SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA BIDIMENSIONAL DO BANHADO DO TAIM (RS)

Adriano Rolim da Paz[1]; Edith B. C. Schettini[2] & Adolfo O. N. Villanueva[3]

Resumo – Além da oscilação natural do nível da água, conhecido como hidroperíodo, a circulação da água desempenha um papel de fundamental importância na estrutura e no funcionamento dos banhados. Tais ecossistemas são caracterizados por pequenas lâminas d'água e pela grande presença de plantas aquáticas, que são sensíveis a alterações no nível e no padrão de circulação da água. Isso tem sido observado no banhado do Taim (RS), objeto deste estudo, em decorrência da ação antrópica, como a captação de água para orizicultura e a operação das comportas de saída para a lagoa Mirim. Neste trabalho, aplicou-se um modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal ao banhado do Taim, procurando analisar o efeito da vegetação e da ação do vento, além da interação com a lagoa Mangueira. Ressalta-se a influência da distribuição espacial da vegetação sobre o padrão geral da circulação da água no Taim e sobre a interação deste com a lagoa Mangueira.

Abstract – Besides the natural water level fluctuation known as hydroperiod, the water movement has an important role in the wetlands structure and operation. Those ecosystems are characterized by small depths and a great density of aquatic plants, which are influenced by the water level and water movement pattern alterations. It has occurred in the Taim wetland (RS) – the study case, as a consequence of human activities like water withdrawal to rice farming and operation of exit gates to lake Mirim. In this paper, a horizontal two-dimensional hydrodynamic model has been applied to Taim wetland, trying to verify the effects of vegetation, wind stress and interaction with lake Mangueira. It is emphasized the vegetation spatial distribution influence over the general water flow pattern in Taim wetland and over its interaction with lake Mangueira.

Palavras-chave – modelagem hidrodinâmica bidimensional, banhados, resistência da vegetação.

[1] Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS). Av. Bento Gonçalves, 9500, Caixa Postal 15029, CEP 91501-970, Porto Alegre-RS. Tel: (51) 3316 6327. Fax: (51) 3316 7105. E-mail: adrianorpaz@yahoo.com.br.
[2] IPH/UFRGS. E-mail: bcamano@iph.ufrgs.br
[3] IPH/UFRGS. E-mail: adolfo@iph.ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Os banhados ou terras úmidas são considerados uns dos mais produtivos ecossistemas do mundo, comparados às florestas tropicais e aos bancos de corais, apresentando diversos valores à sociedade e ao meio ambiente (CZM, 2001). Por definição, os banhados são criados e mantidos pela água, de tal modo que a freqüência e a duração do nível da água determinam, significativamente, a vegetação presente e o desempenho das funções desses ecossistemas (Marble, 1992), além de condicionarem as propriedades físicas, químicas e ecológicas (Clymo et al., 1995).

O nível e a circulação da água influenciam enormemente o desenvolvimento das macrófitas aquáticas, não só pela redução na disponibilidade de oxigênio e nutrientes, mas também pela alteração da textura e composição do substrato, pela pressão mecânica na estrutura das plantas e até pela redução da disponibilidade de luz para as espécies submersas (Newall e Hughes, 1995). Por sua vez, a presença de vegetação tem dois efeitos principais sobre o escoamento: resistência ao fluxo e proteção da superfície da água contra a ação do vento.

Isso tem motivado o desenvolvimento de pesquisas acerca do que se denomina de hidroperíodo das terras úmidas, definido como a ocorrência periódica ou regular de inundação ou saturação do solo, em função do balanço hídrico, da topografia e das condições sub-superficiais, e que constitui sua assinatura hidrológica (Marques et al., 1997).

Entretanto, apesar do hidroperíodo ser amplamente reconhecido como de extrema importância, pouca atenção tem sido dada à circulação da água e aos papéis físicos e ecológicos que a mesma desempenha, tornando-a fundamental para a estrutura e funcionamento dos banhados (Aumen, 2003). Estudos dessa natureza podem não só ajudar a explicar padrões ecológicos, tais como a distribuição, diversidade e abundância de invertebrados e peixes dependentes de plantas aquáticas, mas também ser vitais para projetos de restauração e revitalização (Newall e Hughes, 1995).

Neste trabalho, o modelo hidrodinâmico bidimensional IPH-A foi aplicado ao banhado do Taim, localizado no Estado do Rio Grande do Sul, procurando avaliar a influência dos principais fatores intervenientes no padrão geral de circulação da água desse sistema, como a ocorrência da vegetação, a ação do vento e a interação com a lagoa Mangueira.

O BANHADO DO TAIM

Localização e descrição

O banhado do Taim está inserido na Estação Ecológica do Taim (ESEC Taim), uma unidade de conservação federal criada através do Decreto nº 92.963, de 21 de julho de 1986, com o objetivo de proteger amostras dos Banhados do Sul e da fauna ameaçadas de extinção e preservar o local de passagem de aves migratórias (IBAMA, 2003). A ESEC Taim engloba uma área de cerca de

315km^2 e está localizada entre o Oceano Atlântico e a Lagoa Mirim, no sul do Estado do Rio Grande do Sul, estando parte no município de Rio Grande e parte no de Santa Vitória do Palmar (figura 1).

O relevo dessa região é caracterizado por uma planície com micro-relevos, de pouca expressão altimétrica, destacando-se as feições dunais e os terraços com barreiras lagunares (IBAMA, 2003). Na mesma referência, consta que o clima da região onde a ESEC Taim se insere é do tipo subtropical, com temperatura média anual de 18 graus e precipitação média anual de 1100mm, apresentando um inverno frio e chuvoso e um verão quente e seco, além de ventos bastante intensos.

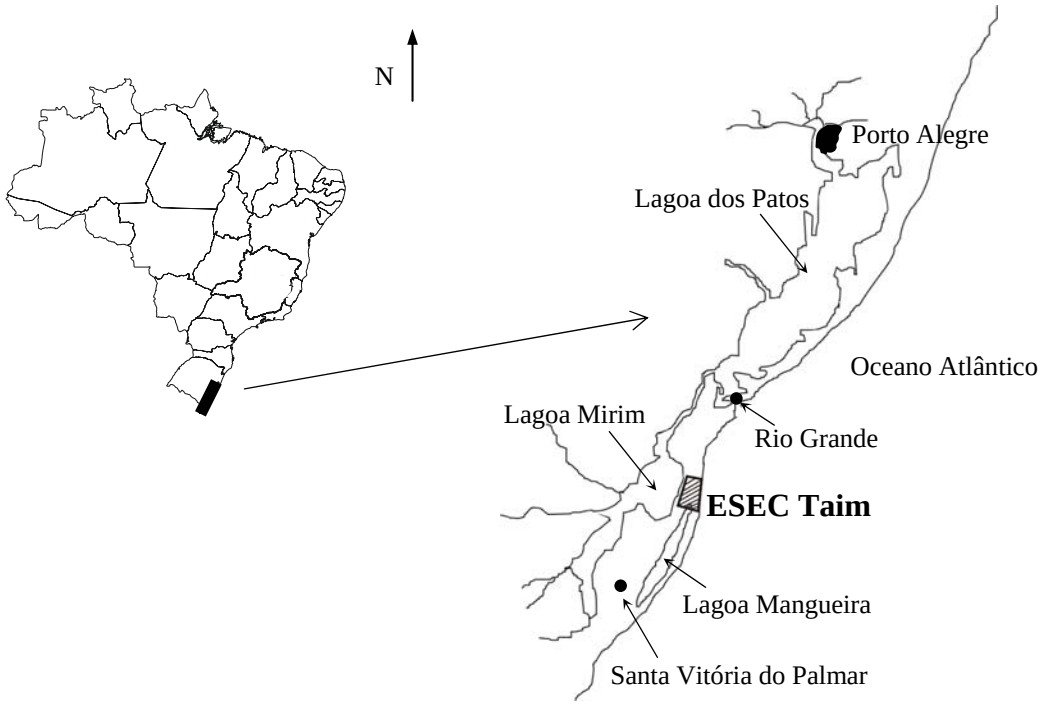


Figura 1. Localização da Estação Ecológica do Taim.

