies analisadas e da razão $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ em cada evento de chuva, para a cidade de São Paulo no IQ-USP no período de julho/1989 a maio/1990.	37
Tabela 4. Comparação entre os totais de precipitação de dois eventos extremos ocorridos em 1990. Dados de pluviometria obtidos da estação Meteorológica do IAG, na Água Funda.	44

RESUMO

Amostras de água de chuva coletadas na região urbana da cidade de São Paulo foram analisadas para o período compreendido entre Julho de 1989 a Maio de 1990. Foram analisadas 223 amostras distribuídas em 20 eventos de precipitação. O principal objetivo dessa análise foi avaliar a influência das condições meteorológicas na composição química da água de chuva. Dados obtidos a partir de estação de superfície, radiossondagens, cartas sinóticas e reanálises de modelo numérico foram utilizados na determinação das condições meteorológicas. Foi observada intensa variabilidade na concentração dos íons H^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- e Cl^- , com boa correlação entre sulfato e nitrato (0,77), embora a razão sulfato/nitrato tenha alcançado valores elevados para alguns eventos em específico. Também foi observada boa correlação desses íons com H^+ (0,56 e 0,66 para os íons SO_4^{2-} e NO_3^- , respectivamente), indicando que a ocorrência dessas espécies químicas pode estar fortemente associada à presença dos ácidos sulfúrico e nítrico, provavelmente via condensação dessas espécies a partir da fase gasosa. O pH das amostras coletadas ficou abaixo de 4,5 em 57% das amostras (pH de 3,88 para o caso mais extremo ocorrido em 12 de Fevereiro de 1990), indicando, portanto a ocorrência de chuva ácida. Embora diferentes padrões de circulação tenham sido identificados, o mesmo não ocorreu com as concentrações das espécies químicas que apresentaram intensa variabilidade sob um mesmo padrão de circulação. Por outro lado verificou-se que concentrações de íons extremamente altas (pH baixo) estavam associadas a forte retenção de poluentes próximo à superfície, devido à ocorrência de inversão térmica nos dias que antecedem o evento de precipitação amostrado. Para eventos em que se verificaram concentrações extremamente baixas (pH elevados) observou-se a passagem de frentes frias nos dias que antecederam a amostragem.

ABSTRACT

Rain water samples collected in a single site located in the urban metropolitan area of São Paulo (Brazil) were analyzed from July 1989 to May 1990, in a total of 223 samples distributed among 20 events. The main goal of this study was evaluate the influence of meteorological conditions on chemical composition of rain water collected. Meteorological conditions were determined from atmospheric soundings, surface synoptic charts, numerical global model reanalysis and one surface station placed close to the site of rain water measurements. It was observed high variability in the concentration of ions H^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- e Cl^- and better correlation between sulfate and nitrate (0,77), although the sulfate/nitrate ratio showed high values in some specific events. In addition, it was observed good correlation between of these same ions and H^+ (0.56 and 0.66 to SO_4^{2-} and NO_3^- , respectively). It suggests that occurrence of these chemical species might be related to sulfuric and nitric acids via condensation of these species from their gaseous phases. A pH lower than 4.5 in 57% of samples indicates the presence of acid rain (it was found a pH of 3.88 in the most extreme case - February 12, 1990). Different atmospheric circulation patterns were identified, but the same behavior were not observed to the properties of chemical species: it was found high variability associated to a unique pattern of atmospheric circulation. On the other hand, high concentration of ions (low pH values) was related to thermal inversions during the days before the data collection. In samples in which low ions concentrations (high pH values) was identified, cold frontal systems was also present in the region.

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica inclui uma gama de atividades, fenômenos e substâncias que contribui para a deteriorização da qualidade natural da atmosfera, causando efeito negativo ao meio ambiente. A poluição atmosférica é um fenômeno decorrente principalmente da atividade humana em vários aspectos, dentre os quais destacam-se o rápido crescimento populacional, industrial e econômico. Desta forma, a poluição atmosférica consiste de gases, líquidos ou sólidos presentes na atmosfera em níveis elevados o suficiente para causar dano ao ser humano, animais, plantas e materiais (Almeida, 1999).

A chuva ácida é um problema ambiental conhecido, principalmente em regiões industrializadas. A acidez da chuva foi historicamente associada à presença dos ácidos sulfúrico e nítrico, produtos da oxidação dos compostos de enxofre (SO_2) e nitrogênio ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) emitidos, principalmente, pela queima de combustíveis fósseis, mineração, que se submetem a dispersão, transporte e reações químicas na atmosfera antes da deposição seca ou úmida como ácidos sulfúrico e nítrico ou parcialmente ou totalmente neutralizado por sais de amônia. A precipitação é muito eficiente na remoção desses compostos na atmosfera. Porém, os ácidos orgânicos também têm sido reconhecidos como espécies importantes para acidez de águas de chuva (Finlayson-Pitts e Pitts, 2000; Seinfeld e Pandis, 1998; Kumar et al. 2002).

O termo “chuva ácida” tem sido extensivamente usado na literatura para descrever processos de formação, transporte e deposição de poluentes atmosféricos. Devido à complexidade do fenômeno, que além dos eventos de precipitação envolvem processos de deposição seca de partículas e gases, a terminologia “deposição ácida” tem sido considerada mais adequada (Finlayson-Pitts e Pitts, 2000).

Segundo Seinfeld e Pandis (1998) e Elsom (1987) a chuva ácida influencia o meio ambiente de diferentes formas, alguns de seus efeitos incluem:

- Ecossistemas aquáticos (lagos, rios, etc.) – o impacto é focalizado sobre a população de peixe, causando a morte devido ao aumento na acidez;
- Ecossistemas terrestres – o aumento na acidez do solo, causa à diminuição de nutrientes disponíveis, mobilidade de metais tóxicos, decomposição de microorganismos no solo e redução na produtividade de florestas;

- Saúde humana – os efeitos diretos ocorrem devido ao aumento dos níveis de poluentes durante períodos de inversão térmica; os efeitos indiretos ocorrem através da liberação de metais pesados como chumbo, cádmio, cobre, zinco e mercúrio por causa do aumento da acidez;
- Materiais – a chuva ácida pode acelerar a corrosão de materiais e erosão de rochas, onde à presença de compostos de enxofre são os principais responsáveis.

A dinâmica da atmosfera é complexa e engloba processos de emissão, transporte, transformação química e deposição de poluentes, de modo que a composição química de um evento de precipitação é resultado do conjunto de processos emissão/deposição, devendo ser analisado de modo amplo. Somam-se a isso, fatores meteorológicos como: direção dos ventos, temperatura, umidade relativa, intensidade da radiação solar, percurso e altitude das nuvens, intensidade da chuva e tamanho das gotas que afetam os processos de transformação, dispersão e remoção de poluentes atmosféricos (Finlayson-Pitts e Pitts, 1986; Seinfeld e Pandis, 1998). Assim, estudos da composição atmosférica e sua variabilidade temporal e espacial apresentam-se como desafio multidisciplinar, englobando a física, a química, a meteorologia, além de requerer forte embasamento matemático e computacional no que tange à modelagem.

A composição química da precipitação é altamente variável e dependente dos diferentes processos de remoção de poluentes nas gotas de nuvem e gotas de chuva. Particularmente, a composição química da precipitação é influenciada por: (1) fontes de emissões de poluentes; (2) reações químicas na atmosfera e (3) mecanismos de remoção através de movimentos de massas de ar (Avila e Alarcón, 1999).

Os processos que resultam na incorporação de poluentes do ar pelas gotículas de nuvem ou incorporação de partículas abaixo da nuvem na gotícula em queda são pouco compreendidos e dificultam os estudos experimentais. A relação da composição química da água de chuva associada às condições meteorológicas pode promover maior entendimento das causas da chuva ácida (Samara et al., 1992; Beverland et al., 1998).

As amostras de chuva para eventos de precipitação individuais em pequenos períodos de amostragem podem mostrar mais informações sobre a deposição úmida de espécies ácidas, que médias diárias ou mensais, em que há contribuição de diferentes eventos para uma mesma amostra. Similarmente, amostras sequenciais de sub-eventos examinadas durante a chuva podem promover informações adicionais sobre os processos físicos de remoção (Beverland e Crowther, 1992, Liljestrand, 1992).

Devido à importância da química da precipitação atmosférica, criaram-se programas de monitoramento envolvendo redes de amostragem cobrindo um ou mais países na Europa e América do Norte, obtendo-se avaliações tanto espaciais quanto temporais da composição química das águas de chuva e seus efeitos a diferentes ecossistemas (Galloway et al. 1976; Likens e Borman, 1974; EPA, 1984; Miller, 1990; Galloway, 1995; Cowling e Nilsson, 1995).

No Brasil, há algumas publicações sobre regiões ou cidades específicas, como por exemplo: na Amazônia (Williams et al., 1997), no Estado de São Paulo (Forti et al., 1990; Fornaro et al., 1993; Abbas et al., 1993; LARA et al., 2001), no Rio de Janeiro (Mello, 2001), Belo Horizonte (Figueiredo, 1999), Porto Alegre (Luca et al., 1991) e Salvador (Campos et al., 1998). Estudo sobre a influência da presença de uma termoelétrica a carvão na composição química de águas de chuva foi realizado no município de Figueira, Paraná (Flues et al., 2002). Efetivamente, não existe rede de monitoramento estabelecida, nem esforços coordenados e os dados disponíveis originam-se de iniciativas isoladas ou de grupos de pesquisadores, limitados a estudos em regiões específicas e por períodos de tempo restritos.

Na cidade de São Paulo, realizaram-se os primeiros estudos de caracterização química de águas de chuva por coleta manual (recipiente de coleta exposto no início do evento) em um ponto de amostragem, com determinações de acidez livre e acidez total, no período de novembro de 1983 a fevereiro de 1985. O valor médio de pH das chuvas do período foi igual a 4,5 (Alonso et al., 1987).

O trabalho mais sistemático foi realizado por um grupo de pesquisadores do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e do Instituto de Física - USP, no período de outubro de 1983 a outubro de 1985. Neste estudo, as 108 amostras coletadas no Instituto de Física (coletor não automático, portanto, com contribuição da deposição seca), apresentaram valor médio do pH igual a 5,0. As concentrações de nitrato (NO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), Cálcio (Ca^{2+}) e amônio (NH_4^+) e potássio (K^+) foram avaliadas em várias amostras (Andrade, 1986; Forti et al., 1990).

Por outro lado, informações meteorológicas de superfície relacionadas com resultados de análises dos íons majoritários em águas de chuva, sugeriram que a precipitação em São Paulo é fortemente influenciada por fontes antropogênicas e marítimas. Para 27 amostras de eventos individuais, ou seja, apenas deposição úmida, coletada no período de setembro de 1993 e maio de 1994, o valor médio do pH foi 4,54 (Paiva et al., 1997).

Estudos sistemáticos e seletivos da deposição úmida foram realizados com o uso de coletor automático, no Instituto de Química da USP, no período de novembro de 1988 a novembro de 1990 (Fornaro, 1991; Fornaro et al., 1993). Verificou-se que, de maneira geral, existiu uma correlação entre a concentração de íons H^+ e a soma dos ânions SO_4^{2-} e NO_3^- , assim como entre essas espécies e a condutividade, indicando os ácidos sulfúrico e nítrico como responsáveis pela acidez livre nessas precipitações. Nesse estudo, para 450 amostras de águas de chuvas, obteve-se o valor médio de pH igual 4,5, praticamente o mesmo valor medido por outros pesquisadores para os períodos de novembro de 1983 a fevereiro de 1985 e setembro de 1993 a maio de 1994, todos de amostras com contribuição apenas de deposição úmida. Como resultado caracterizou-se o fenômeno “chuva ácida” na cidade de São Paulo, com significativa contribuição dos ácidos fortes, sulfúrico e nítrico.

Estudos mais recentes da composição química de águas de chuva em São Paulo mostraram a forte contribuição dos ácidos orgânicos (fórmico e acético) na acidez livre de águas de chuva, variando de 10 a 70% para eventos individuais e na média sendo de 44%. Esses resultados indicaram uma diminuição relativa da contribuição dos ácidos fortes (sulfúrico e nítrico) para acidez livre potencial dessas amostras. Sendo a concentração média ponderada pelo volume para o formiato de $17,1 \mu\text{mol L}^{-1}$, a maior entre os ânions, seguida de NO_3^- ($15,6 \mu\text{mol L}^{-1}$) e SO_4^{2-} ($8,6 \mu\text{mol L}^{-1}$) (Fornaro e Gutz, 2003).

Destaca-se que desses estudos de composição química de águas de chuva realizados em São Paulo, apenas o correspondente ao período entre 09/1993 e 05/1994 (Paiva et al., 1997) fez referência às condições meteorológicas, porém restrito a informação de direção de ventos de superfície.

1.1 Fundamentação teórica

1.1.1 Processos de remoção de poluentes

Os mecanismos de remoção de poluentes atmosféricos para a superfície da terra são divididos em dois processos: deposição seca e úmida (Seinfeld e Pandis, 1998; Gonçalves, 1997; Gonçalves et al., 2000; Gonçalves, 2002; Nakaema, 2001; Pruppacher e Beard, 1970; Pruppacher e Klett, 1997).

Deposição seca é a remoção de espécies gasosas e sólidas da atmosfera para a superfície do solo, água ou vegetação na ausência de precipitação. Os fatores mais importantes que influenciam a deposição seca são: as características da atmosfera

(umidade relativa, estabilidade, velocidade do vento, turbulência e radiação); propriedades químicas dos contaminantes depositados e características físicas e químicas da superfície.

A deposição úmida trata-se de um processo natural no qual os gases e o material particulado são removidos por hidrometeoros atmosféricos (gotículas de nuvem, chuva, neve) que são depositados na superfície. Diferentes termos podem ser usados para deposição úmida, incluindo remoção por precipitação, remoção úmida, remoção dentro da nuvem (*rainout*) e abaixo da nuvem (*washout*).

Os processos de remoção úmida podem ocorrer através da precipitação, onde as espécies são removidas pela chuva; por interceptação pela nuvem, através da impactação de gotículas de nuvem sobre um terreno, freqüentemente no topo de uma montanha; deposição por nevoeiro, onde o material particulado é removido ao depositar-se em gotículas de nevoeiro e a deposição por neve, onde as espécies são removidas durante uma nevasca.

A remoção úmida envolve numerosas fases e são influenciadas por fenômenos de várias escalas físicas. O desafio do entendimento em microescala e mesoescala faz da deposição úmida um dos mais complexos processos atmosféricos.

Um dos desafios envolve as várias fases na deposição úmida. Não somente com três fases usuais (gasosa, particulado e aquosa), mas a fase aquosa está presente em várias formas (gotículas de nuvem, gotas de chuva, neve, cristais de gelo e etc), para complicar diferentes processos atuam dentro e abaixo da nuvem.

1.1.2 Estabilidade atmosférica

Podemos determinar a estabilidade da atmosfera de diferentes formas, através de radiossondagens e calculando suas taxas de variação vertical de temperatura (Γ). A estabilidade atmosférica pode ser analisada do ponto de vista de uma parcela ou como instabilidade na forma de onda. Em relação a estabilidade da parcela, pode-se considerar três tipos de estabilidade definidos por Wallace e Hobbs (1977):

a – Estabilidade Estática

Considerando uma camada atmosférica com Γ (radiossondagem) menor do que Γ_d (adiabática seca). Se uma parcela de ar for levantada, sua temperatura decrescerá por Γ_d ,

até temperatura T_A em P_A , enquanto a temperatura do ambiente será T_B . Neste ponto $T_A < T_B$ e ela voltará por estar mais densa (Figura 1 (a-b)).

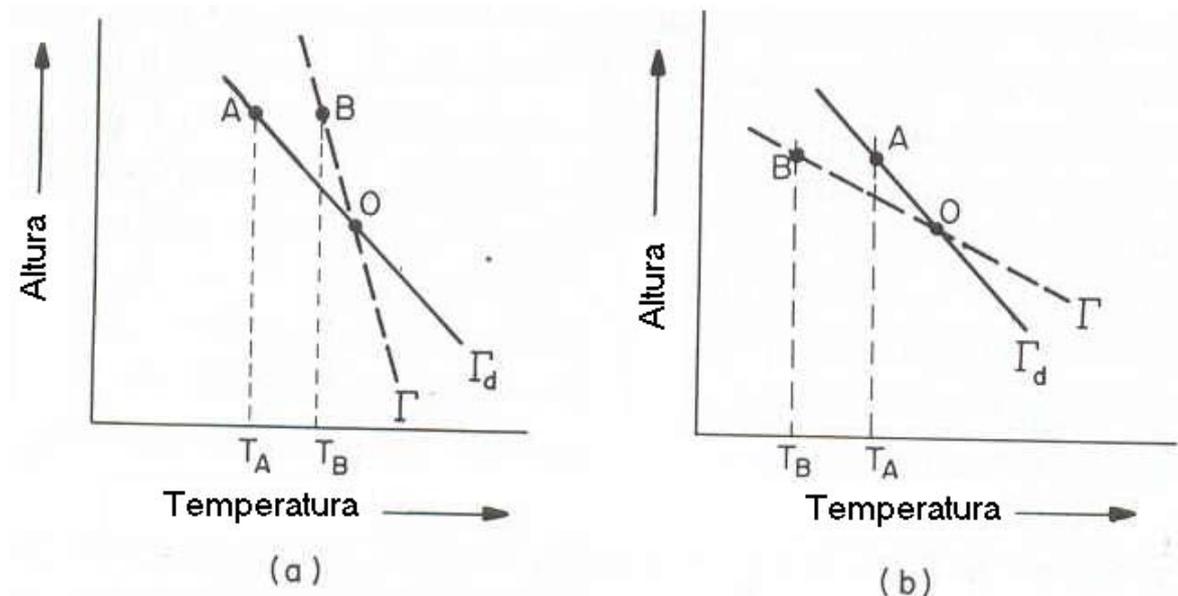


Figura 1. Condições de estabilidade para um ar não saturado: (a) estabilidade estática positiva e (b) estabilidade estática negativa.

Nas condições $\Gamma < \Gamma_d$, a parcela possui estabilidade estática positiva (para um processo não saturado). Em geral, quanto maior for a diferença entre Γ e Γ_d maior serão as forças restauradoras, gerando uma atmosfera estável.

Por outro lado, camadas de ar com Γ negativo são chamadas de inversões térmicas, onde a temperatura sobe em altura gerando uma atmosfera extremamente estável.

Pode ser também através da variação vertical de temperatura potencial (θ , é definido como a temperatura que teria uma parcela de ar, inicialmente em qualquer nível de pressão P , se fosse trazida adiabaticamente ao nível de 1000 hPa (Vianello e Alves, 2000; Wallace e Hobbs, 1977)) ou de temperatura do ar com a pressão. Desta forma, pode-se considerar que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial P} < 0, \text{ atmosfera estaticamente estável;}$$

Pois, à medida que P decresce com a altura ($\partial P < 0$), θ aumenta ($\partial \theta > 0$). Significando que o ambiente tem temperatura potencial maior que a parcela que foi ascendida, portanto, a parcela voltará ao nível inicial.

Se $\Gamma > \Gamma_d$ temos a estática negativa ou instabilidade estática. Se o ar começa a subir ele estará sempre mais quente que o ambiente e continuará a subir "indefinidamente". O mesmo para o ar descendo. Essa é uma condição instável, que ocorre em camadas próximas á superfícies muito aquecidas, ou

$$\frac{\partial\theta}{\partial P} > 0, \text{ atmosfera estaticamente instável;}$$

À medida que P decresce com a altura ($\partial P < 0$), θ também diminui ($\partial\theta < 0$). Significa que a temperatura do ambiente é menor que a da parcela que foi ascendida, e portanto, a parcela possui condições para continuar a subir.

Quando $\Gamma = \Gamma_d$ temos a estabilidade estática neutra ou nula. Neste caso não há forças restauradores e a parcela não saturada pode se deslocar verticalmente, somente por inércia, ou

$$\frac{\partial\theta}{\partial P} = 0, \text{ atmosfera estaticamente neutra.}$$

b – Estabilidade Condicional

Considerando que a taxa de variação vertical de temperatura ("lapse rate") real Γ da atmosfera situa-se entre a adiabática saturado Γ_s e a adiabática seco Γ_d , para uma parcela de ar ascendida acima de seu nível de equilíbrio, a temperatura do ambiente poderá torna-se menor.

Nesta situação temos que, quando a parcela em seu ponto de equilíbrio esfria até atingir o Nível de Condensação por Levantamento NCL (O NCL é definido como o nível no qual uma parcela de ar pode ser levada adiabaticamente até tornar-se saturada (Wallance e Hobbs, 1977; Vianello e Alves, 2000)), sua temperatura será mais fria que o ambiente. A partir deste nível, a parcela irá resfriar através da adiabática úmida.

Se a parcela estiver suficientemente úmida, através da adiabática úmida cruzará a sondagem ambiente e acima desse ponto de intersecção a parcela irá resfriar e ficar mais densa que o ambiente, e para continuar ascendendo será requerida uma energia adicional. Se a elevação parar antes deste ponto, a parcela retornaria ao seu nível de equilíbrio.

Uma vez acima deste ponto de intersecção, a parcela desenvolve flutuação positiva e continuará ascendendo sem a necessidade de uma energia adicional. Por essa razão, o

ponto de intersecção é definido como Nível de Livre Convecção (NLC). O NLC depende da quantidade de umidade inicial da parcela de ar bem como da magnitude de Γ .

A estabilidade condicional depende então da existência ou não de um NLC. Logo, se for possível que a parcela atinja o NLC a atmosfera está condicionalmente instável e se não existir está condicionalmente estável.

c – Estabilidade Convectiva ou Potencial

A estratificação vertical de vapor d'água pode favorecer também o potencial para a instabilidade vertical. Considere a razão de mistura decrescendo rapidamente com a altura dentro de uma camada de inversão acima da camada úmida. A parcela de ar da camada úmida atinge o NCL quase imediatamente, e além deste ponto irá resfriar pela adiabática úmida. Por outro lado, a parcela de ar da camada acima irá resfriar através da adiabática seca em uma profunda camada até atingir o NCL. Portanto, quando a camada de inversão é levantada o topo resfria muito mais rapidamente do que a base e o Γ torna-se quase desestabilizado.

Uma forma de determinar a estabilidade convectiva ou potencial é através da variação vertical da temperatura potencial equivalente (θ_e , que é definida como a temperatura que uma parcela de ar teria se todo seu vapor fosse condensado e posteriormente removido, sendo que todo calor latente liberado no processo fosse usado para aquecer a própria parcela, e depois ela fosse levada por um processo adiabático seco até o nível de 1000hPa (Wallace e Hobbs, 1977)).

Desta forma tem-se que:

$$\frac{\partial \theta_e}{\partial P} > 0, \text{ atmosfera convectivamente instável;}$$

$$\frac{\partial \theta_e}{\partial P} < 0, \text{ atmosfera convectivamente estável;}$$

$$\frac{\partial \theta_e}{\partial P} = 0, \text{ atmosfera convectivamente neutra.}$$

1.2 Meteorologia e poluição do ar

A maior parte dos estudos relacionados à chuva ácida é desenvolvida em outros países, os quais abordam os problemas numa escala regional e global, procurando

desenvolver modelos que expliquem o transporte dos poluentes a longas distâncias, pois os elementos químicos que acidificam as precipitações em áreas de preservação ambiental têm suas fontes localizadas em pólos indústrias distantes mais de 2000 km das áreas de deposição, sendo que estas podem ser feitas na forma seca ou úmida (Castro, 2003).

Os principais estudos relacionando condições meteorológicas e a poluição atmosférica, na cidade de São Paulo, centraram-se na fase gasosa e material particulado, ou seja, em condições de ausência de precipitação, destacando-se períodos de inverno (Setzer et al., 1980; Abreu, 1984; Manfredini, 1988; Ccoyllo, 1998; Ccoyllo e Andrade, 2002).

O estudo realizado por Setzer et al. (1980) avaliou as relações entre parâmetros meteorológicos e índices de poluição do ar durante o ano de 1978. Dias com altos índices de poluição foram observados em condições de frente fria ao sul de São Paulo e anticiclone a leste, predominância de ventos de noroeste, baixa umidade, ausência de dias chuvosos, altura da camada de mistura reduzida e vento fraco. Enquanto que dias com baixos índices de poluição foram observados em condições de frente fria ao norte de São Paulo e anticiclone polar ao sul, presença de baixa pressão na região central do Brasil, predominância de vento de sudeste, alta umidade, dias chuvosos, altura da camada de mistura elevada e vento forte.

Abreu (1984) analisou a relação entre sistemas sinótico-meteorológicos e índices extremos de poluição do ar na região da grande São Paulo no período de 1979 a 1982. Observou que os casos extremos de baixos índices de poluição estão associados, à frente fria sobre ou ao norte de São Paulo e anticiclones frios com o centro ao sul da cidade, e ventos fortes. Nos casos de altos índices, verificou-se a presença de frente fria ao sul de São Paulo e anticiclone subtropical predominando sobre a região com ventos fracos.

Avaliações das condições críticas de poluição em São Paulo, nos meses de maio a agosto entre 1977 e 1980, concluíram que as principais características sinóticas dos dias que antecederam esses episódios foram: frente fria ou semi-estacionária ao sul do Brasil; alta subtropical do atlântico sul com centro a leste de São Paulo; ventos fracos em superfície com direção predominante de noroeste, ausência de precipitação; inversão térmica e uma intensa secagem acima desta camada (Manfredini, 1988).

Outra avaliação da influência das condições meteorológicas nas concentrações de poluentes atmosféricos foi realizada para o período entre 13 de junho e 2 de setembro de 1994. Neste estudo observou-se que dias com baixa concentração de poluentes foram associados a frentes frias sobre o norte da costa do Estado de São Paulo, proporcionando dispersão e diluição de poluentes e dias que apresentaram alta umidade relativa. Enquanto

que os dias com altas concentrações de poluentes foram associados a forte inversão de temperatura, fazendo com que os poluentes ficassem retidos nos baixos níveis, ou seja, próximos da superfície (Ccoyllo, 1998; Ccoyllo e Andrade, 2002).

A partir do exposto fica evidente a importância das condições meteorológicas para o transporte e dispersão de poluentes atmosféricos, destacando-se que baixos índices de poluição ocorrem em presença de precipitação. Portanto, mais uma vez indicando a importância de eventos de precipitação para a “limpeza” da atmosfera.

1.3 Meteorologia e composição química de águas de chuva

Em geral, os poucos estudos que relacionam composição química de águas de chuva com condições meteorológicas são realizados através do monitoramento de massas de ar (Samara et al., 1992; Avila e Alarcón, 1998, Beverland et al., 1998, Dayan e Lamb, 2003).

Dayan e Lamb (2003) utilizaram dados diários de precipitação de nove verões consecutivos (1993-2001) na Pennsylvania central, com a finalidade de mostrar a influência da circulação sinótica na composição química de águas de chuva. Nessas análises classificaram-se sete tipos de tempestades, as quais influenciaram significativamente nas diferenças tanto de acidez, como de concentração de poluentes. Os autores observaram que tempestades do tipo convectiva apresentavam maior concentração média para todos os principais íons quando comparada a do tipo frente quente, caracterizada por baixas concentrações iônicas. Aproximadamente 20% da acidez na precipitação durante o verão foi neutralizada por hidróxidos/carbonatos de cátions, provenientes do solo. Os resultados sugeriram padrão distinto na posição regional de anomalia para diferentes sistemas de circulação.

Um estudo realizado em Hong Kong, com a finalidade de mostrar o impacto climatológico sobre a concentração de SO_2 e NO_x durante o período de 1983-1992, mostrou que as altas concentrações de SO_2 e NO_x são frequentemente associadas a massas de ar de primavera e verão, com modalidade forte e ventos vindos do sudoeste ou oeste, e em relação ao outono e inverno, com categorias sinóticas fracas com ventos vindos de norte ou leste (Cheng et. al, 2000).

Amostras de precipitação coletadas em Montreny (Catalonia, NE da Europa) entre 1983 a 1994 foram analisadas para os principais cátions e ânions. Nestas amostras foram feitas análises sinóticas e identificação de trajetórias de massas de ar, com o objetivo de

identificar as áreas fontes de poluentes na precipitação, chegando a seguinte conclusão: chuvas alcalinas (pH médio de 7,2) foram associadas à trajetória africana; eventos locais produziram chuvas neutras (pH médio de 5,5); chuva ácida foram associadas a chuvas de origem Atlântica (pH médio de 4,8) e chuvas européias (pH médio de 4,4), que apresentaram concentrações médias altas de NH_4^+ (57 $\mu\text{eq/l}$), NO_3^- (49 $\mu\text{eq/l}$) e SO_4^{2-} (103 $\mu\text{eq/l}$). Contudo, eventos de origem européia foram somente uma pequena fração da precipitação total (10% dos casos). Chuvas marinhas ocorreram em 52% dos eventos, africanas e local em 20 e 18%, respectivamente. Durante o período de 11 anos observou-se tendência decrescente para a frequência de eventos europeus (Avila e Alarcón 1999).

O estudo realizado por Liljestrand (1992) no Texas, comparou o fracionamento entre as espécies alcalinas e ácidas durante processos de remoção. As principais conclusões desse trabalho foram que medidas em campo durante os eventos de precipitação indicaram a importância dos efeitos de fracionamento. Por exemplo, o fracionamento entre as espécies ácidas e alcalinas resulta no controle de pH. Também a partir de modelos estatísticos, os efeitos do fracionamento determinam os perfis de fontes médias (p.e., ressuspensão do solo).

Realizaram-se medidas contínuas de composição química de água de chuva entre 28 de junho e 15 de novembro de 1989, em um experimento meteorológico no sudeste da Inglaterra, com a finalidade de investigar as possíveis relações entre processos sinóticos, meso e micro escalas e as características químicas da precipitação em eventos e sub-eventos. Observou-se importante contribuição do transporte de massas de ar da Europa Central para a região estudada (Beverland e Crowther, 1992).

Samara et al. (1992), fizeram um estudo sobre a composição química da chuva em Thessaloniki, no qual analisaram um conjunto de variáveis meteorológicas durante o período de março de 1989 a dezembro de 1990. Os eventos de chuva foram classificados considerando as condições meteorológicas predominantes com a finalidade de investigar as relações entre a composição química da chuva e processos atmosféricos. Nas amostras de chuva foram analisadas as espécies químicas Cloreto (Cl^-), NO_3^- , SO_4^{2-} , sódio (Na^+), magnésio (Mg^{2+}), Ca^{2+} e NH_4^+ , e também medidas de pH e condutividade. A maioria das chuvas apresentou alto valor de pH, ou seja, meio neutro ou alcalino, e somente 22% apresentaram valor de pH abaixo de 5,6. A acidez livre da precipitação geralmente aumentou durante o outono e inverno. Sulfato e cloro apresentaram padrão similar. Quatro das maiores origens de massas de ar foram associadas a eventos de chuva em Thessaloniki. Observaram que geralmente 38% dos fluxos de chuvas vão do sul para o sudoeste e

prevaleceram mais durante a primavera. Essas chuvas foram alcalinas devido à neutralização através de poeira do solo e amônia atmosférica. Geralmente 33% dos fluxos de chuvas vão do oeste-sudoeste para o oeste-noroeste e foram mais freqüentes do verão até o começo do inverno. A maioria dessas chuvas foram alcalinas, com exceção de várias chuvas ácidas que ocorreram no inverno. Geralmente 21% do fluxo de chuva vai do oeste-noroeste para o norte e foram mais freqüentes durante o outono. Algumas dessas chuvas foram ácidas devido ao transporte de poluentes ácidos para a Europa ou áreas vizinhas de indústrias. O fluxo fraco localizado correspondeu a 8% dos eventos de chuva e ocorreu no outono e inverno. Essas chuvas mostraram a alta acidez e a mínima influência de processos de neutralização.

