

## Variação do Nível do Reservatório de Sobradinho e seu Impacto Sobre o Clima da Região

Magaly de Fátima Correia

Departamento de Ciências Atmosféricas – CCT/UFGG  
magaly@dca.ufpb.br

Maria Assunção Faus da Silva Dias

Departamento de Ciências Atmosféricas – LAG/USP  
mafsdia@model.iag.usp.br

Recebido: 25/03/02 - revisão: 07/06/02 - aceito: 05/11/02

### RESUMO

*Experimentos numéricos realizados com o RAMS e análises de dados meteorológicos e hidrológicos são usados para avaliar o impacto da variação no nível do reservatório de Sobradinho sobre os processos meteorológicos e variáveis climáticas na região do lago. A represa tem capacidade de armazenar 34,1 bilhões de metros cúbicos de água, mas pode operar com apenas 35% do seu volume útil. Periodicamente, extensas faixas de terra anteriormente submersas são expostas em torno do lago. Um conjunto de fatores é responsável pelo comportamento climatológico na área da represa. Excluída a influência do escoamento de grande escala, uma combinação de fatores tais como a geometria do vale, a configuração das margens do reservatório, o relevo e a diversidade no uso da terra em torno do lago são responsáveis pela geração de um sistema de circulações complexo que inclui ventos de vale-montanha, anabáticos-catabáticos e brisas lacustres e terrestres. Os resultados mostram que a variação no nível do lago e consequente contração e expansão da área alagada produz variações espaciais significantes na direção e intensidade do vento, temperatura e umidade atmosféricas.*

**Palavras-chave:** nível de reservatório; impacto climático; Sobradinho.

### INTRODUÇÃO

O Lago de Sobradinho está situado na região do Submédio do rio São Francisco, a cerca de 40 km da cidade de Petrolina, PE. A represa em sua cota máxima (máxima operativa normal), 392,50 m, forma um lago de aproximadamente 4214,31 km<sup>2</sup>, com 280 km de comprimento e largura que varia entre 5 e 50 km. Tem capacidade de armazenar 34 bilhões de m<sup>3</sup> de água. A cota mínima de operação é de 380,50 m.

O objetivo inicial da construção de Sobradinho era a regularização plurianual do curso do rio São Francisco, elevando a vazão mínima de 700 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> para cerca de 2060 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, garantindo assim, o funcionamento contínuo das usinas à jusante, particularmente a de Paulo Afonso. Entretanto, com a ocorrência de uma grande cheia no rio São Francisco nos primeiros meses de 1979, foi constatada a necessidade de local 30% do volume útil do reservatório para controle de enchentes.

Tendo sido construído com o objetivo prioritário de gerar energia elétrica, ao adquirir também a função de controlar cheias, Sobradinho passou a operar com finalidades tecnicamente conflitantes. No controle de cheias é necessário deixar disponíveis volumes vazios e ter o reservatório com seu nível mínimo no início da fase de vazões afluentes

altas, usando essa disponibilidade para limitação das descargas (CHESF, 1979). Tendo por finalidade gerar energia elétrica, o reservatório deve ser mantido bem próximo de sua cota máxima operativa, com capacidade total de armazenamento, o que é alcançado através da liberação da descarga mínima estritamente necessária ao funcionamento das usinas à jusante.

As características de operação de um reservatório podem representar uma fonte adicional de variação dos elementos climáticos, particularmente vento, umidade e temperatura. Cada reservatório tem um regime próprio de operação em função do volume de água disponível no curso represado. A variação da vazão com a época do ano (sazonalidade), bem como a necessidade do ajuste de descarga em função dos excedentes armazenados em épocas de cheias e de complementação de descargas em situações de estiagens, impõe oscilações no nível do reservatório e no fluxo à jusante.

Os maiores deplecionamentos do reservatório estão associados com períodos de grandes estiagens e coincidem com a época seca (maio a setembro) na região. No ano de 1989, foi registrado um dos maiores deplecionamentos do reservatório, quando o espelho d'água sofreu uma grande redução atingindo o valor de 2395,9 km<sup>2</sup> (IBGE, 1994). Na época de cheias no rio é necessário liberar uma quantidade

maior de água (maior deflúvio) antecipadamente, objetivando a segurança da própria represa e a prevenção de inundações à jusante.

Resultados de um estudo ambiental realizado na Bacia do rio São Francisco (IBGE, 1994) com dados referentes ao período de 1977 a 1989 mostram que o comportamento da relação deflúvio-aflúvio em Sobradinho é maior durante sete meses, entre maio e novembro (período seco), quando a represa libera mais água do que recebe. No período chuvoso ocorre acúmulo de água, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro.

O principal objetivo deste trabalho é avaliar as alterações nos processos meteorológicos e hidrológicos associados à variação no nível do lago. Com esse propósito foram analisados resultados de experimentos numéricos com alta resolução em conjunto com análises de dados coletados em estações situadas nas margens do reservatório.

A aplicação do modelo RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) neste estudo tem papel fundamental nas análises, pois permite a realização de simulações tridimensionais com uma grande densidade de pontos (Pielke et al., 1992). Esse método possibilita obter informações detalhadas do comportamento meteorológico em terrenos complexos já que permite, por exemplo, avaliar a contribuição relativa de várias forçantes da circulação atmosférica tais como, vale-montanha, lago, e descontinuidade na cobertura e tipo de solo, o que seria impossível verificar por meio de medidas observacionais, ou através de simulações numéricas com baixa resolução.

## Descrição do modelo numérico

O modelo numérico usado neste estudo é o Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), desenvolvido a partir de um modelo de mesoescala (Pielke, 1974) e de um modelo de nuvens (Trípoli & Cotton, 1982). É um código numérico altamente versátil cuja estrutura permite simulações com diferentes graus de complexidade.

O RAMS é um modelo tridimensional não hidrostático, com coordenada vertical do tipo que segue a topografia. Ele inclui processos físicos em superfície, através de uma camada de solo e uma camada superficial com vegetação, processos turbulentos, parametrização da convecção por *cumulus* e dos processos microfísicos das nuvens, radiação de ondas curtas e ondas longas. É, portanto, um modelo constituído por um módulo atmosférico e um módulo de superfície que interagem entre si por meio do fornecimento de condições de contorno adequadas. No modelo, a superfície é constituída de três classes: água, solo sem vegetação e superfície vegetada.

O esquema de parametrização dos fluxos de calor e umidade no interior do solo sem vegetação foi desenvolvido por Tremback & Kessler (1985), a partir de um modelo

de multicamadas proposto por Mahrer & Pielke (1977) e MacCumber & Pielke (1981). As equações prognósticas de temperatura e umidade do solo são derivadas da equação de difusão resolvida explicitamente. As equações e estrutura do modelo descritas de forma detalhada podem ser encontradas em Avissar & Pielke (1989) e Pielke et al. (1992).

## ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

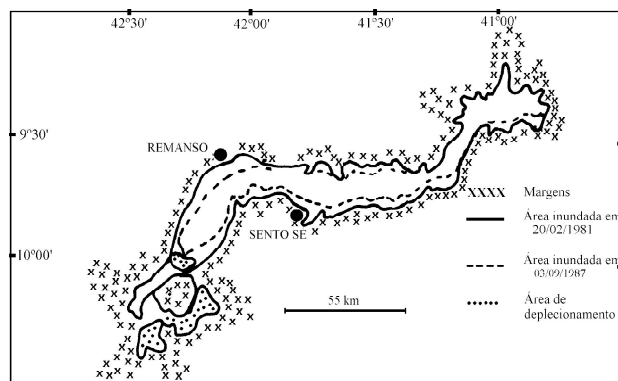
### Condições iniciais

A especificação tanto da topografia quanto da ocupação do solo, incluindo o tipo de vegetação, foi feita com base em arquivos de dados (resolução de 1 km) obtidos por meio de radiômetros de altíssima resolução (Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR) disponíveis para o RAMS. O perfil de umidade do solo foi considerado uniforme dentro do domínio e o valor constante de 0,40 da saturação foi escolhido com base em resultados de testes de sensibilidade efetuados com o modelo (Correia, 2001).

