

CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS SOBRE A REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO (RMSP), E SUA INFLUÊNCIA NA LIMNOLOGIA DOS RESERVATÓRIOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

MARCOS ANTÔNIO DE MORAIS, WAGNER ANTONIO CHIBA DE CASTRO,
JOSÉ GALIZIA TUNDISI

Instituto Internacional de Ecologia (IIE), São Carlos, SP.

moraisiag@gmail.com; wagner@iie.com.br; tundisi@iie.com.br

Recebido Dezembro 2008 - Aceito Dezembro 2009

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise da climatologia de frentes frias e do regime de ventos induzido por esses fenômenos sobre a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), no período de 21 anos (1987 a 2007). Foram utilizados dados de vento da estação meteorológica do IAG/USP, localizada no bairro da Água Funda - São Paulo - SP. Os resultados mostram que três frentes, em média, chegam a RMSP mensalmente, sendo que sua frequência é maior nos meses de março a maio, e de agosto a dezembro. Com relação ao vento, esse mostrou-se mais intenso nos dias anteriores a passagem da frente fria, mínimo na chegada, aumentando gradativamente nos dias seguintes (quando sua direção é predominantemente de sudeste (90% da velocidade média, e 70% das rajadas). As correlações feitas entre frentes frias e a dinâmica nos reservatórios mostraram que, em média, o tempo de resposta de um evento para outro foi de 2 a 3 dias na represa Guarapiranga, e 3 a 4 dias na represa Billings. Os parâmetros físico-químicos medidos nas represas foram temperatura (C), pH e Turbidez (NTU).

Palavras chave: Frentes frias, climatologia, vento, reservatórios.

ABSTRACT: CLIMATOLOGY OF COLD FRONTS OVER THE METROPOLITAN REGION OF SÃO PAULO (MRSP) AND THEIR INFLUENCE IN THE LIMNOLOGY OF WATER SUPPLY RESERVOIRS.

This study presents an analysis of climatology of cold fronts and wind regimes induced by these phenomena over the Metropolitan Region of São Paulo (MRSP) within a time period of 21 years from 1987 to 2007. The wind data series were acquired from the IAG/USP meteorological station, located at Água Funda neighborhood of São Paulo City. The results showed that three fronts, on average, reached the MRSP monthly, and their frequency is higher from March to May and from August to December. Winds showed to be more intense few days before the cold front passage. During the cold front arriving day, wind velocity was at lowest value, increasing gradually in the following days, when the direction was predominantly from southeast quadrant (90 % around the mean velocity and 70 % of the gusts). The correlations between the cold fronts and the dynamics of the reservoirs showed that, in average, the time lag between these events was 2 to 3 days for Guarapiranga Reservoir and 3 to 4 days for Billings Reservoir. The physical-chemical parameters measured in the reservoirs were temperature (C), pH and Turbidity (NTU).

Keywords: Cold fronts, climatology, wind, reservoir.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças nas condições meteorológicas da região sudeste do Brasil, geralmente associam-se à passagem, formação ou intensificação dos sistemas frontais, que por sua vez estão associados a variações de temperatura, pressão, umidade e ventos fortes. Segundo Escobar (2007), esses fenômenos representam cerca de 70% dos padrões sinóticos de ondas de frio sobre a RMSP.

As frentes frias também sofrem os efeitos de perturbações de maior escala. Fedorova e Carvalho (2000) mostraram que nos meses em que os fenômenos de La Niña e El Niño estão na sua fase mais ativa, a quantidade de dias com frentes frias na faixa de latitude entre 20 e 40S no ano de El Niño atingiu 90,3% dos dias analisados e, no ano de La Niña, diminuiu até 56,7%. Em ambos os casos, ou seja, La Niña e El Niño, a maior frequência dos sistemas frontais foi observada mais ao sul da América do Sul (e ainda sobre o Rio Grande do Sul e Uruguai, em anos de El Niño), sendo 49,7 e 44%, respectivamente.

A relação entre os sistemas frontais e o ENOS (El Niño e La Niña) é muito importante, pois, segundo Marengo (2008), a disponibilidade de água no Brasil depende em grande parte do clima, e a variabilidade interanual desse está associada também com tais fenômenos, dentre outros.

Andrade e Cavalcanti (2004) e Andrade (2007) observaram, para a América do Sul, uma diminuição dos sistemas frontais em direção a latitudes mais baixas e menor frequência no verão. Também notaram alguns padrões e características das variáveis atmosféricas relevantes no deslocamento dos sistemas frontais, como a intensidade no campo de pressão, intensidade e posição do cavado associado ao sistema, pressão ao nível médio do mar e advecção de vortacidade.

No inverno, os sistemas frontais se sucedem com maior frequência e velocidade de deslocamento, causando nebulosidade principalmente no litoral (Lemos e Calbete, 1996). Isto ocorre devido à impossibilidade do ar quente e úmido ser renovado durante o curto intervalo entre os sistemas frontais. Assim sendo, a nova frente fria irá encontrar o ar relativamente frio deixado pela precedente (Lemos e Calbete, 1996).

No Sul do Brasil, os estudos de Oliveira (1986), Lemos e Calbete (1996) e Justi da Silva e Silva Dias (2000, 2002) identificaram uma frequência frontal relativamente maior nos meses de maio a dezembro, diminuindo entre janeiro e abril. Mesmo assim, o maior número de frentes frias, encontrado nos meses de inverno e primavera, não difere muito em relação ao período de verão e outono.

Rodrigues *et al.* (2004) mostraram que cerca de três a quatro frentes atingem o litoral de Santa Catarina, sendo que essa frequência é maior durante a primavera. Em meses de inverno, um dia antes da passagem desta por Santa Catarina, ela se

encontra no Rio Grande do Sul, passa pelo estado no dia seguinte e chega ao litoral de São Paulo e Rio de Janeiro um dia depois.

Esses mesmos autores também mostraram que os sistemas frontais avançam até o litoral de São Paulo, dissipando-se mais rapidamente sobre o oceano dois dias depois de passarem por Santa Catarina. No inverno, entretanto, as frentes frias avançam ao longo do litoral sudeste do Brasil, chegando a atingir o Rio de Janeiro e o Espírito Santo.

Segundo Lemos e Calbete (1996), o comportamento dos sistemas frontais no litoral da Região Sudeste no período de verão é de permanecerem semi-estacionários. A permanência dos sistemas frontais, sobre essa região, organiza forte convecção tropical nas Regiões Central e Norte do Brasil, caracterizando as ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul) durante esta estação, indicando a baixa frequência de frentes principalmente no mês de fevereiro.

Em estudo feito para a região sul do Brasil, Stech e Lorenzetti (1992) mostraram que o vento na superfície sofre um aumento considerável sob a influência dos sistemas frontais.

Estudos limnológicos recentes vêm mostrando que esses distúrbios atmosféricos estão intimamente relacionados com a estratificação e comportamento de variáveis físicas, químicas e biológicas em reservatórios, que pode ter implicações na dinâmica de populações fitoplanctônicas nesses ecossistemas, em especial no desenvolvimento de cianobactérias (Tundisi *et al.*, 2004 e 2007).

