

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Instituto de Pesquisas Hidráulicas

**ANÁLISE DOS PRINCIPAIS FATORES INTERVENIENTES NO
COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DO BANHADO DO TAIM (RS)**

ADRIANO ROLIM DA PAZ

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Prof. Dra. Edith Beatriz Camaño Schettini

Co-orientador: Prof. Dr. Adolfo Orestes Nicolás Villanueva

Banca Examinadora

Prof. PhD Lafayette Dantas da Luz	UFBA
Prof. PhD David Manuel L. da Motta Marques	IPH/UFRGS
Prof. Dr. André Luiz Lopes da Silveira	IPH/UFRGS

Porto Alegre, setembro de 2003

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação da Profa. Dra. Edith Beatriz Camaño Schettini e co-orientado pelo Prof. Dr. Adolfo O. Nicolás Villanueva, ambos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Coim



“Sinfonia da natureza”.

(Pedrazzi, 1977)

Aos meus pais, Alisson e Ilma, que sempre valorizaram a busca pelo conhecimento e me apoiaram, irrestritamente, ao longo desta jornada, e com quem sei que sempre contarei.

AGRADECIMENTOS

Não foi fácil, não foi simples e muito trabalho foi necessário ao longo do desenvolvimento desta pesquisa. Contudo, foram as dificuldades e a complexidade que tornaram sua conclusão ainda mais gratificante e ampliaram meu aprendizado. Agradeço aos orientadores Beatriz e Adolfo, pela oportunidade de trabalharmos juntos nesta pesquisa.

Para levar adiante o curso e a dissertação, muitas pessoas contribuíram e aqui deixo registrados meus sinceros agradecimentos a todos. Em especial, agradeço:

- aos meus pais, pelo inquestionável apoio, desde a idéia inicial de vir para Porto Alegre fazer o mestrado como durante todo o curso;
- aos meus irmãos, pela amizade que há entre nós;
- à Isabela, que, além de mudar a minha vida, sempre ofereceu carinho e apoio, de fundamental importância;
- aos professores da Universidade Federal da Paraíba, pelo incentivo ao trabalho na área de Recursos Hídricos e à formação qualificada dos alunos;
- ao professor da UFPB Alain Passerat de Silans, cujos conhecimentos e experiência transmitidos foram fundamentais na minha formação inicial nesta área;
- aos professores Beatriz e Adolfo, pela amizade, orientação e ensinamentos passados, e, em extensão, aos demais professores do IPH;
- ao professor Alejandro, pela atenção e suporte com o modelo IPH-A;
- à Nadir e Maria, pela atenção e ajuda com os assuntos da secretaria da Pós-Graduação;
- aos hidrotécnicos do IPH, César, Pedrinho, Zé Carlos, Álvaro, Antônio Bueno e demais membros da equipe, pela companhia durante as visitas ao Taim;
- ao pessoal da biblioteca do IPH, pelo pronto atendimento e atenção dispensada;
- ao Restaurante Universitário do Campus do Vale, pelas ótimas refeições;
- aos vigilantes do IPH, pelos serviços prestados nos sábados, domingos e feriados de pesquisa, e deles estendo aos demais funcionários do IPH;
- à cidade de Porto Alegre e ao Estado do Rio Grande do Sul, pela boa acolhida;
- aos colegas companheiros de jornada do IPH ou externos que, de diversas formas (conversas técnicas, troca de experiências, conversas fiadas, eventos gastronômicos/etílicos, jogos de futebol e festas), contribuíram para a elaboração deste trabalho e para a vida em Porto Alegre. Listo aqui alguns nomes que me recordo agora: (do IPH) Eduardo, Diego, Carol Costi, Carol Farias, Luis Gustavo, Gilliano,

Márcio, Wálter C., Wálter V., Marllus, Jaildo, Renato, Joana, Fábio, Omar, Sidnei, Laudízio, Daniel, Ruth, Vladimir, Ane, Bia, Emília, Jean, Mário, Patrícia, Aquiles, Sefione, Benedito, Herenice, Laura, Nilson, Elba, Dante, Ivanilto, Daniela, Andréa, Mônica, Cristiane...; (externos) Caju, Marilu, Felipe, Uziel, Otaciana, Rysleine, Roberta, Marina...

- aos amigos da “Cauduro”: Luis Gustavo de Moura Reis, Gilliano Borges, Márcio Nóbrega e Eduardo Bueno, com quem tive a honra de conviver durante os melhores e piores momentos no Rio Grande do Sul. A vida durante o mestrado não teria sido tão boa sem o companheirismo de tais amigos. Ficaram muitas histórias, que lembrarei para o resto da vida;
- aos amigos Diego e Marilu, e às respectivas famílias Carrillo (Miguel, Sandra, Felipe e Fabíola) e Fiegenbaum (Marino, Marli e Mariele), pela amizade e inestimável apoio aos amigos “do Norte”;
- ao amigo Jean Ricardo, pelo apoio fundamental na etapa final da dissertação;
- ao CNPq, pela concessão de bolsa de estudo e
- ao apoio do programa Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD/CNPq) – Sistema Hidrológico do Taim (sítio 7), no qual esta pesquisa está inserida.

RESUMO

Os ecossistemas conhecidos como banhados são corpos d'água rasos de grande importância ecológica, embora apenas recentemente isso começou a ser reconhecido. Além de servirem de habitat para uma diversidade de espécies de seres vivos e constituírem áreas de transição entre ambientes aquáticos e terrestres, os banhados ainda são responsáveis pela atenuação de cheias, melhoria da qualidade da água e recarga/descarga de águas subterrâneas.

Ao lado 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 macrófitas aquáticas, que são sensíveis a alterações no nível e no padrão de circulação da água. Isso tem ocorrido 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 (modelo IPH-A), associado a um algoritmo de secagem/inundação, ao sistema formado pela lagoa Mangueira e pelo banhado do Taim, procurando analisar os principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do banhado. Foram avaliados os efeitos decorrentes da ação de cisalhamento do vento na superfície da água, da resistência ao escoamento e da proteção contra a ação do vento proporcionados pelas macrófitas aquáticas e a interação com a lagoa Mangueira. A resistência da vegetação ao escoamento foi representada na modelagem pela adoção de um coeficiente de Manning superior ao das áreas consideradas sem vegetação e, para representar o efeito protetor contra a ação do vento, considerou-se uma redução da tensão de cisalhamento na superfície da água nas áreas com vegetação.

Verificou-se, através das simulações numéricas, que os fatores analisados têm papel fundamental sobre a hidrodinâmica do Taim, estando fortemente associados entre si. Em particular, os resultados mostraram que a distribuição espacial da vegetação norteia o padrão geral da circulação da água no banhado e sua ocorrência, principalmente na interface com a lagoa, diminui a influência desta sobre o Taim, significativamente. Outro fato relevante é que, conforme o nível da água, diferentes regiões do banhado ficam secas, resultando padrões hidrodinâmicos distintos, que também diferem quanto à influência que sofrem do vento e da lagoa Mangueira.

ABSTRACT

Ecosystems known as wetlands are shallow water bodies whose ecological importance has been just recently recognized. Besides being habitat to a wide variety of wildlife species and transitional area between aquatic and terrestrial environments, wetlands are responsible for flood attenuation, water quality improvement and groundwater recharge/discharge.

In conjunction with natural water level fluctuation, known as hydroperiod, water circulation plays an important role in wetland structure and functioning. These ecosystems are characterized by small depths and remarkable occurrence of aquatic macrophyte sensible to water level and water movement pattern changes. Such pattern changes have had place in Taim Wetland (RS) – study case of the present research – as a consequence of human activities, like water withdrawal to rice farming and Lake Mirim exit gates operation.

In the present research a two-dimensional horizontal hydrodynamic model (IPH-A model) associated with a wetting and drying algorithm was applied to the system formed by lake Mangueira and Taim Wetland, aiming to analyze the mainly involved factors in wetland hydrodynamic. Effects due to wind shear stress in water surface, water flow resistance and wind protection provide by aquatic macrophyte and interaction with lake Mangueira were analysed. Vegetation water flow resistance was represented in the modeling system through adoption of a Manning coefficient higher than that in unvegetated areas, while wind protection effect was modeled by decreasing water surface shear stress in vegetated areas.

It was verified through numerical simulations that the analyzed factors have important role in Taim hydrodynamics, being strongly associated with each other. In particular, results showed that spatial vegetation distribution controls general water circulation pattern in the wetland. Vegetation occurrence, mainly in Lake Mangueira interface, significantly reduces the lake influence over Taim Wetland. Another remarkable observation is that according to water level, different wetland regions dry up, therefore resulting in different hydrodynamic patterns, which are also different in relation to wind and Lake Mangueira influence.

SUMÁRIO

	pág
Lista de símbolos	viii
Lista de tabelas	xii
Lista de figuras	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa e relevância do estudo	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Introdução à metodologia	3
1.4 Organização do texto	4
2 O BANHADO DO TAIM	6
2.1 Introdução	6
2.2 Visão geral de banhados	6
2.2.1 Definição e caracterização	6
2.2.2 Funções e valores	7
2.2.3 O fator hidrologia	8
2.2.4 O fator vegetação	10
2.3 A Estação Ecológica e o banhado do Taim	12
2.3.1 Localização e descrição	12
2.3.2 Caracterização hidrológica	14
2.3.3 Conflitos pelo uso da água	17
3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE CORPOS D'ÁGUA RASOS	22
3.1 Introdução	22
3.2 Equacionamento básico do escoamento de um fluido	22
3.3 Modelos hidrodinâmicos bidimensionais	24
3.3.1 Resistência ao escoamento	28
3.3.2 Ação do vento	31
3.4 Modelagem numérica	34
3.5 Histórico da modelagem de banhados na literatura	35
4 MODELO IPH-A E ALGORITMO DE SECAGEM/INUNDAÇÃO	37

4.1 Introdução	37
4.2 O modelo IPH-A	37
4.2.1 Equacionamento matemático e método numérico	37
4.2.2 Estrutura do modelo	39
4.3 Algoritmo de secagem/inundação	41
4.3.1 Métodos empregados na literatura	42
4.3.2 O algoritmo implementado no IPH-A	43
4.3.2.1 Concepção	43
4.3.2.2 Tratamento da topografia	43
4.3.2.3 Descrição do algoritmo	45
4.3.2.4 Teste do algoritmo de secagem/inundação	47
5 PREPARAÇÃO DOS DADOS E SIMULAÇÕES PRELIMINARES	51
5.1 Introdução	51
5.2 Delimitação dos contornos	51
5.3 Traçado do contorno no modelo IPH-A	54
5.4 Modelo numérico do terreno	57
5.5 Dados de nível de água	62
5.6 Dados de vento	64
5.7 Análise do refinamento da malha de cálculo	67
5.8 Verificação do algoritmo de secagem/inundação no banhado do Taim	72
5.8.1 Descrição das simulações	72
5.8.2 Resultados e discussão	73
5.9 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo IPH-A	76
5.9.1 Condições gerais de simulação	77
5.9.2 Efeito de Coriolis	77
5.9.3 Coeficiente de viscosidade turbulenta	79
5.9.4 Coeficiente de rugosidade de Manning	81
5.9.5 Coeficiente redutor da ação do vento	85
6 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS DO BANHADO DO TAIM	88
6.1 Introdução	88
6.2 Operação das comportas	88
6.2.1 Descrição das simulações	88
6.2.2 Análise dos resultados	89

6.3 Condição de contorno tipo pulso	91
6.3.1 Descrição das simulações	91
6.3.2 Análise dos resultados	92
6.4 Vento constante e seiche da lagoa Mangureira	96
6.4.1 Descrição dos casos simulados	96
6.4.2 Análise dos resultados: vento constante	98
6.4.3 Análise dos resultados: seiche da lagoa Mangureira	102
6.5 Distribuição espacial da vegetação	104
6.5.1 Mapas de vegetação	104
6.5.2 Descrição das situações simuladas	107
6.5.3 Análise dos resultados	109
6.5.3.1 Quanto à distribuição espacial do vento	110
6.5.3.2 Quanto à direção predominante do vento	115
6.5.3.3 Quanto ao nível d'água inicial	119
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	122
7.1 Conclusões	122
7.1.1 Sobre a metodologia empregada	122
7.1.2 Sobre o comportamento hidrodinâmico do Taim	122
7.2 Recomendações	127
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXO A1	A1

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{g}	aceleração da gravidade terrestre
δ	altura de referência da velocidade do vento, relativa à superfície da água
α	ângulo de rotação de coordenadas
ν	coeficiente de viscosidade cinemática
ν_T	coeficiente de viscosidade cinemática turbulenta
κ	constante de Von Kármán
x'	eixo x rotacionado
y'	eixo y rotacionado
U'	flutuação na vertical da componente da velocidade do escoamento na direção x
V'	flutuação na vertical da componente da velocidade do escoamento na direção y
\vec{F}_V	força de atrito viscoso
\vec{F}_C	força de Coriolis
\vec{F}_G	força de gravidade
\vec{F}_I	força de inércia
\vec{F}_P	força de pressão
ϕ	latitude
ρ	massa específica da água
ρ_{ar}	massa específica do ar
\bar{u}	média no tempo da componente da velocidade do escoamento na direção x
\bar{v}	média no tempo da componente da velocidade do escoamento na direção y
\bar{p}	média no tempo da pressão
ε_T	média vertical do coeficiente de viscosidade cinemática turbulenta
ω	módulo da velocidade do vento
η	nível de água variável com o tempo
Δ	operador laplaciano
∇	operador nabla
Ω	parâmetro de Coriolis
Δt	passo de tempo de cálculo
T_ω	período de oscilação
τ_s	tensão de cisalhamento na superfície da água
τ_f	tensão de cisalhamento no fundo

Δh_p	variação percentual da altura do pico
Δt_p	variação percentual do tempo de chegada do pico
ω	velocidade angular de rotação da Terra
ω_x	velocidade do vento na direção x
ω_y	velocidade do vento na direção y
\vec{V}	vetor velocidade do escoamento
$\vec{\omega}$	vetor velocidade do vento
τ_{sx}, τ_{sy}	tensões de cisalhamento na superfície da água, nas direções x e y, respectivamente
τ_{fx}, τ_{fy}	tensões de cisalhamento no fundo, nas direções x e y, respectivamente
$\Delta x, \Delta y$	espaçamentos da malha numérica nas direções x e y, respectivamente
2D	bidimensional
2DH	modelo hidrodinâmico bidimensional horizontal
2DV	modelo hidrodinâmico bidimensional vertical
A0, A1 e A2	cenários de simulação para testar algoritmo de secagem/inundação
ADI	<i>Alternating Direction Implicit</i>
AR	vetor para determinar a numeração dos elementos da malha numérica no IPH-A
BR	batimetria real
c	celeridade da onda
C	coeficiente de Chèzy
CC	cota cortada
C_d	coeficiente de arrasto do vento
CF	cota do fundo ou real
CFL	Courant-Friedrichs-Lewis
Cr	número de Courant
C_{red}	coeficiente redutor da ação do vento
C_u	coeficiente de Chèzy na face direita (dir. x) de um elemento da malha numérica
C_v	coeficiente de ajuste do vento
C_v	coeficiente de Chèzy na face superior (dir. y) de um elemento da malha numérica
dx	espaçamento da malha numérica
E	Leste
ENE	Leste-Nordeste
ESE	Leste-Sudeste
ESEC Taim	Estação Ecológica do Taim
ETM	<i>Enhanced Thematic Map</i>
g	módulo da aceleração da gravidade terrestre
H	profundidade do escoamento
h	profundidade fixa do plano de referência em relação ao fundo
H_1, H_2	profundidades do escoamento
h_p	altura do pico

hu	prof. fixa do escoam., na face direita (dir. x) de um elem. da malha numérica
hv	prof. fixa do escoam., na face superior (dir. y) de um elem. da malha numérica
I	número de uma linha genérica da malha numérica
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
j	coluna genérica da malha numérica
J	número de uma coluna genérica da malha numérica
k	linha genérica da malha numérica
K1	numeração atribuída aos elementos da malha numérica pelo modelo IPH-A
L	comprimento do corpo de água
L _s	escala de comprimento característica no corpo d'água
MNT	Modelo Numérico do Terreno
$k - \varepsilon$	modelo de turbulência com duas equações de transporte de grandezas turbulentas
n	coeficiente de Manning
N	Norte
n _b	coeficiente de Manning na região do banhado do Taim
NE	Nordeste
n _l	coeficiente de Manning nas lagoas Nicola, Jacaré e Mangueira
NNE	Norte-Nordeste
NNO	Norte-Noroeste
NO	Noroeste
O	Oeste
ONO	Oeste-Noroeste
OSO	Oeste-Sudoeste
p	pressão
P1, P2	pontos de análise de níveis e velocidades
R	raio hidráulico
RGB	red-green-blue
Ro	número de Rosby
S	Sul
S1, S2, S3, S4 e S5	casos simulados do sistema Mangueira-Taim com vento constante
SE	Sudeste
S _f	declividade da linha de energia
S _{fx} , S _{fy}	declividade da linha de energia nas direções x e y, respectivamente
SGE	Serviço Geográfico do Exército
SO	Sudoeste
SSE	Sul-Sudeste
SSO	Sul-Sudoeste
t	tempo
T	tirante de água
T01 a T25	casos simulados do sistema Mangueira-Taim
T1, T2	tirante de água na região D da figura 4.3
TM	<i>Thematic Map</i>

t_p	tempo de chegada do pico
U	média vertical da componente da velocidade do escoamento na direção x
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
V	média vertical da componente da velocidade do escoamento na direção y
W	componente do vetor velocidade do escoamento na direção z
WGS	<i>World Geodetic System</i>
x	direção no plano horizontal
xy	plano horizontal de referência
y	direção no plano horizontal
z	direção perpendicular ao plano horizontal

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1. Características das imagens de satélite da região do Taim utilizadas na pesquisa.	52
Tabela 5.2. Distribuição da frequência de ocorrência dos ventos.	65
Tabela 5.3. Especificações das malhas numéricas testadas.	67
Tabela 5.4. Valores do número de Courant (Cr) para diferentes malhas numéricas.	69
Tabela 6.1 Características do pico do pulso em alguns pontos.	93
Tabela 6.2. Casos simulados para analisar a seiche da lagoa Mangueira.	97
Tabela 6.3. Inclinação da superfície da água da lagoa Mangueira após 48h de vento constante.	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Processos associados com a melhoria da qualidade da água proporcionada pelos banhados. (Fonte: adaptado de EPA, 1992).	8
Figura 2.2. Processos fluviais associados à vegetação. (Fonte: adaptado de Tsujimoto, 1999).	10
Figura 2.3. Localização da Estação Ecológica do Taim.	12
Figura 2.4. Indicação dos limites da Estação Ecológica do Taim, sobre composição colorida RGB de imagem do satélite Landsat5, de 06/jul/1987 (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) local das fotos da figura 2.5.	13
Figura 2.5. Fotos do banhado do Taim, de 26/nov/2002, referentes à região indicada na figura 2.4.	14
Figura 2.6. Localização dos três subsistemas que compõem o Sistema Hidrológico do Taim: Sistema Norte, banhado do Taim e Lagoa Mangueira. (Fonte: Villanueva, 1997).	15
Figura 2.7. Foto do canal da Sarita (indicado pela seta vermelha), tirada da margem da estrada BR-471, em 09/jun/2001.	16
Figura 2.8. Foto do canal da Sarita (indicado pela seta vermelha), tirada da margem da estrada BR-471, em 26/nov/2002.	17
Figura 2.9. Foto do banhado do Taim, tirada da margem da BR-471, em 09/jun/2001, com indicação do canal paralelo a esta (seta vermelha).	17
Figura 2.10. Foto do banhado do Taim, tirada da margem da BR-471, em 18/set/2002, com indicação do canal paralelo a esta (seta vermelha).	18
Figura 2.11. Usos do solo na região da ESEC Taim. (Fonte: Villanueva, 1997).	20
Figura 2.12. Fotos com detalhe do “capivaroduto”, em duas épocas de níveis de água diferentes: (a) período de seca (Fonte: PELD, 2002); (b) período de cheia (18/set/2002).	21
Figura 3.1. Plano de referência (plano xy) e definição das variáveis η , h e H .	27
Figura 3.2. Relação entre a profundidade do escoamento e o coeficiente de Manning obtida de experimentos em campo, onde: veg. tipo 1 = predominância da espécie <i>Eichhornia crassipes</i> ; tipo 2 = composição de várias espécies. (Fonte: adaptado de Shih e Rahi, 1981).	31
Figura 3.3. Variação do coeficiente de Manning para diferentes velocidades do escoamento durante a fase de desenvolvimento da espécie <i>Potamogeton trichoides</i> (planta emergente). (Fonte: adaptado de Pitlo, 1979, apud Pitlo e Dawson, 1993).	31
Figura 3.4. Representação do movimento da superfície da água durante seiches dos tipos uninodal e binodal. (Fonte: adaptado de Martin e McCutcheon, 1999).	32
Figura 4.1. Esquema da malha numérica utilizada pelo IPH-A, com localização das variáveis nas quadrículas de cálculo.	39
Figura 4.2. Diagrama de funcionamento do modelo IPH-A, onde: o retângulo central delimita os módulos do modelo (representados pelos retângulos de linhas cheias); as linhas tracejadas indicam a relação entre os arquivos gerados pelo modelo (representados pelos retângulos chanfrados) e os módulos, e as linhas finas cheias representam a entrada de dados externos. (Fonte: adaptado de Casals, 1996).	40

Figura 4.3. Corte do terreno e definição das variáveis do algoritmo de secagem/inundação.	44
Figura 4.4. Diagrama de funcionamento do algoritmo de secagem/inundação.	46
Figura 4.5. Identificação das quadrículas vizinhas (a) e das velocidades impostas nulas (b).	46
Figura 4.6. Geometria do canal fictício usado para testar o algoritmo de secagem/inundação: (a) planta; (b) planta com contorno fechado ao redor da região elevada; (c) curvas de nível, em metros, da superfície do canal.	48
Figura 4.7. Perspectiva tridimensional da topografia do fundo do canal.	48
Figura 4.8. Nível ao longo do tempo nos pontos 3 e 5 do canal, para as simulações com contorno sólido ao redor da região elevada e com o algoritmo de secagem/inundação.	49
Figura 4.9. Componentes da velocidade do escoamento no ponto 5 do canal, para as simulações com contorno sólido ao redor da região elevada e com o algoritmo de secagem/inundação.	50
Figura 4.10. Campos de velocidades no canal fictício, durante teste do algoritmo de secagem/inundação (detalhe em torno da área elevada). Em cima: canal de contorno fechado ao redor da área elevada, para $t = 5,4$ h (a) e $t = 7,9$ h (b). Embaixo: canal com contorno original, para $t = 5,4$ h (c) e $t = 7,9$ h (d).	50
Figura 5.1. Composições coloridas RGB de imagens de satélite do banhado do Taim, de diferentes datas: (a) 06/jul/1987-imagem 1; (b) 04/mar/1997-imagem 2; (c) 18/ago/2000-imagem 3.	52
Figura 5.2. Delimitação do contorno do banhado do Taim e dos elementos internos sobre composição colorida da imagem de satélite 1 (WGS 84, UTM-22S), onde: (1) Lagoa Nicola; (2) região A; (3) região B; (4) região C; (5) Lagoa Jacaré; (6) canal do Jacaré; (7) canal da Sarita.	53
Figura 5.3. Delimitação do contorno da Lagoa Mangueira sobre composição colorida RGB da imagem de satélite 1 (WGS 84, UTM-22S) Em detalhe, tem-se a região da interface com o Taim, mostrando o contorno da lagoa obtido de Beltrame et al. (1998) (em amarelo) e o adotado neste estudo (em azul), além de alguns pontais.	55
Figura 5.4. Contornos do banhado do Taim adotados em algumas simulações: (a) o contorno coincide com a delimitação do banhado; (b) o contorno engloba parte norte da lagoa Mangueira.	56
Figura 5.5. Rotação de coordenadas do contorno do sistema Mangueira-Taim.	56
Figura 5.6. Contorno do sistema Mangueira-Taim rotacionado de 63° (sentido horário).	57
Figura 5.7. (a) Pontos utilizados para geração do MNT do banhado do Taim e (b) curvas de nível resultantes (valores de cota em metros, referidos ao nível do mar - SGE).	58
Figura 5.8. Curvas de nível das lagoas Nicola (a) e Jacaré (b), com valores em metros, referidos ao nível do mar (SGE).	59
Figura 5.9. Curvas de nível da Lagoa Mangueira (cotas em metros, relativas ao nível do mar - SGE).	59
Figura 5.10. Exemplo de superposição dos MNT para compor as matrizes de batimetria e de cotas do fundo: (a) MNT da lagoa Jacaré; (b) MNT da lagoa Nicola; (c) MNT do banhado do Taim; (d) composição dos vários MNT.	60
Figura 5.11. Localização dos perfis longitudinais da interface entre a lagoa Mangueira e o banhado do Taim.	61
Figura 5.12. Perfis topográficos longitudinais da interface entre o banhado do Taim e a lagoa Mangueira.	61
Figura 5.13. Localização das réguas limnimétricas e dos linígrafos da região do banhado do Taim.	62
Figura 5.14. Variação do nível da água no banhado do Taim, resultante das simulações de Villanueva (1997). (Fonte: adaptado de Villanueva, 1997).	63

Figura 5.15. Indicação das áreas consideradas secas (em cinza) para os três níveis de água característicos do banhado do Taim: (a) nível baixo (cota 2,40 m); (b) nível médio (cota 2,90 m); (c) nível alto (cota 3,40 m).	64
Figura 5.16. Rosa dos ventos com distribuição de frequência dos ventos, agrupado em 3 classes (o tamanho do triângulo indica a porcentagem do tempo em que o vento teve origem na direção correspondente; para cada direção, a porcentagem do tempo em que o vento foi fraco, moderado ou forte é indicada pela subdivisão do triângulo, conforme legenda).	66
Figura 5.17. Período de 4 dias de ventos com direção em torno de SO, extraído da série de dados do posto Negreiros.	66
Figura 5.18. Período de 4 dias de ventos com direção em torno de NE, extraído da série de dados do posto Negreiros.	67
Figura 5.19. Distribuição espacial do coeficiente de Manning, para análise do refinamento da malha numérica: (a) $dx = 180m$; (b) $dx = 360m$; (c) $dx = 480m$.	68
Figura 5.20. Localização dos pontos de verificação de níveis e velocidades ao longo das simulações para testar o refinamento da malha numérica.	69
Figura 5.21. Variação no tempo do nível no ponto A3.	70
Figura 5.22. Variação no tempo da componente da velocidade na direção O-E, no ponto A3.	70
Figura 5.23. Variação no tempo da componente da velocidade na direção S-N, no ponto A3.	70
Figura 5.24. Campos de velocidade após 12h de simulação, com uma malha de (a) 180m e (b) 360m, onde os vetores velocidade, na região da lagoa Mangueira, foram omitidos, por questão de escala.	71
Figura 5.25. Contornos do banhado do Taim utilizados nas simulações para verificar algoritmo de secagem/inundação (mapa rotacionado de 90° , sentido horário).	72
Figura 5.26. Campo de velocidades após 5h de simulação, para o cenário A0.	74
Figura 5.27. Campo de velocidades após 5h de simulação, para o cenário A1.	74
Figura 5.28. Campo de velocidades após 5h de simulação, para o cenário A2.	74
Figura 5.29. Variação no tempo da componente da velocidade na direção S-N, para o ponto B1.	75
Figura 5.30. Variação no tempo da componente da velocidade na direção E-O, para o ponto B1.	75
Figura 5.31. Variação no tempo da componente da velocidade na direção S-N, para o ponto B2.	76
Figura 5.32. Variação no tempo da componente da velocidade na direção E-O, para o ponto B2.	76
Figura 5.33. Localização dos pontos de verificação de níveis e velocidades, com detalhe da região norte do banhado.	78
Figura 5.34. Campo de velocidades no banhado do Taim, para o caso sem considerar a força de Coriolis, após 4 dias de simulação.	79
Figura 5.35. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando a força de Coriolis (latitude 33° Sul), após 4 dias de simulação.	79
Figura 5.36. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de viscosidade turbulenta nulo, após 4 dias de simulação.	80
Figura 5.37. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de viscosidade turbulenta igual a $20 \text{ m}^2/\text{s}$, após 4 dias de simulação.	80
Figura 5.38. Nível na lagoa Mangueira (ponto C5) ao longo do tempo.	82

Figura 5.39. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de Manning igual a 0,02 para a região do banhado, após 4 dias de simulação.	83
Figura 5.40. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de Manning igual a 0,1 para a região do banhado, após 4 dias de simulação.	83
Figura 5.41. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de Manning igual a 0,4 para a região do banhado, após 4 dias de simulação.	84
Figura 5.42. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de Manning igual a 2,0 para a região do banhado, após 4 dias de simulação.	84
Figura 5.43. Nível no banhado do Taim (ponto C7) ao longo do tempo.	85
Figura 5.44. Campo de velocidades no banhado do Taim, sem reduzir a tensão do vento na região do banhado ($c_{red} = 1,0$), após 4 dias de simulação.	86
Figura 5.45. Campo de velocidades no banhado do Taim, reduzindo em 50% a tensão do vento sobre a região do banhado ($c_{red} = 0,5$), após 4 dias de simulação.	86
Figura 5.46. Campo de velocidades no banhado do Taim, reduzindo em 80% a tensão do vento sobre a região do banhado ($c_{red} = 0,2$), após 4 dias de simulação.	87
Figura 5.47. Campo de velocidades no banhado do Taim, reduzindo em 90% a tensão do vento sobre a região do banhado ($c_{red} = 0,1$), após 4 dias de simulação.	87
Figura 6.1. Localização dos pontos de análise de níveis e velocidades, com detalhe da região norte do banhado.	89
Figura 6.2. Nível no banhado do Taim (ponto C9), durante simulações com operação das comportas.	90
Figura 6.3. Nível no banhado do Taim (ponto C10), durante simulações com operação das comportas.	90
Figura 6.4. Condição de contorno de nível imposta para a simulação do banhado do Taim.	92
Figura 6.5. Localização dos pontos de verificação de nível e velocidade ao longo das simulações.	93
Figura 6.6. Evolução do nível ao longo do tempo durante as simulações com condição de contorno tipo pulso, em vários pontos.	94
Figura 6.7. Variação no tempo das componentes da velocidade do escoamento no ponto C14.	95
Figura 6.8. Variação no tempo das componentes da velocidade do escoamento no ponto C5.	95
Figura 6.9. Nível da água no ponto C1, para os casos S1, S2 e S5, ao longo das 48h de vento constante.	99
Figura 6.10. Nível da água no ponto C3, para os casos S1, S2 e S5, ao longo das 48h de vento constante.	99
Figura 6.11. Nível da água no ponto C5, para os casos S1, S2 e S5, ao longo das 48h de vento constante.	100
Figura 6.12. Nível da água nos pontos C1, C3 e C5, para o caso S3, ao longo das 48h de vento constante.	100
Figura 6.13. Nível da água nos pontos C1, C3 e C5, para o caso S4, ao longo das 48h de vento constante.	101
Figura 6.14. Nível da água no ponto C1, para o caso S5, a partir do instante em que o vento pára, após 48h constante.	103
Figura 6.15. Nível da água no ponto C3, para o caso S5, a partir do instante em que o vento pára, após 48h constante.	103
Figura 6.16. Nível da água no ponto C5, para o caso S5, a partir do instante em que o vento pára, após 48h constante.	104
Figura 6.17. Parâmetros estabelecidos para gerar os mapas de vegetação e as respectivas denominações.	105
Figura 6.18. Configuração da distribuição espacial da vegetação tipo A, com localização dos pontos de análise de níveis e velocidades.	106

Figura 6.19. Configuração da distribuição espacial da vegetação tipo B, com localização dos pontos de análise de níveis e velocidades.	106
Figura 6.20. Configuração da distribuição espacial da vegetação tipo C, com localização dos pontos de análise de níveis e velocidades.	106
Figura 6.21. Localização dos pontos de análise de níveis e velocidades.	107
Figura 6.22. Descrição resumida dos diversos casos simulados.	108
Figura 6.23. Campo de velocidades no banhado do Taim, para o caso T23, em $t = 60$ h.	110
Figura 6.24. Nível da água no ponto C5, para três casos simulados com a configuração de vegetação A.	111
Figura 6.25. Velocidade do escoamento na direção x no ponto C4, para três casos simulados com a configuração de vegetação A.	111
Figura 6.26. Velocidade do escoamento na direção y no ponto C4, para três casos simulados com a configuração de vegetação A.	112
Figura 6.27. Nível da água no ponto C8, para três casos simulados com a configuração de vegetação A.	112
Figura 6.28. Nível da água no ponto C8, para três casos simulados com a configuração de vegetação B.	113
Figura 6.29. Nível da água no ponto C8, para três casos simulados com a configuração de vegetação C.	114
Figura 6.30. Campo de velocidades no banhado, para o caso T20 (veg. A), em $t = 60$ h.	114
Figura 6.31. Campo de velocidades no banhado, para o caso T21 (veg. B), em $t = 60$ h.	115
Figura 6.32. Campo de velocidades no banhado, para o caso T22 (veg. C), em $t = 60$ h.	115
Figura 6.33. Campo de velocidades no banhado, para o caso T02, em $t = 60$ h.	116
Figura 6.34. Campo de velocidades no banhado, para o caso T08, em $t = 60$ h.	116
Figura 6.35. Campo de velocidades no banhado, para o caso T01, em $t = 60$ h.	117
Figura 6.36. Campo de velocidades no banhado, para o caso T07, em $t = 60$ h.	117
Figura 6.37. Nível da água na lagoa Jacaré (ponto C10), para as simulações com um nível inicial alto (cota 3,40 m).	118
Figura 6.38. Nível da água na lagoa Jacaré (ponto C10), para as simulações com um nível inicial médio (cota 2,90m).	118
Figura 6.39. Nível da água no extremo norte da lagoa Mangueira (ponto C5), para as simulações com um nível inicial alto (cota 3,40m).	119
Figura 6.40. Nível da água no extremo norte da lagoa Mangueira (ponto C5), para as simulações com um nível inicial médio (cota 2,90m).	119
Figura 6.41. Campo de velocidades no banhado, para o caso T05, após 60 h de simulação.	120
Figura 6.42. Nível da água na lagoa Jacaré (ponto C10), para as simulações com um nível inicial baixo (cota 2,40m).	121
Figura 6.43. Nível da água no extremo norte da lagoa Mangueira (ponto C5), para as simulações com um nível inicial baixo (cota 2,40m).	121
Figura A1.1. Exemplo de uma linha genérica k com a indicação das variáveis.	A12
Figura A1.2. Esquema da localização das equações da continuidade, em uma linha genérica k.	A13
Figura A1.3. Esquema da localização das equações dinâmicas no eixo x, em uma linha genérica k.	A13
Figura A1.4. Exemplo de uma coluna genérica j com a indicação das variáveis.	A16
Figura A1.5. Esquema da localização das equações da continuidade (a) e dinâmicas no eixo y (b), em uma coluna genérica j.	A17

1 INTRODUÇÃO

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Os banhados são ecossistemas de grande importância ecológica, principalmente por servirem de habitat para diversas espécies de seres vivos e por constituírem áreas de transição entre ambientes aquáticos e terrestres. Também desempenham uma série de funções e valores à sociedade, como atenuação de cheias, deposição de sedimentos, remoção de poluentes e recarga e descarga de águas subterrâneas, entre outros (Mitsch e Gosselink, 1986).

Embora existam banhados muito distintos entre si, eles são caracterizados e regidos pela frequência e duração do nível da água, que condicionam as características da vegetação e todos os processos físicos, químicos e biológicos associados a tais sistemas (Clymo et al., 1995). Estudos recentes comprovam que, além do hidroperíodo, a circulação da água, propriamente dita, constitui um dos fatores fundamentais para o funcionamento desse tipo de ecossistema (Aumen, 2003).

A vegetação e o vento são dois dos principais agentes governantes da hidrodinâmica de banhados. A ocorrência de vegetação, as suas características e a forma como está espacialmente distribuída têm papel fundamental sobre o comportamento hidrodinâmico dos banhados, ou de qualquer corpo d'água. Além de oferecer uma grande resistência adicional ao escoamento, a vegetação, quando emergente ou flutuante, proporciona um efeito protetor contra a ação do vento sobre a superfície da água.

A alteração do hidroperíodo natural e do padrão geral do escoamento tem impacto direto sobre a distribuição espacial da vegetação e desencadeia uma série de consequências adversas, do ponto de vista ecológico, que ocasiona a degradação do ambiente. Entre elas, tem-se: modificação da composição das espécies vegetais dominantes; alterações no ciclo reprodutivo de espécies da fauna; redução da diversidade de espécies e do número de indivíduos, tanto vegetais quanto animais; e o comprometimento do desempenho das funções e valores dos banhados.

Entretanto, apenas recentemente, a conservação de tais ecossistemas tornou-se importante e passaram a ser discutidos e avaliados os impactos de ações antrópicas sobre os mesmos, principalmente do que diz respeito ao seu comportamento hidrodinâmico (Newall e Hughes, 1995). Com isso, tornou-se evidente, também, a necessidade de um gerenciamento adequado, baseado em estudos que descrevam a oscilação natural do nível da água, através da

identificação do hidroperíodo, ou de uma série deles, e do padrão do escoamento, tanto no cenário real como em possíveis cenários de intervenção humana (Marques et al., 1997).

Na região do banhado do Taim, que constitui o estudo de caso desta pesquisa e está localizado no Sul do Estado do Rio Grande do Sul, os interesses da orizicultura, principal atividade econômica da região, e de conservação do ecossistema têm gerado conflitos pelo uso da água.

Tendo como principal fonte de afluência de água a lagoa Mangueira, situada ao Sul, o comportamento hidrodinâmico do Taim é ditado pela oscilação dos níveis na lagoa, pela ação do vento e pela vegetação, que ocupa grande parte da sua área. Em decorrência da captação de água da lagoa Mangueira para orizicultura, e da operação das comportas de saída do banhado para a lagoa Mirim, ou da falta de uma operação, o hidroperíodo natural do Taim fora impactado, influenciando as comunidades de vegetação e o padrão de circulação da água.

O gerenciamento adequado da região do banhado deve contemplar estudos acerca do comportamento hidrodinâmico, na tentativa de identificar as prováveis alterações quanto ao padrão de circulação da água, resultante dos possíveis cenários. O emprego de modelos matemáticos, como o adotado aqui, constitui uma ferramenta de grande utilidade na tomada de decisões, auxiliando na previsão dos impactos advindos com a intervenção humana sobre os sistemas naturais.

1.2 OBJETIVOS

Esta pesquisa foi desenvolvida procurando estudar como ocorre e quão intensa é a influência dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim, utilizando simulações numéricas.

Apesar da escassez de informações face à complexidade do ecossistema estudado, esta pesquisa tem por objetivos específicos analisar diversas situações, através de modelagem hidrodinâmica bidimensional, na tentativa de fornecer subsídios sobre como os fatores enumerados a seguir influenciam a hidrodinâmica do banhado do Taim:

- interação com a lagoa Mangueira;
- efeito direto da ação do vento sobre o banhado;
- efeito indireto causado pela ação do vento sobre a lagoa Mangueira e
- ocorrência de vegetação e sua distribuição espacial no banhado.

1.3 INTRODUÇÃO À METODOLOGIA

Com a intenção de permitir ao leitor ter uma noção geral de como foi elaborado o trabalho, neste item é apresentada uma introdução à metodologia empregada no desenvolvimento desta pesquisa. A metodologia será discutida em detalhe nos capítulos 4 e 5.

Para estudar a hidrodinâmica do banhado do Taim, utilizou-se modelagem hidrodinâmica bidimensional, empregando o modelo IPH-A, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Casalas, 1996). Parte deste trabalho consistiu em elaborar e implementar um algoritmo de secagem/inundação, que permite a simulação hidrodinâmica com a presença de áreas secas internas ao contorno modelado (“ilhas”).

A escassez de informações por longos períodos de tempo conduziu esta pesquisa a avaliar comparativamente as respostas do sistema modelado a diferentes situações simuladas, e não de procurar obter uma representação detalhada do seu comportamento hidrodinâmico. Por falta de dados de nível de água, de velocidade do escoamento e de vento com discretização temporal suficiente e relativos à mesma época, o modelo IPH-A não foi calibrado no Taim. Tendo em vista o enfoque da pesquisa, adotaram-se valores para os parâmetros do modelo de acordo com os citados na literatura, após realização de uma análise de sensibilidade da resposta do sistema estudado à variação de tais parâmetros.

O banhado do Taim está integrado ao sul com a lagoa Mangueira, formando um conjunto denominado aqui de sistema Mangueira-Taim. A referida lagoa constitui a principal fonte de afluência de água para o banhado e, com o intuito de realizar uma modelagem mais próxima das condições reais, parte do estudo hidrodinâmico do Taim foi realizado simulando todo o sistema Mangueira-Taim.

Normalmente, uma característica do ecossistema banhado é a forte presença de vegetação, como ocorre no Taim, a qual oferece grande resistência adicional ao escoamento. Para representar a ocorrência de vegetação em determinadas áreas do banhado do Taim, utilizou-se um coeficiente de Manning citado na literatura, de valor superior ao atribuído às lagoas, diferindo as áreas com e sem presença de vegetação.

A vegetação também oferece uma proteção contra a ação de cisalhamento do vento na superfície da água e, para representá-la, inseriu-se um coeficiente de redução da ação do vento no equacionamento matemático do modelo hidrodinâmico. A variação espacial de tal coeficiente também foi empregada para caracterizar as áreas com e sem vegetação.

Para analisar a influência da vegetação sobre o comportamento hidrodinâmico do Taim, foram consideradas diferentes distribuições espaciais da sua ocorrência no banhado, mediante a variação espacial dos coeficientes de Manning e redutor da ação do vento.

O efeito do vento foi avaliado considerando diversas condições de vento, variando intensidade, direção e ocorrência espacial, nas simulações. Com a simulação do sistema Mangueira-Taim completo, foi possível analisar a interação que ocorre entre tais subsistemas, do ponto de vista hidrodinâmico, frente às variações nas condições de vento, nível de água inicial e distribuição espacial da vegetação.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Além deste capítulo introdutório e dos últimos dois capítulos, referentes às conclusões/recomendações (capítulo 7) e às referências bibliográficas (capítulo 8), este texto apresenta mais 5 capítulos, divididos e ordenados com o intuito de torná-lo mais direcionado e objetivo. Tal segmentação procurou proporcionar o entendimento e a assimilação do modo como a pesquisa foi desenvolvida, principalmente quanto aos procedimentos adotados e à direção dada ao estudo.

No capítulo 2, descreve-se o ecossistema banhado, ressaltando as principais características relevantes para a pesquisa, e, em seguida, apresenta-se o banhado do Taim, especificamente. Por ser um tipo de ecossistema pouco conhecido de modo geral no Brasil, relativamente às lagoas, rios ou estuários, por exemplo, o referido capítulo foi inserido logo no início do texto.

O capítulo 3 apresenta um breve resumo sobre modelagem hidrodinâmica bidimensional, comentando sobre o equacionamento matemático e os métodos numéricos adotados, dando ênfase à resistência ao escoamento proporcionada pela vegetação e à ação de cisalhamento do vento sobre a superfície da água, além de apresentar um histórico da modelagem matemática de banhados.

No capítulo 4, após apresentar e descrever, sucintamente, o modelo empregado na pesquisa (IPH-A), relata-se a implementação de um algoritmo de secagem/inundação, descrevendo-o e mostrando os resultados de testes de validação.

As particularidades que caracterizam o banhado do Taim levaram à adoção de certos procedimentos distintos dos usuais, quanto à forma com que os dados foram trabalhados e inseridos no modelo hidrodinâmico, o que é mostrado no capítulo 5. O referido capítulo apresenta, também, as análises dos dados de nível e de vento disponíveis, além de algumas simulações preliminares, estabelecidas para avaliar os valores dos parâmetros do modelo e outras verificações.

No capítulo 6, são descritas as simulações realizadas para investigar o comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim, quanto aos principais fatores

intervenientes no escoamento, as quais foram divididas em quatro grupos, enfocando diferentes aspectos.

2 O BANHADO DO TAIM

2.1 INTRODUÇÃO

O objeto de estudo desta pesquisa, o banhado do Taim, constitui um exemplar de um tipo de ecossistema cuja compreensão e entendimento, de um modo geral, ainda são pouco difundidos no Brasil, mesmo no meio acadêmico. Neste capítulo, é feito um resumo sobre algumas características principais de tais ecossistemas, abordando, além da definição e caracterização geral, os tópicos mais relevantes a esta pesquisa, como a hidrologia e a vegetação. Em seguida, apresenta-se e descreve-se o banhado do Taim e a região onde está inserido, enfatizando o funcionamento hidrológico e os conflitos pelo uso da água.

2.2 VISÃO GERAL DE BANHADOS

2.2.1 Definição e caracterização

As regiões conhecidas como banhados, terras úmidas ou *wetlands*, são importantes ecossistemas que ocorrem em todos os continentes do planeta, à exceção da Antártica, apesar de variarem enormemente devido a diferenças locais e regionais nos solos, na topografia, no clima, na hidrologia, na composição química da água, na vegetação e em outros fatores, inclusive no grau de perturbação humana (CZM, 2001). Segundo Guntenspergen e Stearns (1985), a designação *wetland* é muito abrangente e engloba uma grande variedade de sistemas, cada um com suas próprias idiossincrasias. Mitsch e Gosselink (1986) comentam sobre a dificuldade em se definir as terras úmidas e citam a definição adotada pelo *U.S. Fish and Wildlife Service*, considerada a mais aceita: “*áreas que são inundadas ou saturadas por água superficial ou subterrânea, com uma frequência e duração suficiente para suportar (e que sob condições normais suporta) a predominância de vegetação tipicamente adaptada à vida em condições de solo saturado, devendo possuir, ao menos, uma das seguintes propriedades: (i) o solo suporta, predominantemente, macrófitas aquáticas, pelo menos periodicamente; (ii) o substrato é, predominantemente, solo hídrico não drenado; (iii) a cada ano, o substrato é saturado ou coberto por águas rasas por algum período, durante a época de crescimento dos vegetais.*”

Alguns conceitos básicos relevantes para o entendimento desse tipo de ecossistema são enumerados por Guntenspergen e Stearns (1985): (i) não são sistemas estáticos, mas altamente dinâmicos e situados na interface entre ambientes terrestres e aquáticos; (ii) mudam naturalmente, ou seja, estão sempre em evolução, buscando um equilíbrio com o ambiente ao redor, em função do clima, da hidrologia, das espécies presentes, da geologia e até da interação com sistemas adjacentes; (iii) apresentam características individuais resultantes da variação dos regimes climático e hidrológico, da diversidade de espécies e de eventos passados, gerando ecossistemas muito diferentes entre si.

2.2.2 Funções e valores

Devido às suas características hidrológicas particulares, os banhados podem funcionar tanto como exportadores de matéria orgânica quanto como depósitos de material inorgânico (Mitsch e Gosselink, 1986), além de constituírem um ambiente transitório de grande biodiversidade, com espécies representando ambos os ambientes (Heathwaite, 1995). Esses ecossistemas são, notoriamente, conhecidos pela diversidade e abundância de vegetais e animais que os habitam, sendo 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).

Contudo, no passado, os banhados eram considerados apenas áreas potencialmente drenáveis, com terras a serem exploradas, e só com o reconhecimento da importância do meio ambiente é que surgiram outros interesses nesses ecossistemas distintos da exploração (Villanueva, 1997). EPA (1992) menciona que as terras úmidas nos EUA eram tratadas como “terras de lixo” (*wasteland*), sendo consideradas as fontes de mosquitos e odores desagradáveis, e que deveriam ser inundadas ou drenadas para um uso mais nobre. Apesar de já haver uma maior conscientização ambiental, ocorrem, atualmente, conflitos entre os interesses de preservação e os relativos a atividades como agricultura, reflorestamento, construção de estradas e habitações e extração de minérios (Heathwaite, 1995).

A literatura especializada geralmente utiliza a expressão “funções” dos banhados para suas operações e propriedades biológicas, químicas e físicas, enquanto ao termo “valores” são atribuídos os usos e interações humanas com tais sistemas. Brooks (1989) relaciona dez categorias de funções e valores atribuídos aos banhados, as quais dão uma idéia da importância desse tipo de ecossistema: (a) recarga e descarga de águas subterrâneas; (b) proteção contra cheias; (c) proteção das linhas de margem contra erosão; (d) retenção de sedimentos; (e) retenção e remoção de nutrientes e poluentes; (f) habitat para diversas

espécies de seres vivos; (g) suporte à cadeia alimentar; (h) valor recreacional, estético, cultural e científico; (i) fonte de produtos naturais; e (j) modificação climática.

Os processos de remoção de nutrientes e poluentes e de deposição de sedimentos, ilustrados na figura 2.1, têm incentivado a construção de banhados para o tratamento de águas residuárias e pluviais (EPA, 2000), inclusive no Brasil (Lautenschaler e Eiger, 2001). Além de baixo custo de implementação e manutenção, os banhados construídos apresentam boa performance e aparência natural agradável, embora necessitem da disponibilidade de grandes áreas (EPA, 2000).

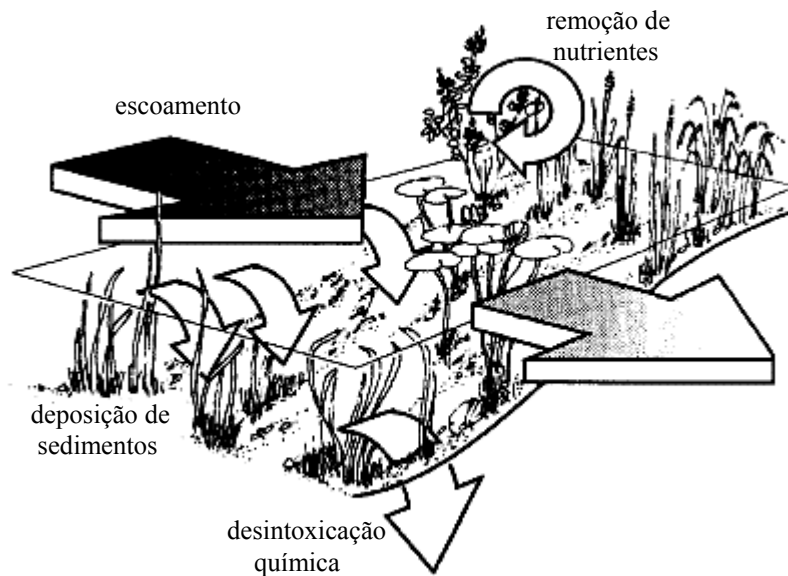


Figura 2.1. Processos associados com a melhoria da qualidade da água proporcionada pelos banhados. (Fonte: adaptado de EPA, 1992).

2.2.3 O fator hidrologia

Por definição, os banhados são criados e mantidos pela água, de tal modo que a frequência 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). Por esse motivo, especial atenção é dispensada ao estudo do que se denomina de hidroperíodo das terras úmidas, o qual é 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). Os mesmos autores ressaltam que a identificação do hidroperíodo específico, ou da série de hidroperíodos, é fundamental para o gerenciamento de banhados, de modo a manter as funções desempenhadas por tais

ecossistemas. Marble (1992) cita uma classificação de doze tipos de hidroperíodos elaborada pelo *U.S. Fish and Wildlife Service*, em função dos fatores que modificam o regime hidrológico, como a influência da maré ou de corpos d'água próximos, e de sua periodicidade, o que ilustra o grau de complexidade relacionado à caracterização da oscilação natural do nível da água em banhados.

A hidrologia desempenha um papel de destaque na formação, exploração e conservação das terras úmidas, influenciando a composição das espécies, a produtividade primária, a disponibilidade de nutrientes e as características dos sedimentos (Heathwaite, 1995). Pequenas alterações na hidrologia podem resultar em grandes mudanças bióticas, principalmente quanto ao tipo e à distribuição espacial da vegetação, as quais, por sua vez, irão influenciar o regime hidrológico, constituindo uma relação de interdependência (Wheeler e Shaw, 1995).