O estudo realizado por Herut et al. (2000) durante cinco invernos consecutivos (1981/1982, 1982/1983, 1983/1984, 1988/1989 e 1989/1990) em Israel, onde foram coletadas 569 amostras de chuva para análises químicas, mostraram que as variações geográficas e meteorológicas influenciam a composição química da água chuva, em relação a fontes naturais e antropogênica e transporte de constituintes. Observaram que existiu uma mudança progressiva das chuvas alcalinas (com um pH médio de 7,45) e não ácidas ao sul, a mais ácidas ao norte (pH médio de 5,49 e às chuvas ácidas de aproximadamente 65%). Uma análise da distribuição latitudinal da acidez e as variações de pH de eventos regionais de chuva levaram à conclusão que o efeito principal sobre o pH não é de uma fonte antropogênica local, a razão da capacidade de neutralização regional para cada evento de chuva. Os efeitos da direção do vento indicam uma fração continental mais elevada e baixa acidez nas chuvas relacionadas ao componente do vento de sudoeste, especialmente nas regiões do norte de Israel.

Beverland et al. (1998) estudaram a composição química de águas de chuva durante o período de seis meses no sudeste da Inglaterra. Observaram que a influência da direção do vento durante a precipitação foi significativa para os valores de concentração e deposição das espécies químicas. Contudo, a análise de trajetória de massa de ar indicou diferenças marcantes na composição da chuva entre diferentes padrões de transporte. Proporcionalmente, as composições iônicas foram também influenciadas pelo padrão de transporte, com acentuado nível de cloreto para eventos marinhos. A razão entre o nitrato e o sulfato foi inversamente relacionada pelo transporte das principais fontes antropogênicas.

No Brasil estudos sobre processos de remoção de poluentes atmosféricos, tanto gases como material particulado, por gotículas de nuvem e gotas de chuva, dentro ou abaixo da nuvem, foram realizados na região de Cubatão em São Paulo, no período entre

1991 e 1996, através do projeto bilateral Brasil – Alemanha, intitulado ENV-3: “*Air Pollution and Vegetation Damage in the Tropics – The Serra do Mar as an Example*”.

Entre os objetivos do projeto ENV-3, estava a caracterização da deposição úmida, onde se investigou processos de remoção de poluentes. Os estudos procuravam avaliar as diferenças entre a absorção dos gases e a incorporação do material particulado nos diferentes momentos dos eventos de precipitação, durante formação das nuvens (processo dentro da nuvem, também chamado *rainout*) e durante a precipitação propriamente dita (processo abaixo da nuvem, também chamado *washout*). Analisaram-se tanto as propriedades químicas das águas coletadas quanto os parâmetros atmosféricos, incluindo a distribuição de tamanho de gotas de chuva e a natureza dos sistemas de precipitação. Para esses estudos desenvolveu-se um modelo unidimensional, denominado Beheng – Gonçalves (BG) acoplado às análises químicas da água de chuva. Os dados da modelagem foram comparados com dados seqüenciais observados e os resultados indicaram que o modelo BG representou bem o processo *washout* de remoção de poluentes. Nesse estudo, para os eventos modelados o efeito *washout* foi considerado o principal mecanismo de remoção de poluentes, com menor contribuição do efeito *rainout* (Gonçalves, 1997).

Na complementação do estudo acima foram utilizados o modelo Beheng Versão 2 (B.V.2) desenvolvido por Gonçalves (1997) para gotas de chuva e o modelo numérico de mesoescala RAMS (‘*Regional Atmospheric Modeling System*’), com a finalidade de analisar os processos de remoção de poluentes, tanto gases como material particulado, por gotículas de nuvem e gotas de chuva, dentro e abaixo da nuvem, respectivamente. Foram utilizadas três modelagens para remoção de poluentes atmosféricos. Na primeira, considerou-se a concentração constante com a altura e na segunda, variando, de acordo com o perfil vertical de concentração. Na terceira, assumiu-se o espectro do material particulado urbano, considerando o efeito da remoção com e sem nucleação, além da remoção somente abaixo da nuvem. Os resultados encontrados com o RAMS conseguiram caracterizar os eventos analisados, identificando regiões contendo precipitação convectiva e estratiforme. Os resultados encontrados nas três modelagens apresentaram superestimativa para o sulfato e amônio e superestimativa para o nitrato, quando se inclui a remoção dentro da nuvem, evidenciando diferenças nas localizações de fontes de nitrato, sulfato e amônio. O amônio pode ser proveniente de fontes rurais, enquanto, o nitrato, de fontes urbanas. Já o sulfato possui fontes na própria Cubatão, não gerando alterações significativas no coeficiente de correlação. Estes resultados vêm enfatizar o fato de que o espectro do material particulado é bastante importante na modelagem da remoção de

poluentes. Não houve diferenças significativas entre a remoção com e sem nucleação para as espécies químicas (Ramos, 2000).

Nakaema (2001) estudou os processos de remoção de poluentes mais significantes dentro e abaixo da nuvem através da deposição úmida na cidade de São Paulo, em quatro datas (26 de julho de 1989, 05 de maio de 1999, 15 de julho de 2000 e 23 de julho de 2000) onde ocorreram eventos de precipitação significantes, as quais foram também comparadas com resultados de modelagem, para validação do método. Para a modelagem dentro da nuvem utilizou-se o modelo de mesoescala RAMS e para processos a baixo da nuvem o B.V.2 desenvolvido por Gonçalves (1997). Os resultados mostraram que o acoplamento dos dois modelos subestimou as concentrações de sulfato quando comparados com os resultados observados na água de chuva, devido à contribuição da remoção no interior da nuvem, onde foram consideradas grandes eficiências na remoção dos gases e material particulado. As diferenças entre os resultados observados e modelados levaram o autor a concluir que, um dos principais fatores que determinam os resultados modelados dentro da nuvem é a suposição de uma transferência total e efetiva do SO_2 para as gotículas.

1.4 Características da região de estudo

1.4.1 Condições climáticas e geográficas

A região Sudeste do Brasil, devido às suas localizações latitudinais, é caracterizada como uma região de transição entre climas quentes de latitudes baixas e climas temperados de latitudes médias. O sul da Região Sudeste é afetado pela maioria dos sistemas sinóticos que atingem o sul do país, com algumas diferenças em termos de intensidade e sazonalidade do sistema (Climanálise Especial, 1996). A região caracteriza-se por verões chuvosos e invernos secos. Nos meses de outubro e março ocorre grande parte da quantidade de precipitação anual. Durante o verão a maior parte da precipitação deve-se aos sistemas convectivos isolados (cumulus nimbus) causados pelo aquecimento diurno e disponibilidade de umidade, porém quando associados as forçantes frontais produzem chuva por toda a região sudeste. A precipitação de verão no sudeste do Brasil é dependente do estabelecimento ou não da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Paegle e Mo, 1997). A ZCAS é definida como uma faixa persistente de nebulosidade orientada noroeste-sudeste associada a uma zona de convergência na baixa troposfera que se estende

desde o sul da Amazônia até Atlântico Sul-Central, bem caracterizada nos meses de verão (Silva Dias, 1995). Durante os períodos de ZCAS ativa, a precipitação persiste por vários dias consecutivos em uma mesma área, muitas vezes causando inundações.

Os sistemas frontais estão associados ao escoamento ondulatório de grande escala que durante o verão podem se intensificar no sul do país e provocar intensa precipitação na região sudeste (Climanálise Especial, 1996). Sistemas convectivos de mesoescala que se formam no Paraguai, e ao norte da Argentina, e a leste dos Andes, algumas vezes deslocam-se para o sudeste do Brasil trazendo chuvas para a região no verão (Velasco e Fritsch 1987; Rocha 1992). Linhas de instabilidade pré-frontais, ou então associadas à brisa marítima, também contribuem para a precipitação de verão no sudeste do Brasil.

A Região Metropolitana de São Paulo – RMSP está localizada em 23°S e 46°W, na região sudeste do Brasil. Possui uma área de 8.051 km² com população superior a 17 milhões de habitantes, distribuída em região urbanizada de maneira desordenada em 1.747 km². A região urbana situa-se, praticamente, na Bacia Sedimentar de São Paulo, cujo principal vale é o do Rio Tietê, orientado no sentido leste-oeste, com altitude média de 720 metros e extensa planície de inundação. Essa bacia é cercada ao norte pela Serra da Cantareira, também orientada no sentido leste-oeste e com altitudes que atingem até 1.200 metros e a leste-sul pelo reverso da Serra do Mar com altitudes que, em geral, ultrapassam os 800 metros. A RMSP está distante, aproximadamente, 45 km do Oceano Atlântico, ocupando cerca de 0,1 % do território brasileiro e é o terceiro maior conglomerado urbano do mundo, responsável por 1/6 do PIB nacional (CETESB, 2004).

O clima na RMSP apresenta inverno seco e verão úmido, com temperaturas que variam de 8 °C (média das mínimas) nos meses mais frios e de 30 °C (média das máximas) nos meses mais quentes, com média anual de temperatura de 20 °C (Climanálise, 1986). A precipitação em agosto (inverno) é aproximadamente 50 mm, enquanto que em fevereiro (verão), a precipitação é cerca de 250 mm (INMET, 2004).

Estudo realizado por Oliveira et al. (2003) considerando 11 estações de superfícies na cidade de São Paulo durante o ano de 1988, mostrou a influência topográfica e urbana sobre o padrão de velocidade do vento. Os resultados mostraram que a circulação sobre a área da cidade de São Paulo é dominada por três principais fatores: brisa marítima; circulação de vale-montanha e o efeito urbano, tais como rugosidade, construções e ilha de calor. Observaram que durante os meses mais quentes do ano, a brisa marítima é uma característica dominante na variação média diurna do vento e que os efeitos térmicos na circulação vale-montanha sobre o fluxo são mais facilmente vistos em padrões temporais

de divergência/convergência. Esses efeitos térmicos, em geral, foram mais importantes nos meses mais frios, à noite e onde as velocidades dos ventos são fracas.

1.4.2 Poluição em São Paulo

A região sofre todo tipo de problemas ambientais, entre os quais está a deterioração da qualidade do ar, devida às emissões atmosféricas de cerca de 2000 indústrias de alto potencial poluidor e por uma frota de aproximadamente 7,8 milhões de veículos, frota esta que representa 1/5 do total nacional. De acordo com as estimativas de 2004, essas fontes de poluição são responsáveis pelas emissões para a atmosfera, dos seguintes poluentes: 1,7 milhão de t/ano de monóxido de carbono (CO), 404 mil t/ano de hidrocarbonetos (HC), 371 mil t/ano de óxidos de nitrogênio (NO_x), 63 mil t/ano de material particulado total (MP) e 38 mil t/ano de óxidos de enxofre (SO_x). Desses totais os veículos são responsáveis por 98% das emissões de CO, 97% de HC, 96% NO_x, 50% de MP e 55% de SO_x (Cetesb, 2004).

1.5 Objetivo

Este trabalho pretende, de forma preliminar avaliar a influência das condições meteorológicas nas concentrações das espécies químicas nas águas de chuva, assunto até então pouco estudado no Brasil.

Para atingir os objetivos, foram utilizados dados de composição química de água de chuva no período entre julho de 1989 e maio de 1990 juntamente com um grande conjunto de dados meteorológicos.

Devido à disponibilidade de dados de água de chuva, optou-se por escolher alguns estudos de caso que pudessem melhor representar como a metodologia influencia a contribuição química das águas de chuva.

Nos próximos capítulos serão mostrados os dados iniciais, a metodologia e os resultados obtidos para os casos analisados.

Capítulo 2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados de química

Para o presente estudo foram utilizados dados de composição química de águas de chuva de 20 eventos amostrados entre julho de 1989 e maio de 1990, na região oeste da cidade de São Paulo, no Instituto de Química (IQ-USP, 23°34'S; 46°44'W; 790m). Usou-se coletor automático para se evitar contaminação da deposição seca e, cada amostra foi congelada imediatamente após o evento. Nestas amostras foram medidos pH, usando-se pHmetro Micronal B375 e eletrodo de vidro combinado Micronal. As medidas de condutividade foram realizadas com condutivímetro Micronal B330. As determinações dos ânions SO_4^{2-} , NO_3^- e Cl^- , foram realizadas por cromatografia de íons, utilizando-se Cromatógrafo Dionex 4000i (Fornaro, 1991, Fornaro et al., 1993).

Durante o período analisou-se a composição química de 223 amostras de águas de chuva de amostragem seqüencial (intra-evento) referentes a 20 eventos de precipitação (inter-evento), identificados na Tabela 1. Observa-se grande variabilidade da quantidade de precipitação, assim como na duração desses eventos, o que é resultado das diferentes taxas de precipitação. Logo, neste conjunto de eventos existiram precipitações fracas ($< 5\text{mm.h}^{-1}$) e precipitações intensas ($>10\text{ mm.h}^{-1}$), as quais também contribuíram para os diferentes números de amostras por evento de chuva.

Tabela 1. Identificação dos eventos de chuva amostrados na cidade de São Paulo no IQ-USP no período de julho/1989 a maio/1990.

Evento	Data	Início (h)	Duração (min)	Chuva acumulada (mm)	Taxa de precipitação (mm/h)	Número de amostra
1	26/7/1989	03:25	980	59,0	3,6	39
2	27-28/07/89	17:40	-	55,2	-	13
3	25/8/1989	10:25	350	13,1	2,2	5
4	3/10/1989	08:00	720	13,9	1,2	5
5	9/11/1989	16:15	215	10,2	2,8	9
6	19/12/1989	08:35	445	18,2	2,5	11
7	6/1/1990	12:20	315	19,0	3,6	20
8	9/1/1990	11:30	220	14,0	3,8	10
9	10/1/1990	11:00	175	8,0	2,7	7
10	10/2/1990	14:30	100	25,2	15,1	5
11	12/2/1990	15:45	180	2,5	0,8	4
12	13/2/1990	20:00	60	4,3	4,3	4
13	15/2/1990	14:00	310	38,1	7,4	20
14	6/3/1990	07:10	100	9,7	5,8	9
15	8/3/1990	17:00	65	15,4	14,2	11
16	16/3/1990	18:40	80	3,7	2,8	4
17	21/3/1990	13:00	320	65,2	12,2	21
18	22/3/1990	07:40	366	15,5	1,2	10
19	18-19/04/90	07:00	-	57,8	-	10
20	17/5/1990	15:00	180	12,5	4,2	6

2.2 Dados meteorológicos

a) Dados horários de precipitação, vento (velocidade e direção) e temperatura obtidos na Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, IAG-USP, no bairro da Água Funda (IAG-AF, 23°39'S e 46°37'W);

A partir dos dados de vento (velocidade e direção), foi calculado a componente meridional do vento (v) através da seguinte expressão:

$$v = -V \cdot \cos\theta \quad (1)$$

onde V (km/h) é a velocidade e θ (Graus) a direção do vento.

- b) Dados de reanálise do “*National Centers for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research*” (NCEP-NCAR) (KALNAY et al., 1996), que consistem em temperatura, vento e umidade específica, com resolução horizontal de $2,5 \times 2,5$ graus de latitude por longitude, disponíveis em quatro horários (0, 6, 12 e 18 UTC), em 17 níveis verticais (1000 hPa até 10 hPa, exceto para a umidade específica que está disponível até 300 hPa). Além da pressão ao nível médio do mar e vento em superfície.

A partir dos dados de reanálise foram calculados os seguintes parâmetros:

❖ **Advecção de temperatura**

$$A_T = -\vec{V} \cdot \nabla T \quad (2)$$

onde, $\vec{V} = (u, v)$ é o vento horizontal, ∇T é o gradiente de temperatura.

❖ **Divergência de umidade**

$$div = \nabla(\vec{V}q) \quad (3)$$

onde, q é a umidade específica.

$div > 0$ – divergência de umidade;

$div < 0$ – convergência de umidade.

- c) Dados de precipitação diária obtidos através do NCEP and “*Brazil Daily Precipitations Analysis*” (NCEP-BDPA, 2004).
- d) Dados de radiossondagem (pressão, Temperatura (T), Temperatura do ponto de orvalho (T_d), Umidade Relativa (UR)) do Aeroporto de Congonhas em São Paulo, para a análise da estrutura vertical da atmosfera, a fim de determinar o tipo de estabilidade (estática, condicional e convectiva) presente nos dias extremos de poluição.
- e) Cartas sinóticas de superfície (pressão), elaboradas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação do ministério da marinha (DHN, 1989-1990) no horário das 12 UTC.

2.2.1 Parâmetros calculados

❖ Temperatura potencial (θ)

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^{R_a / C_{P_a}} \quad (4)$$

onde, T é a temperatura (K); R_a é constante específica do ar seco ($287,05 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$); C_{P_a} é calor específico à pressão constante do ar seco ($1005 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e P é pressão atmosférica (hPa).

❖ Temperatura potencial equivalente (θ_e)

$$\theta_e = \theta \cdot \text{EXP} \left(2,67 \cdot \frac{r_v}{T_{ncl}} \right) \quad (5)$$

onde, r_v é a razão de mistura de vapor (g.kg^{-1}); T_{ncl} é a temperatura do nível de condensação por levantamento (K).

r_v e T_{ncl} são descritas pelas seguintes expressões:

$$r_v = \left(\frac{UR}{100} \right) \cdot \left(\frac{r_s}{1 + \left(\frac{r_s}{622} \right) \cdot \left(1 - \frac{UR}{100} \right)} \right) \quad (6)$$

$$T_{ncl} = 55 + \left(\frac{2840}{3,5 \cdot \ln(\theta) - \ln \left(\frac{1000 \cdot r_v}{622 + r_v} \right) - 4805} \right) \quad (7)$$

onde, r_s é a razão de mistura de saturação (g.kg^{-1}), a qual é calculada da seguinte forma:

$$r_s = \frac{622}{0,16361 \cdot P \cdot \text{EXP} \left(\left(\frac{-17,67 \cdot T}{T + 243,5} \right) - 1 \right)} \quad (8)$$

❖ Temperatura potencial equivalente de saturação (θ_{es})

$$\theta_{es} = \theta \cdot \text{EXP} \left(2,67 \cdot \frac{r_v}{T} \right) \quad (9)$$

Capítulo 3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise dos dados de precipitação

Na Figura 2 estão representados os valores dos totais mensais de precipitação na cidade de São Paulo, Estação Meteorológica do IAG-AF, durante o período de janeiro de 1989 a dezembro de 1990 (barras verdes) e dados de precipitação correspondentes ao período do presente estudo obtidos no IQ-USP (barras azuis). Estes dados são comparados com a média climatológica mensal e desvio padrão, referente aos anos de 1933 a 2001 (IAG-AF). Em termos climatológicos a precipitação em São Paulo pode ser classificada em duas estações: chuvosa que compreende os meses de outubro a abril e seca que compreende os meses de maio a setembro (Sugahara, 1991; Paegle e Mo, 1997). Durante esse período a quantidade de precipitação seguiu a normal climatológica, com exceção do mês de julho de 1989 (anomalia positiva) e fevereiro de 1990 (anomalia negativa).

A anomalia na quantidade de precipitação mensal, ocorrida no mês de julho de 1989 chama a atenção, pois julho é um dos meses mais secos do ano (com baixa quantidade de precipitação) na região Sudeste do Brasil. Durante o ano de 1989, a quantidade de precipitação acumulada no mês de julho foi de 206,9 mm, superando o valor da média climatológica de 33 mm, caracterizando anomalia positiva com quadro meteorológico de verão em pleno inverno (Climanálise, 1989).

Os 20 eventos de chuva identificados na Tabela 1 correspondem a um total de 519,4 mm de precipitação, representando, aproximadamente, 30% do total da precipitação acumulada no período. Porém, considera-se que estes eventos, com amostras em todos os meses podem representar todo o período estudado conforme observado na Figura 2.

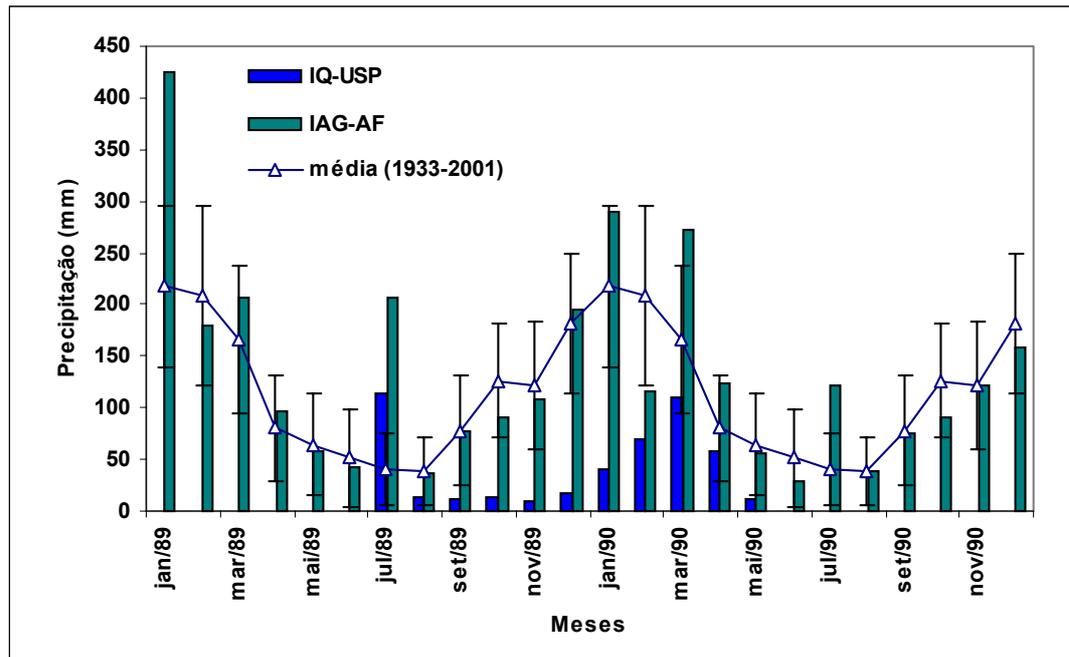


Figura 2. Totais mensais de precipitação da cidade de São Paulo, para os anos 1989 e 1990, e a média climatológica (\pm desvio padrão), referente a 68 anos de dados da Estação Meteorológica do IAG-AF. A pluviometria mensal referente aos eventos do presente estudo foi representada como IQ-USP.

3.2 Avaliação da concentração iônica entre os diferentes eventos

Nesta análise foram consideradas as médias ponderadas pelo volume (MPV), calculadas para as diferentes espécies de concentração $[X]$, analisadas nas n amostras de águas de chuva com volume V cada (UNECE, 1999):

$$[X]_{MPV} = \frac{\sum_{i=1}^n [X]_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (10)$$

A importância do uso de MPV na avaliação da composição química de águas de chuva está no fato deste parâmetro limitar a influência de concentrações muito altas que ocorrem em chuvas muito fracas (pluviometria muito baixa), assim como efeitos de diluição muito intensos (pluviometria alta). A Figura 3 apresenta as concentrações MPV para cada evento das diferentes espécies iônicas. Os valores de concentração dos íons H^+ foram obtidos das medidas de pH (da definição: $pH = -\log[H^+]$). Observa-se ao longo do período estudado variabilidade significativa entre as concentrações, principalmente, para os íons SO_4^{2-} , NO_3^- e H^+ . Em todos os eventos o ânion cloreto sempre apresentou a menor

concentração, principalmente, comparando-se com sulfato e nitrato. Os valores mais altos para todas as espécies foram observados no evento do dia 12 de fevereiro de 1990, e foram mínimos nos dias 19 de dezembro de 1989, 18-19 de abril de 1990 e 17 de maio de 1990.

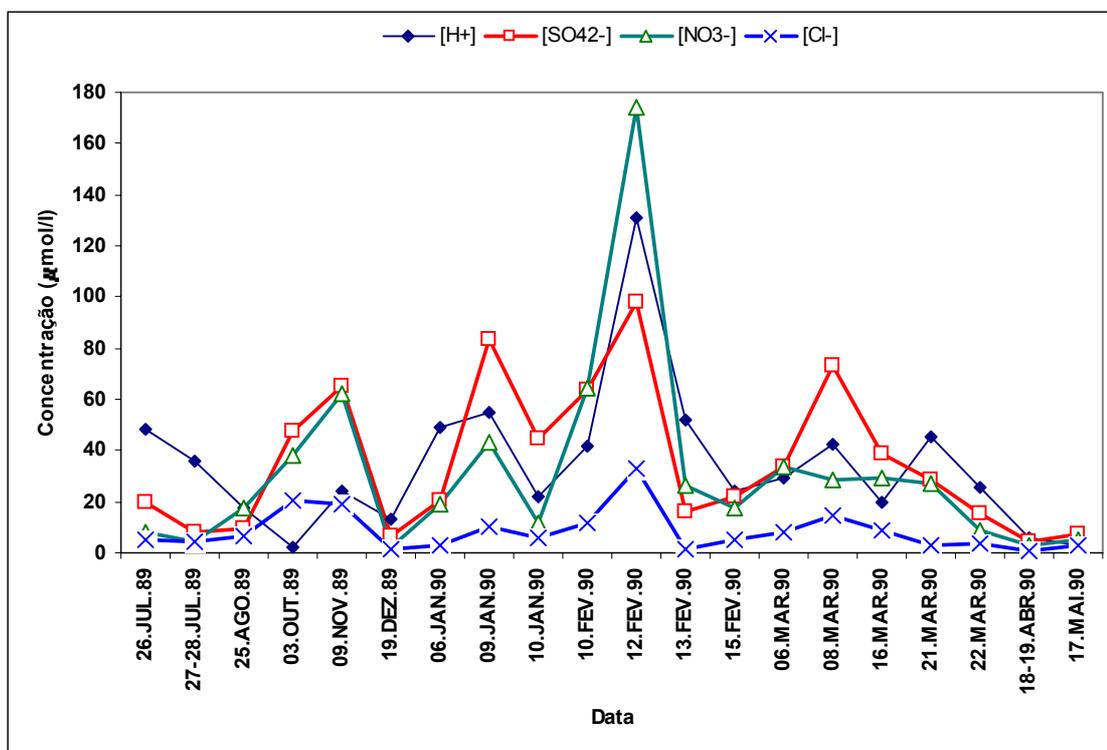


Figura 3. Concentrações médias ponderadas pelo volume (MPV) das diferentes espécies estudadas em águas de chuva coletadas no período entre julho de 1989 e maio de 1990.

A Figura 4 mostra os valores médios de pH e condutividade dos 20 eventos de chuva avaliados. A condutividade é uma expressão numérica da capacidade de uma solução aquosa conduzir corrente elétrica. A medida normalmente é dada em $\mu\text{S cm}^{-1}$ e, depende principalmente das concentrações e mobilidade dos íons dissolvidos. É importante destacar que os valores das medidas de condutividade resultam da soma da contribuição individual de cada íon presente na amostra. Esta medida pode de modo indireto indicar a concentração de poluentes em águas de chuva, mas não fornece nenhuma indicação das quantidades relativas dos vários íons presentes. Portanto, altos valores de condutividade indicam maior quantidade de íons em solução. Sendo que, o íon H^+ é a espécie iônica com maior valor de condutância iônica equivalente à diluição infinita (Giulito, 1980). O comportamento inverso observado entre essas grandezas, indica a importância dos íons H^+ na contribuição iônica total na água da chuva no período estudado. Comparando-se os

valores da condutividade (Figura 4) com as concentrações iônicas (Figura 3), observou-se que o evento do dia 12 de fevereiro de 1990 apresentou maior valor da condutividade, assim como as mais altas concentrações iônicas, caracterizando, portanto, o fenômeno chuva ácida.

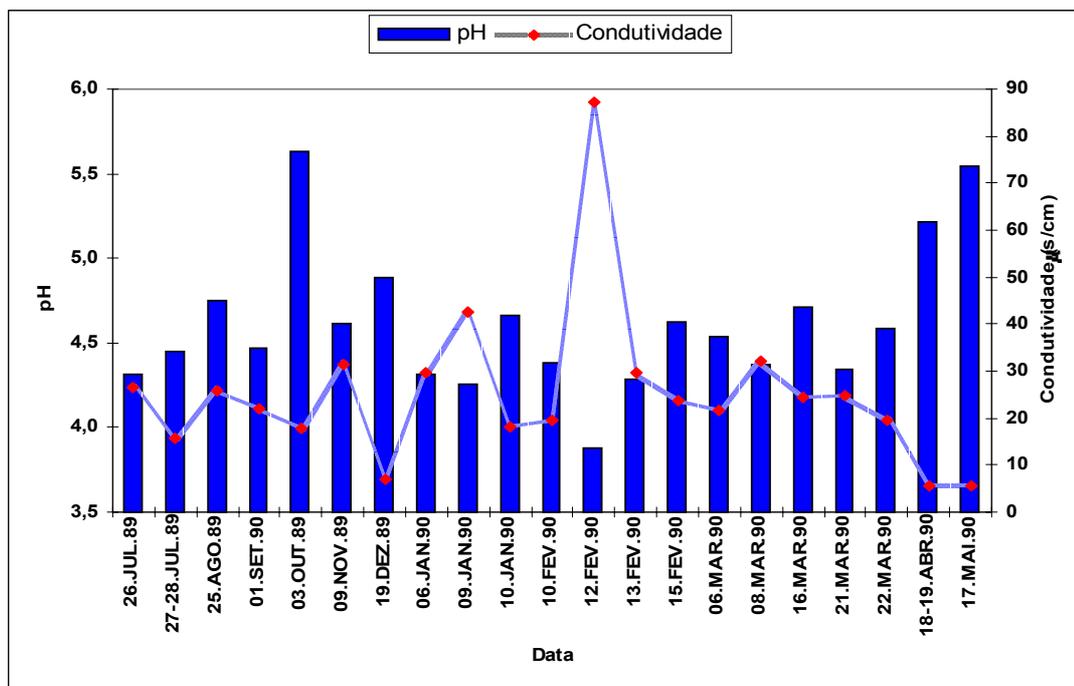


Figura 4. Valores de pH e condutividade em águas de chuva amostradas na região oeste da cidade de São Paulo entre julho de 1989 e maio de 1990.

A distribuição da frequência dos valores de pH para todas as 223 amostras de águas de chuva analisadas no período está apresentada na Figura 5. Cerca de 57 % das amostras apresentaram valores de pH < 4,5 caracterizando, portanto, o fenômeno de chuva ácida.

Utilizando toda a série de dados foram feitas correlações de Pearson entre as espécies químicas (H^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- e Cl^-) e condutividade. Os valores das correlações estão representados na Tabela 2. Observa-se que todas as espécies químicas tiveram correlação significativa com a condutividade (exceto o Cl^-), principalmente o H^+ (0,88), comprovando a sua importância na contribuição iônica total na água da chuva.