Sebastien (2004) estudou os reservatórios de Barra Bonita, Carlos Botelho (Lobo-Broa) e Tucuruí pertencentes às bacias hidrográficas do Paraná e Tocantins. Ele observou que no verão e inverno, os reservatórios Lobo-Broa e Barra Bonita, caracterizados como rasos (máxima profundidade: 30 m), apresentaram-se estáveis em virtude do vento fraco, com pequenas variações de temperatura. Este estudo mostrou também uma proliferação nesses reservatórios de alguns gêneros de algas, como *Bacillariophyceae* e *Cyanophyceae*, em razão do aumento de nutrientes como Si, PO₄, NO₂, NH₄, PO₄, NO₃, que tornam-se disponíveis devido ao revolvimento no fundo do reservatório induzido pela turbulência na superfície, em dias de vento forte. O processo é governado pela redução de temperatura e aumento de pressão no outono ou aumento de temperatura, e redução de pressão na primavera, mas torna-se acelerado com a participação do vento.

Em um estudo também feito na represa Carlos Botelho (Lobo-Broa), Tundisi *et al.* (2004) mostraram que o reservatório apresentava estratificação (térmica, química e biológica) na coluna d'água em períodos calmos. Mas durante a passagem dos sistemas frontais, com ventos a partir de 6 m/s, a coluna sofria uma mistura completa. Segundo eles, esse tipo de efeito está intimamente relacionado com a força e direção do vento, e pode ser generalizado para todos os reservatórios rasos do sudeste do

Brasil, em particular os do estado de São Paulo.

Segundo Tundisi e Matsumura-Tundisi (2008), a circulação num reservatório pode ser expressa através da resistência térmica a circulação (RTC), trabalho do vento (W) e a estabilidade do sistema (S). Esses termos referem-se à densidade e suas diferenças (o que impede a circulação), sendo que S e W são dados em $g\cdot cm\cdot cm^{-2}$ e RTC é um valor adimensional.

Para uso humano, as *Cyanophyceae*, apresentando um efeito tóxico de acordo com a espécie, podem comprometer o uso do reservatório com o aumento de sua densidade. Sendo assim, um estudo sobre os sistemas frontais tem uma fundamental importância no que diz respeito ao gerenciamento de represas, especialmente para o consumo humano de água.

Portanto, este trabalho tem como principais objetivos confirmar os resultados encontrados anteriormente, estabelecer uma climatologia de frentes frias para a RMSP, montar um esboço do comportamento dos ventos durante sua atuação e determinar o momento de maior influência destes sobre a dinâmica dos reservatórios da região.

2. DADOS E METODOLOGIA

O estudo foi realizado para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Foram utilizados valores médios diários de vento horizontal medido por um anemógrafo tipo universal (marca Fuess), instalado na torre da estação meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo – IAG/USP, localizada no Parque das Fontes do Ipiranga - parte Sul - Bairro da Água Funda - Cidade de São Paulo – SP. Em termos geográficos, essa se encontra nos arredores de um marco correspondente à latitude $23^{\circ}39'S$ e à longitude $46^{\circ}37'W$.

Ao sul da estação encontram-se as represas Billings e Guarapiranga, responsáveis pelo abastecimento da RMSP. As profundidades máximas medidas em ambas foram de 25 e 13m, respectivamente, ou seja, são consideradas represas rasas.

O período considerado para o cálculo da climatologia das frentes frias na região em estudo foi de 1987 a 2007, ou seja, 21 anos.

A detecção de períodos de vento meridional positivo é um indicativo muito eficiente da atuação das frentes frias. Rodrigues *et al.* (2004) adotaram, em sua metodologia, um predomínio de vento sul de no mínimo 2 dias, além da análise da pressão e temperatura em superfície. Uma análise objetiva que é possível de ser reproduzida por outros meios. Sendo assim, para o presente trabalho, foi adotado um procedimento similar, mas utilizando-se de outras ferramentas para a validação dos resultados. A metodologia central utilizada foi:

- Virada do vento meridional de norte para sul;
- Persistência do vento de sul por no mínimo dois dias;

Um acompanhamento dos resultados foi feito a fim de avaliar a detecção das frentes frias. Para isso, foram utilizadas cartas sinóticas do Serviço Meteorológico Marinho – SMM (Marinha do Brasil) e as figuras do monitoramento dos sistemas frontais disponibilizadas no Climanálise do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE. Observou-se que em alguns casos ocorria um adiamento ou antecipação do dia correto da chegada da frente fria, já em outros eram observadas duas viradas de vento, sendo que havia ocorrido somente a passagem de um sistema frontal. Por outro lado, poucas não foram detectadas e, considerando o total encontrado no mês, esse não diferia muito em relação ao encontrado pelo CPTEC. Sendo assim, chegou-se a conclusão de que a metodologia era precisa o suficiente para se obter uma análise climatológica com resultados pertinentes ao foco do trabalho.

A fim de suavizar flutuações locais e estimar a média local (Hartmann e Michelsen, 1989), foi aplicado um filtro 1:2:1, conhecido como média móvel, sobre os dados:

$$y(t) = \sum_{r=-q}^{+s} a_r \cdot x_{t+r} \quad (1)$$

onde a_r é o conjunto de pesos tais que $a_r=1$. As médias móveis são frequentemente simétricas e com $s=q$ e $a_r=a_{-r}$. O exemplo mais simples de um filtro simétrico é do tipo $a_r=2q+1$ para $r=-q, \dots, +q$. O valor alisado de x_t é dado por:

$$Sm(x_t) = \frac{1}{2q+1} \sum_{r=-q}^{+q} x_{t+r} \quad (2)$$

Note que neste caso, o peso é igual a 1. O filtro conhecido como 1-2-1 considera uma média móvel de três elementos, porém com pesos a_r na Equação 1 iguais a 0.25, 0.5, 0.25. Em ambas as bordas, o procedimento é calcular a média entre t_0 e t_{0+1} (borda inferior) e entre t_f e $t_{f,1}$ (borda superior). A Figura 1 mostra a velocidade meridional calculada a partir dos dados de vento medidos na estação (como exemplo julho de 1995).

Este recurso é interessante no sentido de eliminar (no mínimo diminuir) possíveis efeitos muito localizados, como por exemplo, no caso da RMSP, a topografia e a atuação da brisa marítima. Além disso, esse procedimento foi adotado a fim de “prolongar a inércia” do sistema frontal, correlacionando as velocidades de um dia para o outro. Ou seja, a idéia foi tentar diminuir os erros em relação a diferir frentes frias da ZCAS, e na detecção das frentes com deslocamento rápido (menos que 2 dias).

A fim de melhorar e ao mesmo tempo não perder muita resolução dos dados, foi utilizado o vento meridional filtrado uma vez (1x).

As frentes foram localizadas através de um algoritmo, o qual detectou as ocorrências de dias consecutivos com

predominância de vento meridional positivo (vento de sul), considerando que cada um desses períodos correspondia à ocorrência de um sistema frontal.