As alterações causadas pela mudança na dimensão da área inundada decorrente da variação no nível da represa foram avaliadas através das simulações de cota alta (CA) e de cota baixa (CB). A diferença básica na configuração dos dois experimentos consiste nas condições da superfície. Características como percentagem de terra e a textura do solo, definidas inicialmente para cada célula de grade, são mantidas constantes durante todo o período de simulação.

A forma irregular, a grande extensão e a profundidade variada do reservatório fazem com que a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto represente a única possibilidade de obter dados precisos das áreas de inundação da represa. O canal MSS-7 do satélite Landsat permite o máximo de contraste entre áreas cobertas por água e áreas não atingidas pela inundação. É possível, com o uso de imagens nesse canal, identificar as áreas atingidas pelo alagamento nos períodos de cheia, bem como quantificar toda a extensão afetada pelo deplecionamento em épocas de estiagem. Imagens do lago de Sobradinho obtidas em períodos de cheia e de estiagem foram usadas como fonte de dados no processo de geração dos arquivos contendo informações sobre a área inundada dentro do domínio analisado, para representar situações de cota alta e cota baixa, respectivamente.

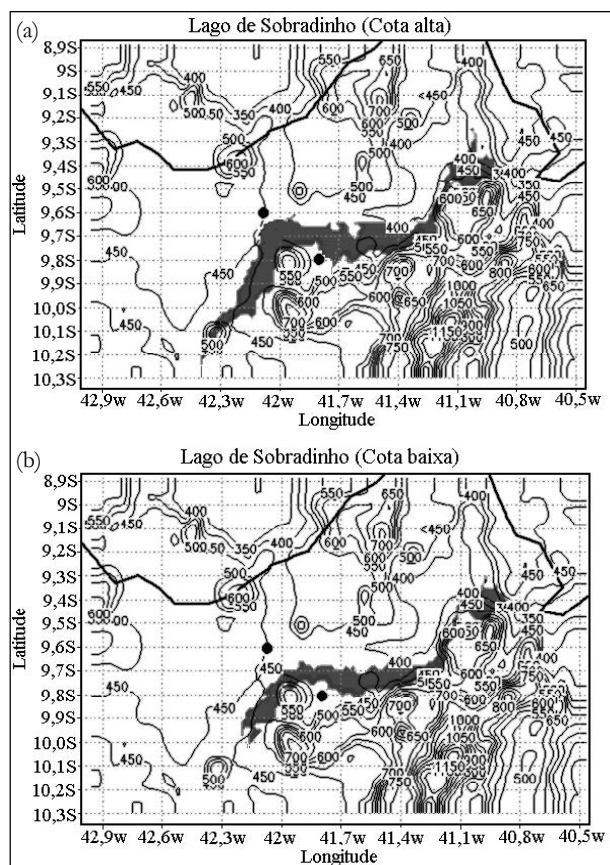
As áreas alagadas nos dias 20/02/1981 (cota alta) e 03/09/1987 (cota baixa) e sua diferença podem ser vistas na Figura 1 obtida com a sobreposição das duas imagens. Tendo como referência a localização de Remanso (9°36'S - 42°6'W), é possível notar que o deslocamento da linha d'água entre o valor da cota do lago em 03/09/87 (385,73 m) e em 20/02/1981 (390,67 m) foi de 8 km, aproximadamente. Tomando agora como referência a localidade de Sento Sé (9°48'S, 41°48'W) esse deslocamento é bem menor, indicando que o deplecionamento varia em torno do lago.



**Figura 1.** Variação do limite da área inundada do lago de Sobradinho. A linha contínua representa o contorno do lago em 20/02/81 (cota alta) e a linha tracejada representa o contorno do lago em 03/09/87 (cota baixa). Os círculos cheios indicam a localização de Remanso (9,6°S-42,1°W) e Sento Sé (9,8°S-41,8°W); fonte: adaptado de IBGE (1994).

Os arquivos de dados necessários a inicialização do modelo contendo informações da região inundada para ambas as situações foram elaborados a partir das imagens do Landsat, através da sobreposição de grades com quadriculas de 2 km x 2 km. Foi possível determinar a distribuição de terra e água no domínio numérico e delimitar com grande precisão as áreas atingidas pelo alagamento. A fração de terra em cada célula da grade é representada por valores variando entre zero (só água) e um (só terra). Esses arquivos externos são constituídos por matrizes bidimensionais, cobrindo todos os pontos de grade do domínio e foram inseridos no modelo através do módulo *ruser.f*. O gradiente de temperatura entre o lago e as terras circunvizinhas foi considerado nulo no início da simulação. O valor de 26° Celsius da temperatura à superfície foi usado com base em valores médios para o mês de junho na região do lago.

O modelo foi integrado por 24 horas iniciando às 0600 UTC com uma estrutura termodinâmica homogênea, utilizando dados de uma sondagem efetuada em Petrolina – PE estendidos para todo o domínio. Visando eliminar a influência do escoamento básico e realçar os efeitos das forçantes em superfície com o objetivo de analisar o comportamento das circulações locais induzidas termicamente, o vento da sondagem foi considerado nulo. A influência das forçantes superficiais é isolada considerando situações meteorológicas de céu claro, em terreno complexo. A condição de céu claro é garantida mantendo desativado o esquema de microfísica do modelo e utilizando a parametrização de radiação proposta por Mahrer & Pielke (1977). Essa parametrização permite o cálculo dos fluxos de radiação de ondas curtas e de ondas longas em superfície ignorando as fases líquida e sólida da água na atmosfera; apenas o vapor d'água é considerado. O domínio numérico é representado por incrementos de  $\Delta x = \Delta y = 2$  km com 140 pontos na direção zonal e 80 pontos na direção meridional, co-



**Figura 2.** Domínio numérico com o lago de Sobradinho e a topografia (m): (a) cota alta (CA) e (b) cota baixa (CB). O intervalo dos contornos é de 50 metros. Os círculos cheios indicam a localização de Remanso (9,6°S-42,1°W) e Sento Sé (9,8°S-41,8°W).

brindo uma área de (160 x 280) km<sup>2</sup>. A Figura 2 mostra o Lago de Sobradinho e a topografia do domínio simulado conforme assimilados pelo modelo RAMS, nas condições de CA e CB, respectivamente. A grade vertical é constituída por 30 níveis com  $\Delta z$  inicial de 50 metros, aumentando para cima na razão de 1,2 até atingir 1 km. A partir desse nível, o  $\Delta z$  é constante até o topo do modelo.

## Resultados

As Figuras 3 e 4 mostram a variação temporal do vento horizontal para as localidades de Remanso (9,6°S-42,1°W) e Sento Sé (9,8°S-41,8°W) obtida com as simulações de cota alta (CA) e cota baixa (CB). As duas localidades estão situadas em margens opostas do lago e refletem bem as mudanças ambientais decorrentes da variação no volume da água do reservatório.

Nos resultados da simulação de CA, a variação diária do vento em Remanso (Figura 3a) é bem definida, mostrando nitidamente o escoamento no sentido lago-terra entre