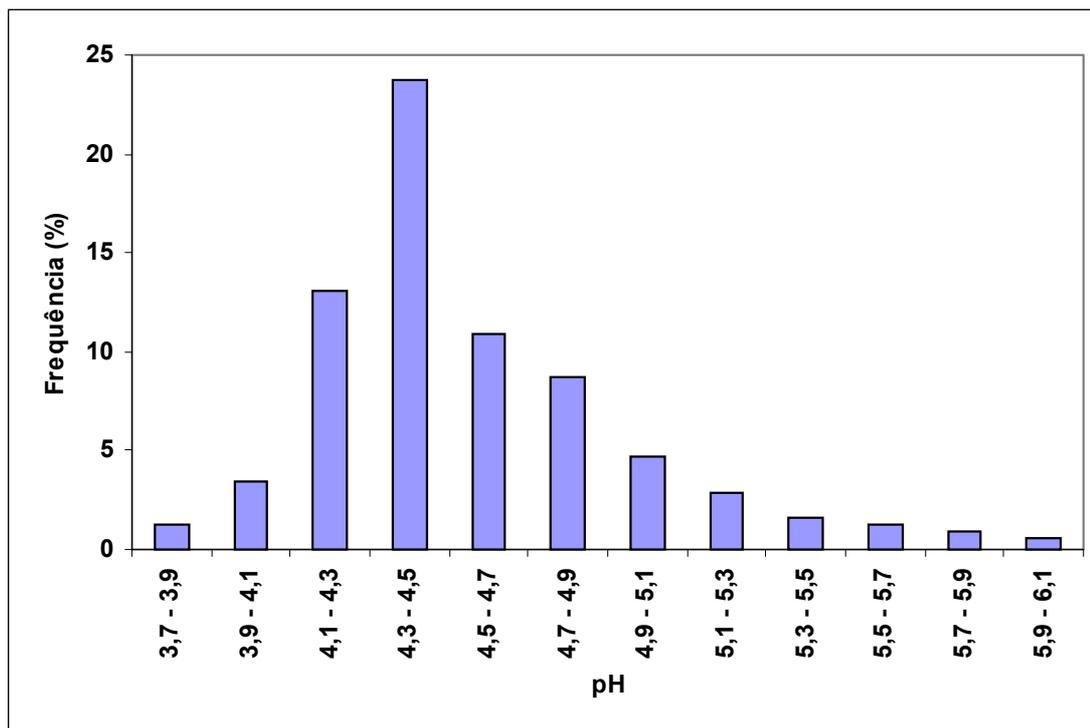


Figura 5. Distribuição da frequência de pH para todas amostras de precipitação durante o período de julho de 1989 a maio de 1990.

Entre as espécies químicas nota-se que houve uma melhor correlação entre o SO_4^{2-} e NO_3^- , (0,77), o que significa que tais espécies possivelmente tenham a mesma origem, ou seja, principalmente, devido a oxidação de SO_2 e NO_x provenientes da queima de combustíveis fósseis (CETESB, 2004). Sendo também significativa a correlação (0,56 e 0,66) entre essas espécies (SO_4^{2-} e NO_3^-) com H^+ (Tabela 2). Desta forma, pode-se considerar significativa à presença dos ácidos sulfúricos e nítricos nessas águas de chuva, provavelmente via condensação dessas espécies a partir da fase gasosa.

Tabela 2. Valores da correlação de Pearson entre as espécies químicas durante o período entre Julho de 1989 a Maio de 1990 (223 amostras e $p < 0,05$).

	H^+	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-
Condutividade	0,88	0,75	0,82	0,64
Cl^-	0,39	0,63	0,58	1,00
NO_3^-	0,66	0,77	1,00	
SO_4^{2-}	0,56	1,00		

Conforme visto anteriormente os íons SO_4^{2-} e NO_3^- são os mais abundantes e apresentaram correlação significativa entre si. A presença dessas duas espécies na

atmosfera urbana pode ser devido a emissão, respectivamente, do SO_2 a partir da queima de combustíveis fósseis e carvão contendo altos teores de enxofre e do NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$) produzidos pela combustão de gasolina e diesel pela frota veicular. Outra contribuição importante para presença do sulfato em águas de chuva é a contribuição da brisa marítima, diferentemente do NO_x , cujas fontes são predominantemente continentais e/ou antropogênicas. Outro aspecto importante sobre essas duas espécies diz respeito a seus processos de oxidação atmosférica, em que a conversão NO_x para NO_3^- ocorre predominantemente em fase gasosa, enquanto a reação de SO_2 para SO_4^{2-} acontece predominantemente em fase aquosa (Ferek et al., 1988; Finlayson-Pitts, 2000; Seinfeld e Pandis, 1998; Elsom, 1987). Portanto, valores da razão $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ podem contribuir para algumas inferências a respeito de possíveis fontes dessas espécies em águas de chuva.

Considerando o exposto acima, calculou-se para cada amostra a razão $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$. Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios (\pm desvio padrão) dessa razão para cada um dos 20 eventos, assim como as concentrações médias aritméticas e respectivos desvios padrões para os três ânions estudados. Observa-se na Tabela 3 que altos valores das razões $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$, assim como do desvio padrão, ocorreram em cinco eventos, destacando-se o dia 19 de dezembro de 1990, em que a concentração de nitrato foi a mais baixa dos três ânions. Outro grupo interessante é o dos eventos do mês de fevereiro de 1990 cujas razões foram menores que 1.

Tabela 3. Valores das concentrações médias aritméticas (\pm desvio padrão) para as espécies analisadas e da razão $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ em cada evento de chuva, para a cidade de São Paulo no IQ-USP no período de julho/1989 a maio/1990.

Evento	Data	SO_4^{2-}	NO_3^-	Cl^-	$\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$
		$\mu\text{mol L}^{-1}$			
1	26/07/89	23,6 (27,9)	9,3 (9,5)	6,8 (12,3)	3,5 (4,4)
2	27-28/07/89	11,3 (8,0)	5,0 (3,3)	7,7 (12,4)	2,4 (0,9)
3	25/08/89	20,1 (14,4)	24,7 (21,1)	12,4 (10,6)	1,3 (0,4)
4	03/10/89	54,3 (48,5)	42,8 (30,2)	19,3 (9,0)	1,1 (0,4)
5	09/11/89	72,4 (24,5)	64,4 (25,6)	20,8 (6,1)	1,2 (0,3)
6	19/12/89	6,4 (4,7)	1,9 (2,6)	2,5 (5,4)	18,9 (17,1)
7	06/01/90	24,4 (9,9)	23,3 (12,0)	3,2 (2,3)	1,1 (0,4)
8	09/01/90	109,3 (67,0)	72,0 (67,7)	13,9 (8,2)	1,9 (0,9)
9	10/01/90	46,5 (14,7)	12,5 (7,9)	5,9 (2,8)	5,4 (4,2)
10	10/02/90	29,8 (21,7)	42,5 (22,5)	7,8 (3,5)	0,7 (0,3)
11	12/02/90	98,7 (22,0)	174,2 (17,3)	35,3 (17,2)	0,6 (0,1)
12	13/02/90	16,1 (10,3)	26,2 (17,2)	1,6 (1,2)	0,62 (0,1)
13	15/02/90	35,7 (30,8)	30,0 (25,3)	6,2 (7,2)	1,1 (0,4)
14	06/03/90	16,7 (12,3)	21,9 (10,7)	5,2 (2,7)	0,76 (0,3)
15	08/03/90	66,5 (50,8)	29,5 (10,5)	13,9 (5,7)	3,0 (3,3)
16	16/03/90	38,6 (8,5)	28,7 (8,0)	8,7 (1,2)	1,3 (0,1)
17	21/03/90	31,2 (32,2)	30,0 (48,8)	3,6 (4,7)	1,9 (1,1)
18	22/03/90	19,8 (13,7)	10,1 (9,3)	3,9 (3,8)	5,2 (8,1)
19	18-19/04/90	7,7 (12,1)	5,6 (8,9)	1,3 (2,0)	1,9 (1,1)
20	17/05/90	5,7 (5,5)	4,5 (1,8)	2,5 (1,2)	1,1 (0,5)

3.3 Condições meteorológicas entre os eventos

Para as análises sinóticas foram utilizadas cartas de superfície do DHN (1989 e 1990) no horário de 12 UTC e as verificações de ocorrências de sistemas frontais através do Climanálise (1989 e 1990), nos horários entre 09HL (Hora Local) do dia anterior até às 09HL do dia indicado. A análise sinótica foi complementada através de dados do NCEP/NCAR para cada evento no horário de 12UTC (isto é, análises 2 dias antes e 1 dia após o evento). Também foram analisados os campos sinóticos de Pressão ao Nível Médio

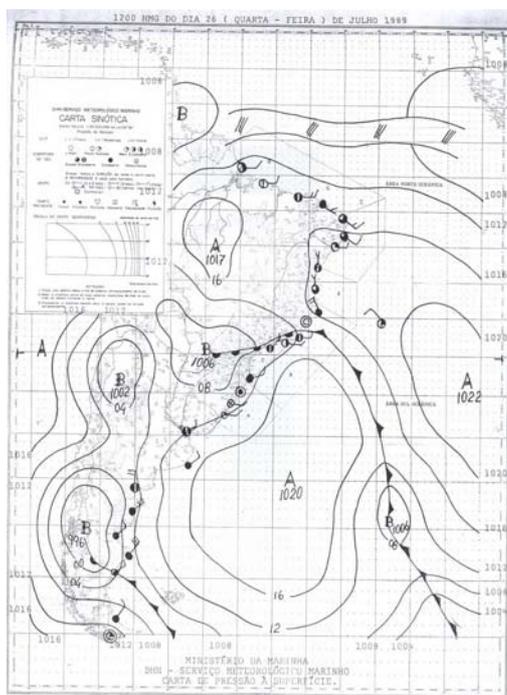
do Mar (P_{NMM}) e vento em superfície; precipitação diária através do NCEP-BDPA; advecção de temperatura e divergência de umidade no nível de 850 hPa. Todas estas análises pretendem avaliar possíveis padrões sinóticos entre os eventos estudados.

Durante o período, foram identificados alguns sistemas sinóticos que atuaram na América do Sul (AS), os quais tiveram grande influência sobre as condições do tempo no Estado de São Paulo. Desta forma, os eventos de precipitação foram separados em cinco grupos de acordo com as semelhanças das condições meteorológicas. Cada grupo será ilustrado por um dos eventos, representativo do quadro das condições sinóticas.

- **Dias 26 e 27-28 de julho de 1989, 25 de agosto de 1989 e 03 de outubro de 1989.**

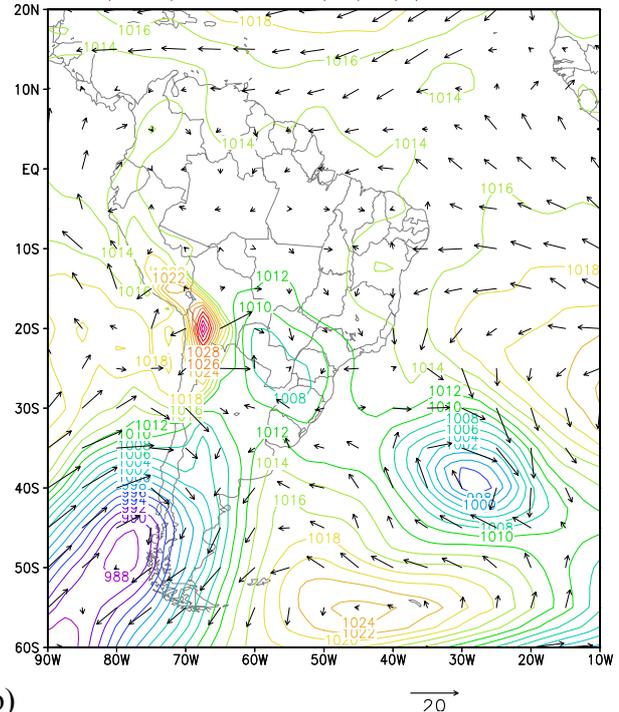
A carta de superfície, o campo de P_{NMM} e vento na superfície para o dia 26 de julho de 1989 (Figura 6 (a-b)) servem de exemplo para a configuração sinótica existente para este grupo de eventos. Observou-se a presença de frente fria entre a Região Sul do Brasil, litoral de São Paulo, Rio de Janeiro e Sul da Bahia. Predominância de baixa pressão sobre a Argentina, assim como uma frente fria no extremo sul da mesma. Nota-se também que parte do Brasil Central ficou sobre a influência de um sistema de alta pressão.

Utilizando os dados da Estação Meteorológica do IAG-AF, nota-se que durante estes dias a direção do vento foi predominantemente de noroeste, com velocidades médias de ventos em torno de $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ e velocidades máximas acima de $3,5 \text{ m.s}^{-1}$.



(a)

PNMM(hPa) e Vento(m/s)(26JUL89 12Z)



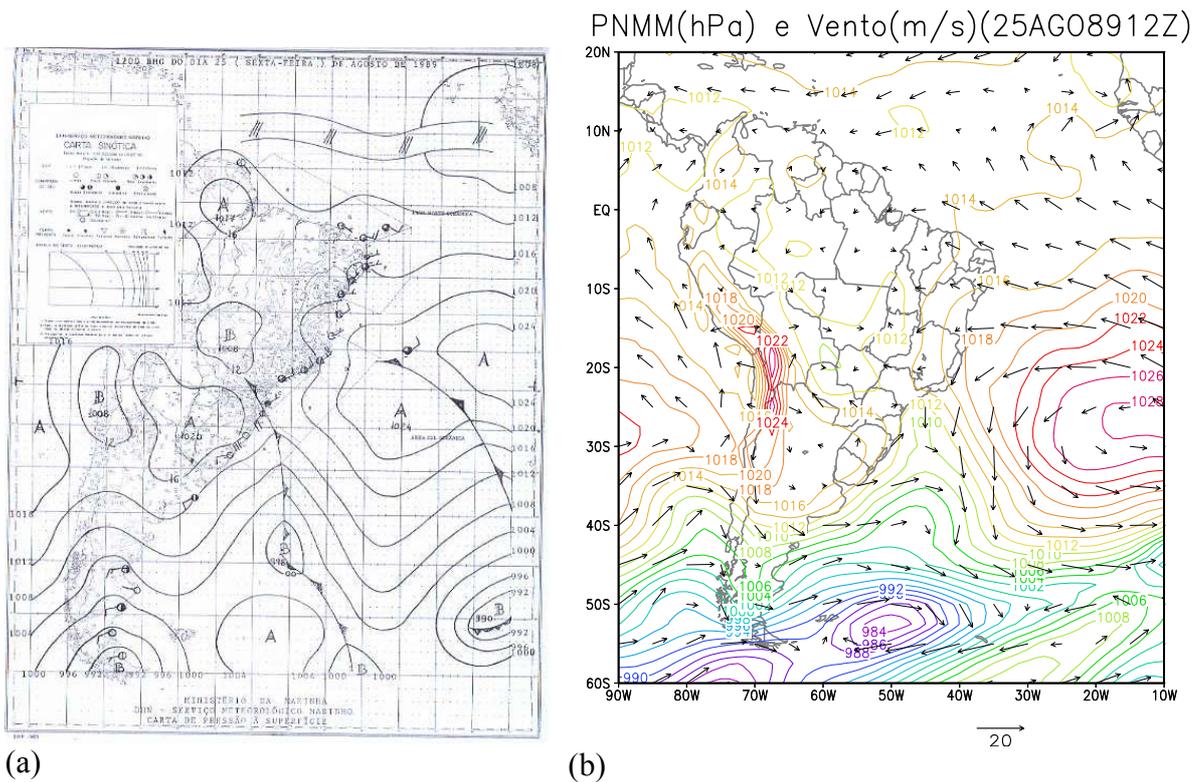
(b)

Figura 6. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 26 de julho de 1989.

- **Dias 25 de agosto e 03 de outubro de 1989.**

O dia 25 de fevereiro de 1990 (Figura 7(a-b)) mostra as características sinóticas observadas durante estes dias. Nota-se a influência de uma frente fria na Região Sul do Brasil deslocando-se para o oceano e um centro de baixa pressão sobre o extremo Sul da Argentina e alta pressão sobre o Uruguai.

Durante estes dias as direções do vento foram predominantemente de noroeste e norte/nordeste, com velocidades médias de ventos em torno de $2,0 \text{ m.s}^{-1}$ e velocidades máximas acima de $3,6 \text{ m.s}^{-1}$.

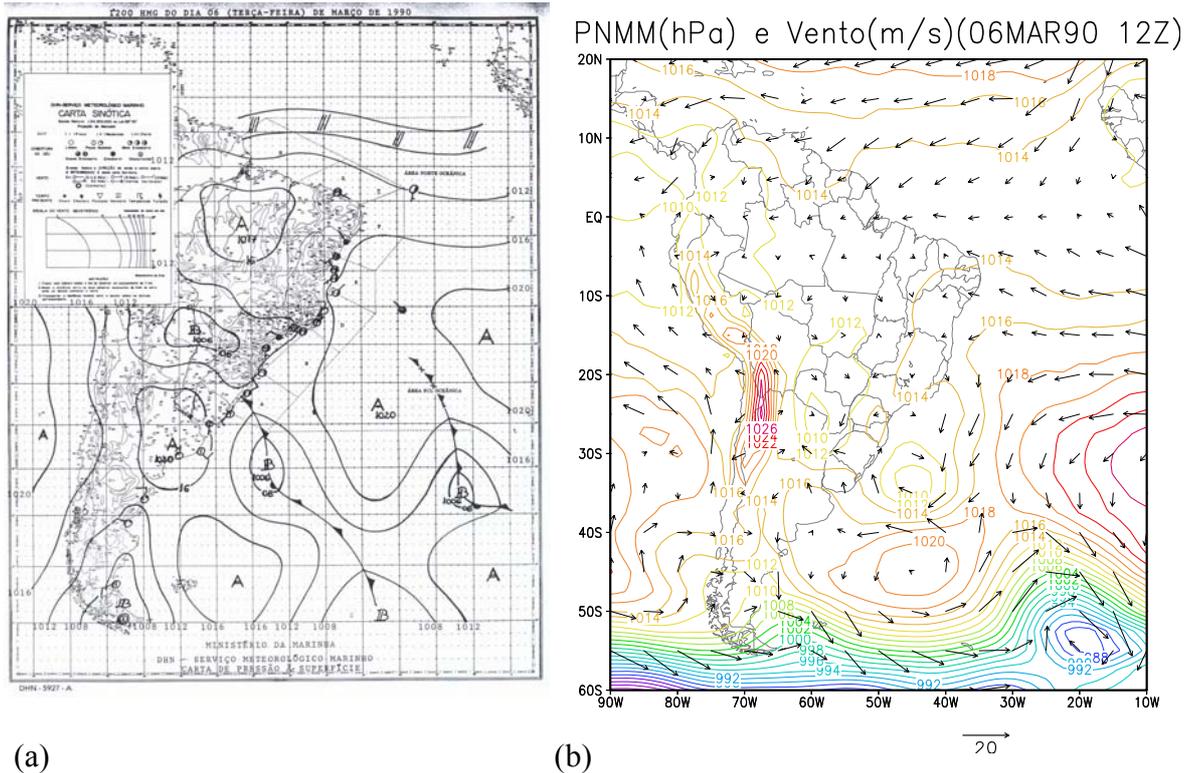


(a) (b)
Figura 7. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 25 de agosto de 1989.

- **Dias 09 de novembro de 1989, 06, 08, 16 de março de 1990 e 17 de maio de 1990.**

As situações sinóticas para estes dias foram semelhantes, com pequenas mudanças no posicionamento e deslocamento dos sistemas. A carta de superfície e campo de P_{NMM} e vento à superfície para o dia 6 de março na Figura 8 (a-b), mostram basicamente a configuração sinótica predominante nestes dias, com uma frente fria no sul da Argentina estendendo-se para o oceano, um sistema de alta pressão sobre o oceano, próximo da costa do Uruguai, e outra frente fria situada na Região Sul do Brasil.

Durante estes dias observou-se que a direção predominante do vento foi de sudeste e nordeste, exceto no dia 17 de maio que ficou no quadrante noroeste, a velocidade média ficou acima de 2 m.s^{-1} e a máxima entre $3,1$ e $5,3 \text{ m.s}^{-1}$.



(a) (b)
Figura 8. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 06 de março de 1990.

- **Dias 6, 9, 10 de janeiro de 1990, 21, 22 de março de 1990.**

O dia 22 de março de 1990 (Figura 9(a-b)) ilustra o exemplo da configuração sinótica existente durante estes dias. Observou-se a atuação de uma frente fria sobre a Argentina estendendo-se para o oceano e uma outra frente fria entre Santos e Rio de Janeiro estendendo-se para o oceano e alta pressão sobre a região sul do Brasil.

Durantes estes eventos observa-se que a velocidade média do vento esteve em torno de 1 m.s^{-1} e a máxima entre $1,9$ e $3,1 \text{ m.s}^{-1}$. A direção do vento foi predominantemente de noroeste nos dias 9 e 10 de janeiro, nos dias 06 de janeiro e 22 de março foram de sudeste e de nordeste no dia 21 de março.

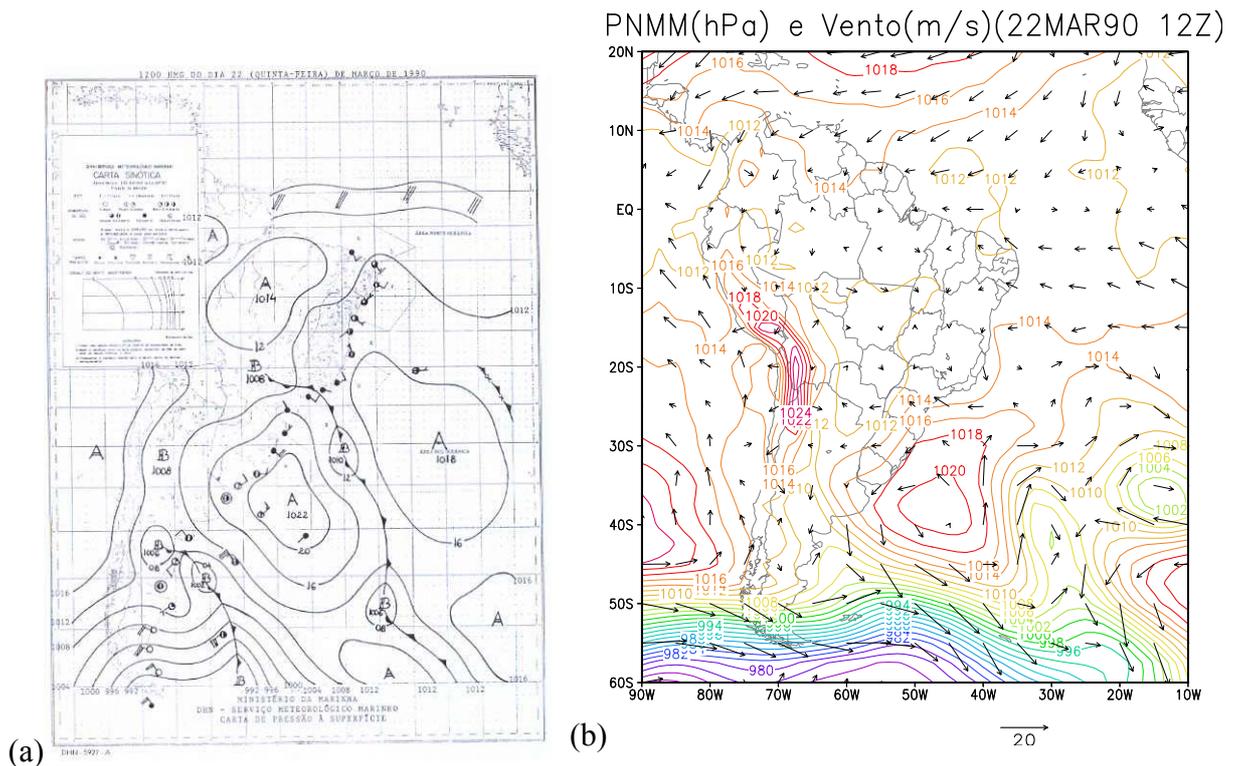
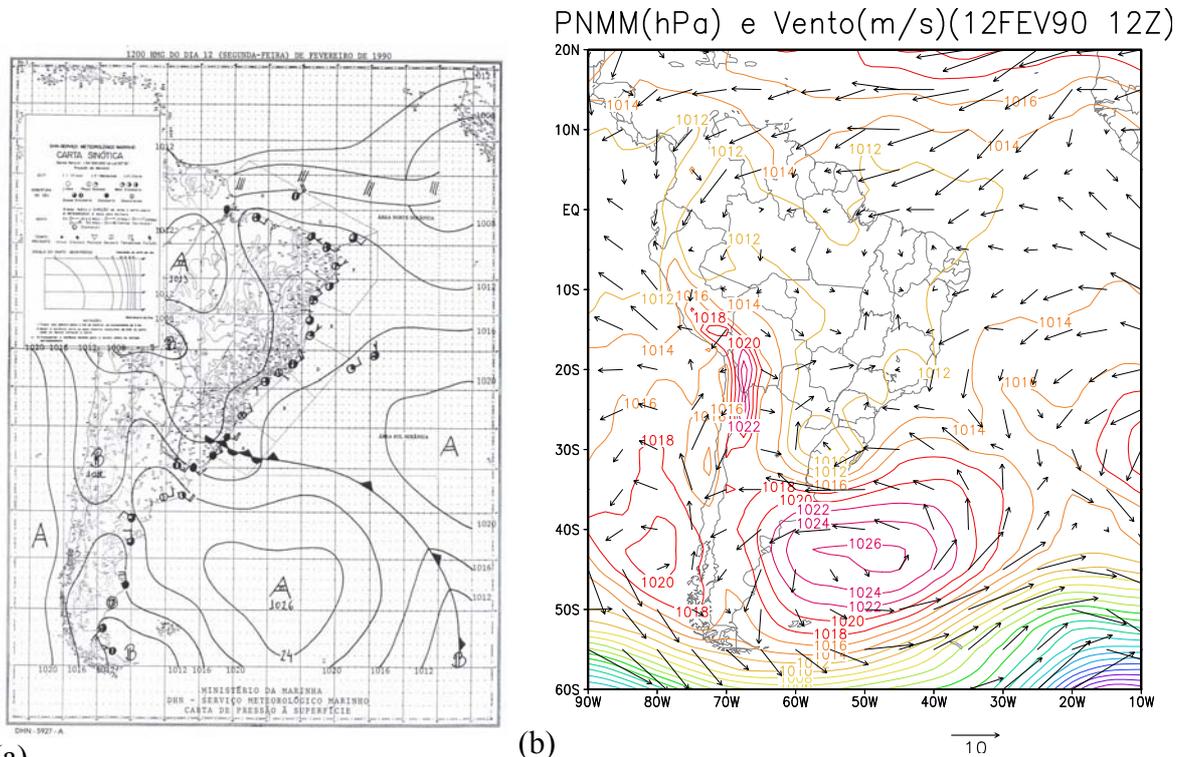


Figura 9. Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 22 de março.

- **Dias 10, 12, 13 e 15 de fevereiro de 1990.**

O dia 12 de fevereiro (Figura 10(a-b)) ilustra as condições sinóticas observadas durante estes dias. Observou-se que existiu um regime estacionário predominando, com uma frente fria quase estacionária na Região Sul do Brasil. A partir do dia 13, este regime começou a mudar e passou a ser notado a influência de um centro de baixa pressão sobre o sudeste do Brasil e no dia 15 uma frente fria fraca no Rio de Janeiro estendendo para o oceano resultante do deslocamento para nordeste da frente fria quase estacionária existente nos dias anteriores.



(a) **Figura 10.** Carta sinótica de pressão em superfície (a) e campo de pressão ao nível médio do mar (b) às 12Z para o dia 12 de fevereiro de 1990.

Nestas amostras de chuva observa-se que, as concentrações das espécies químicas, apesar dos eventos serem próximos, foram diferentes, isto pode estar relacionado à taxa e quantidade de precipitação que foi intensa no dia 10 de fevereiro. Estes eventos apresentaram razão $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ menores que 1 (Tabela 3), exceto no dia 15 de fevereiro. A direção predominante do vento foi de noroeste no dia 13 e de sudeste nos demais dias, a velocidade média manteve-se em torno de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e a máxima cerca de $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Destaca-se aqui que apesar da situação sinótica semelhante entre alguns eventos, as concentrações das espécies químicas em estudo tiveram grande variabilidade entre os eventos, como pode ser visto na Figura 3.

3.4 Estudo de dois casos

Para melhor ilustração dos eventos de ocorrência de chuva ácida foram escolhidos apenas dois casos, onde observaram-se diferenças extremas de concentração das espécies analisadas. Os casos escolhidos foram os dias 12 de fevereiro e 17 de maio de 1990, onde

se observaram valores máximos e mínimos de concentrações, respectivamente. Conforme apresentado na Tabela 1, esses eventos iniciaram-se praticamente no mesmo horário (às 15 horas) e apresentaram o mesmo tempo de duração (aproximadamente 180 minutos). Por outro lado, diferenciaram-se apenas na quantidade e taxa de precipitação com 0,8 e 4,2 mm/h, respectivamente. Além disso, estes eventos ocorreram em diferentes estações do ano: verão para o evento de concentrações máximas e outono para as concentrações mínimas.

A avaliação da precipitação diária e total desses dois eventos está apresentada na Tabela 4, onde se observa que no dia 12 de fevereiro ocorreu pouca precipitação em relação ao outro evento analisado, tanto na estação meteorológica do IAG-AF como no IQ, 5,8 mm e 2,5 mm, respectivamente.

Observa-se também que entre os dias 01 e 11 de fevereiro a quantidade de precipitação registrada no IAG-USP foi de 1,6 mm (Figura 11), portanto, possibilitando o acúmulo de poluentes na atmosfera durante esse período, que depois foram removidos pela precipitação ocorrida durante o dia 12.

O evento de precipitação ocorrido no dia 10 (25,2 mm) pode ser considerado um evento isolado, pois a precipitação foi registrada apenas no IQ-USP. O total mensal de precipitação em fevereiro de 1990 não superou a média Climatológica que foi de 198,4 mm.

No dia 17 de maio de 1990, em que se verificou concentração mínima das espécies iônicas, a chuva acumulada foi de 11,6 mm na estação meteorológica do IAG-AF e 12,5 mm no IQ. Nos dias anteriores a chuva acumulada foi de 44 mm (1 a 16 de maio, ver Figura 11), portanto, removendo as espécies químicas da atmosfera no período que antecedeu ao evento do dia 17. O total de chuva ocorrido durante todo o mês de maio (55,7 mm) foi aproximadamente igual à média climatológica de 64,61 mm.

Tabela 4. Comparação entre os totais de precipitação de dois eventos extremos ocorridos em 1990. Dados de pluviometria obtidos da estação Meteorológica do IAG, na Água Funda.