Para o cálculo de S, W e RTC, foram utilizadas as seguintes equações (Tundisi e Matsumura-Tundisi, 2008):

$$S = \frac{g}{A_0} \int_0^{Z_m} (P_z - \rho)(z - z_p) \cdot Az \cdot dz \quad (3)$$

$$W = \frac{g}{A_0} \int_0^{Z_m} (\rho - P_z) \cdot Az \cdot dz \quad (4)$$

$$RTC = \frac{d_{t_2} - d_{t_1}}{dH_2O(4) - dH_2O(5)} \quad (5)$$

onde g é a aceleração da gravidade, A₀ a área da superfície (em cm²), Az a área à profundidade de qualquer z (em cm²), a densidade média da coluna de água que resultaria do processo de mistura (em g/cm³), P_z a densidade à profundidade z (em g/cm³), z a profundidade (em cm) onde a densidade final ou média () ocorre antes da mistura, Z_m a profundidade máxima (em cm), z a profundidade (em cm), d_{t1} a densidade da água a temperatura t₁, d_{t2} a densidade da água a temperatura t₂, dH₂O(4) a densidade da água a temperatura de 4C e dH₂O(5) a densidade da água a temperatura de 5C.

Esses parâmetros foram calculados para 5 meses de dados limnológicos, medidos tanto na represa Billings quanto na Guarapiranga.

Foi realizada análise de correlação, utilizando o programa computacional PAST ver. 1.88, de forma a permitir uma avaliação temporal entre a chegada da frente e a dinâmica do reservatório. O vento foi correlacionado com diferentes momentos dos parâmetros S, W e RTC, para determinação do período de defasagem (em dias) entre o vento e sua resposta no lago.

3. RESULTADOS

Foram calculados o regime mensal e a climatologia de frentes frias para cada estação do ano (verão, outono, inverno e primavera). Os resultados mostram que três (3) frentes frias, em média, atingem a RMSF por mês, num intervalo médio de 10 dias, sendo que essa frequência é maior na primavera e menor no verão (Tabela 1 e Figura 2).

As frequências mensal e sazonal das frentes frias podem ser melhor visualizadas nas Figuras 2 e 3, respectivamente. A Figura 2 mostra uma frequência relativamente maior dos sistemas frontais nos meses de março a maio, e de agosto a dezembro. Na Figura 3 pode-se observar que a maior ocorrência de frentes é durante a primavera, e a menor no verão.

Em seguida, foi feita uma análise do vento. A Figura 4 mostra o comportamento climatológico do vento médio na região, na qual são amostradas a velocidade média e frequência

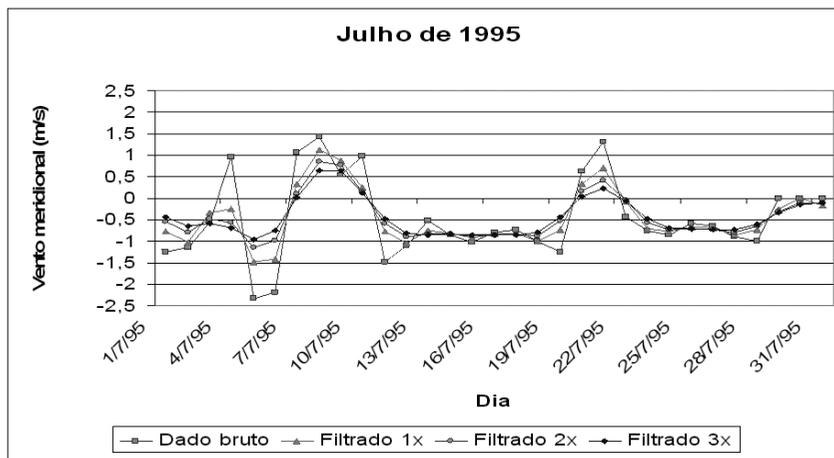


Figura 1. Vento meridional no mês de julho de 1995. Dado bruto, filtrado uma vez (1x), duas vezes (2x) e três vezes (3x).

Tabela 1. Períodos com vento meridional positivo (frentes frias) sobre a RMSF, de 1987 a 2007.

	Durante o período de 21 anos	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Total de sistemas encontrados	783	169	195	208	211
Média mensal	3.1	2.7	3.1	3.3	3.4
Intervalo (dias)	10	11	10	9	8

do vento em cada quadrante, sendo que o “Quadrante Nordeste” refere-se ao vento proveniente das direções entre 0 e 90, “Quadrante Noroeste” entre 270 e 360, “Quadrante Sudoeste” entre 180 e 270, e “Quadrante Sudeste” entre 90 e 180. Nota-se que a RMSP geralmente é atingida por ventos de Quadrante sudeste (40%) nordeste (36%).

Com isso, fez-se uma análise do comportamento do vento nos dias que decorreram a passagem da frente, ou seja, os dois dias anteriores (-2 e -1), na chegada (0), e nos três seguintes (1, 2 e 3). Os resultados mostram a virada do vento de sudeste na chegada do sistema frontal, assim como um predomínio de ventos vindos dessa direção nos dias seguintes (Figura 5).

A Figura 6 mostra uma média da evolução dos maiores valores de velocidade média do vento medido durante a passagem do sistema frontal. Nota-se que este é maior nos dias anteriores, atinge seu mínimo na chegada do sistema frontal e aumenta gradativamente nos dias seguintes. Também é possível perceber que o vento é mais intenso durante a primavera.

E, assim como nas Figuras 4 e 5, foram feitas uma climatologia e análise do comportamento das rajadas de vento durante a passagem das frentes. Os resultados são mostrados nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

O comportamento climatológico das rajadas de vento (Figura 7) é muito próximo da velocidade média, com predominância dos ventos de sudeste (39%) e nordeste (23%). Já a Figura 8, assim como na Figura 4, mostra a virada do vento de sudeste na chegada da frente e a maior frequência dos ventos vindos dessa direção nos dias seguintes.

A Figura 9 ilustra os efeitos da frente sobre um reservatório. Nela são apresentadas, para o período de 1 a 13 de dezembro de 2007, a velocidade ($m.s^{-1}$) média, máxima e direção predominante do vento, as ocorrências de sistemas frontais (fonte: CPTEC) e parâmetros medidos por uma sonda instalada numa das plataformas de monitoramento em tempo real do Instituto Internacional de Ecologia - IIE, localizada na boca do braço Taquacetuba da represa illings, na RMSP.

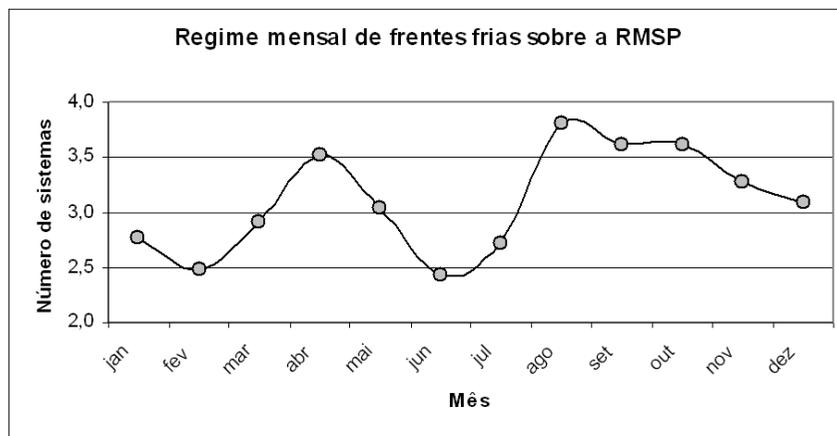


Figura 2. Número mensal de frentes frias sobre a RMSP, de 198 a 2007.