A área em questão é composta por três tipos de ecossistemas principais (PELD, 2002): (i) ecossistemas costeiros, caracterizados por praias litorâneas e um extenso campo de dunas; (ii) ecossistemas límnicos, constituído por banhados e lagoas; (iii) ecossistemas terrestres, constituídos por matas de restinga turfosa e arenosa e campos secos e de várzea. Na região do banhado do Taim, a vegetação é exuberante em macrófitas aquáticas emergentes, que chegam a cobrir 30% ou mais da área (Villanueva, 1997), com predominância de plantas vasculares e herbáceas.

Na área compreendida pela ESEC Taim, encontram-se banhados, lagoas, campos e dunas, com destaque para o banhado do Taim, que ocupa 60% da área da estação, e para as Lagoas Nicola e Jacaré, além da parte norte da lagoa Mangueira. Na figura 2, é apresentada uma composição colorida do tipo RGB, onde as bandas espectrais 3, 4 e 5 foram usadas para as cores vermelho,

verde e azul, de uma imagem do satélite LANDSAT5, de 06/jul/1987, da região da estação. Em tal imagem, observa-se a localização dos elementos que constituem a ESEC e a grande presença de macrófitas aquáticas no banhado. Embora se dispusesse de outras imagens de satélite relativas a datas mais recentes do que a utilizada, a escolha desta foi motivada pelo nível mais baixo da água na época da aquisição, o que permitiu identificar, mais claramente, os contornos das lagoas internas ao Taim.

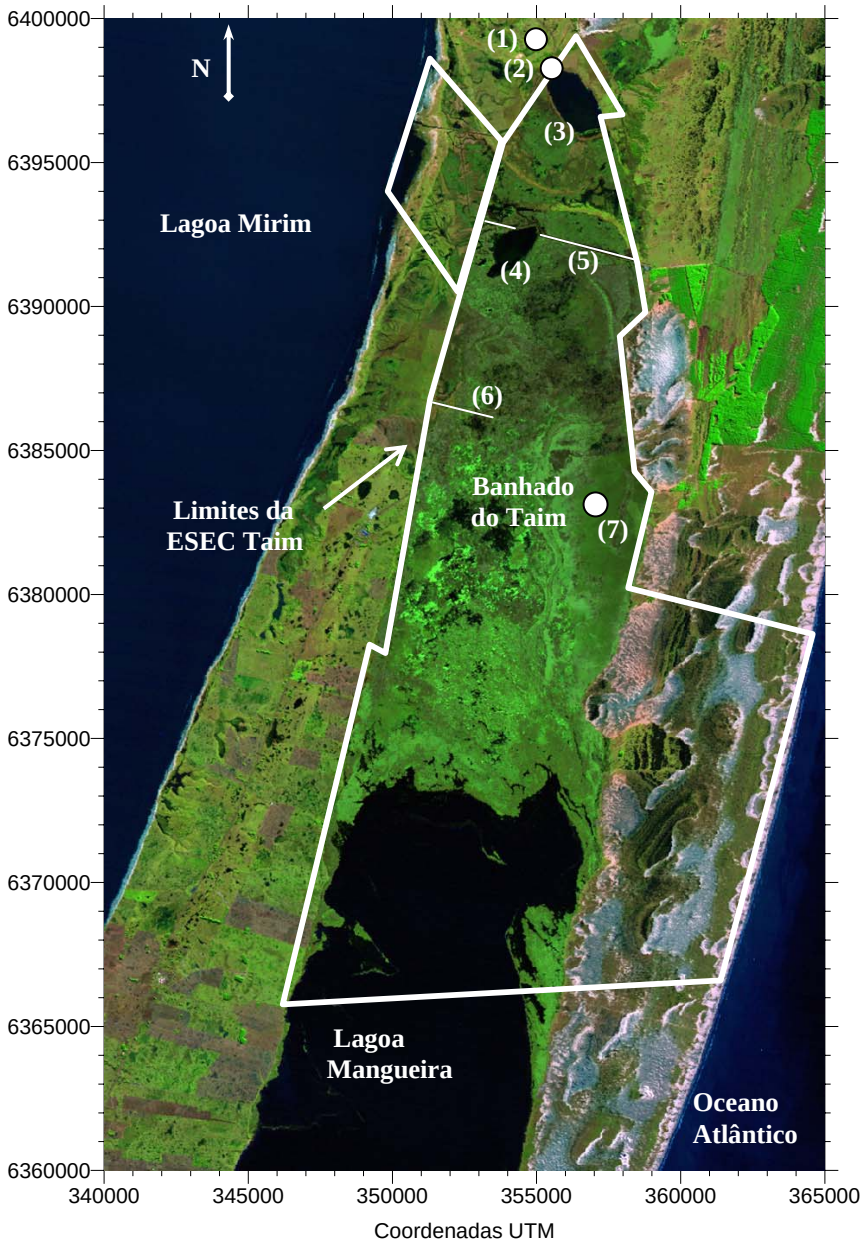


Figura 2. Composição colorida de imagem de satélite de 06/jul/1987 da região da ESEC Taim (WGS-84, UTM-22S), onde: (1) sede da ESEC Taim; (2) comportas de saída do banhado; (3) lagoa Nicola; (4) lagoa Jacaré; (5) canal do Jacaré; (6) canal da Sarita; (7) posto Negreiros.

Conflitos pelo uso da água

A extração de água para a orizicultura, associada aos picos de evapotranspiração observados nos meses de outubro/novembro e fevereiro/março, tem alterado o regime hidrológico da região e pode ocasionar a diminuição no volume de água necessário à manutenção dos ecossistemas palustres (Villanueva, 1997). O impacto ambiental também acontece devido à deterioração da qualidade da água e do solo, causada pelo carreamento de produtos químicos e agrotóxicos usados na agricultura. Outros problemas decorrentes de ação antrópica, verificados na unidade de conservação em questão, são o atropelamento de animais na BR-471, que tem origem na elevação dos níveis e a conseqüente diminuição das áreas secas, a pesca e a caça (IBAMA, 2003).

Apesar da criação da Estação Ecológica do Taim, o conflito entre o uso para agricultura e a sua conservação continua a ser verificado, pois o atendimento da última implica na redução da disponibilidade de água para a primeira. Um agravante reside no fato de que a área delimitada pela estação não inclui toda a bacia de contribuição, de modo que atividades externas afetam diretamente a disponibilidade de água e as condições ambientais no seu interior (Villanueva, 2000).

Outra questão diz respeito à operação e gerenciamento das comportas de saída do banhado para a lagoa Mirim, cuja localização é indicada na figura 2 e sobre a qual há interesses conflitantes (Villanueva, 1997): o fechamento completo da saída é de interesse para a irrigação, uma vez que aumenta a disponibilidade de água; por outro lado, isso prejudica a flutuação natural dos níveis de água, condição necessária para a preservação ambiental do ecossistema.

METODOLOGIA

O modelo IPH-A

Neste estudo, optou-se pela utilização de um modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal, sendo adotado o modelo denominado IPH-A, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH – UFRGS) e descrito por Casalas (1996). Tal modelo constitui um sistema computacional destinado à simulação da circulação e do transporte de massa em corpos d'água bidimensionais e é resultante de uma série de estudos realizados pelo IPH na modelagem de estuários e lagoas: lago Guaíba, lagoa dos Patos, rio da Prata, rio Uruguai e lagoa Setúbal (Argentina), por exemplo.

Para descrever o escoamento da água, o modelo IPH-A emprega as equações da continuidade e de Navier-Stokes integradas na vertical, com a formulação de Manning para o cálculo da tensão de cisalhamento do fundo, enquanto que a tensão de cisalhamento na superfície é determinada em função da velocidade do vento e de um coeficiente de arrasto constante:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (HU)}{\partial x} + \frac{\partial (HV)}{\partial y} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} = \Omega V - g\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{C_V \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{H} - \frac{g n^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{H^{4/3}} + \varepsilon_T \Delta U \qquad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} = -\Omega U - g\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{C_V \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{H} - \frac{g n^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{H^{4/3}} + \varepsilon_T \Delta V \qquad (3)$$

onde η é o nível d'água variável com o escoamento; h é a profundidade fixa em relação ao plano de referência (figura 3); H representa a profundidade total; U e V são as componentes da velocidade média na vertical do escoamento, nas direções x e y, respectivamente; t é o tempo; Ω é o parâmetro de Coriolis; g é a aceleração da gravidade; C_V é um coeficiente de ajuste de vento; ω_x e ω_y são as componentes da velocidade do vento nas direções x e y, respectivamente; n é o coeficiente de Manning; ε_T é o coeficiente de viscosidade cinemática turbulenta; ∇ é o operador nabla e $\Delta=\nabla^2$ é o operador laplaciano.