O emprego de estruturas como comportas e diques, para modificar a hidrologia das terras úmidas e atender aos interesses humanos, altera todos os processos físicos, químicos e biológicos. Apesar disso, a influência de tais estruturas nos parâmetros hidrológicos, como tempo de residência e nível da água, ainda é pouco compreendida (Sanzone e McElroy, 1998). Vários estudos comprovam os impactos ambientais decorrentes da intervenção humana dessa forma. Por exemplo, David (1996) constatou, através de observações em campo, que mudanças de origem antrópica na hidrologia de um banhado levaram à redução da diversidade da flora e a alterações no ciclo reprodutivo de algumas espécies da fauna, enquanto Shay et al. (1999) relataram a variação na composição das espécies vegetais dominantes, em função da alteração do regime hidrológico, também resultante de intervenção humana.

Entretanto, apesar do hidroperíodo ser amplamente reconhecido como de extrema importância, pouca atenção tem sido dada à circulação da água, aos papéis físicos e ecológicos que ela desempenha e a como medidas de gerenciamento impactam o escoamento (Aumen, 2003). O mesmo autor argumenta que a circulação da água, em ecossistemas como os banhados, é um fator de fundamental importância para a sua própria estrutura e funcionamento, e cita que significativas mudanças foram observadas em banhados da Flórida (EUA), conhecidos como *the Florida Everglades*, com efeitos ecológicos adversos, em razão da alteração do regime de escoamento causado por atividade antrópica – construção de barreiras e desvios. Newall e Hughes (1995) acrescentam que, embora o escoamento da água constitua a variável física mais importante em muitos banhados, ainda são poucos os estudos que investigam os seus efeitos nos padrões da vegetação. Tais autores elucidam que pesquisas 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.

2.2.4 O fator vegetação

A presença de vegetação é um dos principais fatores responsáveis pelas funções e valores das terras úmidas, principalmente por constituir uma grande resistência adicional ao escoamento da água. A conseqüente diminuição da velocidade do fluxo, proporcionada pela vegetação, tem os seguintes impactos principais: atenuação de vazões de inundação, controle da erosão, deposição de materiais suspensos e auxílio na remoção de nutrientes e poluentes.

Tsujimoto (1999) ressalta a importância da compreensão e do gerenciamento dos processos fluviais relacionados com a vegetação, descritos do seguinte modo (figura 2.2): o escoamento é afetado pela morfologia do fundo (i), pelas estruturas (ii) e pela vegetação (iii), além de governar o transporte de sedimentos (iv), que causa a deformação do fundo (v); este, por sua vez, controla o crescimento da vegetação (vii) e, em eventos extremos de cheias, sofre mudanças bruscas que ocasionam o colapso das estruturas (vi) e da vegetação (vii).

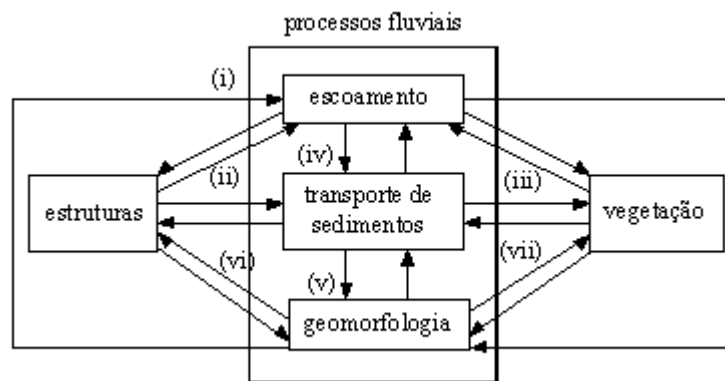


Figura 2.2. Processos fluviais associados à vegetação.
(Fonte: adaptado de Tsujimoto, 1999).

A vegetação encontrada em banhados, tanto herbácea quanto lenhosa, pode ser agrupada em plantas submersas, espécies de folhas flutuantes e espécies emergentes, sendo que a maioria das comunidades é composta por uma mistura daqueles grupos e, também, por algas flutuantes e epífitas (Guntenspergen e Stearns, 1985). Hammer (1992) cita que vários termos têm sido usados para plantas que se desenvolvem em ambientes aquáticos ou semi-aquáticos, como plantas aquáticas, fitoplâncton e macrófitas aquáticas, e que, na falta de uma definição consensual para distinguir entre plantas terrestres, semi-terrestres, de águas rasas e de águas profundas, sugere o uso do termo “plantas de banhado”. Tal expressão definiria as

plantas capazes de crescer e de se desenvolver em um ambiente que é periodicamente inundado por mais do que 5 dias contínuos durante a época de crescimento. Neste texto, serão usadas, indistintamente, as expressões macrófitas aquáticas, plantas aquáticas, vegetação aquática e plantas de banhado, para designar a vegetação encontrada nesse tipo de ecossistema, salvo quando explicitado o contrário.

As macrófitas emergentes das terras úmidas, geralmente, crescem em condições inadequadas de concentração de oxigênio para a respiração das raízes e, apesar de a maioria delas ter a capacidade de respiração anaeróbica, elas melhor se desenvolvem quando há oxigênio disponível para respiração (Hammer, 1992). Segundo o mesmo autor, para superar a limitação de oxigênio, as plantas apresentam um extenso sistema lacunar interno, que pode ocupar até cerca de 60% do volume total da planta, enquanto esse percentual é de apenas 2 a 7% para as plantas terrestres. O referido sistema é constituído por espaços ocupados pelo ar, os quais permitem a difusão dos gases atmosféricos das porções aéreas da planta até as raízes.

O nível da água e as propriedades do escoamento influenciam enormemente o desenvolvimento das plantas, 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. Como resultado, observam-se diferenças na forma das folhas e na biomassa das raízes, podendo, inclusive, comprometer a sobrevivência dos vegetais, cuja grande maioria, segundo Hammer (1992), não suporta condições de tirante de água superior a 2 m.

A associação entre as características da vegetação e a oscilação do nível da água, constatada em vários estudos (Shay et al., 1999; David, 1996), tem sido utilizada na tentativa de identificar o hidroperíodo das terras úmidas (Marques et al., 1997). Wheeler e Shaw (1995) empregaram até a expressão “hidrofitômetro” para as plantas, em uma alusão ao uso destas como indicadores de mudanças no nível da água. No entanto, apesar de haver uma grande quantidade de estudos nessa linha, os mesmos autores ressaltam que a relação entre a hidrologia dos banhados e a composição da vegetação ainda não é bem compreendida, a não ser de uma forma muito geral.

A importância da manutenção das comunidades de vegetação reside não só no fato de influenciarem a hidrologia e os solos, mas também por produzirem matéria orgânica e constituírem a base para todas as outras formas de vida (Hammer, 1992), tornando-se essenciais para proporcionar o desempenho de todas as funções das terras úmidas.

2.3 A ESTAÇÃO ECOLÓGICA E O BANHADO DO TAIM

2.3.1 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). Até junho de 2003, a ESEC Taim englobava uma área de cerca de 31.500 ha, 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 2.3). Em junho de 2003, foi divulgado um anúncio presidencial ampliando para 110.000 ha a área da ESEC Taim, que passou a incluir toda a extensão territorial entre a lagoa Mangueira e o Oceano Atlântico (Torma e Melo, 2003). Na figura 2.4, a delimitação da estação, quando da sua criação, é apresentada sobre uma composição colorida do tipo RGB, sendo as bandas espectrais 3, 4 e 5 usadas para as cores vermelho, verde e azul, respectivamente, de uma imagem do satélite Landsat5, de 06/jul/1987 (ESDI, 2002).

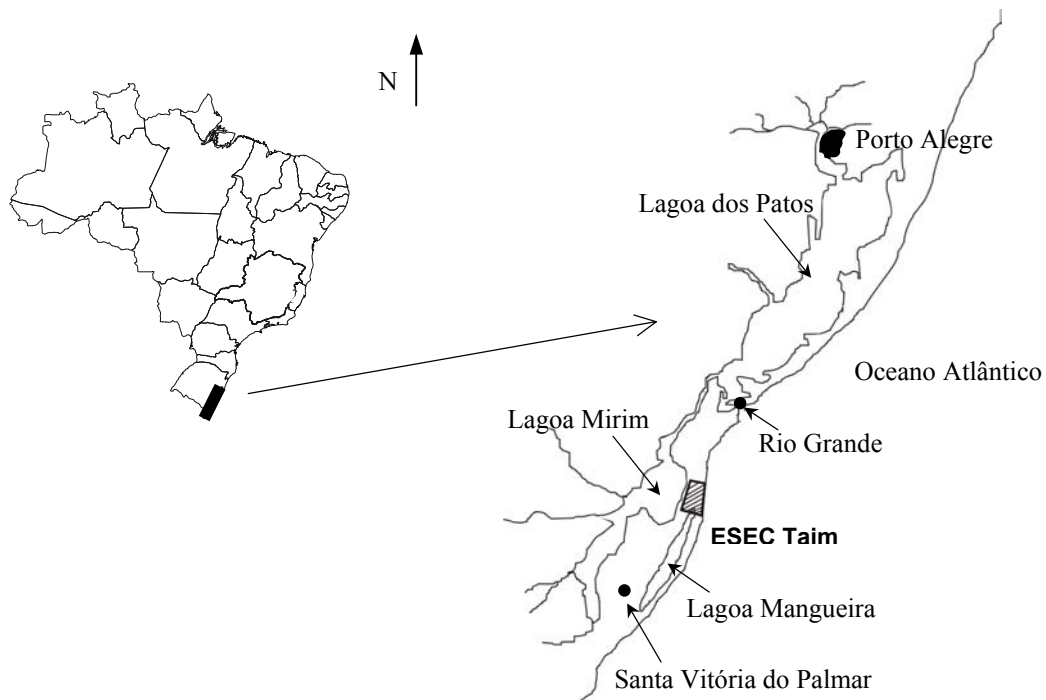


Figura 2.3. Localização da Estação Ecológica do Taim.

A formação geológica da região onde se encontra a estação ecológica se deu em função dos movimentos de recuo do mar, que originaram o litoral do Rio Grande do Sul e que

resultaram no maior complexo lagunar da América do Sul, composto pelas lagoas dos Patos, Mirim e Mangueira, além de banhados e lagoas menores (PELD, 2002). Inclusive, segundo a mesma fonte, o que hoje é constituído por banhados, campos e matas palustres, dentro da ESEC, tratava-se de um antigo canal ligando a Lagoa Mirim ao Oceano Atlântico.

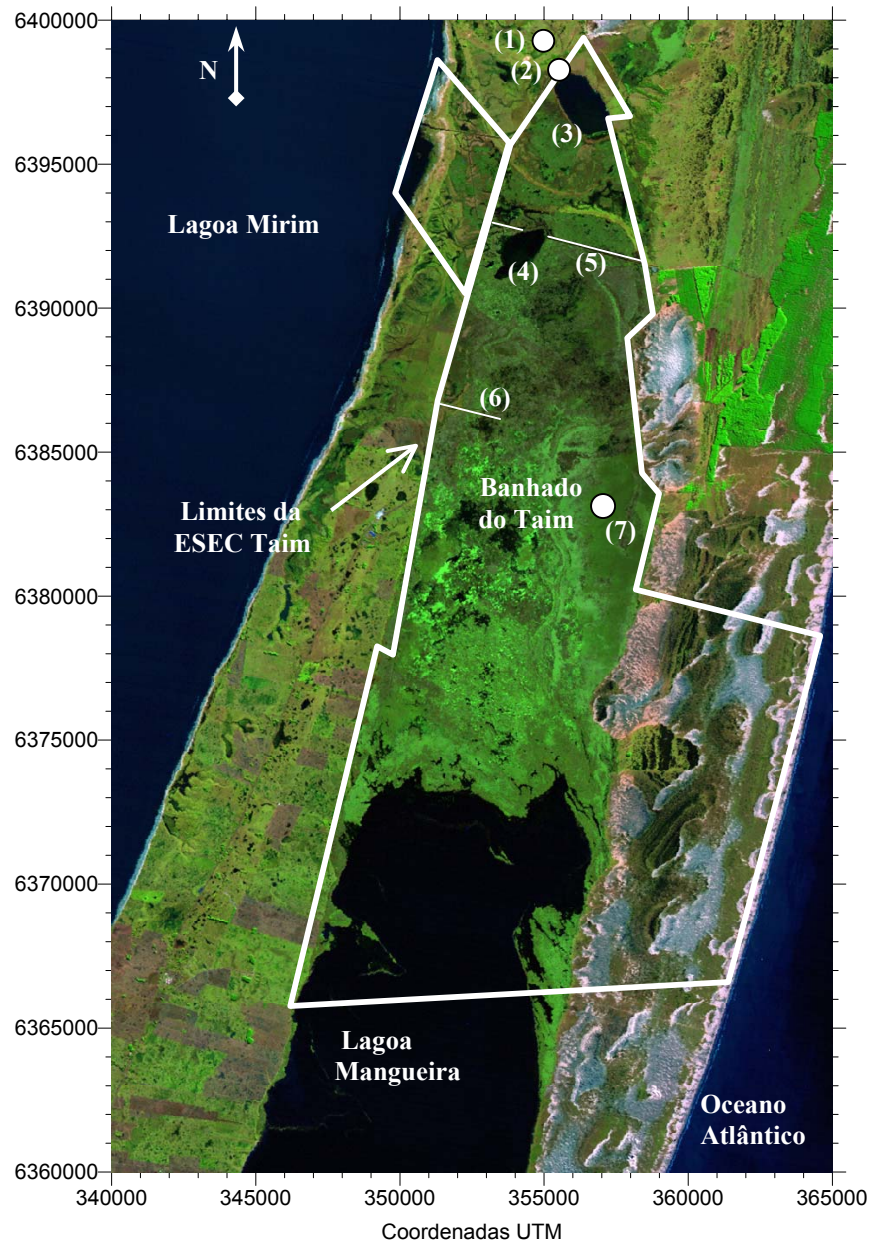


Figura 2.4. Indicação dos limites da Estação Ecológica do Taim, sobre composição colorida RGB de imagem do satélite Landsat5, de 06/jul/1987 (WGS 84, UTM-22S), onde: (1) sede da ESEC Taim; (2) comportas de saída do banhado; (3) lagoa Nicola; (4) lagoa Jacaré; (5) canal do Jacaré; (6) canal da Sarita; (7) local das fotos da figura 2.5.

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 1100 mm, apresentando um inverno frio e chuvoso e um verão quente e seco, além de ventos bastante intensos.

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. As fotos apresentadas na figura 2.5, referentes à região indicada na figura 2.4, dão uma idéia da grande densidade de macrófitas aquáticas emergentes presente na maior parte do Taim. Na área em questão, a vegetação é completamente densa, mesmo para uma coluna de água em torno de 1,5m, situação na época da foto (26/nov/2002).

Marques et al. (1997) identificaram 49 espécies de macrófitas aquáticas no banhado do Taim, destacando-se, em termos de freqüências relativa e absoluta, as espécies *Salvinia herzogii*, *Azolla caroliniana* e *Lemma valdiviana*, para as espécies flutuantes, e, para o grupo das emergentes, as espécies *Scirpus californicus*, *Zizaniopsis bonariensis* e *Scirpus giganteus*.

Quanto à fauna, observa-se uma variedade muito grande devido à diversidade de habitat, sendo o ecossistema terrestre representado por insetos, artrópodes, aves e mamíferos, e o ecossistema límnico representado por aves e quelônios (IBAMA, 2003).



Figura 2.5. Fotos do banhado do Taim, de 26/nov/2002, referentes à região indicada na figura 2.4.

2.3.2 Caracterização hidrológica

Na área compreendida pela ESEC Taim, encontram-se banhados, lagoas, campos e dunas, com destaque para o banhado do Taim, que ocupa cerca de 60% da área da estação, com uma área em torno de 18.000 ha, e para as Lagoas Nicola (área de 2.606 ha) e Jacaré

(766 ha), além da parte Norte da Lagoa Mangueira, conforme mostra a figura 2.4. A existência de uma extensa rede de arroios e canais interligando as lagoas e banhados tornam o fluxo da região da estação bastante complexo e abrangente (Villanueva, 1997). O mesmo autor apresenta um resumo do comportamento hidrológico dos três subsistemas que compõem o sistema no qual a ESEC Taim está inserida, que são: Sistema Norte, Lagoa Mangueira e Sistema do banhado do Taim, indicados na figura 2.6.

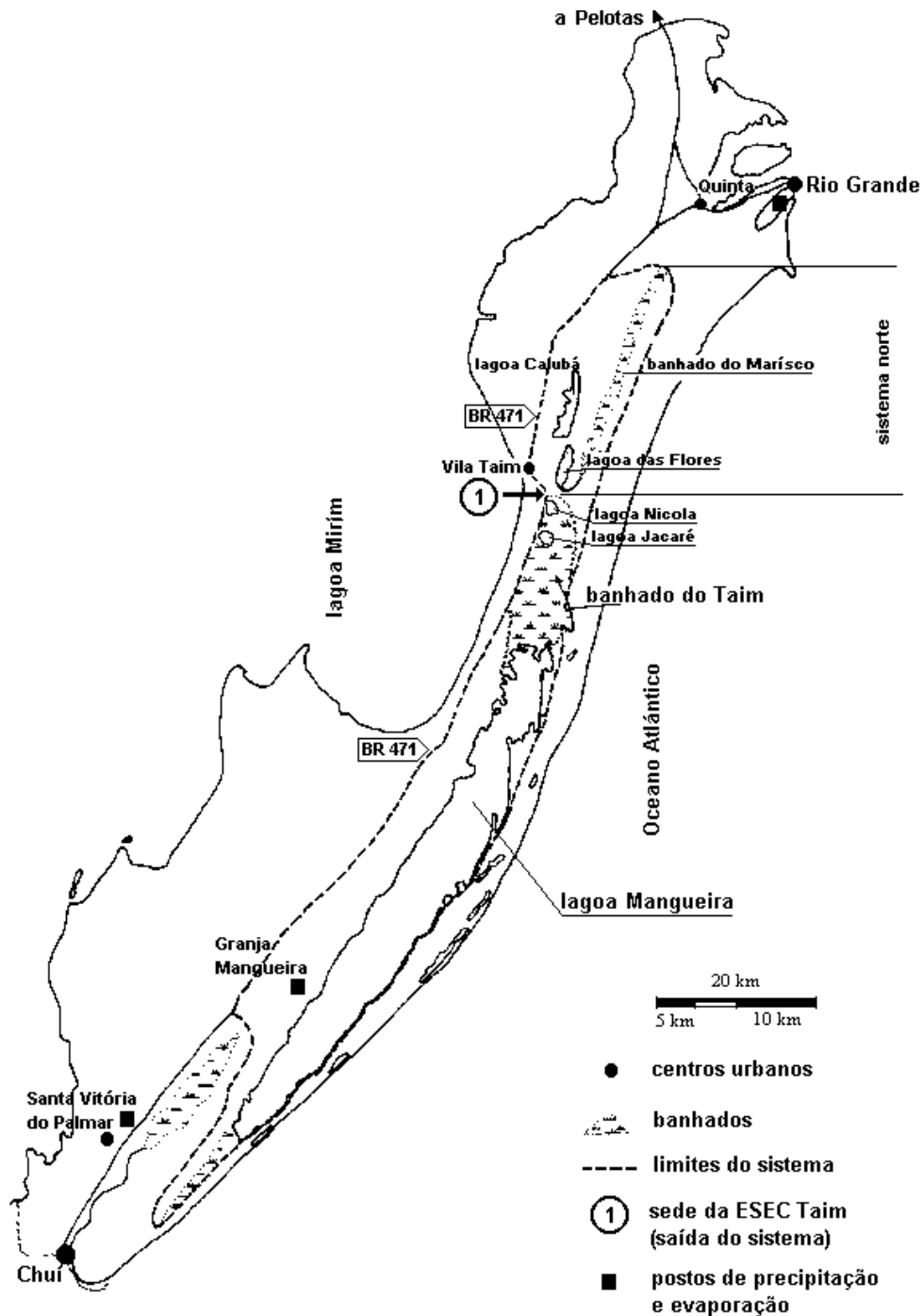


Figura 2.6. Localização dos três subsistemas que compõem o Sistema Hidrológico do Taim: Sistema Norte, banhado do Taim e Lagoa Mangueira. (Fonte: Villanueva, 1997).

A seguir, é apresentada uma breve descrição de tais subsistemas, cuja principal fonte de afluência de água é a precipitação, a partir do relatado por Villanueva (1997):

(i) *Sistema Norte*: constituído pelas Lagoas Caiubá e Flores e pelo banhado do Marisco; apresenta um fluxo definido pelo escoamento superficial da bacia de contribuição para as lagoas, e por um canal ligando a Lagoa das Flores ao banhado do Taim;

(ii) *Lagoa Mangueira*: apresenta uma grande superfície líquida ($\sim 820\text{km}^2$) e importante bacia de contribuição; além das perdas por evaporação e da demanda por irrigação, a Lagoa Mangueira alimenta o banhado do Taim, ocorrendo fluxo no sentido inverso dependendo das condições de vento e das respectivas cotas do nível da água;

(iii) *Sistema do banhado do Taim*: além do intercâmbio de água com a Lagoa Mangueira e do canal que une à lagoa das Flores, há uma ligação do banhado com a lagoa Mirim por meio de um canal, interrompido pelo aterro da rodovia BR-471 e que apresenta dois sistemas de galerias submersas e uma casa de bombas abandonada.

A presença de elementos internos ao banhado, como as lagoas Nicola e Jacaré e os canais da Sarita e do Jacaré, além do canal paralelo à estrada, contribui para a complexidade da circulação da água nessa região. As figuras 2.7 e 2.8 apresentam fotos do canal da Sarita, em duas épocas diferentes, sendo a primeira referente a um período mais seco do banhado, relativamente à segunda. A comparação entre tais fotos permite ter uma noção de como a paisagem se altera, neste caso, devido à variação do nível da água. O mesmo efeito pode ser constatado nas fotos das figuras 2.9 e 2.10, nas quais é mostrado o canal paralelo à estrada, também em duas épocas distintas, sendo a primeira referente a um período mais seco.



Figura 2.7. Foto do canal da Sarita (indicado pela seta vermelha), tirada da margem da estrada BR-471, em 09/jun/2001.



Figura 2.8. Foto do canal da Sarita (indicado pela seta vermelha), tirada da margem da estrada BR-471, em 26/nov/2002.



Figura 2.9. Foto do banhado do Taim, tirada da margem da BR-471, em 09/jun/2001, com indicação do canal paralelo a esta (seta vermelha).

2.3.3 Conflitos pelo uso da água

Diferentes usos do solo são observados na região onde se insere a Estação Ecológica do Taim (Marques e Villanueva, 2001): agricultura, pecuária, pastagens e reflorestamento, além de dunas e áreas baixas, alagadas temporariamente (figura 2.11). Em IBAMA (2003), é mencionado que, antigamente, a área em questão era utilizada para pecuária extensiva, de onde se extraía o couro beneficiado nas charqueadas de Pelotas.



Figura 2.10. Foto do banhado do Taim, tirada da margem da BR-471, em 18/set/2002, com indicação do canal paralelo a esta (seta vermelha).

Atualmente, a orizicultura constitui a principal atividade econômica da região, que exige a manutenção de lâminas de água sobre os cultivos, durante todo o desenvolvimento dos mesmos, e é quase a única fonte de emprego e sobrevivência da população local (Villanueva et al., 2000). Segundo o referido trabalho, os primeiros estudos da região consistiram em avaliar a possibilidade de drenagem do Taim, para utilizá-lo no cultivo de arroz.

A extração de água para 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, são o atropelamento de animais na BR-471, a pesca e a caça (IBAMA, 2003).

A morte de animais na BR-471 tem como principal causa a elevação do nível da água no banhado e sua manutenção por um tempo prolongado, que diminui a área seca e faz com que capivaras, ratões do banhado e outras espécies procurem refúgio na região próxima ao aterro da estrada, acabando atropelados pelo trânsito veicular. Na tentativa de minimizar essa mortandade de animais, foram colocadas cercas de proteção nas margens do aterro, “mata-burros” no leito da estrada, redução do limite de velocidade máxima permitida e placas sinalizadoras para os motoristas, além da construção dos chamados “capivarodutos”, que consistem em tubulações de concreto instaladas transversalmente ao aterro da estrada,

servindo para a passagem de animais (figura 2.12). Quando o nível da água está muito alto, como no caso do período relativo à foto da figura 2.12-b, tais dutos servem, também, para extrair o volume adicional para a lagoa Mirim. No final do ano de 2002, o nível do banhado esteve tão alto que ocasionou o desgaste e a erosão do aterro da estrada, com prejuízos para o trânsito no local.

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 et al., 2000).

Outra questão diz respeito à operação e gerenciamento das comportas de saída do banhado, onde 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. O referido autor empregou um modelo hidrodinâmico bidimensional de celas e simulou diversos cenários de gerenciamento do banhado, analisando as retiradas para irrigação de arroz e regras operacionais para as comportas. Em tal estudo, concluiu-se que o sistema não tem condições de atender à demanda atual para irrigação, sendo recomendada uma nova estrutura de saída, associada a regras de limitação da extração de água para agricultura, de modo a contemplar tanto o interesse de preservação quanto o de tal atividade.

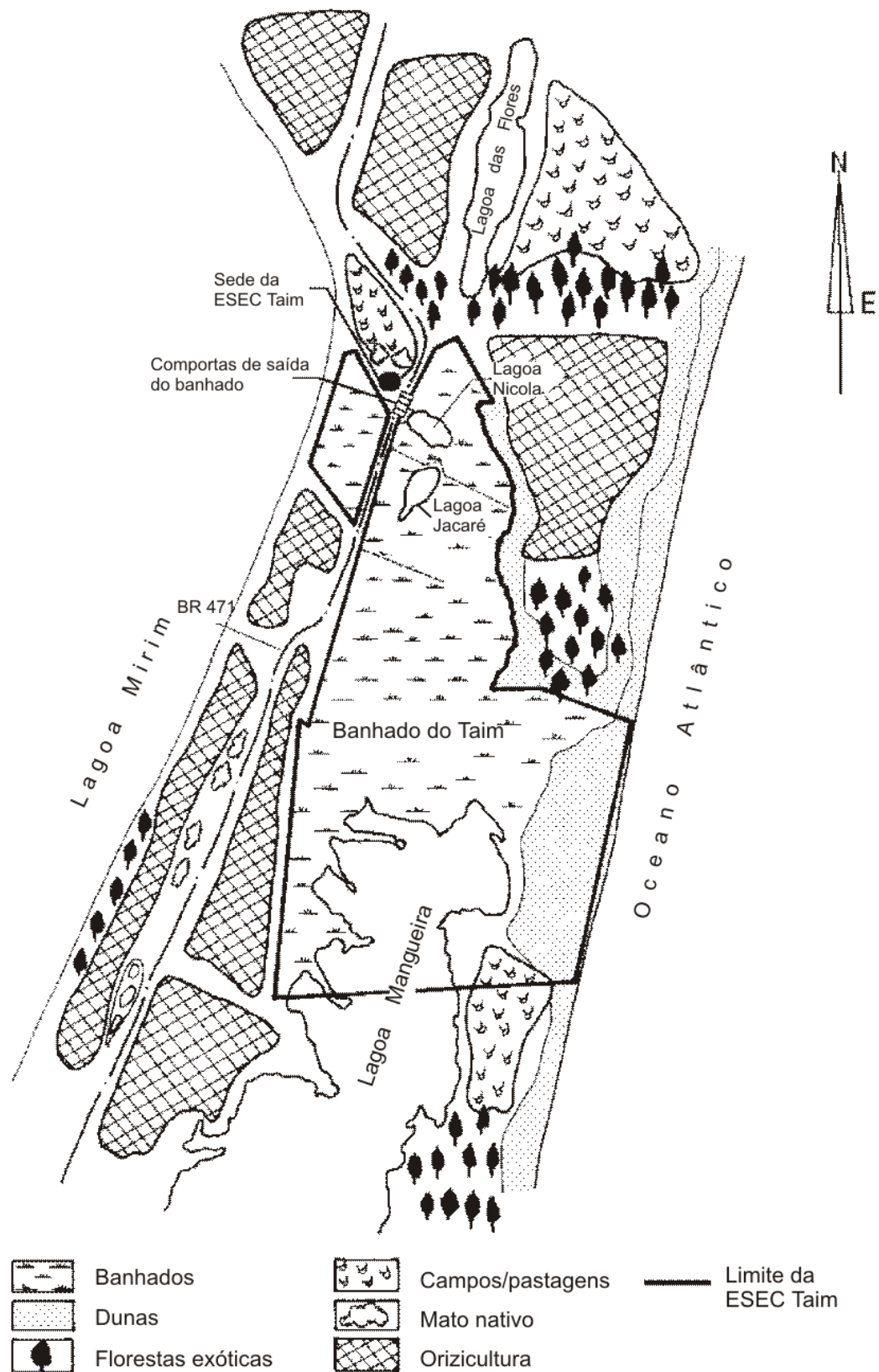


Figura 2.11. Usos do solo na região da ESEC Taim.
(Fonte: Villanueva, 1997).

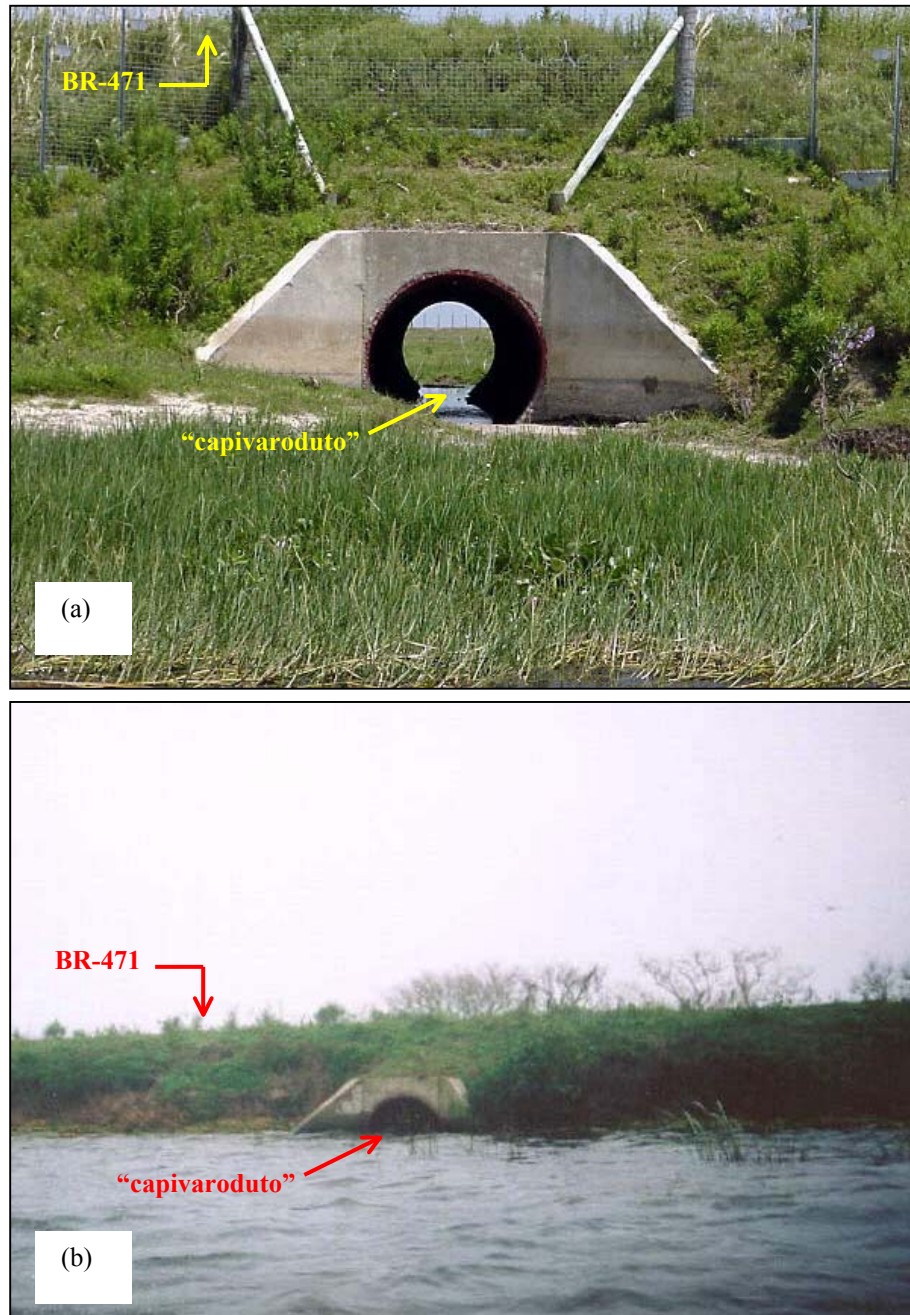


Figura 2.12. Fotos com detalhe do “capivaroduto”, em duas épocas de níveis de água diferentes: (a) período de seca (Fonte: PELD, 2002); (b) período de cheia (18/set/2002).

3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE CORPOS D'ÁGUA RASOS

3.1 INTRODUÇÃO

Lagoas, estuários, zonas costeiras e banhados são, normalmente, caracterizados como corpos d'água rasos, onde os processos horizontais são mais importantes e têm predominância sobre os verticais e a coluna d'água é, usualmente, assumida como bem misturada, ou seja, com pouca ou nenhuma estratificação vertical (Rosman, 1989). Tanto a Lagoa Mangueira quanto o banhado do Taim, objetos deste estudo, podem ser enquadrados como ecossistemas dessa natureza.

Segundo Weiyen (1992), são considerados corpos d'água rasos aqueles cuja profundidade (H) é muito menor que o comprimento de onda ou que seu comprimento característico (L), isto é, $H \ll L$, sendo considerada a relação H/L da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} . Rosman (2001) classifica como “escoamento em águas rasas” aqueles nos quais as escalas dos movimentos horizontais sejam, pelo menos, 20 vezes maiores do que a profundidade.

O equacionamento matemático empregado na descrição do escoamento em corpos d'água rasos – as chamadas “equações de águas rasas”, é amplamente conhecido e consolidado, sendo sua dedução encontrada na literatura especializada (Rosman, 1999; Weiyen, 1992; Rosman, 1989) e, portanto, não há necessidade de mostrá-la em detalhe aqui. Entretanto, apenas para ilustrar a origem de tal equacionamento e descrever o significado dos termos, apresenta-se, a seguir, um breve resumo da dedução matemática das referidas equações, a partir do equacionamento geral que descreve o escoamento de um fluido.

Um pouco mais de ênfase é dispensada à resistência ao escoamento provocada pela vegetação e à ação de cisalhamento do vento sobre a superfície da água, por desempenharem um importante papel na circulação da água em banhados. Em seguida, comenta-se, brevemente, sobre a modelagem numérica aplicada aos modelos hidrodinâmicos e apresenta-se um resumo de antecedentes da modelagem de banhados na literatura.

3.2 EQUACIONAMENTO BÁSICO DO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO

O escoamento de um fluido segue os princípios fundamentais estabelecidos pelas equações da conservação da massa, quantidade de movimento (equações dinâmicas),

conservação do momento angular e equação da energia, que constituem as quatro leis básicas dos escoamentos de grandes escalas (White, 1979).

Desprezando os efeitos de compressibilidade e considerando as ações do campo gravitacional e da rotação terrestres, tem-se o seguinte sistema de equações, como formulação geral para o movimento tridimensional de um fluido viscoso newtoniano, em um espaço de coordenadas cartesianas (eixos x e y horizontais, eixo z vertical) (Streeter, 1961):

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (3.1)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \right\} = \left. \begin{aligned} & + \Omega v & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} & + \nu \Delta u, \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned} \right\} = \left. \begin{aligned} & - \Omega u & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} & + \nu \Delta v, \end{aligned} \right\} \quad (3.3)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \end{aligned} \right\} = \left. \begin{aligned} & -g & - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} & + \nu \Delta w, \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

$\underbrace{\hspace{15em}}_{\vec{F}_I} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{\vec{F}_G} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{\vec{F}_C} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{\vec{F}_P} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{\vec{F}_V}$

onde u, v e w são as componentes do vetor velocidade $\vec{V} = V(u, v, w)$ nas direções x, y e z, respectivamente; ρ é a massa específica e ν é o coeficiente de viscosidade cinemática do fluido; p é a pressão; g é a aceleração da gravidade; Ω é o parâmetro de Coriolis; ∇ é o operador nabla; $\Delta = \nabla^2$ é o operador laplaciano; \vec{F}_I , \vec{F}_G , \vec{F}_C , \vec{F}_P e \vec{F}_V são as forças de inércia, gravidade, Coriolis, pressão e viscosas, respectivamente; a equação (3.1) é a equação da continuidade e as equações (3.2) a (3.4) são as equações dinâmicas.

As equações dinâmicas apresentadas constituem as chamadas equações de Navier-Stokes e representam o balanço das forças de campo e de massa envolvidas no movimento do fluido, as quais são descritas sucintamente a seguir, conforme o sistema de referências adotado. A dedução e outros comentários acerca de tais equações são encontrados em textos de mecânica de fluidos, como em White (1991), Schlichting (1979), White (1979) e Streeter (1961), entre outros. Escrevendo as equações (3.2) a (3.4) sob a forma do somatório de forças, tem-se:

$$\vec{F}_I = \vec{F}_C + \vec{F}_G + \vec{F}_P + \vec{F}_V, \quad (3.5)$$

cujas descrições de cada uma das parcelas é feita a seguir.

- Força de inércia – \vec{F}_I : representa a tendência natural que um corpo material tem de resistir a mudanças no seu estado de movimento. É expressa pelos termos do lado esquerdo em cada equação dinâmica, sendo o primeiro deles em cada equação

referente à aceleração local enquanto os outros três constituem a aceleração convectiva;

- Força de Coriolis – \vec{F}_C : é a força à qual um corpo qualquer, que se desloca horizontalmente na superfície terrestre, está sujeito, devido à rotação terrestre. Tal força foi primeiro formulada por Gaspard Gustave de Coriolis, em 1835, e faz com que os objetos em movimento na superfície da Terra sejam desviados para a direita, caso estejam no hemisfério Norte, ou para a esquerda, no hemisfério Sul (Martin e McCutcheon, 1999). No sistema apresentado, a componente vertical da força de Coriolis é desprezível, se comparada ao efeito gravitacional. O parâmetro de Coriolis (Ω) é expresso por $\Omega = 2\omega \sin\phi$, onde ω é a velocidade angular de rotação da Terra e ϕ é a latitude, considerada positiva no hemisfério Norte e negativa no hemisfério Sul;
- Força de gravidade – \vec{F}_G : este termo representa a força exercida pelo campo gravitacional terrestre, que submete qualquer corpo a uma aceleração constante (\vec{g}), com sentido orientado para o centro do planeta;
- Força de pressão – \vec{F}_p : esta força representa a ação da pressão sobre o escoamento, através das componentes indicadas no sistema de equações em questão;
- Força de atrito viscoso – \vec{F}_V : a dissipação de energia que ocorre no escoamento, devido à viscosidade do fluido, é representada pela força de atrito viscoso, cujas componentes no sistema apresentado foram estabelecidas considerando as hipóteses de Reynolds (White, 1991; Schlichting, 1979) e o coeficiente de viscosidade constante.

3.3 MODELOS HIDRODINÂMICOS BIDIMENSIONAIS

Os modelos matemáticos que utilizam as equações dinâmicas (ou de Navier-Stokes) e da continuidade são denominados de modelos hidrodinâmicos, e, para representá-los, pode-se trabalhar com as equações instantâneas do escoamento ou com tais equações integradas no tempo. O último caso ocorre quando se deseja a representação do escoamento em termos de valores médios temporais, sem as variabilidades ocasionadas pelas perturbações em escalas de tempo inferiores às da integração. Para isso, utiliza-se o método da separação introduzido por Reynolds (White, 1991; Weiyan, 1992; Schlichting, 1979), pelo qual cada variável é definida pela soma entre uma parte “média” ou de grande escala (\bar{u}) e uma parte de “flutuação” ou de pequena escala (u'):

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.6)$$

A integração no tempo das equações (3.1) a (3.4) é feita utilizando um intervalo de tempo considerado longo em termos das flutuações turbulentas, mas suficientemente pequeno para considerar as variações dos valores médios dos fenômenos cujas propriedades estão sendo estudadas. Como resultado de tal processo, cuja apresentação em maiores detalhes foge ao escopo deste trabalho e pode ser encontrada em White (1991) e Rosman (1989), obtém-se o sistema apresentado a seguir:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \Omega \bar{v} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu_T \Delta \bar{u} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\Omega \bar{u} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu_T \Delta \bar{v} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu_T \Delta \bar{w} \quad (3.10)$$

onde a barra acima das variáveis indica o termo médio e ν_T é um coeficiente de viscosidade cinemática turbulenta.

Convém ressaltar que, durante o processo de integração, surgem termos relativos às flutuações turbulentas nas equações dinâmicas, os quais são conhecidos como tensões aparentes ou turbulentas de Reynolds e cuja definição se faz necessária a fim de tornar o sistema de equações matematicamente determinado. Para os modelos hidrodinâmicos que não procuram caracterizar, detalhadamente, a turbulência, mas apenas representar a sua influência na dissipação de energia, como é o caso desta pesquisa, adota-se a simplificação de considerar as tensões de Reynolds de forma análoga às tensões viscosas, mediante a introdução de um coeficiente de viscosidade turbulenta (ν_T), resultando no sistema apresentado anteriormente.

Esse tipo de abordagem, usando somente o conceito de viscosidade turbulenta, é classificado por Rodi (1980) apud Eiger (1989) como modelos com nenhuma equação de transporte de grandezas turbulentas. Quando há interesse em estudar o fenômeno da turbulência com maiores detalhes, como no caso do lançamento de efluentes em corpos d'água estratificados, costuma-se empregar modelos com uma equação (equação de transporte de energia cinética turbulenta) ou duas equações de transporte (uma equação de transporte para a energia cinética e outra para a dissipação – modelos k- ϵ de turbulência). As propriedades e demais aspectos do fenômeno da turbulência constam em White (1991), Schlichting (1979) e Tennekes e Lumley (1972), por exemplo, enquanto uma discussão sobre os modelos de turbulência e sua aplicação a corpos d'água naturais podem ser vistos em Yu e Righetto (1999) e Eiger (1989).

As equações (3.7) a (3.10) descrevem o escoamento sobre as três dimensões espaciais, porém, como em grande parte dos problemas estudados, há a predominância de uma ou duas direções no escoamento, costuma-se simplificar o equacionamento, reduzindo-o a uma ou duas dimensões, resultando nos chamados modelos uni e bidimensionais, respectivamente. Então, conforme o interesse e os objetivos da modelagem, as equações podem ser integradas nas direções consideradas não predominantes para o problema.

Com relação aos modelos bidimensionais, eles podem ser resultantes da integração na vertical (modelos bidimensionais horizontais – 2DH) ou na horizontal (modelos bidimensionais verticais – 2DV). Os últimos normalmente são aplicados a estuários fortemente estratificados com canal suficientemente regular (Schettini, 1991) ou a reservatórios com dimensões longitudinais muito maiores que as dimensões transversal e vertical (Eiger, 1999).

Os modelos 2DH são empregados, geralmente, para a representação da maioria dos corpos d'água rasos, desde que as escalas verticais do escoamento sejam muito menores que as horizontais, e que a coluna d'água apresente pouca ou nenhuma estratificação vertical (Rosman, 1989). A aplicação deste tipo de modelo é facilmente encontrada na literatura, como em Pinho et al. (2001), Podsetchine e Schernewski (1999), Somes et al. (1999), Guardo e Tomasello (1995), Almeida et al. (1990), Józsa et al. (1990), Rosauero e Schettini (1989) e Silveira (1986).

Em algumas pesquisas, há o interesse em outros processos associados à circulação da água, tais como: transporte, dispersão e reações cinéticas de crescimento e decaimento de constituintes (Schettini, 1991; Rajar et al., 1997), deposição e re-suspensão de sedimentos (Cancino e Neves, 1999; Tsujimoto, 1999; López e García, 1998; Rajar et al., 1997), crescimento e distribuição espacial de fitoplâncton e zooplâncton (Le Pape e Menesguen, 1997), entre outros. Para tanto, emprega-se o modelo hidrodinâmico e equações que descrevem cada processo, conforme o objetivo do estudo, o que não é o caso desta pesquisa e, portanto, não serão discutidas aqui.

Nesta pesquisa, empregou-se um modelo 2DH, cujo equacionamento é resultante da integração das equações (3.7) a (3.10) na direção vertical, tendo como limites de integração o fundo e a superfície livre da água. Para tanto, fixou-se como plano de referência o plano xy, conforme mostrado na figura 3.1, ficando definidas as profundidades fixas do plano em relação ao fundo (h) e os níveis da água variáveis em função do escoamento (η), sendo a relação entre tais variáveis dada por:

$$H(x, y, t) = h(x, y) + \eta(x, y, t) \quad (3.11)$$

O sistema resultante da integração na vertical das equações (3.7) a (3.10), que constitui o equacionamento empregado pelos modelos bidimensionais horizontais, pode ser escrito como:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0, \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = \Omega V - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{(\tau_{fx} - \tau_{sx})}{H} + \varepsilon_T \Delta U, \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\Omega U - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{(\tau_{fy} - \tau_{sy})}{H} + \varepsilon_T \Delta V, \quad (3.14)$$

onde U e V são as médias verticais das componentes das velocidades \bar{u} e \bar{v} ; U' e V' são as flutuações em torno das médias, sendo $\bar{u} = U + U'$ e $\bar{v} = V + V'$; ε_T é a média vertical do coeficiente de viscosidade cinemática turbulenta ν_T ; τ_{fx} e τ_{fy} são as tensões de cisalhamento no fundo, nas direções x e y , respectivamente; τ_{sx} e τ_{sy} são as tensões de cisalhamento na superfície da água, nas direções x e y , respectivamente.

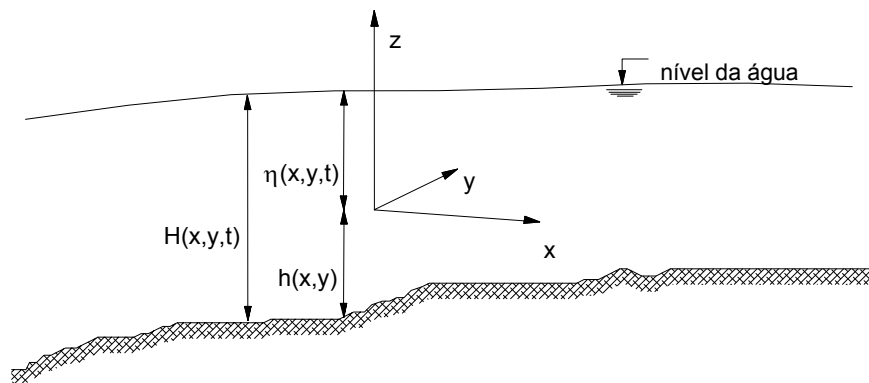


Figura 3.1. Plano de referência (plano xy) e definição das variáveis η , h e H .

No processo anterior de integração, cujo detalhamento pode ser visto em outros trabalhos (Weiyang, 1992; Schettini, 1991; Rosman, 1989; Silveira, 1986; Casas, 1985), considerou-se uma distribuição de pressões hidrostática e desprezou-se a variação espacial da pressão atmosférica, o que é aceitável na grande maioria dos casos (Weiyang, 1992). Quanto ao coeficiente ε_T , a simplificação de considerar um valor constante no espaço e no tempo é suficiente, geralmente, quando se trata da simulação do campo de velocidades em grandes corpos d'água (Rajar et al., 1997).

3.3.1 Resistência ao escoamento

Nas equações dinâmicas integradas na vertical (equações 3.13 e 3.14), constam termos referentes à tensão de cisalhamento no fundo, que representam a resistência ao escoamento provocado pela rugosidade do fundo (τ_{fx} e τ_{fy}).

Segundo Weiyan (1992), de acordo com as hipóteses feitas por Prandtl, de que a resistência ao escoamento por atrito no fundo é uma constante conhecida e de que a viscosidade turbulenta varia linearmente com a profundidade, e sabendo-se que o perfil de velocidades sobre uma vertical segue uma lei logarítmica, seria possível estimar τ_f , caso se pudesse medir as velocidades em duas alturas H_1 e H_2 , através da equação

$$\tau_f = \kappa \frac{U(H_1) - U(H_2)}{\log(H_2 / H_1)}, \quad (3.15)$$

onde κ é a constante de Von Kármán.

Simplificadamente, costuma-se estimar τ_f com o emprego de equações empíricas ou semi-empíricas, tais como as equações de Chèzy e de Manning. A equação de Chèzy estabelece, para escoamento unidimensional permanente, a seguinte relação (Streeter, 1961):

$$S_f = \frac{u^2}{C^2 R} = \frac{u|u|}{C^2 R}, \quad (3.16)$$

onde S_f é a declividade da linha de energia, R é o raio hidráulico, C o coeficiente de Chèzy e u^2 foi expresso como $u|u|$ para se levar em conta a direção de S_f e garantir que o atrito com o fundo sempre se oporá ao escoamento (Smith, 1997, apud Martin e McCutcheon, 1999).

Com o emprego da equação de Chèzy, decompondo S_f nas direções x (S_{fx}) e y (S_{fy}) e fazendo uma aproximação para o caso bidimensional, obtém-se (Weiyan, 1992):

$$\tau_{fx} = \rho g H S_{fx} = \frac{\rho g U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2} \quad (3.17)$$

$$\tau_{fy} = \rho g H S_{fy} = \frac{\rho g V \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2} \quad (3.18)$$

Tais expressões são as comumente utilizadas para representar a tensão de cisalhamento no fundo em modelos 2DH, como em Crowder e Diplas (2000), Weiyan (1992), Schettini (1991), Almeida et al. (1990) e Silveira (1986), por exemplo. Outra equação empírica bastante empregada é a equação de Manning (Streeter, 1961):

$$S_f = \frac{n^2 u |u|}{R^{4/3}}, \quad (3.19)$$

onde n é o coeficiente de Manning.

O uso da equação anterior para o cálculo da tensão de cisalhamento no fundo resulta em:

$$\tau_{fx} = \frac{\rho g n^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{H^{1/3}} e \quad (3.20)$$

$$\tau_{fy} = \frac{\rho g n^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{H^{1/3}}, \quad (3.21)$$

que foram as relações adotadas por Podsetchine e Schernewski (1999), Zhang et al. (1990) e Boudreau e Leclerc (1990), entre outros.

Quando há uma efetiva presença de vegetação no corpo d'água, têm sido propostas e empregadas equações alternativas às equações de Chezy ou de Manning, para representar a resistência ao escoamento.

A vegetação oferece uma grande resistência adicional ao escoamento ao longo de toda a coluna d'água (no caso de plantas emergentes) ou de grande parte dela (no caso de plantas submersas), e diversos estudos têm sido conduzidos com experimentos e medições, tanto em canais de laboratório como em campo, procurando avaliar tal efeito (Stephan e Gutknecht, 2002, Freeman et al., 2000, Nepf e Vivoni, 2000, Wu et al., 1999, Tsujimoto, 1999, Fathi-Maghadam e Kouwen, 1997, Jadhav e Buchberger, 1995, Abdelsalam et al., 1992, Turner e Chanmeesri, 1984, Shih e Rahi, 1981, Turner et al., 1978, Petryk e Bosmajian III, 1975).