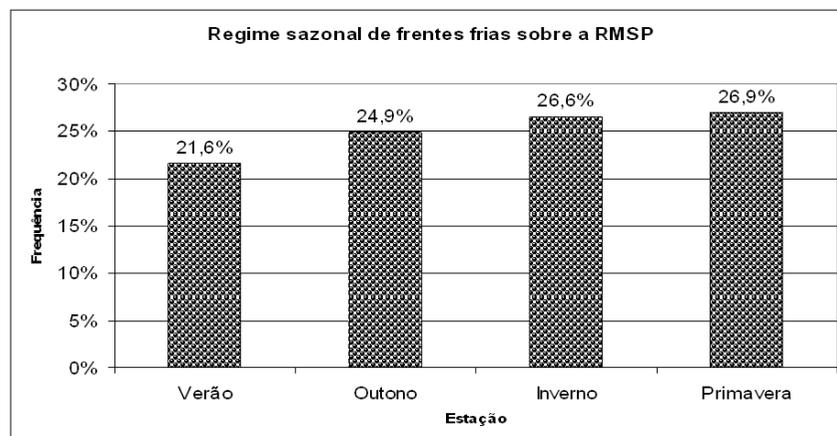


Figura 3. Frequência sazonal de frentes frias sobre a RMSP, de 1987 a 2007.

A Figura 10 mostra os valores de S, W e RTC calculados a partir dos dados limnológicos mostrados na Figura 9. Nota-se que todos eles apresentam valores baixos (em módulo) durante a passagem dos sistemas frontais. Os valores negativos de W representam a energia dissipada em função do trabalho do vento.

Para o cálculo das correlações, foi considerado que o mínimo de velocidade do vento representaria a chegada da frente fria, e os mínimos de S, W e RTC como o momento de máxima resposta desta no lago. Desta maneira, para se chegar ao valor da defasagem entre esses dois eventos, bastaria atrasar (recuá-las de um em um dia) as seqüências de dados limnológicos (S, W e RTC) de maneira a fazer com que seus máximos e mínimos coincidisse com os dos dados de vento. Assim, o período entre

a posição inicial e a máxima correlação representaria o tempo de resposta de um evento para o outro.

As Figuras 11 e 12 mostram os resultados das correlações para as represas Guarapiranga e Billings, respectivamente. Para a represa Guarapiranga, os valores das correlações mostraram-se maiores, quando os parâmetros limnológicos foram comparados aos valores do vento numa defasagem de 2 e 3 dias após a chegada da frente fria. Isto indica que os maiores efeitos do sistema frontal sobre a circulação do lago ocorrem, em média, durante o segundo e terceiro dias pós-frontal.

Para a represa Billings, os valores das correlações mostraram-se maiores para uma defasagem de 3 e 4 dias, indicando que os maiores efeitos do sistema frontal sobre a

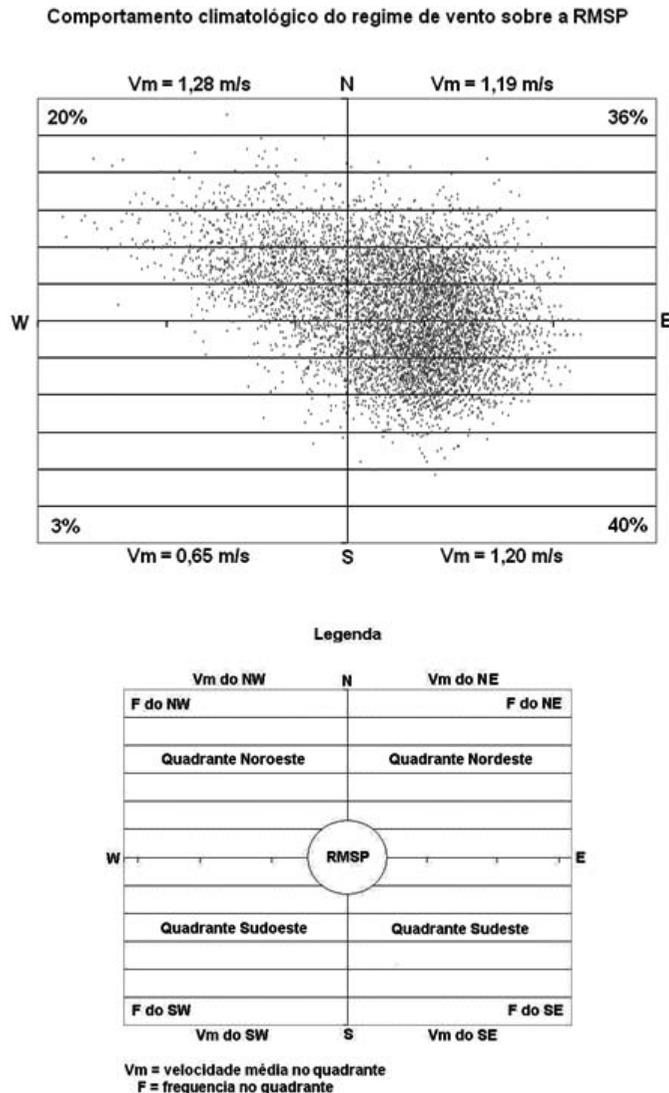


Figura 4. Esquema mostrando a distribuição climatológica do vento médio sobre a RMSP. Os 1% restantes são de calmaria ($V_m = 0$).