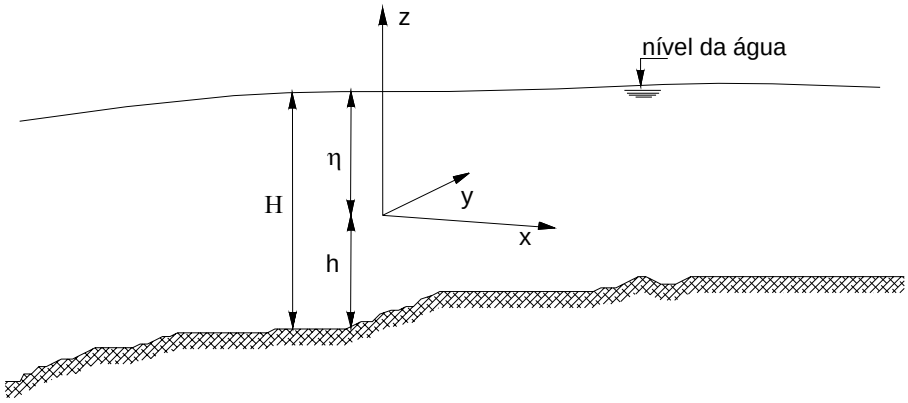


Figura 3. Plano de referência (plano xy) e definição das variáveis η, h e H.

O IPH-A emprega o método das diferenças finitas, aplicando um esquema semi-implícito de direções alternadas (ADI - *Alternating Direction Implicit*), baseado no esquema adaptado por Leendertse, com algumas modificações, para a resolução numérica do sistema de equações que descrevem o escoamento (Casalas, 1996).

A figura 4 apresenta um exemplo de malha numérica de cálculo, com a distribuição espacial das variáveis em cada elemento da malha adotada pelo referido modelo. Observa-se que as componentes de velocidade do escoamento U e V estão definidas nas faces direita e superior de cada elemento, respectivamente, tendo como sentido positivo a orientação dos eixos x (para U) e y (para V). A profundidade fixa h(x,y) e o coeficiente de Manning (n) são tomados em duas componentes (hu e hv, para h, e nu e nv, para n) uma para cada direção do plano x-y, definidas nos lados direito e superior, enquanto o nível variável no tempo η(x,y,t) é associado ao centro de cada elemento da malha.

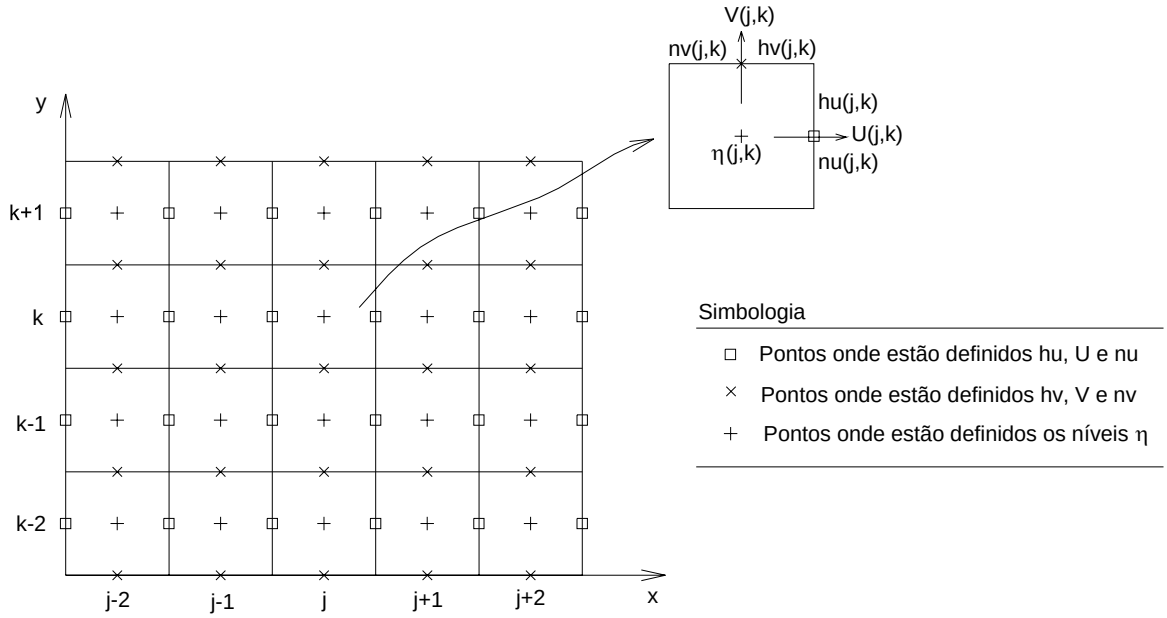


Figura 4. Esquema da malha numérica utilizada pelo IPH-A, com a localização das variáveis nas quadrículas de cálculo.

Algoritmo de secagem/inundação

Devido ao equacionamento matemático empregado, os modelos hidrodinâmicos 2DH não suportam que áreas dentro do contorno estudado apresentem cotas superiores ao nível d'água de simulação, ou seja, regiões com tirante nulo ou negativo. Essa limitação constitui uma restrição para o estudo do comportamento hidrodinâmico do Taim, ou de banhados em geral, como alertam Feng e Molz (1997), por serem regiões de topografia pouco acentuada e tirantes de água muito pequenos, apresentando áreas internas secas com freqüência.

Neste estudo, implementou-se um algoritmo de secagem/inundação no modelo IPH-A, o qual consiste, resumidamente, em identificar se cada elemento está "seco" ou "molhado", baseado em um critério de tirante mínimo (considerado igual a 10cm), e adotar procedimentos específicos para cada uma das situações, como: imposição de condições de velocidade nula, rugosidade do fundo extrema e alterações da batimetria e do nível da água de cada elemento.

O algoritmo funciona em três etapas, executadas após cada semi-intervalo de tempo de simulação, ou seja, após a resolução do sistema de equações para todas as linhas ou para todas as colunas: (1) imposição de velocidade nula; (2) ajuste de níveis, batimetria e coeficiente de Manning; (3) atualização de níveis.

Resumidamente, as etapas do algoritmo são descritas da seguinte forma:

(1) Imposição de velocidade nula: para cada elemento da malha numérica interno ao contorno, verifica-se se seu estado é "seco" ou "molhado", caso o tirante seja inferior ou não ao tirante

mínimo de 10cm, respectivamente. Se o elemento está “seco”, impõe-se velocidade nula nas suas quatro faces, conforme ilustra a figura 5;

(2) Ajuste de níveis, batimetria e coeficiente de Manning: para o elemento considerado “molhado”, a batimetria e o coeficiente de Manning assumem seus valores “reais”, e para o caso do elemento “seco”, impõe-se uma batimetria rebaixada e um valor extremo para o coeficiente de Manning (n=100). Em seguida, é verificada a condição de fluxo nulo nos elementos vizinhos superior, inferior, abaixo e acima do elemento em questão. Em caso positivo, ou seja, quando as componentes da velocidade nos quatro elementos vizinhos são nulas, o nível auxiliar do elemento é ajustado pela média aritmética entre os níveis máximo e mínimo vizinhos, enquanto que, no caso de não atendimento à condição de fluxo nulo, o nível auxiliar é estabelecido como o mínimo dentre os níveis daqueles elementos vizinhos com fluxo;

(3) Atualização de níveis: o terceiro e último passo do algoritmo consiste em atualizar os níveis de todos os elementos, em função do nível auxiliar correspondente a cada um deles. A adoção de um nível auxiliar durante os dois passos anteriores, em vez de ajustar diretamente o nível d’água do elemento, tem o propósito de fazer com que os níveis ajustados em um ciclo do algoritmo não sejam levados em conta para o ajuste dos elementos seguintes no mesmo ciclo, mas apenas no próximo, isto é, no semi-intervalo de tempo seguinte de simulação.