O estudo do escoamento sobre e através de vegetação aquática é, atualmente, um dos principais interesses de pesquisas relacionadas à engenharia hidráulica, inclusive para propósitos de recuperação e renaturalização de corpos d'água degradados (Fischer-Antze et al., 2001), servindo para aumentar a funcionalidade biológica, oportunidades recreativas e beleza estética (Bennett et al., 2002). Vários autores propuseram equações empíricas relacionando a declividade da linha de energia e a vazão, incluindo parâmetros relativos às características da vegetação, como densidade e altura relativa à coluna d'água, ou apenas recomendando o uso de expoentes distintos dos utilizados nas equações de Chèzy e de Manning (Bolster e Saiers, 2002; Abdelsalam et al., 1992; Kadlec, 1990; Turner et al., 1978). Outros sugeriram a inclusão, nas equações que descrevem o escoamento, de um termo análogo ao arrasto sobre cilindro para computar a resistência da vegetação, além do termo relativo à tensão de cisalhamento no fundo (Fischer-Antze et al., 2001; Tsujimoto, 1999; López e García, 1998; Petryk e Bosmajian III, 1975).

A interação entre o escoamento e a vegetação é muito complexa, dependendo de diversos fatores, incluindo o grau de organização do arranjo das plantas (que pode variar de simples caules cilíndricos a um emaranhado de caules de seção transversal irregular), a

flexibilidade, a área e a forma frontal ao escoamento, a área da seção transversal e o espaçamento dos caules, além da relação entre o nível da água e a altura da vegetação (Pitlo e Dawson, 1993). Tudo isso, aliado à variabilidade temporal das características das plantas, em função dos seus ciclos sazonais de crescimento e desenvolvimento, tornam os resultados dos estudos experimentais muito restritos às condições originais onde foram desenvolvidos e dificultam a extrapolação para outras situações, face à necessidade de uma prévia caracterização da vegetação local, o que raramente está disponível.

Para os objetivos deste estudo, que trata da modelagem hidrodinâmica bidimensional com enfoque sobre a circulação da água e não há informações suficientes das características da vegetação, a aplicação da equação de Chèzy ou de Manning representa uma simplificação aceitável.

Para estudos semelhantes a este, resultados mais interessantes do ponto de vista prático são os que indicam valores dos coeficientes de Manning ou de Chèzy em função de uma maior ou menor densidade de vegetação, da condição de emergência ou submergência das plantas ou de outras variáveis do escoamento, como em Wu et al. (1999), Fathi-Maghadam e Kouwen (1997), Pitlo e Dawson (1993), Abdelsalam et al. (1992), Turner e Chanmeesri (1984) e Shih e Rahi (1981), entre outros.

Como exemplos, são citados aqui dois casos:

(i) a partir de medições em um banhado natural, Shih e Rahi (1981) obtiveram vários resultados estimando a variação do coeficiente de Manning com a profundidade do escoamento e a época do ano, para dois tipos de vegetação. Analisou-se uma vegetação composta por *Eichhornia crassipes*, uma espécie flutuante durante maior parte do seu ciclo de vida, e outra vegetação formada por uma composição de espécies, cujos resultados são apresentados no gráfico da figura 3.2;

(ii) Pitlo e Dawson (1993) citam um estudo experimental em laboratório desenvolvido por Pitlo, cujos resultados apresentam o comportamento do coeficiente de Manning em função da velocidade média do escoamento e da época do ano, relativo à espécie emergente *Potamogeton trichoides* (figura 3.3).

Além da resistência ao escoamento, alguns estudos consideraram, ainda, o volume ocupado pela vegetação no corpo d'água, através da introdução de um coeficiente de porosidade na equação da continuidade (Jadhav e Buchberger, 1995; Hammer e Kadlec, 1986).

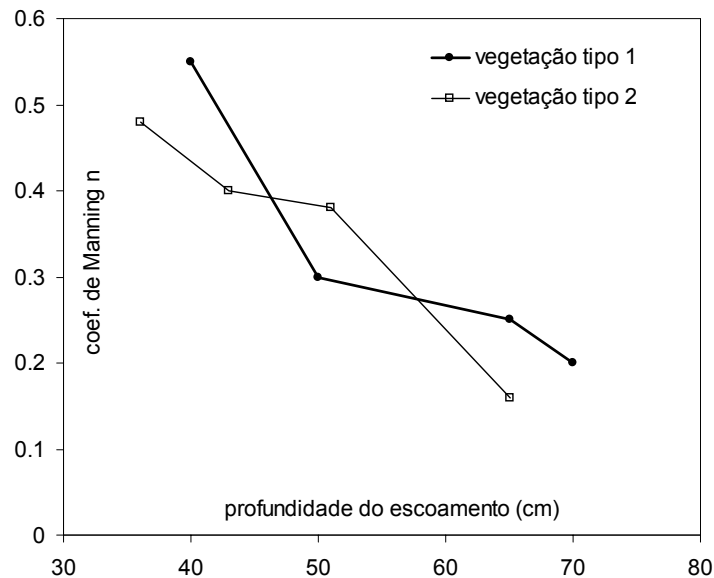


Figura 3.2. Relação entre a profundidade do escoamento e o coeficiente de Manning obtida de experimentos em campo, onde: veg. tipo 1 = predominância da espécie *Eichhornia crassipes*; tipo 2 = composição de várias espécies. (Fonte: adaptado de Shih e Rahi, 1981).

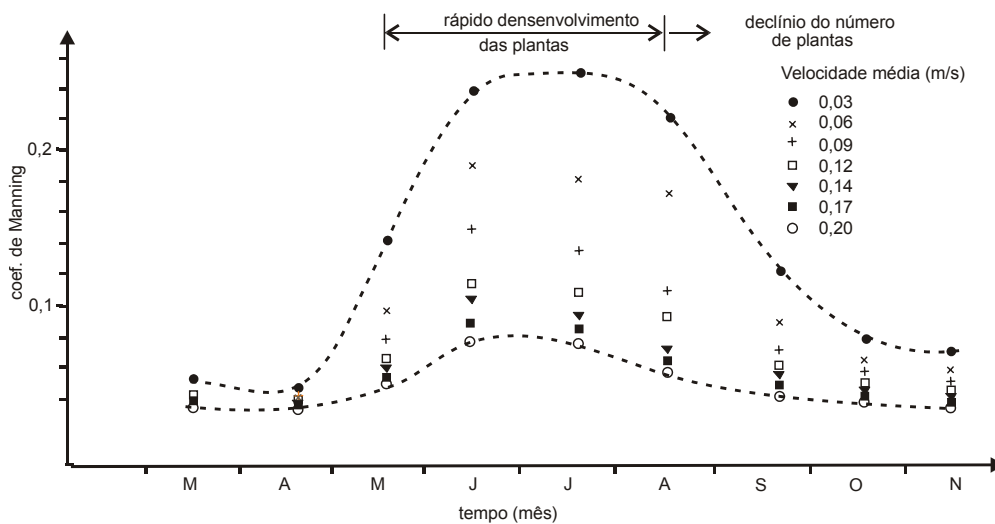


Figura 3.3. Variação do coeficiente de Manning para diferentes velocidades do escoamento durante a fase de desenvolvimento da espécie *Potamogeton trichoides* (planta emergente). (Fonte: adaptado de Pitlo, 1979, apud Pitlo e Dawson, 1993).

3.3.2 Ação do vento

A ação contínua e prolongada do vento sobre um corpo d'água provoca uma determinada inclinação da superfície deste, cujo valor depende da intensidade do vento, da profundidade e do comprimento do corpo d'água na direção do vento (*fetch*) (Martin e McCutcheon, 1999). Caso tal força cesse abruptamente, a superfície tende a voltar ao estado de repouso, na horizontal, ocasionando a seiche do corpo d'água. Segundo os referidos autores, o termo seiche é empregado para designar o movimento de oscilação da superfície da

água (ou da interface entre zonas de diferentes densidades, no caso de um corpo d'água estratificado), resultante de um desnível, que é provocado, geralmente, pela interrupção de uma força que atuava sobre o corpo d'água, como a ação do vento, ou pela operação de barragens. Apenas para ilustrar a ordem de grandeza, Wetzel (1975) apud Martin e McCutcheon (1999) menciona que o desnível no lago Erie (EUA) pode ultrapassar os 2 m, em uma tempestade severa.

A seiche pode ser classificada em função do número de pontos onde a superfície da água (ou a interface entre superfícies de diferentes densidades) não apresenta o movimento oscilatório, sendo mais comum a ocorrência da seiche uninodal (um ponto), e, com menos frequência, a binodal (2 pontos), ilustradas na figura 3.4 (Martin e McCutcheon, 1999). No tipo uninodal, a oscilação ocorre entre dois estados opostos caracterizados pela interrupção momentânea do fluxo, seguida da sua inversão, havendo, ainda, outras duas posições opostas onde a superfície é momentaneamente horizontal e as velocidades máximas ocorrem em direções contrárias.

Considerando a celeridade de uma onda de pouca profundidade (c), dada por:

$$c = \sqrt{gH}, \quad (3.22)$$

e, para o caso da seiche uninodal, cujo comprimento de onda é o dobro do comprimento do corpo d'água (L), o período de oscilação (T_w) pode ser estimado pela chamada equação de Meriam (Martin e McCutcheon, 1999):

$$T_w = \frac{2L}{\sqrt{gH}}. \quad (3.23)$$

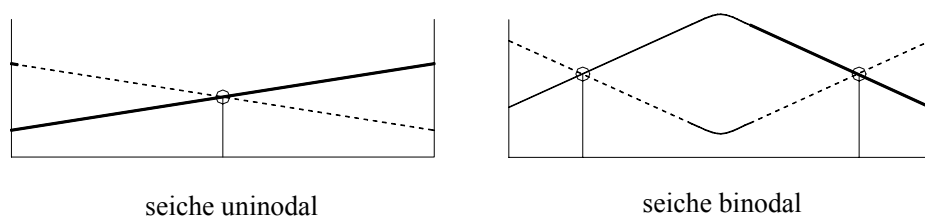


Figura 3.4. Representação do movimento da superfície da água durante seiches dos tipos uninodal e binodal. (Fonte: adaptado de Martin e McCutcheon, 1999).

Na modelagem hidrodinâmica 2DH, a ação do vento é levada em conta através da tensão de cisalhamento na superfície da água (τ_{sx} e τ_{sy}), nas equações dinâmicas.

Segundo Weiyan (1992), a tensão de cisalhamento do vento pode ser estimada por uma fórmula semi-teórica, baseada em uma hipótese de semelhança proposta por Von Kármán para escoamento turbulento, da qual resulta uma expressão onde a tensão de atrito na interface é proporcional ao quadrado da velocidade turbulenta (aqui tomada como a velocidade do vento):

$$\tau_s = \rho_{\text{ar}} \left(\frac{\kappa \omega}{\ln\left(\frac{\delta + k}{k}\right)} \right)^2 \quad (3.24)$$

onde ρ_{ar} é a massa específica do ar, k é a medida de rugosidade da superfície da água e ω é a velocidade do vento a uma altura δ da superfície da água.

Normalmente, faz-se uma simplificação da equação (3.24), adotando-se uma altura fixa $\delta = 10$ m ou 15 m e um coeficiente de arrasto do vento (C_d) dado por:

$$C_d = \left(\frac{\kappa}{\ln\left(\frac{\delta + k}{k}\right)} \right)^2, \quad (3.25)$$

resultando na seguinte expressão para a tensão de cisalhamento na superfície da água:

$$\tau_s = \rho_{\text{ar}} C_d \omega^2 \quad (3.26)$$

Decompondo a equação anterior nos eixos x e y , obtém-se:

$$\tau_{sx} = \rho_{\text{ar}} C_d \omega_x |\omega| \quad (3.27)$$

$$\tau_{sy} = \rho_{\text{ar}} C_d \omega_y |\omega| \quad (3.28)$$

onde ω_x e ω_y são as componentes da velocidade do vento $\vec{\omega}$ nas direções x e y , respectivamente.

Quando há disponibilidade de dados da velocidade e direção do vento em mais de um posto de medição, costuma-se adotar algum tipo de interpolação para considerar a variação espacial das condições de vento, como as empregadas por Podsetchine e Schernewski (1999), Almeida et al. (1990) e Rosauero e Schettini (1989). Entretanto, o problema reside na ausência de dados disponíveis, sendo o campo de ventos usualmente considerado homogêneo em toda a região estudada, como em Pinho et al. (2001) e Rajar et al. (1997).

Quanto ao coeficiente C_d , em alguns estudos ele foi ajustado durante a calibração do modelo, como em Almeida et al. (1990), por exemplo, enquanto em outros foi adotado um valor de referência citado na literatura ou alguma relação para calculá-lo em função da velocidade do vento, como as mencionadas por Leitão (2002), Weiyan (1992) e Rosman (1989). O valor usual desse parâmetro é em torno de $1,0 \times 10^{-3}$ a $3,0 \times 10^{-3}$ (Weiyan, 1992).

A proximidade do corpo d'água com morros e montanhas provoca em certas áreas daquele um efeito de proteção contra a ação do vento, o que foi concluído por Józsa et al. (1990) durante a aplicação de um modelo 2DH, cuja calibração com dados medidos em

campo só foi alcançada com a modificação do campo de tensões do vento levando em conta o referido efeito.

A necessidade de considerar a variabilidade espacial da tensão do vento também é enfatizada por Podsetchine e Schernewski (1999), que ressaltam, além da proteção provocada por regiões de topografia elevada, o efeito da presença de vegetação no corpo d'água. Este último fator também foi levado em conta nas simulações realizadas por Ramming (1979), que adotou, arbitrariamente, uma redução de 75% no termo referente à tensão do vento, nas áreas do lago modelado com grande presença de plantas emergentes. Kadlec (1990) comenta, inclusive, que uma densa cobertura vegetal pode efetivamente bloquear a ação do vento e excluí-lo como fator atuante no escoamento.

3.4 MODELAGEM NUMÉRICA

O sistema formado pelas equações (3.12) a (3.14), apresentado e discutido no item 3.3, constitui um modelo matemático hidrodinâmico empregado para representar o escoamento bidimensional horizontal. Na forma completa, sem simplificações, tais equações não apresentam solução analítica conhecida, acarretando a utilização de métodos numéricos para encontrar soluções aproximadas. Como princípio básico, os métodos numéricos usam o processo de discretização, pelo qual um problema físico, contínuo e com um número infinito de incógnitas é reduzido a um problema discreto em um número finito de pontos nos domínios temporal e espacial (Rosman, 1989; Cunge et al., 1980).

As técnicas de modelagem numérica, usualmente empregadas nos problemas relacionados com hidráulica, são os métodos das características, de diferenças finitas, de elementos finitos e de volumes finitos, ou uma combinação dos anteriores. A descrição em detalhes de cada um deles, com aplicações aos recursos hídricos, é encontrada na literatura especializada, como em Rosman (1989), Cunge et al. (1980) e Abbott (1979), por exemplo.

Atualmente, os métodos de diferenças finitas e de elementos finitos são os mais empregados para simulação do escoamento bidimensional. O primeiro consiste, basicamente, em aproximar as derivadas parciais das equações diferenciais através de diferenças, obtidas por expansão truncada em série de Taylor, definidas em uma série de pontos que constituem a malha computacional, geralmente de espaçamento constante (Cunge et al., 1980). Como exemplos de aplicação desse método na modelagem hidrodinâmica 2DH, tem-se Somes et al. (1999), Guardo e Tomasello (1995) e Józsa et al. (1990).

No emprego do método das diferenças finitas, vários esquemas numéricos podem ser aplicados, como os descritos em Cunge et al. (1980) ou em Abbott (1979), como os

esquemas do tipo ADI (*Alternating Direction Implicit*). Embora empregados com frequência nos modelos 2DH (Somes et al., 1999; Guardo e Tomasello, 1995; Józsa et al., 1990), Benqué et al. (1982) alerta para problemas numéricos que podem aparecer em esquemas desse tipo, como atenuação artificial e difusão numérica, para números de Courant maiores do que 5. A condição de Courant-Friedrichs-Lewis (CFL), mais referenciada como número de Courant (Cr), indica uma condição de estabilidade para esquemas explícitos, quando apresenta valor menor que a unidade, sendo expressa, para o caso bidimensional, da seguinte forma (Benqué et al., 1982):

$$Cr = \Delta t \sqrt{gH} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}}, \quad (3.29)$$

onde Δt é o passo de tempo de cálculo e Δx e Δy são os espaçamentos da malha numérica nas direções x e y , respectivamente. No mesmo trabalho e em Casulli e Cattani (1994), são apresentados esquemas alternativos, com as respectivas análises de estabilidade, precisão e eficiência, enquanto em Casulli (1990) é apresentada uma análise comparativa entre três esquemas de diferenças finitas, sendo um esquema básico ADI, um esquema semi-implícito e outro totalmente implícito.

O método dos elementos finitos é caracterizado pela discretização do contínuo em elementos que podem apresentar formas geométricas diversas, sendo a relação entre os valores das variáveis nos nós determinada por meio de funções de interpolação (Rosman, 1989). Alguns exemplos da aplicação do referido método na simulação hidrodinâmica bidimensional horizontal são: Pinho et al. (2001), Podsetchine e Schernewski (1999) e Rosauero e Schettini (1989).

Um método alternativo mais recente é a técnica das redes neurais artificiais, cuja aplicação a diversas áreas dos recursos hídricos vem ganhando ênfase, inclusive sendo utilizado como operador numérico em modelos hidrodinâmicos, na simulação de escoamentos uni e bidimensionais (Dibike, 2002).

3.5 HISTÓRICO DA MODELAGEM DE BANHADOS NA LITERATURA

A modelagem da circulação da água em banhados é um tema ainda pouco tratado na literatura e de interesse relativamente recente. A maioria dos estudos envolvendo terras úmidas apresenta um enfoque biológico ou ecológico e poucos deles procuram descrever ou analisar o comportamento hidrológico/hidrodinâmico. Aqueles que o fazem, geralmente utilizam uma abordagem simplificada. Uma das razões para isso é que o reconhecimento da importância de estudar o padrão de circulação da água e os fatores intervenientes no

escoamento em banhados ainda é muito recente (Aumen, 2003; Newall e Hughes, 1995). É importante ressaltar, também, que vários estudos são direcionados aos banhados artificiais, construídos com propósitos de tratamento de água residuárias, e não a ecossistemas naturais.

Hammer e Kadlec (1986) utilizaram uma representação unidimensional, aplicando uma equação da continuidade e uma equação alternativa à de Manning, devido à presença de vegetação, para estudar o escoamento em banhados. Uma abordagem unidimensional também foi a empregada por Jadhav e Buchberger (1995), mas aplicando as equações de Saint Venant, modificadas para levar em conta o arrasto sobre as plantas e o volume ocupado pelas mesmas. Villanueva (1997) aplicou um modelo hidrodinâmico de celas ao banhado do Taim (adotando coeficiente de Manning igual a 0,4), o qual foi desenvolvido para a simulação de rios com planícies de inundação e adaptado às terras úmidas.

Bolster e Saiers (2002) e Feng e Molz (1997) empregaram modelos de difusão bidimensionais para avaliar a circulação da água em banhados naturais, os quais foram verificados com dados medidos em campo, obtendo resultados satisfatórios. No último estudo citado, os autores incluíram um algoritmo de contornos móveis que permitiu a secagem/inundação de áreas internas à região modelada.

Uma modelagem hidrodinâmica bidimensional foi a metodologia utilizada por Somes et al. (1999) e Guardo e Tomasello (1995), no estudo do escoamento de um banhado natural e um artificial, respectivamente. No segundo caso, a vegetação emergente abrangia toda a região simulada, e um coeficiente de Manning espacialmente uniforme foi adotado ($n = 1,0$), enquanto que, no primeiro estudo, áreas com maior ou menor presença de vegetação foram identificadas e receberam diferentes valores para tal coeficiente ($0,05 \leq n \leq 2,0$).

Um estudo distinto dos citados anteriormente é o relatado por Stern et al. (2001), que empregaram traçadores (corante) para descrever a circulação de água em um banhado natural e identificaram diferenças significativas nas características do escoamento, conforme o tipo de vegetação predominante.

4 MODELO IPH-A E ALGORITMO DE SECAGEM/INUNDAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste estudo, optou-se pela utilização de um modelo hidrodinâmico bidimensional integrado na vertical, sendo adotado o modelo denominado IPH-A, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) e descrito por Casalas (1996). Segundo o mesmo autor, o IPH-A é um sistema computacional destinado à simulação da circulação e do transporte de massa em corpos d'água bidimensionais, sendo 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, lagoa Setúbal (Argentina) e Praia de Ipanema (lago Guaíba).

A escolha de tal modelo foi motivada, principalmente, pela eficiência comprovada em estudos anteriores e por uma série de facilidades, como a possibilidade de acompanhamento do cálculo, em tempo real de simulação, através de gráficos de níveis e campos de velocidades, por exemplo. Além do mais, o desenvolvimento de um modelo computacional apenas iria consumir um tempo prolongado, sem contribuir efetivamente para alcançar os objetivos deste trabalho.

Neste capítulo, apresenta-se o modelo IPH-A, indicando o equacionamento matemático, o método numérico empregado para resolver o sistema de equações e o funcionamento do modelo propriamente dito. Em seguida, descreve-se o algoritmo de secagem/inundação implementado, com alguns resultados do teste comprovando a sua validade.

4.2 O MODELO IPH-A

4.2.1 Equacionamento matemático e método numérico

Para descrever o escoamento da água, o modelo IPH-A emprega as equações da continuidade e de Navier-Stokes integradas na vertical, apresentadas no capítulo anterior (equações 3.12 a 3.14). A formulação de Chèzy (equação 3.16) é empregada no 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

(equação 3.26). Com a substituição de tais termos, as equações dinâmicas e da continuidade empregadas pelo modelo são:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = \Omega V - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{C_v \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{H} - \frac{gU \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} + \varepsilon_T \Delta U \quad (4.2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\Omega U - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{C_v \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{H} - \frac{gV \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} + \varepsilon_T \Delta V \quad (4.3)$$

onde C_v é um coeficiente de ajuste de vento, dado por $C_v = \rho_{ar} C_D / \rho$, e as demais variáveis estão apresentadas no capítulo 3.

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).

Por esse método, cada intervalo de tempo é subdividido em dois semi-intervalos: inicialmente, resolve-se o sistema de equações formado pela equação da continuidade e pela equação dinâmica na direção x , para o primeiro semi-intervalo e para cada linha da malha numérica; após repetir-se o processo para todas as linhas, resolve-se o sistema formado pela equação da continuidade e pela equação dinâmica na direção y , referente ao segundo semi-intervalo de tempo, para todas as colunas. O processo promove uma dupla varredura do espaço de cálculo e as matrizes resultantes para cada linha e para cada coluna são do tipo tridiagonal, o que agiliza a solução computacional.

A figura 4.1 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 Chèzy (C) são tomados em duas componentes (h_u e h_v , para h , e C_u e C_v , para C) uma para cada direção do plano x - y , definidas nos lados direito e superior, enquanto o nível variável no tempo $\eta(x,y)$ é associado ao centro de cada elemento da malha. No Anexo A1, consta a discretização numérica em diferenças finitas de todos os termos das equações dinâmicas e da continuidade empregada pelo modelo em questão.

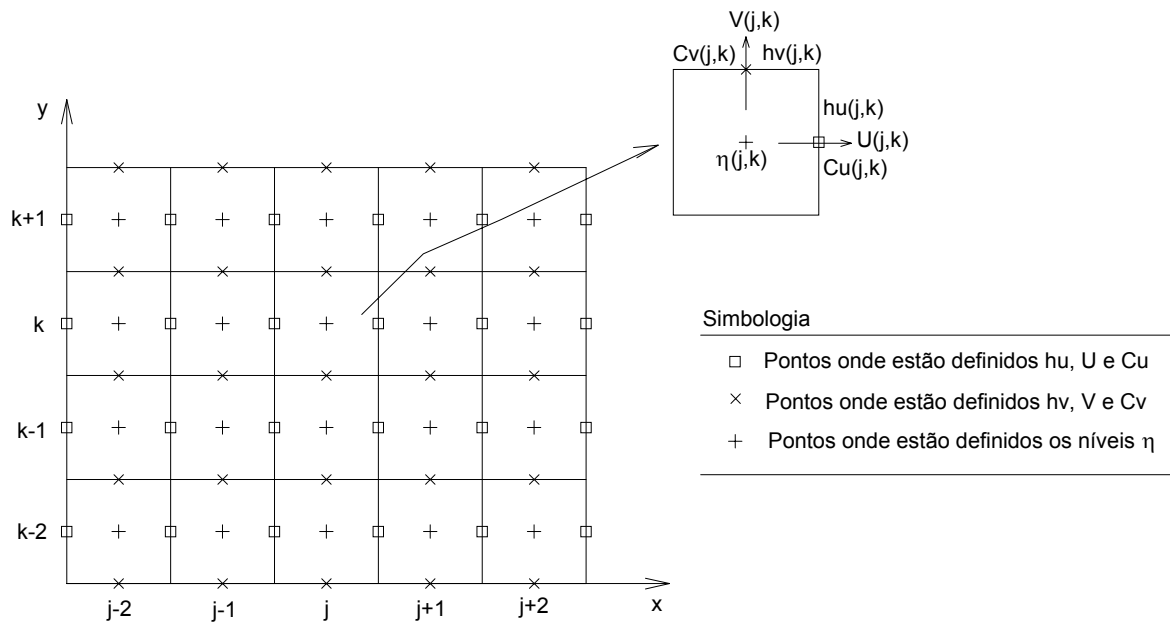


Figura 4.1. Esquema da malha numérica utilizada pelo IPH-A, com localização das variáveis nas quadrículas de cálculo.

4.2.2 Estrutura do modelo

A aplicação do sistema computacional IPH-A é facilitada pela forma com que foi desenvolvido: uma série de programas que permitem a definição do contorno, dos parâmetros de simulação e a entrada dos dados de batimetria de forma separada, gerando arquivos específicos.

Uma característica interessante do modelo aqui descrito é a utilização de uma forma vetorial para armazenar todas as informações correspondentes às quadrículas da malha, o que poupa memória e aumenta a velocidade de processamento (Casalas, 1996). Cada elemento da malha é referido por um número $K1$, em função da linha e da coluna onde está localizado, da seguinte forma:

$$K1 = AR(I) + J \quad (4.4)$$

onde I é o número da linha do elemento, J é o número da coluna e AR é um vetor cujas componentes são determinadas pela diferença entre o número e a coluna da primeira quadrícula de cada linha.

Cada módulo do modelo armazena as informações correspondentes em arquivos utilizando a forma vetorial citada, os quais são responsáveis pela troca de dados entre os diversos programas de uma maneira eficiente. A figura 4.2 apresenta um esquema com os programas que constituem o referido modelo, bem como as informações de entrada e os arquivos de saída gerados por cada um.

A definição do contorno a ser simulado é realizada através do programa INICIAL, gerando-se os arquivos ARQCONT.nnn e ARQGEO.nnn, onde .nnn é a terminação dos arquivos especificada pelo usuário. Em seguida, através do módulo denominado BATIM, são introduzidos ou alterados os dados de batimetria, atualizando-se o arquivo ARQGEO.nnn. Com o programa CHEZY, são informados os valores do coeficiente de Chèzy para cada elemento da malha numérica, caso se deseje variar esse parâmetro espacialmente, registrando no arquivo ARQCHEZY.nnn.

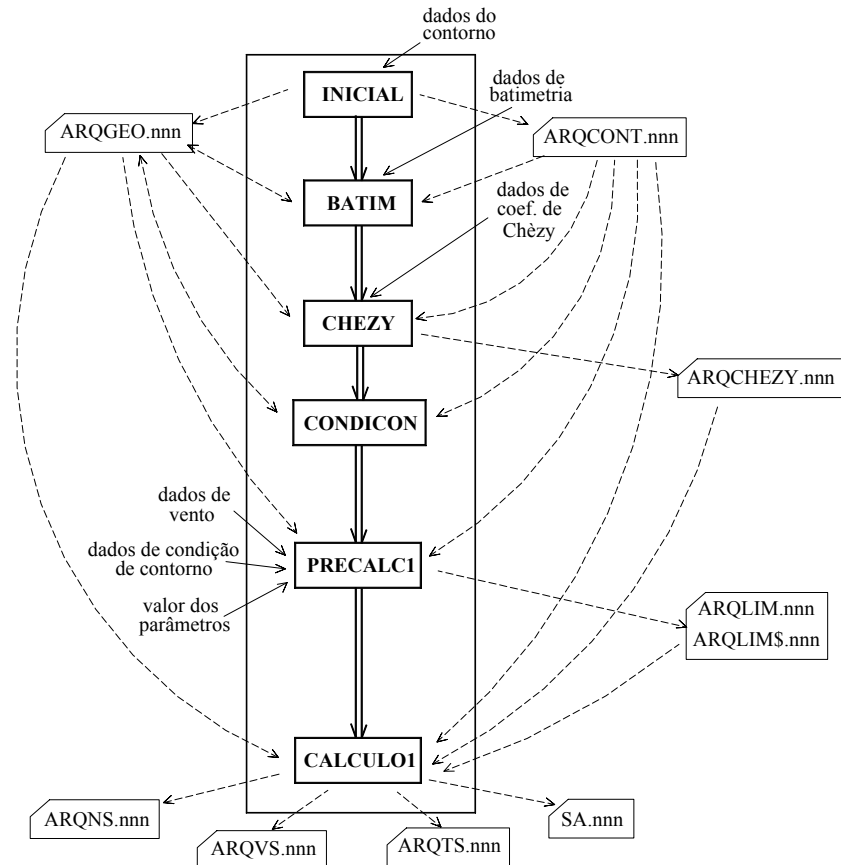


Figura 4.2. Diagrama de funcionamento do modelo IPH-A, onde: o retângulo central delimita os módulos do modelo (representados pelos retângulos de linhas cheias); as linhas tracejadas indicam a relação entre os arquivos gerados pelo modelo (representados pelos retângulos chanfrados) e os módulos, e as linhas finas cheias representam a entrada de dados externos. (Fonte: adaptado de Casalas, 1996).

O programa CONDICON permite estabelecer o tipo da condição de contorno para as fronteiras abertas: nível ou velocidade, que podem ser constantes ou variáveis ao longo do tempo e, como resultado, é atualizado o arquivo ARQGEO.nnn. Através do módulo PRECALC1 são definidos os dados de vento (constante ou variável no tempo) e demais especificações: espaçamento da malha, passo de tempo de simulação, coeficiente de viscosidade turbulenta, latitude, coeficiente de vento e coeficiente de Chèzy, caso considerado constante. Como resultado, são gerados os arquivos ARQLIM.nnn e ARQLIMS.nnn.

Após a definição de todas as condições e parâmetros de entrada, a simulação hidrodinâmica é realizada através do programa CALCULO1, que permite o acompanhamento do cálculo sob várias formas: gráfico de níveis e velocidades em elementos da malha previamente especificados; campo de velocidades; indicação do valor das componentes de velocidade e do nível em cada elemento; gráfico de faixas das velocidades, dos níveis e da amplitude de oscilação dos níveis, etc. Como arquivos de saída, o CALCULO1 gera os seguintes arquivos: ARQNS.nnn e ARQVS.nnn, contendo os níveis e as velocidades de alguns pontos pré-determinados; ARQTS.nnn, com as trajetórias dos flutuadores; e SA.nnn, com informações das condições finais de simulação.

Os demais módulos que constituem o modelo IPH-A, denominados PRECALC2 e CALCULO2, são utilizados quando se deseja realizar a simulação hidrodinâmica acompanhada do cálculo da dispersão de um contaminante (com funções análogas ao PRECALC1 e CALCULO1), o que não é analisado neste estudo. A descrição detalhada do funcionamento de todos os programas constituintes do IPH-A é apresentada por Casalas (1996).

Apesar de constituir um sistema computacional definido, de relativa versatilidade quanto à forma de entrada de dados e de comprovada eficiência, algumas modificações foram efetuadas no modelo IPH-A, conforme a necessidade e o interesse durante a pesquisa. As principais implementações foram: (i) geração de outros arquivos de saída, (ii) adoção do coeficiente de Manning como padrão para o coeficiente de rugosidade do fundo, e (iii) introdução de um coeficiente que multiplica a tensão de cisalhamento na superfície da água, com valor entre 0 e 1, denominado aqui de “coeficiente redutor da ação do vento”. Tal coeficiente permitiu dar um tratamento diferenciado para a ação do vento, entre as áreas consideradas com e sem vegetação.

4.3 ALGORITMO DE SECAGEM/INUNDAÇÃO

O objetivo de desenvolver um algoritmo que permitisse a secagem e a inundação de regiões internas ao contorno modelado foi a possibilidade de simular o banhado do Taim com níveis de água relativamente baixos. Sem algum tratamento dessa natureza, a maioria dos modelos hidrodinâmicos não suporta que áreas dentro do contorno estudado apresentem cotas superiores ao nível d'água de simulação, ou seja, regiões com tirante nulo ou negativo (ilhas). Isso é devido ao equacionamento matemático envolvido, onde alguns termos apresentam o tirante de água no denominador ou elevado a potência fracionária (equações 4.2 e 4.3). Tal limitação constitui uma séria restrição para o estudo do comportamento hidrodinâmico do

Taim, por ser uma região de topografia pouco acentuada, com tirantes de água muito pequenos, apresentando áreas secas com frequência. O mesmo problema é elucidado por Feng e Molz (1997), para a simulação de banhados em geral, por estarem sujeitos à inundação e secagem, geralmente.

4.3.1 Métodos empregados na literatura

Para não ter que sempre simular os modelos hidrodinâmicos com níveis de água que cubram todos os pontos da região, vários métodos têm sido estudados. Elder (1994) apud Martin e McCutcheon (1999) cita dois grupos de métodos principais: (i) métodos que “desligam” ou “ligam” elementos internos ao contorno, conforme sua situação de “seco” ou “molhado”; (ii) métodos que utilizam contornos móveis, com uma malha numérica adaptativa. Enquanto o primeiro grupo utiliza algum artifício, para considerar que determinados elementos do contorno sejam isolados do escoamento, caso sejam classificados como secos, sem alterar a configuração do contorno modelado, o segundo, efetivamente, modifica a malha numérica, excluindo os elementos rotulados como secos (Awruch, 1983). Uma alternativa, desenvolvida mais recentemente, consiste no método das fronteiras virtuais, cuja origem foi motivada pela dificuldade em simular o escoamento na proximidade de geometrias complexas, como ao redor de um cilindro submerso, por exemplo. O método em questão consiste em adicionar um termo de força de campo às equações dinâmicas do escoamento, de modo a simular a presença de uma fronteira imersa no escoamento, sem alterar a malha cartesiana uniformemente espaçada (Ribeiro, 2002).

Vários métodos adotam a verificação da condição de tirante mínimo, de modo a tomar medidas que evitem a ocorrência de valores negativos ou nulos, o que acarretaria na parada da execução do modelo. Leitão (2002) ressalta que o valor do tirante mínimo tem que ser suficientemente grande de modo a minimizar a criação artificial de massa, porém pequeno o bastante para não comprometer a propagação do escoamento, e cita como valor usual o tirante de 4 cm, enquanto que Ramming (1979) adotou o valor de 5 cm e Martin e McCutcheon (1999) mencionam o uso na literatura do valor de 10 cm.

Em Martin e McCutcheon (1999) é apresentado um bom resumo de modelos hidrodinâmicos bidimensionais desenvolvidos com algum tipo de procedimento que possibilite a simulação com secagem/inundação da região estudada, com comentários e observações acerca do desempenho constatado durante as aplicações. Awruch (1983) apresentou um método de contornos móveis adaptado para escoamentos de águas rasas,

enquanto Feng e Molz (1997) incluíram um algoritmo dessa natureza em um modelo de difusão 2D, na simulação de terras úmidas.

4.3.2 O algoritmo implementado no IPH-A

4.3.2.1 Concepção

A forma com que o modelo IPH-A foi desenvolvido, sendo os elementos da malha numérica internos ao contorno identificados e referidos por uma numeração seqüencial, dificulta a adaptação de um algoritmo de contornos móveis, uma vez que, a cada passo de tempo, caso o contorno mude, toda a numeração dos elementos é modificada, havendo a necessidade de criar uma rotina que faça a correspondência entre as duas numerações. Isso levou à conclusão de que a conservação do contorno original e, conseqüentemente, a permanência da numeração dos elementos internos ao contorno deveria ser adotada. No entanto, segundo Casalas (2002), há uma versão do modelo IPH-A que trabalha com contornos móveis, mas ainda em fase de ajustes.

Por não ser o foco principal deste trabalho, optou-se por desenvolver um algoritmo alternativo que constituísse uma solução mais simples do ponto de vista computacional, mas que resolvesse o problema, permitindo a secagem/inundação.

Tendo como princípio a conservação do contorno, vários algoritmos foram formulados, testados e descartados, até chegar à formulação final adotada neste trabalho. Uma dificuldade adicional surgiu da limitação de memória a que os programas desenvolvidos em linguagem Basic estão sujeitos, restringindo o número e as dimensões das variáveis.

O algoritmo de secagem/inundação empregado neste estudo consiste, resumidamente, em identificar se cada elemento está “seco” ou “molhado”, baseado em um critério de tirante mínimo (considerado igual a 10 cm), 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. Considerou-se que lâminas de água inferiores a 10 cm não proporcionariam escoamento, devido à grande resistência causada pela presença de vegetação e material depositado no fundo.

4.3.2.2 Tratamento da topografia

Antes de descrever o algoritmo propriamente dito, cabe ressaltar o “tratamento” adotado quanto às cotas topográficas do terreno. Antes da simulação, é feito um “corte” do

terreno por um plano horizontal (plano de corte), situado na chamada cota de corte, resultando em: (a) os pontos com cota inferior ou igual à cota de corte permanecem com a cota inalterada; (b) os pontos com cota superior à cota de corte têm sua cota alterada para a cota de corte. Desse modo, todos os pontos da malha passam a ter cota inferior ou igual àquela cota de corte estabelecida, sendo possível a simulação com cotas do nível da água acima da cota de corte, apenas. Ressalta-se que a definição da cota de corte deve ser baseada nos níveis com os quais serão realizadas as simulações, selecionando uma cota que nunca será superior à cota do nível da água. A figura 4.3 ilustra o esquema de corte do terreno, considerando o plano de corte como plano de referência para a definição do nível da água e da batimetria, tanto real como cortada, e o nível do mar como plano de referência para as cotas cortada e do fundo. Como entrada no modelo, são fornecidas a cota “cortada” e a cota “real” (também denominada cota do fundo) de cada elemento.

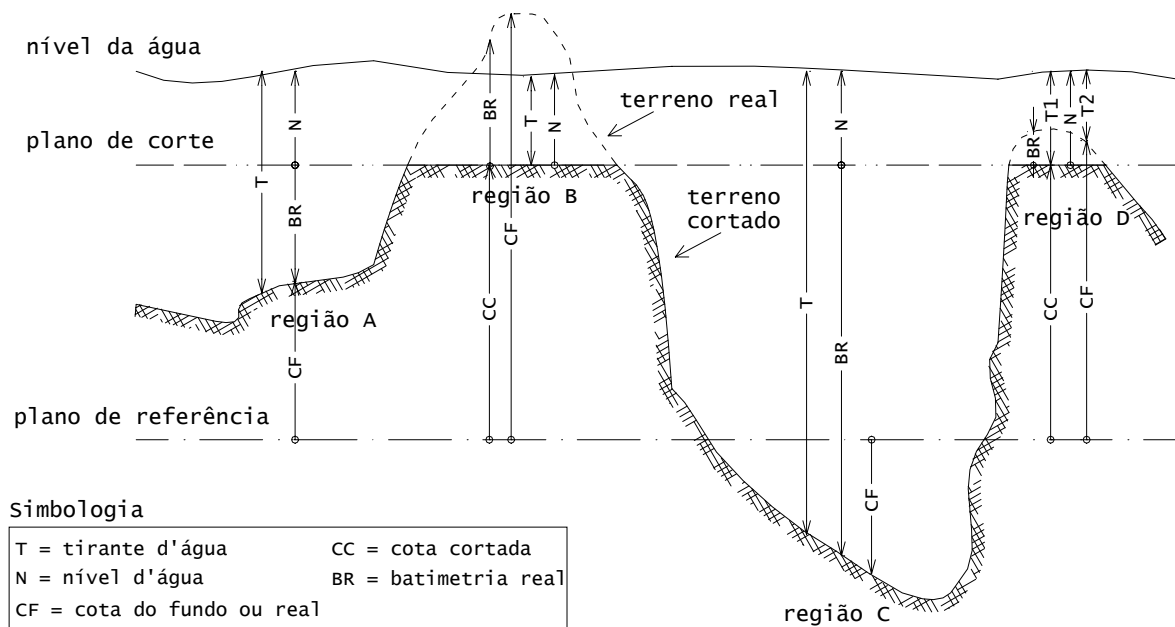


Figura 4.3. Corte do terreno e definição das variáveis do algoritmo de secagem/inundação.

Na figura 4.3, as regiões A, B, C e D indicadas representam distintas situações possíveis:

- nas regiões A e C, o terreno está abaixo do plano de corte, logo, são assumidas a batimetria e a cota reais (BR e CF). Como, na região C, o terreno também está abaixo do nível do mar, a cota do fundo é negativa;
- na região B, o terreno se encontra acima do nível da água, caracterizando uma área classificada como “seca”. Atribui-se, portanto, a cota e a batimetria cortadas. Como a cota

cortada (CC) coincide com o plano de corte, a batimetria cortada é igual a zero e o tirante (T) e o nível da água (N) são os indicados na figura;

- no caso da região D, o terreno está localizado acima do plano de corte e abaixo do nível da água. Caso o tirante seja inferior ao valor mínimo fixado de 10 cm, a região é dada como “seca”, são assumidas a cota e a batimetria cortadas (CC e zero, respectivamente) e o tirante é o indicado pelo símbolo T1 na figura. No caso do tirante ser superior a 10 cm, a região é classificada como “molhada”, e a cota e a batimetria permanecem com os valores reais (CF e BR, respectivamente), sendo o tirante representado pelo símbolo T2.

4.3.2.3 Descrição do algoritmo

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 (figura 4.4): (1) imposição de velocidade nula; (2) ajuste de níveis, batimetria e coeficiente de Manning; (3) atualização de níveis. Cada etapa é descrita, sucintamente, a seguir:

(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 10 cm, respectivamente. Se o elemento está “seco”, impõe-se velocidade nula nas suas quatro faces, conforme ilustra a figura 4.5;

(2) *Ajuste de níveis, batimetria e coeficiente de Manning*: inicialmente, verifica-se o estado do elemento. Caso ele esteja “molhado”, a batimetria e o coeficiente de Manning assumem seus valores “reais”, enquanto que o que se denominou de nível auxiliar do elemento assume o valor do nível atual do elemento. Para o caso do elemento considerado “seco”, impõe-se a batimetria “cortada” 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 (figura 4.5). 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 da malha, em função do nível auxiliar correspondente a cada um deles. A adoção de uma variável denominada de 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 ciclo, isto é, no semi-intervalo de tempo seguinte de simulação.

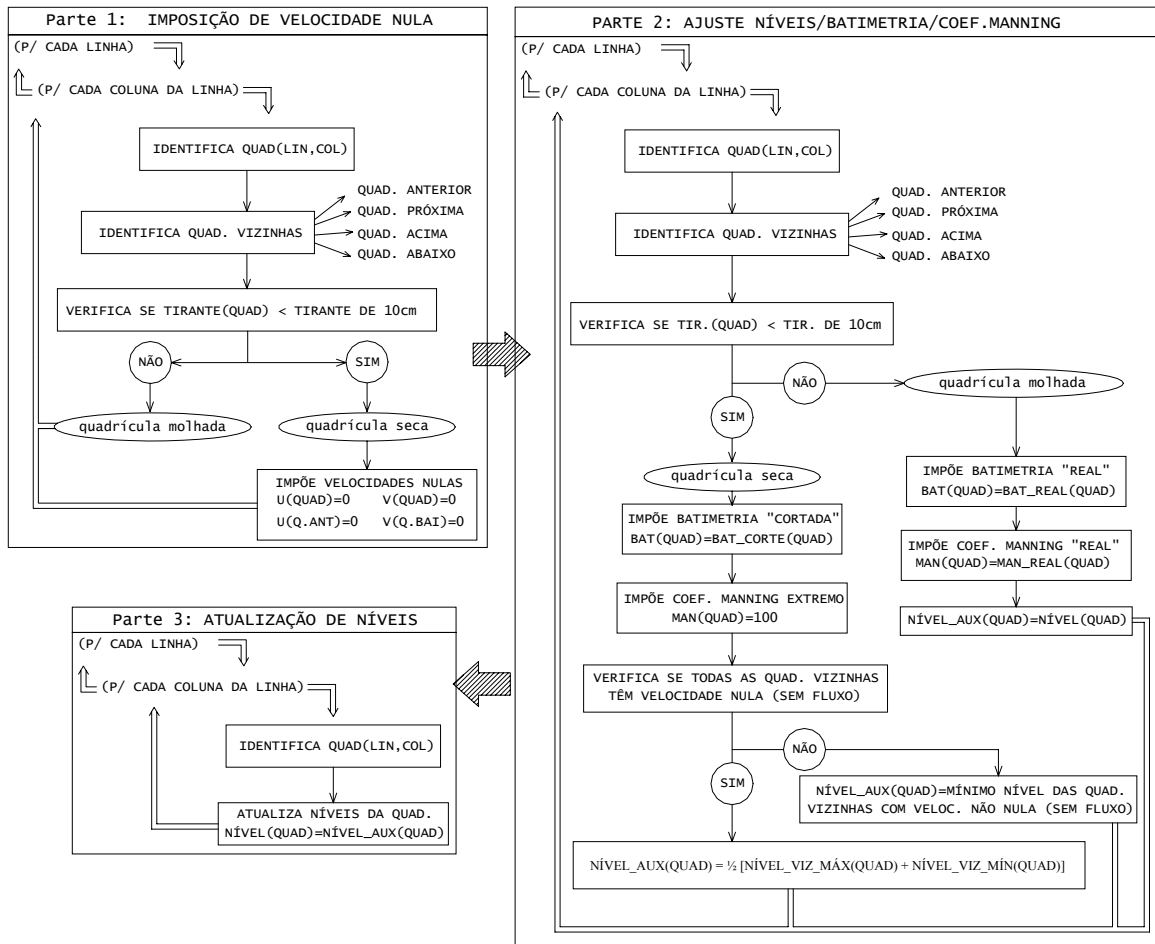


Figura 4.4. Diagrama de funcionamento do algoritmo de secagem/inundação.

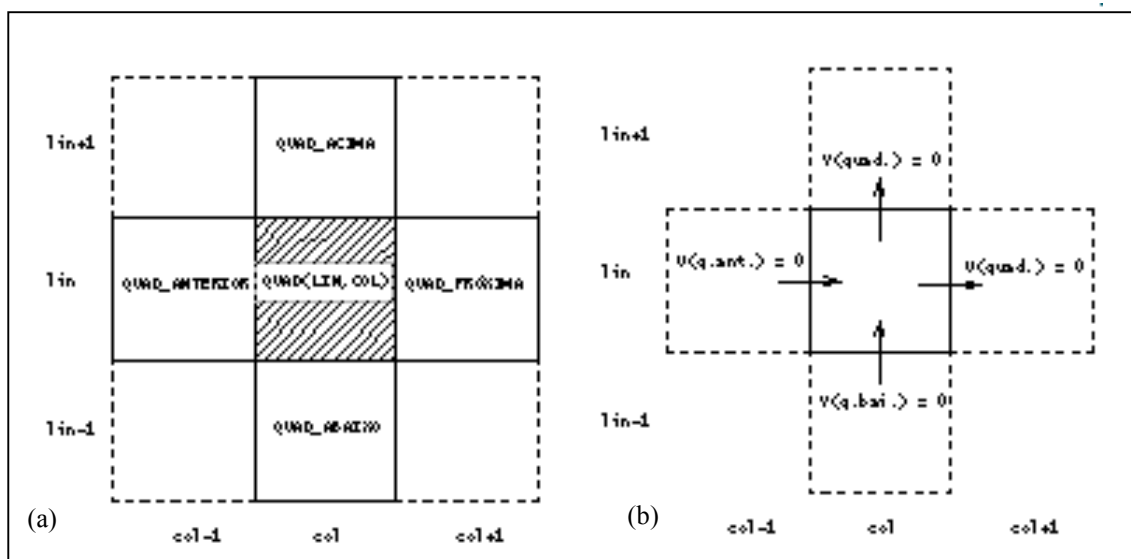


Figura 4.5. Identificação das quadrículas vizinhas (a) e das velocidades impostas nulas (b).

A imposição de velocidade nula tem um efeito similar ao observado pelo método das fronteiras virtuais, com a diferença de que, neste último, a própria resolução do sistema de equações fornece valores nulos para a velocidade nos elementos considerados secos ou que representam a fronteira sólida. O fato é que, em ambos, as regiões consideradas sem fluxo têm velocidade nula e isso faz com que, no semi-intervalo de tempo seguinte, o fluxo vizinho interprete tais áreas como um obstáculo e as contorne. A imposição de coeficiente extremo de rugosidade, quando o elemento está seco, tem o objetivo de inibir o transporte de massa e de quantidade de movimento, reforçando o efeito de impor velocidade nula. Alguns testes foram feitos adotando apenas um dos mecanismos, sendo os melhores resultados observados considerando a combinação de ambos.

A variação dos níveis nas áreas dadas como secas, em função das zonas vizinhas com fluxo, tem o objetivo de evitar instabilidades numéricas pela formação de um “degrau”, ou seja, um gradiente hidráulico muito alto, nas áreas de interface entre elementos secos e molhados. Esse problema foi identificado em diversas simulações preliminares, com o surgimento de fontes ou sumidouros nas áreas secas, ocasionando, inclusive, a divergência dos resultados. O ajuste do nível da região seca pela média aritmética da região vizinha com fluxo mostrou-se satisfatório, permitindo acompanhar a subida ou descida do nível, sem gerar gradiente hidráulico e sem comprometer a simulação.

A imposição da batimetria cortada para o elemento considerado seco é o que faz com que nunca ocorram tirantes nulos ou negativos, caso o nível da água não seja inferior à cota de corte. Por outro lado, quando tal elemento muda seu estado para molhado, e, portanto, passa a apresentar fluxo, a elevação da batimetria para o valor real faz com que se trabalhe com um tirante coerente e não com um valor irreal baseado na batimetria cortada.

4.3.2.4 Teste do algoritmo de secagem/inundação

Ao longo do desenvolvimento do algoritmo de secagem/inundação implementado no modelo IPH-A e, depois, para verificar sua validade, diversas simulações foram realizadas, aplicando-o a um canal retangular fictício. Além da análise dos resultados finais, o acompanhamento das simulações permitiu detectar a ocorrência de instabilidades numéricas ou incoerências no fluxo, facilitando a identificação da origem e a solução do problema. A seguir, serão descritos e apresentados os resultados de algumas simulações de forma resumida, os quais comprovaram a eficiência do algoritmo desenvolvido.

O algoritmo foi testado em um canal retangular fictício, idealizado com uma configuração geométrica muito próxima da do banhado do Taim: 18 km de comprimento por

9 km de largura, e profundidades baixas, em torno de 1,5 m (figura 4.6). Conforme mostram as curvas de nível da figura citada e a perspectiva tridimensional da topografia do fundo do canal (figura 4.7), a maior parte do mesmo compreende uma área plana e mais baixa (na cota 1,5 m), havendo uma elevação gradual na parte inferior central até a cota 2,5 m e, em seguida, uma região mais elevada com cotas iguais a 4,0 m. Durante as simulações, analisou-se o escoamento nas proximidades dessa região de cotas mais altas, que permaneceu “seca” todo o tempo, isto é, acima do nível da água.