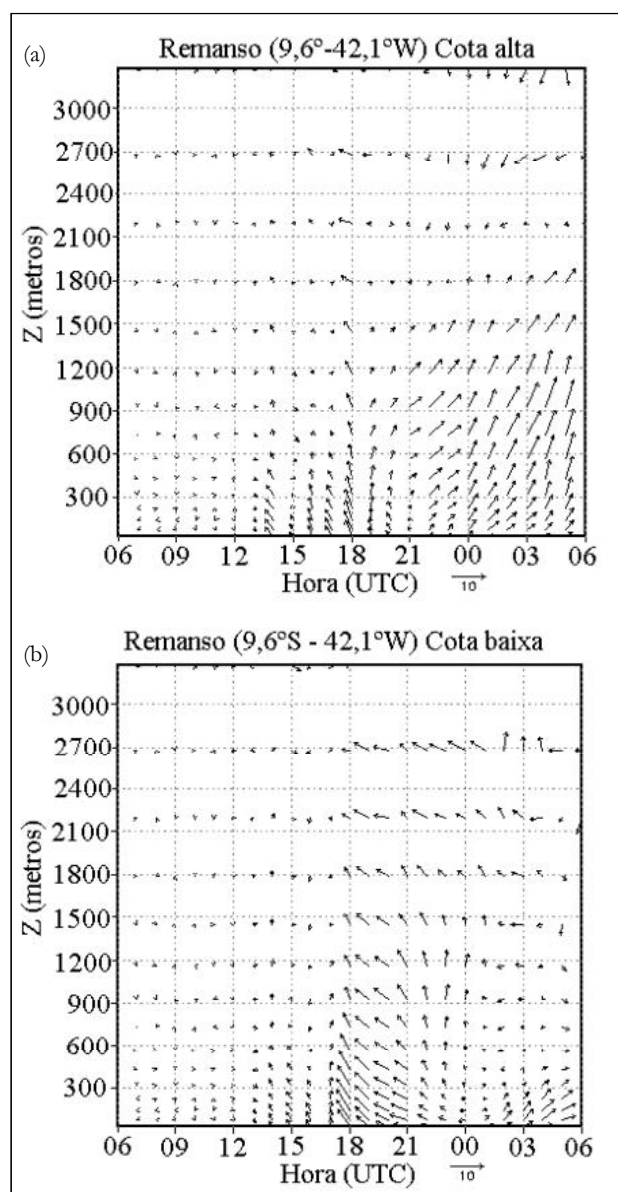


Figura 3. Variação diária do vento horizontal ( $\text{m s}^{-1}$ ) na localidade de Remanso ( $9,6^{\circ}\text{S}-42,1^{\circ}\text{W}$ ): (a) simulação de cota alta (CA) e (b) simulação de cota baixa (CB). A escala do vento é vista abaixo de cada ilustração. A hora local (HL) pode ser obtida da diferença  $\text{HL} = \text{UTC} - 3$  horas.

14:00 UTC (11:00 HL) e 20:00 UTC (17:00 HL), o que caracteriza a formação da brisa lacustre. A circulação inversa, entre 2100 UTC (18:00 HL) e 06:00 UTC (03:00 HL), com orientação no sentido terra-lago, caracteriza a formação da brisa terrestre. Na simulação de CB (Figura 3b), a redução na dimensão do lago, decorrente do deplecionamento, provoca um retardamento na formação da circulação direta da brisa. Esse efeito é produzido pelo aumento da distância entre Remanso e a borda do lago, que é de 9 km, aproximadamente.

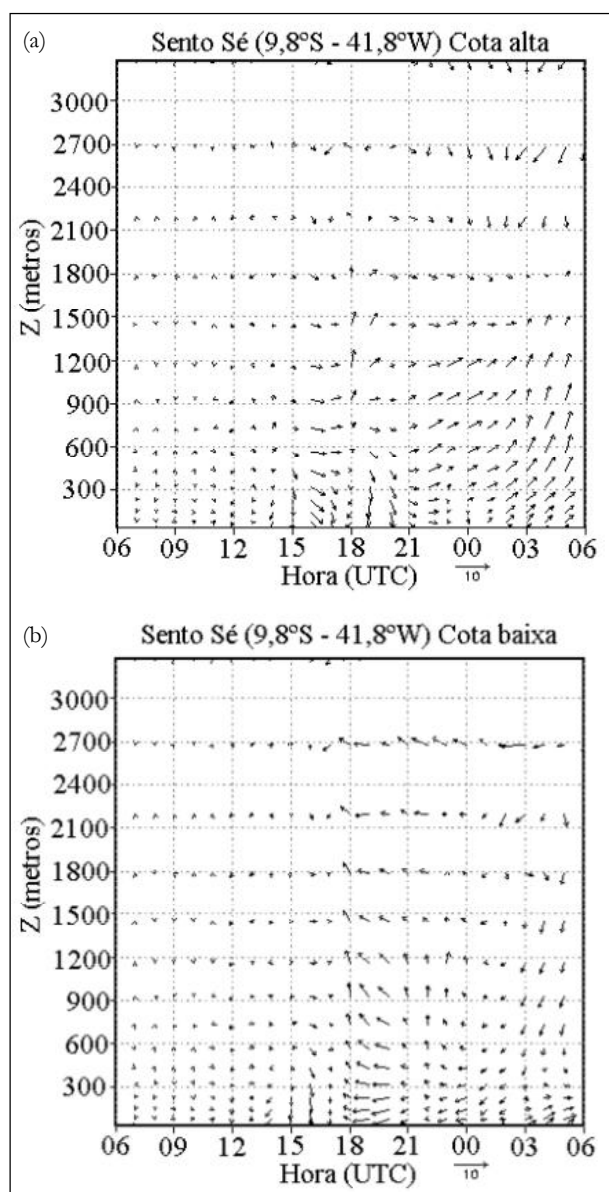
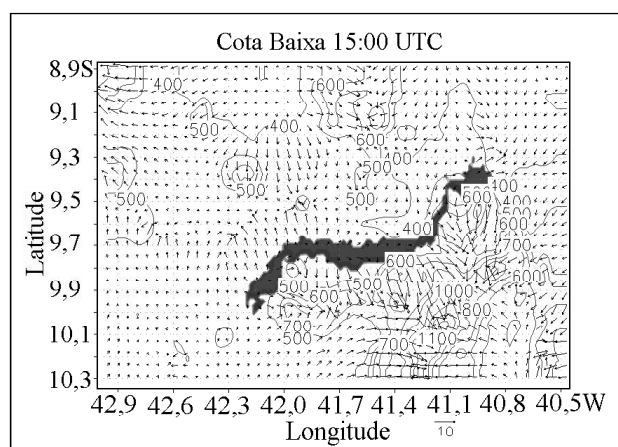


Figura 4. Variação diária do vento horizontal ( $\text{m s}^{-1}$ ) na localidade de Sento Sé ( $9,8^{\circ}\text{S}-41,8^{\circ}\text{W}$ ): (a) simulação de cota alta (CA) e (b) simulação de cota baixa (CB). A escala do vento é vista abaixo de cada ilustração. A hora local (HL) pode ser obtida da diferença  $\text{HL} = \text{UTC} - 3$  horas.

No caso da localidade de Sento Sé, situada ao sul do lago, a circulação da brisa lacustre é bastante afetada pelo efeito da topografia. O escoamento induzido pelo maior aquecimento do ar próximo às encostas gera uma componente no sentido vale-montanha durante o dia, dando origem aos ventos anabáticos que são dominantes principalmente nas situações de CB. Essa contribuição é evidente na Figura 5 que mostra o vento horizontal para o primeiro nível do modelo (24 metros), altitude mínima para a qual há estabilidade numérica na presença da topografia da região.



**Figura 5. Campo do vento horizontal ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 24 m da superfície e topografia (m). Simulação de cota baixa (CB) às 1500 UTC. A escala do vento é vista abaixo da ilustração. A hora local (HL) pode ser obtida da diferença  $\text{HL} = \text{UTC} - 3$  horas.**

A evolução do campo do vento nas simulações de cota alta (CA) e cota baixa (CB) é ilustrada na Figura 6. Mecanismos físicos distintos são responsáveis pelas dissimilaridades observadas nas configurações do escoamento.

No horário das 1500 UTC (Figura 6a e 6d), o controle da topografia sobre as circulações é evidente enquanto que as modificações impostas pelo efeito do lago são quase inexistentes. Nesse horário, os resultados obtidos com as duas simulações não mostram diferenças significativas.

Às 1800 UTC (Figura 6b), o controle orográfico sobre as circulações locais ainda é visível. Entretanto, as modificações impostas pelo efeito do lago são facilmente identificadas na configuração do escoamento. É possível observar também um outro mecanismo que influencia o comportamento da circulação no vale. Apesar das dissimilaridades entre os resultados obtidos com as duas simulações, é evidente que os escoamentos têm configurações similares no setor noroeste do domínio, onde são visíveis a intensificação e o direcionamento do escoamento no sentido SW-NW devido à canalização forçada pelas encostas.

A área afetada pela brisa lacustre (BL) na simulação de CA é visivelmente mais extensa. A circulação intensificada pela interação com os ventos anabáticos atinge distâncias maiores do que aquelas obtidas com a simulação de CB. Isso indica que o aumento na razão de propagação da frente da brisa está associado com o crescimento da área alagada. Esse resultado é coerente com as conclusões obtidas por Neumann & Mahrer (1975) em um estudo sobre brisas em lagos circulares.