Data	AF-IAG	Coletadas pelo IQ-USP	Ocorrida antes do evento mm	Acumulada no mês	Média (1933-2001)
12/02/90	5,8	2,5	1,6	124,5	208,11
17/05/90	11,6	12,5	44,0	55,7	64,61

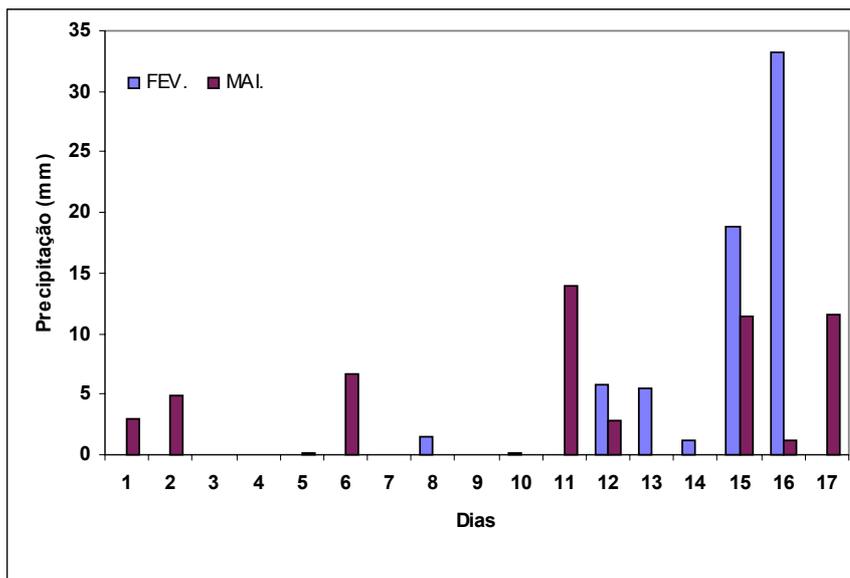


Figura 11. Distribuição de precipitação durante os dias que antecederam os eventos extremos de precipitação, obtidos através da estação meteorológica do IAG-AF.

3.4.1 Primeiro caso – 12/02/1990

As imagens de satélites GOES-E, as cartas sinóticas de pressão em superfície geradas pelo serviço meteorológico da Marinha (DHN, 1990), os campos de Pressão ao Nível Médio do Mar (P_{NMM}) e vento em superfície entre os dias 10 e 12 de fevereiro de 1990, das reanálise do NCEP/NCAR, são mostrados nas Figuras 12 (a-d) a 14 (a-d), respectivamente.

Observa-se através das Figuras 12 a 14 que durante os dias analisados existiu um regime estacionário predominando (isto é, não houve mudança na situação sinótica), com pressão de 1012 hPa sobre Estado de São Paulo, e uma frente fria estacionária na região Sul do Brasil. Durante estes dias os ventos em superfície foram predominantemente fracos e de leste na região Sudeste do Brasil, existiu advecção quente de temperatura e convergência de umidade fraca ou nula, o que favoreceu a maior concentração de poluentes, uma vez que nesta situação existe pouca mistura vertical.

No dia 13 observa-se sobre grande parte do Brasil, inclusive o Estado de São Paulo, a atuação de um sistema de baixa pressão, com advecção quente de temperatura fraca (Figura 15 (a-d)) e transporte de umidade (Figura 16 (a-d)) do oceano Atlântico, favorecendo a ocorrência de precipitação durante este dia (Figura 17d). Nos dias que antecederam a ocorrência de precipitação no Estado de São Paulo observou-se advecção quente e divergência de umidade fraca.

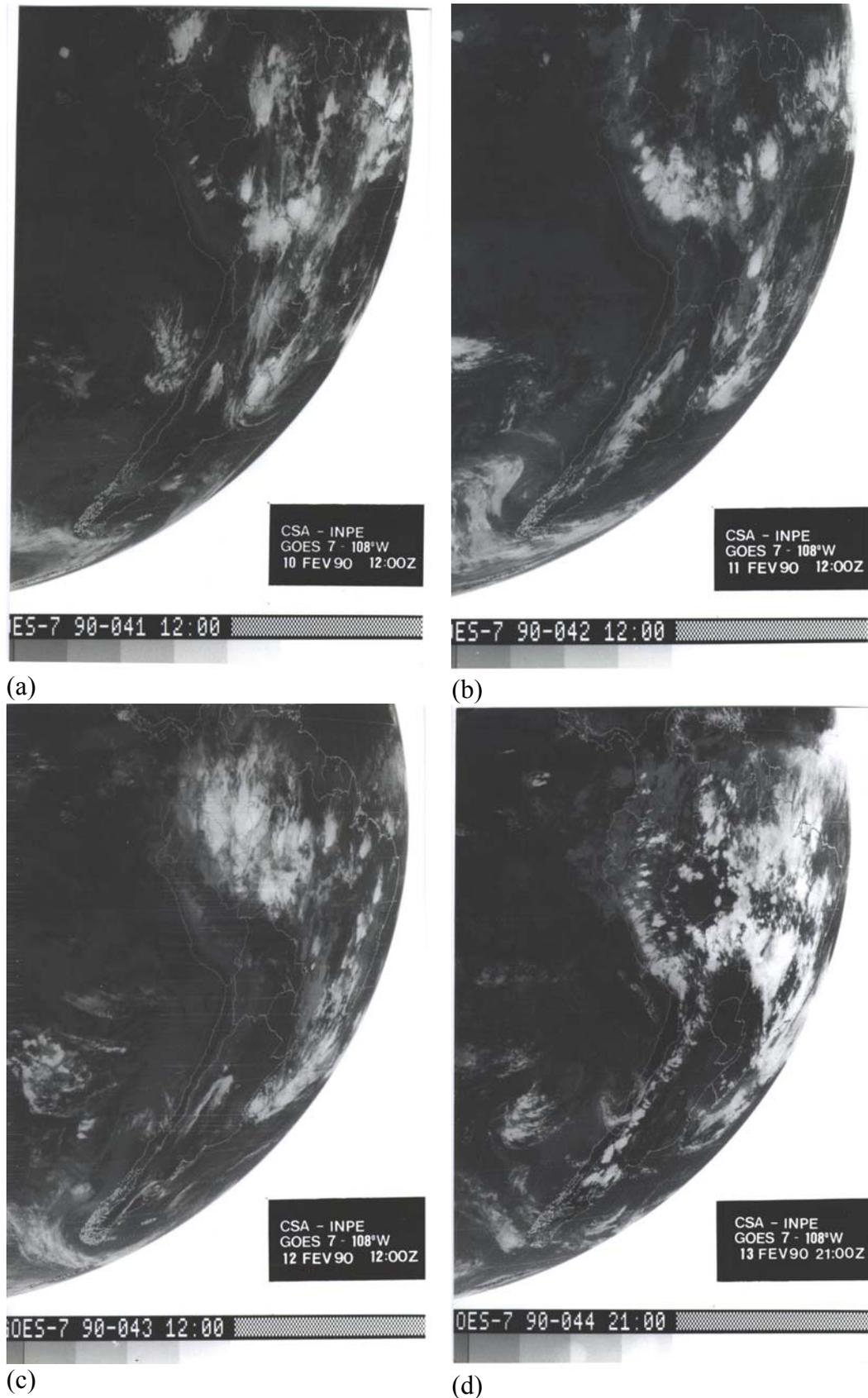
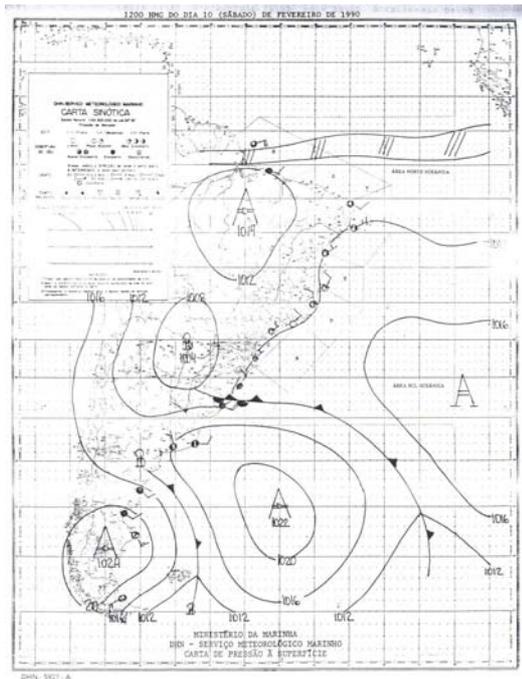
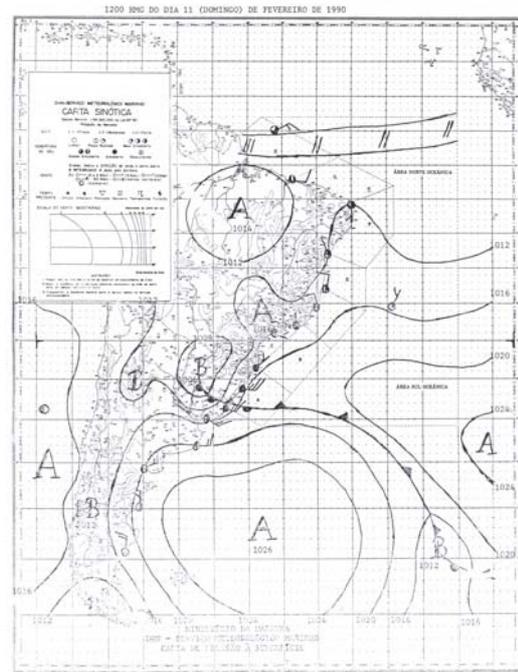


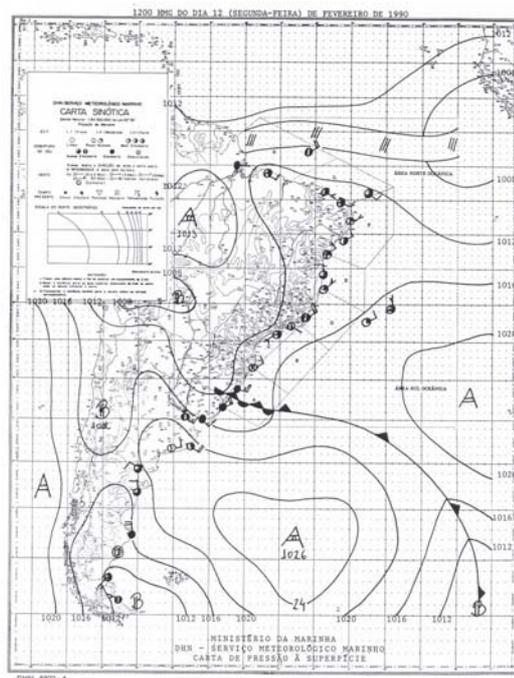
Figura 12. Imagens de satélite GOES-E em 12Z. (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro (às 21Z).



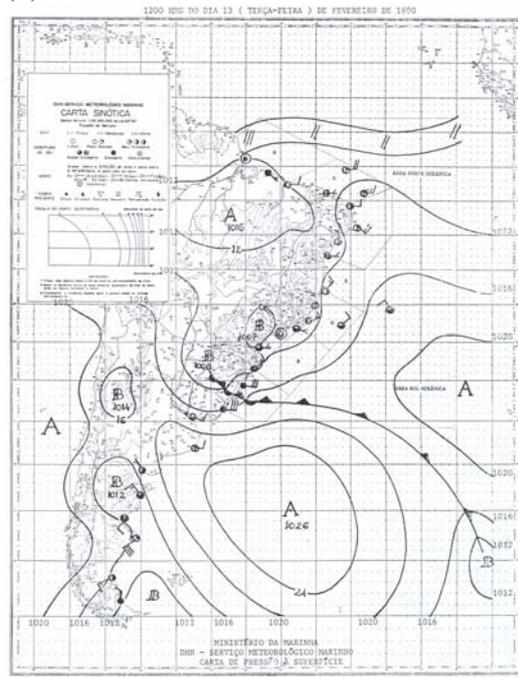
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 13. Cartas sinóticas de pressão em superfície em 12Z. (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.

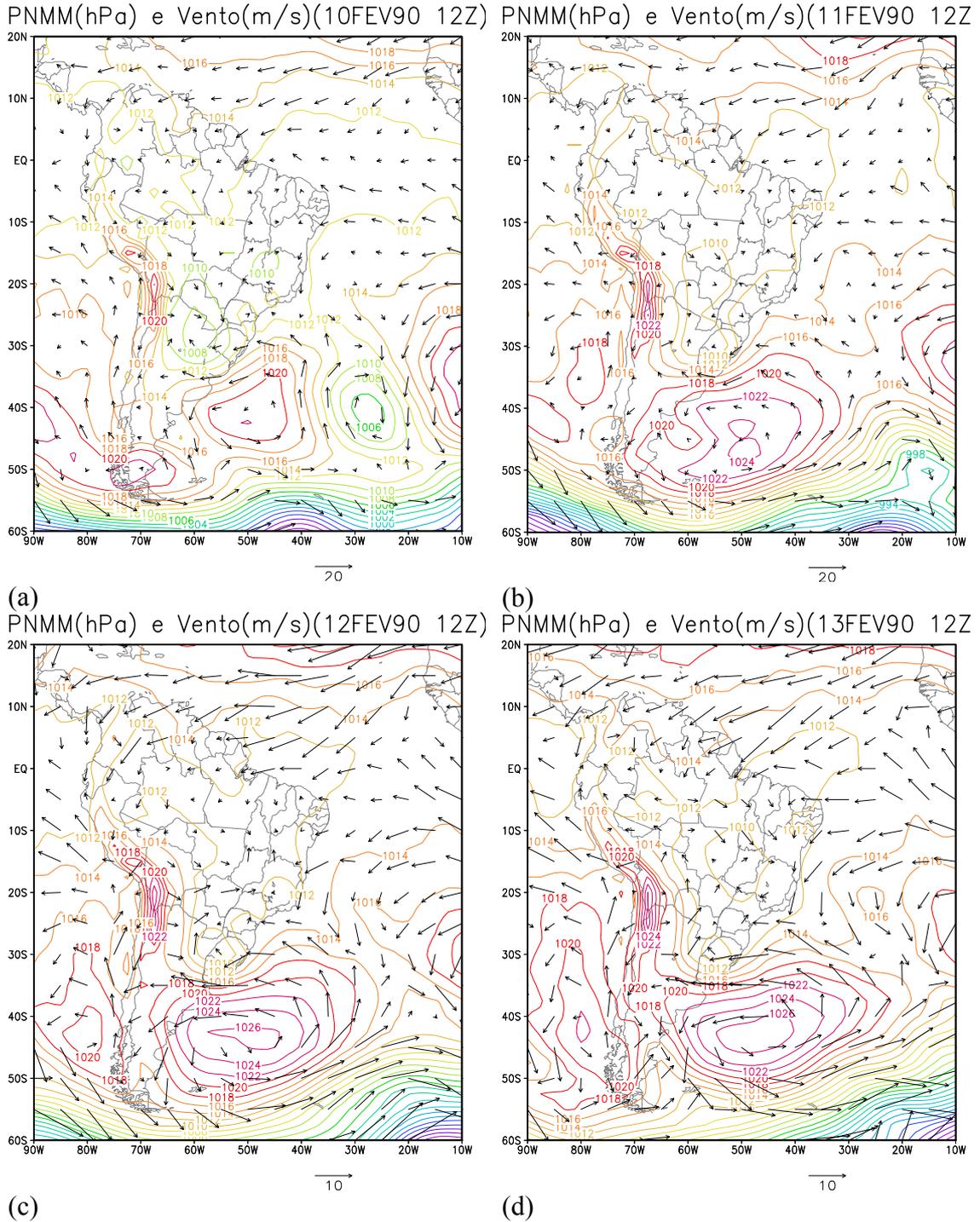


Figura 14. Campos de pressão ao nível médio do mar e vento em superfície. (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.

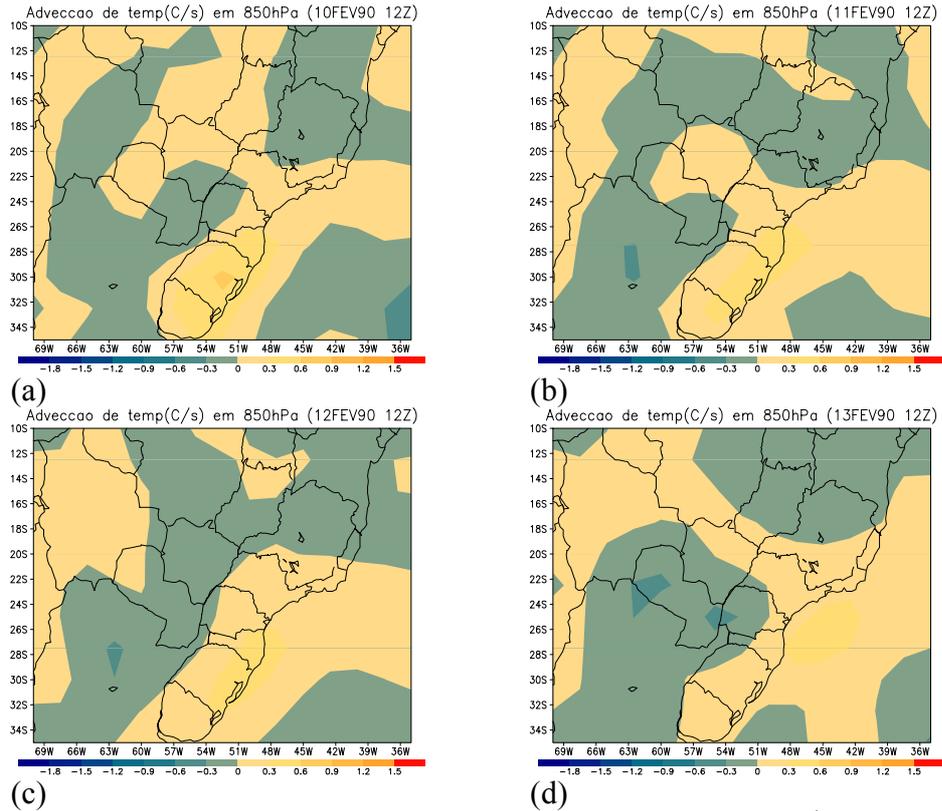


Figura 15. Advecção de temperatura em 850 hPa ($\times 10^4$). (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.

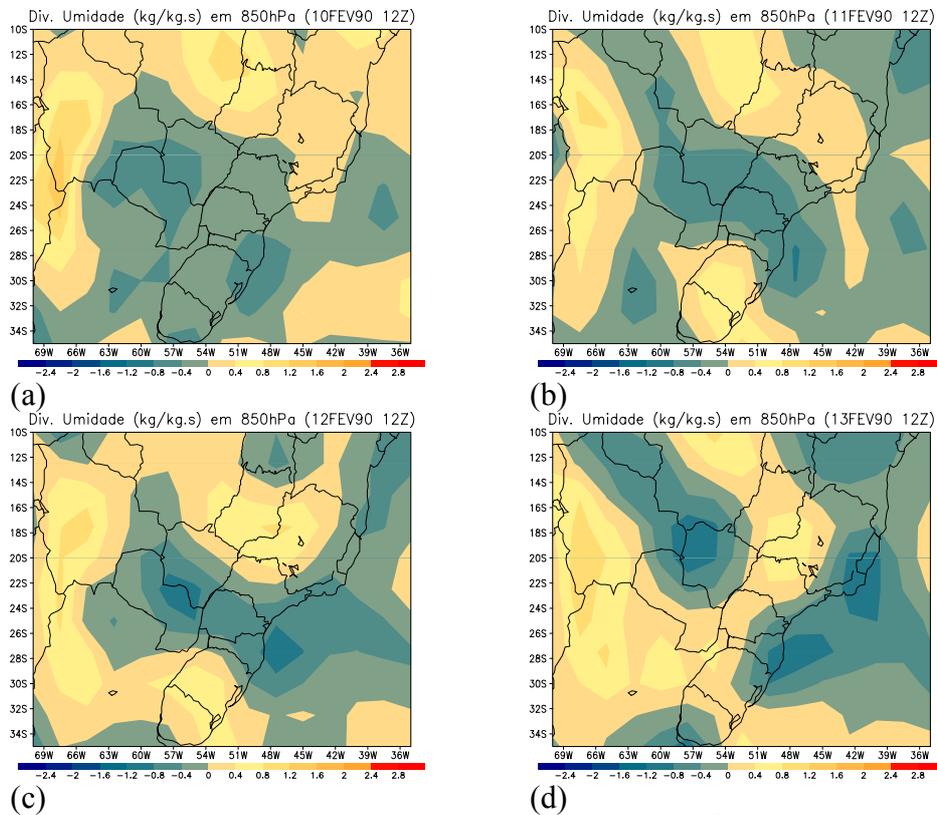


Figura 16. Divergência de umidade em 850hPa ($\times 10^7$). (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.

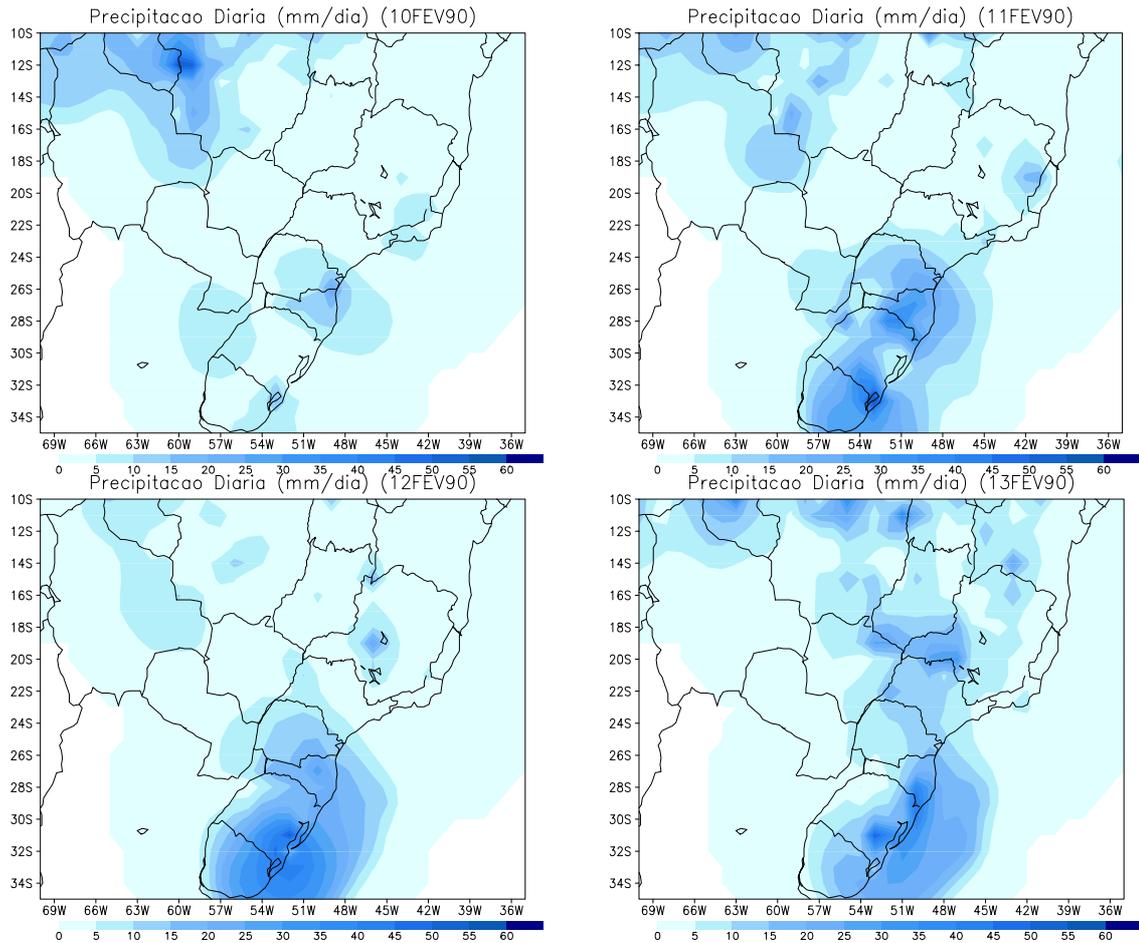


Figura 17. Campos de precipitação diária em superfície. (a) 10 de fevereiro, (b) 11 de fevereiro, (c) 12 de fevereiro e (d) 13 de fevereiro.

A temperatura média diária do ar e sua amplitude (Figura 18) variaram pouco durante o período analisado. Isto é razoável, pois fevereiro é um mês de verão, com pequenas variações no ciclo diurno de temperatura, onde tanto a temperatura máxima como a mínima mostram pequenas variações pouco ao longo da estação.

A componente meridional do vento (Figura 19) foi predominantemente de sul entre os dias 10 a 12, pois havia a predominância de um regime estacionário, com a influência de alta pressão sobre São Paulo (Figuras 12 a 14). No dia 13, a atuação do sistema de baixa pressão (Figura 12 e 14) tanto no Sul como no Sudeste do Brasil, fez com que a componente meridional do vento passasse de sul para norte.

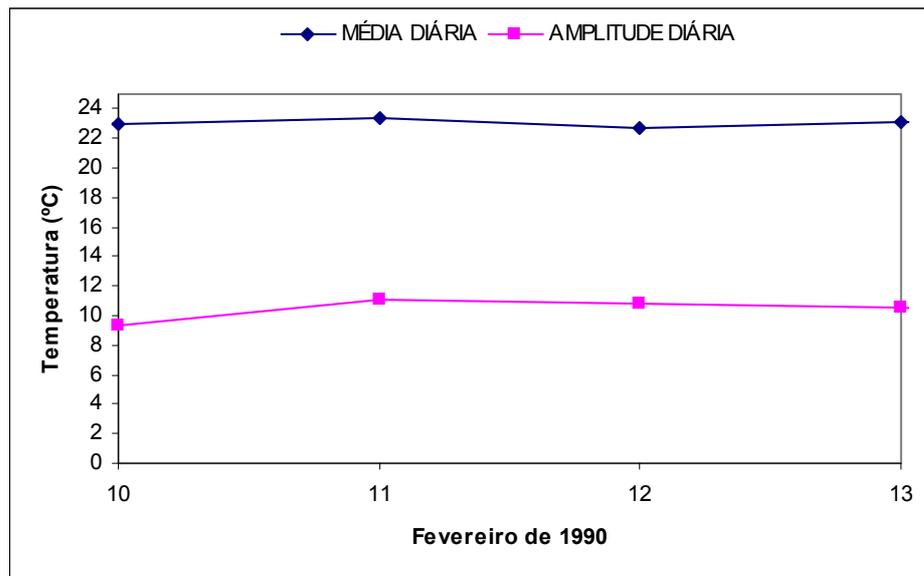


Figura 18. Médias e amplitudes diárias da Temperatura do ar.

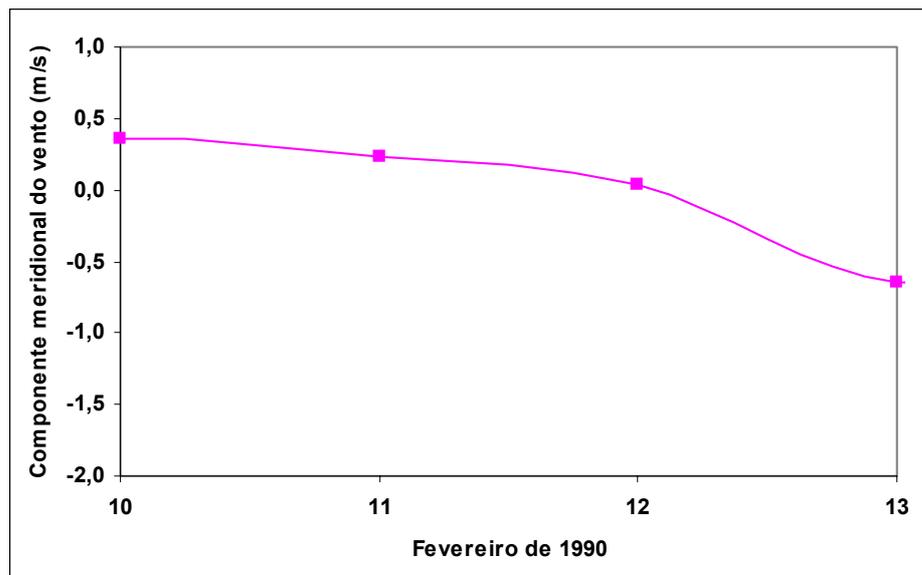
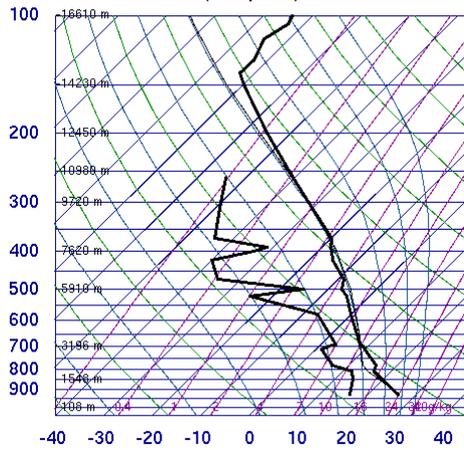


Figura 19. Médias diárias da componente meridional (v) do vento.

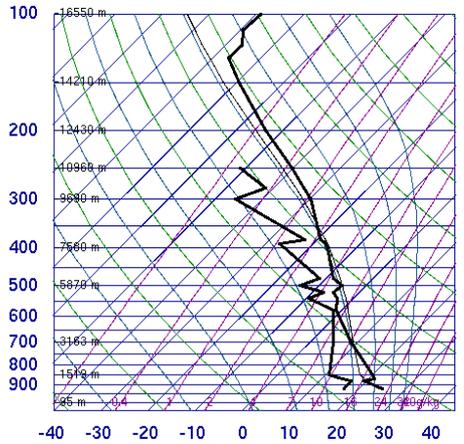
A Figura 20 mostra os diagramas Skew – T de temperatura (T) e temperatura do ponto de orvalho (T_d) entre os dias 08 e 13 de fevereiro de 1990 às 12 UTC e a Figura 21 os perfis verticais de temperatura potencial (θ), da temperatura potencial equivalente (θ_e) e da temperatura potencial equivalente saturada (θ_{es}) para o dia 12 de fevereiro de 1990 às 12 UTC, obtidos através de radiossondagem do Aeroporto de Congonhas.