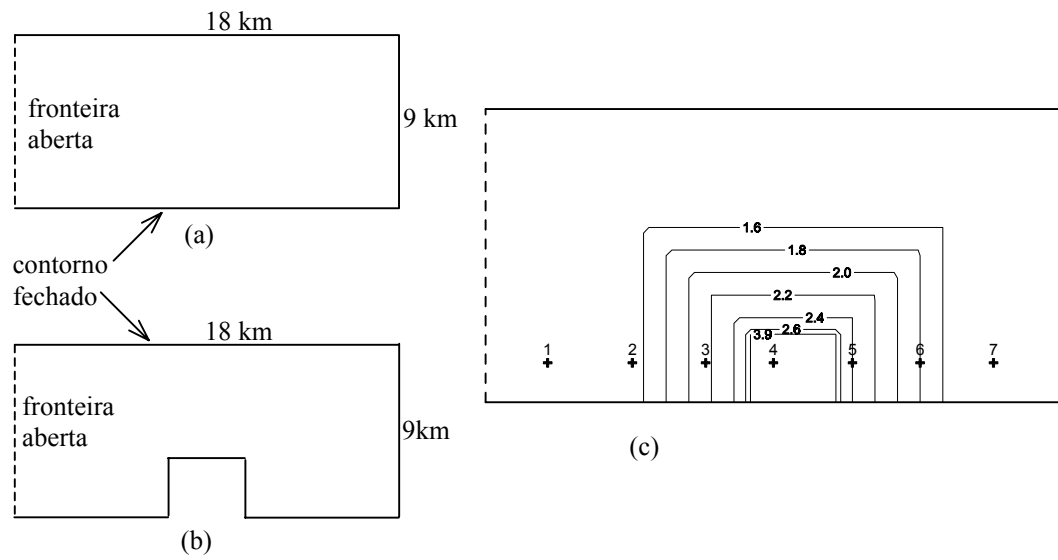


Figura 4.6. Geometria do canal fictício usado para testar o algoritmo de secagem/inundação: (a) planta ; (b) planta com contorno fechado ao redor da região elevada; (c) curvas de nível, em metros, da superfície do canal.

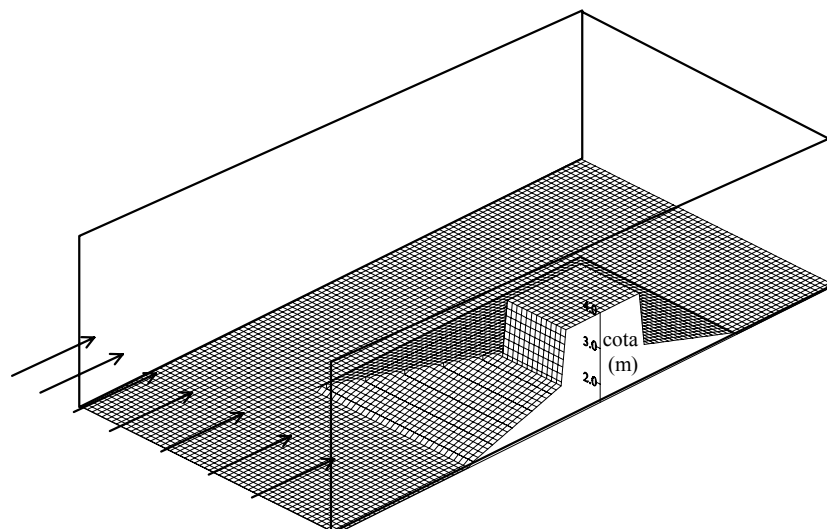


Figura 4.7. Perspectiva tridimensional da topografia do fundo do canal.

Como base de comparação, outra simulação foi realizada usando o modelo IPH-A sem o algoritmo de secagem/inundação e impondo uma condição de contorno fechada ao redor da região de cota igual a 4,0 m (figura 4.6).

Nos dois casos, em toda a lateral esquerda do canal foi imposta uma condição de contorno aberta de nível, de forma análoga à Lagoa Mangueira em relação ao banhado do Taim. Adotou-se um passo de tempo de 30 s e uma malha numérica retangular de espaçamento igual a 180 m, com um total de 53 colunas e 103 linhas, totalizando 5300 elementos internos. Por simplificação, desprezou-se a ação do vento e o efeito de Coriolis e usou-se o valor padrão de $10 \text{ m}^2/\text{s}$ para o coeficiente de viscosidade turbulenta. O coeficiente de rugosidade de Manning foi considerado constante em toda a região simulada com valor 0,1, representando a presença de vegetação.

A comparação entre as duas simulações foi feita de várias formas: gráficos de níveis e velocidades ao longo do tempo em alguns pontos do canal, trajetórias de flutuadores, e campos de velocidades. Todos os resultados mostraram boa concordância entre os dois casos, indicando que o algoritmo implantado no modelo IPH-A atendeu aos objetivos, possibilitando a simulação hidrodinâmica com áreas internas de cota superior à do nível d'água.

Os gráficos das figuras 4.8 e 4.9 mostram total conformidade entre o comportamento dos níveis e das componentes da velocidade do escoamento, ao longo do tempo, em alguns pontos do canal, cuja localização é indicada na figura 4.6. Em todos os pontos onde foram gravados os níveis e as velocidades, observou-se comportamento idêntico entre os dois casos comparados nas figuras 4.8 e 4.9, e, por isso, foram omitidos aqui.

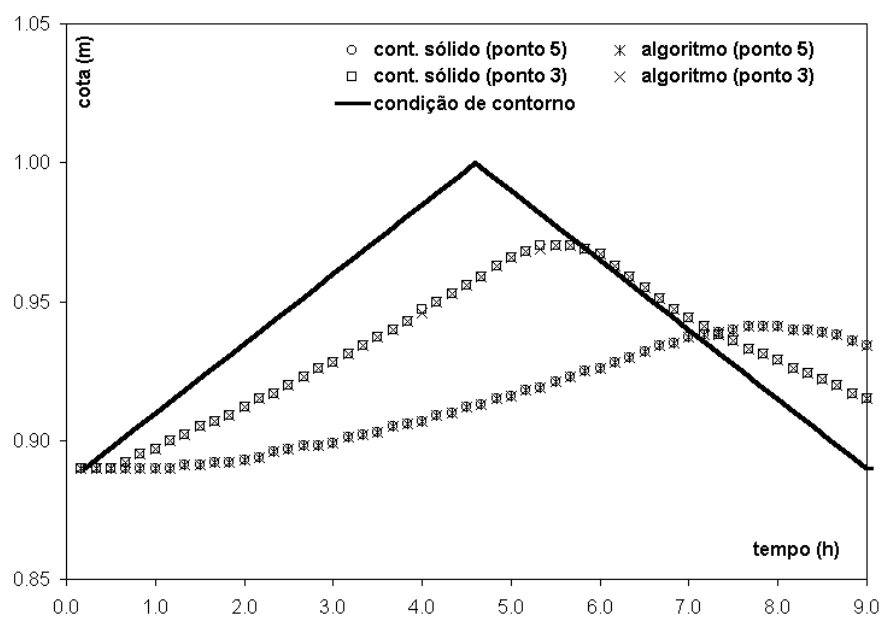


Figura 4.8. Nível ao longo do tempo nos pontos 3 e 5 do canal, para as simulações com contorno sólido ao redor da região elevada e com o algoritmo de secagem/inundação.

São apresentados, na figura 4.10, alguns campos de velocidade, que traduzem a concordância mencionada, mostrando quanto o algoritmo foi capaz de interpretar a área de cotas acima do nível da água como área classificada como seca, fazendo com que o escoamento a contornasse, como se realmente houvesse uma fronteira sólida, que é o que ocorre na situação simulada para comparação.

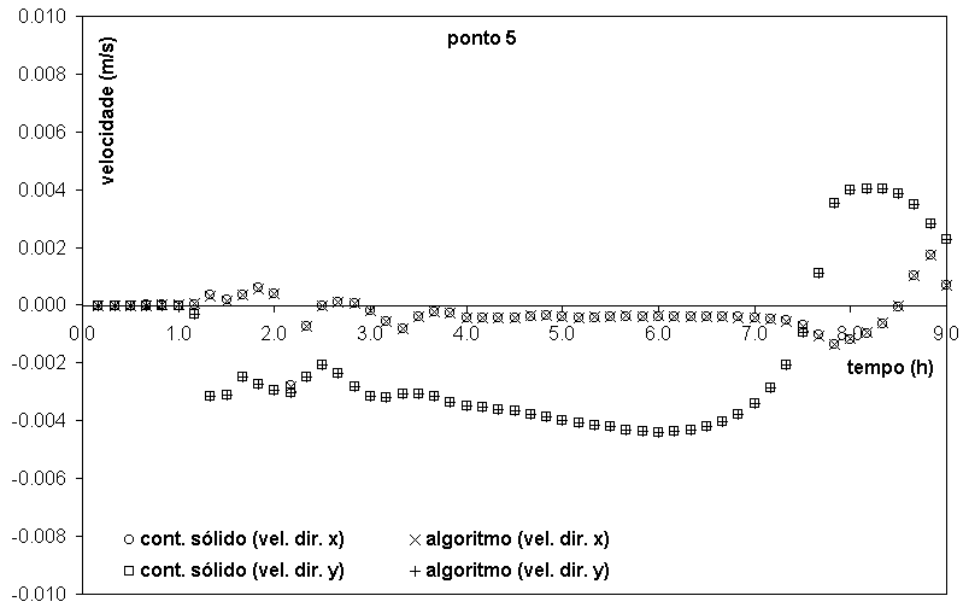


Figura 4.9. Componentes da velocidade do escoamento no ponto 5 do canal, para as simulações com contorno sólido ao redor da região elevada e com o algoritmo de secagem/inundação.

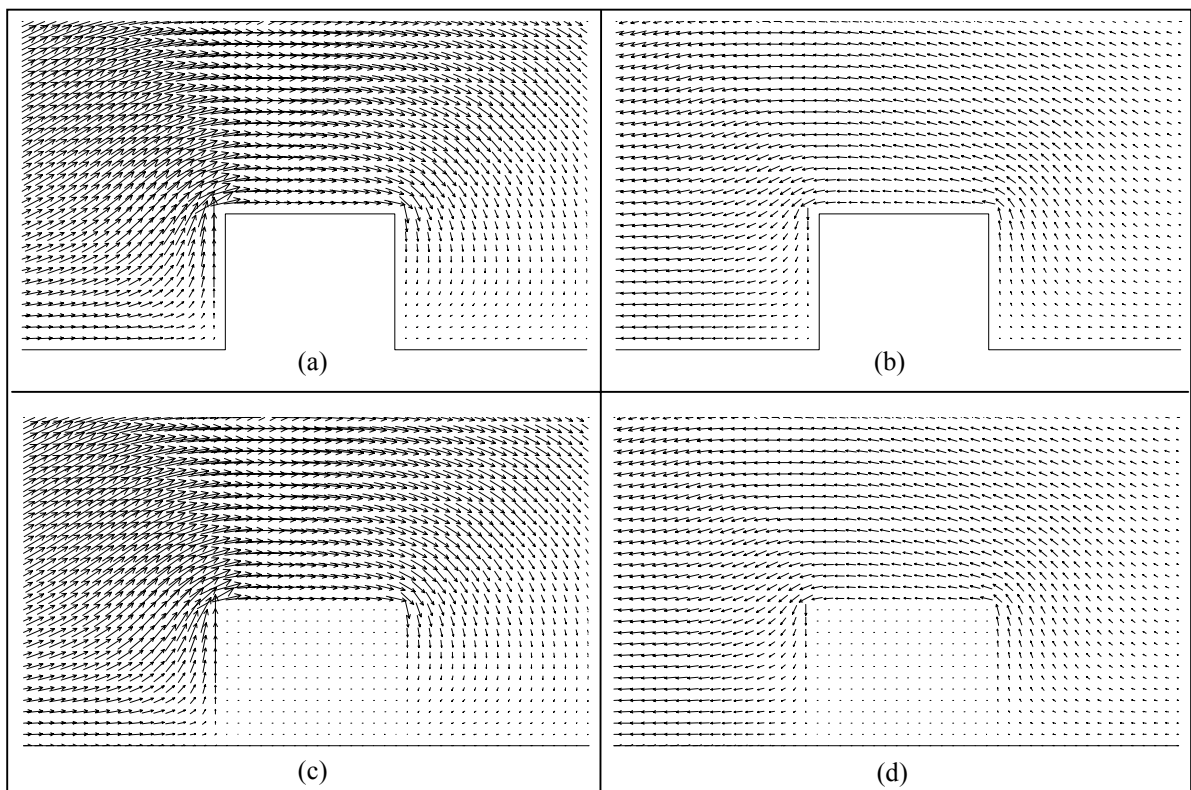


Figura 4.10. Campos de velocidades no canal fictício, durante teste do algoritmo de secagem/inundação (detalhe em torno da área elevada). Em cima: canal de contorno fechado ao redor da área elevada, para $t = 5,4\text{h}$ (a) e $t = 7,9\text{h}$ (b). Embaixo: canal com contorno original, para $t = 5,4\text{h}$ (c) e $t = 7,9\text{h}$ (d).

5 PREPARAÇÃO DOS DADOS E SIMULAÇÕES PRELIMINARES

5.1 INTRODUÇÃO

De forma geral, na aplicação de um modelo hidrodinâmico 2DH, várias informações são necessárias para suprir o modelo, como o contorno e a topografia do fundo do terreno de toda a região simulada e dados relativos às condições de contorno, além da definição dos parâmetros como os coeficientes de viscosidade turbulenta, de rugosidade e arrasto do vento. Neste capítulo, apresenta-se a forma com que tais informações foram trabalhadas e inseridas no modelo IPH-A, comentando alguns procedimentos específicos adotados, face às particularidades do sistema modelado, como a presença de lagoas e canais internos ao banhado ou a grande ocorrência de vegetação, por exemplo.

Algumas simulações iniciais do banhado do Taim também são apresentadas neste capítulo: (i) análise do refinamento da malha numérica, (ii) verificação do funcionamento do modelo IPH-A após a implementação do algoritmo de secagem/inundação, no próprio banhado, e (iii) análise da sensibilidade dos parâmetros do IPH-A. Tais simulações foram consideradas preliminares por servirem apenas como embasamento e suporte para as simulações apresentadas no capítulo 6, sem efetivamente contribuir para a análise do padrão de circulação da água no banhado do Taim.

5.2 DELIMITAÇÃO DOS CONTORNOS

Uma dificuldade inicial na pesquisa foi a indefinição do contorno que delimita o banhado do Taim, bem como da localização de elementos internos característicos, como as lagoas Nicola e Jacaré e os canais da Sarita e do Jacaré, devido à escassez de informações disponíveis. Esse problema foi contornado com a obtenção de imagens de satélite de várias datas (tabela 5.1), as quais possibilitaram a clara identificação de cada entidade constituinte do banhado e sobre as quais foram digitalizados os contornos delimitadores correspondentes. Empregando um programa específico de geoprocessamento, converteu-se para o sistema UTM-22S as imagens obtidas da *Earth Science Data Interface* (ESDI, 2002), originalmente no sistema UTM-22N, e, a partir da primeira delas, fez-se o georreferenciamento da terceira imagem disponível, tomando um conjunto de pontos característicos em comum e

espacialmente distribuídos, seguindo procedimento recomendado por Mendes e Cirilo (2001).

Tabela 5.1. Características das imagens de satélite da região do Taim utilizadas na pesquisa.

Imagem	Data de aquisição	Satélite/sensor	Bandas espectrais	Resolução (m)	Sistema de referência e projeção	Fonte
1	06/jul/87	LANDSAT5 - TM	1 a 7	30	WGS 84, UTM-22N	ESDI ⁽¹⁾
2	04/mar/97	LANDSAT5 - TM	3, 4, 5	30	-	IPH ⁽²⁾
3	18/ago/00	LANDSAT7 - ETM+	1 a 7 e pan-cromática	30	WGS 84, UTM-22N	ESDI ⁽¹⁾

⁽¹⁾ *Earth Science Data Interface* (ESDI, 2002).

⁽²⁾ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS.

Para cada imagem, gerou-se uma composição colorida tipo RGB, sendo as bandas espectrais 5, 4 e 3 usadas para as cores vermelho, verde e azul, respectivamente (Mendes e Cirilo, 2001). Na figura 5.1, são apresentadas as composições coloridas de cada imagem, cujos limites foram restritos à área do banhado do Taim, de modo a visualizá-lo com mais detalhes. Segundo Crósta (1992), composições a cores de conjuntos de três bandas constituem uma poderosa forma de sintetizar uma grande quantidade de informação em uma única imagem, ao mesmo tempo em que representam essa informação em diferentes cores, facilitando sua interpretação.

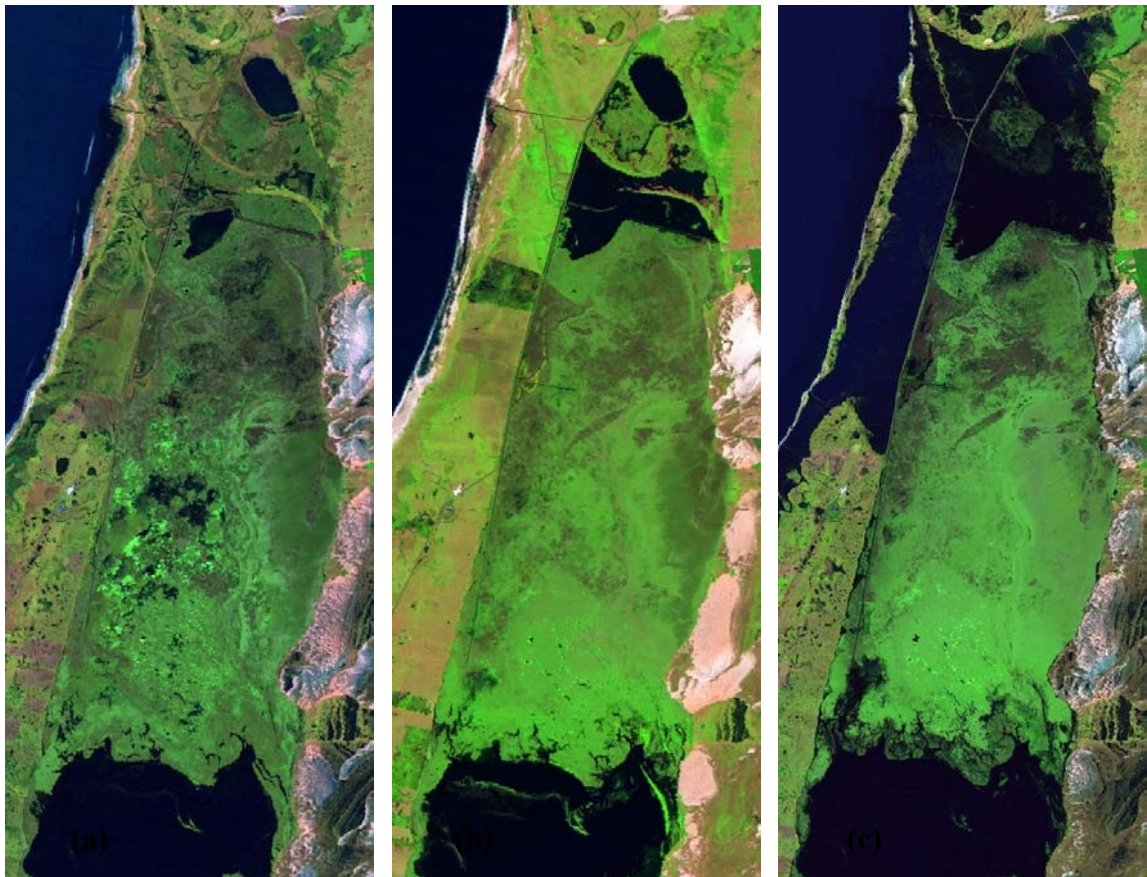


Figura 5.1. Composições coloridas RGB de imagens de satélite do banhado do Taim, de diferentes datas: (a) 06/jul/1987-imagem 1; (b) 04/mar/1997-imagem 2; (c) 18/ago/2000-imagem 3.

Como as imagens são referentes a épocas bem distintas entre si, observa-se a variação do nível da água no banhado do Taim ao longo do tempo, evidenciada pelas lagoas Nicola e Jacaré. Os contornos de tais lagoas são identificados mais claramente na imagem mais antiga (imagem 1), onde o nível se encontra mais baixo e a vegetação ocupa toda a região ao redor. Por isso, escolheu-se tal imagem para delimitar os contornos do banhado e dos elementos internos e extrair demais informações em termos de coordenadas (figura 5.2).

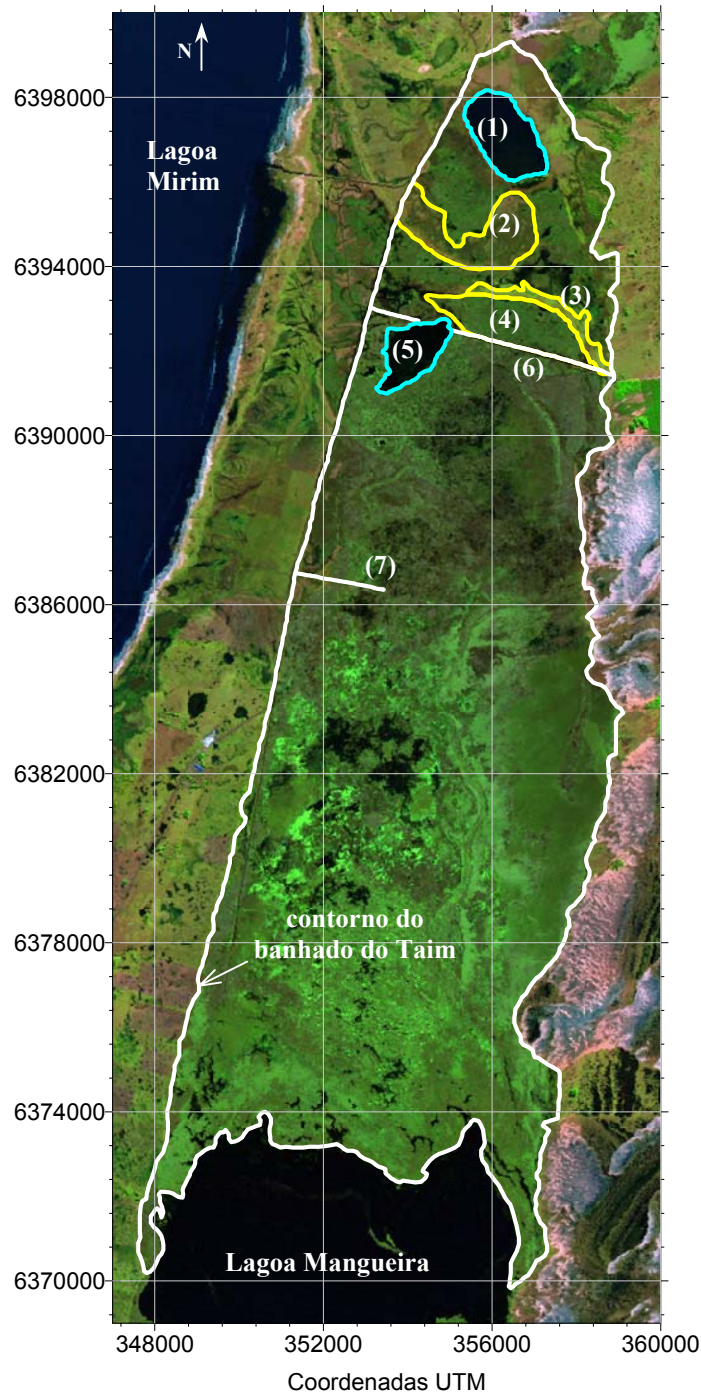


Figura 5.2. Delimitação do contorno do banhado do Taim e dos elementos internos sobre composição colorida da imagem de satélite 1 (WGS 84, UTM-22S), onde: (1) Lagoa Nicola; (2) região A; (3) região B; (4) região C; (5) Lagoa Jacaré; (6) canal do Jacaré; (7) canal da Sarita.

Através da comparação entre as três imagens de satélite e de acordo com a delimitação das celas de simulação de Villanueva (1997), foram identificadas três regiões que apresentam características particulares e diferem das áreas vizinhas, as quais foram denominadas de regiões A, B e C (figura 5.2). Essas regiões receberam um tratamento especial quanto à topografia, o que será comentado adiante, no item 5.4 deste texto.

Para a lagoa Mangueira, dispunha-se de um contorno em coordenadas UTM de um levantamento realizado pelo IPH (Beltrame et al., 1998), mas que, superposto à imagem de satélite, apresenta algumas diferenças em relação a esta, principalmente na região norte, na interface com o banhado do Taim. Como os dados batimétricos da lagoa provêm do mesmo levantamento (Beltrame et al., 1998) e as diferenças são muito pequenas, preferiu-se manter o referido contorno, alterando-se, apenas, a região de interface com o banhado, que foi digitalizada a partir da imagem de satélite (figura 5.3). Além disso, através da técnica de realçamento aplicada à banda 3, cujo intervalo de comprimento de onda provoca maior reflectância do solo (Mendes e Cirilo, 2001), observam-se alguns detalhes das margens da lagoa não constatados com a composição colorida, mas que são coerentes com o contorno obtido em Beltrame et al. (1998), como ocorre para os pontais em detalhe na figura 5.3, por exemplo.

5.3 TRAÇADO DO CONTORNO NO MODELO IPH-A

Os contornos do banhado do Taim e da lagoa Mangueira em coordenadas UTM serviram como entrada para o programa INICIAL, que compõe o modelo IPH-A, através do qual foi traçado o contorno modelado, ou seja, o contorno em termos de malha numérica, em função do espaçamento adotado para a mesma. Durante esse processo, observou-se uma limitação computacional decorrente do excesso de elementos internos ao contorno, agravada com a inclusão do algoritmo de secagem/inundação e a conseqüente declaração de novas variáveis.

No traçado do contorno, os canais da Sarita e do Jacaré foram considerados como condição de contorno fechada, por apresentarem albardões nas margens, decorrentes da própria escavação, os quais constituem um impedimento ao fluxo transversal e funcionam como fronteiras sólidas (Villanueva, 2002). Devido ao canal que segue paralelo à estrada BR-471, os contornos fechados sobre os canais da Sarita e do Jacaré não foram traçados até o encontro com o limite oeste do banhado, mas até a distância de uma quadrícula da malha desse limite.

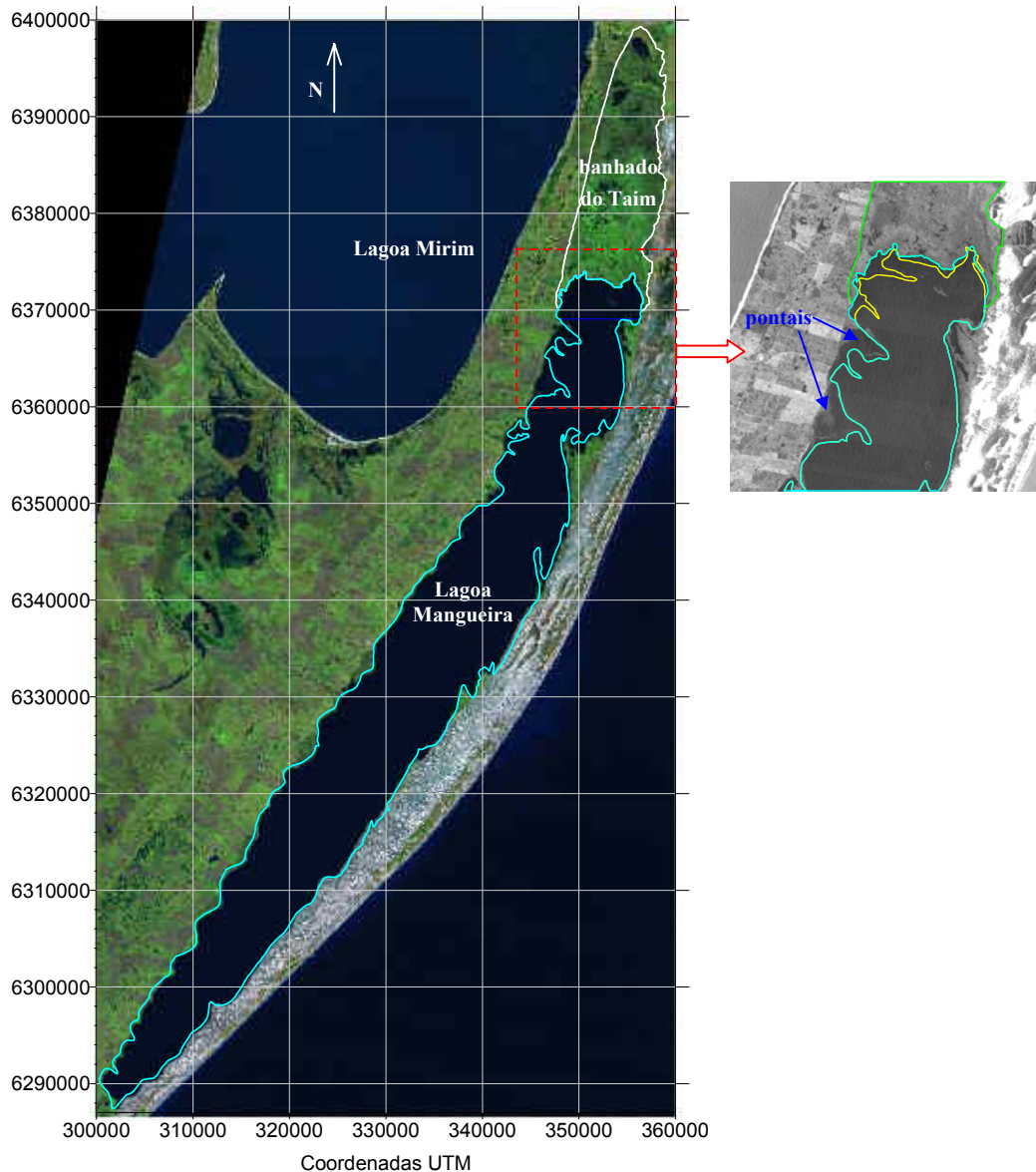


Figura 5.3. Delimitação do contorno da Lagoa Mangueira sobre composição colorida RGB da imagem de satélite 1 (WGS 84, UTM-22S). Em detalhe, tem-se a região da interface com o Taim, mostrando o contorno da lagoa obtido de Beltrame et al. (1998) (em amarelo) e o adotado neste estudo (em azul), além de alguns pontais.

Para a simulação do banhado do Taim isolado, considerando a lagoa Mangueira como condição de contorno, o espaçamento adotado para a malha de cálculo foi de 180 m. Dois contornos foram usados: um que delimita todo o banhado e outro que agrega a este uma porção norte da Lagoa Mangueira (figura 5.4), com o intuito de fazer a imposição de níveis como condição de contorno sobre a lagoa, e não diretamente sobre o banhado, como no primeiro caso. Nos dois contornos, a malha foi constituída por 72 linhas e 172 colunas, com um total de 12384 elementos, sendo 6225 elementos internos para o primeiro contorno e 6916 para o segundo.

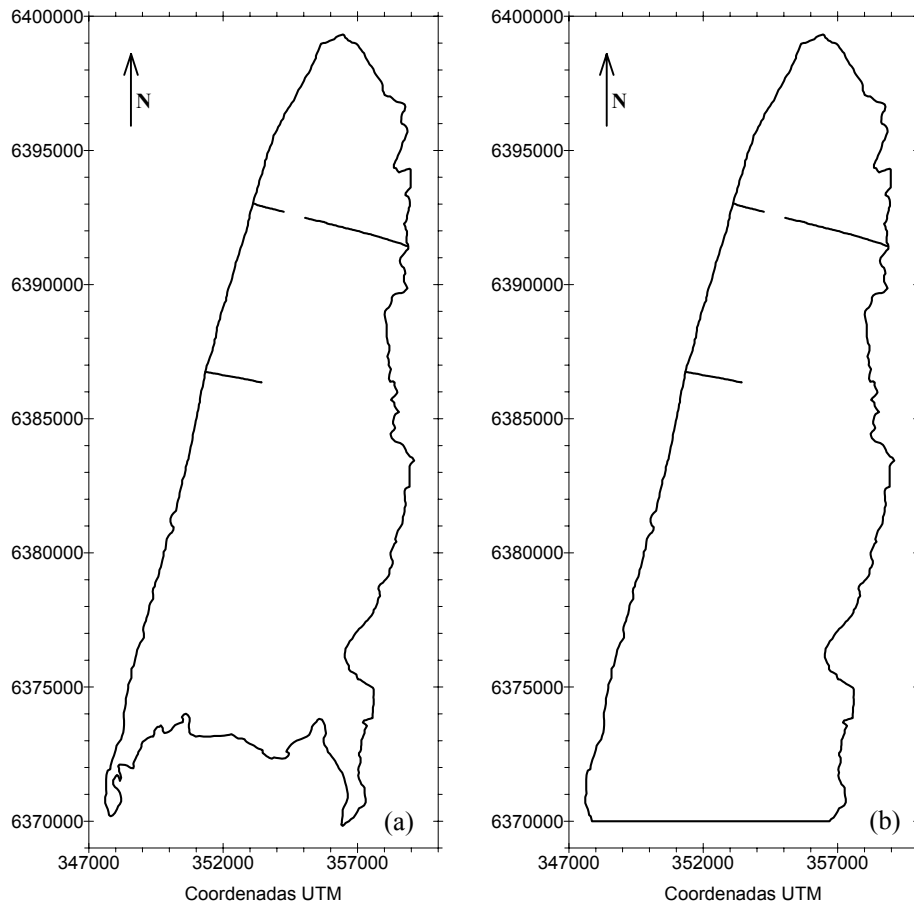


Figura 5.4. Contornos do banhado do Taim adotados em algumas simulações: (a) o contorno coincide com a delimitação do banhado; (b) o contorno engloba parte norte da lagoa Mangueira.

No caso da simulação do banhado do Taim em conjunto com a lagoa Mangueira, não foi possível usar o espaçamento de 180 m para a malha de cálculo, uma vez que o número de elementos excedeu o limite do modelo. Após várias tentativas, o menor espaçamento suportado foi 360 m, alcançado através da rotação de coordenadas, que reduziu significativamente as dimensões das matrizes de elementos, como ilustrado na figura 5.5.

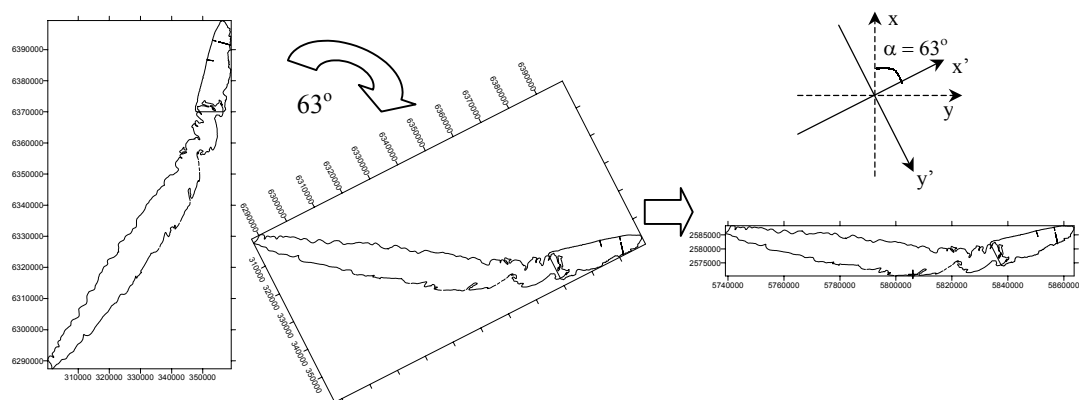


Figura 5.5. Rotação de coordenadas do contorno do sistema Mangueira-Taim.

Definiu-se um ângulo de rotação de 63° (sentido horário), em função da posição da lagoa e do banhado, o qual proporcionou o menor número de elementos totais da malha numérica. A equação de rotação de coordenadas é dada por:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

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 5.5).

A figura 5.6 ilustra o sistema Mangueira-Taim rotacionado, cuja malha de cálculo com espaçamento de 360 m foi constituída por 52 linhas, 348 colunas e um total de 18096 elementos, sendo 12609 elementos internos. Apenas para ilustrar a otimização dos recursos computacionais alcançada com a rotação de coordenadas, pode-se mencionar que o traçado do contorno do sistema na posição original, com um espaçamento de 480 m, resultaria em uma matriz de 236 linhas, 125 colunas e 29500 elementos, onde somente 5004 seriam internos.

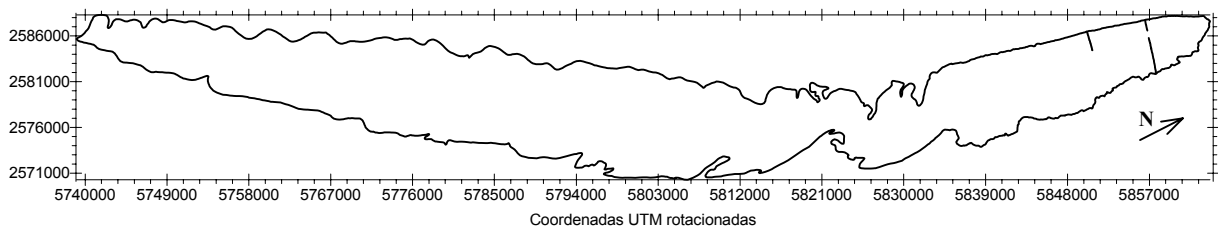


Figura 5.6. Contorno do sistema Mangueira-Taim rotacionado de 63° (sentido horário).

5.4 MODELO NUMÉRICO DO TERRENO

O banhado do Taim é uma região bastante plana e de difícil levantamento batimétrico, face à grande presença de macrófitas aquáticas emergentes, de modo que os poucos dados disponíveis são de qualidade duvidosa. Vários Modelos Numéricos do Terreno (MNT) foram gerados, com a exclusão e inclusão dos pontos disponíveis, até se obter uma configuração coerente com o conhecimento mínimo da topografia daquela região (Villanueva, 2002). Isso foi alcançado adotando-se as cotas empregadas por Villanueva (1997) para as zonas de interface entre as celas do seu modelo, cujos pontos correspondentes são apresentados na figura 5.7. O MNT foi gerado utilizando o método geoestatístico da krigagem, sendo as curvas de nível resultantes mostradas na mesma figura, ressaltando que, neste trabalho, todas as cotas têm como sistema de referência o Serviço Geográfico do Exército (SGE).

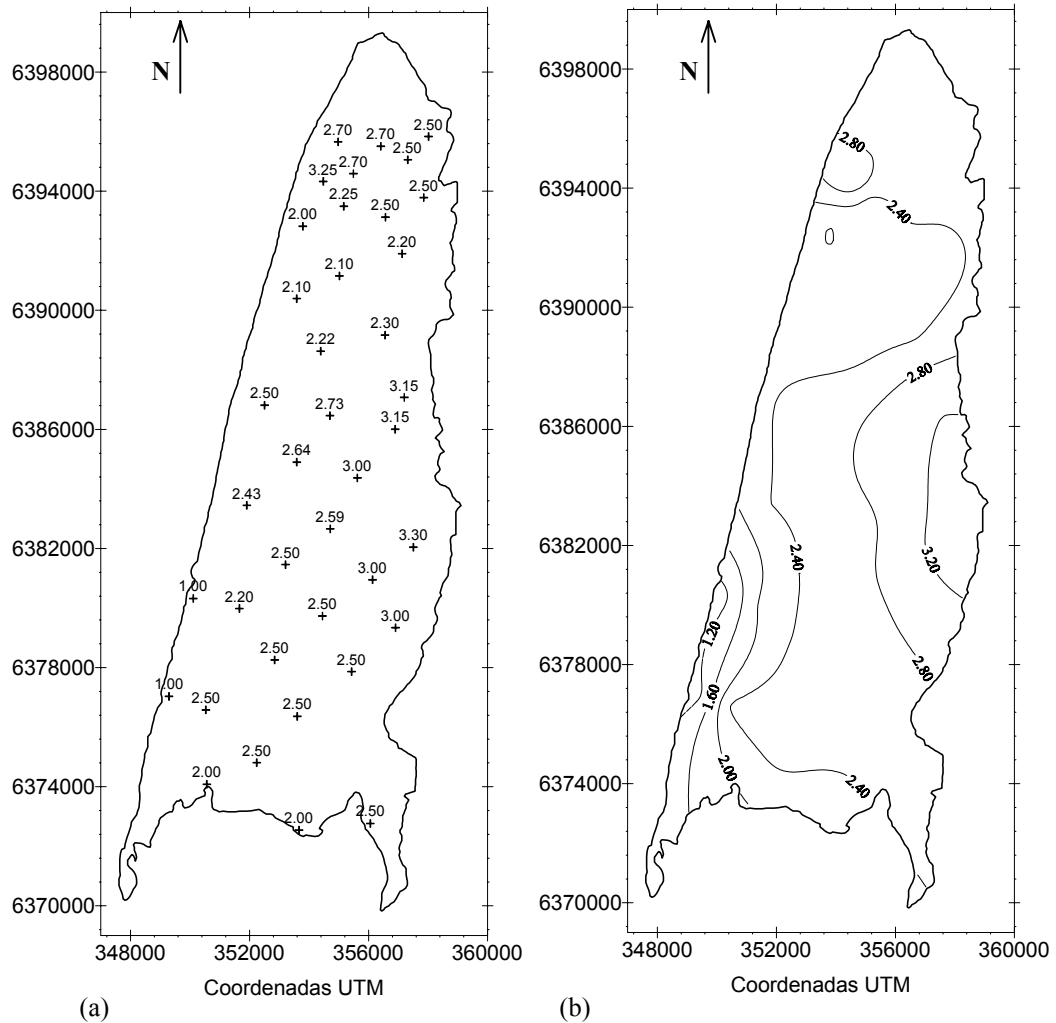


Figura 5.7. (a) Pontos utilizados para geração do MNT do banhado do Taim e (b) curvas de nível resultantes (valores de cota em metros, referidos ao nível do mar - SGE).

As lagoas internas do banhado (Nicola e Jacaré) apresentam levantamento batimétrico próprio, disponível no IPH, com uma boa densidade de pontos, os quais não foram utilizados em conjunto com os demais pontos do banhado. Para cada lagoa, gerou-se um MNT específico (figura 5.8), também usando a krigagem, baseado no levantamento correspondente, o qual foi superposto ao MNT do banhado seguindo metodologia descrita adiante. O mesmo procedimento foi adotado para a lagoa Mangueira, a partir do levantamento batimétrico disponível no IPH, sendo as curvas de nível resultantes mostradas na figura 5.9.

As regiões A, B e C – identificadas como áreas distintas das vizinhas (figura 5.2) – foram consideradas com cotas constantes de valor igual a 3,0 m, 3,5 m e 2,4 m, respectivamente, a partir de estimativa com base nas imagens de satélite e em informações de Villanueva (2002).

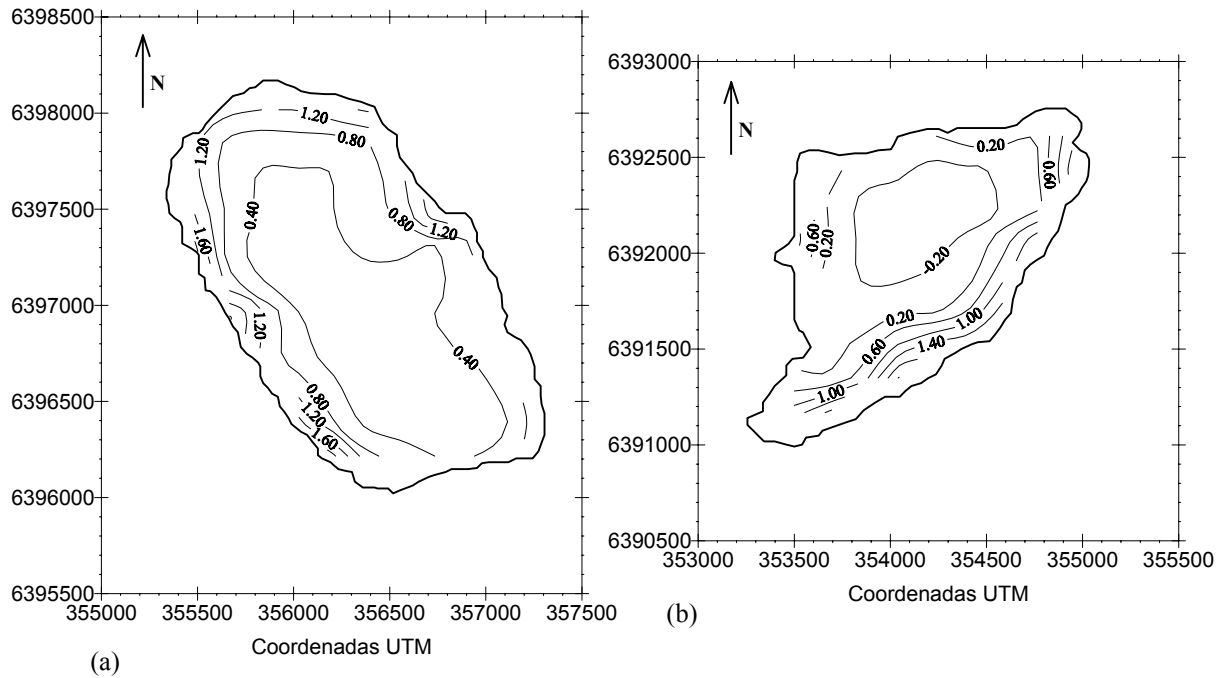


Figura 5.8. Curvas de nível das lagoas Nicola (a) e Jacaré (b), com valores em metros, referidos ao nível do mar (SGE).

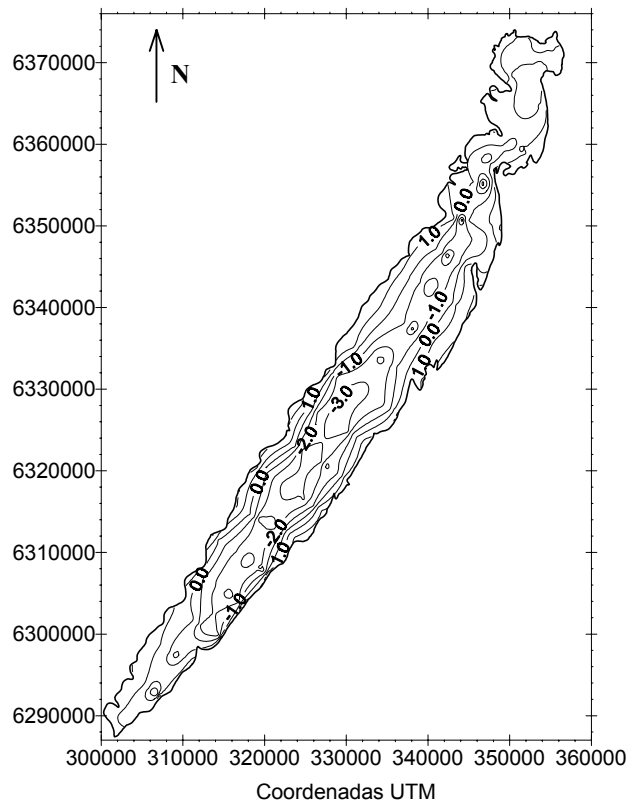


Figura 5.9. Curvas de nível da Lagoa Mangueira (cotas em metros, relativas ao nível do mar - SGE).

Os modelos numéricos do terreno de cada região específica (banhado, lagoas Nicola, Jacaré e Mangueira) foram gerados de forma independente e superpostos ao final (figura 5.10). Esse procedimento permitiu tratar, isoladamente, as informações de cada área e

fazer com que as lagoas internas do banhado fossem representadas realmente como lagoas, no MNT final, identificando claramente as bordas correspondentes. 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 adequadamente.

Os contornos de cada região foram utilizados como máscaras para delimitar a zona válida de cada MNT e, através do desenvolvimento de uma rotina computacional, fez-se a superposição dos modelos numéricos do terreno, gerando-se uma matriz com as mesmas dimensões da malha numérica de cálculo do modelo IPH-A. Na mesma rotina, procede-se ao “corte do terreno” (ver item 4.3.2.2), a partir da matriz anterior, gerando uma matriz com “cotas cortadas” do terreno, requisitado pelo algoritmo de secagem/inundação inserido no modelo, conforme comentado no capítulo 4, item 4.3.2.

A interface entre o banhado do Taim e a Lagoa Mangueira constitui uma região de pouquíssimas informações, apesar da importância no que diz respeito à interação entre os dois sistemas. Os perfis topográficos indicados em planta na figura 5.11 e traçados na figura 5.12 dão uma idéia de como a topografia da região em questão foi representada no modelo hidrodinâmico: o fundo da lagoa se eleva a medida que se aproxima do banhado, que, por sua vez, está situado em uma cota acima do fundo da lagoa, havendo um desnível na transição entre os dois sistemas de cerca 40 cm, considerado pequeno, relativamente ao tamanho dos elementos da malha numérica (180 m).

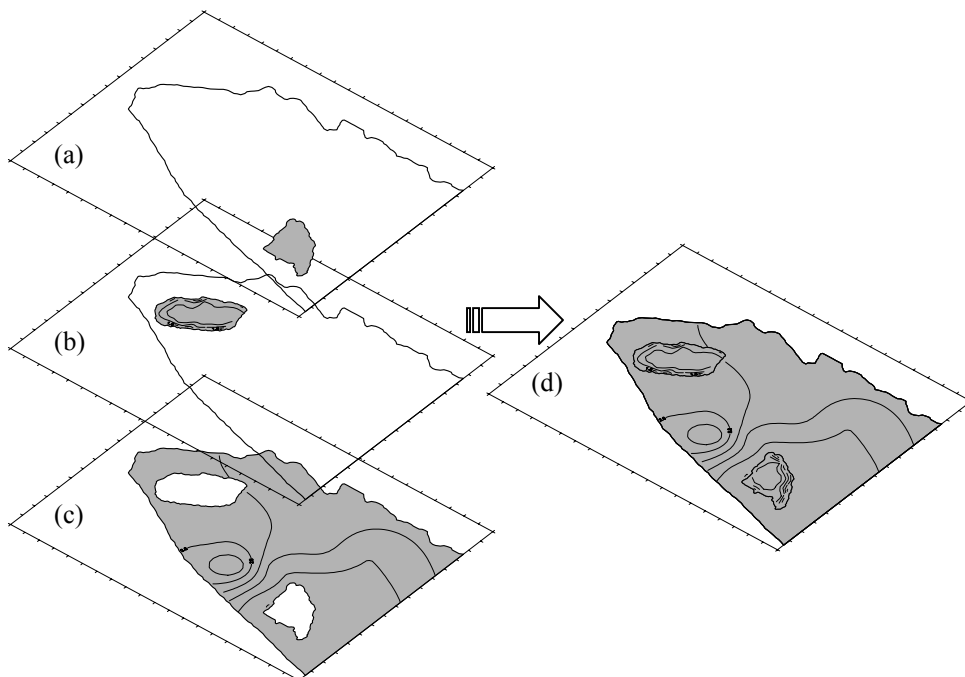


Figura 5.10. Exemplo de superposição dos MNT para compor as matrizes de batimetria e de cotas do fundo: (a) MNT da lagoa Jacaré; (b) MNT da lagoa Nicola; (c) MNT do banhado do Taim; (d) composição dos vários MNT.

No mesmo programa de superposição dos MNT, adaptou-se uma rotina para atribuir valores específicos aos coeficientes de rugosidade e redutor da ação do vento para cada região (banhado do Taim, lagoa Nicola, lagoa Jacaré, lagoa Mangueira e regiões A, B e C), gerando-se as matrizes correspondentes para entrada no modelo IPH-A.