Por outro lado, na região situada ao norte da latitude de  $9,6^{\circ}\text{S}$  e a leste da longitude de  $41,7^{\circ}\text{W}$ , os ventos são visivelmente mais intensos e predominantemente de leste-sudeste na simulação de CB. Esse comportamento

é atribuído principalmente à influência da mudança na configuração das bordas do lago em decorrência da variação no nível do reservatório, o que afeta substancialmente a direção do escoamento. Os efeitos desse fator em conjunto com a influência da topografia alteram o padrão do vento no vale. Esse impacto é bastante evidente nas regiões situadas ao sul do reservatório. A Figura 7 mostra a variabilidade na direção do vento na latitude de Sento Sé ( $9,8^{\circ}\text{S}$ ) em situações de CA e CB.

## Temperatura do ar

A influência da variação do nível do reservatório no comportamento da temperatura do ar é ilustrada na Figura 8 pela diferença entre os campos obtidos com as duas simulações (CA-CB). Ela mostra tanto queda quanto aumento nos valores dessa variável na área do lago. Visivelmente, a temperatura diminui nas regiões atingidas pela BL mais intensa em virtude do aumento da área inundada, conforme pode ser comprovado pelo campo do vento obtido da diferença entre as simulações CA e CB (Figura 9). É possível observar toda a área afetada pela BL, bem definida no horário das 1800 UTC. Por outro lado, é observado um aumento da temperatura nas áreas em que a intensificação do escoamento não está associada diretamente com o efeito da elevação na cota do lago, a exemplo da região mencionada na seção anterior, na qual o vento é mais intenso na simulação de cota baixa (CB) e cuja direção é fortemente afetada pela mudança na configuração das bordas do lago. O controle da topografia é determinante.

Com a redução da área alagada decorrente do abaixamento do nível do reservatório, tem-se um aumento do fluxo de calor sensível em superfície e conseqüentemente, uma maior disponibilidade de energia para aquecer a atmosfera.

## Razão de mistura (umidade atmosférica)

A razão de mistura foi escolhida para avaliar as possíveis mudanças na umidade do ar por se tratar de um elemento meteorológico de grande aplicação prática. Seu valor não muda com alterações na temperatura ou na pressão atmosférica, a exemplo da umidade relativa, podendo ser usado para detectar quando os aumentos ou reduções na umidade são produzidos por massas de ar provenientes de outras regiões.

Similarmente à temperatura do ar, o aumento ou queda nos valores dessa variável está diretamente relacionado com as mudanças na intensidade e direção do escoamento, provocadas pela ampliação ou redução da área alagada. Equivalentemente, há um aumento da razão de mistura em toda a área na qual o aumento na cota do reservatório contribuiu para intensificar a circulação da BL (Figura 10).

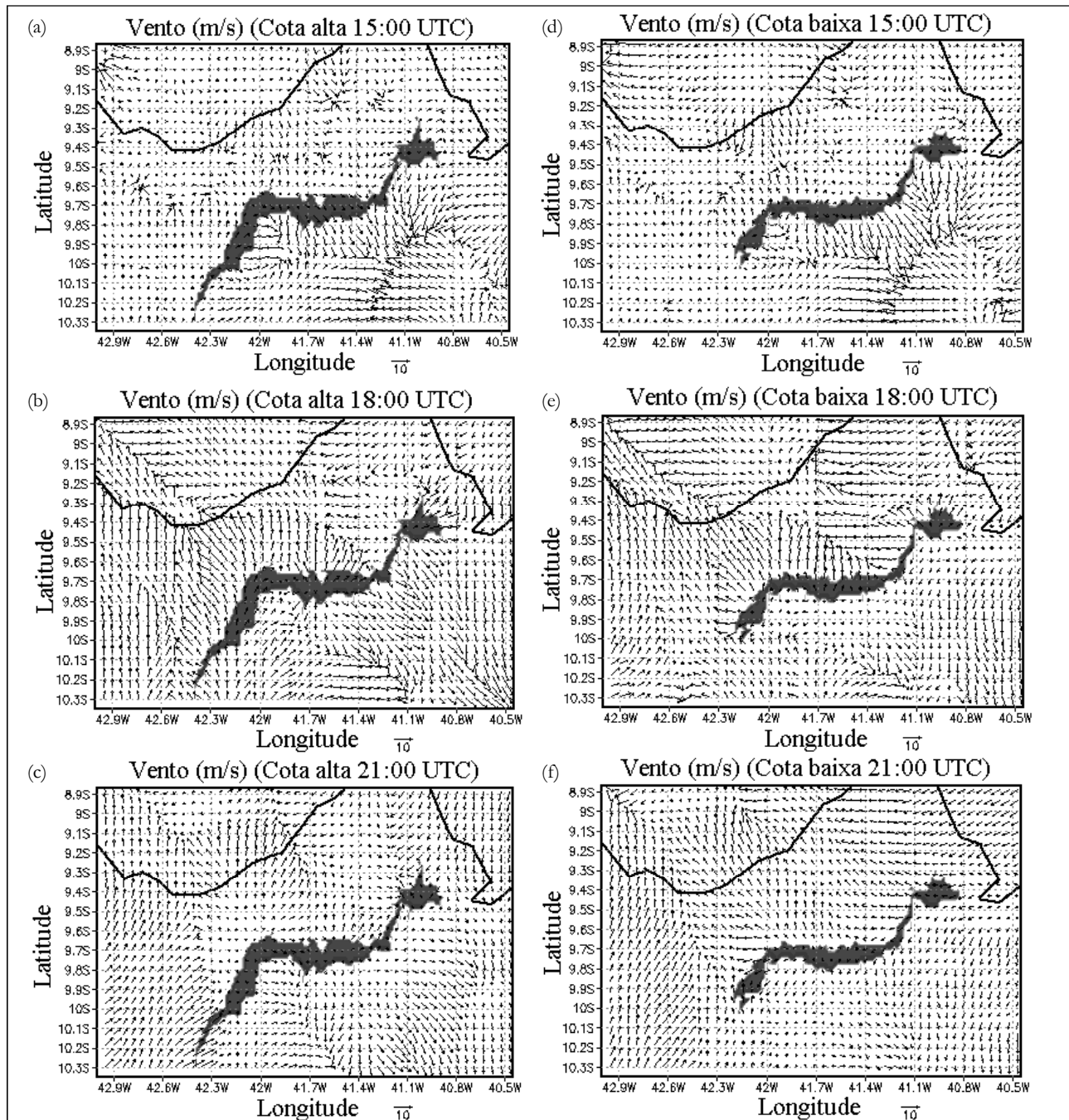


Figura 6. Campo do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) a 24 m da superfície. Simulação de cota alta (CA): (a) 1500 UTC; (b) 1800 UTC; (c) 2100 UTC. Simulação de cota baixa (CB): (d) 1500 UTC; (e) 1800 UTC; (f) 2100 UTC. A escala do vento é vista abaixo de cada ilustração. A hora local (HL) pode ser obtida da diferença  $\text{HL} = \text{UTC} - 3$  horas.

### Estrutura da camada limite planetária

Visando ilustrar melhor as condições meteorológicas, próximas e acima do lago, seções verticais da componente zonal ( $u$ ) e da temperatura potencial ( $\theta$ ) ao longo da latitude de  $9,7^\circ\text{S}$  são mostradas na Figura 11. Essa latitude foi selecionada por incluir o maior trecho da área inundada pelo

lago, compreendido entre as longitudes de  $41,2$  e  $42,1^\circ\text{W}$ , conforme pode ser visto na Figura 2.