83780 SBSP Sao Paulo (Aeroporto)



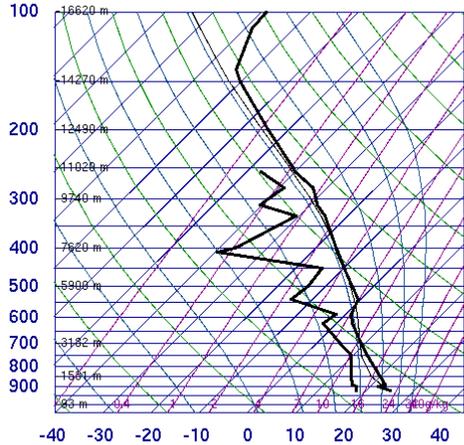
12Z 08 Feb 1990

83780 SBSP Sao Paulo (Aeroporto)



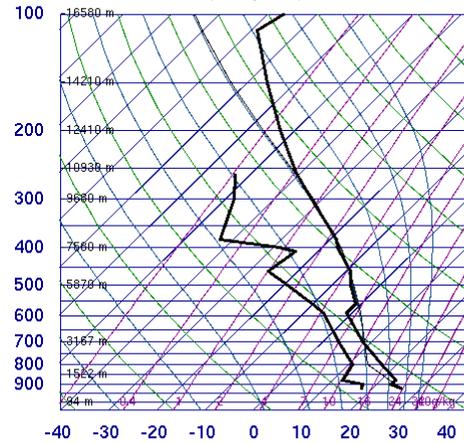
12Z 10 Feb 1990

83780 SBSP Sao Paulo (Aeroporto)



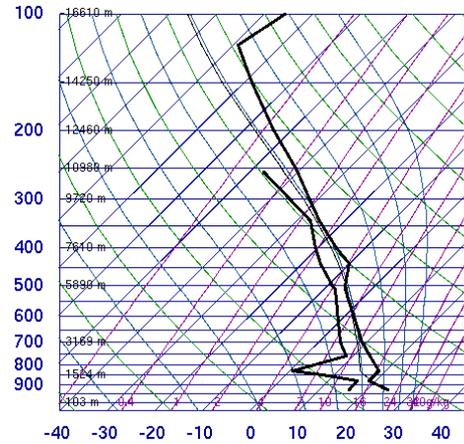
12Z 12 Feb 1990

83780 SBSP Sao Paulo (Aeroporto)



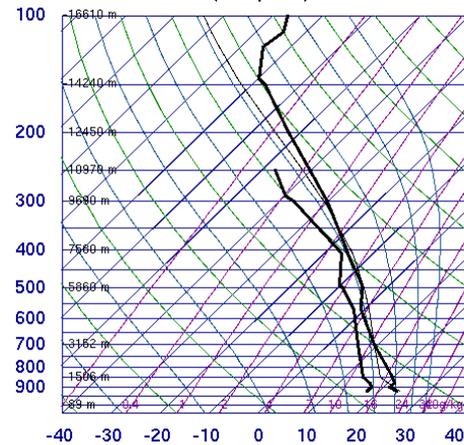
12Z 09 Feb 1990

83780 SBSP Sao Paulo (Aeroporto)



12Z 11 Feb 1990

83780 SBSP Sao Paulo (Aeroporto)



12Z 13 Feb 1990

Figura 20. Diagramas Skew- T mostrando as sondagens da temperatura do ar (T) e da Temperatura do ponto de orvalho (T_d) em relação à pressão às 12 UTC, entre 8 a 13 de Fevereiro de 1990.

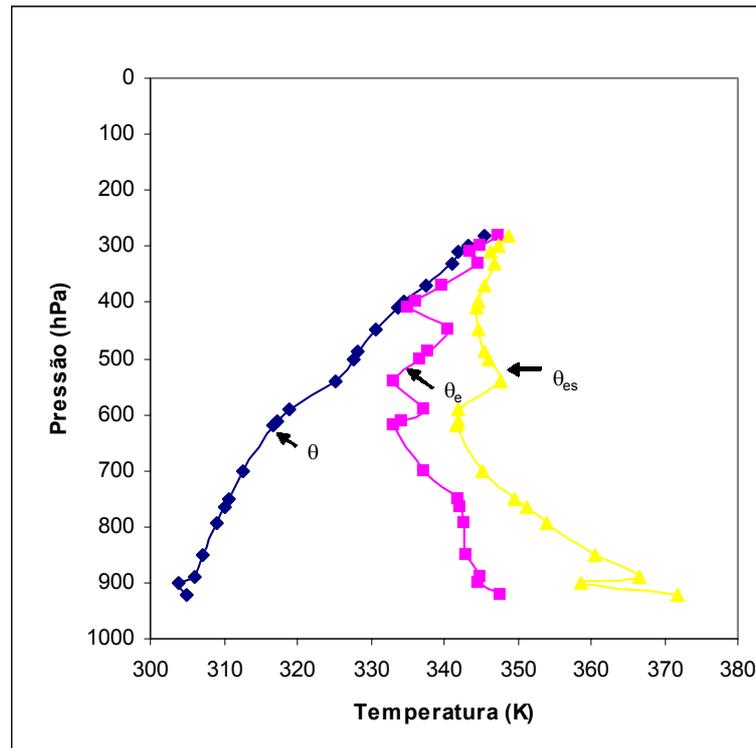


Figura 21. Perfil vertical de temperatura potencial (θ), da temperatura potencial equivalente (θ_e) e da temperatura potencial equivalente saturada (θ_{es}), para o dia 12 de fevereiro de 1990 às 12UTC.

Observa-se na Figura 20 que nos dias anteriores ao evento do dia 12 de fevereiro existiu uma camada de inversão próxima à superfície, ficando mais forte no dia 11 de fevereiro. Durante o período, a atmosfera esteve estaticamente estável, ou seja, desfavorável à formação de precipitação do ponto de vista da parcela. Estas condições de estabilidade e inversão térmica favoreceram ao acúmulo de poluentes e a inibição de precipitação.

No dia 12 de fevereiro nota-se que essa situação começou a mudar, com a atmosfera um pouco mais úmida e a camada de inversão começando a romper, o que contribuiu para um ambiente mais favorável a ocorrência de precipitação no decorrer do período. A partir deste dia, as chuvas tornaram-se mais regulares, quase diárias (Figura 11).

Considerando os critérios de estabilidade atmosférica para o dia 12 de fevereiro (Figura 21), observa-se que a atmosfera esteve estaticamente estável (perfil de θ) entre o nível de 900 a 300 hPa. No entanto, quando consideramos a disponibilidade de umidade, o dia 12 de fevereiro, já pela manhã apresentava-se tanto convectivamente instável (θ_e) como condicionalmente estável (θ_{es}), desde níveis próximos à superfície até aproximadamente

700-600 hPa. Ambas instabilidades favorecem o desenvolvimento de sistemas precipitantes. Desta forma, as condições de estabilidade atmosférica durante os dias anteriores ao evento favoreceram o acúmulo de poluentes em baixos níveis da atmosfera, explicando as altas concentrações de espécies químicas na amostra de chuva coletada no dia 12 de fevereiro (ver Figura 3).

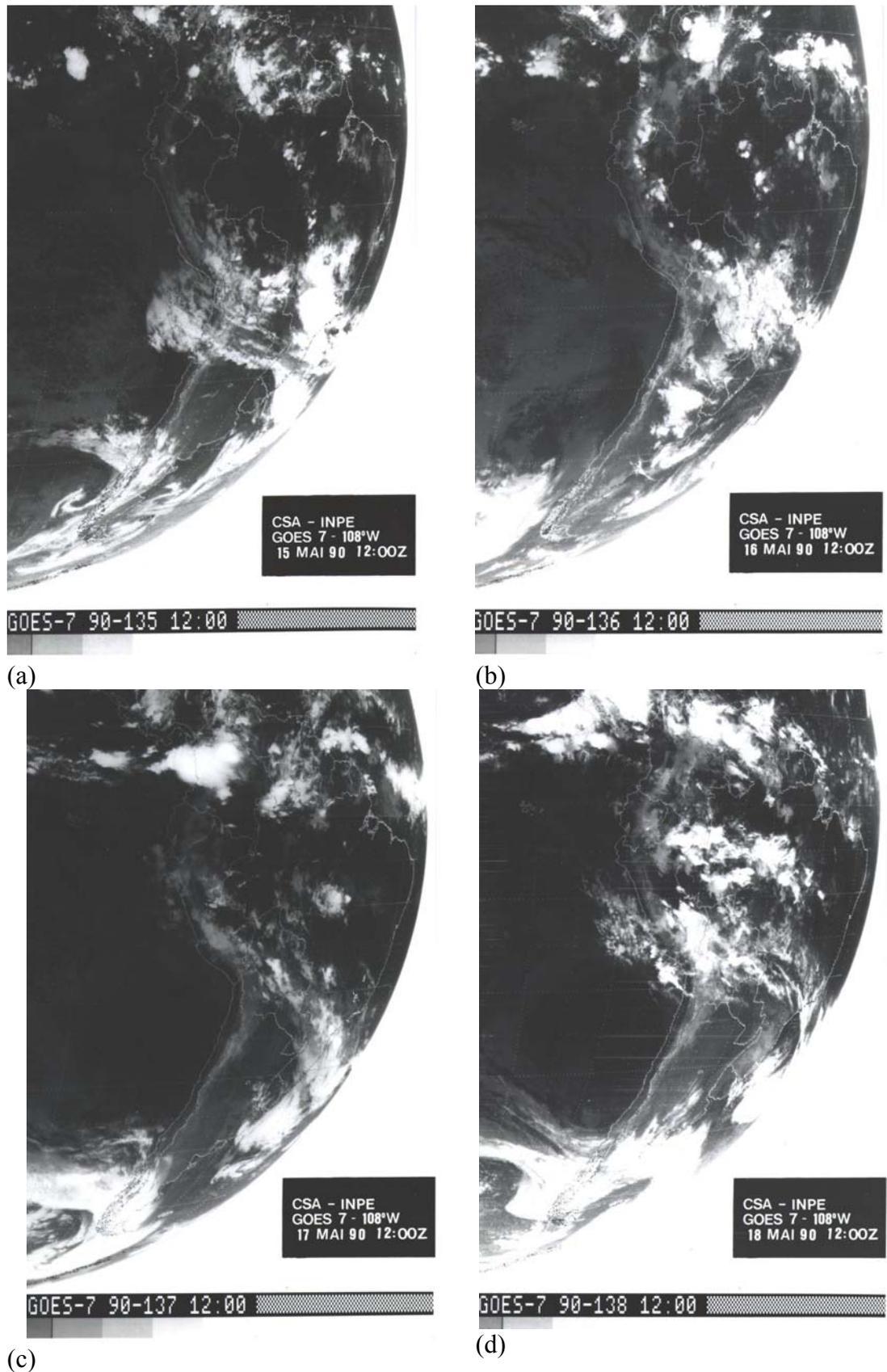
3.4.2 Segundo caso – 17/05/1990

As Figuras 22 a 24 mostram as cartas sinóticas de pressão à superfície e os campos de P_{NMM} e vento em superfície, respectivamente, entre os dias 15 a 18 de maio de 1990. No dia 15 observa-se através das Figuras 22 a 24 um sistema de baixa pressão centrado em 33°S sobre o oceano Atlântico intensificando-se, ocorrendo, portanto, advecção fria (Figura 25 (a-d)) e divergência de umidade (Figura 26 (a-d)) sobre o sul do Brasil e advecção quente e convergência de umidade sobre o Estado São Paulo, tal condição favorece a convecção e o aumento dos movimentos verticais atmosféricos.

Nos dias 15 e 16 observa-se a evolução e deslocamento para nordeste deste sistema de baixa pressão, e sobre o Sul do Brasil passou a atuar um centro de alta pressão devido ao deslocamento do sistema. Assim, diminuiu a convergência sobre São Paulo e o núcleo de advecção fria que estava sobre o Sul teve um deslocamento para o oceano.

Entre os dias 15 e 16 a frente passou sobre o oceano, mudando a direção do vento na cidade de São Paulo (Figura 29). No dia 17 forma-se uma frente fria sobre o litoral de São Paulo, favorecendo a convergência e advecção quente de temperatura. Neste dia a frente fria, localizada entre os Estados de São Paulo e Paraná, causou chuvas intensas da ordem de 40 mm nas 24 horas que precederam sua passagem, sobre Santa Catarina e sul do Mato Grosso do sul (Satyamurty et al., 1990). Esse sistema frontal intensificou e se deslocou para o oceano no dia 18, provocando advecção fria e divergência de umidade em São Paulo.

A situação sinótica durante e nos dias que precederam o evento, com concentração baixa, possibilitou a remoção dos poluentes devido à forte advecção, possibilitando a ocorrência de precipitação (Figura 27 (a-d)). Entre os dias 15 e 16 ocorreu precipitação intensa sobre os Estados do Mato Grosso do Sul e parte da Amazônia. No Estado de São Paulo, ocorreu precipitação a partir do dia 17, mas com pouca intensidade. Essa configuração sinótica favoreceu a diminuição da concentração de poluentes na atmosfera e a diminuição da acidez da chuva.



(c)
Figura 22. Imagens de satélite GOES-E em 12Z. (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.

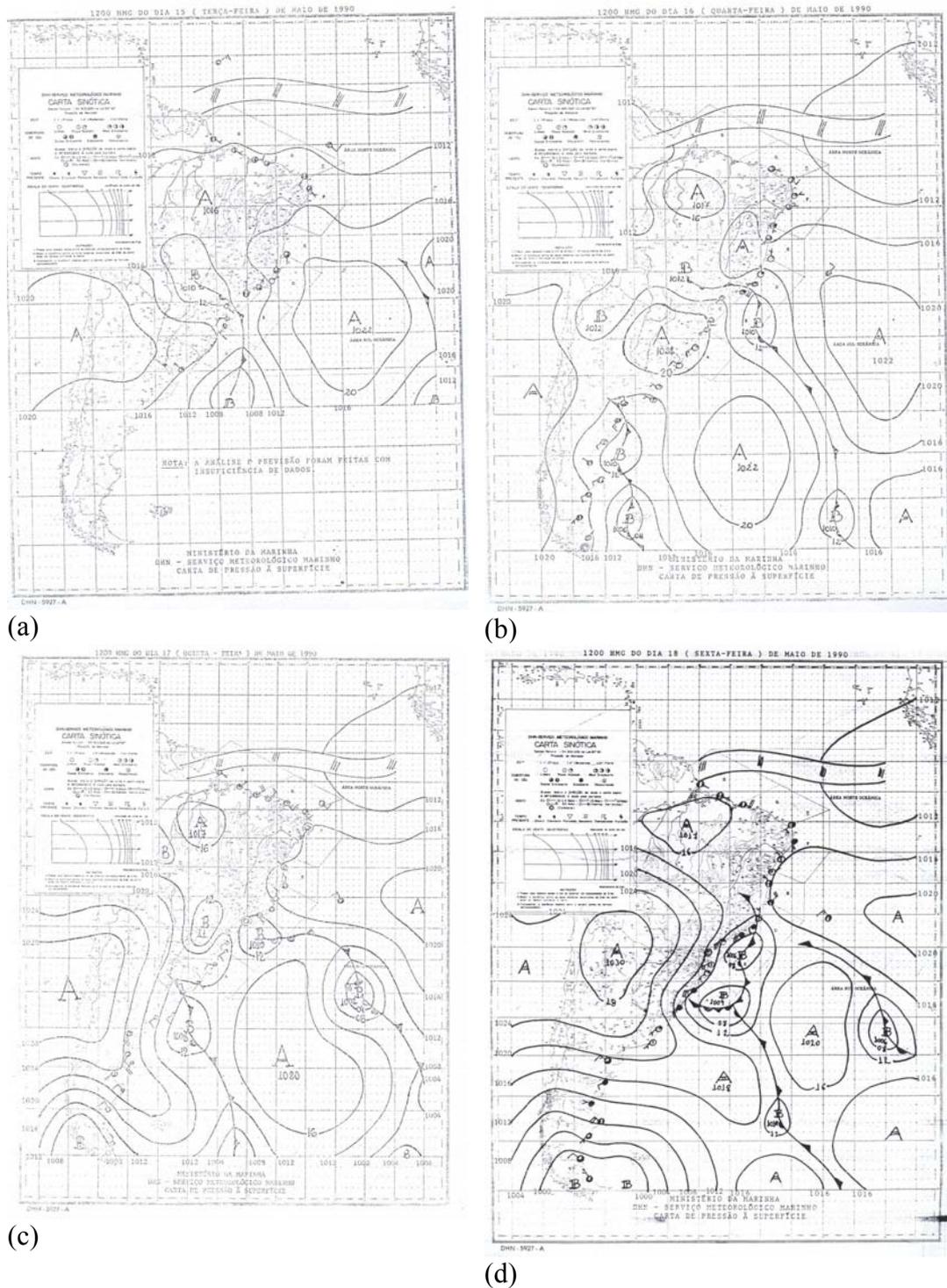
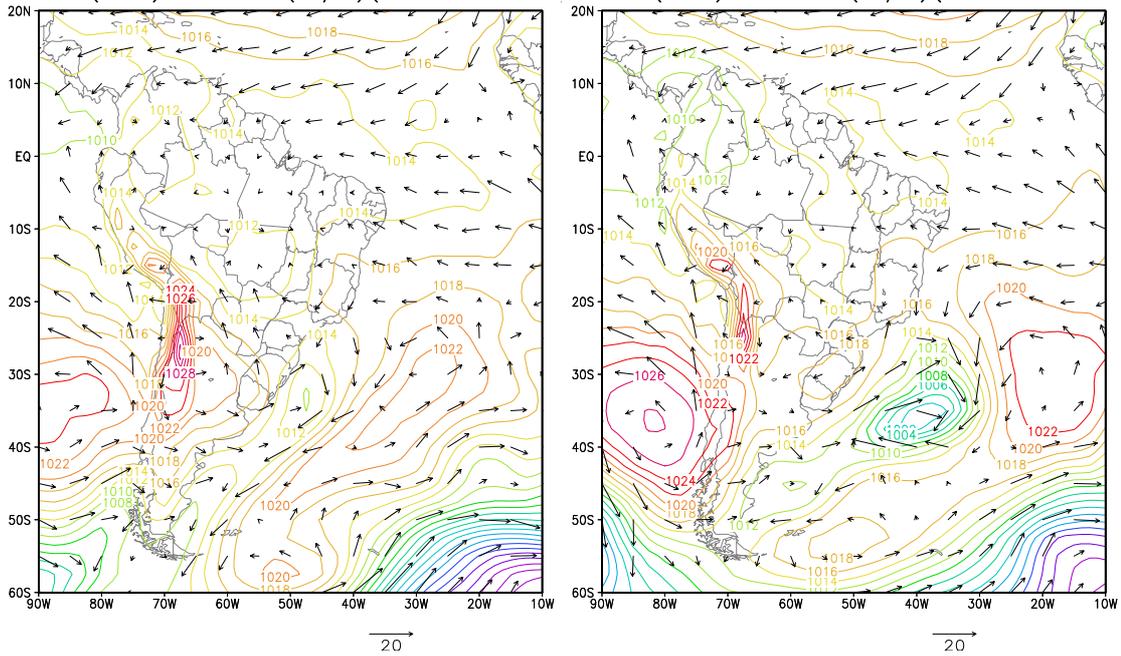
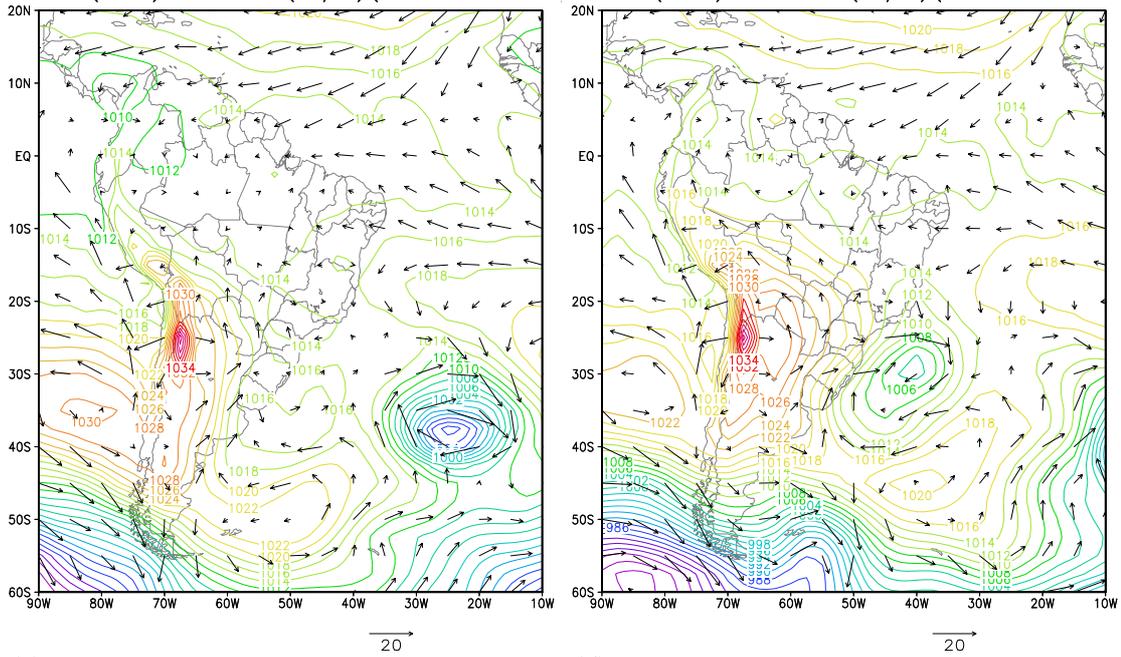


Figura 23. Cartas sinóticas de pressão em superfície em 12Z. (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.

PNMM(hPa) e Vento(m/s)(15MAI90 12Z PNMM(hPa) e Vento(m/s)(16MAI90 12Z)



(a) PNMM(hPa) e Vento(m/s)(17MAI90 12Z (b) PNMM(hPa) e Vento(m/s)(18MAI90 12Z)



(c) (d)
Figura 24. Campos de pressão ao nível médio do mar e vento em superfície. (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.

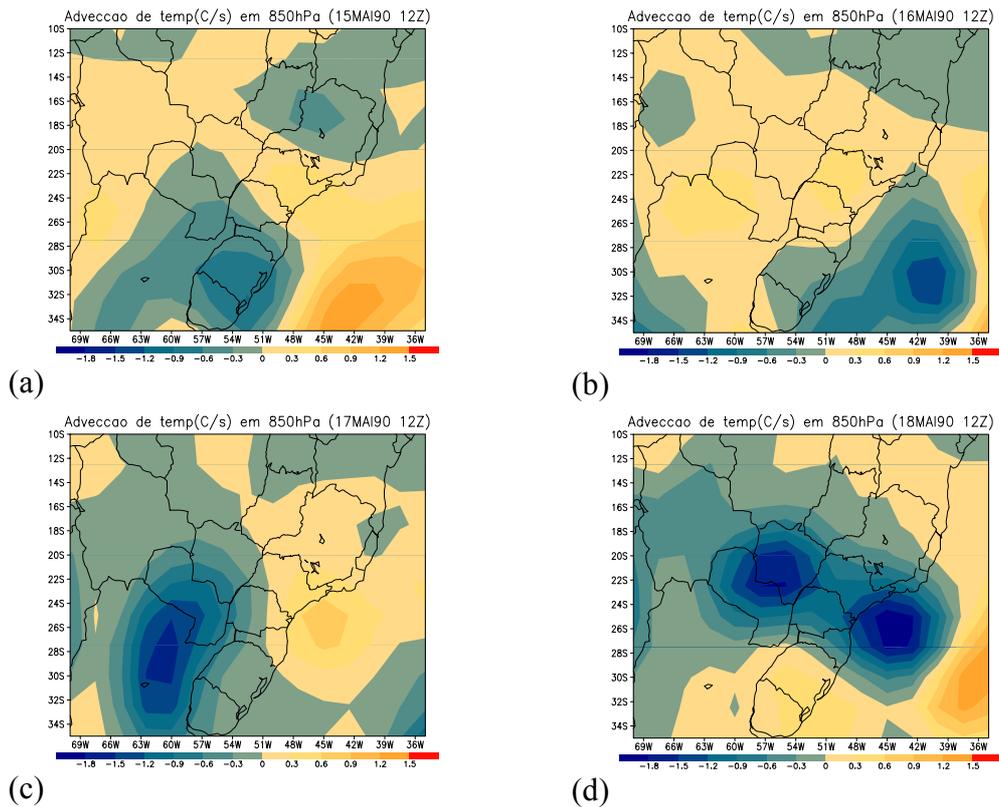


Figura 25. Adveccão de temperatura em 850 hPa ($\cdot 10^4$). (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.

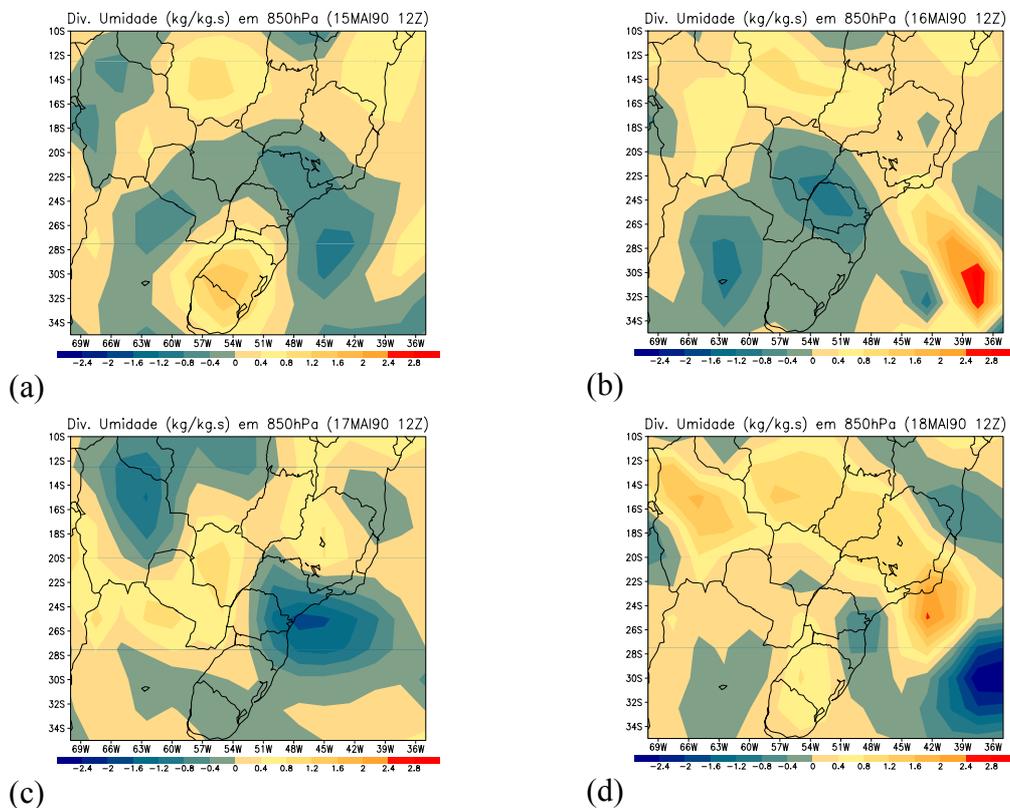


Figura 26. Divergência de umidade em 850hPa ($\cdot 10^7$). (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.

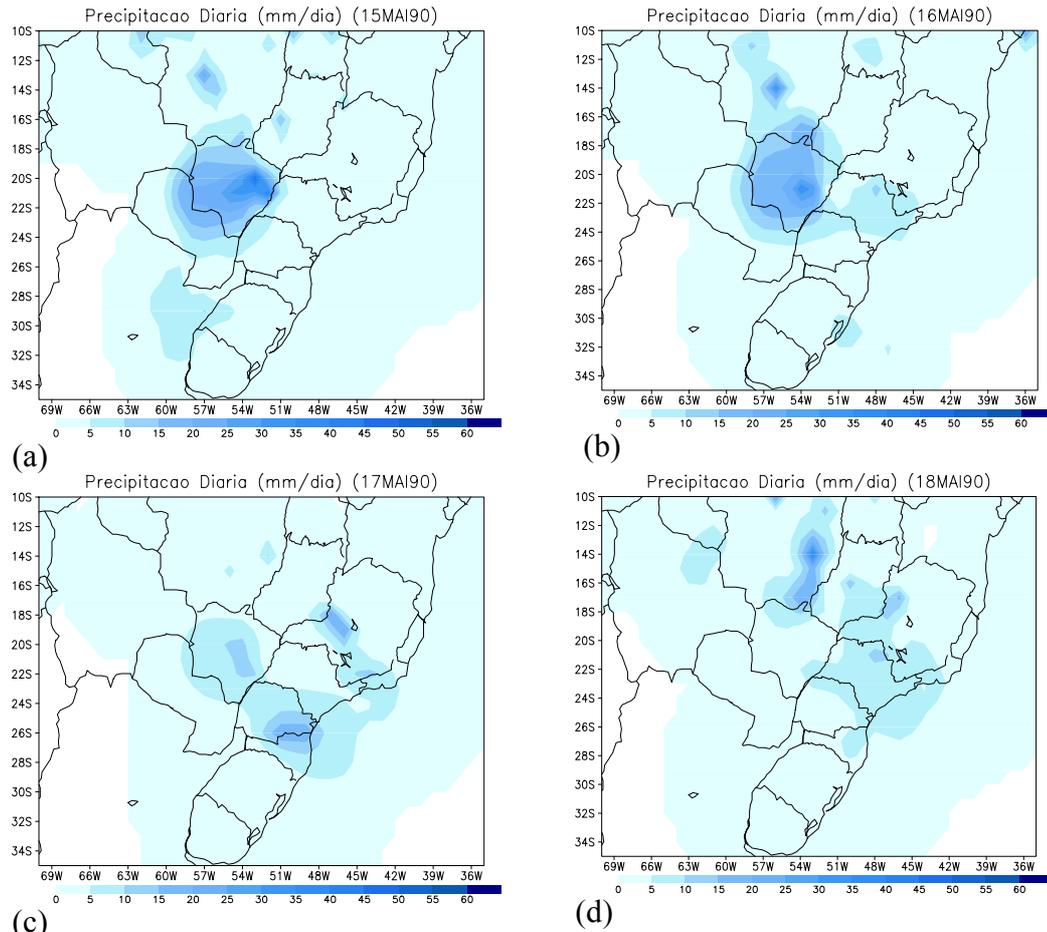


Figura 27. Campos de precipitação diária em superfície. (a) 15 de maio, (b) 16 de maio, (c) 17 de maio e (d) 18 de maio.

As médias e amplitudes diárias da temperatura do ar entre os dias 15 e 18 de maio de 1990 são mostradas na Figura 28. Observa-se uma pequena variação na temperatura média entre os dias 15 e 17, porém a amplitude variou bruscamente, ocorrendo uma queda de aproximadamente $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre os dias 15 e 16. A pequena amplitude térmica do dia 16 estaria associada à presença de nebulosidade (Figuras 22(a-b)) devido à penetração de frente fria. Esta frente fria mudou a direção do vento de norte para sul entre os dias 15 e 16 (Figura 29). Entre os dias 17 e 18 a temperatura média diária diminuiu bruscamente devido à entrada da massa de ar fria e seca na retaguarda da frente fria. Neste período a amplitude térmica variou entre 8 e $9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

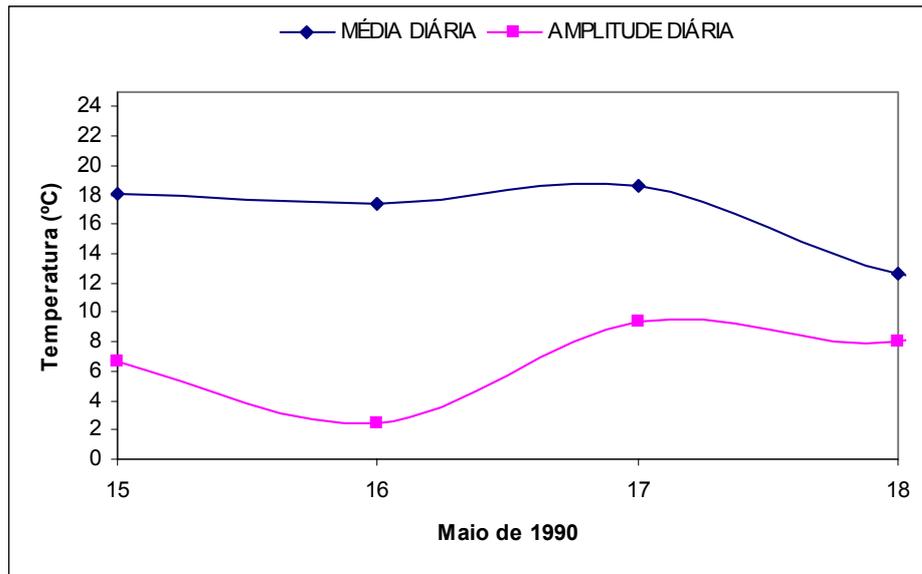


Figura 28. Médias e amplitudes diárias da Temperatura do ar.