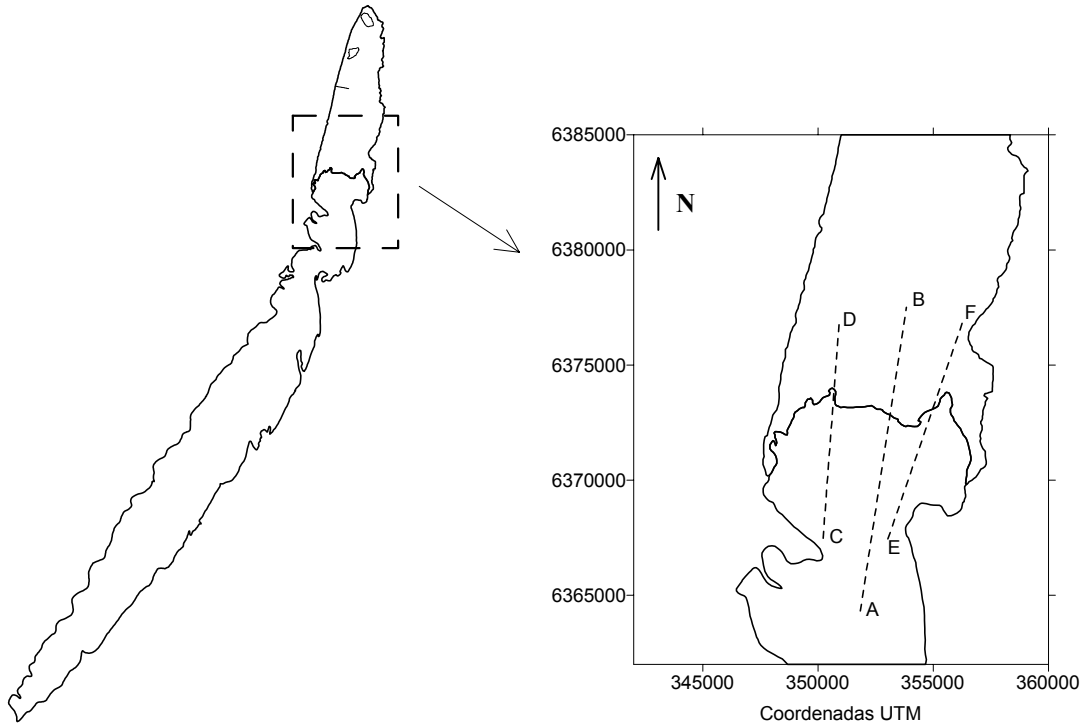


Figura 5.11. Localização dos perfis longitudinais da interface entre a lagoa Mangueira e o banhado do Taim.

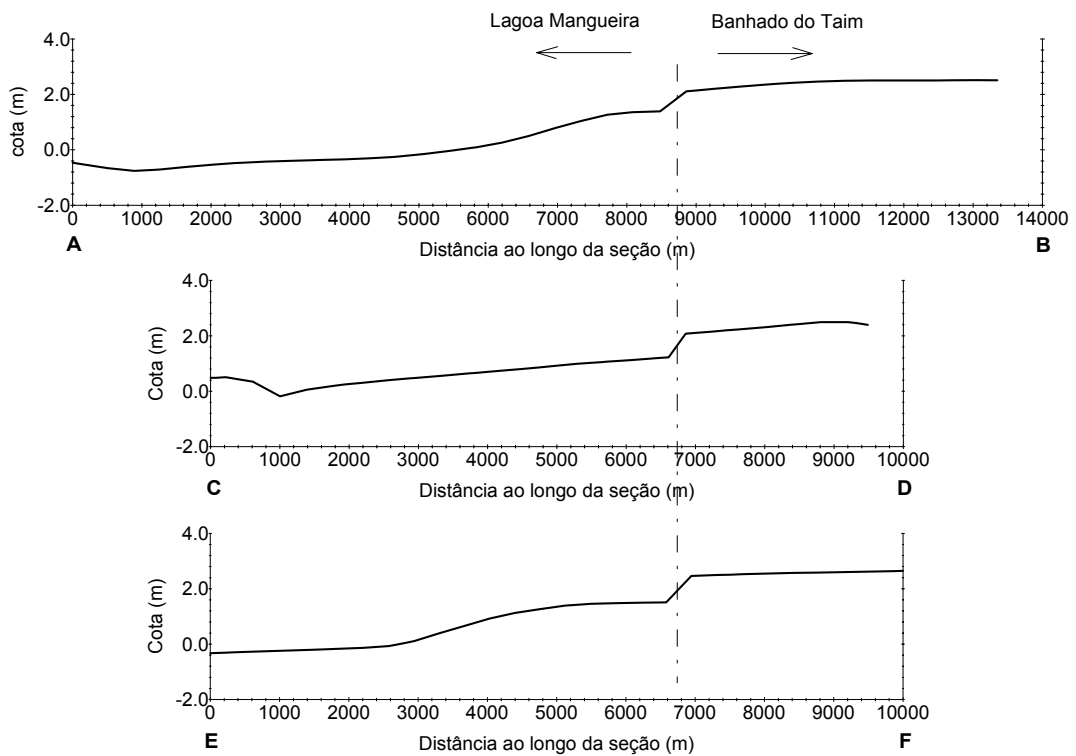


Figura 5.12. Perfis topográficos longitudinais da interface entre o banhado do Taim e a lagoa Mangueira.

5.5 DADOS DE NÍVEL DE ÁGUA

Na região do banhado do Taim, apesar da existência de algumas réguas limnimétricas e linígrafos, conforme apresentado na figura 5.13, poucos dados de nível d'água estavam disponíveis e apresentaram condições de serem aproveitados nesta pesquisa, por uma série de fatores: incerteza quanto à cota de referência; interrupção na operação e leitura dos dados; discretização temporal dos dados das réguas limnimétricas (12 h) muito superior ao intervalo de tempo de simulação (30 s ou 60 s).

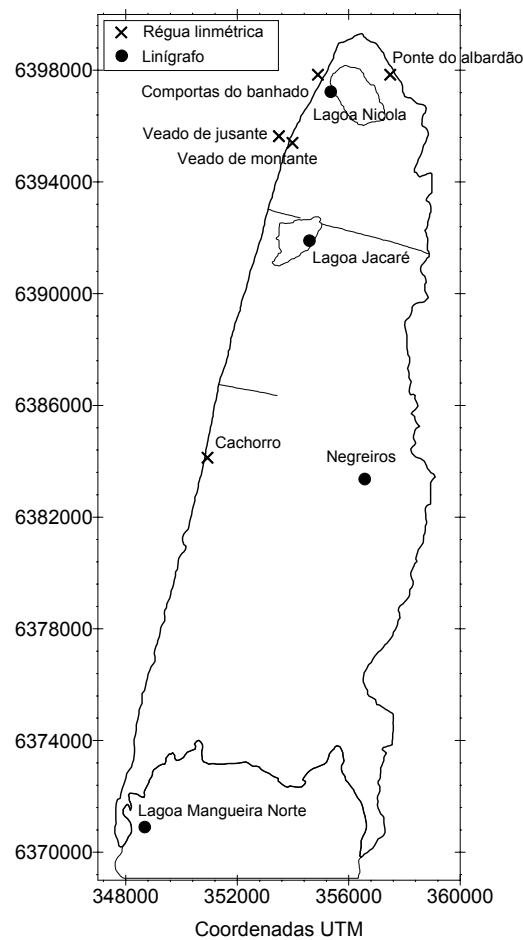


Figura 5.13. Localização das réguas limnimétricas e dos linígrafos da região do banhado do Taim.

Os dados de nível efetivamente utilizados neste estudo são referentes ao linígrafo localizado na parte norte da Lagoa Mangueira, cujo período disponível está compreendido entre 19/12/2001 e 06/08/2002, com um intervalo de amostragem de 15 minutos. Cabe ressaltar a incerteza quanto à cota de referência de tais dados, o que não impediu de utilizar o padrão de variação como condição de contorno em algumas simulações do banhado do Taim, fixando o referencial em determinadas cotas, conforme a situação analisada.

A análise dos níveis d'água históricos no banhado do Taim, registrados nas réguas limnimétricas, e dos resultados das simulações de Villanueva (2000) possibilitou a definição de três níveis principais: nível “baixo” (cota = 2,40 m), nível “médio” (cota = 2,90 m) e nível “alto” (cota = 3,40 m). Tais níveis caracterizam três situações bem distintas quanto ao comportamento hidrológico do banhado do Taim e foram utilizados como referência na definição das condições inicial e de contorno, durante as simulações. A figura 5.14 apresenta os resultados das simulações de Villanueva (1997), com a variação do nível da água no Taim entre 1960 e 1996, considerando um cenário que procurou caracterizar a situação ocorrida na época.

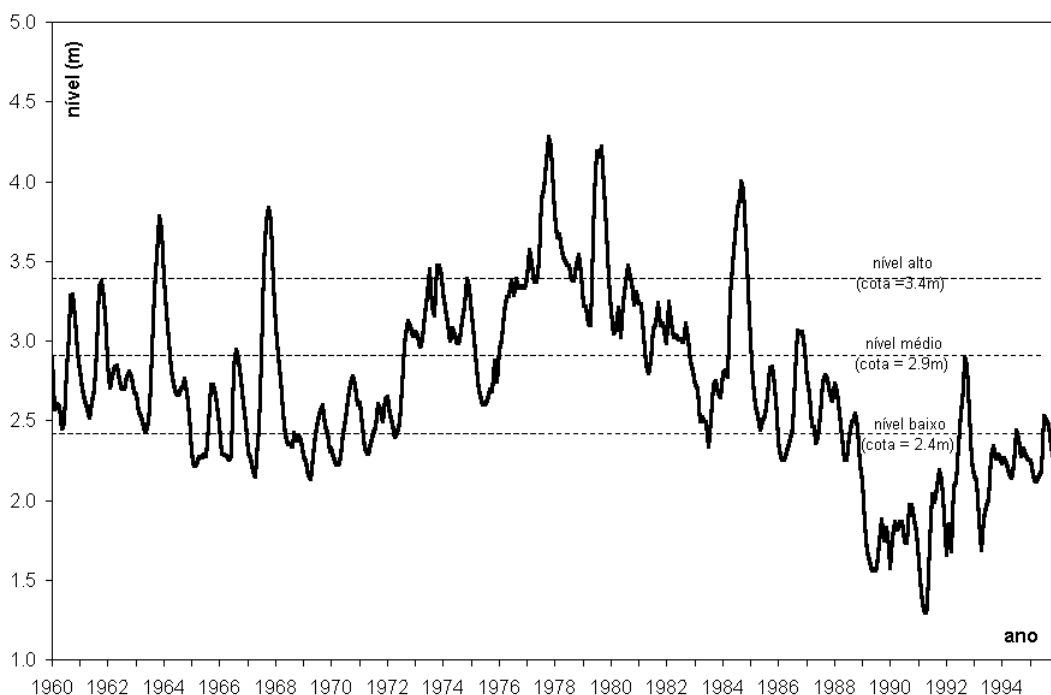


Figura 5.14. Variação do nível da água no banhado do Taim, resultante das simulações de Villanueva (1997).
(Fonte: adaptado de Villanueva, 1997).

Na figura 5.15, são apresentadas as regiões do banhado do Taim consideradas secas ou não, para cada um dos três níveis de água selecionados, em função da composição do MNT descrita no item 5.4. Pode-se observar como tais níveis representam situações bem distintas quanto à área disponível para o escoamento. Para o nível baixo, grande parte do banhado é considerado seco, enquanto que, para o nível médio, apenas uma porção leste central, além das regiões A e B, são dadas como secas. Com um nível d'água alto, somente a região identificada como C tem as cotas acima da superfície da água.

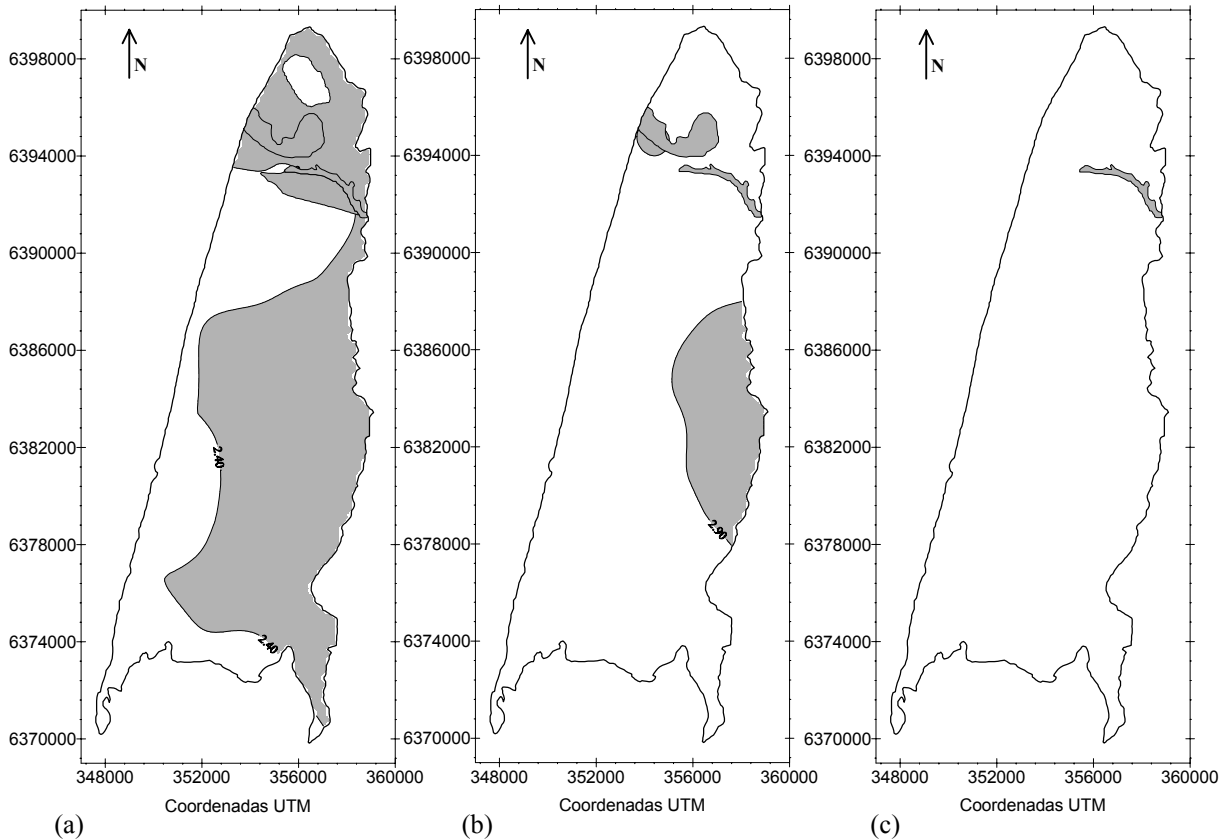


Figura 5.15. Indicação das áreas consideradas secas (em cinza), para os três níveis de água característicos do banhado do Taim: (a) nível baixo (cota 2,40 m); (b) nível médio (cota 2,90 m); (c) nível alto (cota 3,40 m).

5.6 DADOS DE VENTO

Os dados de vento utilizados nesta pesquisa são do posto Negreiros, localizado dentro do banhado do Taim (figura 5.13), relativos ao período compreendido entre março e dezembro de 2001. Tais dados são referentes à velocidade média e máxima (pico) do vento a cada intervalo de 30 minutos, além da direção média, que é discretizada em 16 sentidos, referentes aos pontos cardeais, colaterais e sub-colaterais.

Observou-se que a velocidade média (de 30min) do vento apresentou o valor máximo de 43,6 km/h, velocidade mínima de zero e, como valor médio, a velocidade de 10,9 km/h. Para a velocidade de pico, a máxima observada foi de 80,6 km/h, a média de 19,9 km/h e a mínima de 1,4 km/h. Quanto à direção média (de 30 min), há uma predominância de ventos originários do 1º quadrante (N, NNE, NE, ENE e E), com 48,8% da frequência total, ou do 3º quadrante (O, OSO, SO, SSO e S), com 30,1%. A tabela 5.2 apresenta a frequência de ocorrência dos ventos para cada direção, relativa ao período dos dados disponíveis (valores médios de 30 min), o que é melhor visualizado através da figura

5.16. Tal figura mostra como a maior incidência de vento ocorre quase alinhado com a orientação do sistema Mangueira-Taim.

O vento foi classificado em três categorias: fracos (velocidade < 10km/h), moderados (10 < vel. < 20km/h) e fortes (vel. > 20km/h). Apesar dos limites que definem as classes serem relativamente baixos, apenas 34,2% dos ventos foram agrupados como moderados e 12,1% como fortes, sendo considerados fracos mais da metade dos ventos (53,7%), o que justifica a escolha de tais limites. Para cada direção, a frequência observada da ocorrência dos ventos, agrupados nas três classes, é mostrada também na tabela 5.2 e na figura 5.16.

A grande predominância de ventos ao longo do eixo NE-SO levou à caracterização de dois tipos de ventos a serem adotados nas simulações, um para cada sentido do referido eixo: enquanto um atua contribuindo para o fluxo no sentido da lagoa Mangueira para o banhado do Taim (vento em torno da direção SO), o segundo tipo tem o efeito inverso (vento NE). Para simular com condições de vento variáveis no tempo, foram identificados e selecionados, a partir dos dados disponíveis, dois períodos contínuos de dados, nos quais a direção do vento oscilou em torno de uma das direções predominantes, conforme apresentado nas figuras 5.17 e 5.18.

Tabela 5.2. Distribuição da frequência de ocorrência dos ventos⁽¹⁾.

Direção de origem		Freq. por direção ⁽³⁾ (%)	Freq. por intensidade (%) ⁽⁴⁾		
graus ⁽²⁾	símbolo		fraco	moderado	forte
0	N	7.6	70.5	26.9	2.6
22.5	NNE	9.1	62.6	33.4	4.1
45	NE	11.5	56.8	36.0	7.2
67.5	ENE	10.8	55.0	25.9	19.1
90	E	9.8	54.5	29.0	16.5
112.5	ESE	6.6	47.3	44.1	8.6
135	SE	3.5	65.3	30.2	4.4
157.5	SSE	4.0	57.6	35.7	6.7
180	S	5.7	62.7	28.3	9.0
202.5	SSO	6.2	45.9	37.2	16.9
225	SO	4.3	48.2	34.4	17.4
247.5	OSO	7.6	33.1	47.0	19.9
270	O	6.3	34.6	43.9	21.5
292.5	ONO	3.2	50.2	39.1	10.7
315	NO	2.2	61.5	19.9	18.6
337.5	NNO	1.6	63.1	33.3	3.6
todas		100.0	53.7	34.2	12.1

⁽¹⁾ Relativo aos dados médios de 30min.

⁽²⁾ Medido em relação à direção Norte, sentido horário.

⁽³⁾ Total do tempo em que o vento teve origem em cada uma das direções.

⁽⁴⁾ Para cada direção, total do tempo em que o vento foi fraco, moderado ou forte.

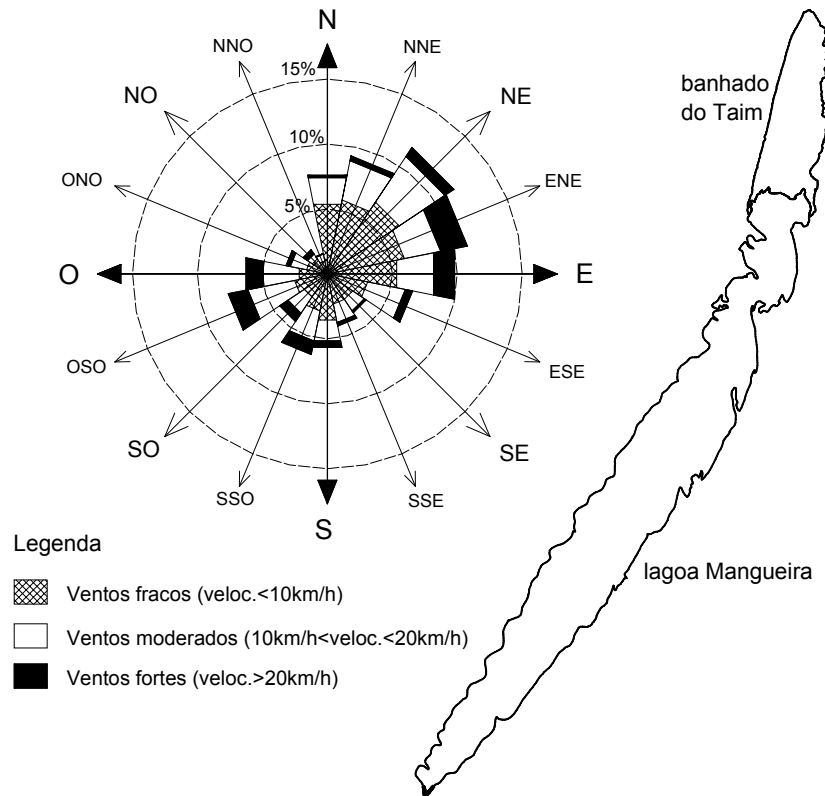


Figura 5.16. Rosa dos ventos com distribuição de frequência dos ventos, agrupado em 3 classes (o tamanho do triângulo indica a porcentagem do tempo em que o vento teve origem na direção correspondente; para cada direção, a porcentagem do tempo em que o vento foi fraco, moderado ou forte é indicada pela subdivisão do triângulo, conforme legenda).

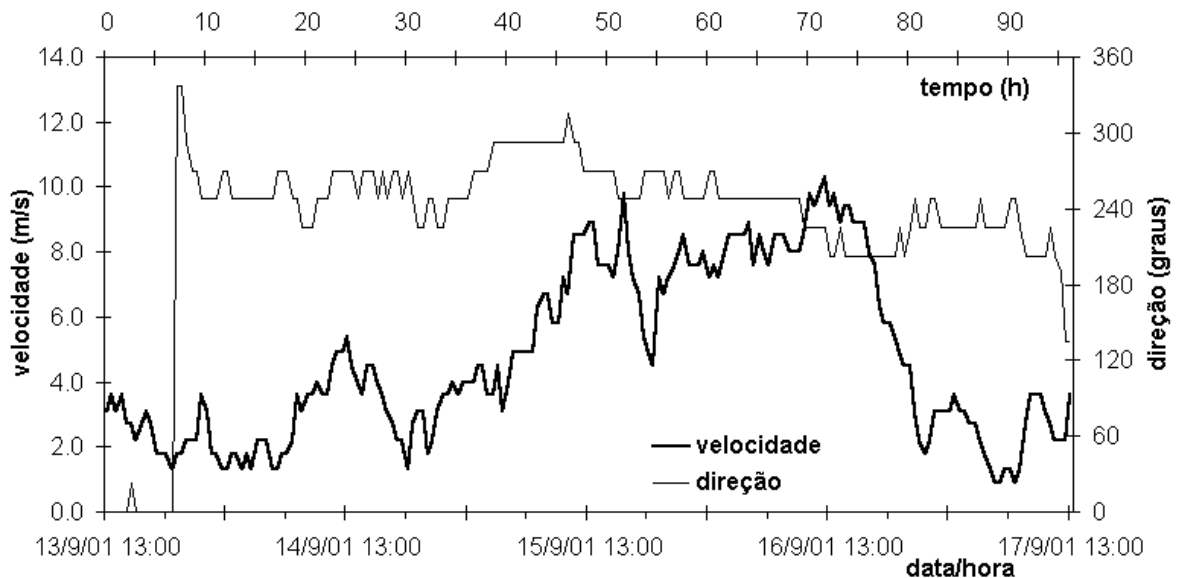


Figura 5.17. Período de 4 dias de ventos com direção em torno de SO, extraído da série de dados do posto Negreiros.

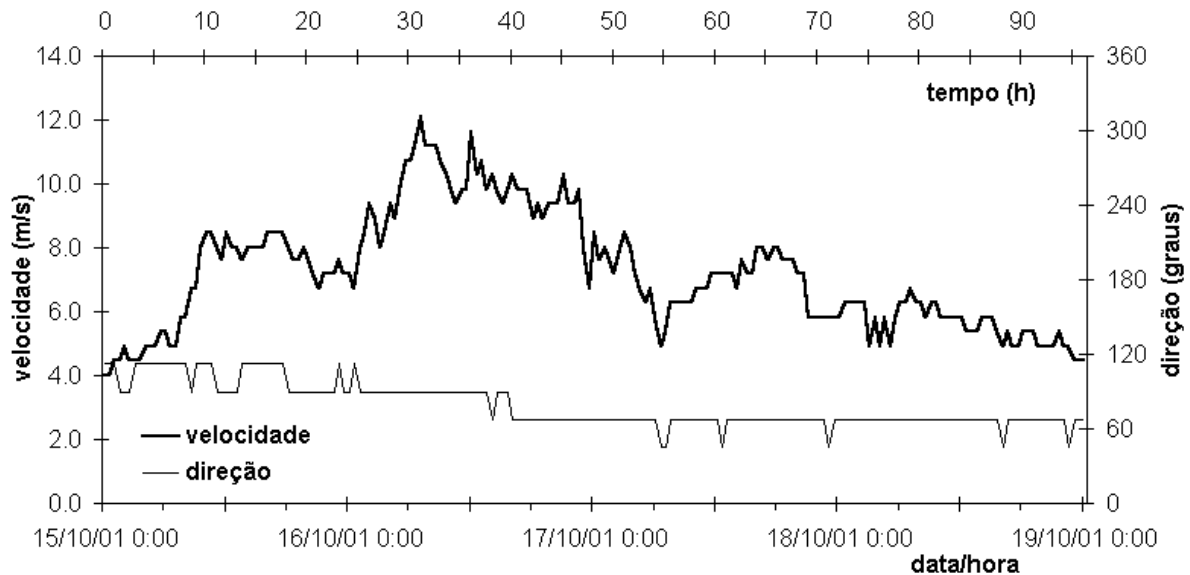


Figura 5.18. Período de 4 dias de ventos com direção em torno de NE, extraído da série de dados do posto Negreiros.

5.7 ANÁLISE DO REFINAMENTO DA MALHA DE CÁLCULO

Conforme comentado no item 5.3, para simular apenas o banhado do Taim, isoladamente, foi possível adotar uma malha numérica com espaçamento de 180 m, enquanto que, para simular o sistema composto pelo banhado e pela lagoa Mangueira, o menor espaçamento da malha suportado foi de 360 m, por limitações computacionais. Apesar da vantagem de conseguir uma representação mais próxima do sistema natural, na medida em que passa a não necessitar da imposição de níveis como condição de contorno, a simulação de todo o sistema com uma malha de 360 m provoca uma perda de resolução na definição dos contornos, principalmente dos elementos internos ao banhado, como as lagoas Nicola e do Jacaré, em relação à malha de 180 m.

Para avaliar o efeito de refinamento da malha de cálculo, realizaram-se algumas simulações do banhado do Taim, com três tamanhos de espaçamento: 180 m, 360 m e 480 m, cujas características são apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3. Especificações das malhas numéricas testadas.

malha	matriz (lin x col)	total de elementos	núm. elem. internos	área de cada elem. (km ²)
dx = 180m	72 x 172	12384	6916	0,0324
dx = 360m	33 x 87	2871	1837	0,1296
dx = 480m	28 x 66	1848	1066	0,2304

Como condições iniciais de simulação, considerou-se velocidade nula em todos os elementos da malha e um nível d'água constante, situado na cota de 2,85 m, sendo adotada a

condição de contorno de nível com variação em torno do nível médio, conforme classificação feita no item 5.5.

Considerou-se um vento constante com velocidade de 6 m/s, originário de Oeste-Sudoeste (OSO), durante os 2 dias de simulação, sendo adotado um coeficiente de ajuste do vento (C_v) de valor igual a $3,0E-6$. Tanto para o coeficiente de Manning quanto para o coeficiente redutor da tensão do vento, foram considerados dois valores: um para as lagoas (Nicola, Jacaré e parte norte da Mangueira) e outro para as demais áreas do banhado, devido à presença de vegetação nestas últimas. Para as lagoas, adotou-se um coeficiente de Manning de 0,02, sem redução da tensão do vento (coeficiente redutor igual a 1,0), enquanto que, para as demais regiões do banhado, atribuiu-se um coeficiente de Manning de 0,1 e um coeficiente redutor do vento igual a 0,2 (redução de 80% da tensão do vento).

A perda de resolução devido ao aumento do espaçamento da malha pode ser visualizada através da figura 5.19, que apresenta três gráficos elaborados com o próprio modelo IPH-A, referentes à distribuição espacial do coeficiente de Manning para cada uma das malhas numéricas analisadas, onde se percebe a diferença na representação das lagoas Nicola e Jacaré.

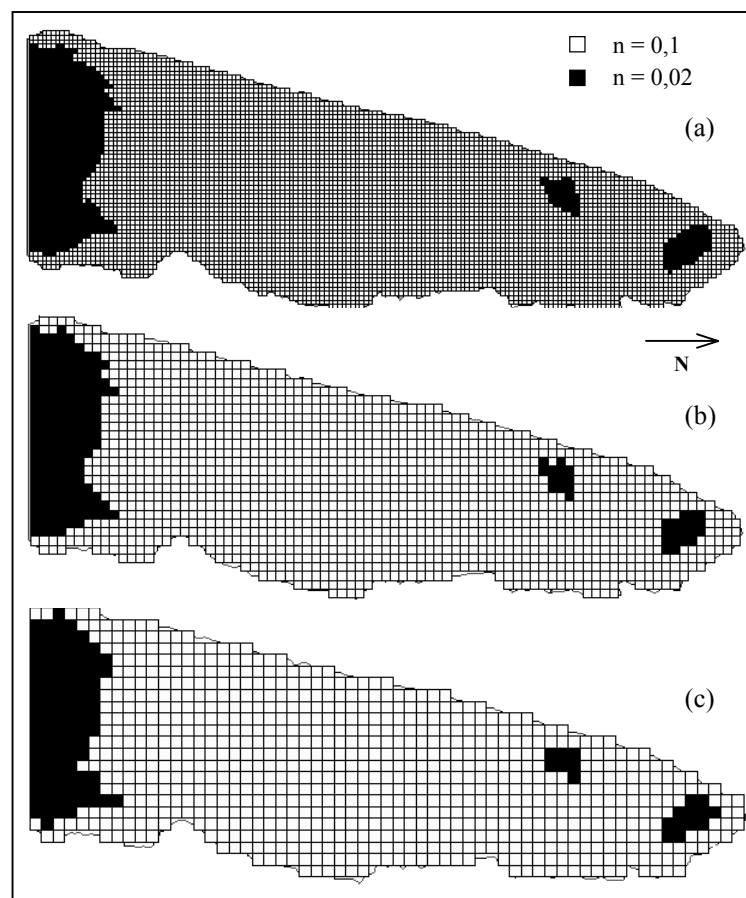


Figura 5.19. Distribuição espacial do coeficiente de Manning, para análise do refinamento da malha numérica: (a) $dx = 180$ m; (b) $dx = 360$ m; (c) $dx = 480$ m.

Cabe ressaltar que, para todas as malhas empregadas ($dx = 180, 360$ e 480 m), com os passos de tempo de 30 s e 60 s considerados na pesquisa e em função dos tirantes observados na região modelada, em torno de 1 a 5 m, o número de Courant apresenta um valor baixo (tabela 5.4), inferior ao limite acima do qual foram verificados problemas numéricos com esquemas tipo ADI (Benqué et al., 1982).

Tabela 5.4. Valores do número de Courant (Cr)⁽¹⁾ para diferentes malhas numéricas.

dx (m)	dt	
	30s	60s
180	$Cr < 1.65$	$Cr < 3.30$
360	$Cr < 0.83$	$Cr < 1.65$
480	$Cr < 0.62$	$Cr < 1.24$

⁽¹⁾ Limite superior referente a um tirante de 5 m, calculado pela equação (3.29).

Os pontos indicados na figura 5.20 foram os utilizados para verificar os níveis e velocidades durante as simulações. Observou-se que o comportamento do nível do banhado foi praticamente idêntico, para as três malhas testadas, como exemplifica o gráfico da figura 5.21, relativo ao ponto A3. Quanto à variação das velocidades, pouca diferença (inferior a 10%) foi verificada entre os três casos, como ilustram as figuras 5.22 e 5.23, para o referido ponto. Esse comportamento foi verificado em todos os demais pontos selecionados.

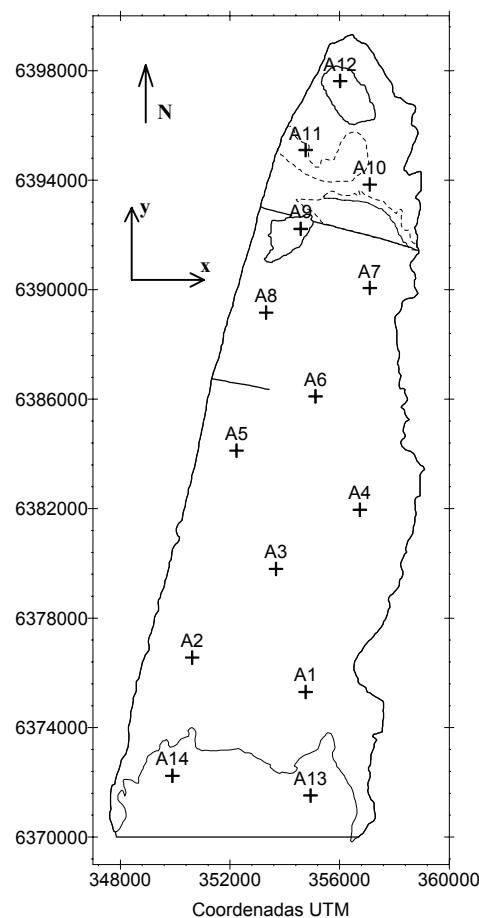


Figura 5.20. Localização dos pontos de verificação de níveis e velocidades ao longo das simulações para testar o refinamento da malha numérica.

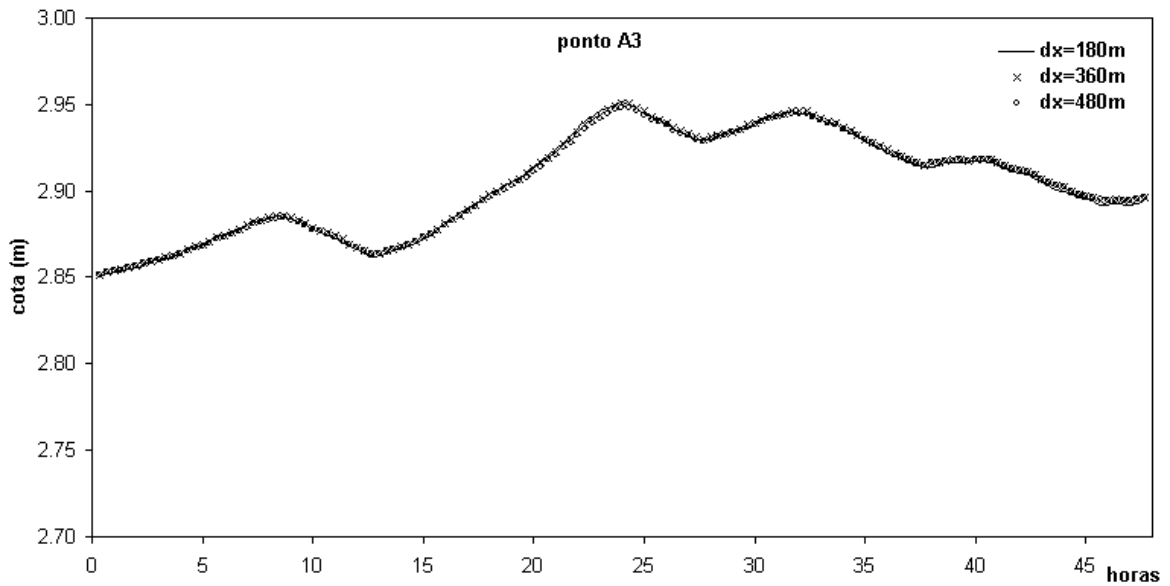


Figura 5.21. Variação no tempo do nível no ponto A3.

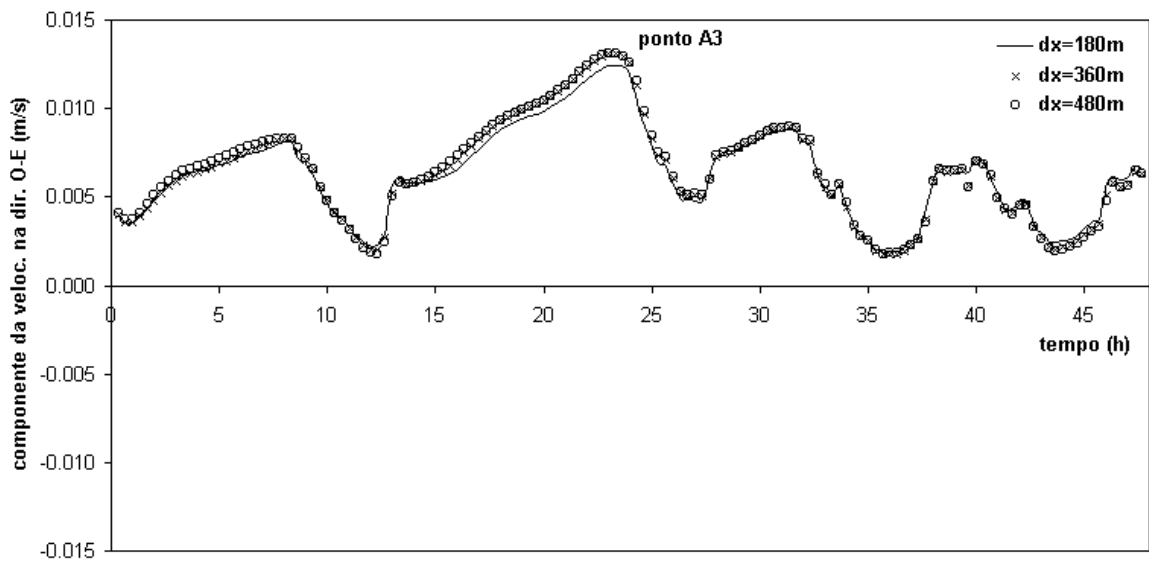


Figura 5.22. Variação no tempo da componente da velocidade na direção O-E, no ponto A3.

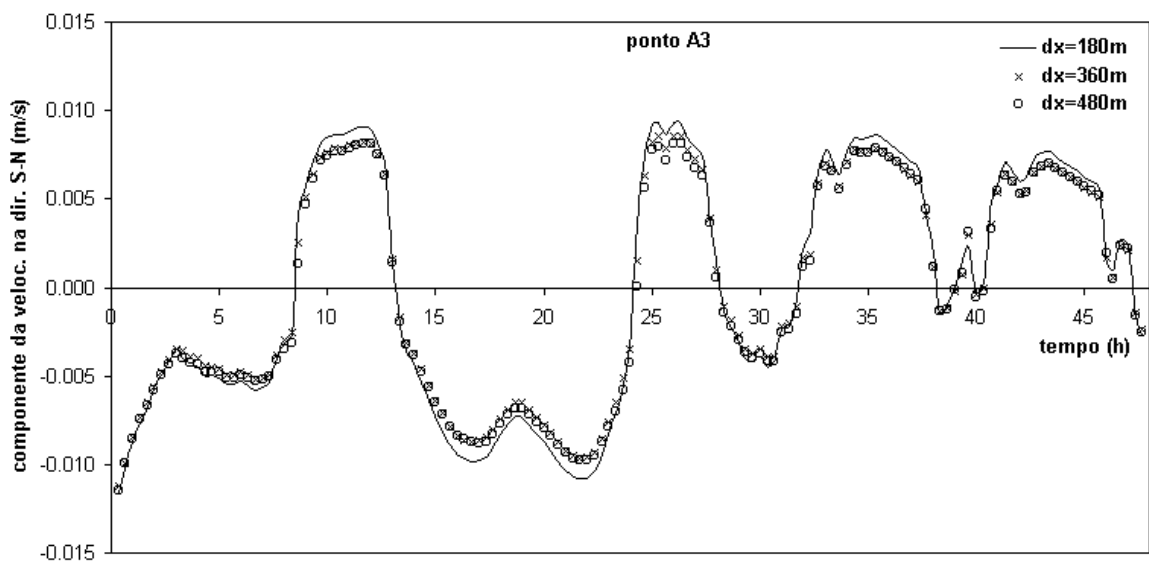


Figura 5.23. Variação no tempo da componente da velocidade na direção S-N, no ponto A3.

Os campos de velocidade traçados na figura 5.24 comprovaram que o aumento do espaçamento da malha de 180 m para 360 m não acarretou mudanças significativas na resposta do modelo às condições simuladas. Em tais figuras, os vetores velocidade da região norte da lagoa Mangueira foram omitidos, por questão de escala do desenho, já que a velocidade do escoamento no banhado é bem menor do que a da lagoa Mangueira, por causa da vegetação.

Os resultados das simulações descritas neste item mostraram que, apesar de trabalhar com menor número de elementos e ocasionar perda na definição das regiões, a malha numérica com espaçamento de 360 m reproduziu a circulação da água de modo muito semelhante ao obtido com a malha de 180 m. Assim, a opção de simular todo o sistema Mangueira-Taim, com uma malha de 360 m, é preferível à simulação do banhado do Taim isolado, com uma malha de 180 m.

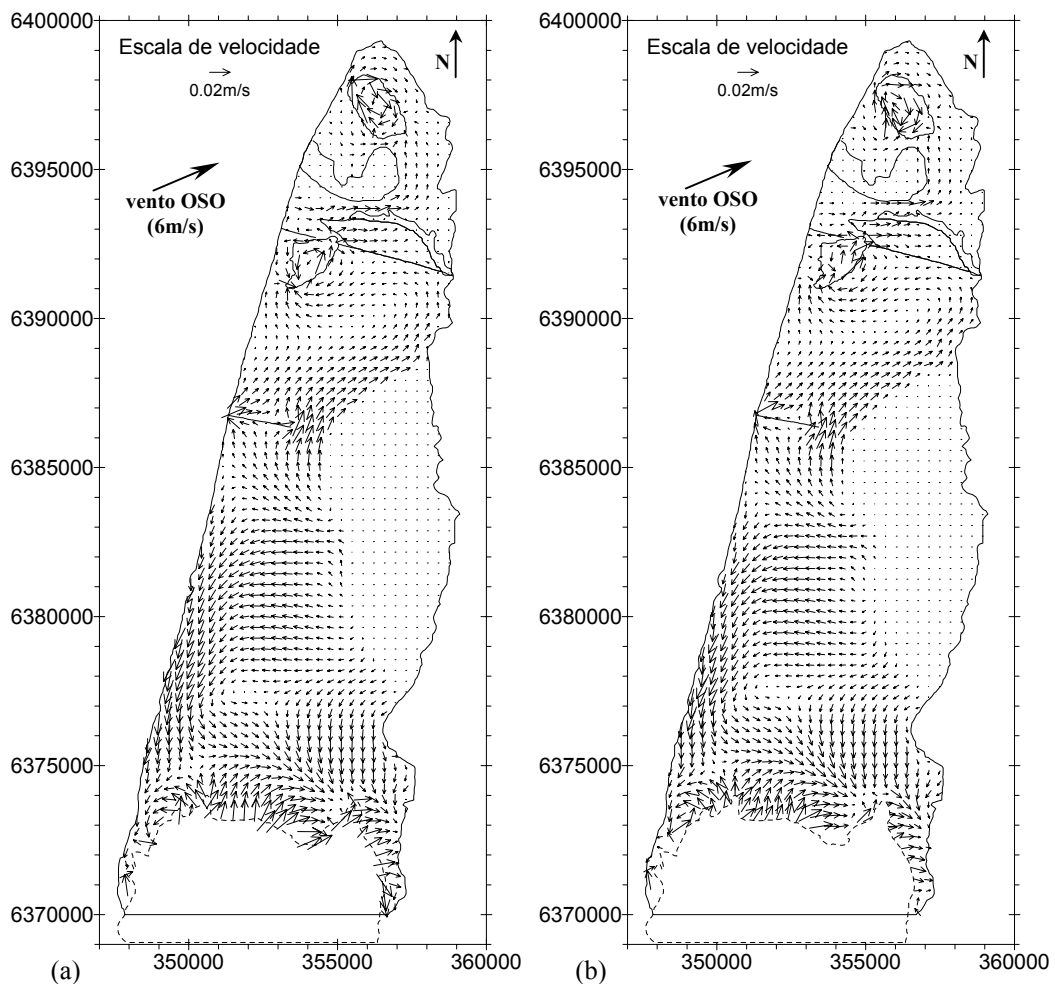


Figura 5.24. Campos de velocidade após 12 h de simulação, com uma malha de (a) 180 m e (b) 360 m, onde os vetores velocidade, na região da lagoa Mangueira, foram omitidos, por questão de escala.

5.8 VERIFICAÇÃO DO ALGORITMO DE SECAGEM/INUNDAÇÃO NO BANHADO DO TAIM

5.8.1 Descrição das simulações

A verificação do algoritmo de secagem/inundação aplicado ao banhado do Taim seguiu a mesma idéia do teste no canal fictício, descrito no capítulo 4 (item 4.3.2.4): avaliar seu desempenho frente a uma situação onde há uma região que permanece com cotas acima do nível da água e compará-lo com o comportamento do modelo sem o algoritmo, onde tal área é isolada por um contorno fechado.

Escolheu-se a curva de nível de 2,80 m como a delimitadora entre as regiões com e sem escoamento (“secas”). Na simulação base de comparação (cenário A0), o contorno fechado do banhado foi alterado de forma a excluir todos os pontos com cota superior a 2,80 m, conforme mostra a figura 5.25. Com o algoritmo, duas simulações foram realizadas: na primeira, impôs-se uma cota de 5 m para aquelas áreas com cotas acima de 2,80 m (cenário A1), enquanto que, na simulação seguinte, todos os elementos foram mantidos com suas cotas reais (cenário A2).

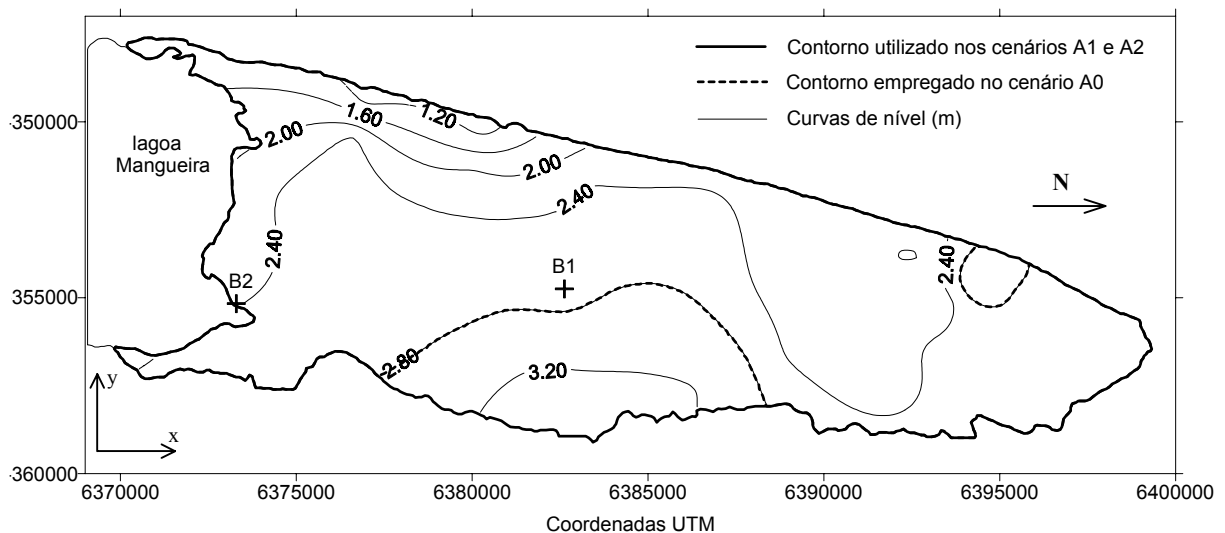


Figura 5.25. Contornos do banhado do Taim utilizados nas simulações para verificar algoritmo de secagem/inundação (mapa rotacionado de 90°, sentido horário).

A elevação de cotas no cenário A1 tem o propósito de garantir que nenhum elemento seja inundado ou secado, na medida que a região de cota originalmente superior a 2,80 m permanece abaixo do nível da água, já que o valor de 5 m foi escolhido em função da condição de contorno e do nível inicial adotados para a simulação. Isso garante que a área de escoamento no cenário A1 seja idêntica àquela da simulação base (cenário A0). O cenário A2

permite observar o desempenho do algoritmo em uma situação “real” de simulação do banhado e verificar o efeito de inundar ou secar alguns elementos da malha numérica.

Nos três cenários, a interface com a lagoa Mangueira foi considerada como condição de contorno aberta de nível. Para simplificar a análise e a comparação dos resultados, os canais da Sarita e do Jacaré foram desprezados no traçado dos contornos e não foram consideradas as três regiões de cotas específicas (A, B e C), na composição das matrizes com dados de batimetria e cotas do fundo.

Adotou-se uma malha numérica com espaçamento uniforme de 180 m (72 linhas e 172 colunas), resultando em 5838 elementos internos para o caso do contorno traçado acompanhando a curva de nível de 2,80 m (cenário A0) e 6225 elementos internos para o caso do contorno delimitando todo o banhado (cenários A1 e A2). A ação do vento não foi considerada e as demais condições e parâmetros adotados em comum nas simulações foram: passo de tempo de cálculo = 30 s; cota do nível d'água inicial = 2,19 m; coeficiente de viscosidade turbulenta = $10 \text{ m}^2/\text{s}$ e coeficiente de rugosidade de Manning = 0,1.

5.8.2 Resultados e discussão

Os campos de velocidades referentes ao tempo de 5 horas de simulação (figuras 5.26 a 5.28) mostram que, assim como no caso do canal fictício, o algoritmo de secagem/inundação implementado no modelo IPH-A foi capaz de simular com áreas internas de cotas superiores à do nível da água, apresentando um desempenho muito próximo à situação onde houve uma imposição de contorno fechado. Comparando-se os dois últimos mapas (cenários A1 e A2), percebe-se a área do banhado que foi inundada ao longo da simulação (após 5 h) e passou a fazer parte do escoamento, o que não seria possível sem o algoritmo desenvolvido. Isso ilustra o que a implementação do algoritmo proporcionou tanto em termos de flexibilidade das condições de simulação como em relação a uma representação mais próxima da realidade.

Os gráficos de níveis e velocidades ao longo do tempo, referentes a alguns pontos específicos do banhado, também serviram de base para análise e verificação do algoritmo, comprovando sua validade. Para ilustrar, nas figuras 5.29 e 5.30, são apresentadas as componentes da velocidade do escoamento ao longo das simulações, referentes ao ponto B1 indicado na figura 5.25, para os 3 cenários estudados. Observou-se um comportamento muito semelhante entre os resultados dos cenários A0 e A1, um pouco distinto do cenário A2, devido à ocorrência da inundação de uma parte do banhado.

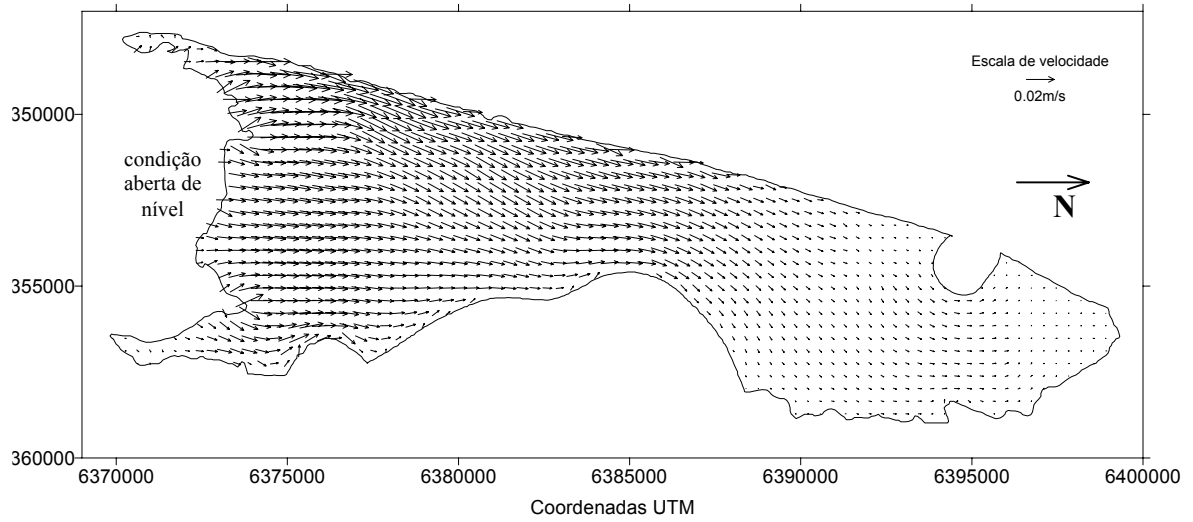


Figura 5.26. Campo de velocidades após 5 h de simulação, para o cenário A0.