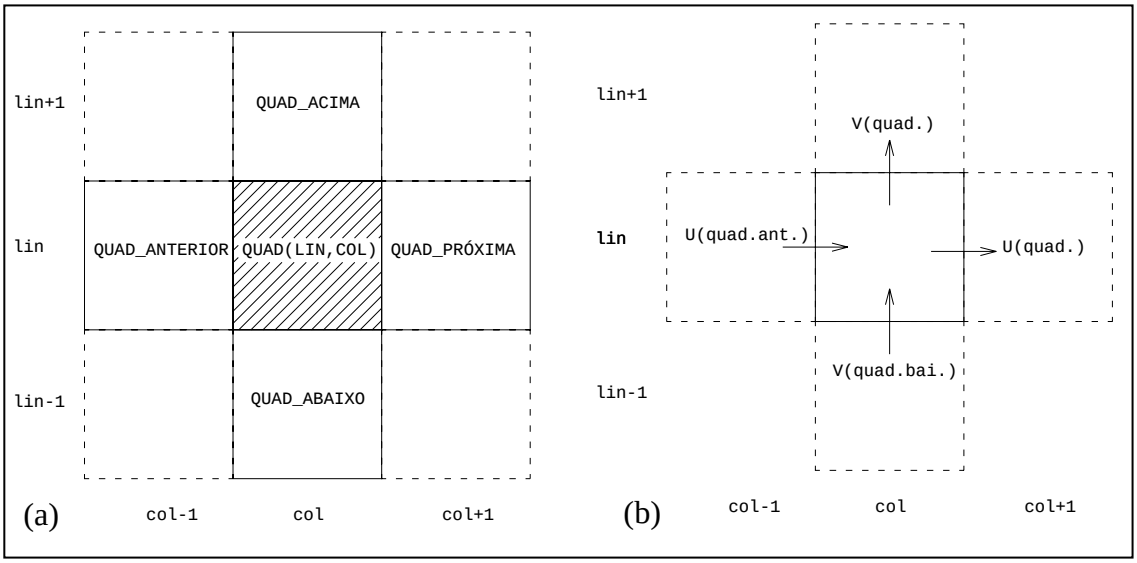


Figura 5. Identificação das quadrículas vizinhas (a) e das velocidades impostas nulas (b).

APLICAÇÃO AO BANHADO DO TAIM

Definição da área modelada

Como mostra a figura 2, o banhado do Taim e a lagoa Mangueira constituem um sistema integrado, sendo a última a principal fonte de afluência de água para o primeiro. Dessa forma, o comportamento hidrodinâmico do Taim está diretamente vinculado à Mangueira e, para estudá-lo, há duas possibilidades: (i) simular o banhado isoladamente, considerando a lagoa Mangueira como condição de contorno no limite sul; (ii) simular todo o sistema Mangueira-Taim. A segunda alternativa foi a adotada neste estudo, por ser uma representação mais próxima do sistema natural, embora isso acarrete maior custo computacional, devido ao aumento do número de elementos da malha numérica de cálculo.

Utilizou-se uma malha numérica com espaçamento igual a 360m, fazendo-se uma rotação de coordenadas do contorno modelado, que reduziu significativamente as dimensões da matriz de elementos, como ilustrado na figura 6, através da seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \text{sen}(\alpha) \\ -\text{sen}(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \qquad (4)$$

onde x e y são os eixos ortogonais originais e x” e y” são os eixos rotacionados de um ângulo α, medido entre os eixos x e x” (figura 6). Com o espaçamento citado, a malha numérica foi constituída por 52 linhas, 348 colunas e um total de 18096 elementos, sendo 12609 elementos internos ao contorno da região modelada.

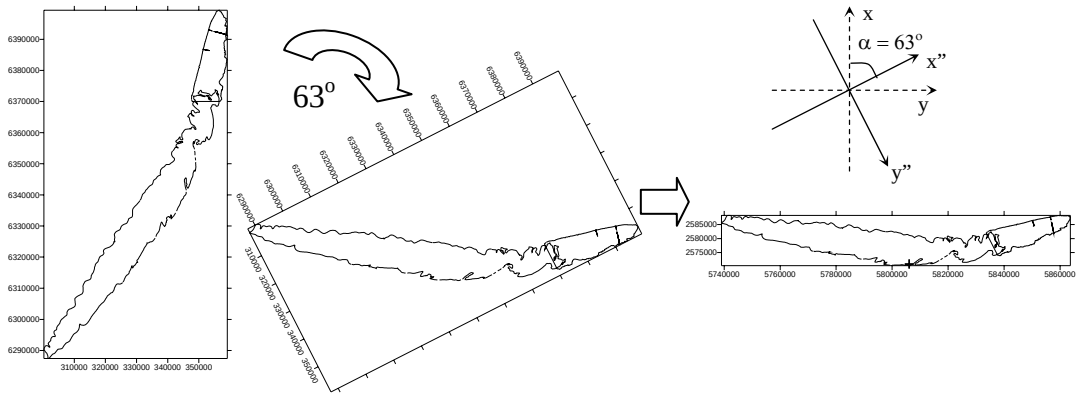


Figura 6. Rotação de coordenadas do contorno do sistema Mangueira-Taim.

Modelo numérico do terreno

Os modelos numéricos do terreno (MNT) das várias regiões específicas (banhado, lagoas Nicola, Jacaré e Mangueira) foram gerados de forma independente e superpostos ao final. Esse procedimento permitiu tratar de forma independente as informações de cada sub-região e fazer com

que as lagoas internas ao banhado fossem representadas realmente como lagoas, no MNT final, havendo um forte gradiente topográfico entre as mesmas e a região vizinha. Caso as informações batimétricas das lagoas fossem usadas em conjunto com as demais do banhado, bastante escassas, gerando um MNT único no mesmo processo, o terreno da região seria suavizado de tal forma que não caracterizaria a presença das lagoas, efetivamente. Nas figuras 7 a 8 são apresentadas as curvas de nível do banhado e das lagoas.