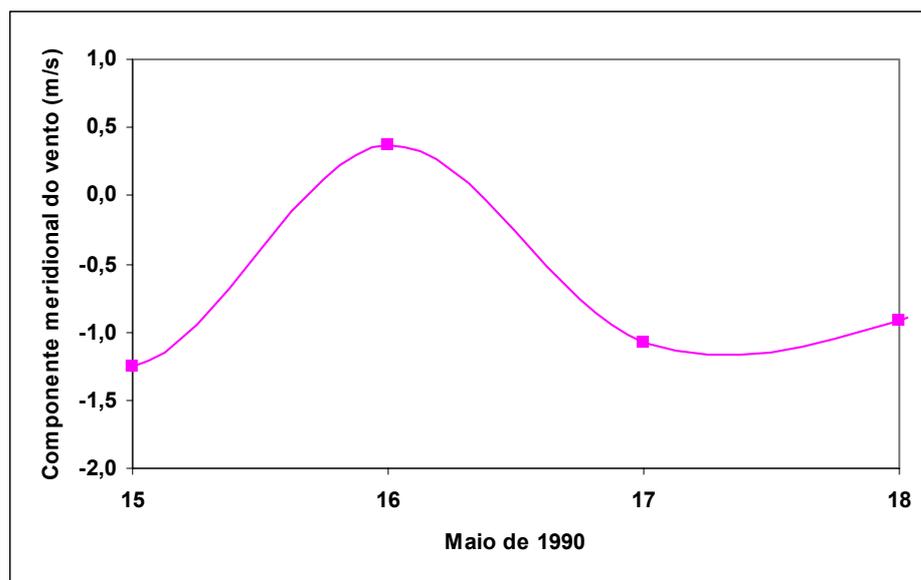


Figura 29. Médias diárias da componente meridional (v) do vento.

Os diagramas Skew – T de T e T_d , entre os dias 13 e 18 de maio de 1990 às 12 UTC, são representados na Figura 30, e a Figura 31 apresenta os perfis verticais de θ , θ_e e θ_{es} para o dia 17 de maio de 1990 às 12 UTC, obtidos através de radiossondagem do Aeroporto de Congonhas.

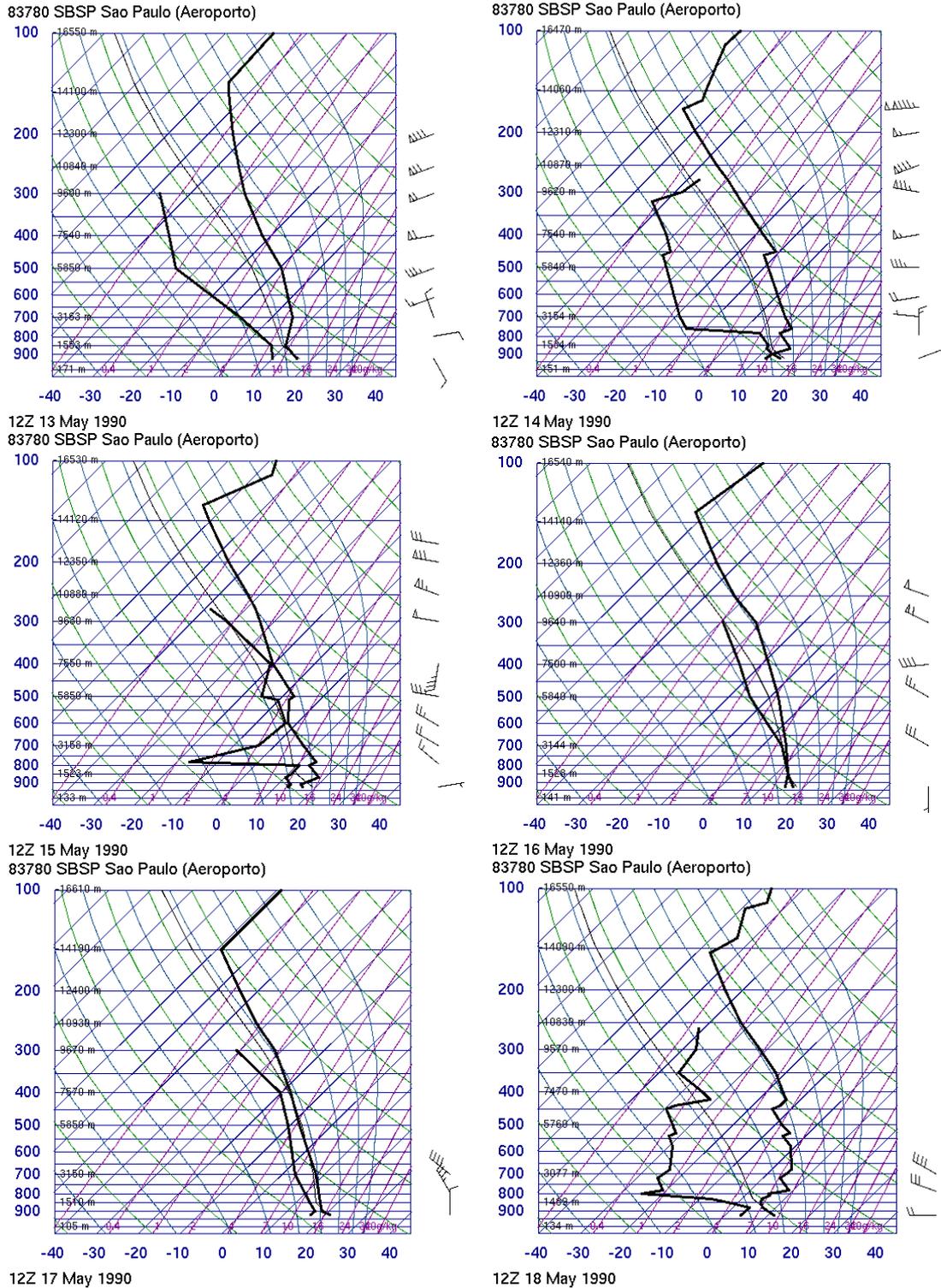


Figura 30. Diagramas Skew - T mostrando as sondagens da temperatura do ar (T) e da Temperatura do ponto de orvalho (T_d) em relação à pressão às 12 UTC, entre 13 a 18 de maio de 1990.

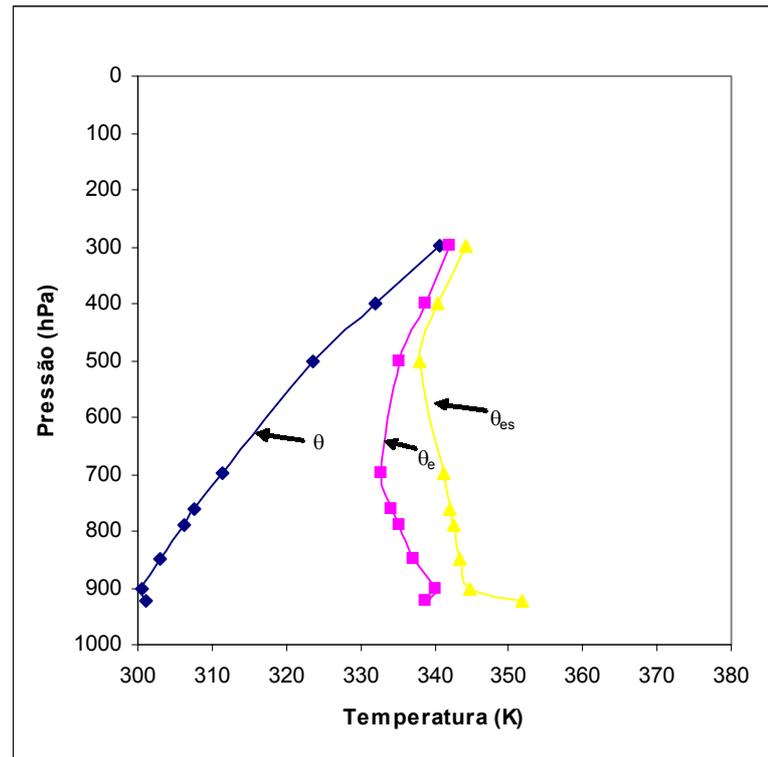


Figura 31. Perfil vertical de temperatura potencial (θ), da temperatura potencial equivalente (θ_e) e da temperatura potencial equivalente saturada (θ_{es}), para o dia 12 de fevereiro de 1990 às 12UTC.

De acordo com a Figura 30, observa-se que nos dias anteriores ao evento do dia 14 de maio a atmosfera estava úmida próximo da superfície e mais seca em níveis mais elevados. Nota-se também que, apesar do alto teor de umidade em baixos níveis, a atmosfera encontrava-se estaticamente estável, o que não favoreceu a formação de nuvens do ponto de vista da teoria da parcela. A partir do dia 15 até o dia 17 de maio a atmosfera manteve-se estaticamente estável, mas com considerável aumento de umidade em toda coluna vertical. Esta mudança nos perfis termodinâmicos estaria associada à penetração de uma frente fria entre os dias 15 e 16 de maio (Figuras 22-24). Desta maneira, a precipitação ocorrida nestes três dias estaria associada à nebulosidade proveniente da passagem do sistema frontal.

No dia 17 de maio a atmosfera estava úmida, convectivamente instável entre o nível de 900 a 700 hPa e convectivamente estável acima (Figura 31). A camada entre 923 a 850 hPa apresentou-se condicionalmente instável (perfil de θ_{es}) e a camada entre 850 a 500 hPa condicionalmente estável. Tal situação favorece a formação de nuvens, principalmente associada à atuação da frente fria sobre o litoral de São Paulo (Figuras 22-24).

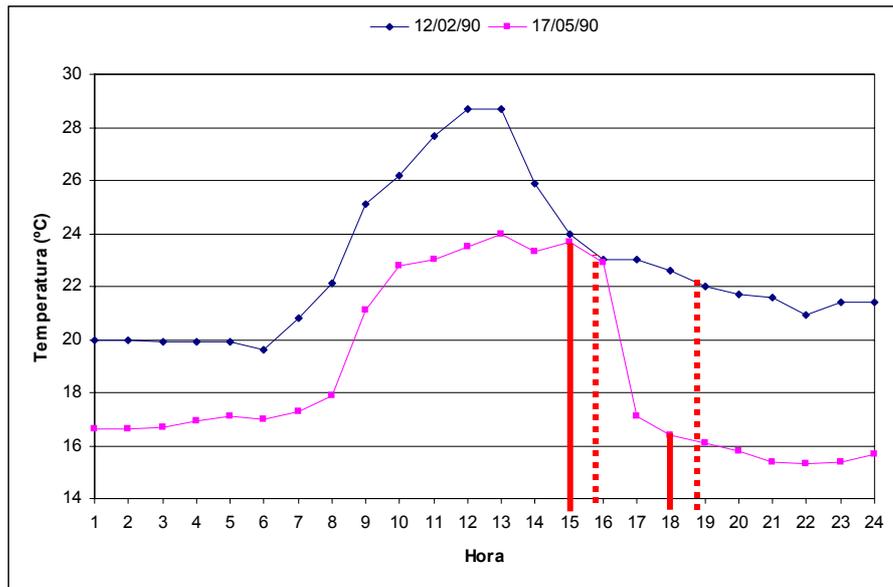
Comparando-se os dois casos, nota-se duas situações sinóticas diferentes. No primeiro caso, nos dias anteriores ao evento do dia 12 de fevereiro, existiu um regime estacionário com pressão de 1012 hPa sobre Estado de São Paulo, uma frente fria atuando na região Sul do Brasil e a ocorrência de inversão térmica pré-evento, tal situação possibilitou a retenção de poluentes próximo à superfície. No segundo caso, nos dias anteriores a 17 de maio, ocorreu a passagem de uma frente fria que mudou a direção do vento de norte para sul, ocasionando precipitação, o que possibilitou a remoção de poluentes sobre a região antes da ocorrência deste evento.

3.5 Situação meteorológica em superfície nos dois casos

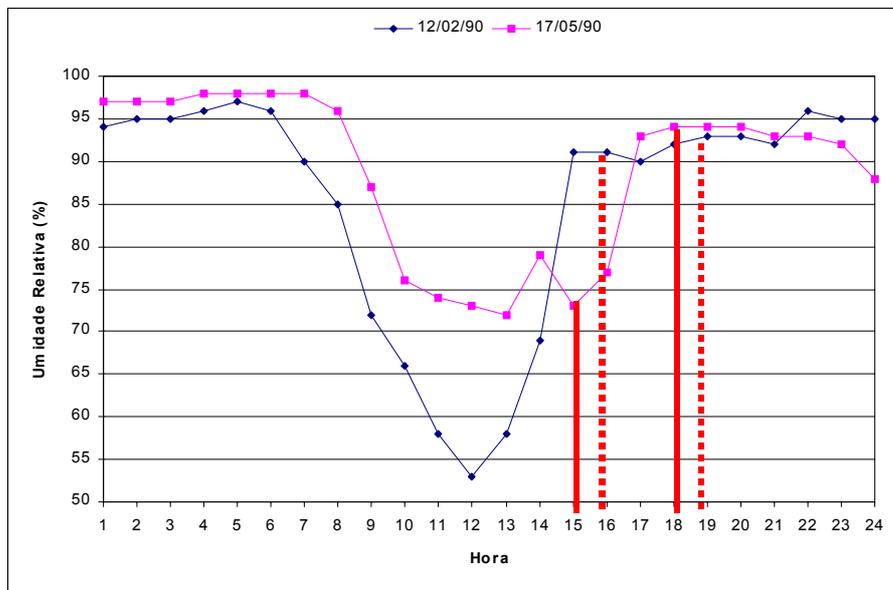
Foram utilizadas médias horárias de Temperatura do ar (T em °C), Umidade Relativa (UR em %), velocidade do vento ($m.s^{-1}$) e direção do vento (Graus) obtidos na estação climatológica do IAG-AF, durante o período de janeiro a maio de 1990, com a finalidade de comparar os dias com concentrações extremas (valores máximos no dia 12 de fevereiro e valores mínimos no dia 17 de maio).

As comparações entre os ciclos diurnos de T e UR durante os dias 12 de fevereiro e 17 de maio são apresentadas na Figura 32 (a-b). Observaram-se ciclos diurnos de T (Figura 32a) semelhantes até o início da precipitação, embora os maiores valores de temperatura terem sido registrados no dia 12 de fevereiro. Após o início da precipitação, a temperatura caiu bruscamente no dia 17 de maio, cerca de 7,3 °C, mantendo-se baixa no restante do dia, devido à influência da frente fria (Figuras 22 a 24). No dia 12 de fevereiro, a temperatura variou pouco, cerca de 1°C, e manteve-se constante no restante do período.

Na figura 32b são mostrados os ciclos diurnos de UR para os dias 12 de fevereiro e 17 de maio de 1990. Nota-se praticamente a mesma evolução horária de UR, exceto que foi maior no dia 17 de maio (cerca de 75%), que em 12 de fevereiro (cerca de 50%). Durante a precipitação a umidade ficou praticamente constante e acima de 90% no dia 12 de fevereiro. O mesmo pode ser observado no dia 17 de maio.



(a)

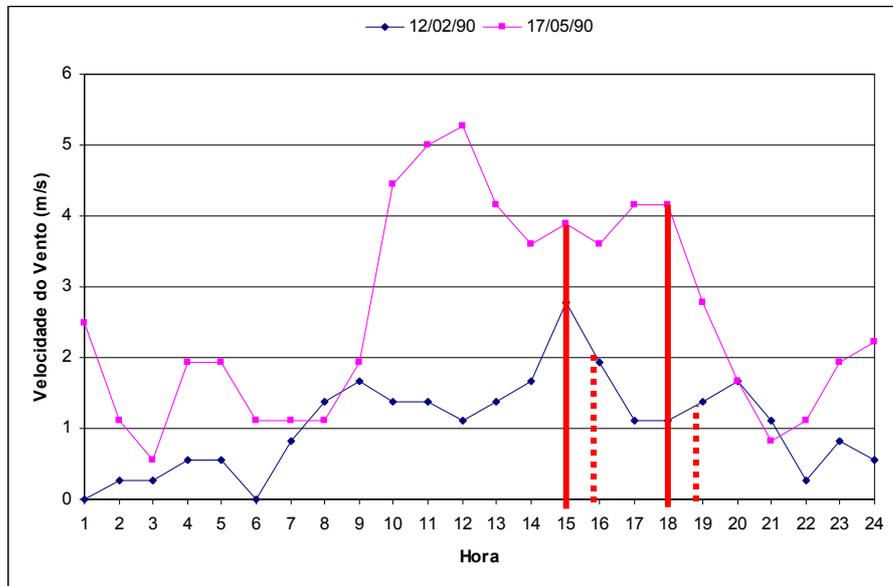


(b)

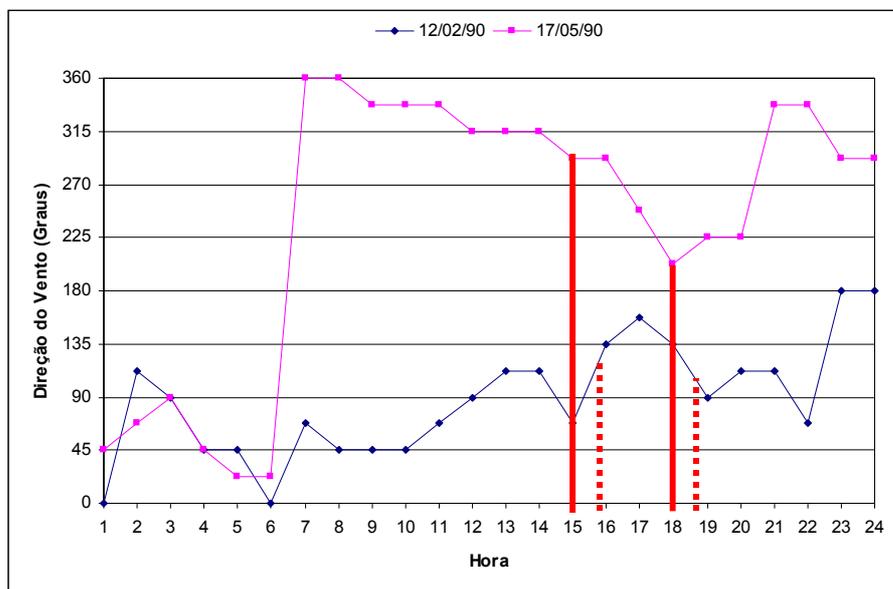
Figura 32. Comparação entre os ciclos diurnos de Temperatura do Ar e Umidade Relativa para os dias 12 de fevereiro e 17 de maio de 1990. As linhas vermelhas tracejadas representam o intervalo de tempo da precipitação do dia 12 de fevereiro e as contínuas representam o evento do dia 17 de maio de 1990.

Na Figura 33 (a-b) foram comparados os ciclos diurnos da velocidade do vento e direção do vento dos dias 12 de fevereiro e 17 de maio. Observa-se na Figura 33a que as velocidades do vento foram mais intensas no dia 17 de maio (valor máximo de $5,3 \text{ m.s}^{-1}$ às 12 horas e o valor mínimo de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ às 03 horas). Em relação ao ciclo diurno da direção do vento (Figura 33b) nota-se que no dia 17 de maio, no período da manhã o vento estava na direção nordeste/noroeste até aproximadamente 15 horas e a seguir gira para sudeste (18

horas), voltando para a direção noroeste durante a noite. No dia 12 de fevereiro, no período da madrugada e manhã, o vento foi predominantemente de nordeste e girou para sudeste no período da tarde.



(a)



(b)

Figura 33. Comparação entre os ciclos diurnos de Velocidade do Vento (a) e Direção do Vento (b) dos dias 12 de fevereiro e 17 de maio de 1990. As linhas vermelhas tracejadas representam o intervalo de tempo da precipitação do dia 12 de fevereiro e as linhas sólidas representam o evento do dia 17 de maio de 1990.

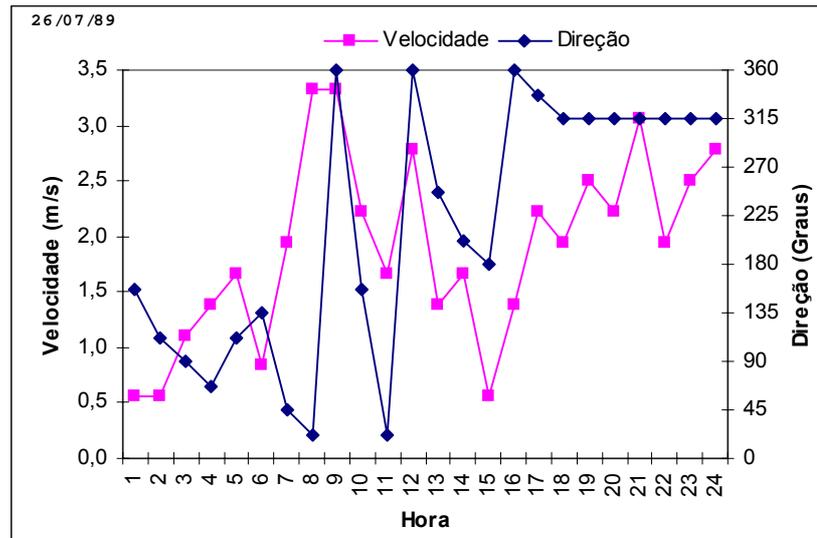
Fazendo uma comparação entre os dias extremos, temos que: no primeiro caso (12 de fevereiro) nota-se que durante a ocorrência da precipitação, houve pouca variação de T

e UR, a velocidade do vento foi fraca e o vento girou de nordeste para sudeste durante o dia, o que justifica a situação estacionária predominante sobre a região, com pressão de 1012 hPa sobre São Paulo, e uma frente fria estacionária na região Sul do Brasil (Figuras 26 a 28).

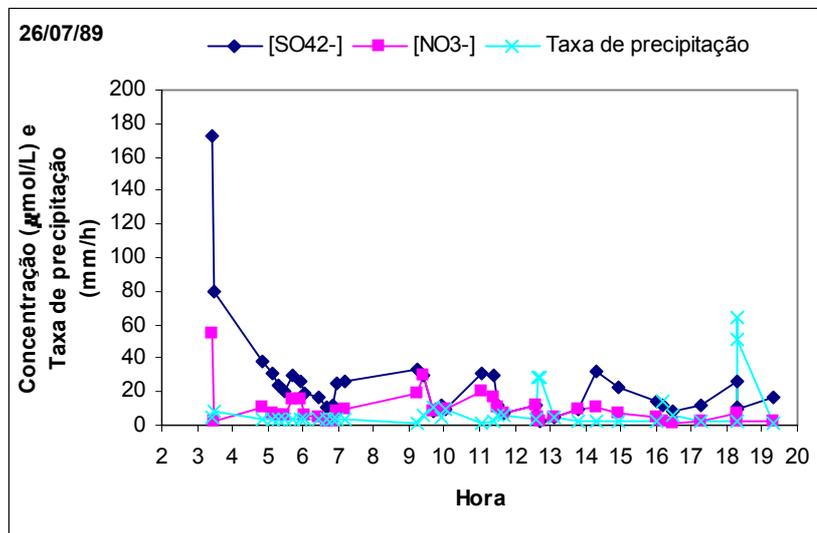
No segundo caso (17 de maio), observa-se que durante a ocorrência da precipitação existiu uma queda brusca de T, cerca de 7,3 °C entre o início e fim da precipitação. A velocidade do vento ficou em torno de 3 e 4 m.s⁻¹ e diminuiu de intensidade após a precipitação, a direção mudou de noroeste para sudoeste no decorrer do evento. Logo, o dia 17 de maio foi marcado pela influência de um sistema de baixa pressão.

3.6 Variações intra-evento

Para dar ênfase aos eventos cujas razões sulfato/nitrato foram discrepantes, serão analisadas as direções do vento (em Graus) obtidas na estação climatológica do IAG-AF, taxa de precipitação e as variações intra-eventos (amostragem seqüencial) nas concentrações de SO₄⁻² e NO₃⁻, para o dia 19 de dezembro de 1989, com o maior valor da razão (18,9 ± 17,1). Os eventos dos dias 26 de julho de 1989 (razão de 3,3 ± 4,4), 10 de janeiro (razão de 5,4 ± 4,2), 08 de março (razão de 3,0 ± 3,3) e 22 de março de 1990 (razão de 5,2 ± 8,1) também foram analisados. A direção do vento, taxa de precipitação e as variações nas concentrações de SO₄⁻² e NO₃⁻ durante o evento do dia 26 de julho de 1989, são mostradas na Figura 34 (a-b). Nota-se que a direção predominante do vento (Figura 34a) durante o evento teve variações bruscas, ficando entre os quadrantes nordeste, sudeste e sudoeste e logo após a precipitação ficou constante, isto é, de noroeste. A velocidade do vento variou entre 2 e 3 m.s⁻¹ no decorrer da precipitação e continuou acima de 2 m.s⁻¹ após a precipitação. Observa-se também que tanto a taxa de precipitação quanto às concentrações de SO₄⁻² e NO₃⁻ (Figura 34b) variaram durante o evento. Desta forma, este comportamento mostra que durante este evento, este poluente possivelmente é oriundo de diferentes lugares e transportado pelas massas de ar, mas isso só pode ser afirmado através de uma análise mais detalhada. Além disso, existiu um pico de SO₄²⁻ no início do evento, o que caracteriza a predominância do processo abaixo da nuvem. Segundo Naik et al. (1994) o processo de remoção abaixo da nuvem parece ser um mecanismo importante para a remoção dos principais íons da atmosfera, entretanto, o processo de remoção dentro da nuvem parece ser importante para a remoção dos íons NO₃⁻.



(a)

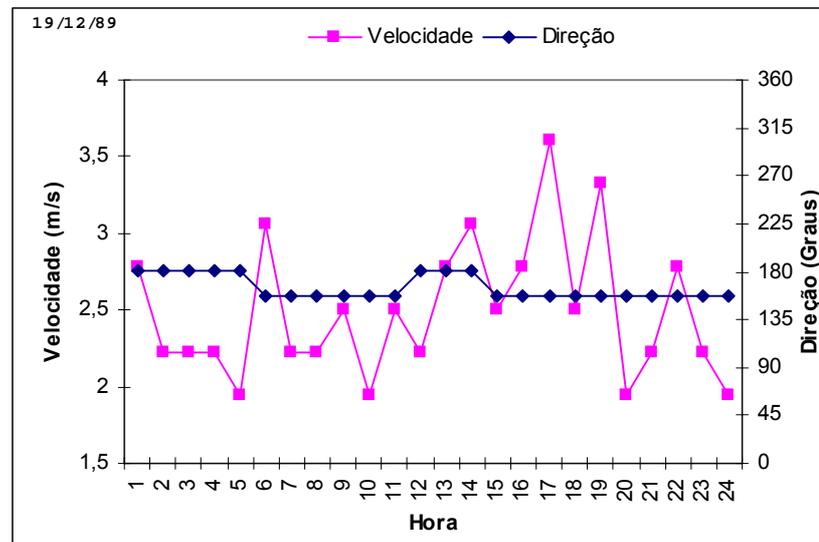


(b)

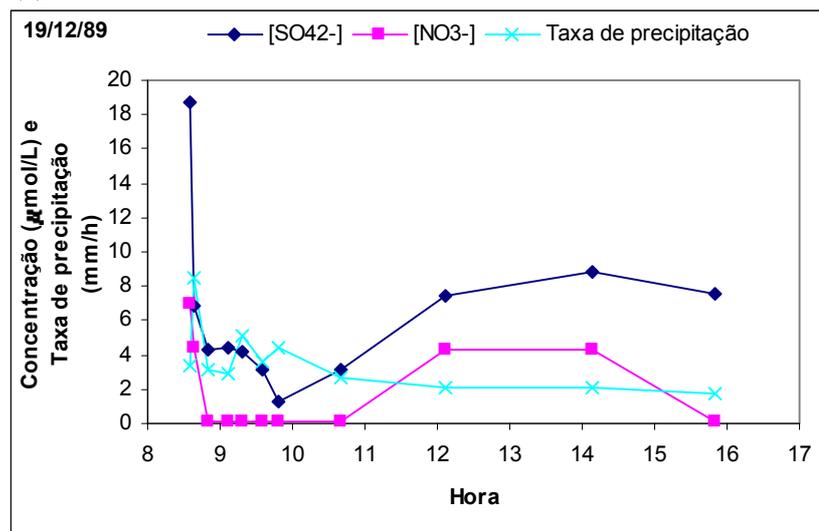
Figura 34. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do SO_4^{2-} NO_3^- (b) para o dia 26 de julho de 1989.

O dia 19 de dezembro de 1989 está representado na Figura 35 (a-b). Observa-se que a direção do vento (Figura 35a) foi praticamente constante, ficando, portanto, predominantemente de sul/sudeste e de sul. Observa-se também que, a taxa de precipitação teve um comportamento diferente das concentrações de SO_4^{2-} e NO_3^- (Figura 35b), onde as concentrações das espécies químicas tenderam a diminuir, enquanto a direção do vento era de sul/sudeste e aumentar significativamente quando passou a ser sul e a velocidade em torno de $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ no decorrer da precipitação. Isto significa dizer que no início do evento, baseado na curva de SO_4^{2-} , houve a predominância do processo abaixo da nuvem, uma vez que existiu um pico no início do evento e quando mudou a direção do vento a concentração

aumentou, provavelmente devido ao transporte de poluentes de diferentes lugares, mas isso só pode ser afirmado através de uma análise mais detalhada.