A divergência da componente zonal sobre o lago, associada com a circulação da BL, é visível apenas na simulação de CA (Figura 11a). É evidente o domínio das circulações induzidas pelas encostas. A interação entre a BL e o escoamento anabático (montanha acima) é a causa da com-

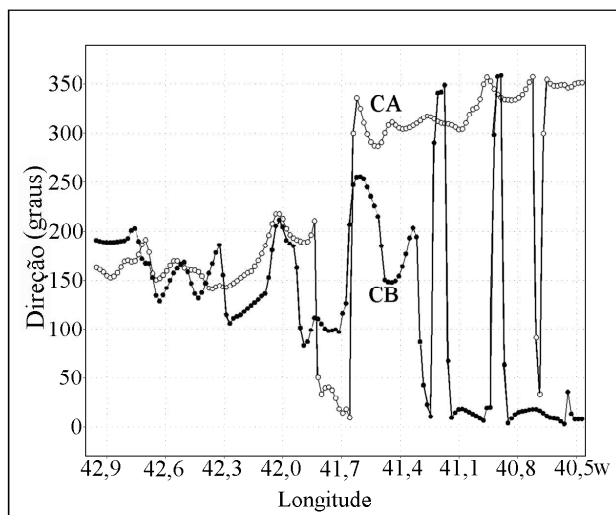


Figura 7. Direção do vento (graus) para as simulações de cota alta (CA) e cota baixa (CB) na latitude de 9,8°S, às 1800 UTC. A hora local (HL) pode ser obtida da diferença  $HL = UTC - 3$  horas.

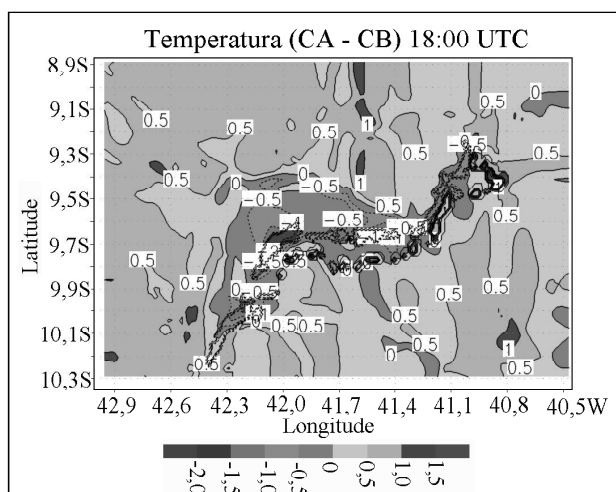


Figura 8. Campo da temperatura do ar (°C) a 24 m da superfície, às 1800 UTC (1500 HL), resultante da diferença entre as simulações de cota alta (CA) e cota baixa (CB).

ponente zonal mais intensa observada no lado leste do lago na simulação de CA.

Camadas de mistura atmosférica bem desenvolvidas são observadas sobre o vale nos campos das duas simulações (Figura 11b e 11d).

Na situação de CB, com a redução na área do espelho d'água, margens anteriormente submersas surgem como grandes extensões de terra. Esse deplecionamento causa um impacto na atmosfera que é facilmente detectado no campo de  $\theta$  (Figura 11d) pelo aumento no valor da temperatura potencial em torno de 41,6°W. O contraste térmico produzido no local gera um escoamento secundário para leste,

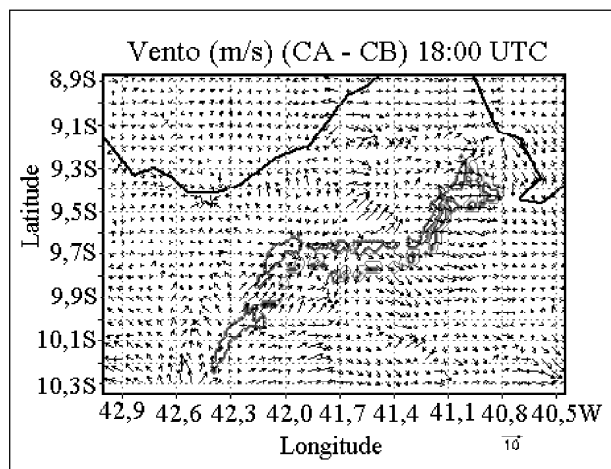


Figura 9. Campo do vento ( $m s^{-1}$ ) a 24 m da superfície, às 1800 UTC (1500 HL), resultante da diferença entre as simulações de cota alta (CA) e cota baixa (CB).

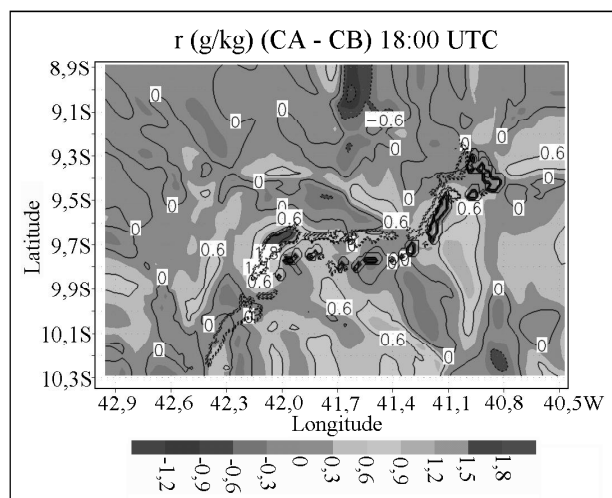


Figura 10. Campo da razão de mistura ( $g kg^{-1}$ ) a 24 m da superfície, às 1800 UTC (1500 HL), resultante da diferença entre as simulações de cota alta (CA) e cota baixa (CB).

como pode ser visto no campo da componente zonal (Figura 11c).

## ANÁLISE DE DADOS OBSERVADOS

### Nível do reservatório de Sobradinho

As imagens do Landsat obtidas em períodos distintos, utilizadas como fonte de dados na realização das simulações de CA e CB, permitiram avaliar o efeito da variação do nível do reservatório sobre os processos hidrometeorológicos locais. Por outro lado, essas informações evidenciam a importância do controle da grande escala no regime climático da