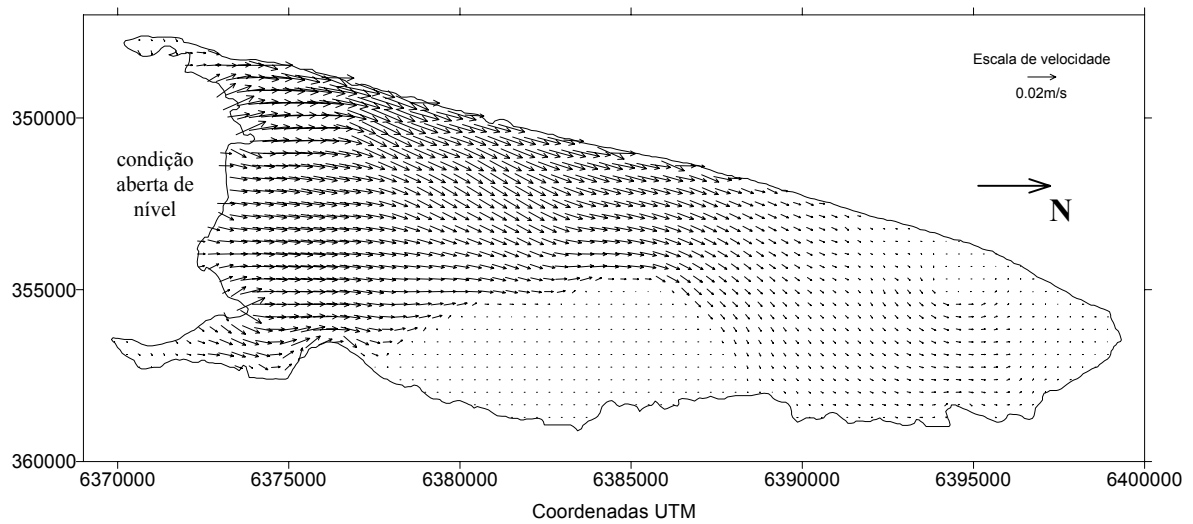


Figura 5.27. Campo de velocidades após 5 h de simulação, para o cenário A1.

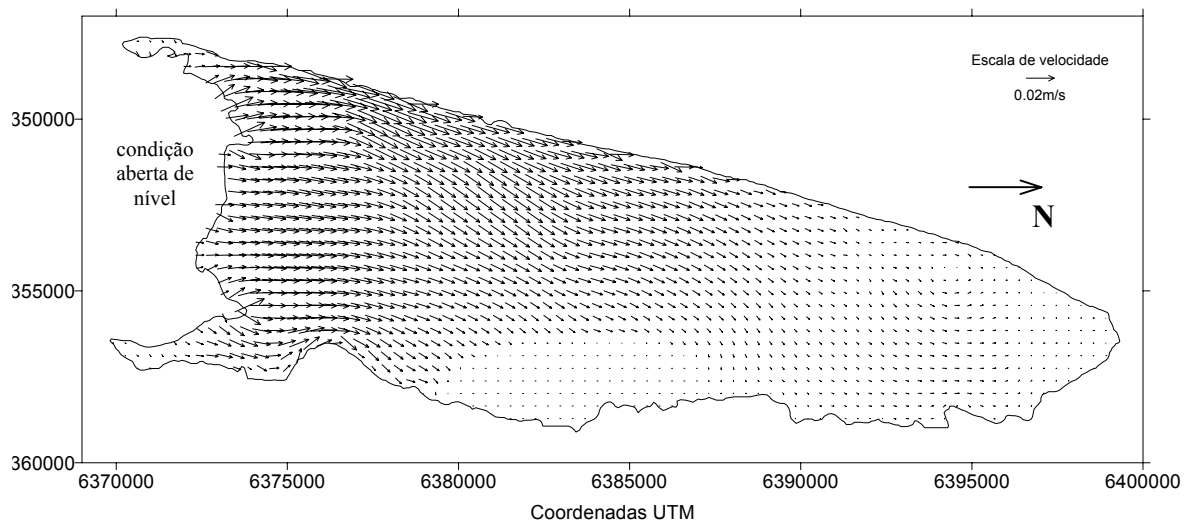


Figura 5.28. Campo de velocidades após 5 h de simulação, para o cenário A2.

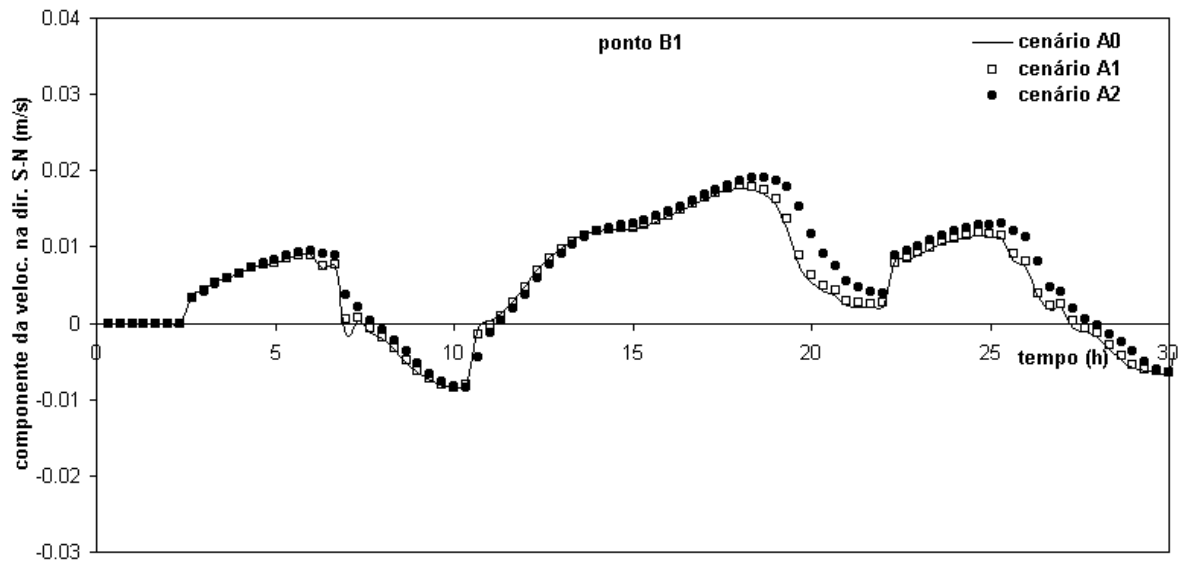


Figura 5.29. Variação no tempo da componente da velocidade na direção S-N, para o ponto B1.

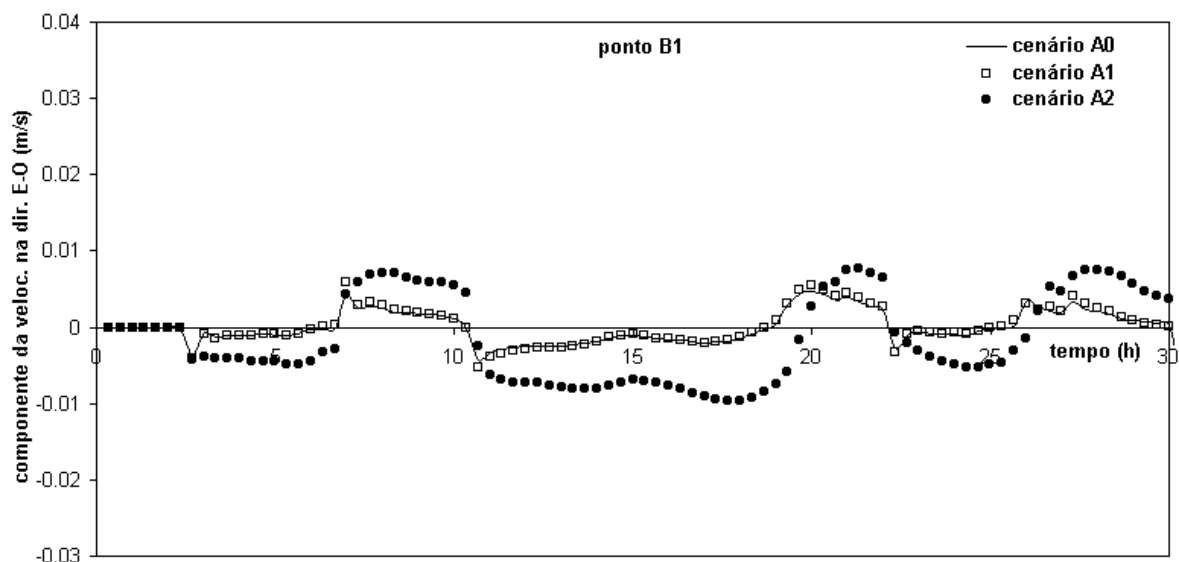


Figura 5.30. Variação no tempo da componente da velocidade na direção E-O, para o ponto B1.

Como forma de comparar o volume de água trocado entre o Taim e a Lagoa Mangueira ao longo das simulações, analisou-se as componentes da velocidade em diversas quadrículas da malha situadas na interface entre os dois sistemas. Por se impor o nível como condição de contorno, a comparação entre as velocidades permite avaliar o balanço do volume de água trocado entre os dois sistemas. Como ilustram os gráficos das figuras 5.31 e 5.32, referentes ao ponto B2 (tomado aqui para exemplificar o comportamento verificado em todos os demais pontos), indicado na figura 5.25, os cenários A0 e A1 apresentaram um comportamento bastante similar, ou seja, a simulação considerando o emprego do algoritmo e uma área interna sem fluxo (considerada seca) foi bastante próxima da ideal, representada por uma fronteira sólida fechada.

Enfim, tomando como base os resultados das simulações descritas neste item e os testes realizados no canal fictício, descritos no capítulo 4, verificou-se a validade do algoritmo implementado no modelo IPH-A, permitindo a secagem/inundação de áreas internas ao contorno modelado, satisfatoriamente.

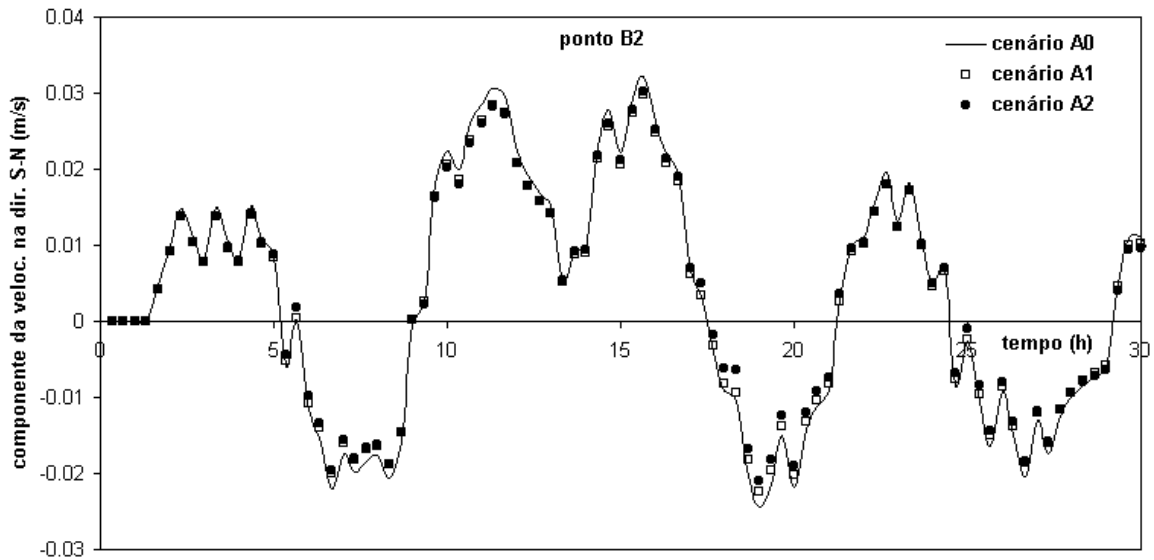


Figura 5.31. Variação no tempo da componente da velocidade na direção S-N, para o ponto B2.

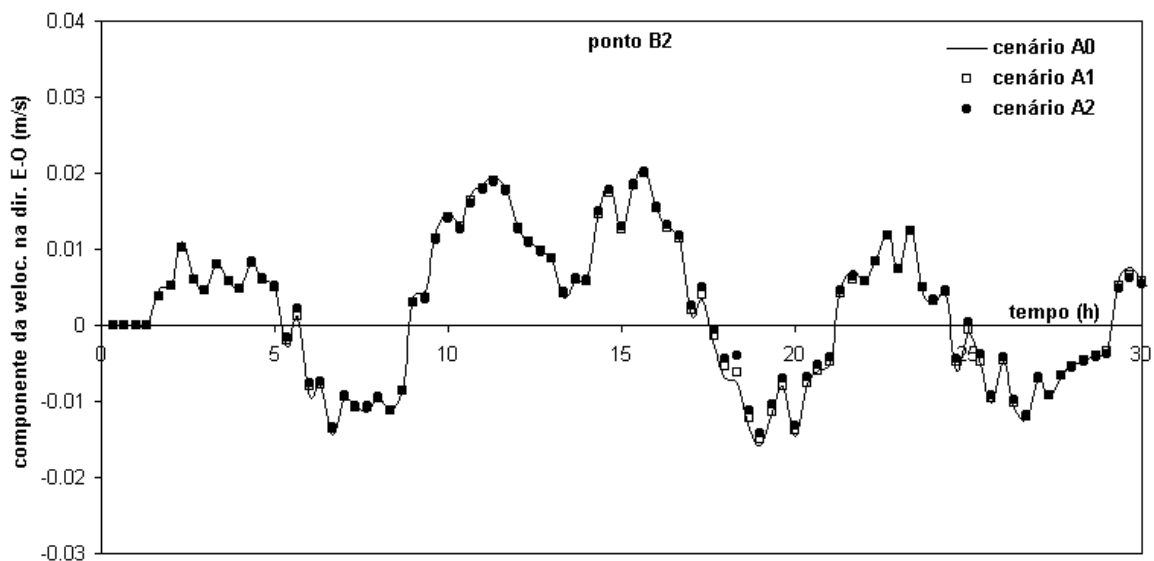


Figura 5.32. Variação no tempo da componente da velocidade na direção E-O, para o ponto B2.

5.9 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS PARÂMETROS DO MODELO IPH-A

Previamente à investigação acerca do comportamento hidrodinâmico do Taim, realizou-se uma série de simulações com o intuito de verificar a influência da variação dos parâmetros do modelo IPH-A e respaldar a definição de tais valores para as simulações subsequentes. A falta de dados de nível e de vento no banhado do Taim, com uma

discretização temporal suficiente, referente ao mesmo período, inviabilizou qualquer tentativa de calibração do modelo, motivando a realização das simulações descritas neste item.

Analisou-se a sensibilidade da resposta do modelo, quando aplicado ao sistema Mangueira-Taim, quanto à variação dos coeficientes de viscosidade turbulenta, de rugosidade de Manning e redutor da ação do vento e quanto ao efeito de Coriolis, sob determinadas condições de simulação, explicitadas a seguir.

5.9.1 Condições gerais de simulação

As simulações descritas neste item foram realizadas utilizando uma malha numérica de espaçamento uniforme e igual a 360 m, com o contorno rotacionado de 63°, conforme comentado no item 5.3 deste capítulo, e um passo de tempo de cálculo de 60 s. Em todos os casos, simulou-se um período de 4 dias sob ação de um vento constante e uniforme, de velocidade igual a 21,6 km/h (6 m/s) e direção OSO, com as seguintes condições iniciais: velocidade nula em todo o sistema e nível inicial na cota de 2.85 m, classificado como nível “médio” do banhado, conforme análise feita no item 5.5.

As demais condições adotadas em todas as simulações, exceto quando o interesse foi analisar a variação do próprio parâmetro, foram: efeito de Coriolis referente à latitude de 33°S; coeficiente de viscosidade turbulenta igual a 10 m²/s; coeficiente de ajuste do vento igual a 3,0E-6; coeficiente de rugosidade de Manning igual a 0,02 para as lagoas Nicola, Jacaré e Mangueira, e igual a 0,1 para as demais regiões do banhado; coeficiente redutor da ação do vento igual a 1,0 para as lagoas e a 0,2 para o restante do Taim.

A figura 5.33 indica a localização dos 12 pontos selecionados para comparar os níveis e as velocidades ao longo do tempo, em todas as simulações, os quais foram dispostos espacialmente distribuídos ao longo do sistema modelado, com uma maior densidade na região do banhado do Taim.

5.9.2 Efeito de Coriolis

A importância relativa da força de Coriolis costuma ser estimada pelo número de Rosby (Ro), dado pela relação entre a força de inércia e a de Coriolis, sendo expresso por (White,1991):

$$Ro = \frac{V}{L_s \Omega}, \quad (5.2)$$

onde L_s é uma escala de comprimento característica, V é a velocidade do escoamento e Ω é o parâmetro de Coriolis. Caso $Ro < 0,1$, o efeito de Coriolis é considerado importante para a circulação da água (Martin e McCutcheon, 1999).

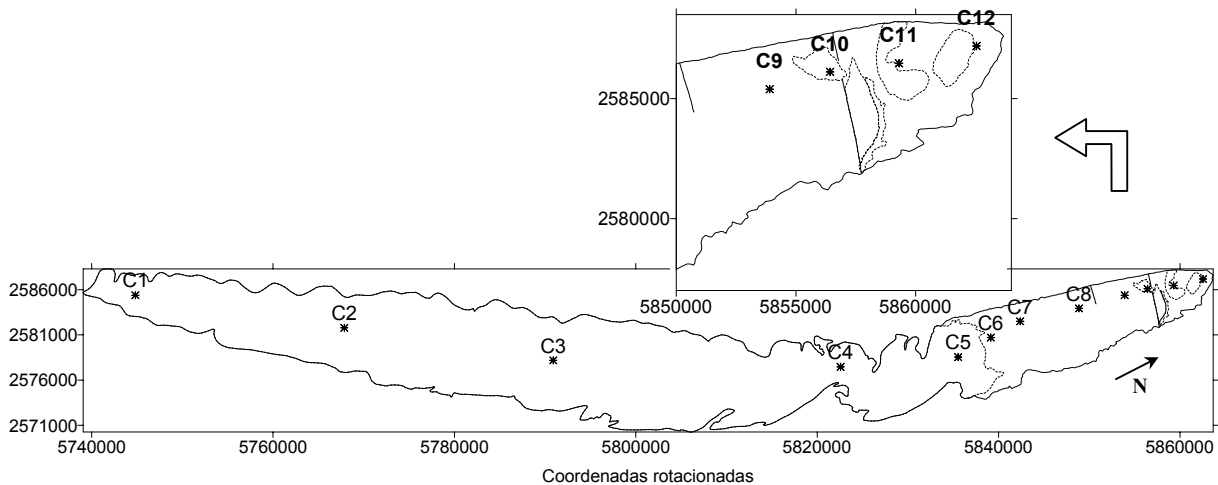


Figura 5.33. Localização dos pontos de verificação de níveis e velocidades, com detalhe da região norte do banhado.

Considerando o banhado do Taim (latitude 33°S), isoladamente, e tomando uma velocidade do escoamento igual a $0,01\text{ m/s}$ e um comprimento de 5000 m (largura aproximada do banhado), resulta que $Ro = 0,03$, sugerindo que a força de Coriolis é importante. Para a lagoa Mangueira, tomando uma velocidade de $0,10\text{ m/s}$ e um comprimento característico de 8000 m (largura aproximada da lagoa), tem-se que $Ro = 0,13$, o que sugere que o efeito de Coriolis não é significativo.

Para avaliar a influência do efeito de Coriolis no escoamento do banhado do Taim, simulou-se o sistema Mangueira-Taim nas situações com e sem a força de Coriolis (relativa à latitude de 33°S), mantendo todas as demais condições e parâmetros.

Como resultado, constatou-se que a referida força não desempenha um papel significativo no escoamento do sistema estudado, relativamente às condições consideradas na simulação. Conforme mostram as figuras 5.34 e 5.35, os campos de velocidades referentes aos casos considerando ou não o efeito de Coriolis são praticamente idênticos, indicando que o mesmo teve uma contribuição desprezível para a circulação da água no sistema Mangueira-Taim, sob as condições adotadas.

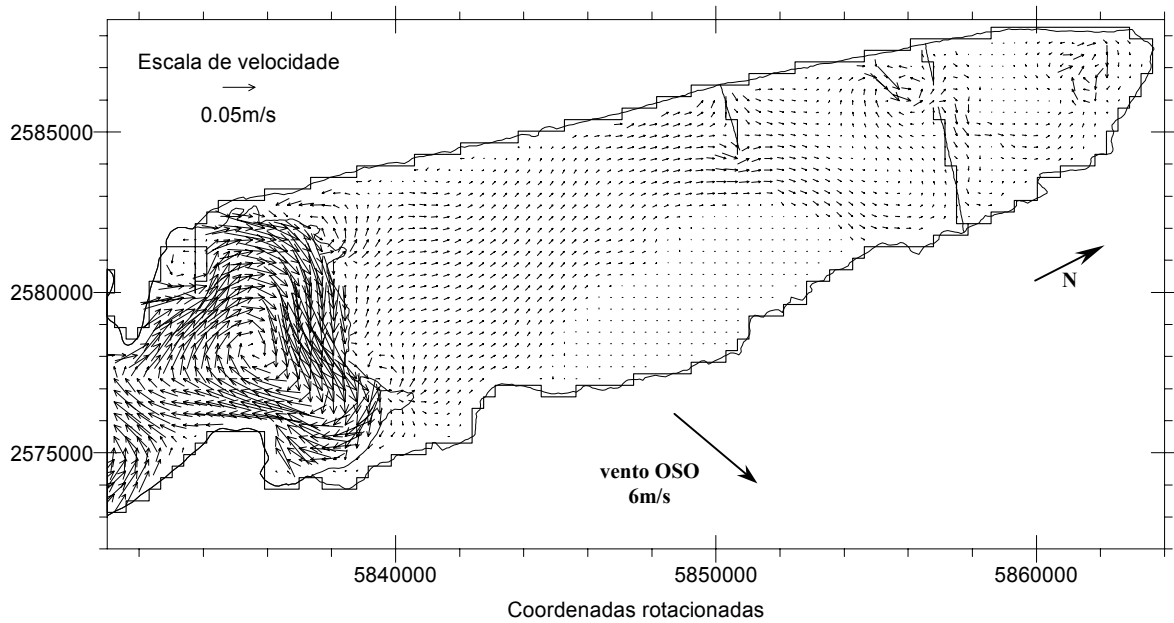


Figura 5.34. Detalhe do campo de velocidades no banhado do Taim, para o caso sem considerar a força de Coriolis, após 4 dias de simulação.

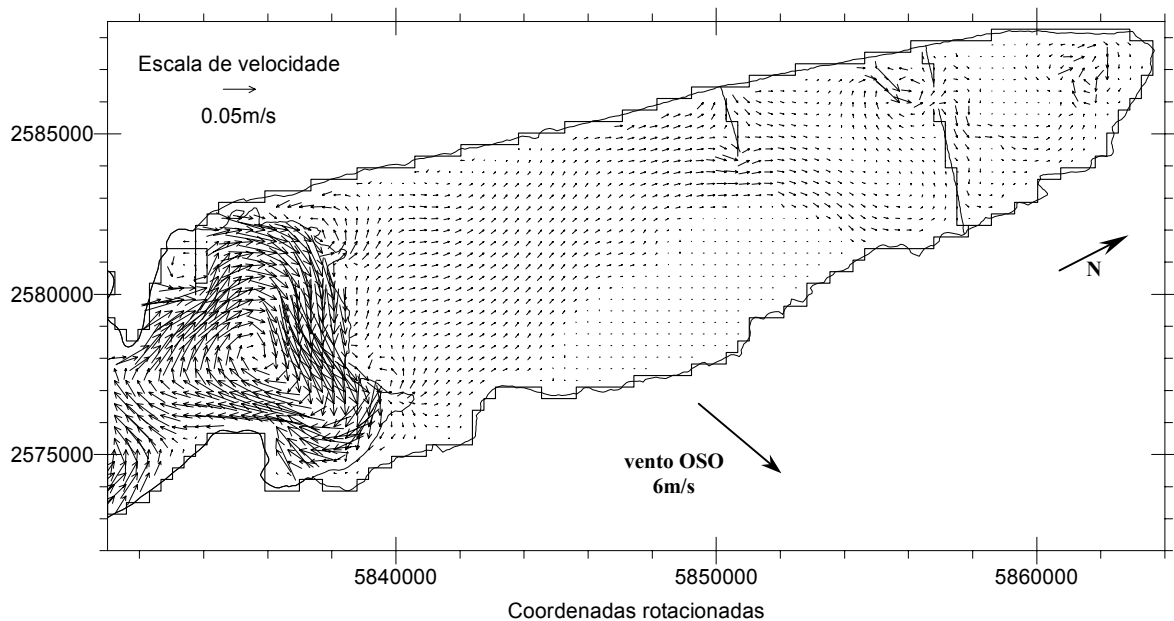


Figura 5.35. Detalhe do campo de velocidades no banhado do Taim, considerando a força de Coriolis (latitude 33°S), após 4 dias de simulação.

5.9.3 Coefficiente de viscosidade turbulenta

A análise da sensibilidade da resposta do modelo ao coeficiente de viscosidade turbulenta foi realizada considerando os seguintes valores, usualmente encontrados na literatura: 0, 5, 10 e 20 m^2/s , constantes no tempo e espacialmente uniformes.

Os resultados mostraram que as perdas por atrito viscoso, representada no equacionamento pela força de atrito viscoso, não constituem um fator importante para a

circulação da água no sistema Mangueira-Taim, para as condições consideradas nas simulações. De forma geral, a variação do coeficiente de viscosidade turbulenta entre os valores 0 (situação onde é desprezada a força de atrito viscoso) e $20 \text{ m}^2/\text{s}$ resultou no mesmo padrão de escoamento (figuras 5.36 e 5.37), motivando a adoção do valor mais usual de $10 \text{ m}^2/\text{s}$ ao longo do trabalho. Pequenas alterações foram observadas no campo de velocidades da lagoa Mangueira, mas sem implicações para o banhado do Taim, como é constatado observando o fluxo na interface Mangueira-Taim, nos campos de velocidade mostrados nas referidas figuras.

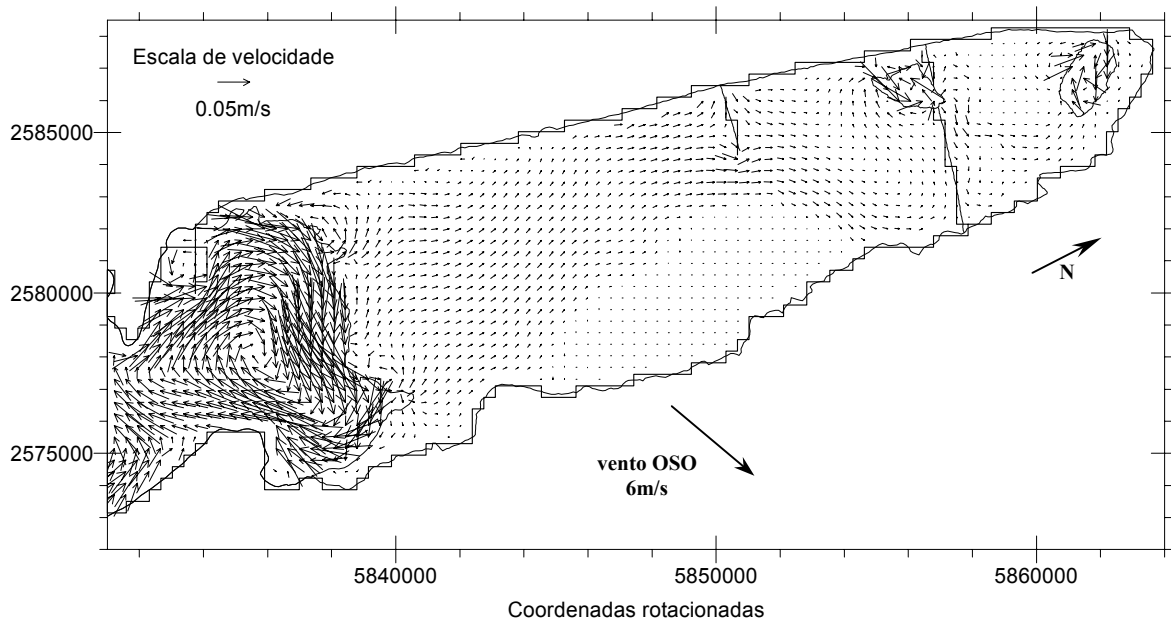


Figura 5.36. Detalhe do campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de viscosidade turbulenta nulo, após 4 dias de simulação.

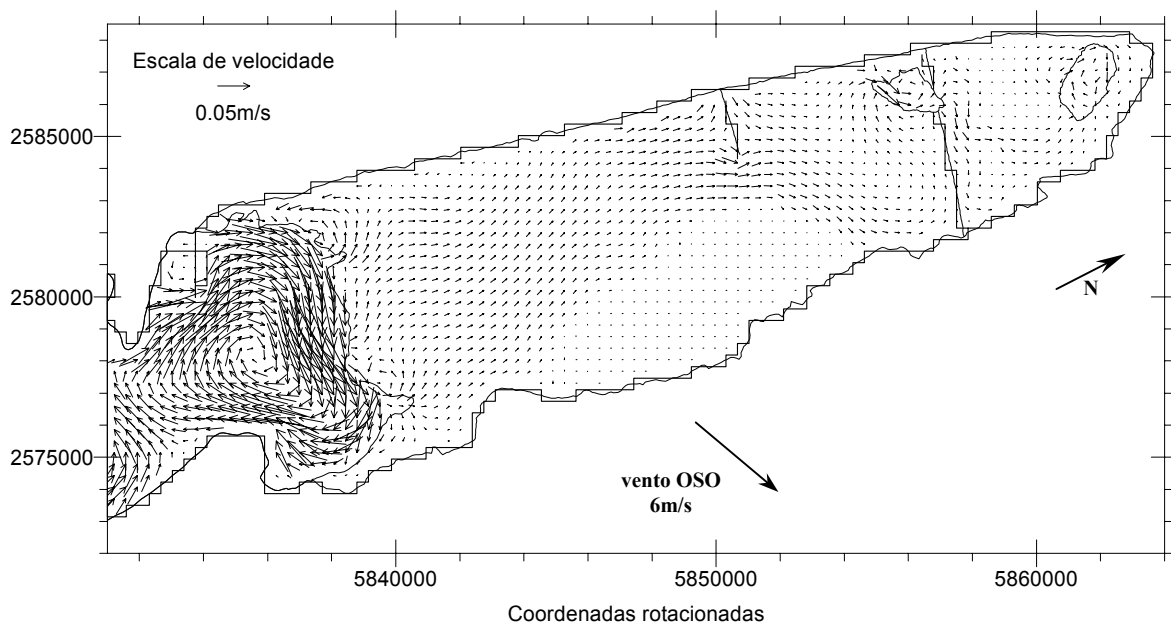


Figura 5.37. Detalhe do campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de viscosidade turbulenta igual a $20 \text{ m}^2/\text{s}$, após 4 dias de simulação.

A única diferença significativa foi o padrão de circulação da água nas lagoas Nicola e Jacaré, sendo observado que, quanto maior a perda por atrito viscoso, ou seja, maior o coeficiente de viscosidade turbulenta, menores as velocidades do escoamento em tais regiões. Em função dos valores distintos dos coeficientes de Manning e redutor da ação do vento, adotados para as lagoas em relação às regiões vizinhas, as lagoas constituem áreas de fluxo menos restrito pela rugosidade do fundo e mais afetado pela ação do vento, enquanto as áreas com vegetação apresentam grande impedimento ao escoamento. Isso proporcionou uma espécie de confinamento das lagoas, que, aliado à pequena área das mesmas em relação ao espaçamento da malha numérica, fez com que a perda de energia por atrito viscoso fosse relativamente importante, tornando a circulação da água em tais regiões mais sensível ao coeficiente de viscosidade turbulenta.

5.9.4 Coeficiente de rugosidade de Manning

As imagens de satélite e as fotos, apresentadas no capítulo 2 e neste, evidenciam a forte presença de vegetação no banhado do Taim, representada por um aumento do valor do coeficiente de Manning, em relação ao valor adotado para as lagoas Nicola, Jacaré e Mangueira, quando da aplicação do modelo IPH-A.

Como mencionado no capítulo 3, diversos estudos deram enfoque à resistência ao escoamento proporcionada pela vegetação, indicando valores de coeficiente de Manning estimados com base em medições em campo ou em laboratório. Algumas simulações do sistema Mangueira-Taim foram realizadas, com o objetivo de verificar a alteração do comportamento da circulação da água em resposta à variação do referido parâmetro no banhado.

Para as lagoas internas ao banhado e a parte norte da lagoa Mangueira, o coeficiente de Manning (n_i) foi mantido constante em todas as simulações, com valor igual a 0,02, referido na literatura como valor usual para lagoas rasas, enquanto que, para as demais áreas do banhado (n_b), foram testados os seguintes coeficientes de Manning: 0,02, 0,05, 0,10, 0,20, 0,40, 0,60, 1,00 e 2,00. O primeiro valor representa uma situação sem vegetação, sendo o banhado caracterizado como uma lagoa, enquanto os demais se referem a diferentes intensidades de resistência ao escoamento, cobrindo uma faixa de valores adotados na literatura, devido à ocorrência de vegetação. É importante ressaltar que, em todas as simulações, o coeficiente redutor da ação do vento foi mantido com valor igual a 0,2 para a região do banhado e igual a 1,0 para as áreas das lagoas.

De modo geral, a variação no valor de n_b pouco repercutiu na lagoa Mangueira, não acarretando mudanças significativas no padrão da circulação da água. Entretanto, observando a variação do nível da água com o tempo, constatou-se que, quanto maior o coeficiente de Manning no banhado, menor é o volume de água trocado entre este e a lagoa, e maior é a oscilação dos níveis na lagoa, em resposta à ação do vento (figura 5.38). Em outras palavras, quanto maior a resistência ao escoamento no banhado provocada pela vegetação, maior o impedimento para o fluxo entre os dois sistemas, que se tornam mais isolados um do outro. Na referida figura, são apresentados os resultados referentes ao ponto C5, situado no extremo norte da lagoa Mangueira (figura 5.33), para três valores de n_b (0,02, 0,2 e 2,0), sendo que os demais apresentam comportamento intermediário ao daqueles mostrados.

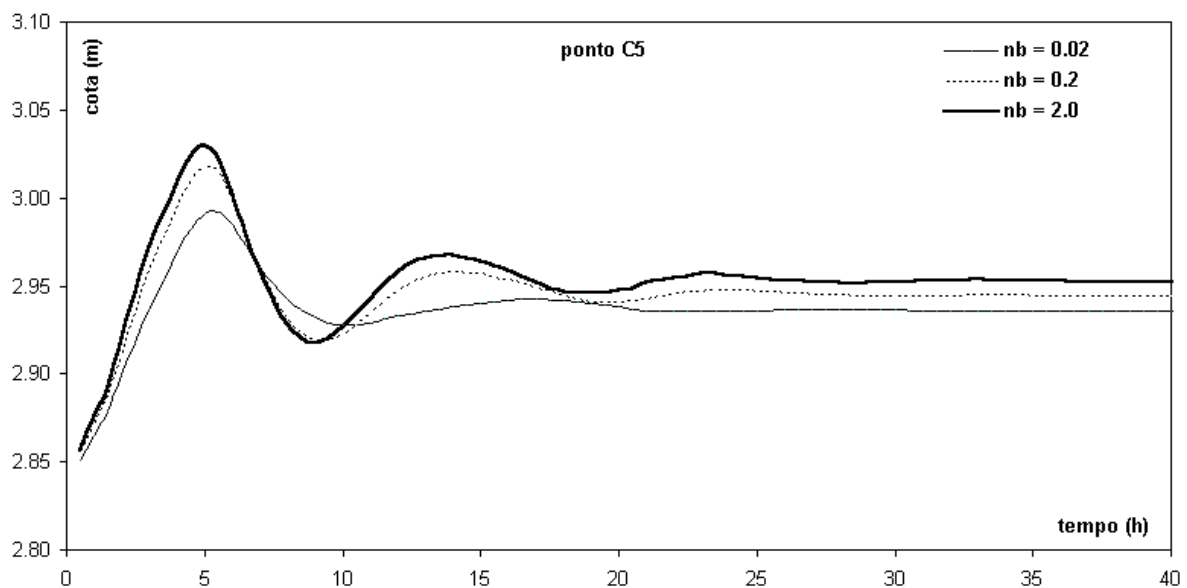


Figura 5.38. Nível na lagoa Mangueira (ponto C5) ao longo do tempo.

O valor do coeficiente de Manning adotado para o banhado teve uma grande influência sobre a circulação da água neste, como se conclui através da comparação entre os campos de velocidade referentes ao tempo de simulação de 4 dias (figuras 5.39 a 5.42). Para o caso de $n_b = 0,02$, a velocidade do escoamento, no interior do banhado, foi da mesma ordem de grandeza da observada na lagoa Mangueira. A medida que o valor desse coeficiente foi aumentado, a circulação da água no banhado ficou cada vez mais restrita, com velocidades muito inferiores às verificadas nas áreas das lagoas, onde se manteve um n_l igual a 0,02. A figura 5.43 apresenta a variação do nível da água ao longo do tempo, no ponto C7, na qual se observa o amortecimento provocado pelo aumento do coeficiente de rugosidade do fundo.

Por não haver condições de efetuar uma calibração do modelo, como já discutido, preferiu-se adotar o valor 0,4 para o coeficiente de Manning nas áreas consideradas com vegetação nas simulações subseqüentes, exceto quando explicitado o contrário. Tal valor foi o

obtido por Villanueva (1997), na calibração de um modelo hidrodinâmico de células aplicado ao banhado do Taim.

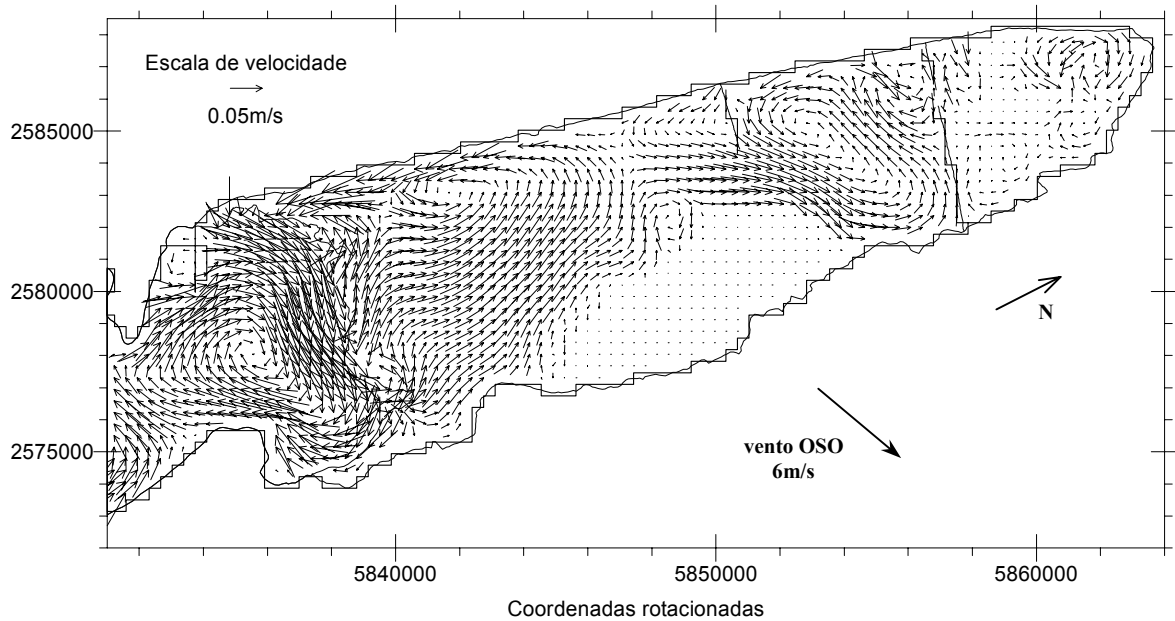


Figura 5.39. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de Manning igual a 0,02 para a região do banhado, após 4 dias de simulação.

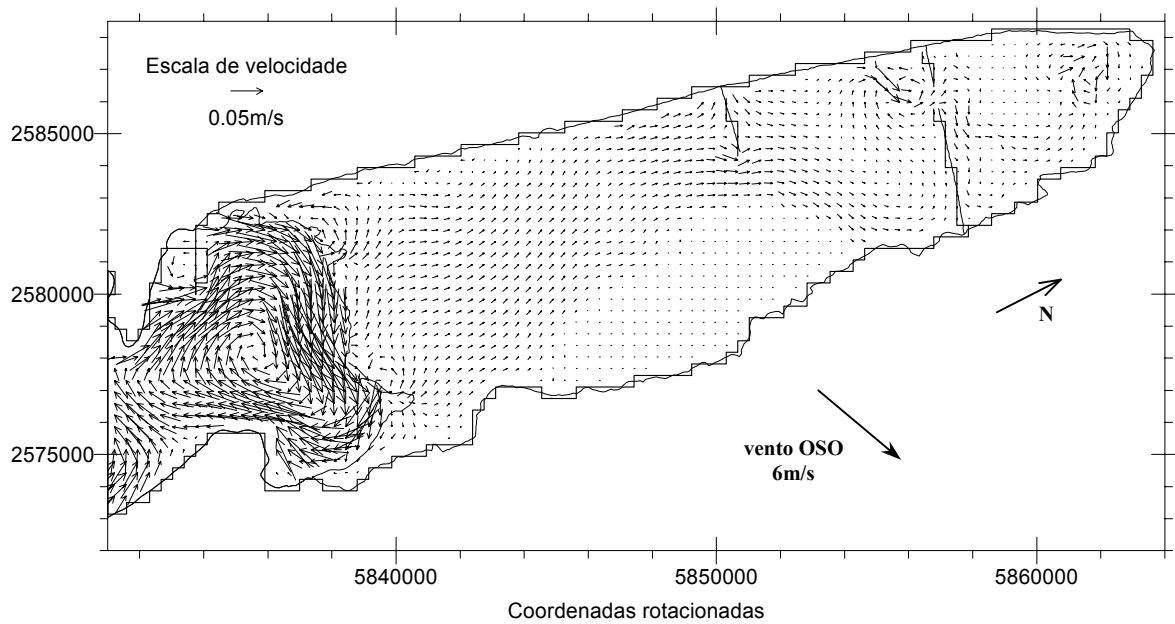


Figura 5.40. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de Manning igual a 0,1 para a região do banhado, após 4 dias de simulação.

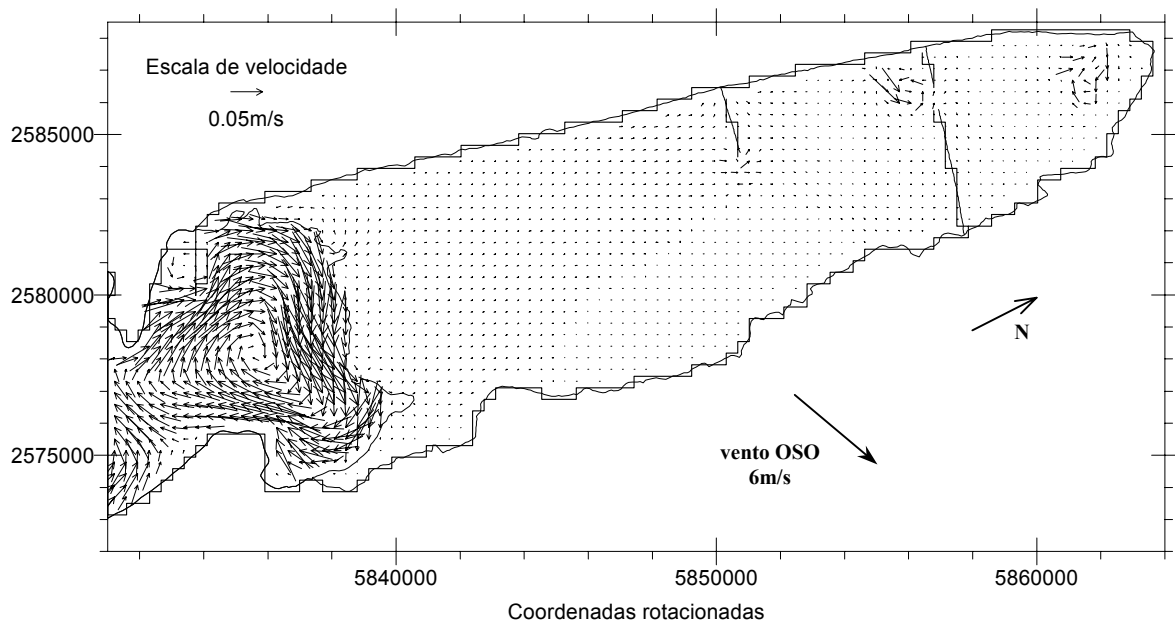


Figura 5.41. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de Manning igual a 0,4 para a região do banhado, após 4 dias de simulação.

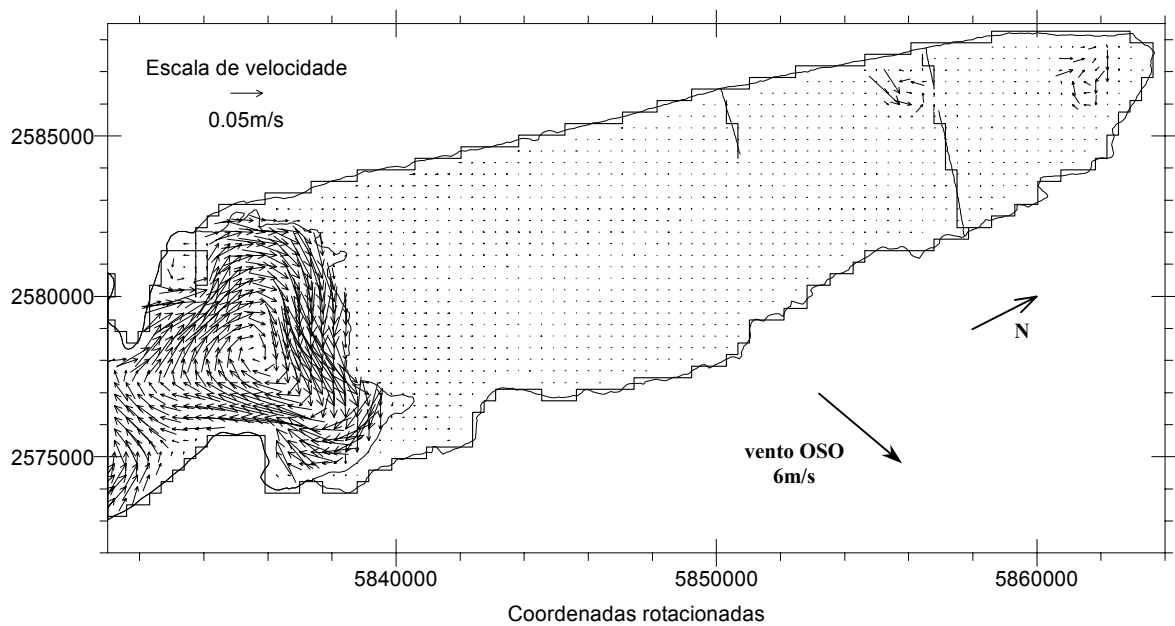


Figura 5.42. Campo de velocidades no banhado do Taim, considerando um coeficiente de Manning igual a 2,0 para a região do banhado, após 4 dias de simulação.

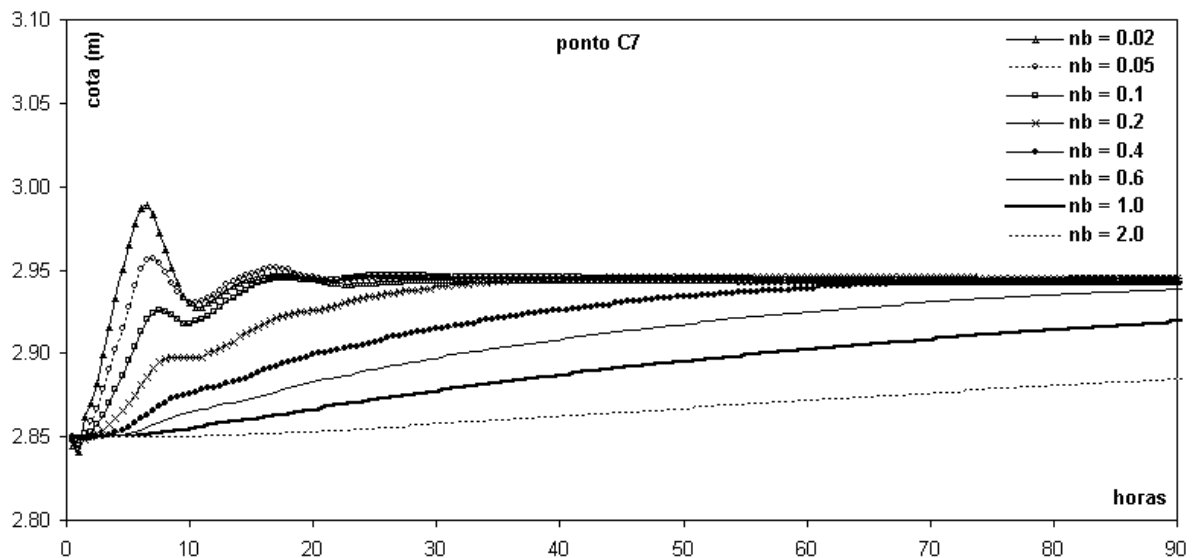


Figura 5.43. Nível no banhado do Taim (ponto C7) ao longo do tempo.

5.9.5 Coefficiente redutor da ação do vento

O chamado coeficiente redutor da ação do vento, introduzido no equacionamento matemático multiplicando a tensão de cisalhamento na superfície, tem o objetivo de permitir a variação espacial da ação do vento, distinguindo as áreas consideradas com e sem vegetação (equações 3.27 e 3.28). Na intenção de verificar o quanto a variação desse parâmetro influi no escoamento, algumas simulações foram realizadas considerando os valores 0,1, 0,2, 0,5 e 1,0 para a região do banhado do Taim considerada coberta por vegetação, mantendo o valor 1,0 para as áreas das lagoas Mangueira, Nicola e Jacaré.

Como mostram os campos de velocidade apresentados nas figuras 5.44 a 5.47, a redução da tensão de cisalhamento do vento sobre a região do banhado, além de ter provocado a diminuição da velocidade do escoamento em tal área, tornou a circulação da água mais orientada no sentido da lagoa para o banhado. Esse último aspecto é percebido claramente pela comparação entre os casos sem redução (figura 5.44) e com redução de 90% da ação do vento (figura 5.47). No primeiro caso, ocorreu uma maior circulação de água no banhado, inclusive entrando e saindo da lagoa, enquanto que, na segunda situação, o escoamento foi, predominantemente, regido pelo escoamento vindo da lagoa para o banhado.

Entretanto, pode-se considerar que a sensibilidade da resposta do sistema modelado ao referido parâmetro foi menor do que ao coeficiente de Manning. Além disso, como as simulações foram realizadas considerando um coeficiente de Manning igual a 0,02, em todo o sistema modelado, representando uma situação sem vegetação, conclui-se que a influência da variação do coeficiente de redução da ação do vento é ainda menor para o caso

com vegetação, onde o escoamento é bem mais restrito. Nas simulações seguintes, fixou-se um valor de 0,2 para tal coeficiente, nas áreas consideradas com vegetação, valor próximo ao único citado na literatura (0,25), usado por Ramming (1979).