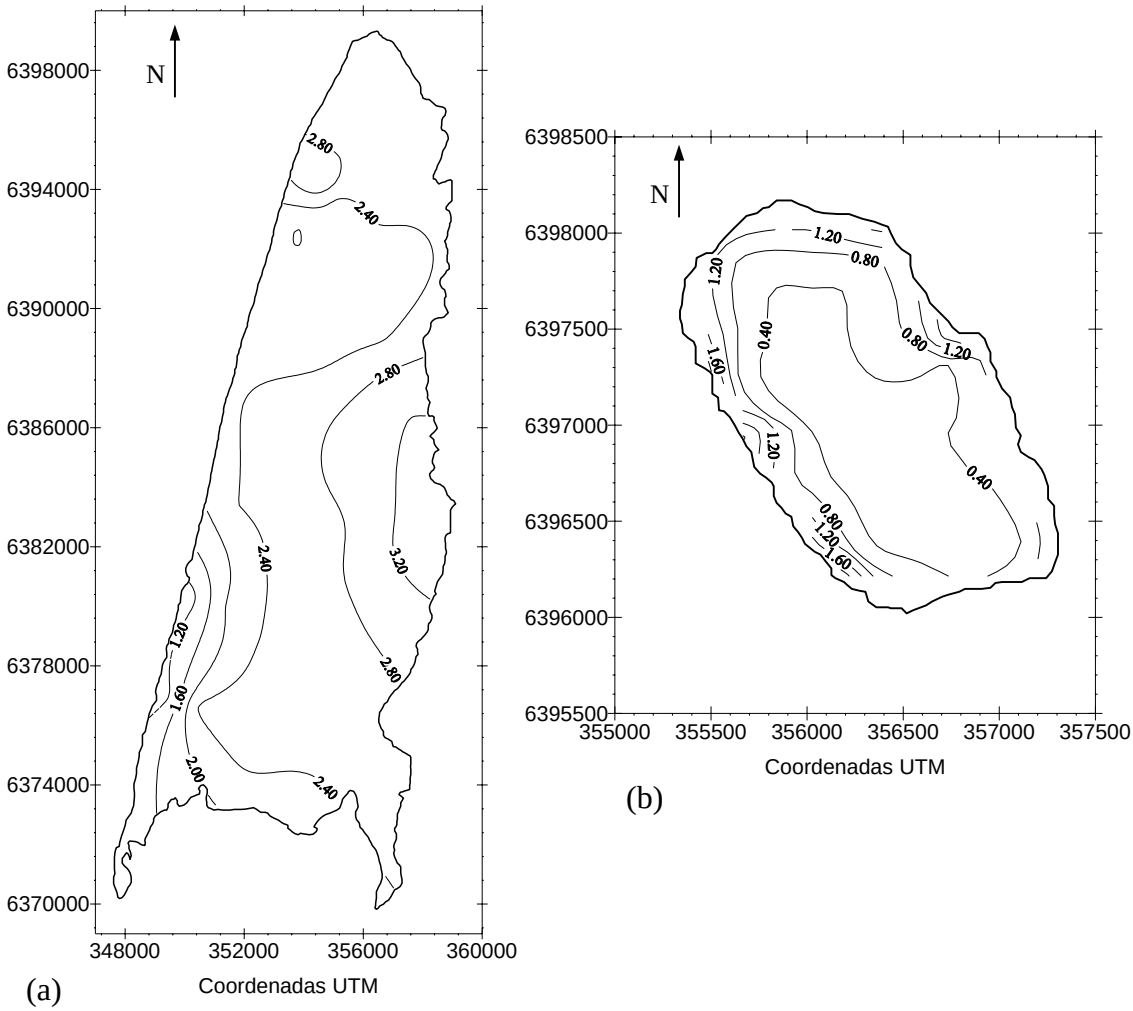


Figura 7. Curvas de nível do banhado do Taim (a) e da lagoa Nicola (b), em metros, tendo como referencial o nível do mar.

Distribuição espacial da vegetação

A distribuição espacial da vegetação no banhado do Taim foi estabelecida considerando que o nível da água no banhado permaneceu constante durante um prolongado período de tempo, o suficiente para definir as áreas capazes de suportar as macrófitas aquáticas emergentes. Considerou-se um nível da água na cota 2,40m, que representa uma situação de seca no banhado, abaixo do valor médio em torno do qual oscila naturalmente. Tal situação pode ser decorrente, por exemplo,

de uma captação em excesso para irrigação do arroz, na lagoa Mangueira, associada à falta de gerenciamento da operação das comportas de saída.

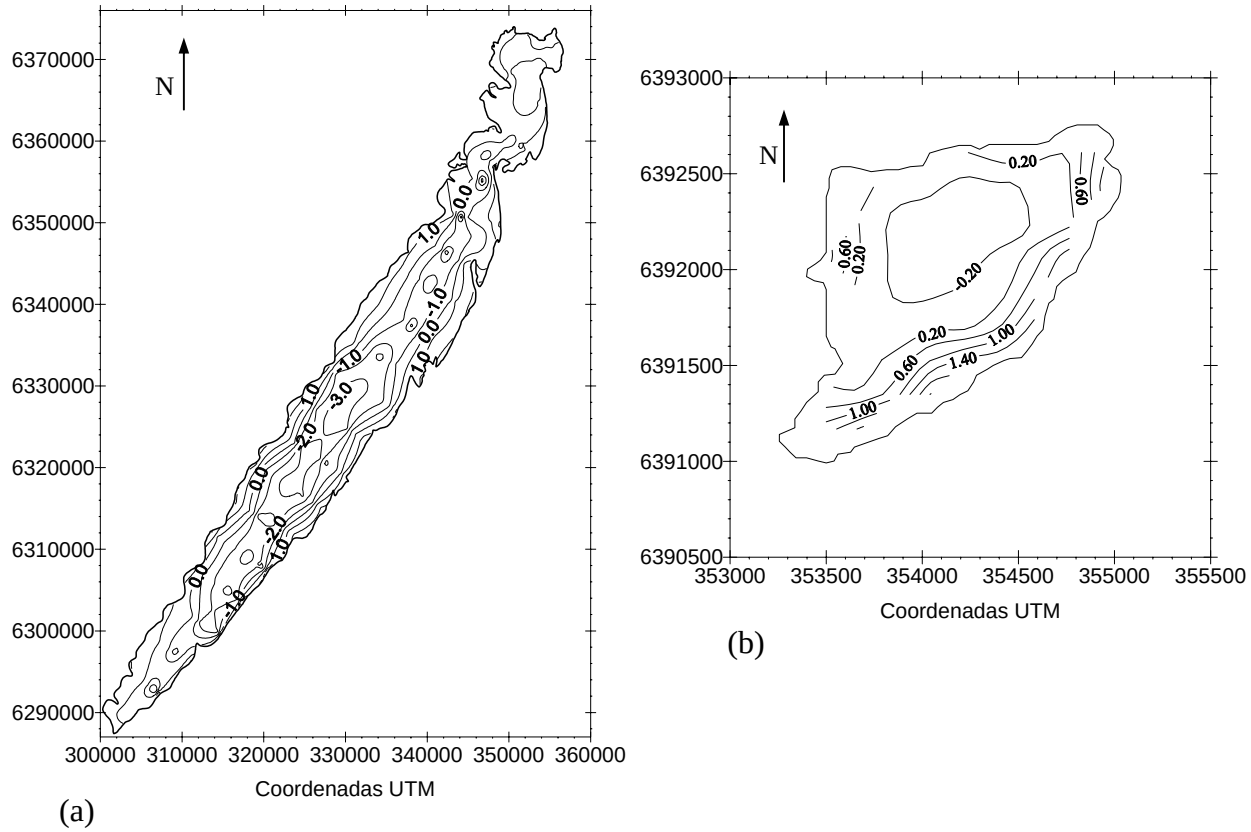


Figura 8. Curvas de nível das lagoas Mangueira (a) e Jacaré (b), em metros, tendo como referencial o nível do mar.

A definição das áreas com vegetação foi realizada aplicando um critério baseado nos limites mínimo e máximo da lâmina d'água suportados pela mesma, adotados como 0,10m e 1,80m, respectivamente. Assim, para cada elemento da malha da região do banhado, supondo o nível da água na cota 2,40m, calculou-se os tirantes correspondentes e obteve-se a configuração espacial da distribuição da vegetação conforme mostrado na figura 9.

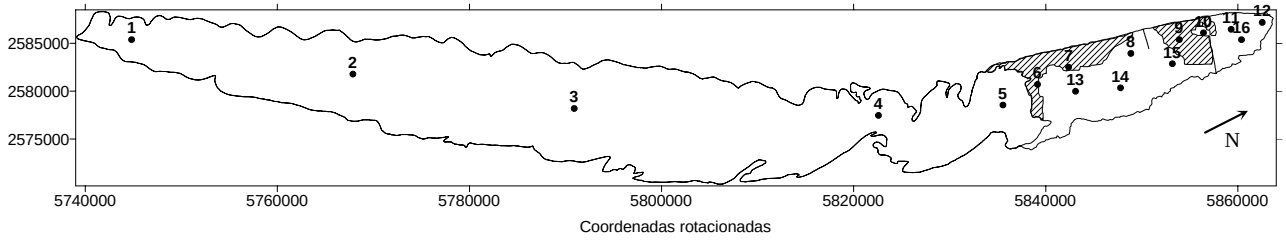


Figura 9. Indicação da área considerada com macrófitas aquáticas emergentes (área tracejada) e dos pontos de gravação de níveis e velocidades ao longo do tempo.

Parâmetros adotados nas simulações

A falta de dados de nível do banhado e de condições de vento, com uma discretização temporal suficiente e referentes ao mesmo período, inviabilizou a calibração do modelo hidrodinâmico. Dessa forma, os valores dos parâmetros do modelo IPH-A foram estabelecidos com base nos citados na literatura, após a realização de uma verificação simplificada da resposta do sistema modelado à variação de cada parâmetro.

Uma questão adicional é quanto a distinção entre as áreas consideradas com e sem macrófitas aquáticas emergentes, que, além de oferecer uma resistência adicional ao escoamento, ainda proporcionam um efeito protetor contra a ação do vento sobre a superfície da água.