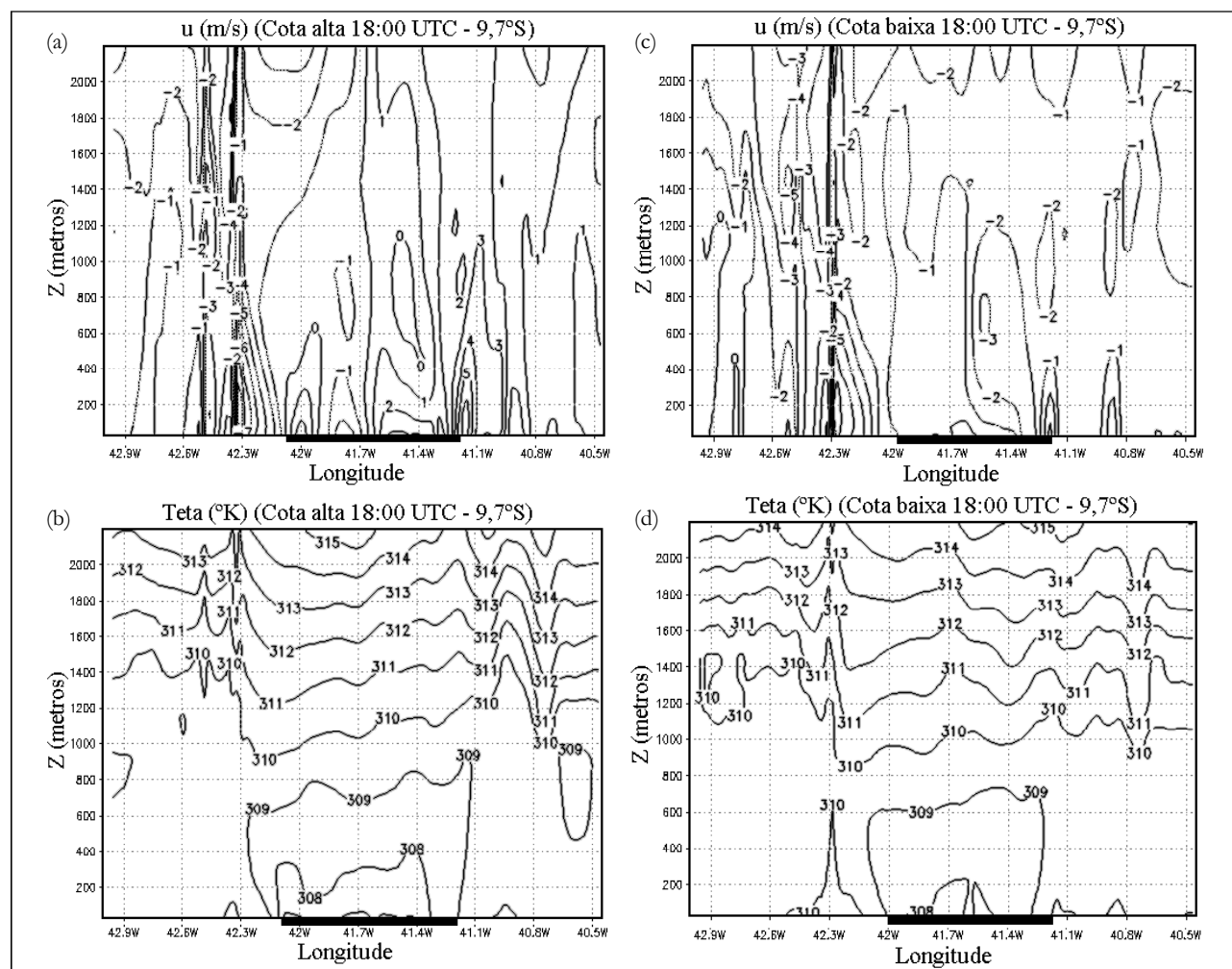


Figura 11. Corte transversal da componente zonal do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) e da temperatura potencial ( $^{\circ}\text{K}$ ) na latitude de  $9,7^{\circ}\text{S}$ , às 1800 UTC (1500 HL), resultante da simulação de cota alta (CA): (a) e (b), e de cota baixa (CB): (c) e (d). A barra no eixo das abscissas indica a posição do lago. Valores positivos (negativos) em (a) e (c) representam componente de oeste (leste).

bacia hidrográfica e, conseqüentemente, no sistema operacional da represa.

Dados médios diários do nível do reservatório de Sobradinho para o período de 1981 a 1989, provenientes da CHESF, foram usados para avaliar o grau de variabilidade na cota do lago e identificar possíveis relações com influências sazonais e com o regime de operação da represa.

A Figura 12 mostra a variação do nível médio anual do reservatório de Sobradinho no período de 1981 a 1989 e o valor das cotas máxima e mínima atingidas em cada ano. Os meses nos quais foram registrados os valores extremos também estão indicados na figura.

São evidentes as pequenas variações interanuais no nível médio anual do reservatório no período de 1981 a 1986 e a queda substancial no nível do reservatório em 1986. Variação interanual pequena aliada a baixos valores do nível médio anual caracteriza o período subsequente. Esse comportamento reflete a grande influência do regime de operação de Sobradinho e as conseqüências negativas quando as chu-

vas são insuficientes para elevar a cota do reservatório a níveis satisfatórios.

No mês de julho de 2001, na recente crise energética, agravada pela ocorrência de chuvas insuficientes em toda a bacia do rio São Francisco, Sobradinho estava com 16,7% de seu volume útil, o que corresponde à cota de 383,96 m. Esse valor representa apenas 3,46 m acima do nível mínimo operativo normal. Segundo informações obtidas junto a CHESF, esse é um valor nunca registrado nesse período do ano.

Na Figura 13 são apresentadas, em conjunto, ilustrações do nível médio mensal do reservatório (histograma) para o período, de 1981-1989, a variação mensal do nível do reservatório, incluindo os valores extremos atingidos em cada mês, para 1981 e 1987, e a indicação do nível máximo operativo de Sobradinho. Vale assinalar que a área ocupada pelo espelho d'água em dias específicos de 1981 e 1987 é representada nos experimentos numéricos de cota alta (20/02/81) e cota baixa (03/09/87) discutidos anteriormente.



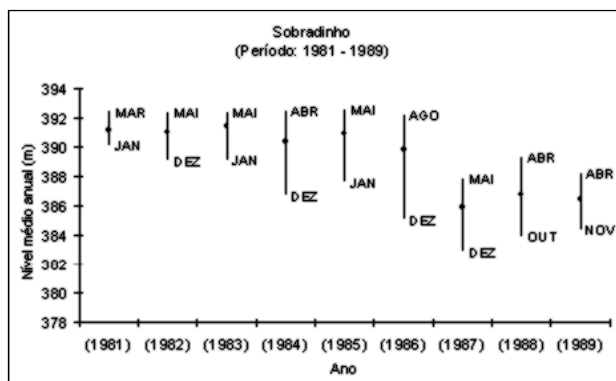


Figura 12. Variação do nível médio anual (círculos cheios) do reservatório de Sobradinho. As barras verticais indicam a amplitude da variação cujos extremos representam os valores das cotas máxima e mínima anuais. Os meses nos quais foram registrados os valores extremos são indicados na figura. Fonte dos dados: CHESF.

Essa ilustração evidencia a variação sazonal no nível da água do lago de Sobradinho: aumento no período chuvoso e diminuição no período de estiagem. Mostra também que em 1981 a cota do lago esteve próxima do nível máximo de operação da represa, mesmo durante o período de estiagem. No ano de 1987, em contrapartida, o nível do reservatório atingiu cotas baixíssimas. O valor de 382,9 m registrado no mês de dezembro é quase a cota mínima de operação do reservatório (380,5 m). Esse resultado indica que, apesar da influência comprovada dos controles climáticos globais sobre a precipitação (uma das variáveis mais importantes em estudos de bacias hidrográficas), o controle regional foi dominante no período analisado.

Segundo o Climanálise (1992), um episódio de El Niño de intensidade moderada influenciou o Nordeste do Brasil a partir de abril de 1987, quando houve uma abrupta redução no volume de chuvas no semi-árido. Março, entretanto, foi caracterizado como um mês excessivamente chuvoso. É provável que, naquele ano, a área de maior afluência do reservatório tenha sido afetada pela redução na quantidade de chuvas e este fator também tenha contribuído para o abaixamento na cota do lago.

Estudos recentes (Marengo et al., 1997; Marengo & Hastenrath, 1993; Molion & Carvalho, 1987) comprovam a influência de eventos El Niño e La Niña sobre o comportamento da descarga fluvial de rios brasileiros. Molion & Carvalho (1987) avaliaram a influência do El Niño 82/83 sobre a descarga fluvial de rios na Amazônia. Eles encontraram indicativos de correlações positivas em relação às vazões dos rios Trombetas e Ji-Paraná. Segundo Marengo e Silva Dias (1999), a cota do rio Negro em Manaus mostrou valores acima da média durante o episódio La Niña de 88/89.

No caso do rio São Francisco, essa relação não parece evidente. No período de 1981 a 1989 foram registrados dois episódios extremos, no mínimo. O El Niño de 1982/1983

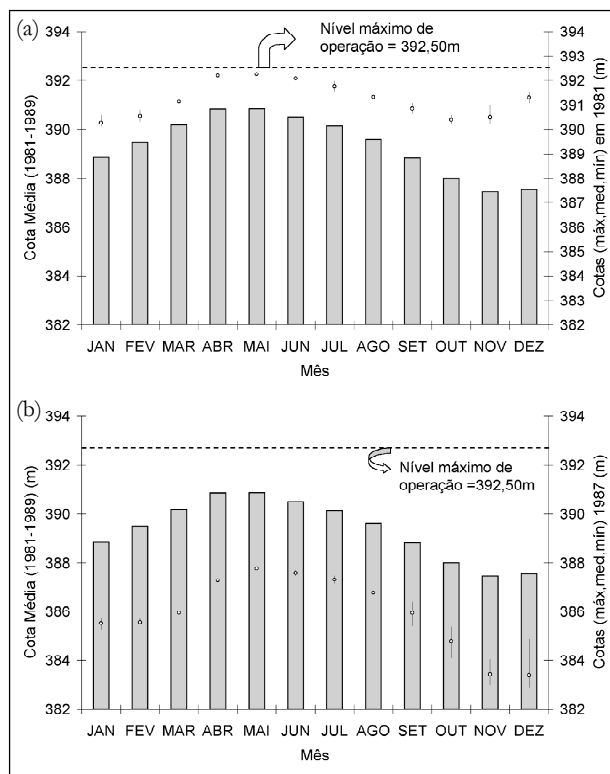


Figura 13. Variação do nível da água do lago de Sobradinho. O histograma representa o nível médio mensal para o período de 1981 a 1989. Os círculos com barras verticais ilustram a variação mensal do nível do lago e os extremos atingidos em cada mês para: (a) 1981 e (b) 1987. A linha tracejada indica o nível máximo de operação da represa. Fonte dos dados: CHESF.

foi um dos mais intensos do século 20. Ele afetou fortemente o clima de toda a América do Sul e, em particular, as regiões Norte, Nordeste (chuvas abaixo da normal) e Sul do País (chuvas acima da média climatológica). O evento La Niña de 1988/1989, classificado como intenso, afetou o Nordeste contribuindo para um aumento significativo das chuvas em várias localidades. Por outro lado, a variação média anual do nível de Sobradinho (Figura 12) não indica uma influência predominante e direta desses fenômenos sobre o regime hidrológico do lago.