(a)

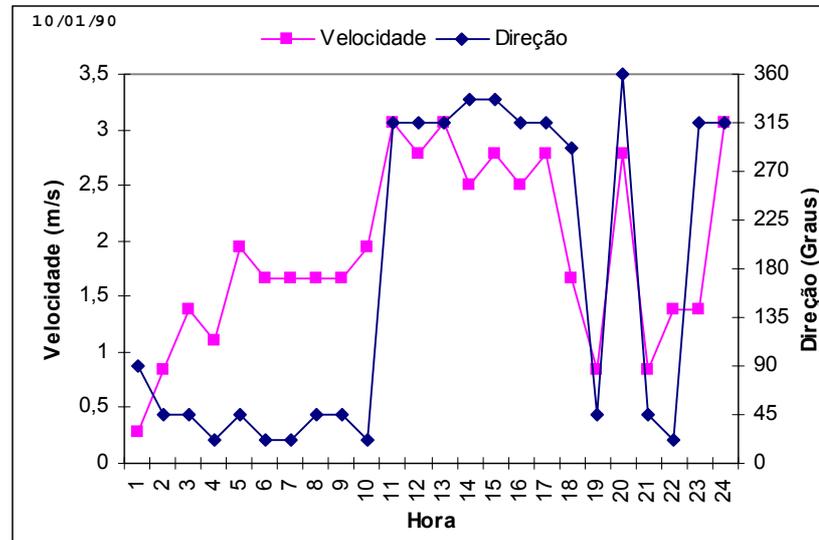


(b)

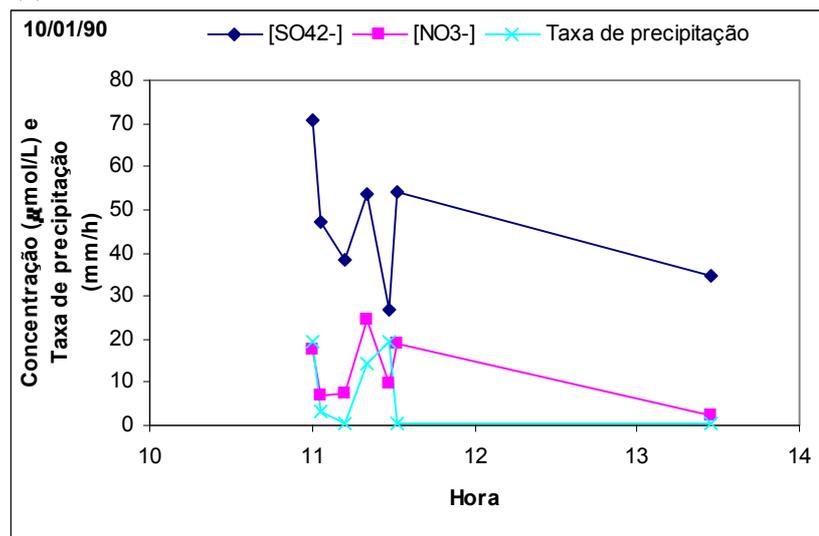
Figura 35. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do SO_4^{2-} NO_3^- (b) para o dia 19 de dezembro de 1989.

A Figura 36 (a-b) representa a variação da direção do vento, taxa de precipitação e concentrações de SO_4^{2-} e NO_3^- para o evento do dia 10 de janeiro de 1990. Nota-se que a direção do vento (Figura 36a) antes do evento era de nordeste e logo após o início do evento passou a ser de noroeste, continuou de noroeste por algum tempo depois da precipitação. A velocidade do vento durante o evento esteve acima de 2 m.s^{-1} . A intensidade da precipitação aumentou no início do evento e depois ficou constante no final,

em relação à concentração de SO_4^{2-} e NO_3^- , nota-se uma tendência a diminuição ao longo do evento (Figura 36b).



(a)

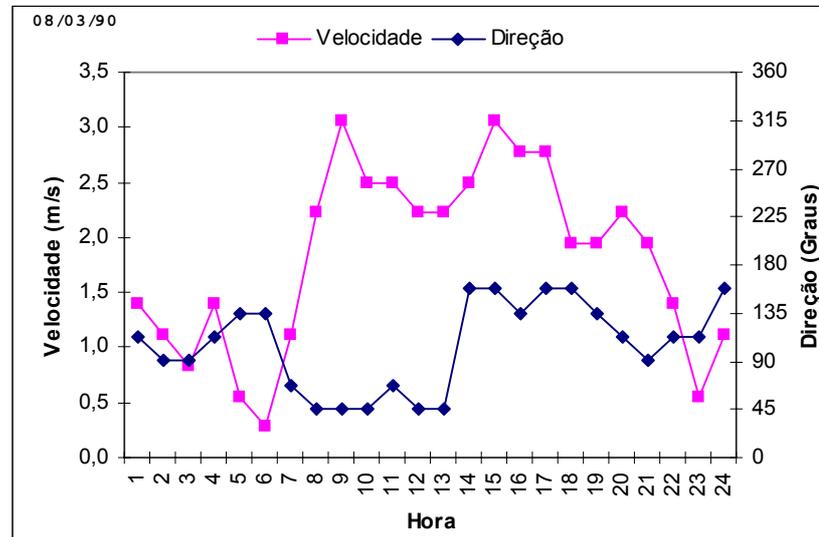


(b)

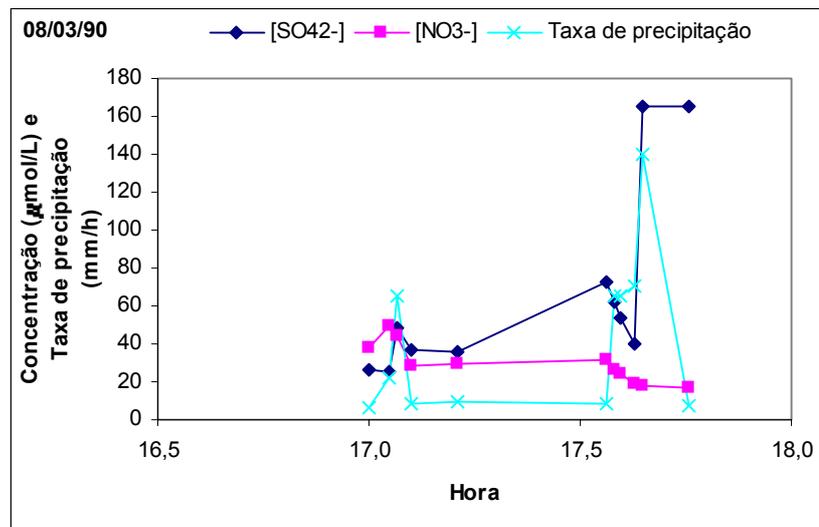
Figura 36. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do SO_4^{2-} NO_3^- (b) para o dia 10 de janeiro de 1990.

Na Figura 37 (a-b) estão representadas a direção do vento, taxa de precipitação e as variações nas concentrações das espécies químicas SO_4^{2-} e NO_3^- para o dia 08 de março de 1990. Como este evento teve um período curto (~ 1 hora), pouco pode ser dito em relação à variação da direção e velocidade do vento, durante o evento. Observa-se que a direção do vento (Figura 37a) antes do evento estava variando de nordeste para sudeste e que durante o evento passou a ser de sudeste, a qual continuou assim no restante do período, a velocidade do vento esteve mais intensa antes do evento. Em relação às concentrações das

espécies químicas no decorrer do evento (Figura 37b), nota-se um aumento significativo na concentração do SO_4^{2-} , esse aumento pode estar relacionado a uma fonte local desta espécie ou transporte de outras regiões.



(a)

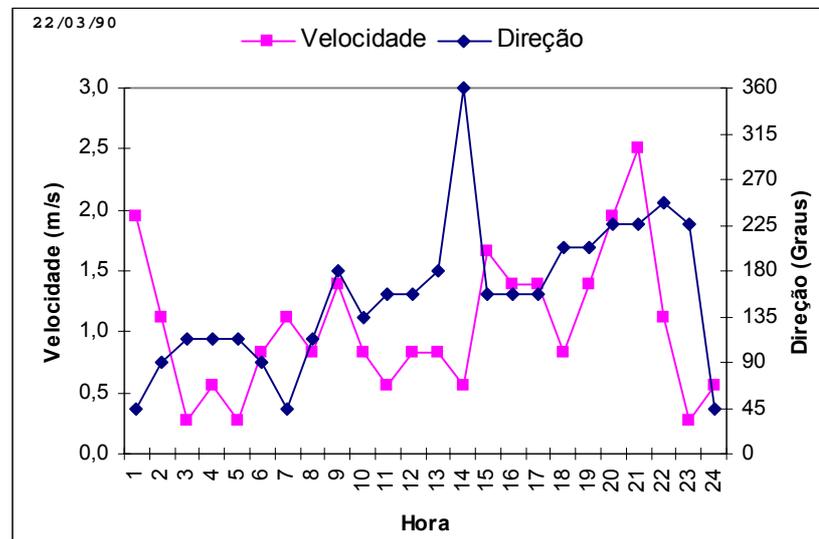


(b)

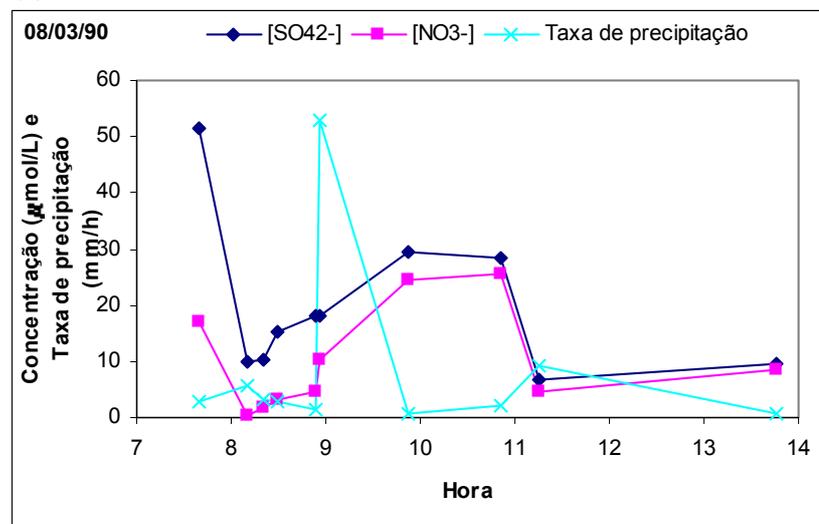
Figura 37. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do SO_4^{2-} NO_3^- (b) para o dia 08 de março de 1990.

A Figura 38 (a-b) representa a variação na direção do vento, taxa de precipitação e concentração de SO_4^{2-} durante o evento dia 22 de março de 1990. Nota-se que a direção do vento (Figura 38a) mudou bastante durante o período, estando entre nordeste e sul no início, depois ficou praticamente constante, isto é, de sudeste, exceto pela mudança para norte às 14 horas, e depois do evento passou a ser de sudeste novamente. Em relação à taxa

de precipitação e as concentrações de SO_4^{2-} NO_3^- (Figura 38b), o que pode ser dito é que, certamente existiu o processo abaixo da nuvem, uma vez que as concentrações foram maiores no início da precipitação e oscilaram constantemente durante o processo.



(a)



(b)

Figura 38. Direção e velocidade do vento (a) direção do vento versus variações nas concentrações do SO_4^{2-} NO_3^- (b) para o dia 22 de março de 1990.

Durantes estes cinco eventos analisados, nota-se que em todos eles existiu o processo abaixo da nuvem, devido ao fato de que no início do evento a concentração de SO_4^{2-} ter um pico no início do evento seguido de oscilações, tem-se também que no evento do dia 26 de julho de 1989, os poluentes foram possivelmente transportados pelo vento de diferentes lugares durante a precipitação, uma vez que no decorrer dos eventos as

concentrações para espécies químicas foram aumentando. Para melhor avaliar os processos que ocorreram durante estes eventos, teria que ser feito uma análise mais detalhada sobre os possíveis processos de remoção de poluentes, que estavam atuando dentro e abaixo da nuvem durante a precipitação.

Em relação ao demais eventos estudados (Figuras 1-20 em Anexo, as quais apresentam as concentrações de SO_4^{2-} e NO_3^- em relação à precipitação acumulada). Observa-se que o processo de remoção abaixo da nuvem foi dominante, uma vez que as concentrações dos poluentes apresentaram um valor máximo no início do evento e logo após, uma diminuição na concentração, seguido de oscilações constantes em alguns eventos. Além disso, em alguns eventos pode ter ocorrido o transporte de poluentes de diferentes lugares pelo vento e por massas de ar.

Capítulo 4 – CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se a composição química de águas de chuva em função das condições meteorológicas para 20 eventos de precipitação, do período de julho de 1989 a maio de 1990.

A análise mostrou variabilidade significativa tanto das espécies químicas (H^+ , SO_4^{2-} , NO_3^- e Cl^-) quanto das quantidades de precipitação. Em relação ao pH, observou-se 57% dos casos apresentou um $pH < 4,5$ caracterizando, portanto, o fenômeno chuva ácida.

A correlação entre as espécies químicas mostrou que o SO_4^{2-} e NO_3^- tiveram uma melhor correlação (0,77), sendo também significativa a correlação (0,56 e 0,66) com o H^+ , logo foi considerada a presença dos ácidos sulfúrico e nítrico nessas amostras de chuva.

Os eventos que mais se destacaram foram: dia 12 de fevereiro de 1990, que apresentou valores mais altos de todas as espécies químicas e pH de 3,88, sendo caracterizado como ácido e os dos dias 19 de dezembro de 1989, 18-19 de abril de 1990 e 17 de maio de 1990, que apresentaram baixos valores na concentração e valores de pH acima de 4,5.

As análises sinóticas permitiram distinguir cinco padrões de circulação atmosférica. No entanto, a composição química apresentou grande variabilidade entre os eventos de um mesmo padrão de circulação.

O estudo mais sistemático das condições meteorológicas de dois eventos de características químicas extremas, dia 12 de fevereiro de 1990 (altas concentrações) e dia 17 de maio de 1990 (baixas concentrações das espécies iônicas analisadas), indicaram duas situações sinóticas diferentes. No primeiro caso, nos dias anteriores ao evento de 12 de fevereiro, existiu um regime estacionário com pressão de 1012 hPa sobre Estado de São Paulo, frente fria atuando na região Sul do Brasil e ocorrência de inversão térmica, possibilitando assim a retenção de poluentes próxima à superfície. No segundo caso, nos dias anteriores ao dia 17 de maio, ocorreu passagem de frente fria que mudou a direção do vento, ocasionou precipitação e promoveu a remoção de poluentes sobre a região antes da ocorrência deste evento.

Desta forma, pode-se avaliar que as variações das concentrações das espécies iônicas em águas de diferentes eventos de chuva estiveram associadas, principalmente, à quantidade de precipitação, assim como ao tempo transcorrido entre os eventos.

A razão entre SO_4^{2-} e NO_3^- mostrou-se mais significativa em cinco eventos, destacando-se o do dia 19 de dezembro de 1989, onde a razão foi de $18,9 \pm 17,1$. Desta forma, as avaliações intra-evento nestes casos estudados, mostraram que possivelmente o processo de remoção abaixo da nuvem foi dominante. Em alguns eventos, notou-se que os poluentes foram possivelmente transportados pelo vento de diferentes lugares durante a precipitação, devido à oscilação constante nas concentrações das espécies químicas.

Considera-se que apesar das limitações encontradas para a execução do trabalho, os resultados obtidos foram muito interessantes e importantes a nível ambiental e acadêmico, servindo de base para futuros trabalhos e contribuindo para o estudo da poluição atmosférica de São Paulo.

4.1 Sugestões para futuros trabalhos

Este trabalho é pioneiro no Brasil e muito importante, pois procurou mostrar a influência das condições meteorológicas na composição química da água de chuva, com a finalidade de determinar quais padrões sinóticos eram apresentados em eventos de chuva ácida e não ácida. A análise a partir de um conjunto de dados mais completo, pode ampliar o horizonte de alcance deste trabalho. Desta forma, para que possa ter um resultado mais aprofundado teriam que ser feitas algumas considerações:

❖ Micro-escala

- Períodos mais longos de amostragens (pelo menos 10 anos) de deposição seca e úmida;
- Vários pontos de amostragens, onde em cada ponto seria necessária uma estação meteorológica automática de superfície;
- Dados de poluição, por exemplo, CETESB;
- Dados de sondagens (cerca de 4 horários), para determinar a estabilidade atmosférica e altura da camada limite atmosférica, com a finalidade de determinar o quanto a poluição está influenciando a atividade humana;
- Dados de disdrômetro, estações de superfície próximo da região de coleta e Radar, para determinar o padrão de precipitação.

❖ Escala sinótica

- Imagens de satélites globais e setorizadas;

- Dados de reanálises;
- Análise não somente de baixos, mas também de altos níveis, com a finalidade de mostrar os padrões existentes entre cada estação procurando associá-los a composição química da água de chuva.

❖ **Modelagem**

- Fazer uma modelagem dos processos de remoção de poluentes atmosféricos dentro e abaixo da nuvem que seja capaz de resolver o complexo mecanismo de interação entre as fases gasosa, líquida e sólida na atmosfera, procurando compará-los com os dados observados. Essa abordagem sugerida possa pelo acoplamento de modelos fotoquímicos e de aerossóis com modelos atmosféricos.

Capítulo 5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, M. Z. M., BRUNS, R. E., SCARMINIO, I. S., FERREIRA, J. R. **A multivariate statistical analysis of the composition of rainwater near Cubatão, SP, Brasil.** Environment Pollution, v.79, p.225-233, 1993.
- ABREU, M. L. Previsores sinótico-meteorológicos para dispersão de poluentes na região da grande São Paulo. INPE –3600 – TDL/197, São José dos Campos – SP, 1984.
- ALMEIDA, I.T. **A poluição atmosférica por material particulado na mineração a céu aberto.** Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica – USP, 1999.
- ALONSO, C.D., ROMANO, J. E MASSARO, S. **Medições de pH e titulação em águas pluviais em um ponto urbano.** Livro de Resumos da 37^a. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química - SBPC, p. 604, 1987.
- ANDRADE, M.F., **Propriedades da matéria particulada inalável do aerossol atmosférico de São Paulo,** Dissertação de Mestrado, Instituto de Física -USP, 1986.
- AVILA, A., ALARCÓN, M. **Relationship between Precipitation Chemistry and Meteorological Situations at a Rural Site in NE Spain.** Atmospheric Environment, v.33, p.1663-1677, 1999.
- BEVERLAND, I. J., CROWTHER, J. M. **On the interpretation of event and sub-event rainfall chemistry.** Environmental Pollution, n. 75, p. 163-174, 1992.
- BEVERLAND, I. J., CROWTHER, J. M., SRINIVAS, M. S. N., HEAL, M, R. **The Influence of Meteorology and Atmospheric Transport Patterns on the Chemical Composition of Rainfall in South-East England.** Atmospheric Environment, v. 32(6), p.1039–1048, 1998.
- CAMPOS, V.P., COSTA, A.C.A., TAVARES, T.M., **Comparação de dois tipos de amostragem de chuva: deposição total e deposição apenas úmida em área costeira tropical.** Química . Nova, v.21(4), p.418-423, 1998.
- CASTRO, M. G. S., TARIFA, J. R. **A Acidez da Chuva na Cidade de São Paulo.** <http://www.pucsp.br/geoweb/chuva.htm>. Acesso em 01 de outubro de 2003.
- CETESB- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de Qualidade do Ar no Estado De São Paulo 2003.** São Paulo (SP), p. 122, 2004.
- CCOYLLO, O. R. **Interação entre os poluentes atmosféricos e a circulação local na cidade de São Paulo.** Departamento de Ciências atmosféricas – IAG/USP, Dissertação de Mestrado, 1998.
- CCOYLLO, O. R., ANDRADE, M. F. **The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in São Paulo, Brasil.** Environmental Pollutions, n.116, p. 257-263, 2002.

CHENG, S., LAM, K. **Synoptic Typing and Application to the Assessment of Climatic Impact on Concentrations of Sulfur Dioxide and nitrogen Oxides in Hong Kong.** Atmospheric Environment, v. 34, p. 585-594, 2000.

CLIMANÁLISE. **Boletim de monitoramento e análise climática.** Número especial, 1986.

CLIMANÁLISE. **Boletim de monitoramento e análise climática.** MTC/INPE, n.4, v.2, 1989.

CLIMANÁLISE. **Boletim de monitoramento e análise climática.** MTC/INPE, n.5, v.1, 1990.

CLIMANÁLISE. **Boletim de monitoramento e análise climática.** Número especial, 1996.

COWLING, E. E NILSSON, J., **Acidification research: lessons from history and visions of environmental futures.** Water, Air, and Soil Pollution., v.85, p.279-292, 1995.

DAYAN, U., LAMB, O. **Meteorological indicators of summer precipitation chemistry in central Pennsylvania.** Atmospheric Environment, n.37, p.1045-1055, 2003.

DHN- Divisão de Hidrografia e Navegação. **Serviço de previsão do Atlântico.** Ministério da Marinha, 1989.

DHN- Divisão de Hidrografia e Navegação. **Serviço de previsão do Atlântico.** Ministério da Marinha, 1990.

ELSOM, D. Atmospheric Pollution. Copyright, 322pp1987.

EPA - Environmental Protection Agency. **The acid deposition phenomenon and its effects - Critical assessment review papers.** Atmospheric Sciences, Washington, v.1, 1984.

FEREK, R. J., EYNON, B. P., ENDLICH, R. M. **Statistical analysis of precipitation chemistry measurements over the Eastern United States. Part III: The ionic balance among chemical constituents.** Journal of Applied Meteorology, v.27, p.1344-1351, 1988.

FLUES, M., HAMA, P., LEMES, M. J. L., DANTAS, E. S. K., FORNARO, A. **Evaluation of the rainwater acidity of a rural region due to a coal-fired power plant in Brazil.** Atmospheric Environment, v.36, n.14, p. 2397-2404, 2002.

FIGUERÊDO, D. V. **Influence of calcareous soil particulates on acid rain: Belo horizonte metropolitan region, Brazil.** Ambio, v.28, n. 6, p.514-518, 1999.

FINLAYSON-PITTS, B.J. E PITTS JR., J.N., **Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques,** John Wiley & Sons, New york, 1986.

FINLAYSON-PITTS, B.J. E PITTS JR., J.N. **Chemistry of the upper and lower atmosphere: Theory, Experiments, and applications,** Academic Press, p.969, 2000.

FORNARO, A., **Chuva ácida em São Paulo: caracterização química de amostras integradas e seqüenciais de deposição úmida.** Dissertação de Mestrado, IQ-USP, 1991.

- FORNARO, A., ISOLANI, P. C., GUTZ, I. G. R., **Low-cost automated rain collector and its application to the study of wet-only deposition in São Paulo (Brazil)**. Atmospheric Environment, v.27(B), p.307-312, 1993.
- FORNARO, A., GUTZ, I. G. R. **Wet deposition and related atmospheric chemistry in the São Paulo metropolis, Brazil: Part 2 – contribution of formic and acetic acids**. Atmospheric Environment, v.37, p.117-128, 2003.
- FORTI, M.C., MOREIRA-NORDEMANN, L.M., ANDRADE, M.F. E ORSINI, C.Q. **Elements in the precipitation of S. Paulo city (Brazil)**. Atmospheric Environment, v.24B(2), p.355-360, 1990.
- GIOLITO, I. **Métodos eletrométricos e eletroanalíticos: fundamentos e aplicações**. Multitec – coordenadoria de treinamento técnico, 2ª edição, 1980.
- GAFFNEY, J.S., STREIT, G.E., SPAL, W.D. E HALL, J.H., **Beyond acid rain**. Atmospheric Environment, 21(6), 519-524, 1987.
- GALLOWAY, J. N. Water, air, and soil pollution, v.85, n.15, 1995.
- GALLOWAY, J. N, LIKENS, G. E., EDGERTON, E. S. **Acid precipitation in the northeastern United States: pH and acidity**. Science, v.194, p.727-724, 1976.
- GODISH, T., **Air Quality**, 3rd ed., Lewis Publishers, Boca Raton, 1997.
- GONÇALVES, F. L. T. **Uma análise dos processos de remoção de poluentes atmosféricos por gotas de chuvas**. Tese de Doutorado, IAG-USP, 1997.
- GONÇALVES, F.L.T., MASSAMBANI O., BEHENG, K.D., VAUTZ, W., SCHILLING, M., SOLCI, M.C., ROCHA, V., KLOCKOW, D. **Modeling and measurements of below cloud processes in the highly industrialized region of Cubatão- Brazil**. Atmospheric Environment, 34, 4113-4120, 2000.
- GONÇALVES, F.L.T., MALHEIROS, A. R., FREITAS, R. S., ASSUNÇÃO, M. A. F., MASSAMBANI, O., 2002. **In-cloud and below-cloud numerical simulation of scavenging processes at Serra do Mar region, SE Brazil**. Atmospheric Environment, vol.36, fasc.:33, págs:5245-5255, 2002.
- HERUT, B. STARINSKY, A., KATZ, A. ROSENFELD, D. **Relationship between the acidity and chemical composition of rainwater and climatological conditions along a transition zone between large deserts and Mediterranean climate, Israel**. Atmospheric Environment, v. 34, p. 1281-1292, 2000.
- INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. **Gráficos Climatológicos**. Acesso em: 25 de mai. 2004.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., et al. **The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project**. Bulletin of the American Meteorological Society, Boston, v.77, n.3, p. 437-472, 1996.
- KUMAR, R., RANI, A., SINGH, S. P., KUMARI, K. M., SRIVASTAVA, S. S. **A Long Term Study on Chemical Composition of Rainwater at Dayalbagh, a Suburban Site of Semi-arid Region**. Journal of Atmospheric Chemistry 41, 265-279, 2002.

- LARA, L.B.L.S., ARTAXO, P., MARTINELLI, L.A, VICTORIA, R.L., CAMARGO, P.B., KRUSCHE, A, AYERS, G.P., FERRAZ, E.S.B., BALLESTER, M.V. **Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piraciba River Basin, Southeast Brazil.** Atmospheric Environment, v.35, p.4937-4945, 2001.
- LIKENS, G.E. E BORMANN, F.H. **Acid rain: a serious regional environmental problem.** Science, v.184, p.1176-1179, 1974.
- LILJESTRAND, H. M. **Fractionation of atmospheric acid and base components within storm events by precipitation scavenging processes.** Environmental Pollution, v. 75, p. 157-161, 1992.
- LUCA, S. J., MILANO, L. B., IDE, C. N. **Rain and urban stormwater quality.** Water Science Technology, v.23, p.133-140, 1991.
- MANFREDINI, L. M. **Condições meteorológicas para a previsão de situações críticas de poluição na grande São Paulo.** Departamento de Ciências atmosféricas – IAG/USP, Dissertação de Mestrado, 1988.
- MELLO, W. Z. **Precipitation chemistry in the coast of the metropolitan region of Rio de Janeiro, Brasil.** Environment Pollution, v.114, p.235-242, 2001.
- MILLER, D. **The Na/Cl ratio in rainwater and the sea salt chloride cycle.** Tellus, v.B42, n.3, p.254-262, 1990.
- NAIK, M. S., KHEMANI, L. T., MOMIN, G. A., RAO, P. S. P., PILLAI, A. G., SAFAI, P. D. **Variation in the ionic composition in convective showers in Pune, India.** Tellus, v.46B, p.68-75, 1994.
- NAKAEMA, W. M. **Modelagem da deposição úmida atmosférica na Grande São Paulo durante os meses de inverno.** Dissertação de Mestrado, IAG-USP, 2001.
- PAEGLE, J., MO, K. C. **Alternating wet and dry conditions over South American during summer.** Monthly Weather Review, v.125, n.2, p. 279-291, 1997.
- NCEP-BDPA – **National Centers for Environmental Prediction and Brazil Daily Precipitations Analysis.** ftp:// ftp. ncep. noaa. gov/ pub/ precip/ wd52ws/ brasil, Acesso em: 15 de mai. 2004.
- OLIVEIRA, A. P., BORNSTEIN, R. D., SOARES, J. **Annual and diurnal wind patterns in the city of São Paulo.** Water, air, and soil pollution, focus, p.3-15, 2003.
- PAIVA, R. P., PIRES, M. A. F., MUNITA, C. S., ANDRADE, M. F., GONÇALVES, F. L. T. MASSAMBANI, O. **A preliminary study of the antropogenic contribution to São Paulo rainfall.** Fresenius Environment Bull., v.6, p.508-513, 1997.
- PRUPPACHER, H. R. & BEARD, K. V. **A wind tunnel investigation of the internal circulation and shape of drops falling at terminal velocity in air.** J. Q. R. Met. Soc. 96, 247-256, 1970.
- PRUPPACHER, H. R. & KLETT, J. D. **Microphysics of cloud and precipitation.** Ed.: Reidel Publ. Company, 714pp, 1997.

RAMOS, A. M. **Análise dos processos de remoção de poluentes atmosféricos dentro e abaixo da nuvem na Região de Cubatão.** Dissertação de mestrado, IAG-USP, 2000.

ROCHA, R.P. **Simulação numérica de sistema convectivo de mesoescala na América do Sul (in Portuguese).** Departamento de Ciências atmosféricas – IAG/USP, Dissertação de Mestrado, 1992.

SAMARA, C., TSITOURIDOU, R., BALAFOUTIS, CH. **Chemical Composition of Rain in Thessaloniki, Greece, in Relation to Meteorological Conditions.** Atmospheric Environment, v.26B(3), p.359-367, 1992.

SATYAMURTY, P., ETCHICHURY, P. C., STUDZINSKI, C., CALBETE, N. O., LOPES, R. R., GRAMMELSBACHER, I. A. V., GRAMMELSBACHER, E. A. **A primeira friagem de 1990: uma descrição sinótica.** Climanálise – boletim de monitoramento e análise climática. MTC/INPE, n.5, v.1, 1990.

SEINFELD, J.H. E PANDIS, S.N., **Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution,** John Wiley, New York, 1998.

SETZER, A. W., CAVALCANTE, F. A., MARCELINO, B. C. **Influências meteorológicas na poluição atmosférica em São Paulo.** INPE-1969-rpe/107. São José dos Campos, SP, 1980.

SILVA DIAS, P. L. **A zona de Convergência do Atlântico Sul.** IV Curso de Interpretação de imagens e análise meteorológica, UNIVAP, 1995.

SUGAHARA, S. **Flutuações interanuais, sazonais e intrasazonais da precipitação no estado de São Paulo.** Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP. Tese de Doutorado, 1991. SILVA DIAS, P. L. **A zona de Convergência do Atlântico Sul.** IV Curso de Interpretação de imagens e análise meteorológica, UNIVAP, 1995.

UNECE – **United Nations Economic Commission for Europe, Manual** – Methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests, Part VI: Measurement of Deposition and Air Pollution, 1999.

VELASCO, I., J. M. FRITSCH. **Mesoscale convective complexes in the Americas.** Journal of Geophysical Research, v. **92 (D8)**, p.9591-9613, 1987.

VIANELLO, R. L., ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações.** Editora UFV, Viçosa, p. 448, 2000.

WALLACE, J. M., HOBBS, P.V. **Atmospheric science, an introductory survey.** Academic Press, New York, p.467, 1977.

WILLIAMS, M. R., FISHER, T. R., MELACK, T. M. **Chemical composition and deposition of rain in the central Amazon, Brasil.** Atmospheric Environment, v.33, n.2, p.207-217, 1997.

ANEXO

As variações nas concentrações de SO_4^{2-} e NO_3^- em relação à quantidade de precipitação acumulada, para os 20 eventos estudados, durante o período de julho de 1989 a maio de 1990.