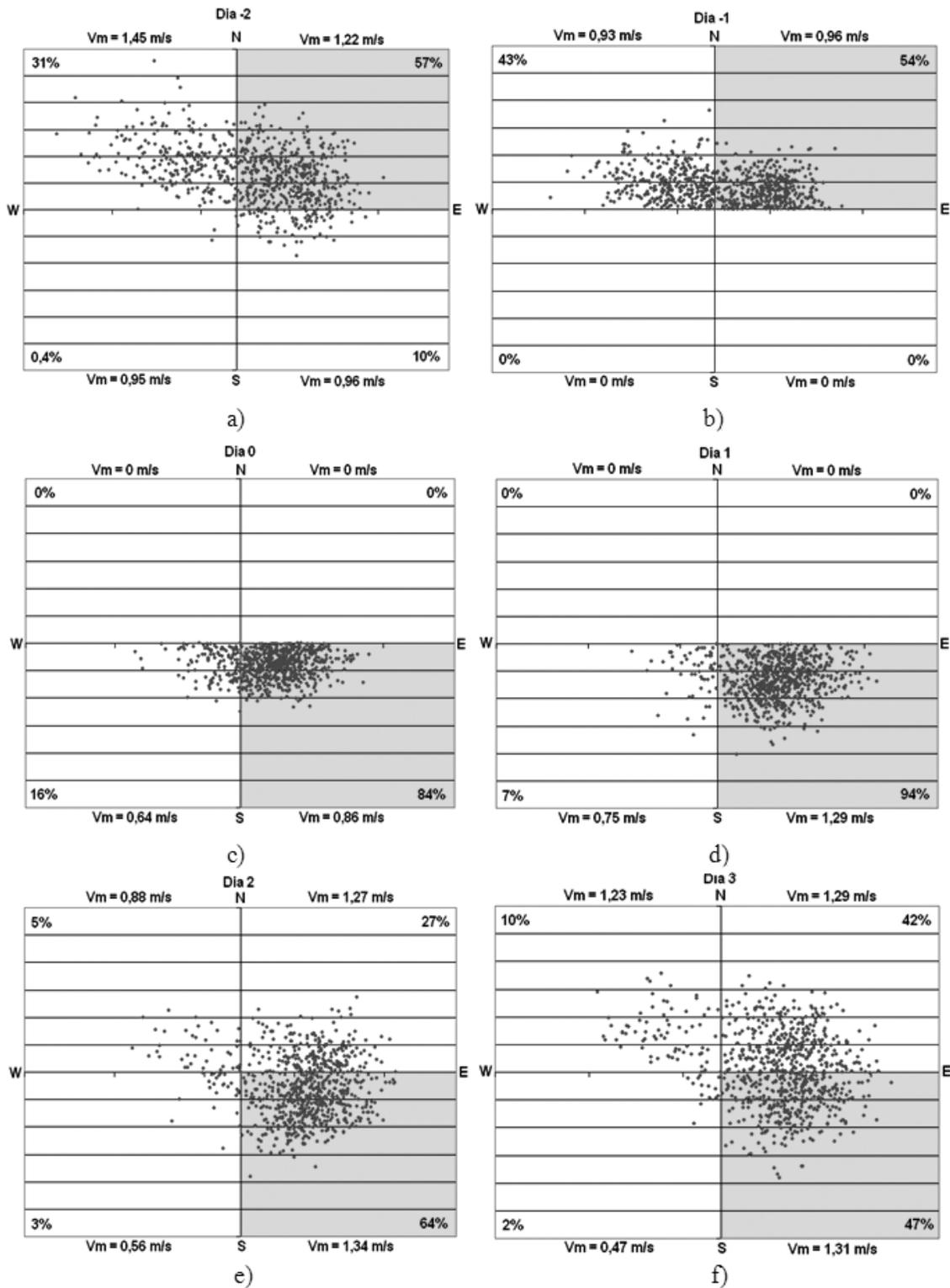


Figura 5. Esquema mostrando a evolução da direção e velocidade média do vento durante a passagem do sistema frontal, dois dias antes (a e b), na chegada (c), e nos três dias seguintes (d à f) respectivamente.

circulação deste reservatório ocorrem, em média, durante o terceiro e quarto dias pós-frontal.

4. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos (Tabela 1), a média de frentes frias estabelecida para a RMSP foi de três (3) ocorrências por mês, num intervalo médio de dez (10) dias. Rodrigues *et al.* (2004) encontraram três frentes passando por Santa Catarina neste mesmo período, e segundo esses autores, esse número diminui na medida em que avança em direção a latitudes baixas, e o máximo ocorre no litoral argentino.

A maior frequência desses sistemas ocorre na primavera (intervalo médio de 8 dias), e a menor no verão (intervalo médio de 11 dias). Mais especificamente, os meses que apresentaram maior ocorrência foram os de março a maio, e de agosto a dezembro, e as menores foram em janeiro, fevereiro, junho e julho (Figuras 2 e 3). No verão, Justi da Silva e Silva Dias (2000) identificaram um máximo da frequência frontal no sul da Argentina, em torno de 45°S, numa região considerada altamente frontogenética (Satyamurty e Mattos, 1989; Reboita *et al.*, 2009) e ciclogênética, ou seja, favorável à formação e intensificação de ciclones (Gan e Rao, 1991; Reboita, 2008) nesta época do ano. Em meses de inverno, este número máximo

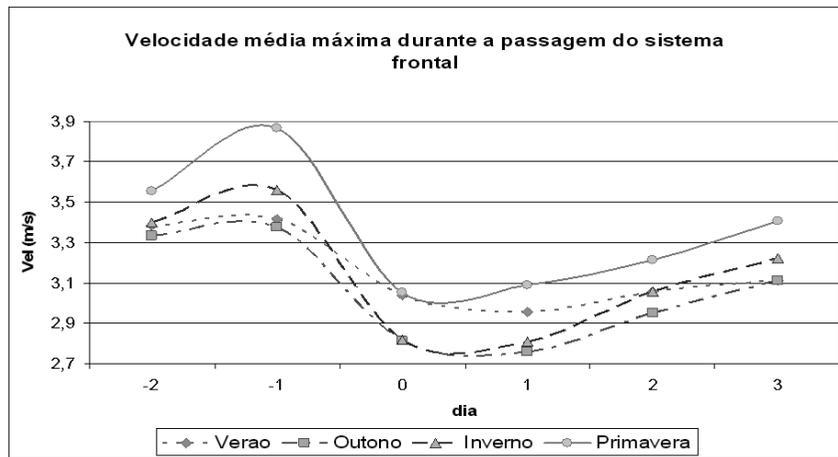


Figura 6. Climatologia da velocidade máxima média sobre a RMSP, durante a passagem do sistema frontal.

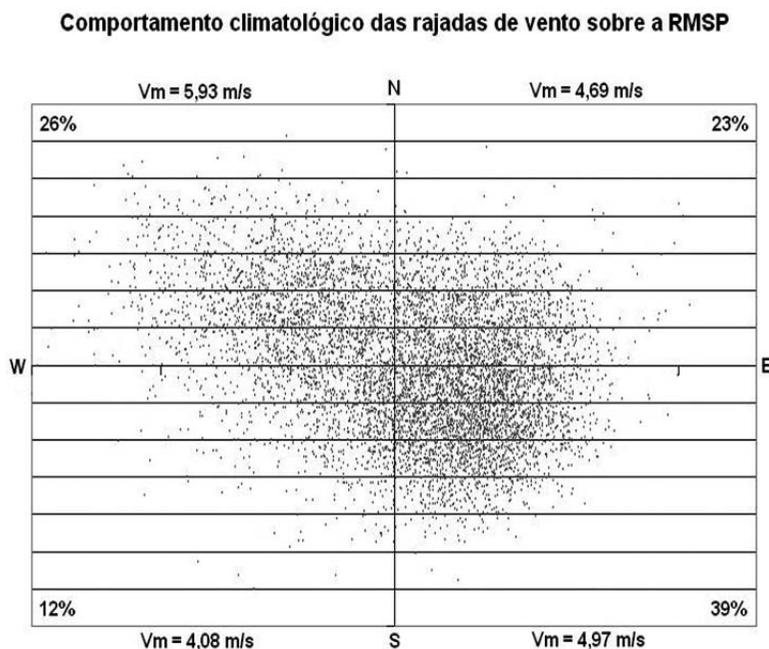


Figura 7. Esquema mostrando a distribuição climatológica das rajadas de vento sobre aRMSP.