A vegetação oferece uma resistência ao fluxo ao longo de toda a coluna d'água, de forma que vários estudos têm propostos relações empíricas alternativas às de Chèzy e de Manning, para o cálculo da tensão de cisalhamento no fundo, ou mesmo a inclusão de novos termos relativos a tal resistência, nas equações dinâmicas (Bolster e Saiers, 2002; Tsujimoto, 1999; Abdelsalam et al., 1992; Turner e Chanmeesri, 1984; Petryk e Bosmajian III, 1975, entre outros).

Entretanto, a falta de informações e a complexidade da região estudada, aliadas aos objetivos deste estudo, justificam a simplificação de adotar a formulação de Manning, considerando um coeficiente de rugosidade do fundo mais elevado para as áreas com vegetação (n_1=0,4), relativamente às regiões sem vegetação (n_2=0,02). O valor de n_1 foi estabelecido com base no adotado por Villanueva (1997), para a simulação do Taim com um modelo hidrodinâmico de celas, e nos resultados de Shih e Rahi (1981), que estimaram o coeficiente de Manning em um banhado natural, para diferentes condições de escoamento e épocas do ano.

Os coeficientes de viscosidade cinemática turbulenta (ε_T) e de ajuste do vento (C_v) foram considerados constantes e uniformes, sendo iguais a $10 m^2/s$ e 3,0E-6, respectivamente. Porém, para representar o efeito protetor da ação do vento provocado pela vegetação, inseriu-se um coeficiente multiplicador da tensão de cisalhamento na superfície da água, de valor igual a 0,2 para as áreas consideradas com vegetação, baseado em Ramming (1979), e igual a 1,0, nas demais regiões.

Situações simuladas

Três casos foram simulados, diferindo entre si quanto à área de atuação do vento: (1) no primeiro, considerou-se um vento uniforme, atuando sobre todo o sistema Mangueira-Taim; (2) no segundo caso, a ação do vento foi considerada apenas sobre a lagoa Mangueira; (3) e, no terceiro, somente a área do banhado do Taim esteve sobre a ação direta do vento.

Dessa forma, enquanto o primeiro caso corresponde a uma circulação da água no banhado do Taim, provocada pela ação direta do vento em conjunto com a oscilação dos níveis da Mangueira,

sendo esta causada pela ação do vento sobre a mesma, nas outras duas situações, o escoamento no banhado é induzido apenas por um dos dois fatores isolados.

Em todos os casos, simulou-se um período de 4 dias com as condições de vento mostradas na figura 10, onde o vento permaneceu, predominantemente, com a direção em torno de Sudoeste. Esse período foi extraído da série histórica de dados do posto Negreiros, cuja localização é apresentada na figura 2. As direções Nordeste e Sudoeste são as direções de maior ocorrência de ventos na região, sendo que a última foi a adotada por representar uma situação favorável ao fluxo no sentido da lagoa Mangueira em direção ao Taim, mais interessante para os objetivos deste estudo.

Adotou-se um intervalo de tempo de cálculo de 60s, que, para a malha de 360m de espaçamento e as profundidades do sistema modelado, resulta em um número de Courant (Cr) inferior a 1,5, valor abaixo do limite (Cr=3,0) acima do qual foram observados problemas numéricos em esquemas do tipo ADI (Benqué et al., 1982).

Como condições iniciais, adotou-se um nível da água horizontal na cota 2,90m, referente a uma condição de nível médio no banhado, além de velocidades nulas em todos os elementos da malha numérica.

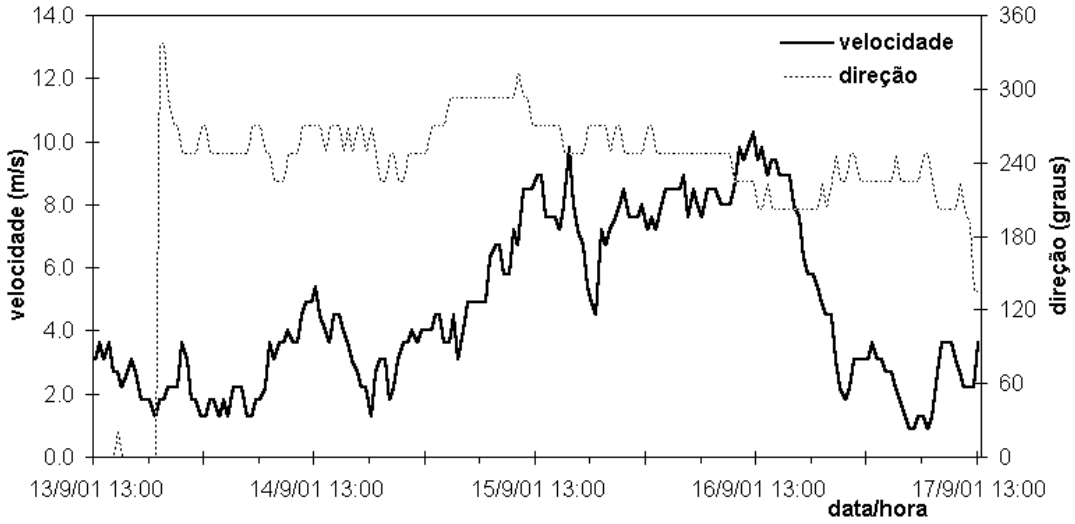


Figura 10. Velocidade e direção do vento durante 4 dias de setembro/2001, retiradas dos dados do posto Negreiros e adotadas nas simulações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A consideração do vento atuando sobre todo o sistema Mangueira-Taim (caso 1) ou apenas sobre a lagoa Mangueira (caso 2) acarretou no mesmo padrão de circulação da água na lagoa. As variações de nível e de velocidade do escoamento com o tempo, em ambas as situações, foram praticamente idênticas entre si, como ilustram as figuras 11 e 12. Isso indica que a circulação da água na Mangueira foi quase totalmente induzida pela ação direta do vento sobre a mesma, sendo

desprezível a contribuição da variação dos níveis no banhado, resultante do efeito do vento sobre este.

A constatação anterior é reforçada pela análise dos resultados do terceiro caso, onde não se observou, praticamente, nenhum efeito sobre a lagoa Mangueira, que permaneceu com uma superfície d'água sem oscilação e velocidades de escoamento desprezíveis, relativamente aos casos 1 e 2. Devido à configuração da distribuição espacial da vegetação considerada, o fato de não haver vegetação na porção leste da interface entre a lagoa e o banhado permitiu uma pequena circulação de água na área da lagoa próxima a essa região, mas muito restrita (figura 14).

A predominância de um vento em torno da direção Sudoeste provocou a inclinação da superfície da lagoa, elevando a parte norte e rebaixando a parte sul, o que pode ser observado pelo comportamento dos níveis nos pontos 1 e 5 (figuras 11 e 12), para os casos 1 e 2. Após 74h de simulação, esse desnível alcançou o valor máximo de 0,74m, cerca de 2,5h após o instante em que o vento atingiu a velocidade máxima de 10,3m/s.

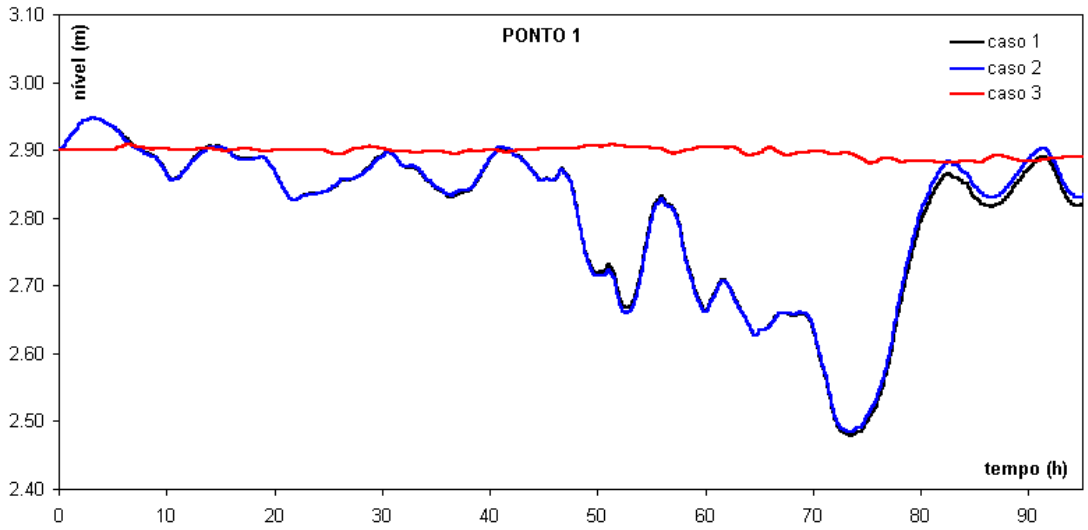


Figura 11. Variação do nível ao longo do tempo no ponto 1, para os 3 casos simulados.