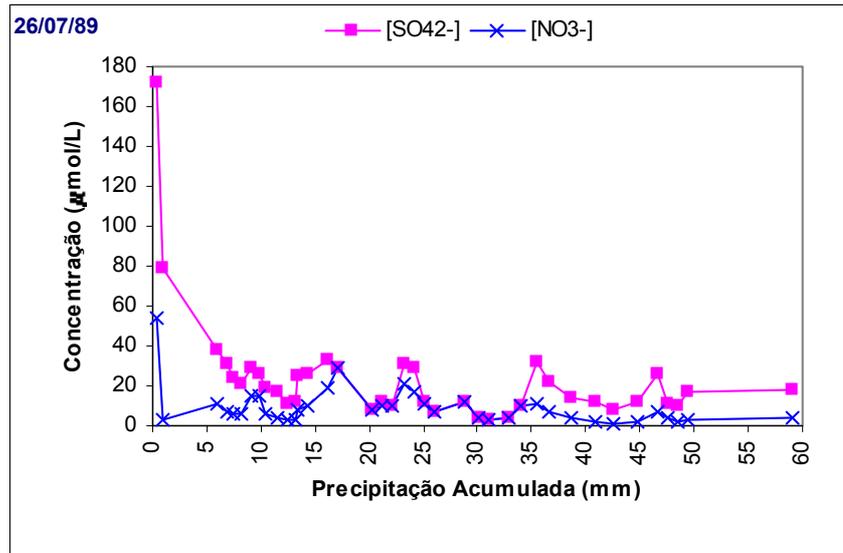


Figura 1. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 26 de julho de 1989.

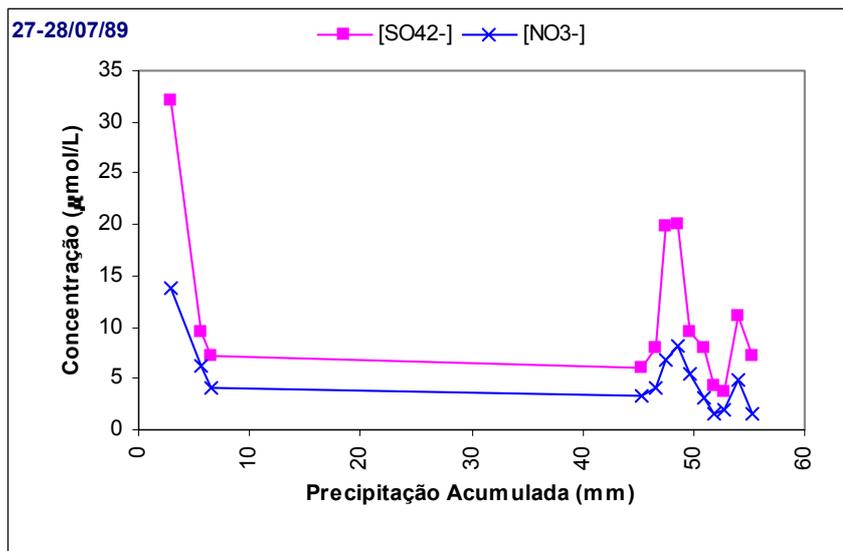


Figura 2. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 27-28 de julho de 1989.

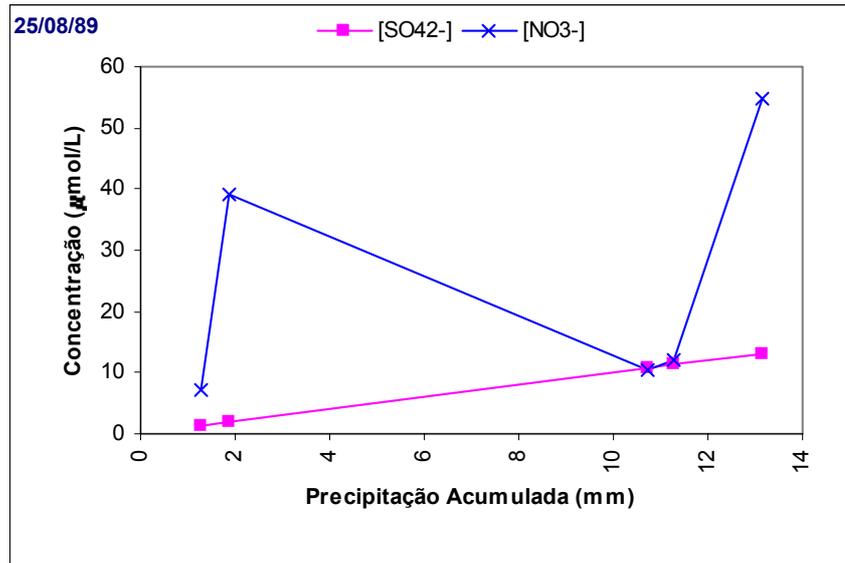


Figura 3. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 25 de agosto de 1989.

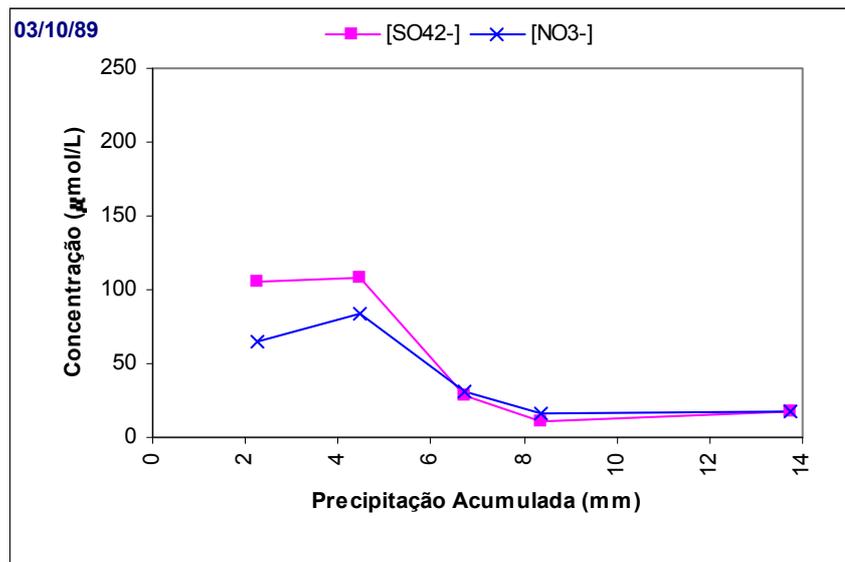


Figura 4. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 3 de outubro de 1989.

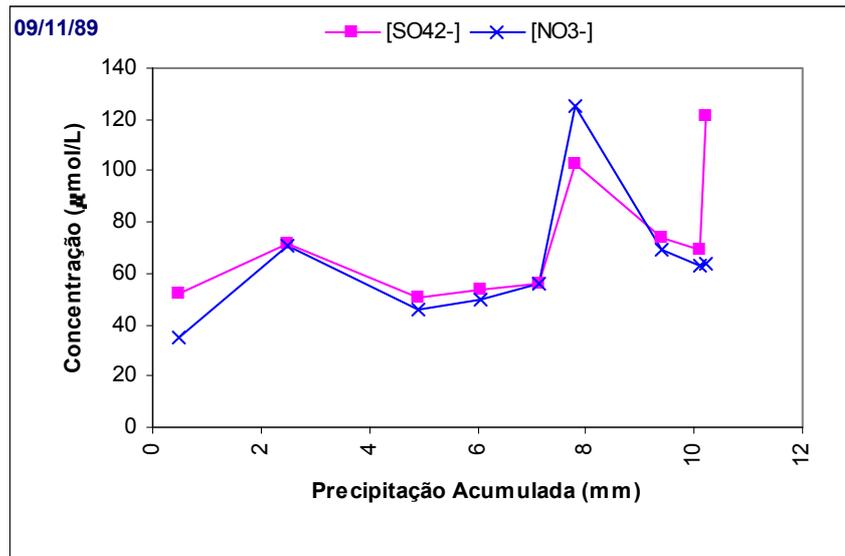


Figura 5. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 09 de novembro de 1989.

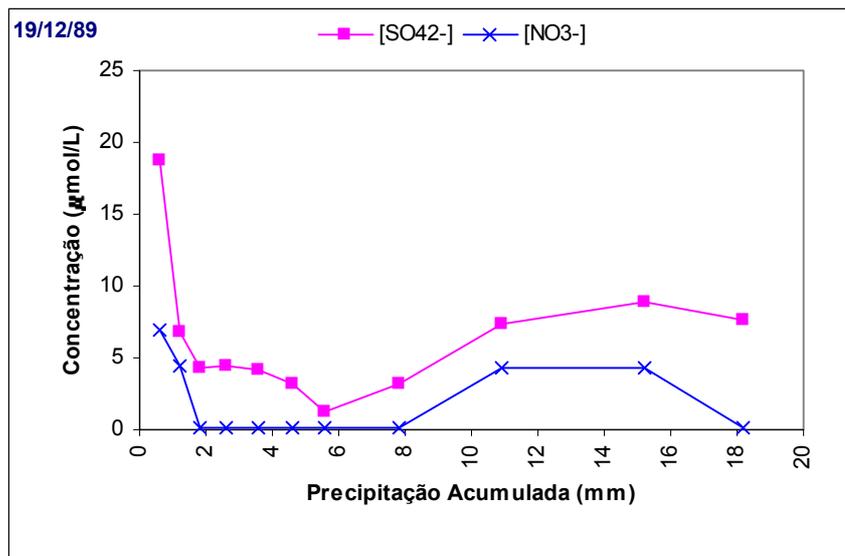


Figura 6. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 19 de dezembro de 1989.

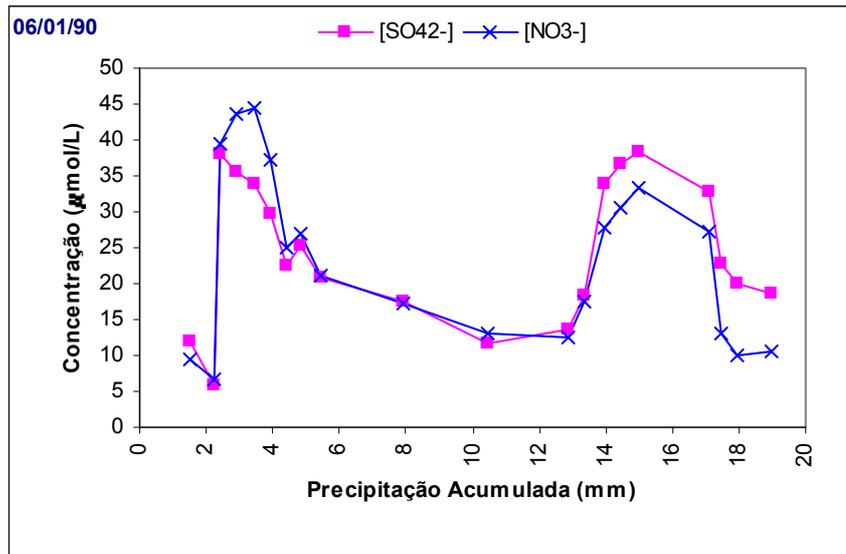


Figura 7. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 06 de janeiro de 1990.

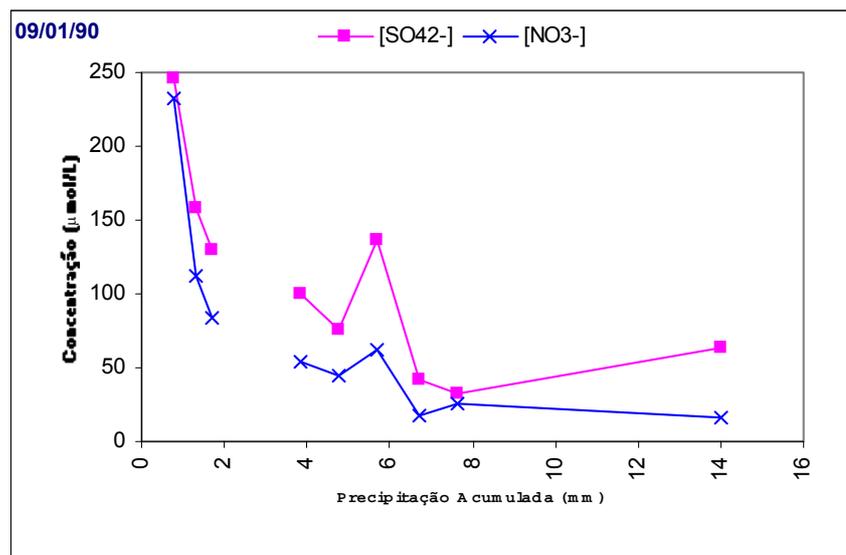


Figura 8. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 09 de janeiro de 1990.

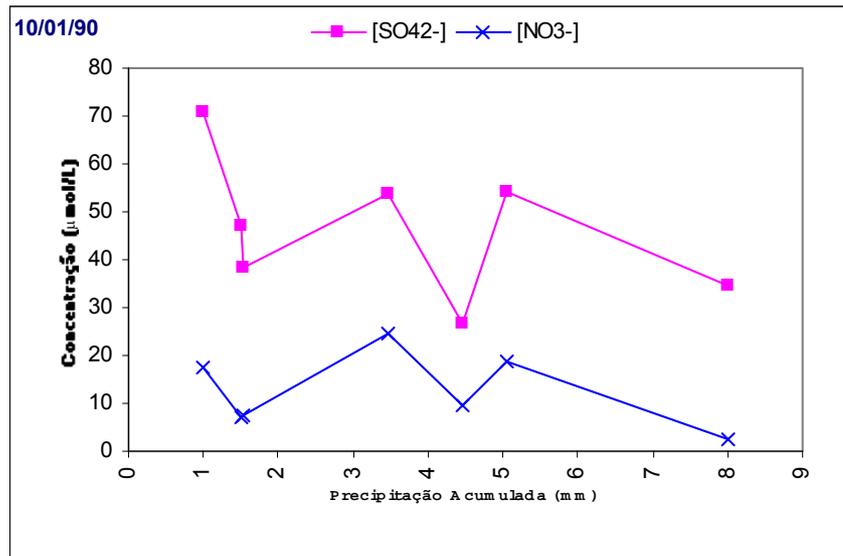


Figura 9. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 10 de janeiro de 1990.

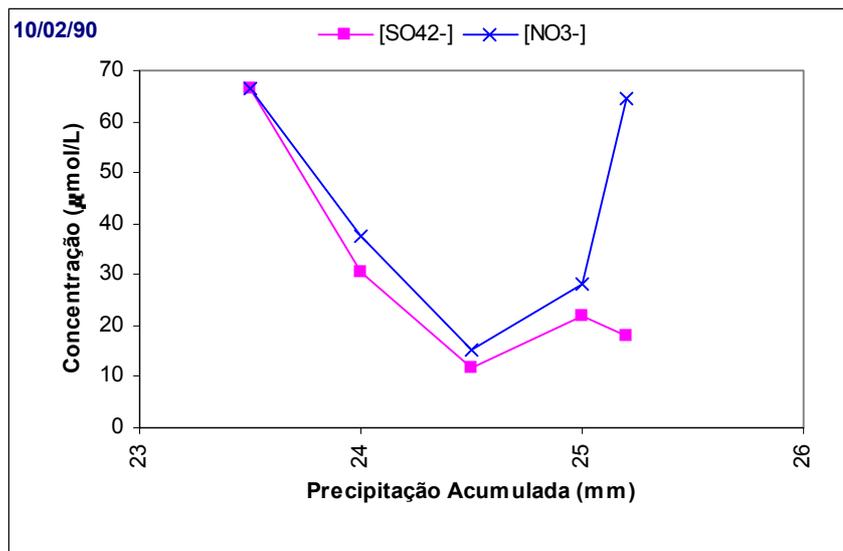


Figura 10. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 10 de fevereiro de 1990.

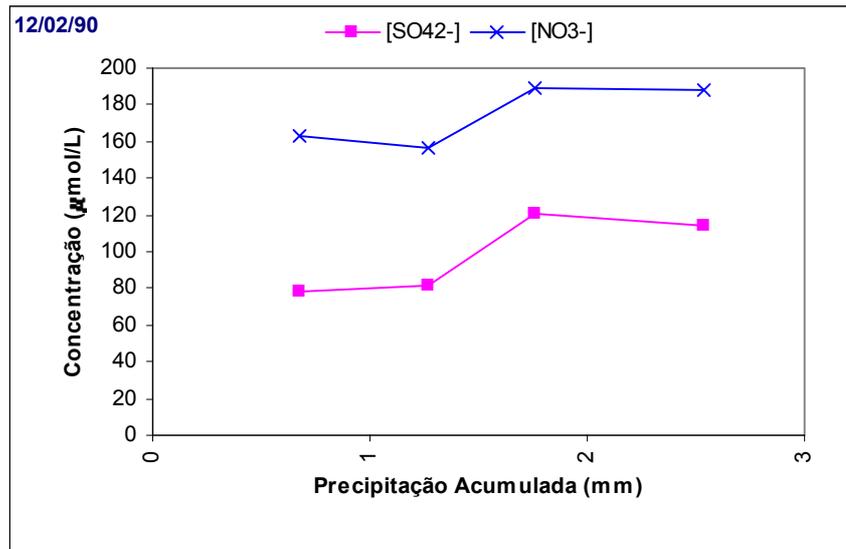


Figura 11. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 12 de fevereiro de 1990.

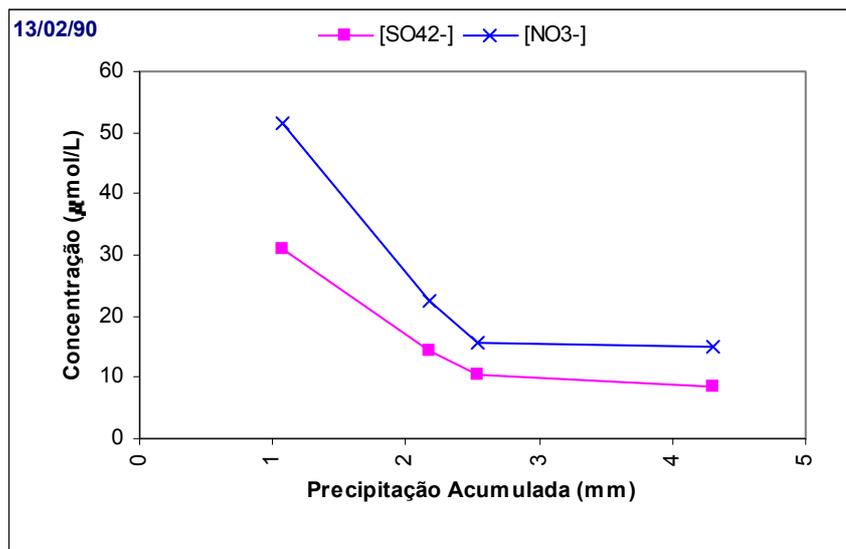


Figura 12. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 13 de fevereiro de 1990.

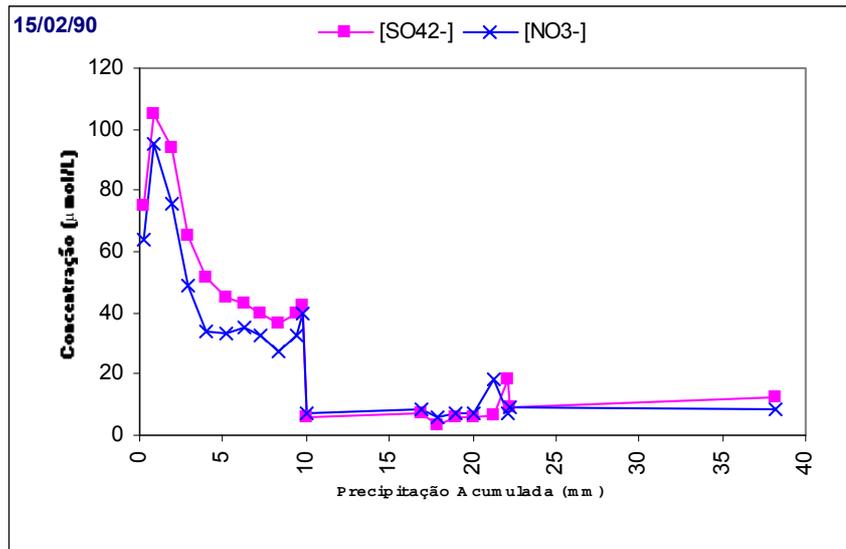


Figura 13. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 15 de fevereiro de 1990.

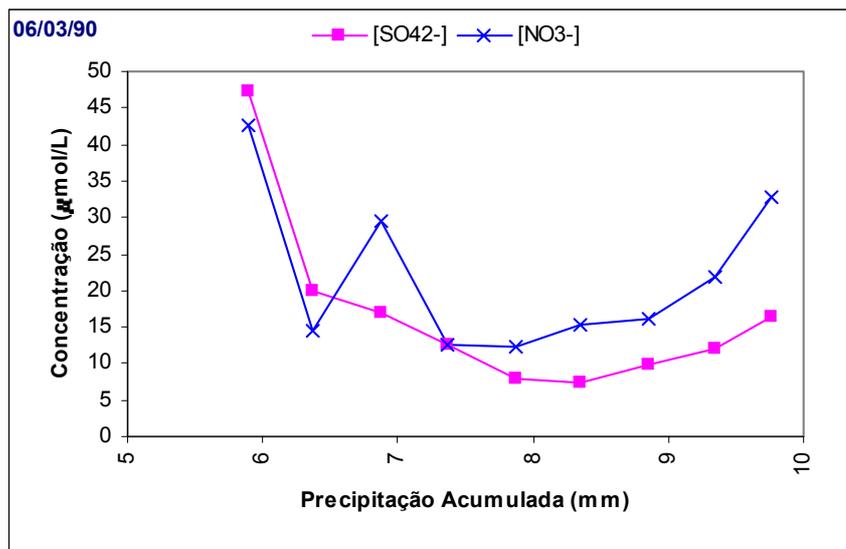


Figura 14. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 06 de março de 1990.

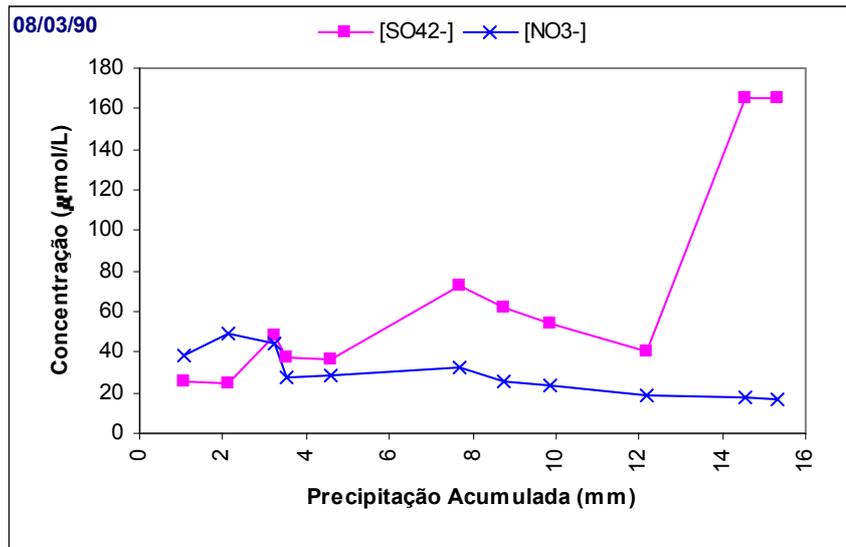


Figura 15. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 08 de março de 1990.

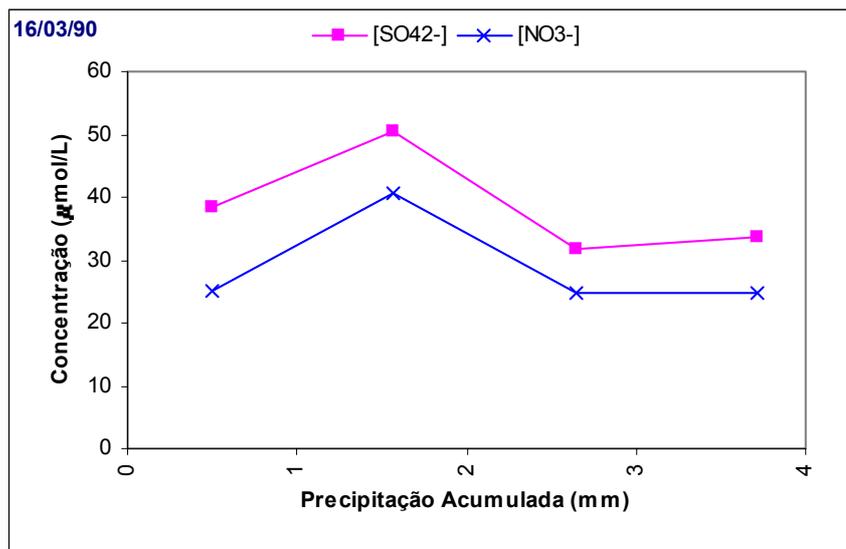


Figura 16. Variação nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 16 de março de 1990.

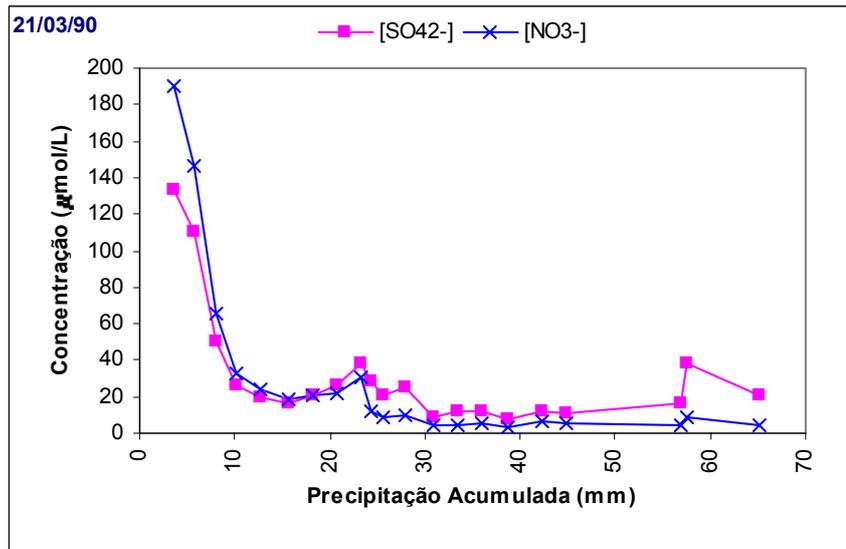


Figura 17. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 21 de março de 1990.

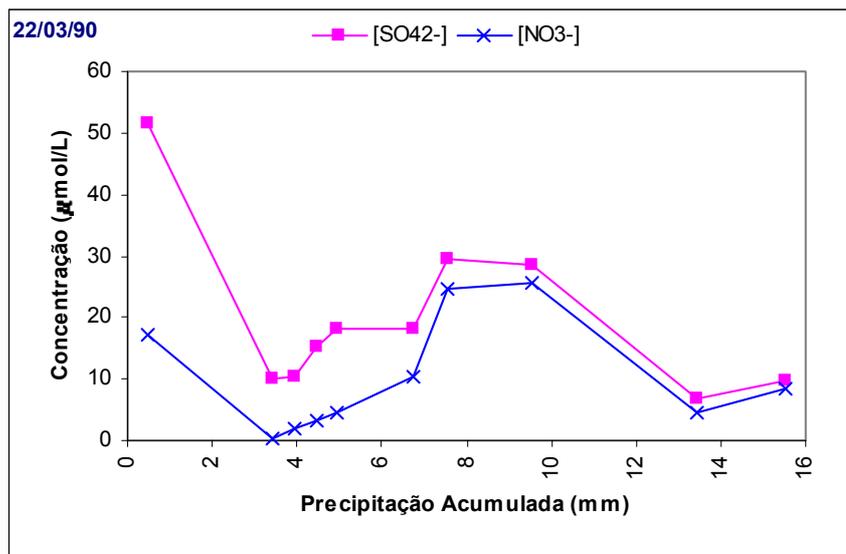


Figura 18. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 22 de março de 1990.

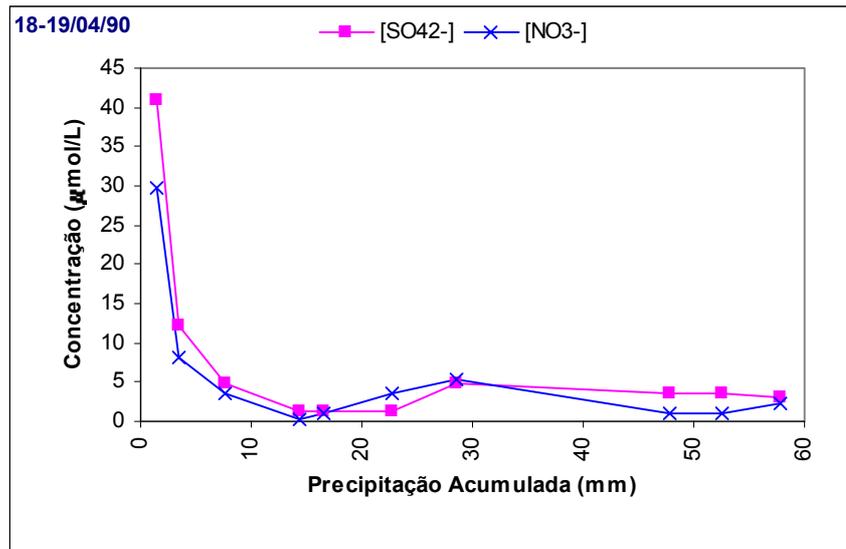


Figura 19. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 18-19 de abril de 1990.

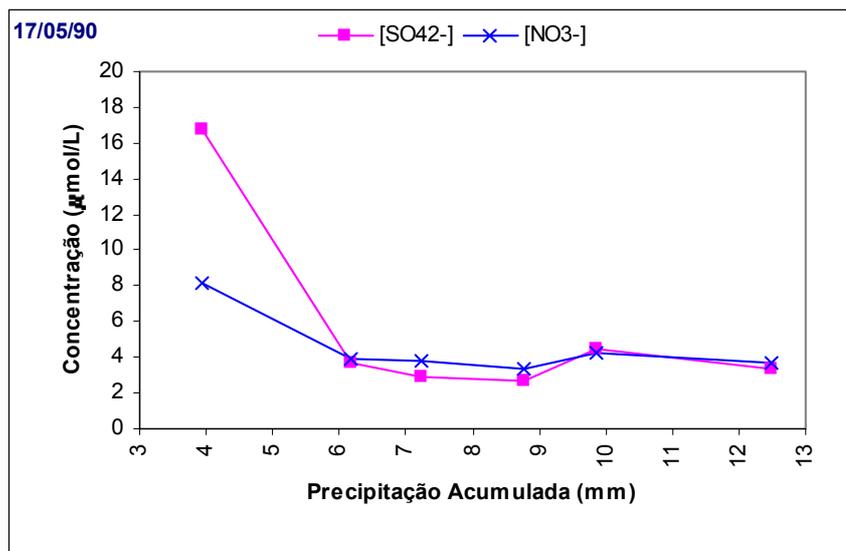


Figura 20. Variações nas concentrações das espécies químicas (SO_4^{2-} e NO_3^-) em 17 de maio de 1990.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)