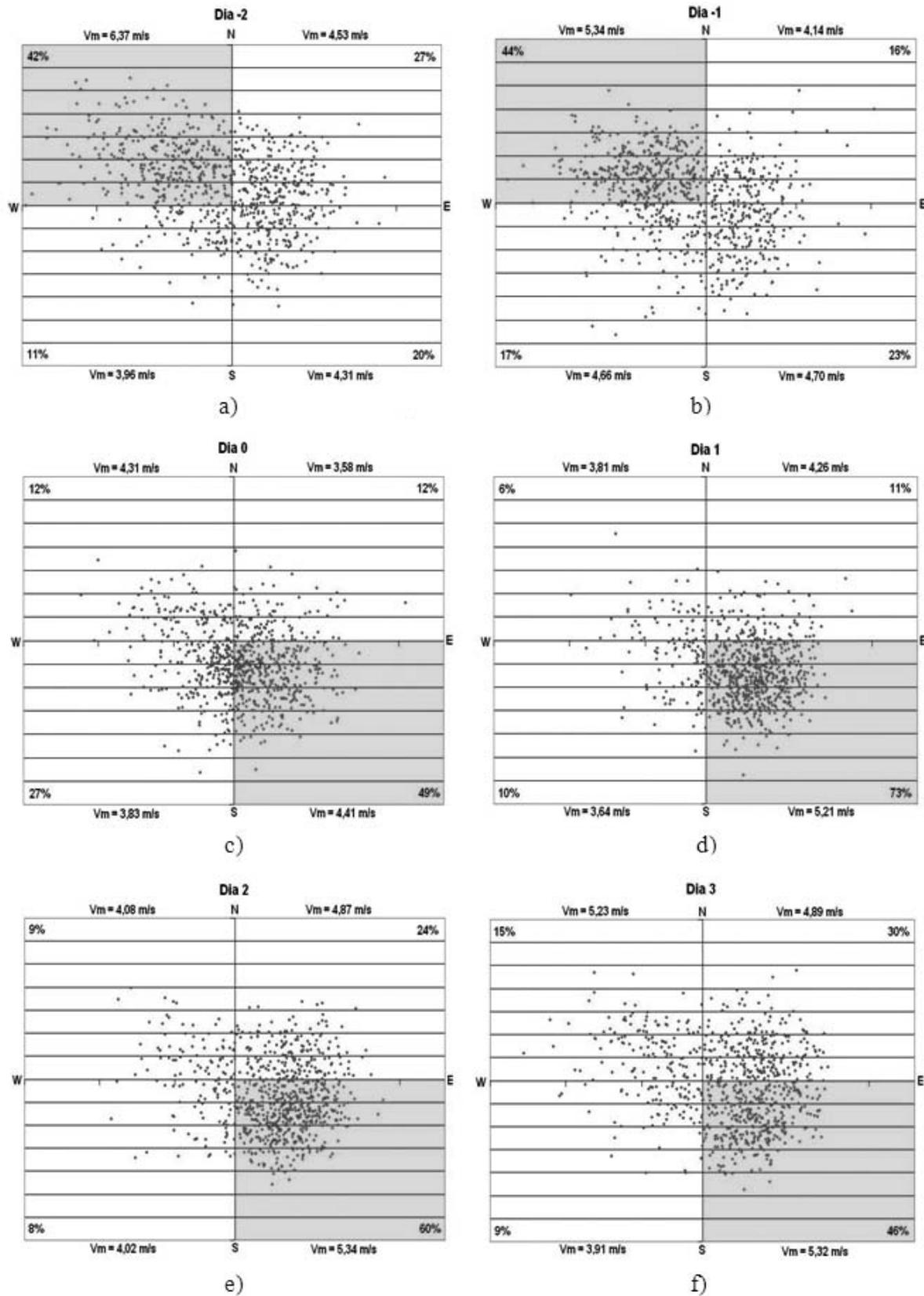


Figura 8. Esquema mostrando a evolução da direção e velocidade das rajadas de vento durante a passagem do sistema frontal, dois dias antes (a e b), na chegada (c), e nos três dias seguintes (d à f), respectivamente.

de sistemas frontais estende-se para latitudes mais próximas ao Uruguai.

Os mínimos em fevereiro e junho dão uma boa idéia de correlação com os períodos de estratificação na coluna d'água durante o verão e inverno, observado por Sebastian (2004). A maior ocorrência desses fenômenos na primavera, e a mínima no verão, concordam com as verificações de Rodrigues *et al.* (2004) e Andrade e Cavalcanti (2004).

O comportamento direcional do vento também foi próximo do esperado. O regime climatológico apresentou uma frequência maior para ventos de sudeste e nordeste (Figuras 4 e 7).

Durante a passagem das frentes frias, observou-se ventos de norte nos dias anteriores, a virada seguida pelo predomínio de sudeste nos dias seguintes (Figuras 5 e 8). Segundo Rodrigues *et al.* (2004), nos dias que antecedem a passagem da frente fria (Figuras 5a, 5b, 8a e 8b) são observados ventos de norte devido à predominância da alta subtropical do Atlântico Sul. Já Taljaard (1967) e Satyamurty *et al.* (1998) também associam a essa predominância o fluxo induzido pelo sistema de baixa pressão localizado sobre o oceano.

Na chegada do sistema frontal (Figuras 5c e 8c), observa-se a virada do vento de quadrante sudeste, induzido pelo sistema de alta pressão (anticiclone) pós-frontal, que indica a chegada