## Vento à superfície

Uma maneira bastante utilizada para obter informações sobre o comportamento da brisa lacustre é através da construção de hodógrafos determinados pelo ponto final do vetor vento em função de sua variação no tempo.

Hodógrafos podem mostrar, dependendo da localidade, um giro completo (360°) do vetor vento, no período de um dia (24 horas). Geralmente, a rotação é no sentido horário no Hemisfério Norte e anti-horário no Hemisfério Sul.

Resultados de estudos teóricos (Holton, 1967; Barbato, 1978) sugerem que a principal causa do sentido de rotação do vento é a influência da força de Coriolis. Porém, o efeito de forçantes térmicas como aquela associada à topografia pode afetar o sentido de rotação do vetor e inclusive invertê-lo completamente.

Segundo Dexter (1958), para obter um hodógrafo cuja forma represente uma elipse perfeita é necessário que a linha da costa, no caso da brisa marítima, ou a linha d'água, relacionada com a margem do lago no caso da BL, seja reta. A orientação, o tamanho e o ângulo formado entre o eixo maior da elipse e a linha da costa dependem da intensidade da circulação.

Num dos estudos pioneiros sobre as características da brisa marítima Haurwitz (1947), usando um modelo teórico bastante simplificado, construiu hodógrafos do vento horário à superfície comparando-os com dados observados. Os resultados mostraram uma boa concordância quanto à forma elipsoidal da trajetória horária descrita pelos pontos finais dos vetores em 24 horas. Outros estudos, a exemplo de Holton (1967), Barbato (1978) e Kassuda & Alpert (1982), confirmaram os resultados de Haurwitz.

Oliveira e Silva Dias (1982), em um estudo de brisa marítima no estado de São Paulo, verificaram que os hodógrafos horários para um período de sete anos tinham forma elipsoidal com rotação no sentido anti-horário. Eles concluíram que o sentido de rotação descrito pelo vetor vento é uma forte evidência da importância da força de Coriolis sobre a circulação de mesoescala na região de São Paulo.

Mais recentemente, em um estudo sobre os aspectos observacionais das circulações locais no Rio Grande do Sul, Saraiva (1996) também apontou como característica marcante dos hodógrafos analisados o giro anti-horário do vetor, indicando a influência da força de Coriolis na circulação da brisa na cidade do Rio Grande, RS. A autora também ressalta a ocorrência de uma deformação na forma elipsoidal devido à presença de uma concavidade, próximo ao meio dia, atribuindo essa alteração à proximidade do mar. Um gradiente térmico mais intenso no período noturno, com uma brisa terrestre bem definida, seria a explicação para o atraso na inversão do sentido do escoamento.

Observações horárias do vento à superfície realizadas na estação meteorológica de Remanso (9,6°S, 42,1°W), situada na margem esquerda do Lago de Sobradinho, e disponíveis para o período de 1979 a 1981, foram usadas para analisar o comportamento das circulações locais, com ênfase na BL e compará-lo com os resultados das simulações numéricas.

O campo do vento à superfície é constituído por uma componente periódica, associada à circulação térmica, e outra aperiódica, associada às perturbações de grande escala. Considerando que o objetivo básico é analisar as circulações locais e avaliar o efeito da variação no nível do reservatório sobre o comportamento da brisa lacustre, a componente

aperiódica foi eliminada subtraindo as componentes (zonal e meridional) médias diárias das componentes horárias.

As análises foram feitas para as épocas seca e chuvosa, separadamente, visando avaliar as possíveis relações entre o grau de variação no nível da represa, a estação do ano e as mudanças no comportamento da BL.

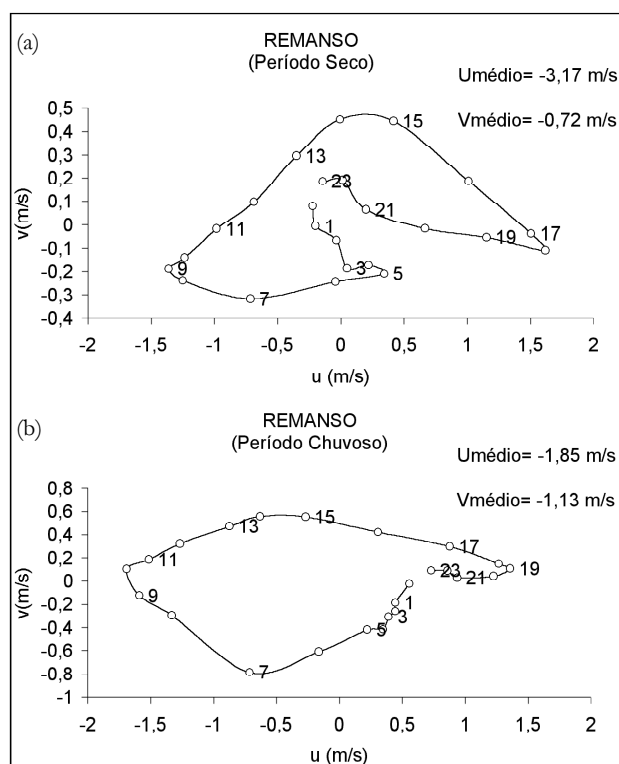
A Figura 14 mostra os hodógrafos do vento médio horário à superfície no período seco (maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro) e chuvoso (novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março e abril). A forma elipsoidal é mais evidente no período chuvoso (Figura 14b). A rotação do vento no sentido horário indica que o efeito de Coriolis é desprezível em relação à influência do gradiente de pressão (forçante térmica). Esse comportamento era esperado em função da localização da estação de Remanso numa latitude próxima do equador.

As brisas lacustre e terrestre também são melhor definidas no período chuvoso (Figura 14b). Nas primeiras horas da manhã, a componente perpendicular à margem do lago é negativa, indicando que o escoamento se dá no sentido terra-lago (brisa terrestre). A brisa terrestre atinge a intensidade máxima de  $1,05 \text{ m s}^{-1}$  às 07 horas da manhã. No período entre 1000 e 1700 horas, a componente do vento perpendicular à margem é positiva, revelando um fluxo no sentido lago-terra (brisa lacustre). A brisa lacustre tem intensidade máxima de  $1,7 \text{ m s}^{-1}$  às 1000 horas (HL).

Contrariamente ao observado para o período chuvoso, o hodógrafo representativo do período de estiagem (Figura 14a) apresenta um desvio considerável em relação à forma elipsoidal e reflete uma circulação mais difusa. A dessemelhança entre a configuração dos hodógrafos evidencia a existência de um efeito sazonal importante sobre a variação diária do vento. Isso implica em que a expansão e contração da área inundada provocadas pela variação sazonal no volume d'água do reservatório devem afetar consideravelmente a direção e intensidade do vento. Dois fatores podem contribuir para esse comportamento: (a) a extensão do afastamento da linha d'água em relação à estação de Remanso e (b) a alteração na geometria das bordas do lago, já que ela é realçada ou suavizada com o abaixamento ou elevação no nível da água. Por outro lado, a redução no volume da água não pode ser inteiramente creditada à ocorrência de períodos de estiagem prolongados, embora o clima da região, caracterizado pela alta irregularidade espacial e temporal das chuvas, influencie diretamente os processos hidrológicos da bacia. O regime de operação da usina de Sobradinho também contribui para intensificar esse efeito.