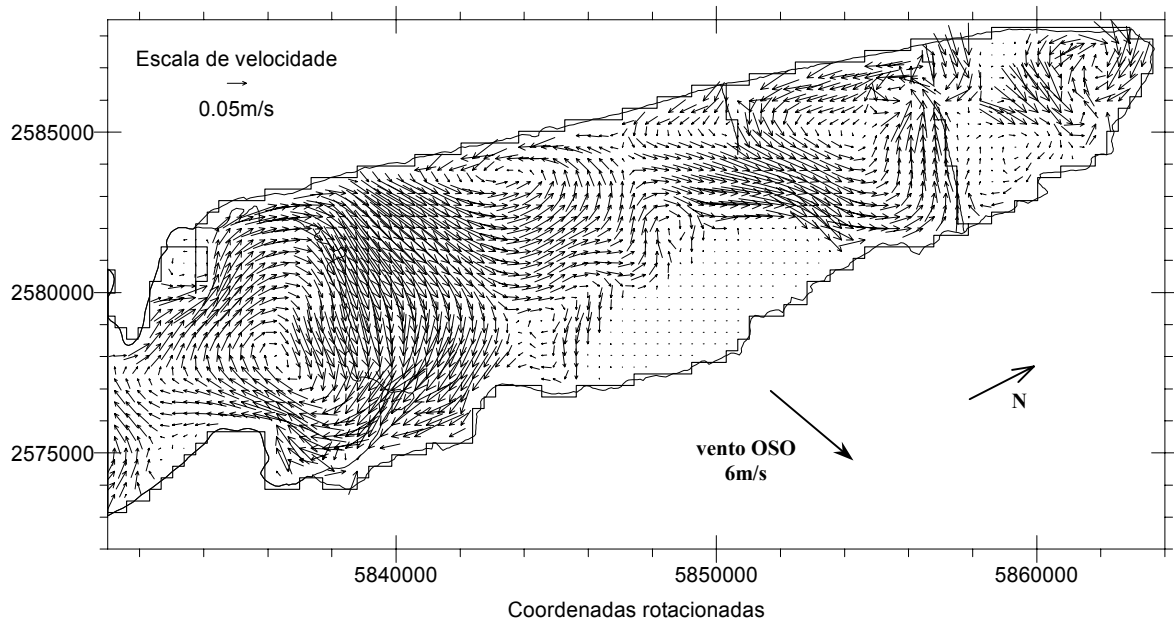


Figura 5.44. Campo de velocidades no banhado do Taim, sem reduzir a tensão do vento no banhado ($c_{red} = 1,0$), após 4 dias de simulação.

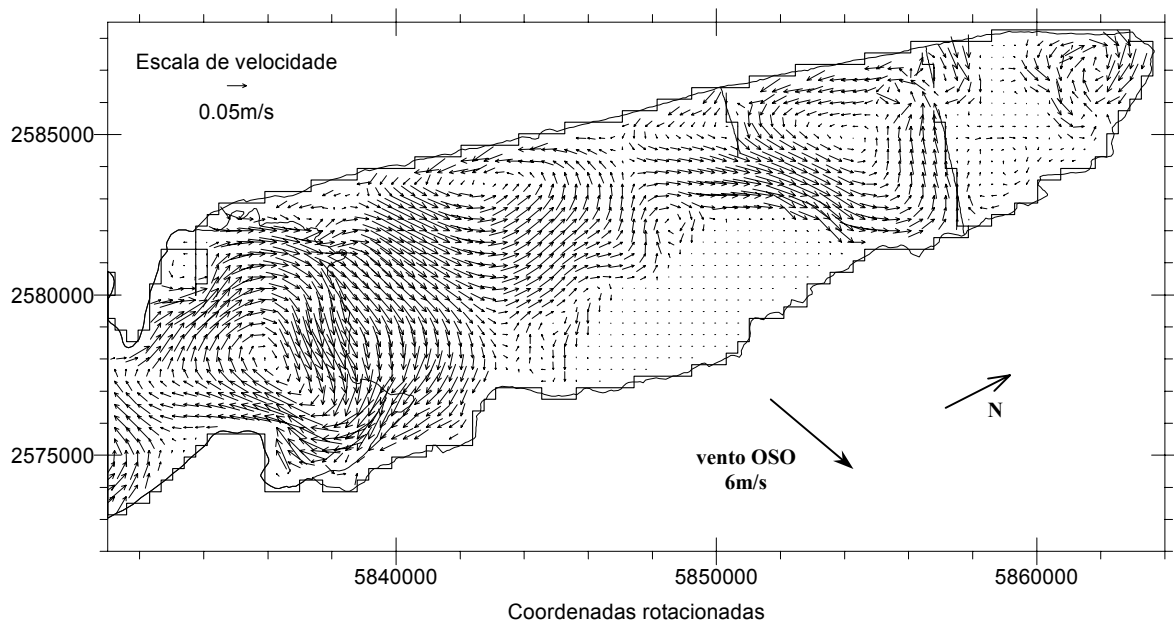


Figura 5.45. Campo de velocidades no banhado do Taim, reduzindo em 50% a tensão do vento sobre o banhado ($c_{red} = 0,5$), após 4 dias de simulação.

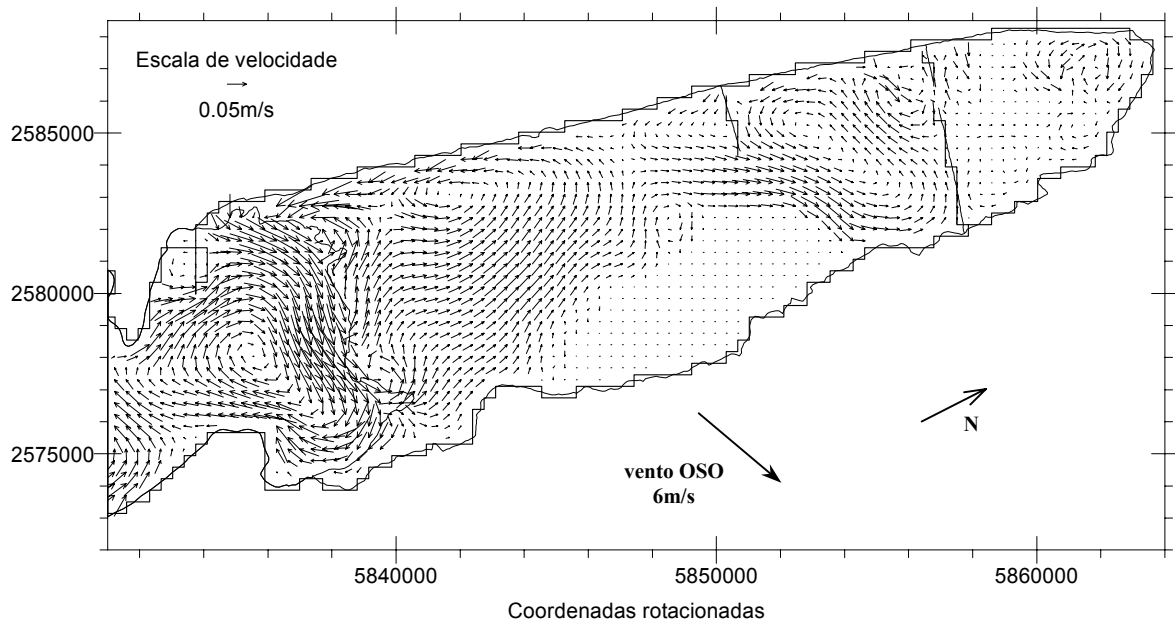


Figura 5.46. Campo de velocidades no banhado do Taim, reduzindo em 80% a tensão do vento sobre o banhado ($c_{red} = 0,2$), após 4 dias de simulação.

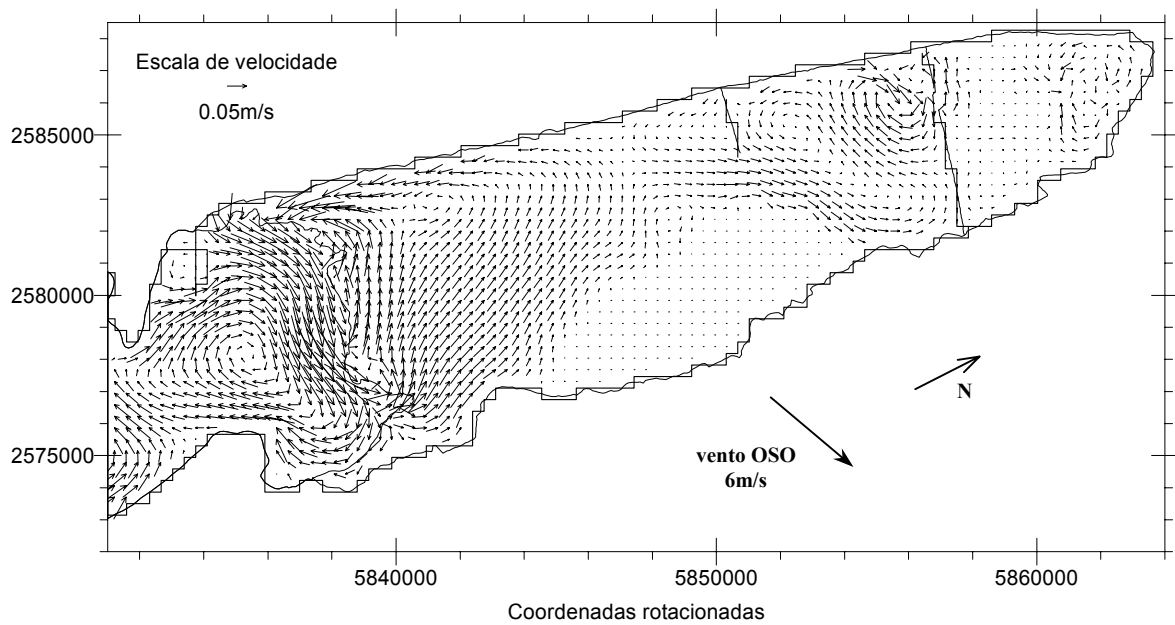


Figura 5.47. Campo de velocidades no banhado do Taim, reduzindo em 90% a tensão do vento sobre o banhado ($c_{red} = 0,1$), após 4 dias de simulação.

6 SIMULAÇÕES HIDRODINÂMICAS DO BANHADO DO TAIM

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são descritas as simulações realizadas com o objetivo de verificar o comportamento hidrodinâmico do sistema formado pela lagoa Mangueira e pelo banhado do Taim, com maior ênfase sobre o último, quanto a vários fatores, como: a influência da variação do nível da água na lagoa Mangueira sobre o banhado, o efeito deste sobre a seiche provocada pelo vento na lagoa e o impacto de diferentes distribuições espaciais da vegetação presente no Taim.

As simulações foram agrupadas em quatro partes, conforme o enfoque dado: (i) a primeira se refere à operação das comportas de saída do banhado; (ii) na segunda, simulou-se o banhado impondo uma condição de contorno de nível tipo pulso; (iii) a atuação de um vento constante e a questão da seiche na lagoa Mangueira foram abordadas na terceira parte e, por fim, (iv) diversos casos foram simulados, correspondendo a diferentes configurações de vegetação no banhado, constituindo a quarta parte. Em todas as simulações, o comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim foi avaliado para um período de tempo de até 4 dias, considerado suficiente para o objetivo desta pesquisa.

Para cada parte, são apresentadas as considerações relativas às simulações, os valores dos parâmetros e as condições iniciais e de vento, sendo, em seguida, mostrados os resultados com as respectivas análises. De certa forma, apesar do enfoque de cada grupo de simulações ser direcionado para um determinado ponto de interesse, também foram avaliados os demais aspectos, sempre que possível.

6.2 OPERAÇÃO DAS COMPORTAS

6.2.1 Descrição das simulações

A operação das comportas de saída do banhado para a lagoa Mirim, localizadas ao norte daquele, próximas à lagoa Nicola (figura 2.4), constitui uma das medidas possíveis de serem adotadas, para o gerenciamento dos níveis do banhado, a fim de evitar a inundação prolongada e em excesso ou a redução para níveis muito baixos. Na tentativa de verificar qual o impacto da referida operação sobre o comportamento hidrodinâmico do sistema Mangueira-

Taim, algumas simulações foram realizadas considerando uma situação onde as comportas são mantidas abertas, com uma determinada vazão de saída, constante no tempo. Duas vazões foram analisadas: $5 \text{ m}^3/\text{s}$, que representa uma estimativa da vazão de saída nas condições atuais das comportas, e $50 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondente a um valor extremo.

No modelo IPH-A, a vazão que sai pelas comportas foi representada por uma condição de contorno aberta de velocidade, imposta a um único elemento da malha, cujo comprimento e cota do fundo serviram de base para estimar a velocidade a ser imposta, de modo a obter uma vazão em torno daquela desejada. Além disso, as cotas de alguns elementos da malha foram rebaixadas, na tentativa de representar o canal que se formou da lagoa Nicola em direção às comportas.

Nas simulações, adotou-se, como condições de vento, a série com predominância em torno da direção Sudoeste, apresentada no capítulo 5 (figura 5.17), e foram considerados os seguintes valores para os parâmetros: coeficiente de viscosidade turbulenta igual a $10 \text{ m}^2/\text{s}$; coeficiente de ajuste do vento igual a $3,0\text{E}-6$; coeficiente de Manning com valores 0,4, para as regiões consideradas com vegetação, e 0,02, para as demais; coeficiente redutor da ação do vento igual a 0,2 para as áreas com vegetação e 1,0 para as demais. Como condições iniciais, considerou-se o nível classificado como alto (cota 3,40 m), e velocidade do escoamento nula em todos os elementos da malha numérica.

Para análise de níveis e velocidades durante as simulações, foram selecionados 12 pontos (figura 6.1), espacialmente distribuídos ao longo do sistema Mangueira-Taim.

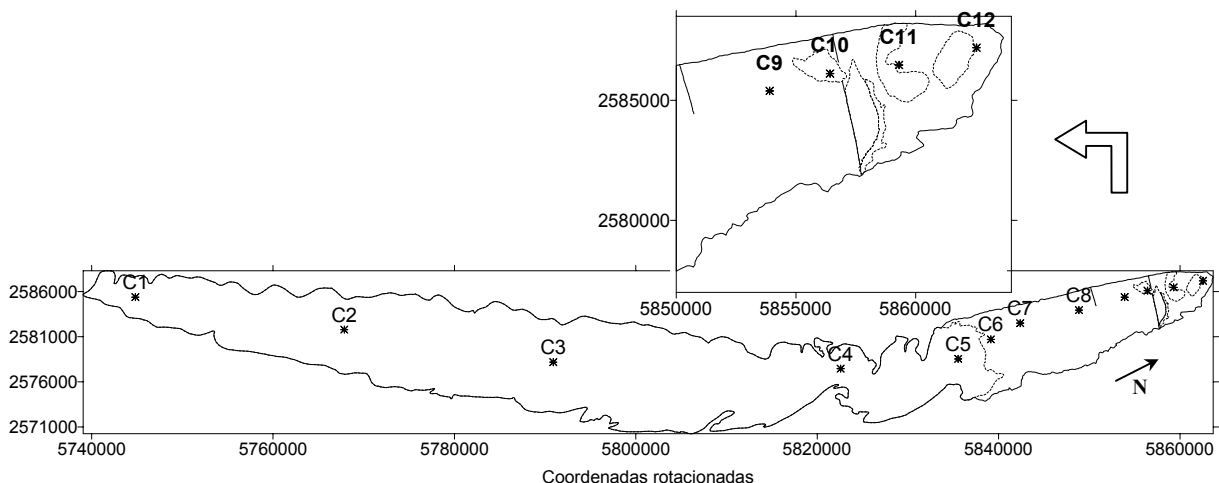


Figura 6.1. Localização dos pontos de análise de níveis e velocidades, com detalhe da região norte do banhado.

6.2.2 Análise dos resultados

A abertura das comportas e a imposição de uma velocidade constante de saída não alteraram o padrão de circulação da água no sistema Mangueira-Taim, durante os 4 dias

simulados, em relação à situação com as comportas fechadas, nem mesmo na região norte do banhado. O comportamento das velocidades ao longo das simulações foi idêntico nos três casos considerados, sendo os gráficos correspondentes omitidos aqui, para não estender o texto.

Para a vazão de saída em torno de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, obteve-se a mesma oscilação do nível da água no sistema modelado da observada sem a abertura das comportas (figuras 6.2 e 6.3). Considerando a vazão de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, o volume de água perdido acarretou um rebaixamento de cerca de 10 cm, e restrito à região norte do banhado, como na lagoa Nicola, por exemplo (figura 6.3). Considerando períodos curtos de tempo, como 2 a 4 dias, que constituem o enfoque deste trabalho, tal rebaixamento pode ser considerado pequeno, no que diz respeito à influência sobre a hidrodinâmica do sistema Mangueira-Taim.

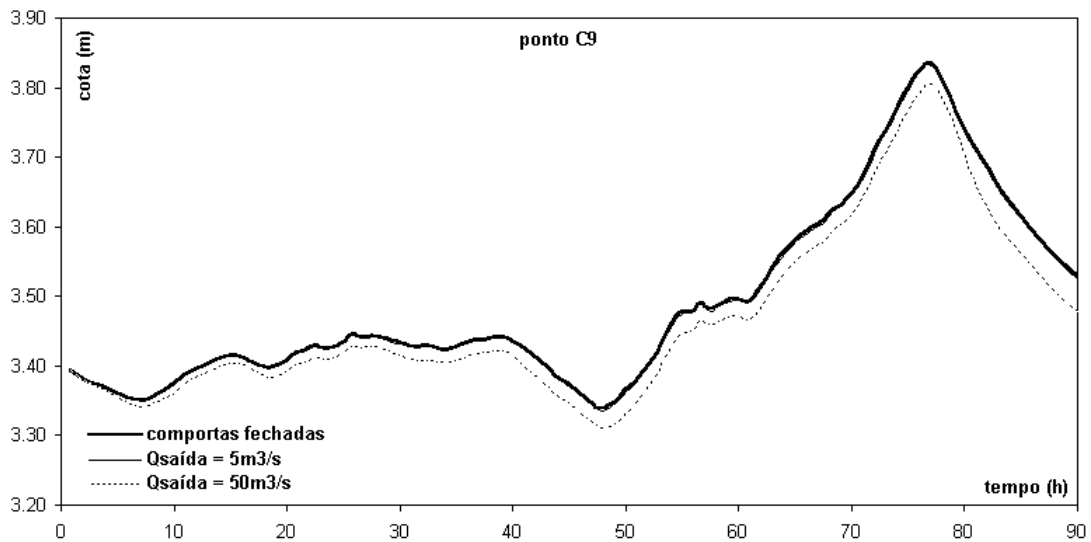


Figura 6.2. Nível no banhado do Taim (ponto C9), durante simulações com operação das comportas.

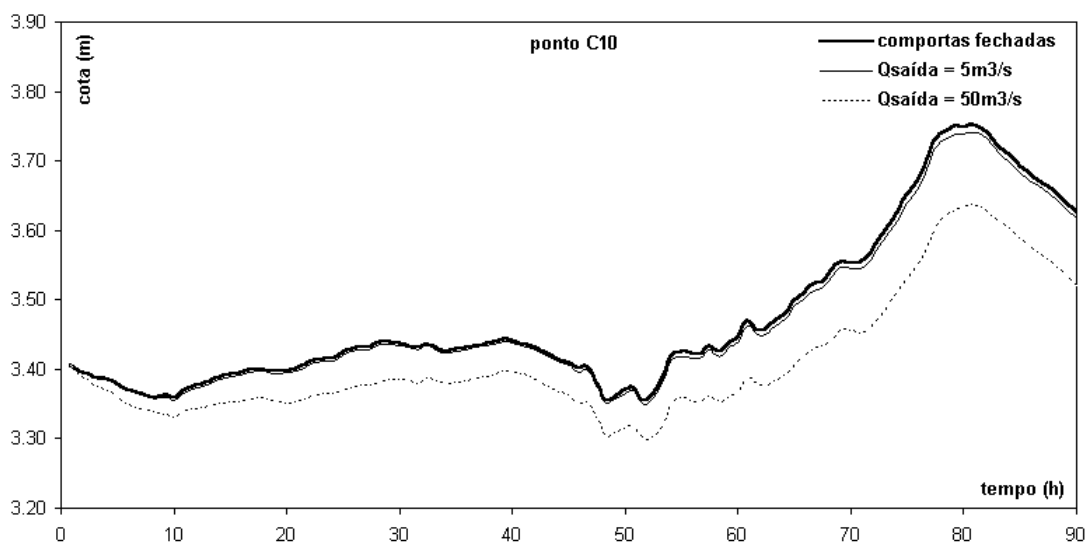


Figura 6.3. Nível no banhado do Taim (ponto C10), durante simulações com operação das comportas.

Pela própria capacidade física, a vazão de saída pelas comportas é estimada em torno de $5 \text{ m}^3/\text{s}$, que, segundo os resultados apresentados aqui, não tem influência significativa no comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim. Desse modo, conclui-se que a consideração das comportas fechadas representa uma simplificação pouco importante na modelagem da hidrodinâmica do referido sistema, para períodos curtos de simulação.

6.3 CONDIÇÃO DE CONTORNO TIPO PULSO

6.3.1 Descrição das simulações

A ação direta do vento e a variação dos níveis de água na lagoa Mangueira constituem os principais agentes governantes da circulação da água no banhado do Taim. Dotada de uma área bastante extensa e sem o efeito protetor proporcionado pela vegetação, a lagoa é mais suscetível à ação do vento do que o banhado, ocorrendo grandes variações do nível d'água (da ordem de dezenas de centímetros) que, por sua vez, têm influência sobre o escoamento do banhado. Entretanto, a presença de vegetação no banhado, acarretando uma grande resistência ao fluxo, é um fator inibidor do efeito de elevação ou redução do nível da lagoa sobre o mesmo.

Com o intuito de avaliar o quanto o banhado está influenciado pela variação do nível na lagoa e o quanto a vegetação do banhado do Taim contribui para minimizar tal efeito, algumas simulações foram realizadas impondo uma variação de níveis na lagoa, caracterizada por um pulso, da forma mostrada na figura 6.4. Durante a primeira hora de simulação, o nível permanece constante na cota 2,90 m (equivalente ao nível “médio” do banhado), elevando-se em seguida até a cota 3,47 m, em 2,4 h, e retornando à cota inicial em igual intervalo de tempo, onde permanece até completar 60 h de simulação. A idéia foi verificar a propagação de um pulso no banhado, simulando a ocorrência de uma variação abrupta do nível da água no extremo norte da lagoa Mangueira.

As simulações foram feitas com o contorno do banhado do Taim considerando a parte norte da lagoa Mangueira (contorno da figura 5.4-b), a cujo extremo sul é imposta a variação de nível como condição de contorno aberta. Desprezou-se a ação do vento e a força de Coriolis, de modo a limitar a circulação da água no banhado à causada pela condição de contorno. As demais condições adotadas foram: coeficiente de viscosidade turbulenta igual a $10 \text{ m}^2/\text{s}$ (valor médio citado na literatura) e nível inicial em toda a região modelada constante na cota 2,90 m, além de velocidade inicial nula em todos os elementos da malha numérica.

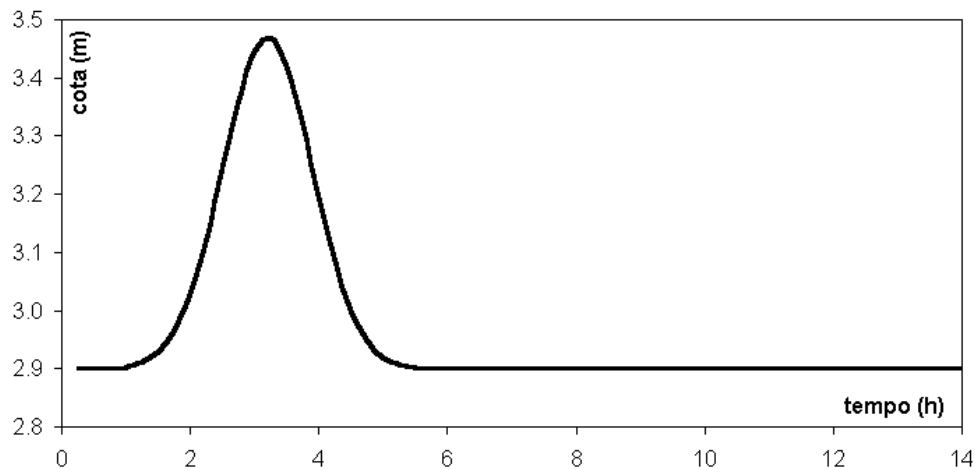


Figura 6.4. Condição de contorno de nível imposta para a simulação do banhado do Taim.

Quanto ao coeficiente de rugosidade de Manning, fez-se a distinção entre as áreas relativas às lagoas Nicola, Jacaré e Mangueira (n_1) e as demais partes do banhado (n_b), consideradas com forte presença de vegetação, através da adoção de dois valores. Para as lagoas, usou-se um coeficiente de Manning $n_1 = 0,02$, enquanto que, para as demais áreas, foram empregados três valores de n_b : 0,02, 0,1 e 0,4. O primeiro deles representa a ausência de vegetação, caracterizando o banhado como uma lagoa, ao passo que os outros dois indicam a resistência provocada pela vegetação, em duas intensidades diferentes. Tais valores foram escolhidos em função dos resultados obtidos no capítulo 5 e dos valores citados na literatura.

6.3.2 Análise dos resultados

A figura 6.6 mostra o comportamento do nível ao longo do tempo, em diversos pontos do sistema modelado, especialmente distribuídos conforme mostrado na figura 6.5. De forma geral, os resultados mostraram que o banhado do Taim está sujeito à variação de níveis na lagoa Mangueira, por constituírem um sistema integrado, embora isso seja minimizado pelo efeito da vegetação. O impacto desta sobre o pulso, que se propaga a partir da condição de contorno, é muito intenso, sendo observados dois efeitos principais: o amortecimento e o retardo.

Na tabela 6.1, é apresentado o tempo que o pico do pulso levou para atingir determinados pontos do banhado e a respectiva cota, para os três valores do coeficiente n_b considerados, além das variações percentuais relativas ao caso de n_b igual a 0,02. Segundo a referida tabela, na região do ponto A2, distante cerca de 7,1 km da condição de contorno aberta, ocorreu um retardo de 14,3% e 46,6% na chegada do pulso, para as situações considerando n_b igual a 0,1 e 0,4, respectivamente, em relação à simulação com o valor de

0,02 para tal coeficiente. Esse percentual sobe para 55,9%, para n_b igual a 0,1, e 139,8%, para o valor de 0,4, considerando o ponto A5, localizado a cerca de 14 km da fronteira aberta.

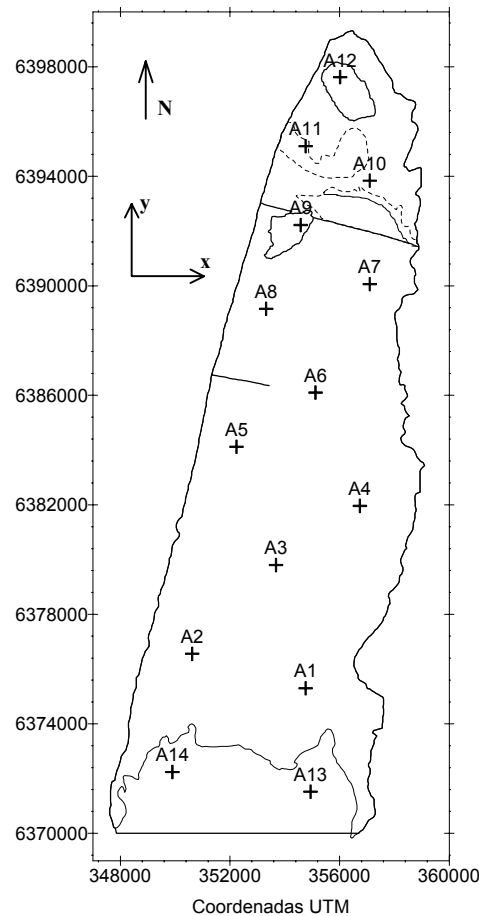


Figura 6.5. Localização dos pontos de verificação de nível e velocidade ao longo das simulações.

Tabela 6.1. Características do pico do pulso em alguns pontos.

n_b	ponto A2				ponto A5			
	tempo do pico - tp ⁽¹⁾		altura do pico - hp ⁽²⁾		tempo do pico - tp ⁽¹⁾		altura do pico - hp ⁽²⁾	
	tp (h)	Δtp (%) ⁽³⁾	hp (m)	Δhp (%) ⁽⁴⁾	tp (h)	Δtp (%) ⁽³⁾	hp (m)	Δhp (%) ⁽⁴⁾
0.02	3.50	-	0.42	-	4.17	-	0.27	-
0.10	4.00	14.3	0.23	-45.2	6.50	55.9	0.05	-81.5
0.40	5.13	46.6	0.07	-83.3	10.00	139.8	0.01	-96.3

⁽¹⁾ tempo de chegada do pico do pulso no ponto correspondente.

⁽²⁾ altura do pico do pulso no ponto correspondente, tendo como referencial a cota 2,90m.

^{(3),(4)} variação percentual do tempo e da altura do pico, respectivamente, em relação à situação com $n_b = 0,02$.

Adotando um valor de 0,4, o pulso já fora praticamente amortecido por completo, na altura do ponto A5, sendo registrado apenas 1cm de elevação do nível por volta das 10 h de simulação. Aliás, para esse valor do coeficiente de Manning no banhado, nas imediações do ponto A3, o pulso já foi quase totalmente dissipado, o que só ocorreu próximo ao ponto A6, para o caso do n_b igual a 0,1. Na situação dada como sem vegetação, a variação do nível imposta como condição de contorno ainda alcançou a região mais ao norte do banhado, embora praticamente amortecida.

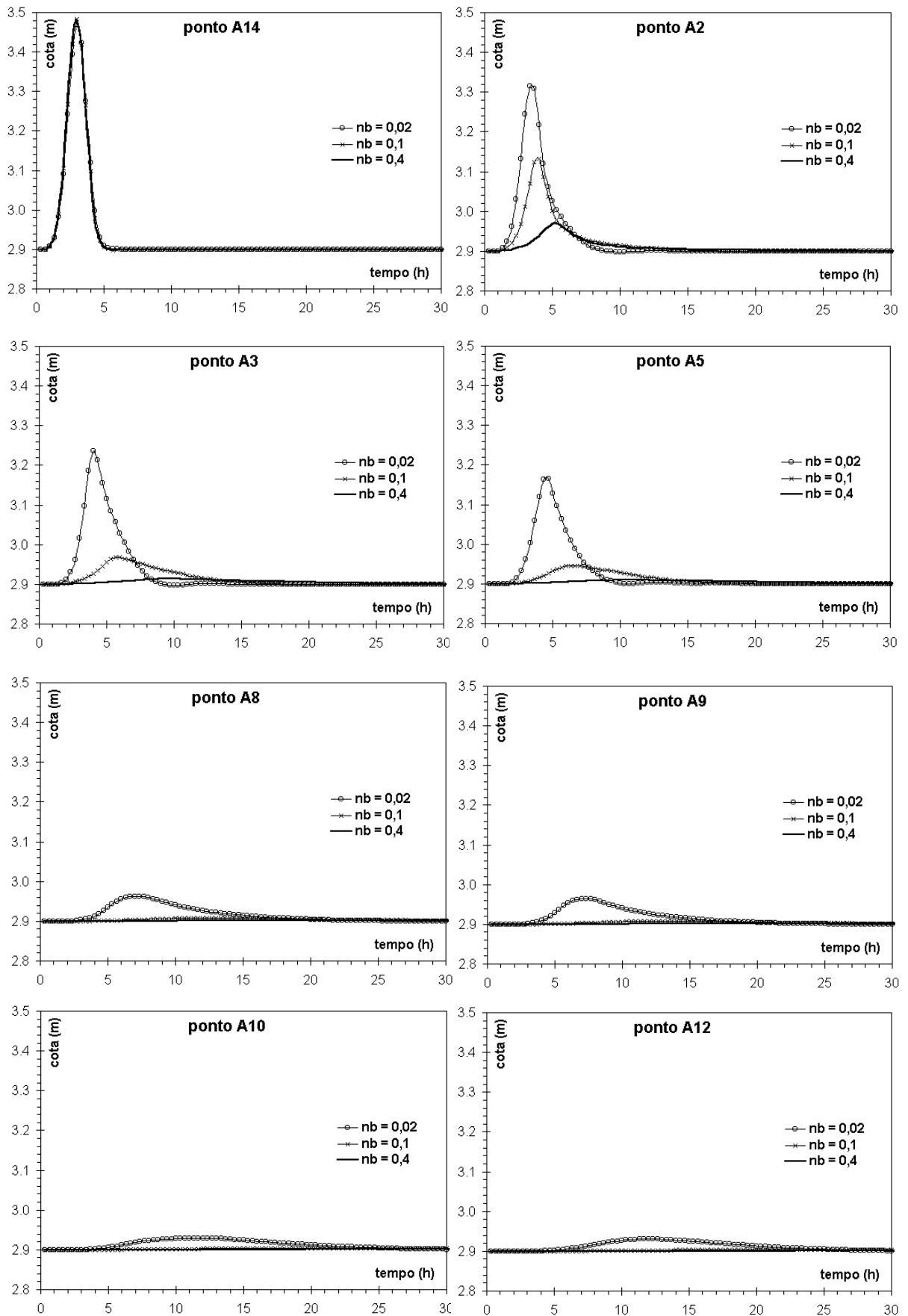


Figura 6.6. Evolução do nível ao longo do tempo durante as simulações com condição de contorno tipo pulso, em vários pontos.

O pulso provocou um escoamento predominantemente no sentido sul-norte do banhado, como ilustram as figuras 6.7 e 6.8, caracterizado por uma inversão do sentido do fluxo após a passagem daquele. Nas mesmas figuras, observa-se como a presença de vegetação, representada no modelo pelos coeficientes de Manning 0,1 e 0,4, reduziu a velocidade do escoamento, a medida que a onda se deslocava na direção norte do banhado. A partir da região onde está localizado o ponto A3, as velocidades correspondentes às simulações com tais valores do coeficiente de Manning ficaram abaixo de 0,02 m/s, enquanto que, para o caso considerado sem vegetação, velocidades em torno de 0,25 m/s ainda foram observadas na área do ponto A5, e valores por volta de 0,10 m/s no ponto A8.

É interessante constatar como uma maior resistência ao escoamento no banhado fez com que a componente da velocidade na direção N-S, na parte norte da lagoa Mangueira, fosse reduzida. Pelo gráfico referente ao ponto A14 (figura 6.7), observa-se que as velocidades máximas, durante a passagem do pulso, foram 0,37 m/s, 0,22 m/s e 0,13 m/s para os casos de n_B iguais a 0,02, 0,1 e 0,4, respectivamente. Isso traduz como a vegetação, ao impor uma resistência adicional à circulação da água, inibiu o fluxo afluyente ao banhado, repercutindo no expressivo amortecimento da elevação dos níveis, já comentado.

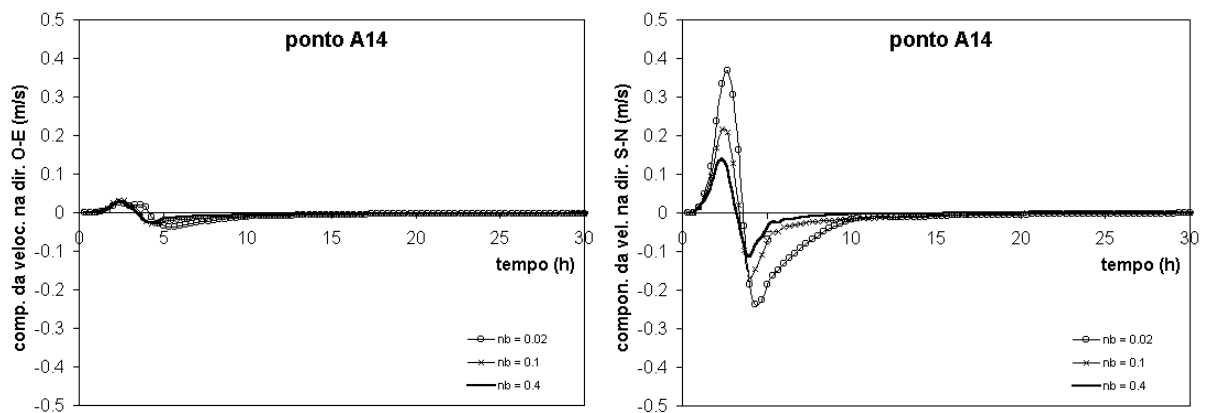


Figura 6.7. Variação no tempo das componentes da velocidade do escoamento no ponto A14.

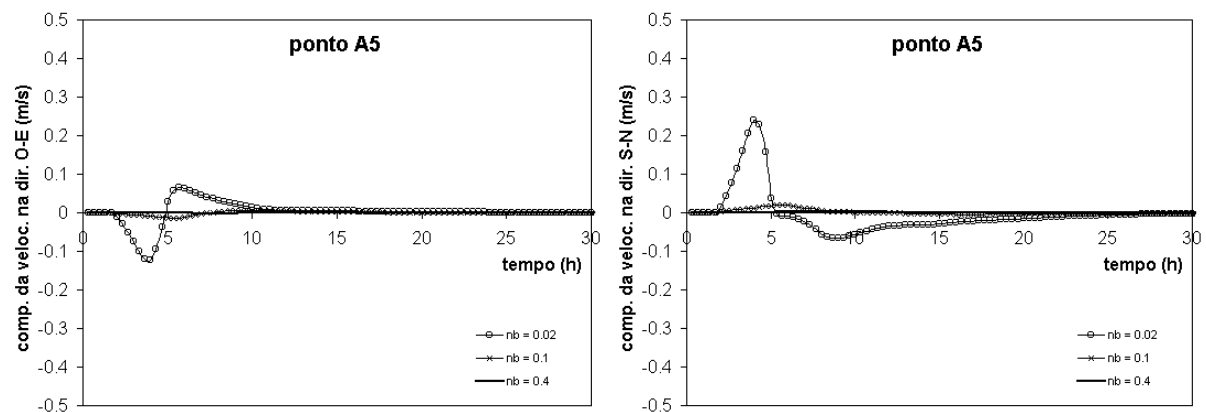


Figura 6.8. Variação no tempo das componentes da velocidade do escoamento no ponto A5.

A variação do nível da água na lagoa Mangueira, do modo como foi imposto nas simulações aqui analisadas, sob a forma do pulso mostrado na figura 6.4, retrata uma situação idealizada. Porém, como tal condição de contorno representa uma variação de níveis na lagoa de forma mais brusca e intensa do que a natural, e os resultados mostraram que a vegetação atua amortecendo a primeira, pode-se concluir que o mesmo acontece para a oscilação natural da lagoa.

6.4 VENTO CONSTANTE E SEICHE DA LAGOA MANGUEIRA

6.4.1 Descrição dos casos simulados

Neste item, procurou-se estudar o comportamento hidrodinâmico do sistema formado pela lagoa Mangueira e pelo banhado do Taim, sob a atuação de um vento constante, durante dois dias, além da seiche da lagoa Mangueira.

A fim de avaliar a influência do banhado sobre a seiche na lagoa, duas situações foram simuladas: na primeira, considerou-se todo o sistema Mangueira-Taim, enquanto que, na segunda, apenas a lagoa Mangueira foi simulada, impondo uma condição de contorno fechada na interface com o banhado. A idéia é comparar a situação real, onde a lagoa Mangueira está integrada ao Taim, como um sistema único, da situação na qual a lagoa é isolada, como se não existisse o banhado ou que este não fosse integrado àquela.

Para provocar a seiche, impôs-se uma condição de vento uniforme e constante durante 2 dias, a qual é bruscamente interrompida, sendo seguida por 10 dias sem vento, totalizando 12 dias de simulação. A inclinação da superfície da água, resultante da ação do vento nos 2 dias iniciais, dá origem à oscilação da mesma (seiche), tão logo o vento cessa.

Foram analisadas as seiches resultantes de diferentes condições de vento inicial, conforme os casos explicitados na tabela 6.2, lembrando que cada um deles foi simulado tanto para o sistema Mangueira-Taim como para a lagoa Mangueira, isoladamente.

A distribuição da frequência de ocorrência do vento, referente aos dados disponíveis, motivou a escolha dos ventos OSO e ENE, os quais caracterizam duas situações opostas, na medida em que o primeiro atua no sentido lagoa-banhado e o segundo no sentido inverso. O vento empregado no caso S5 tem direção alinhada com a lagoa Mangueira, cuja orientação forma, aproximadamente, ângulo de 33° com a direção Norte, e constitui, portanto, a situação de maior influência da ação do vento sobre a mesma (maior *fetch*).

À exceção do caso S1, cuja velocidade do vento é de 21,6 km/h, classificado como moderado, em todos os demais se impôs um vento de velocidade igual a 32,4 km/h,

dado como forte, segundo classificação adotada no capítulo 5. Embora ventos mais fortes sejam observados na região, tais velocidades foram adotadas levando em conta que o vento permanece constante durante 2 dias seguidos, e não apenas como rajadas de curto período de duração.

Tabela 6.2. Casos simulados para analisar a seiche na lagoa Mangueira.

casos	velocidade do vento (km/h)	direção do vento ⁽¹⁾		nível da água ⁽³⁾
		graus ⁽²⁾	símbolo	
S1	21.6	247.5	OSO	médio
S2	32.4	247.5	OSO	médio
S3	32.4	247.5	OSO	alto
S4	32.4	67.5	ENE	médio
S5	32.4	213	SSO-SO ⁽⁴⁾	médio

⁽¹⁾ Direção de origem do vento.

⁽²⁾ Ângulo medido em relação ao Norte, no sentido horário.

⁽³⁾ Classificação feita no capítulo 5, item 5.5, deste texto.

⁽⁴⁾ Vento com direção entre SSO e SO.

Em função do nível da água adotado na simulação, o banhado do Taim apresenta diferentes áreas consideradas “molhadas” e “secas”, conforme comentado no capítulo 5 (figura 5.15). As situações S2 e S3 distinguem entre si apenas quanto ao nível da água em torno do qual ocorre a variação durante a simulação, na tentativa de identificar se esse fator tem alguma contribuição efetiva em relação à seiche da lagoa Mangueira e à influência do banhado sobre a mesma. Na simulação S3, adotou-se o nível alto (nível da água na cota 3,4 m) como condição inicial de simulação, enquanto que, no caso S2 e nos demais, a cota do nível inicial foi estabelecida em 2,9 m, considerada nível médio.

As lagoas Nicola, Jacaré e Mangueira foram distinguidas das demais regiões do banhado, através da adoção de dois coeficientes de rugosidade do fundo e redutor da ação do vento: coeficiente de Manning igual a 0,02 para as lagoas (n_l) e 0,1 para o restante do banhado (n_b), enquanto o coeficiente redutor da ação do vento tem valor unitário para aquelas e é igual a 0,2 para o último.

A questão da consideração de coeficientes específicos para as áreas com vegetação proporcionou a definição de mais um caso simulado. Com as mesmas condições de nível e de vento estabelecidos para a situação S5, simulou-se o sistema Mangueira-Taim atribuindo um coeficiente de Manning uniforme e igual a 0,02 e sem reduzir a ação do vento. Tal situação representa um cenário onde o banhado do Taim não apresenta vegetação, o que pode ser provocado pela manutenção de um nível da água muito elevado ou muito reduzido, resultante da falta de um gerenciamento adequado.

As demais condições de simulação, adotadas em comum em todos os casos, foram: coeficiente de viscosidade turbulenta com valor igual a $10 \text{ m}^2/\text{s}$; coeficiente de arraste

do vento (C_v) igual a $3E-6$; parâmetro de Coriolis referente à latitude de $33^\circ S$; espaçamento da malha de 360 m e passo de tempo de cálculo igual a 60 s.

6.4.2 Análise dos resultados: vento constante

Como o banhado do Taim constitui, efetivamente, o objeto de estudo desta pesquisa, os resultados serão analisados tendo como enfoque principal a comparação, para cada caso, entre as simulações dos dois sistemas considerados, sob as diferentes condições de vento.

A primeira análise dos resultados pode ser feita com base na inclinação da superfície da água da lagoa Mangueira após as 48 h de vento constante, nas situações com e sem banhado, para os diversos casos. Os pontos C1 e C5 (figura 6.1), por se situarem próximos aos limites sul e norte da lagoa, respectivamente, foram tomados como referência para avaliar a inclinação da superfície da mesma, como apresentado na tabela 6.3. Em todos os casos, observou-se que o desnível da lagoa provocado pela ação contínua do vento, nos dois primeiros dias, foi independente da consideração do banhado do Taim ou não, isto é, simulando a lagoa em conjunto com o banhado ou simplesmente a lagoa, impondo um contorno fechado no limite norte, ocasionou a mesma diferença entre os níveis das porções norte e sul da lagoa. Nas figuras 6.9 a 6.13, são apresentadas as curvas indicando a variação do nível nos pontos C1, C3 e C5, durante as 48 h iniciais, relativas aos diversos casos simulados.

Tabela 6.3. Inclinação da superfície da água da lagoa Mangueira após 48h de vento constante.

caso	sistema modelado	cota (m)		desnível ⁽¹⁾
		ponto C1	ponto C5	(m)
S1	sistema Mang.-Taim	2.72	2.94	0.22
	lagoa Mangueira	2.73	2.96	0.22
S2	sistema Mang.-Taim	2.55	3.05	0.51
	lagoa Mangueira	2.58	3.09	0.50
S3	sistema Mang.-Taim	3.12	3.56	0.44
	lagoa Mangueira	3.17	3.61	0.44
S4	sistema Mang.-Taim	3.13	2.63	-0.50
	lagoa Mangueira	3.13	2.63	-0.50
S5	sistema Mang.-Taim	2.48	3.11	0.63
	sistema Mang.-Taim (sem veget.)	2.42	3.05	0.63
	lagoa Mangueira	2.53	3.16	0.63

⁽¹⁾ Diferença entre as cotas dos pontos C5 e C1.

Como foi suposto, o vento com direção alinhada com a lagoa Mangueira (caso S5) proporcionou o maior desnível (63 cm), cerca de 13 cm ou 26% de aumento em relação aos ventos OSO (caso S2) e ENE (caso S4) de igual intensidade, cujas diferenças de níveis entre as regiões norte e sul foram iguais a 50 cm, com inclinações opostas entre si. O aumento da

velocidade do vento de 21,6 km/h para 32,4 km/h (50% de acréscimo), acarretou um desnível 127% maior, tomando os casos S1 e S2 para comparação, cujos desníveis foram iguais a 22 e 50 cm, respectivamente.

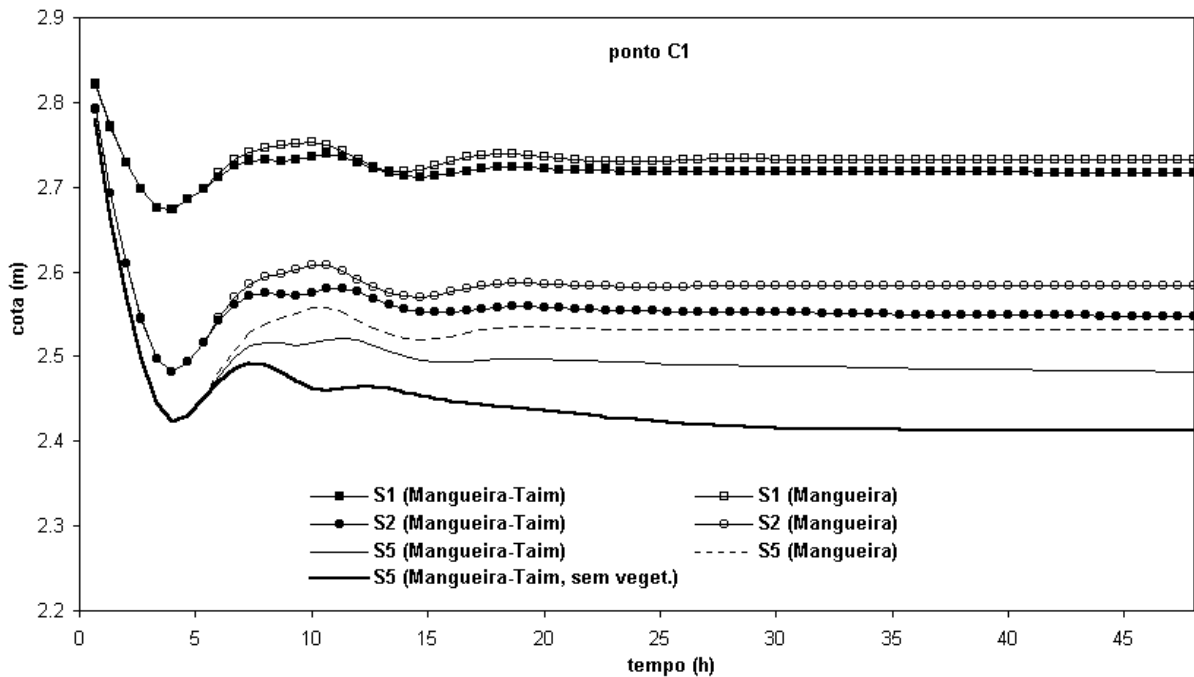


Figura 6.9. Nível da água no ponto C1, para os casos S1, S2 e S5, ao longo das 48h de vento constante.

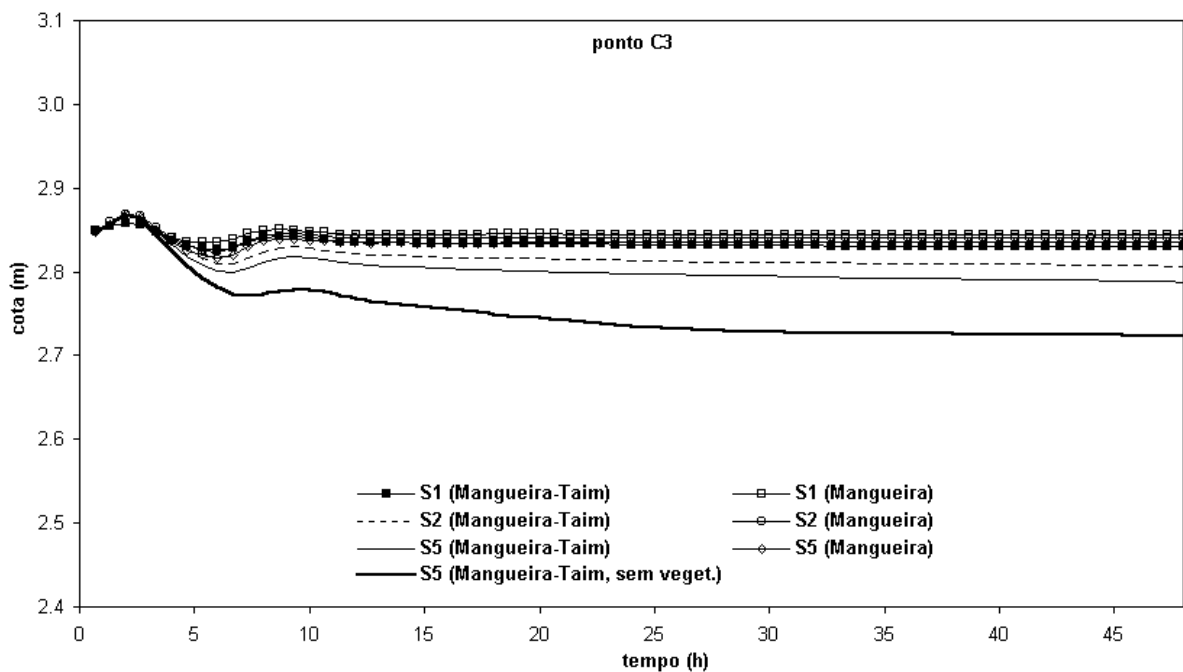


Figura 6.10. Nível da água no ponto C3, para os casos S1, S2 e S5, ao longo das 48h de vento constante.