Tendo como enfoque o banhado do Taim, as simulações das três situações estudadas possibilitaram ter uma noção do quanto a oscilação dos níveis da água em tal região tem origem na ação direta do vento sobre a mesma e o quanto é causada pela variação dos níveis na lagoa. No gráfico da variação do nível com o tempo referente ao ponto 8 (figura 13), identifica-se, claramente, que a oscilação resultante da ação do vento uniforme sobre todo o sistema modelado foi semelhante à combinação dos efeitos resultantes da ação direta do vento sobre o banhado e sobre a Mangueira. Tomando o nível inicial como referência, observa-se que, em alguns momentos, tais efeitos foram opostos: enquanto um provocou a elevação, o outro contribuiu para o rebaixamento dos níveis,

como o ocorrido após 60h de simulação. Em outros instantes, como após as 80h, ambos os efeitos provocaram uma oscilação do nível da água no mesmo sentido.

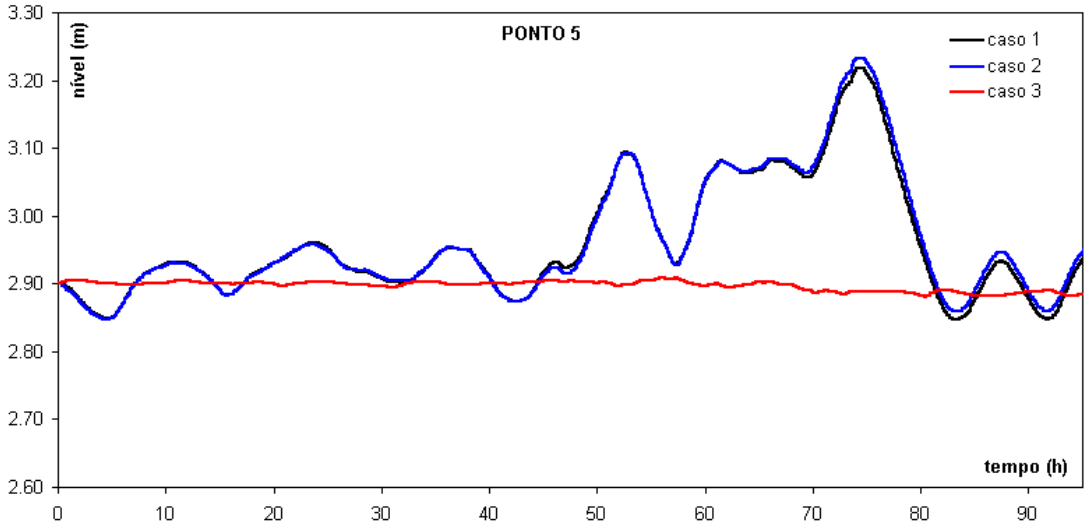


Figura 12. Variação do nível ao longo do tempo no ponto 5, para os 3 casos simulados.

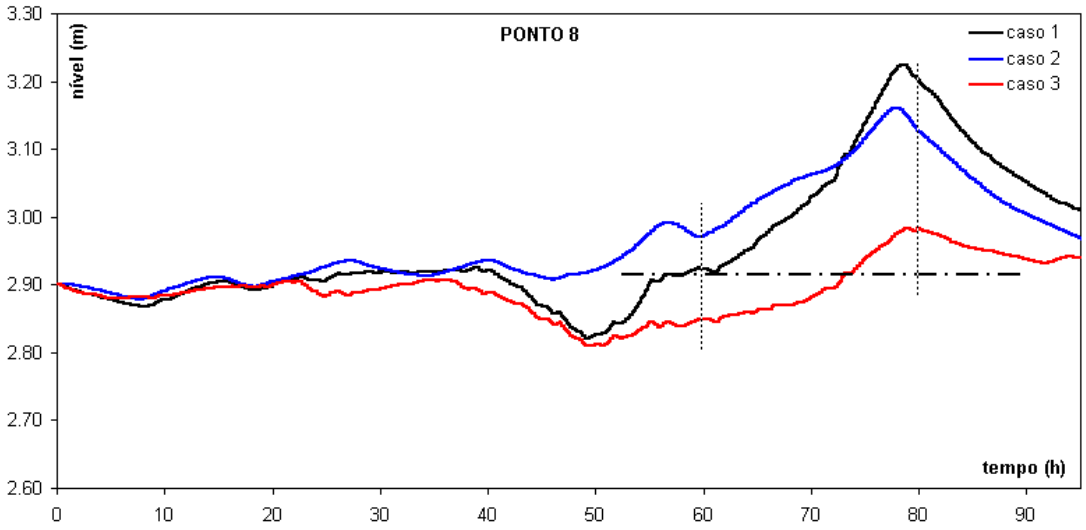


Figura 13. Variação do nível ao longo do tempo no ponto 8, para os 3 casos simulados.

Como mostram os campos de velocidade da figura 14, nas áreas consideradas com vegetação, onde se impôs um coeficiente de Manning elevado e se reduziu a tensão de cisalhamento do vento, o escoamento apresentou comportamento bem diferente das áreas sem vegetação.

Quando a atuação do vento foi restrita à lagoa Mangueira, observou-se uma circulação da água no banhado do Taim, predominantemente, direcionada pelo fluxo afluente da lagoa Mangueira. Conforme a configuração da distribuição espacial da vegetação adotada, apenas uma pequena parte leste da região da interface não foi coberta por macrófitas aquáticas, servindo como

principal região de interação com a lagoa Mangueira, como mostram os campos de velocidades da figura 14.