## Síntese das análises e conclusões

A influência da variação no nível do reservatório de Sobradinho sobre os processos atmosféricos na área do lago foi avaliada. O efeito das forçantes superficiais foi isolado



**Figura 14. Hodógrafos do vento médio horário ( $\text{m s}^{-1}$ ) na estação de superfície de Remanso - BA, nas estações seca (a) e chuvosa (b), no período de 1979 a 1981. Os números representam o tempo (hora local). Os valores de  $U_{\text{médio}}$  e  $V_{\text{médio}}$  correspondem ao escoamento de grande escala. Fonte dos dados: INMET.**

considerando situações meteorológicas de céu claro, em terreno complexo. A influência do vento de grande escala não foi incluída nas análises.

O regime de operação da represa causa variações significantes no nível do reservatório. Em situações críticas, pode operar com apenas 35% de seu volume útil, o que reduz drasticamente a dimensão da área alagada e expõe faixas anteriormente submersas que totalizam até 3100 km<sup>2</sup> em torno do lago (IBGE, 1994).

Esse é um fenômeno previsto e bastante avaliado pela engenharia hidráulica (Righetto, 1998). Entretanto, a expansão e contração da lâmina d'água, ocasionam alterações na geometria das bordas do lago. Essas alterações acarretam mudanças frequentes na direção e intensidade do escoamento associado à BL e, conseqüentemente, em toda a circulação desenvolvida localmente. Esse mecanismo é pouco estudado e a importância de seu papel no comportamento do ciclo hidrológico da bacia ainda é desconhecida.

Considerando que o vento controla os mecanismos de transporte e difusão de propriedades na atmosfera, é importante investigar a contribuição desse fator no conjunto de influências meteorológicas e hidrológicas na área do lago.

Os experimentos numéricos discutidos neste trabalho permitiram avaliar o comportamento de processos meteorológicos na área de Sobradinho em situações de cota alta (CA) e cota baixa (CB).

Foi possível concluir que:

O RAMS reproduziu bem as circulações termicamente induzidas, simulando características conhecidas desses sistemas de vento.

As características do terreno na região do lago contribuem para o desenvolvimento de um sistema de circulações complexo, incluindo brisas lacustres, terrestres, ventos anabáticos e catabáticos.

Apesar da evidência do controle da topografia sobre o padrão de ventos locais, a alteração na dimensão e geometria do lago muda a distribuição espacial das zonas de convergência induzidas pela BL. Esse mecanismo leva a variações diurnas nos elementos climáticos.

A BL associada com cotas elevadas e, por conseguinte, com um lago "maior", é mais intensa e atinge maiores distâncias continente adentro. Esse efeito produz uma queda nos valores da temperatura e um aumento na umidade do ar.

Os resultados obtidos com a análise de dados observados mostram que, apesar da influência comprovada dos efeitos climáticos globais na variação no volume d'água do reservatório, fatores regionais que incluem o regime de operação da represa parecem ser dominantes no período analisado.

## AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à SUDENE e à CHESF pela concessão dos dados de vento e do nível do reservatório de Sobradinho utilizados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- AVISSAR, R. & PIELKE, R. A. (1989). A parameterization of heterogeneous land surface for atmospheric numerical models and impact on regional meteorology. *Mon. Wea. Rev.*, vol.117, p.2113-2136.
- BARBATO, J. P. (1978). Areal parameters of the sea breeze and its vertical structure in the Boston basin. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol.59, p.1420-1431.
- CHESF – DIVISÃO DE PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA E HIDROLOGIA (1979). 02/79. *Relatório da Cheia do São Francisco*.
- CLIMANÁLISE (1992). Número especial (06/92): adendo aos números de janeiro a junho de 1992.
- CORREIA, M. F. (2001). *Impacto das ações antrópicas no clima do submédio do rio São Francisco: um estudo numérico e observacional*. Tese de doutorado. IAG-USP. São Paulo.

- DEXTER, R. V. (1958). The sea breeze hodograph at Halifax. *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol.39, n°3, p.241-247.
- HAURWITZ, B. (1947). Comments of the sea-breeze circulation. *Journal of Meteorology*, vol.4, p.1-8.
- HOLTON, J. R. (1967). The diurnal boundary layer wind oscillation above sloping terrain. *Tellus*, vol.19, p.199-205.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (1994). Diagnóstico da qualidade ambiental da bacia do rio São Francisco sub-bacias do oeste baiano e Sobradinho.
- KASSUDA, M. & ALPERT, P. (1982). Anti-clockwise rotation of the wind hodograph. part I, theoretical study. *J. Atmos. Sci.*, vol.40, p.487-499.
- MACCUMBER, M. C. & PIELKE, R. (1981). Simulation of the effects of surface fluxes of heat and moisture in a mesoscale numerical model. Parte I: Soil Layer. *J. Geoph. Res.*, vol.86, p.9929-9938.
- MAHRER, Y. & PIELKE, R. A. (1977). A numerical study of the airflow over irregular terrain. *Beitrage zur Physik der Atmosphäre*, vol.50. Band, Seite 98-113.
- MARENGO, J. & HASTENRATH, S. (1993). Case studies of extreme climatic events in the Amazon basin. *J. Climate*, vol.6, p.617-617.
- MARENGO, J.; NOBRE, C. & CULF, A. (1997). Climatic impacts of friagens in forested and deforested areas of the Amazon basin. *J. Applied Meteor.*
- MARENGO, J. e SILVA DIAS, P. L. (1999). *Águas doces no Brasil*. Academia Brasileira de Ciências. Instituto de Estudos Avançados da USP.
- MOLION, L. C. B. & CARVALHO, J. C. (1987). *Southern Oscillation and river discharge of selected rivers of tropical South America*. In: Conference of Geophysical Fluid Dynamics with special emphasis on “El Niño”. São José dos Campos, Ministério da Ciência e Tecnologia e Centro Latino Americano de Física, p.343-354.
- NEUMANN, J. & MAHRER, Y. (1975). A theoretical study of the lake and land breeze of circular lakes. *Mon. Wea. Rev.* March, vol.103, p.474-485.
- OLIVEIRA, A. P. e SILVA DIAS, P. L. (1982). Aspectos observacionais da brisa marítima em São Paulo. *Anais*. III Congresso Brasileiro de Meteorologia. Pelotas, RS.
- PIELKE, R. A. (1974). A three-dimensional numerical model of the sea breezes over south Florida. *Mon. Wea. Rev.*, vol.102, 115-139.
- PIELKE, R. A.; COTTON, W. R.; WALKO, R. L.; TREMBACK, C. J.; LYONS, W. A.; GRASSO, L. D.; NICHOLLS, M. E.; MORAN, M. D.; WESLEY, D. A.; LEE, T. J. & COPELAND, J. H. (1992). A comprehensive meteorological modeling system – RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, vol.49, p.69-91.
- RIGHETO, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. São Carlos: EESC-USP.
- SARAIVA, J. M. B. (1996). *Previsão de tempo na região sul: efeitos locais e influência da liberação de calor latente*. Tese de doutorado.

IAG-USP. São Paulo.

- TREMBACK, C. J. & KESSLER (1985). A surface temperature and moisture parameterization for use in mesoscale models. In: Proc. Seventh Conference on Numerical Weather Prediction. *American Meteorological Society, Boston, Massachusetts*, p.355-358.
- TRÍPOLI, G. J. & COTTON, W. R. (1982). The Colorado State University Three-Dimensional Cloud/Mesoscale Model. Part I: General Theoretical Framework and Sensitivity Experiments. *J. Recherches Atmos*, vol.16, p.186-219.

### ***Variation in the Level of Sobradinho Reservoir and its Impact on the Climate in the Region***

#### **ABSTRACT**

*Numerical simulations performed with RAMS (Regional Atmospheric modeling System) with analyses of meteorological and hydrological data are used to evaluate the impact of water level variations of the Sobradinho Dam upon meteorological processes and climatic variables within the lake region. The dam holds 34.1 billion cubic meters of water but can operate with 35% of this capacity only. Extensive underwater land strips are periodically exposed around the lake due to various factors that are responsible for the climatological behavior within the reservoir area. Once the influence of large-scale flow has been excluded, a combination of factors such as valley geometry, shape of the reservoir banks, relief and land use diversity around the lake are responsible for a complex circulation system which includes valley – mountain and anabatic – katabatic winds as well as lake – land breezes. Results show that water level variations and associated contraction and expansion in the underwater area cause significant spatial variations in wind direction and speed, atmospheric temperature and humidity.*

*Key-words: reservoir level; climate impact; Sobradinho.*