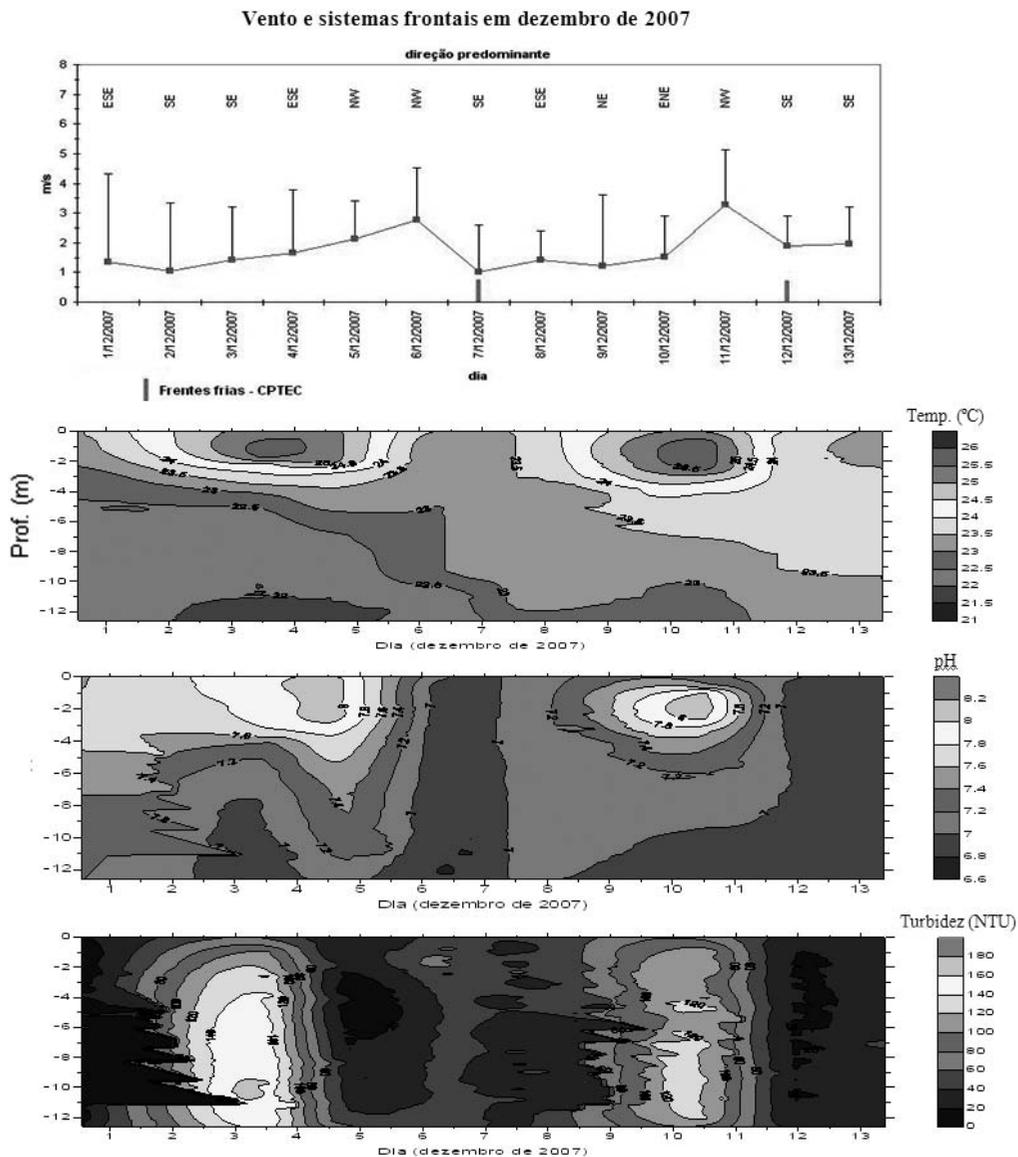


Figura 9. Dados meteorológicos e limnológicos (Braço Taquacetuba da represa Billings, RMSP) obtidos entre os dias 1 e 13 de dezembro de 2007. Os perfis de temperatura, pH e Turbidez caracterizam períodos de circulação e estratificação térmica relacionados com a presença ou ausência de frentes frias.

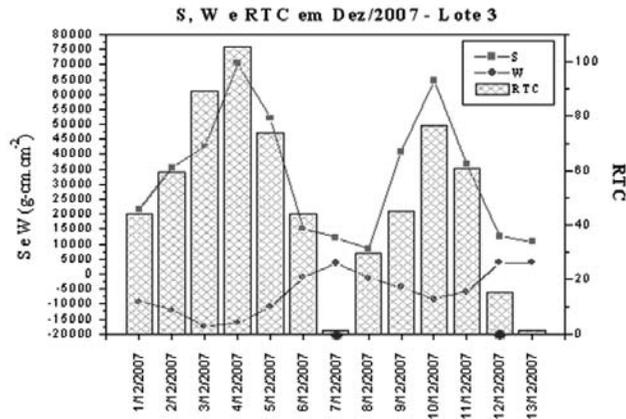


Figura 10 - S, W e RTC calculados para a os dados limnológicos (Braço Taquacetuba da represa Billings, RMSP) obtidos entre os dias 1 e 13 de dezembro de 2007. Os pontos sobre a abscissa representam a chegada do sistema frontal.

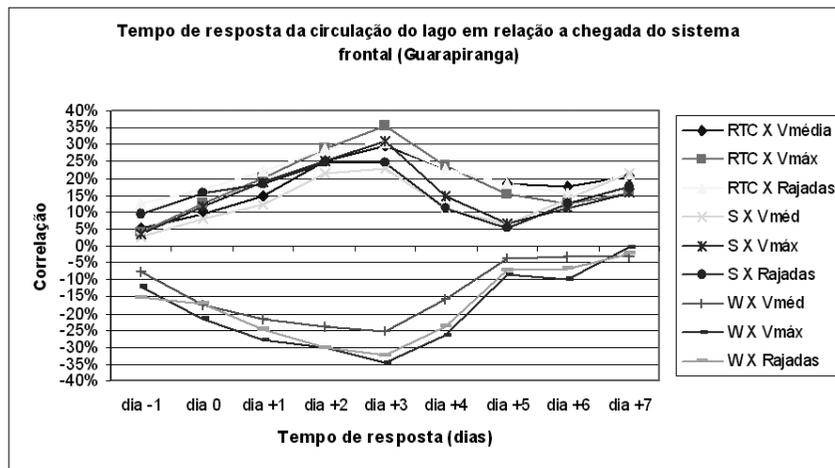


Figura 11 - Correlação entre a velocidade do vento e os parâmetros de estabilidade calculados para a represa Guarapiranga. O dia 0 representa a chegada do sistema frontal.

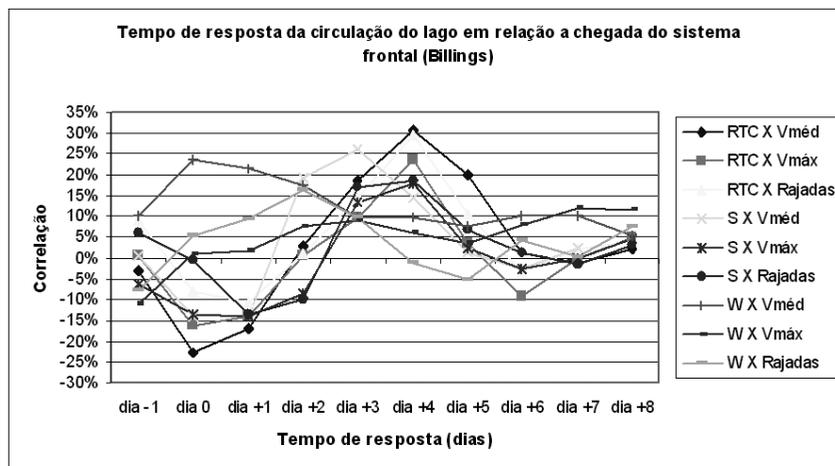


Figura 12 - Correlação entre a velocidade do vento e os parâmetros de estabilidade calculados para a represa Billings.

da frente. Este predomínio de vento sudeste prevalece até dois dias depois (Figuras 5d, 5e, 8d e 8e), e a partir daí ele começa a se dispersar (Figura 5f e 8f).

Com relação a velocidade do vento, ela mostrou-se maior nos dias anteriores, mínima na chegada, seguido de um aumento gradativo nos dias seguintes a passagem do sistema frontal. A estação que registrou as maiores velocidades foi a primavera (Figura 6).

Os reservatórios de abastecimento de água da RMSP estão submetidos às influências das frentes frias, que atingem o sudeste com ventos e precipitação, os quais interagem nos mecanismos de seu funcionamento e na sucessão fitoplanctônica, além de alterar a qualidade da água, implicando em modificações e adaptações no processo de tratamento para a potabilidade.

Em primeiro lugar, deve-se considerar que a presença das frentes frias produz uma turbulência na coluna de água, a qual depende da força e direção dos ventos (Figura 9). Essa turbulência pode ser mais efetiva se os ventos atingirem de 8 a 10 m/s. Ela reorganiza o reservatório através de uma mistura vertical, promovendo a desagregação do florescimento de cianobactérias, resuspendendo sedimento do fundo do reservatório alterando a concentração de oxigênio dissolvido e a turbidez.