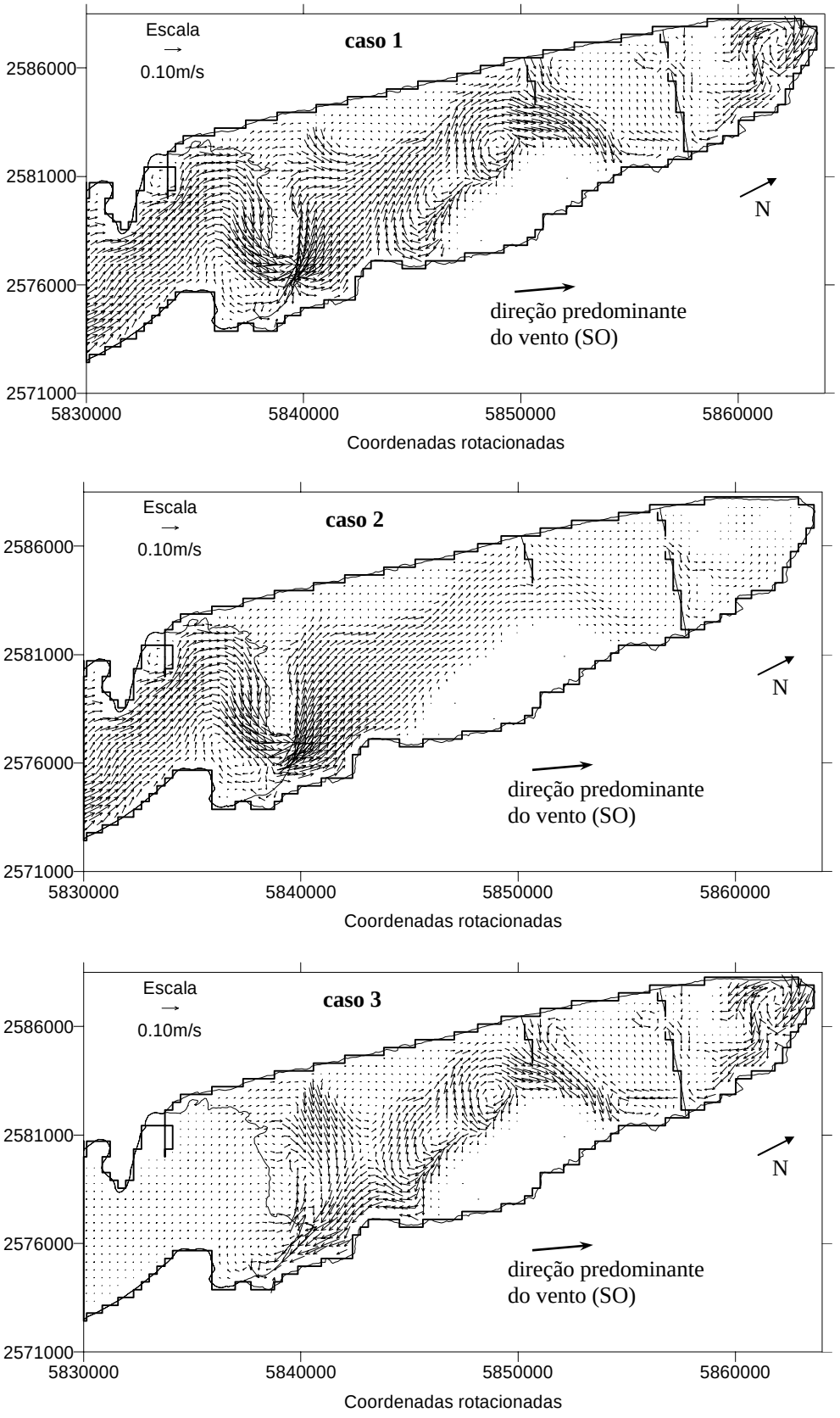


Figura 14. Detalhe da região do banhado do Taim com campos de velocidade após 60h de simulação, para os 3 casos simulados.

CONCLUSÕES

A vegetação presente nos banhados é bastante influenciada pela oscilação dos níveis e pela circulação da água, refletindo alterações de origem antrópica sobre tais ecossistemas. Por oferecer uma resistência adicional ao fluxo e proteger contra a ação do vento, a distribuição espacial da vegetação dita o padrão geral de circulação da água, e, portanto, amplifica as conseqüências de intervenções como a instalação e a operação de estruturas e a captação de água para agricultura, por exemplo.

De modo geral, observou-se que o comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim está fortemente associado à presença da vegetação, cuja ocorrência temporal e espacial é dependente da oscilação do nível da água. Portanto, prováveis cenários de gerenciamento da água na região devem levar em conta o impacto sobre a vegetação e, consequentemente, sobre a circulação da água.

Neste estudo, a configuração da distribuição espacial da vegetação foi resultante da aplicação de um critério simplificado, baseado nas condições de profundidade suportadas pelas macrófitas aquáticas emergentes, considerando que o nível permanecera constante por um longo período de tempo. Isso representa uma situação factível, tendo em vista a falta de um gerenciamento adequado das comportas de saída e a captação de água para orizicultura, além do aterro da BR-471, cuja construção foi responsável pelo isolamento entre o Taim e a lagoa Mirim.

A interação do banhado com a lagoa Mangueira é regida pela ação do vento sobre a última e, principalmente, pela resistência provocada pela vegetação na interface com o banhado, levando a concluir que a alteração do padrão espacial da vegetação no Taim, certamente, terá impacto também na circulação da água na Mangueira.

Além de servir para analisar prováveis cenários de gerenciamento, o estudo da hidrodinâmica de um ecossistema como o banhado do Taim pode ser utilizado para o entendimento de diversos processos biológicos e ecológicos, bem como da ocorrência e distribuição espacial de macrófitas aquáticas, organismos bentônicos e peixes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELSALAM, M. W. et al., 1992. Flow capacity through wide and submerged vegetal channels. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v. 118, n. 5, p. 724-732.

AUMEN, N. G. (ed.), 2003. **The role of flow in the Everglades – ridge and slough landscape**. Science Coordination Team – South Florida Ecosystem Restoration Working Group, p. 62.

BENQUÉ, J. P. et al., 1982. New method for tidal current computation. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division**, v. 108, n. WW3, p. 396-417.

BOLSTER, C. H. e SAIERS, J. E., 2002. Development and evaluation of a mathematical model for surface-water flow within the Shark River Slough of the Florida Everglades. **Journal of Hydrology**, v. 259, p. 221-235.

CASALAS, A. B., 1996. **IPH-A – Aplicativo para modelação de estuários e lagoas, Manual de Uso**. ABRH, Recursos Hídricos, n. 33.

CLYMO, R. S. et al., 1995. Conclusion: directions for research on wetlands in Britain. In: HUGHES, J. M. R. e HEATHWAITE, L. (eds), **Hydrology and hydrochemistry of british wetlands**, John Wiley & Sons, c. 25, p. 467-478.

CZM, 2001. The Massachusetts Office of Coastal Zone Management, **Wetlands ecology and assessment**. Disponível em: <http://www.state.ma.us/czm/wastart.htm>. Acesso em: 19 dez. 2001.

FENG, K. e MOLZ, F. J., 1997. A 2-D, diffusion based, wetland flow model. **Journal of Hydrology**, 196, p. 230-250.

HEATHWAITE, A. L., 1995. Overview of the hydrology of british wetlands. In: HUGHES, J. M. R. e HEATHWAITE, L. (eds), **Hydrology and hydrochemistry of british wetlands**, John Wiley & Sons, c. 2, p. 11-20.

IBAMA, 2003. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. Disponível em <http://www2.ibama.gov.br/unidades/estacoes/reuc/3017.htm>. Acesso em: 20 fev. 2003.

KADLEC, R. H., 1990. Overland flow in wetlands: vegetation resistance. **Journal of Hydraulic Engineering**, 116 (5), p. 691-706.

MARBLE, A. D., 1992. **A guide do wetland functional design**. Lewis Publishers.

MARQUES, D. M. et al., 1997. A importância do hidroperíodo no gerenciamento de água em terras úmidas (wetlands) com uso múltiplo – o caso da Estação Ecológica do Taim. In: **XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, v. 3, p. 8, Salvador.

MITSCH, W. J. e GOSSELINK, J. G., 1986. **Wetlands**. Van Nostrand Reinhold, New York.

NEWALL, A. M. e HUGHES, J. M. R., 1995**.** Microflow environments of aquatic plants in flowing water wetlands. In: HUGHES, J. M. R. e HEATHWAITE, L. (eds), **Hydrology and hydrochemistry of british wetlands**, John Wiley & Sons, c. 19, p. 363-381.

PELD, 2002. Pesquisas Ecológicas de Longa Duração, **Sistema Hidrológico do Taim**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <http://www.peld.ufgrs.br/projetos/carac.htm>. Acesso em: 6 mar. 2002.

PETRYK, S.; BOSMAJIAN III, G., 1975. Analysis of flow through vegetation. **Journal of Hydraulics Division**, ASCE, v. 101, n. HY7, p. 871-884.

RAMMING, H. -G., 1979. The dynamics of shallow lakes subject to wind – an application to Lake Neusiedl, Austria. In: GRAF, W. H.; MORTIMER, C. H. (eds). **Hydrodynamics of lakes**, Developments in Water Sciences, 11, p. 65-75.

SHIH, S. F. e RAHI, G. S., 1981. Seasonal variations of manning's roughness coefficient in a subtropical marsh. **Transactions of American Society of Agricultural Engineering**, v. 25, n. 1, p. 116-119.

TSUJIMOTO, T., 1999. Fluvial processes in streams with vegetation. **Journal of Hydraulic Research**, v. 37, n. 6, p. 789-803.

TURNER, A. K. e CHANMEESRI, N., 1984. Shallow flow of water through non-submerged vegetation. **Agricultural Water Management**, 8, p. 375-385.

VILLANUEVA, A. O. N., 1997. **Simulação de áreas de inundação dinâmicas: canais compostos e wetlands**. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

VILLANUEVA, A. O. N. et al., 2000. The Taim wetland conflict: a compromise between environment conservation and irrigation. **Water International**, v. 25, n. 4, p. 610-616.