Quando cessa o efeito da frente fria e os ventos diminuem para 2 ou 3 m/s, há uma estabilização da coluna de água, alteração na concentração de O_2 dissolvido nas camadas profundas (diminuição) e nos episódios de cor e odor associados à desoxigenação e liberação de H_2S do fundo, além de aumentar a concentração de manganês, o que promove degradação da qualidade.

Sendo assim, no que se diz respeito à indução turbulenta em reservatórios, pode-se dizer que os efeitos mais significativos da frente fria, com relação à atuação dos ventos, são nos 2 dias (até 3 dias) após a sua chegada. Isso porque, apesar do vento de norte nos dias anteriores ser mais forte, com média de 1,45 m/s, máxima média de 3,5 m/s e rajadas de 6,37 m/s, sua direção ainda é pouco definida (com 50% da velocidade média de nordeste, e 40% das rajadas de noroeste). Já nos dias seguintes, esse é predominantemente de quadrante sudeste (em torno de 90% da velocidade média, e 70% das rajadas), com média de 1,30 m/s, máxima média de 3 m/s e rajadas de 5,30 m/s, ou seja, com velocidade pouco inferior mas com o vento vindo sempre de um mesmo lugar.

É importante observar que os sistemas frontais podem ser mais ou menos intensos dependendo, dentre outros fatores, da época do ano em que atuam e da sua trajetória (mais ou menos próximo à costa). Além disso, essas velocidades podem ser ainda maiores sobre as represas, pois o vento medido na estação sofre influência do “dossel urbano”. Por isso, estudos como esse serão ainda mais precisos se forem utilizados dados de vento medidos

exatamente sobre os reservatórios, idéia a qual será abordada em trabalhos futuros.

Para as correlações, a represa Guarapiranga apresentou maiores valores no segundo e terceiro dia pós-frontal (Figura 11), e a represa Billings no terceiro e quarto dias (Figura 12). Esses valores representam o período médio de resposta entre o evento frente fria e sua máxima influência na circulação dos reservatórios.

A diferença nas profundidades das duas represas pode explicar as diferenças das interações climáticas-limnológicas constatadas nas análises de correlação. A represa Billings possui maior profundidade (25 m) em relação à represa Guarapiranga (13 m), o que pode acarretar num maior tempo de resposta (3 a 4 dias) aos fatores climáticos.

Ainda sobre a Billings, com respeito aos valores das correlações envolvendo W, estes não apresentaram os mesmos padrões de resposta à frente fria como S e RTC. Isto pode ser atribuído ao maior volume de água que uma maior profundidade possui. Desta forma, a periodicidade da influência dos fenômenos climáticos sobre o trabalho do vento (W) numa represa mais profunda é menor, como constatado para esta represa.

Vale ressaltar que, de maneira geral, os valores de correlação foram baixos, o que pode ser atrelado ao fato das medidas do vento não terem sido feitas exatamente no mesmo lugar das medidas limnológicas, como dito anteriormente.

Enfim, considerando a compatibilidade dos resultados encontrados aqui com outros obtidos por diferentes metodologias em estudos anteriores, pode-se dizer que a utilização do algoritmo para detecção de frentes, citado neste trabalho, pode ser considerada plausível para fins climatológicos, e para estudos limnológicos associados às represas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a estação meteorológica do IAG/USP, por fornecer os dados meteorológicos. M. A. Moraes agradece a Dr^a Michelle Simões Reboita pelos seus preciosos comentários e sugestões. Os autores agradecem a FAPESP e CNPq pelo apoio financeiro, e a prefeitura municipal de São Paulo (Contrato n 056/SVMA/2008).

6. BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE, K.; CAVALCANTI, I. F. A. Climatologia dos sistemas frontais e padrões de comportamento para o verão na América do Sul. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13., 2004, Fortaleza. *Anais...*Fortaleza: SBMET, 2004. 1 CD-ROM.
- ANDRADE, K. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul.** 2007. 187 f.

- Tese (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.
- ESCOBAR, G. C. J. Padrões sinóticos associados a ondas de frio sobre a cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.22, n. 2, p. 241-254, 2007.
- FEDOROVA, N.; CARVALHO, M. H. Processos sinóticos em anos de La Niña e de El Niño. Parte II: Zonas frontais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 15, n. 2, p. 57-72, 2000.
- GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface Cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, v. 119, n. 5, p. 1293–1302, 1991.
- HARTMANN, D.; MICHELSEN, M. L. **Intraseasonal Periodicities in Indian Rainfall**. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 46, n. 18, p. 2838-2862, 1989.
- JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. A Estatística dos transientes na América do Sul. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: SBMET, 2005. 1 CD-ROM.
- JUSTI DA SILVA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. A frequência de fenômenos meteorológicos na América do Sul: uma climatologia. CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...**Foz do Iguaçu: SBMET, 2002. 1 CD-ROM.
- LEMONS, C. F.; CALBETE, N. O. Sistemas Frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995. **Net**, 1996. Climanálise especial, edição comemorativa de 10 anos. MCT/INPE-CPTEC. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/products/climanalise/cliesp10a/14.html>. Acesso em 15 set. 2008.
- MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.
- OLIVEIRA, A. S. **Interações entre sistemas frontais na América do Sul e Convecção na Amazônia**. 1986. 134 f. Tese (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1986.
- REBOITA, M. S. **Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade**. 2008. 359 f.. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – IAG – USP, 2008.
- REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P. Relationship between the Southern Annular Mode and Southern Hemisphere Atmospheric Systems. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 48-55, 2009.
- RODRIGUES, M. L. G.; FRANCO, D.; SUGAHARA, S. Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.22, n. 2, p.135-151, 2004.
- SATYAMURTY, P.; MATTOS L. F. Climatological Lower Tropospheric Frontogenesis in the Midlatitudes Due to Horizontal Deformation and Divergence. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 6, p. 1355-1364, 1989.
- SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; SILVA DIAS, P. L. Tropics – South America. In : KAULY, D. J. AND VINCENT, D. **Meteorology of the Southern Hemisphere**. Boston: Meteorological Monograph 49, American Meteorological Society. 1998. p. 119-139.
- SEBASTIEN, N. Y. **Fenômenos climatológicos e hidrológicos e sua repercussão sobre a limnologia dos reservatórios de Barra Bonita-SP, Carlos Botelho (Lobo-Broa)-SP e Tucuruí - PA - Brasil**. 2004. 179 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, 2004.
- STECH, J. L.; LORENZETTI, J. A. The response of the South Brazil Bight to the passage of wintertime cold fronts. **Journal Geophysical Research**, v. 97, n. 66, p. 9507-9520, 1992.
- TALJAARD, J. J. Development, Distribution and Movement of Cyclones and Anticyclones in the Southern Hemisphere During the IGY. **Journal of Applied Meteorology**, v. 6, n. 6, p. 973-987, 1967.
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; ARANTES JUNIOR, J. D.; TUNDISI, J. E.; MANZINI, N. F.; DUCROT, R. The response of Carlos Botelho (Lobo, Broa) reservoir to the passage of cold fronts as reflected by physical, chemical, and biological variables. **Brazilian Journal of Biology**, v. 64, n. 1, p. 177-186, 2004.
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T.; ABE, D. S. Climate monitoring before and during limnological studies: a needed integration. **Brazilian Journal of Biology**, v. 67, n. 4, p.795-796, 2007.
- TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Limnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p. 66-93.