Ainda baseado nos resultados apresentados na tabela 6.3, observa-se que as mesmas condições de vento, quando aplicadas aos dois sistemas com um nível d'água alto (caso S3, figura 6.12), ocasionaram menor inclinação da superfície da água do que com um

nível médio (caso S2, figuras 6.9 e 6.11), mostrando como a ação do vento teve maior impacto sobre águas mais rasas. Isto significa que menores profundidades proporcionaram maior influência da atuação do vento sobre a coluna d'água, embora, em tal caso, o efeito da rugosidade do fundo também fosse mais importante.

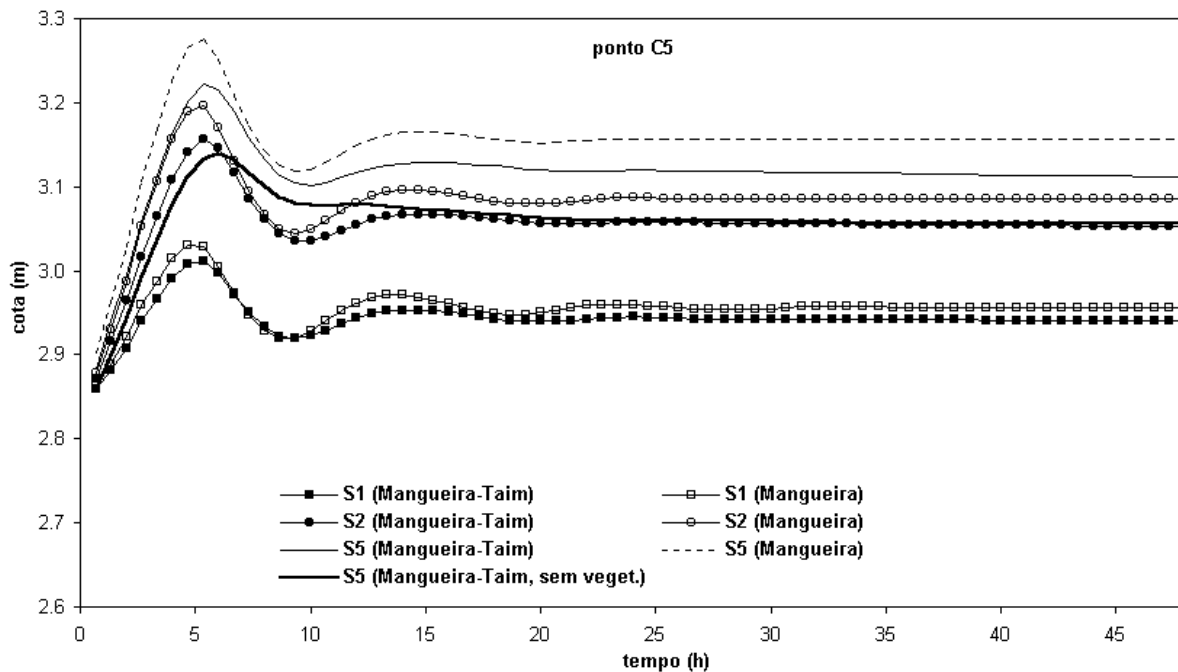


Figura 6.11. Nível da água no ponto C5, para os casos S1, S2 e S5, ao longo das 48h de vento constante.

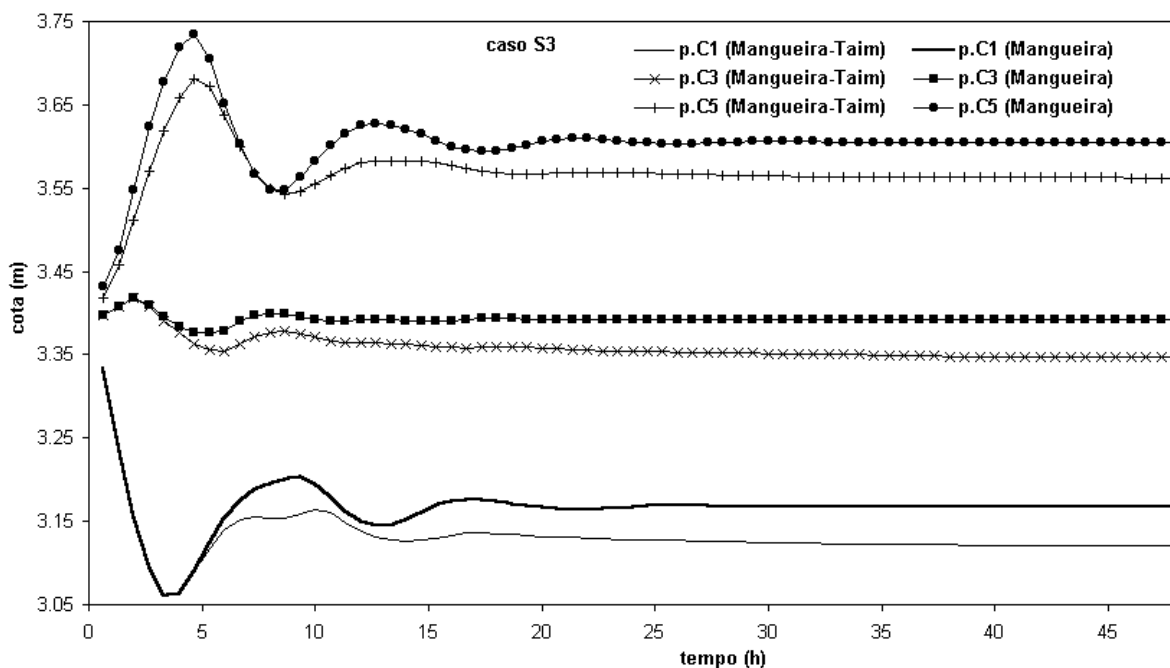


Figura 6.12. Nível da água nos pontos C1, C3 e C5, para o caso S3, ao longo das 48h de vento constante.

Os resultados das simulações dos dois sistemas diferiram apenas no sentido de que, quando considerada isoladamente, a lagoa Mangueira manteve o nível alguns centímetros

acima daquele observado quando em conjunto com o banhado, para os casos cujo vento atuava forçando o fluxo no sentido da lagoa para o banhado (S1, S2, S3 e S5). Na situação S4, com vento ENE, tanto o nível no ponto C1 como no ponto C5 alcançaram o mesmo valor nas duas situações em questão, após 48 h.

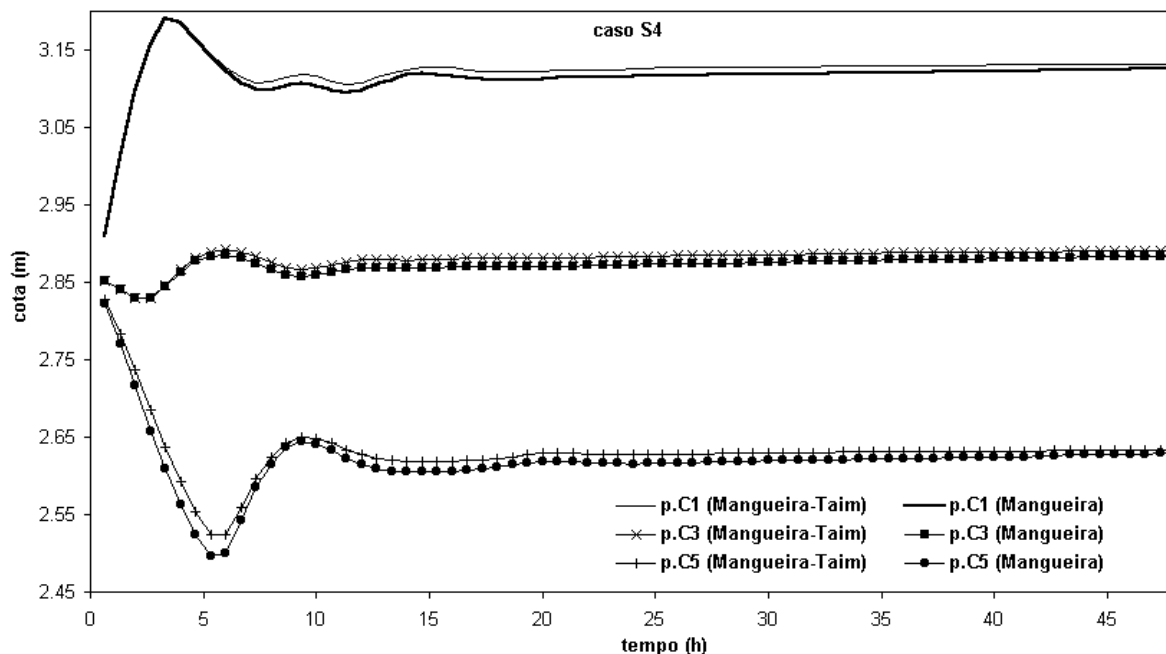


Figura 6.13. Nível da água nos pontos C1, C3 e C5, para o caso S4, ao longo das 48h de vento constante.

Entretanto, embora ocorrera a afluência de água da lagoa para o banhado, no caso da simulação do sistema completo e vento favorável (S1, S2, S3 e S5), a troca de volume de água da lagoa para o banhado ocasionou uma diminuição nos níveis da primeira da ordem de 5 cm, relativamente às simulações da lagoa isolada, como pode ser visto na figura 6.12, para o caso S3, por exemplo. Quando o vento atuou com sentido contrário, como no caso S4 (figura 6.13), nenhuma diferença foi constatada. A resistência ao escoamento proporcionada pela vegetação fez com que, no caso S4, com vento de sentido banhado-lagoa, o volume de água “perdido” do banhado para a lagoa fosse tão pequeno a ponto de não influenciar os níveis nesta. Em outras palavras, apesar da vegetação desempenhar um papel importante no escoamento em todas as simulações, isso ficou ainda mais evidente durante a ação de um vento no sentido ENE (banhado-lagoa).

Observando os resultados referentes à simulação do sistema Mangueira-Taim, no caso S5 (figuras 6.9 e 6.11), verificou-se que a consideração do banhado sem vegetação acarretou o mesmo desnível entre os extremos da superfície da água da lagoa Mangueira, com relação à situação considerando vegetação. Porém, sem a resistência proporcionada pela vegetação, o volume de água trocado entre a lagoa e o banhado foi maior, levando ao

rebaixamento de cerca de 6 cm da superfície da água da lagoa, em relação ao caso onde a vegetação foi considerada, e de 11 cm, relativo à simulação da lagoa isolada.

A constatação anterior indica que a resistência à circulação da água provocada pela vegetação presente no banhado (representada na modelagem pelo coeficiente de Manning de valor 0,1) e o efeito protetor contra a ação do vento que a mesma proporciona (representado pelo coeficiente redutor igual 0,2) inibiu bastante a afluência de água da lagoa Mangueira para o Taim, e mais ainda o fluxo no sentido inverso.

6.4.3 Análise dos resultados: seiche da lagoa Mangueira

A comparação entre as seiches da lagoa Mangueira nos diversos cenários, as quais têm início após as 48h de simulação, quando o vento, outrora constante, cessa repentinamente, permite estabelecer o segundo tipo de análise. Com a interrupção da ação do vento, o estado de equilíbrio alcançado é quebrado, produzindo-se um fluxo no sentido inverso. A inclinação resultante da superfície da água tem a forma contrária à do equilíbrio e de menor valor que esta. Em seguida, ocorre nova inversão do fluxo, e a inclinação volta a ser no sentido da inicial, quando sob ação do vento, mas, agora, resultando menor desnível. Esse processo, que caracteriza a seiche, é dissipativo e prossegue até o total amortecimento da oscilação, quando o nível permanece constante na horizontal.

De modo geral, observou-se um rápido amortecimento da amplitude de oscilação dos níveis, logo ao final da primeira inversão do fluxo, cuja inclinação resultante é reduzida à cerca de 1/3 da original, por volta das 52 h de simulação (figuras 6.14 a 6.16). As oscilações subsequentes são muito pequenas e logo se tornam desprezíveis, sendo inferiores a 5 cm.

As curvas apresentadas nas figuras 6.14 a 6.16 mostram a oscilação do nível da água ao longo do tempo, em alguns pontos da lagoa, referente às simulações do caso S5, a partir das 48 h de simulação, quando o vento pára. Constatou-se que a região central da lagoa, nas imediações do ponto C3, tem o nível pouco alterado, levando a concluir que as seiches analisadas se aproximam do tipo uninodal, com um período de oscilação em torno de 9 h (estimado a partir dos gráficos das figuras citadas). Este valor está razoavelmente próximo do valor de 10,2 h, estimado pela equação de Meriam (equação 3.23), considerando um comprimento de 100 km e uma profundidade média de 3 m.

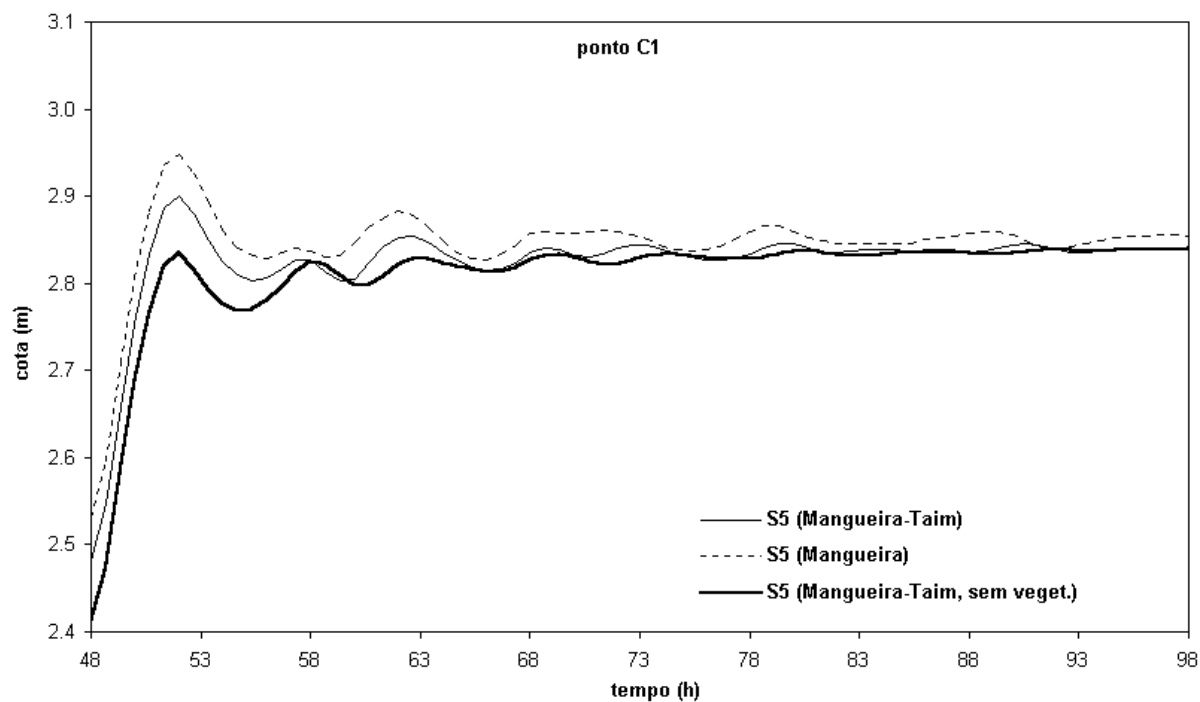


Figura 6.14. Nível da água no ponto C1, para o caso S5, a partir do instante em que o vento pára, após 48h constante.

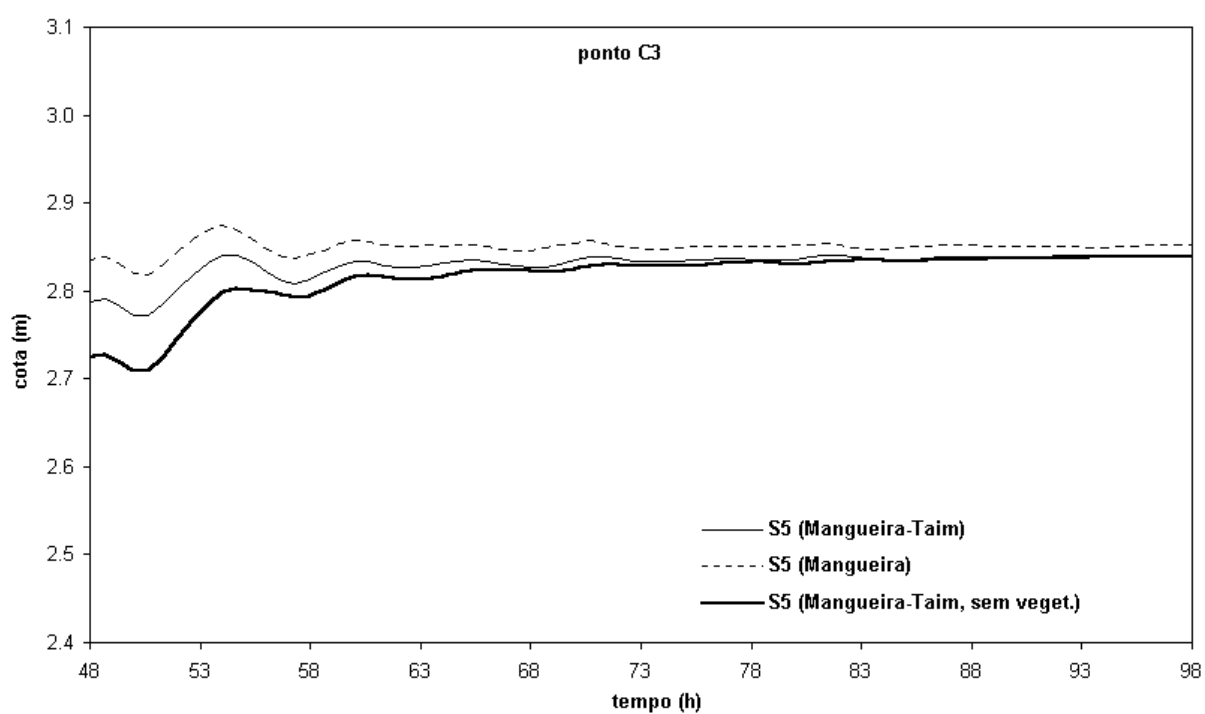


Figura 6.15. Nível da água no ponto C3, para o caso S5, a partir do instante em que o vento pára, após 48h constante.

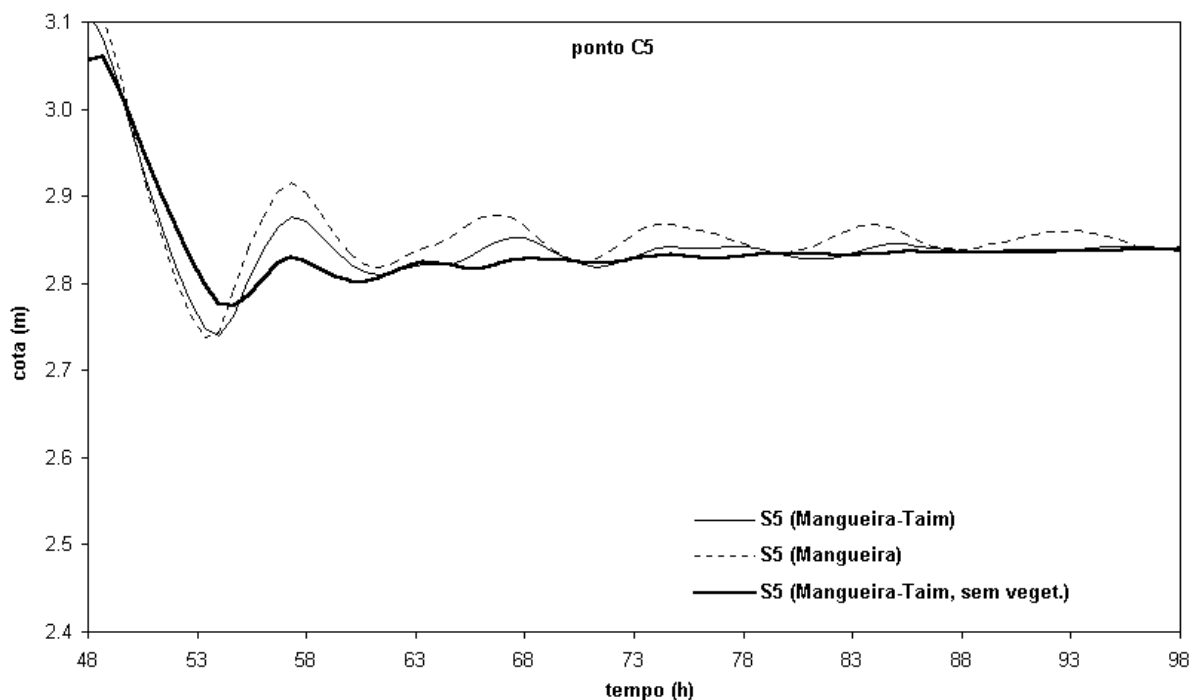


Figura 6.16. Nível da água no ponto C5, para o caso S5, a partir do instante em que o vento pára, após 48h constante.

6.5 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA VEGETAÇÃO

6.5.1 Mapas de vegetação

As macrófitas aquáticas emergentes constituem o principal tipo de vegetação presente no banhado do Taim e apresentam características peculiares que as tornam capazes de suportar as condições anaeróbias do solo, quando há uma certa lâmina d'água ou condições de solo saturado, conforme comentado no capítulo 2, item 2.2.4. Entretanto, a ocorrência de uma profundidade muito alta ou a ausência de uma lâmina d'água mínima, por um tempo prolongado, pode comprometer o desenvolvimento de tais plantas. A oscilação natural do nível da água, ou seja, o hidroperíodo, é o que garante a sobrevivência desse tipo de vegetação e do próprio banhado (Marble, 1992).

Além das conseqüências adversas diretas, a alteração dos padrões de vegetação tem efeito amplificado sobre todo o ecossistema, uma vez que a vegetação tem papel de destaque sobre a circulação da água, e esta, associada com a variação do nível da água, constitui a força motriz do funcionamento do banhado. Isso serviu de motivação para definir diferentes configurações espaciais de vegetação e observar as respostas correspondentes do sistema, quanto à circulação da água e à variação dos níveis.

Para tanto, supôs-se que o nível da água no Taim oscilou em torno de um nível médio por um longo período de tempo, o suficiente para alterar o padrão da distribuição espacial da vegetação. Após estabelecer os limites mínimo e máximo do tirante suportados pelas macrófitas aquáticas emergentes, foram geradas diferentes configurações espaciais de vegetação. O nível em torno do qual ocorreu a oscilação foi fixado nos três níveis estabelecidos a partir da observação dos dados históricos disponíveis, como comentado no item 5.5 deste trabalho, que são: nível alto (cota 3,4 m), nível médio (cota 2,9 m) e nível baixo (cota 2,4 m).

Quanto aos tirantes, foram adotados os valores de 0,10 m e 1,80 m como os limites mínimo e máximo, que oferecem condições de suportar as macrófitas aquáticas emergentes, respectivamente. Tais valores foram estabelecidos com base na literatura (Hammer, 1992) e segundo observações feitas no próprio Taim por Marques (2002). Sabe-se que não há valores exatos para os limites do tirante, mas apenas valores médios em torno dos quais a observação em campo tem constatado a maior frequência da ocorrência ou não do tipo de vegetação em questão.

Elaborou-se um programa computacional para, a partir da matriz de cotas do fundo e tomando cada um dos níveis como referência, calcular o tirante em todos os elementos da malha numérica e identificar quais deles são considerados com vegetação e quais não, baseado na aplicação do critério do tirante. Na figura 6.17, é apresentado um esquema descritivo das configurações de vegetação geradas e das respectivas denominações, através das quais as mesmas serão referidas no texto, a partir deste ponto.

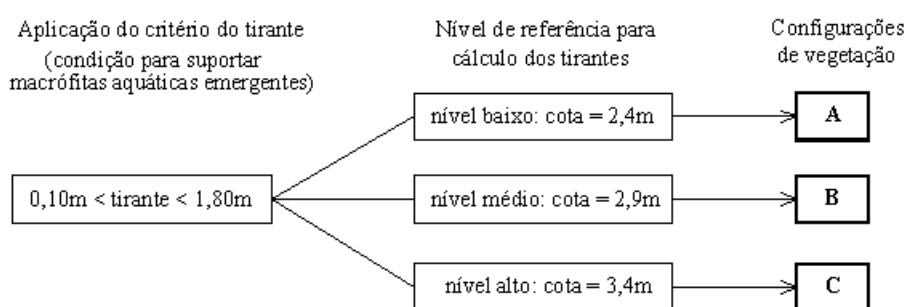


Figura 6.17. Parâmetros estabelecidos para gerar os mapas de vegetação e as respectivas denominações.

As figuras 6.18 a 6.20 apresentam as distribuições espaciais da vegetação obtidas da aplicação do critério do tirante aos três níveis d'água mencionados, a partir das quais se observa como uma diferença de 50 cm no nível mantido constante acarreta configurações bem diferentes. Nas mesmas figuras, consta a indicação dos pontos selecionados dentro do

banhado do Taim, para comparação de níveis e velocidades entre as várias simulações, enquanto, na figura 6.21, é apresentado o conjunto completo de todos os pontos.

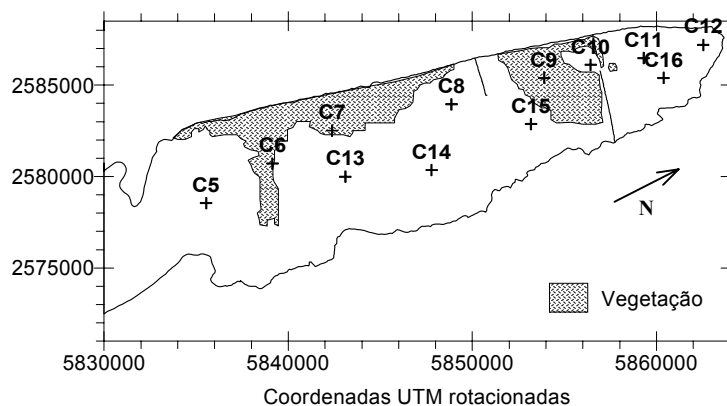


Figura 6.18. Configuração da distribuição espacial da vegetação tipo A, com localização dos pontos de análise de níveis e velocidades.

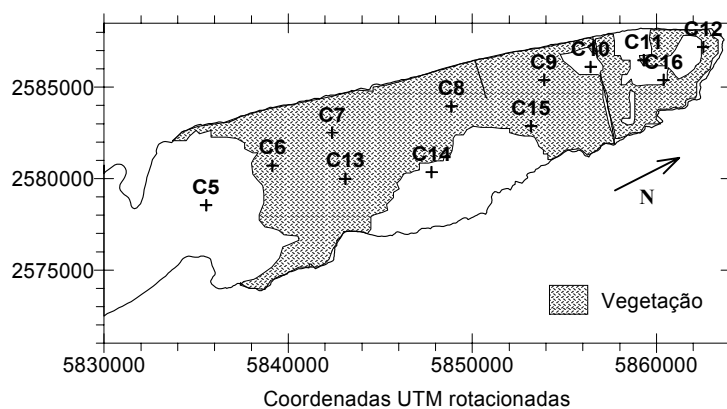


Figura 6.19. Configuração da distribuição espacial da vegetação tipo B, com localização dos pontos de análise de níveis e velocidades.

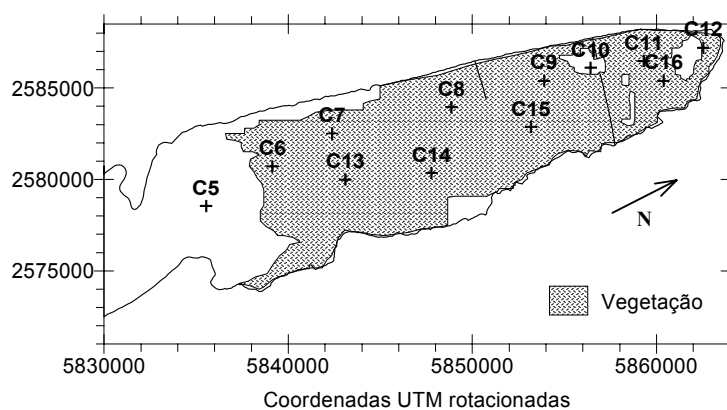


Figura 6.20. Configuração da distribuição espacial da vegetação tipo C, com localização dos pontos de análise de níveis e velocidades.

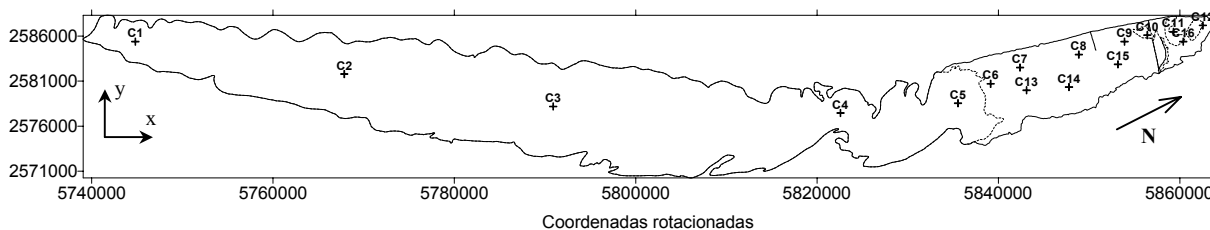


Figura 6.21. Localização dos pontos de análise de níveis e velocidades.

Com o objetivo de verificar a sensibilidade da distribuição espacial da vegetação ao limite máximo do tirante estabelecido, aplicou-se, novamente, o critério do tirante aos três níveis, modificando o limite máximo para o valor de 1,5 m. Os mapas obtidos foram bastante semelhantes àqueles referentes aos limites referentes ao valor 1,80 m, o que indica que o mesmo representa, na verdade, uma faixa de valores em torno dele, pouco importando qual seja, exatamente, o tirante máximo mais característico da vegetação típica do Taim.

A distinção entre as regiões consideradas cobertas por macrófitas emergentes daquelas sem, no que diz respeito às simulações com o modelo IPH-A, foi feita através das matrizes de coeficientes de Manning (n) e redutor da ação do vento (c_{red}), atribuindo valores diferenciados para cada caso:

- áreas consideradas com vegetação: $n = 0,40$ e $c_{red} = 0,2$;
- áreas consideradas sem vegetação: $n = 0,02$ e $c_{red} = 1,0$.

6.5.2 Descrição das situações simuladas

Diversos casos foram estabelecidos e simulados, com o intuito de averiguar a influência da distribuição espacial da vegetação sobre a circulação da água no sistema formado pela lagoa Mangueira e pelo banhado do Taim, sob diferentes condições de vento e de nível d'água inicial, como ilustra o esquema da figura 6.22. As três configurações de vegetação foram simuladas para as três condições de nível do banhado, adotadas como condição inicial, e com duas séries de ventos, extraídas dos dados do posto Negreiros (figura 5.13) e apresentadas no capítulo 5, item 5.5, totalizando 18 casos.

O objetivo foi permitir a comparação das respostas do sistema para cada mapa de vegetação, em diferentes situações de nível d'água, que correspondem a áreas distintas de escoamento, e sob as duas condições de vento que ocorrem com mais frequência, que são os ventos originários de direções em torno de Nordeste (NE) e de Sudoeste (SO).

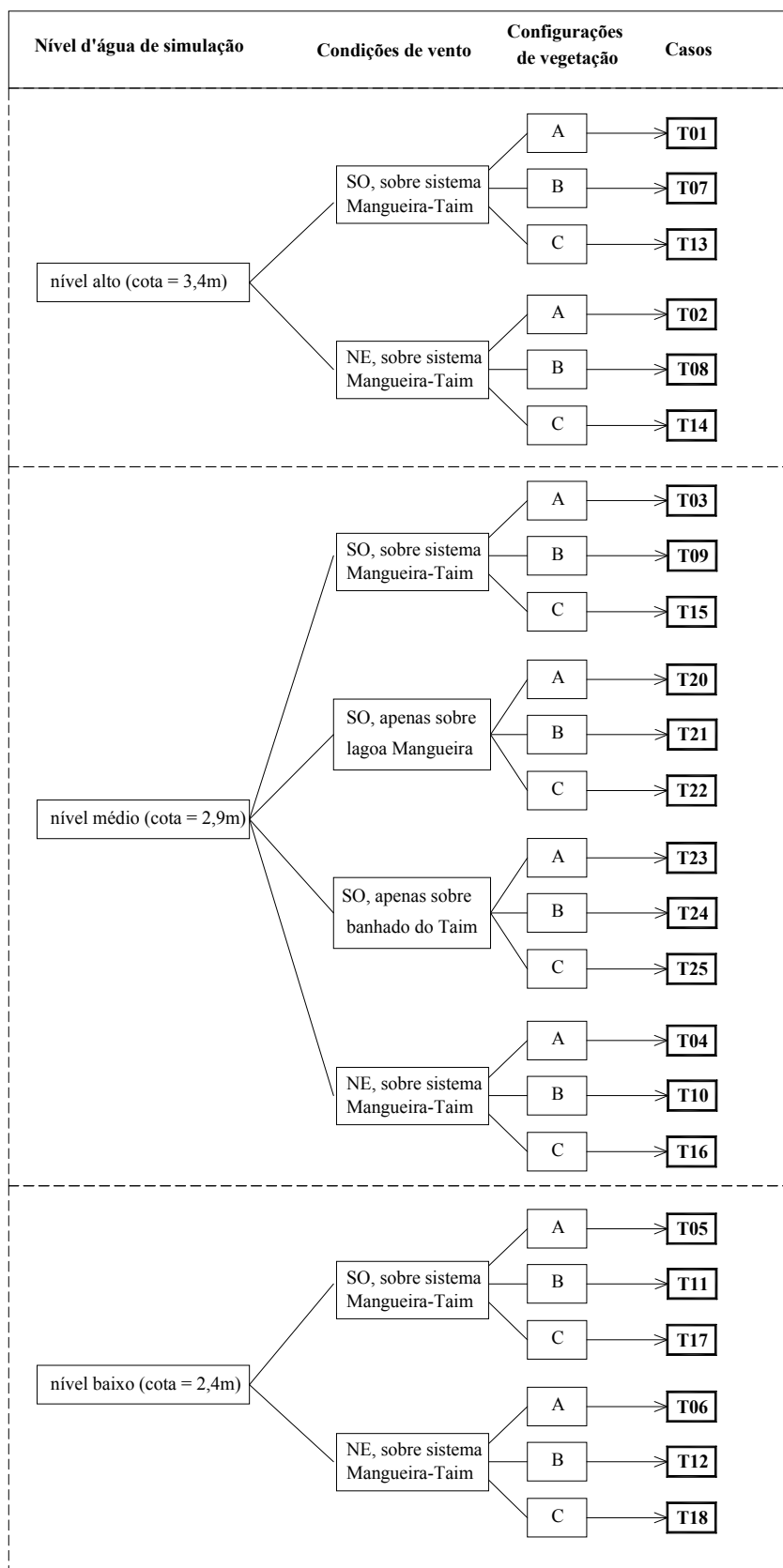


Figura 6.22. Descrição resumida dos diversos casos simulados.

Nas simulações enfocando uma condição de contorno tipo pulso e a seiche da lagoa Mangueira, descritas no início deste capítulo, abordou-se, entre outros fatores, a questão da influência da variação dos níveis da lagoa sobre o banhado. Com um propósito semelhante e na tentativa de isolar os efeitos, algumas situações foram estabelecidas, com as diferentes configurações de vegetação, considerando três condições distintas da ação do vento: (i) no caso padrão, adotado para a maioria das simulações, o vento foi considerado uniforme sobre todo o sistema modelado; (ii) no segundo caso, considerou-se um vento atuando apenas sobre a lagoa Mangueira; (iii) por fim, na última situação, a ação do vento foi considerada apenas sobre o banhado do Taim.

Dessa forma, o primeiro caso (i) correspondeu a uma circulação da água, no banhado do Taim, provocada pela ação direta do vento em conjunto com a oscilação dos níveis da Mangueira. Nas outras duas situações (ii e iii), o escoamento no banhado foi induzido apenas por um dos dois fatores.

A definição da área de atuação do vento foi realizada através do coeficiente redutor, adotando um valor nulo nas regiões não atingidas pelo vento, assumindo, nas demais, o valor correspondente à presença ($c_{red} = 0,2$) ou ausência ($c_{red} = 1,0$) de vegetação, conforme o caso. Como apresentado no esquema da figura 6.22, os casos correspondentes à não uniformidade das condições de vento foram simulados considerando um nível de água médio e a série de ventos com direção em torno de Sudoeste.

Em todas as situações, simulou-se o sistema Mangueira-Taim com uma malha de espaçamento igual a 360 m, sendo o contorno rotacionado de 63° , conforme explicado no item 5.3, e um passo de tempo de 60 s, com duração de 4 dias. As demais condições, comuns a todas as simulações, foram: coeficiente de viscosidade turbulenta com valor igual a $10 \text{ m}^2/\text{s}$; coeficiente de ajuste do vento igual a $3,0\text{E-}6$ e parâmetro de Coriolis referente à latitude de 33°S .

6.5.3 Análise dos resultados

Simulou-se, neste item 6.5, um número considerável de situações, produzindo-se uma quantidade ainda maior de gráficos, campos de velocidade e outros tipos de informações, de forma que a análise dos resultados foi agrupada em tópicos, enfocando alguns aspectos em particular, na tentativa de melhor direcionar o texto. Em cada um deles, também foi analisada a questão principal, quanto à variação da distribuição espacial da vegetação, e, quando necessário, foram abordados os demais aspectos.

Devido à adoção de dois valores para os coeficientes de Manning e redutor da ação do vento, distinguindo as áreas consideradas com e sem vegetação, o comportamento

hidrodinâmico do banhado do Taim foi fortemente influenciado pela distribuição espacial da vegetação. Assim, de modo geral, os resultados das simulações com as configurações A, B e C (figura 6.17) foram bem distintos, tanto em relação à circulação da água quanto à oscilação dos níveis no banhado.

6.5.3.1 Quanto à distribuição espacial do vento

A consideração do vento atuando sobre todo o sistema Mangueira-Taim ou apenas sobre a lagoa Mangueira acarretou o mesmo padrão de circulação da água nesta última, independentemente da distribuição espacial da vegetação. Apenas no caso T23, com a configuração de vegetação A, que apresenta a menor área ocupada por vegetação, o fato de não haver vegetação na porção leste da interface entre a lagoa e o banhado (figura 6.18) possibilitou uma pequena circulação de água nessa região, mas muito restrita e pouco significativa (região do círculo da figura 6.23).

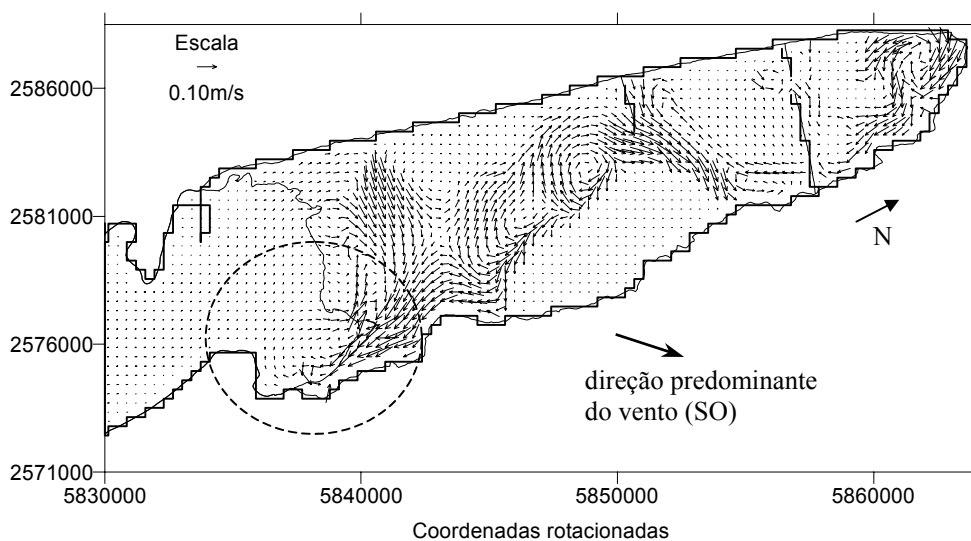


Figura 6.23. Campo de velocidades no banhado do Taim, para o caso T23, em $t = 60$ h.

Para as três configurações de vegetação, as variações de nível e de velocidade com o tempo, na lagoa Mangueira, foram muito semelhantes, entre os casos considerando um vento uniforme sobre todo o sistema Mangueira-Taim ou apenas sobre a lagoa Mangueira. As figuras 6.24 a 6.26 exemplificam esse fato, para o mapa de vegetação tipo A, comparando-se os casos T03 e T20. Isso indica que a circulação da água na lagoa foi quase totalmente induzida pela ação direta do vento sobre a mesma, sendo desprezível a contribuição da variação dos níveis no banhado, induzida pelo vento sobre este (caso T23, para a vegetação tipo A, por exemplo).

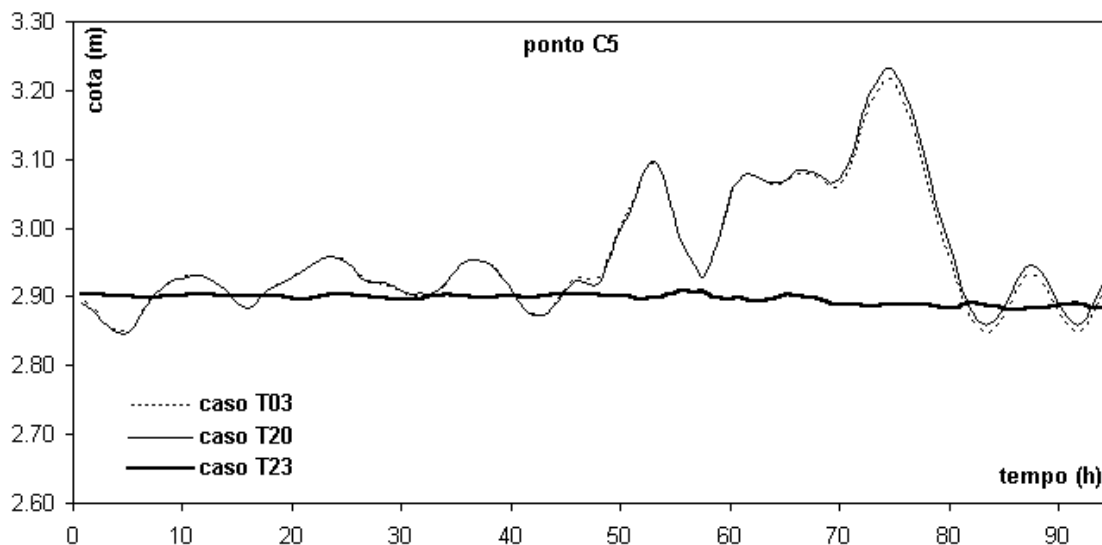


Figura 6.24. Nível da água no ponto C5, para três casos simulados com a configuração de vegetação A.

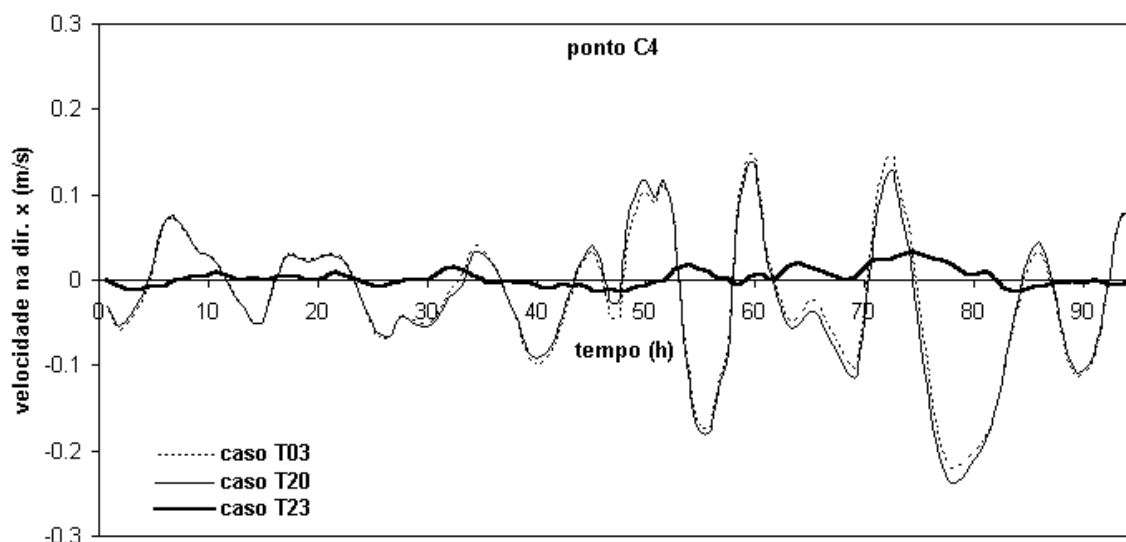


Figura 6.25. Velocidade do escoamento na direção x no ponto C4, para três casos simulados com a configuração de vegetação A.

A constatação anterior é reforçada pela análise dos resultados dos casos onde a ação do vento foi considerada apenas sobre o Taim, para cada mapa de vegetação (T23, T24 e T25). Em tais situações, não se observou, praticamente, nenhum efeito considerável sobre a lagoa Mangueira, que permaneceu com uma superfície d'água quase sem oscilação e velocidades de escoamento desprezíveis, relativamente aos casos onde a ação do vento foi considerada diretamente sobre a mesma, como mostram as figuras 6.24 a 6.26 para o caso da configuração A (casos T03 e T20).

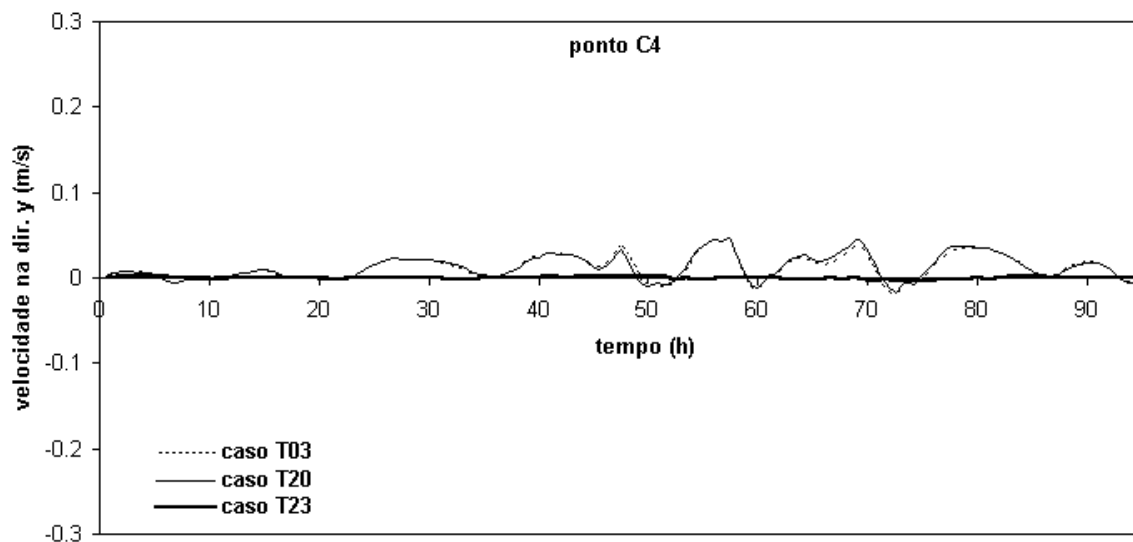


Figura 6.26. Velocidade do escoamento na direção y no ponto C4, para três casos simulados com a configuração de vegetação A.

Tendo como enfoque o banhado do Taim, as simulações dos casos onde a área de atuação do vento foi modificada permitiram 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 C8 (figura 6.27), para o caso da configuração A, identificou-se, claramente, que a oscilação resultante da ação do vento sobre todo o sistema modelado (T03) foi semelhante à combinação dos efeitos resultantes da ação direta do vento sobre o banhado (T23) e sobre a Mangueira, isoladamente (T20).

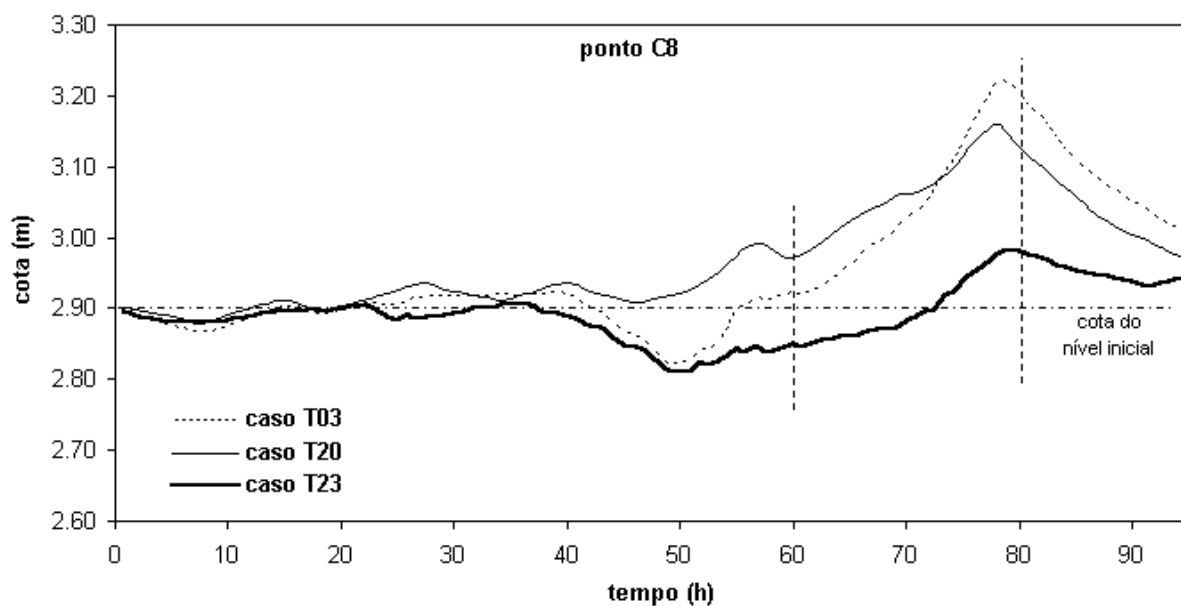


Figura 6.27. Nível da água no ponto C8, para três casos simulados com a configuração de vegetação A.

Tomando o nível inicial como referência, observou-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 em $t = 60$ h. Em outros instantes, como $t = 80$ h, ambos os efeitos provocaram uma oscilação do nível da água no mesmo sentido.

Entretanto, para os mapas de vegetação B (casos T09, T21 e T24) e C (casos T15, T22 e T25), o ponto C8 não apresentou o mesmo comportamento de variação de nível daquele observado para a configuração A, quanto à combinação dos efeitos isolados devido à ação do vento sobre o banhado e sobre a lagoa Mangueira. Essa diferença é justificada pela própria distribuição espacial da vegetação, já que, no mapa tipo A, o ponto em questão está localizado em uma região considerada sem vegetação, existindo uma faixa contínua de área no banhado, desde a interface com a lagoa Mangueira, caracterizada pela ausência de vegetação, ao contrário do que ocorre com as configurações B e C (figuras 6.18 a 6.20). Nestas, o ponto C8 está situado em uma região com vegetação, o que também contribuiu para diminuir a amplitude de oscilação, como mostram as figuras 6.28 e 6.29, cujas escalas foram alteradas para permitir diferenciar as três curvas.

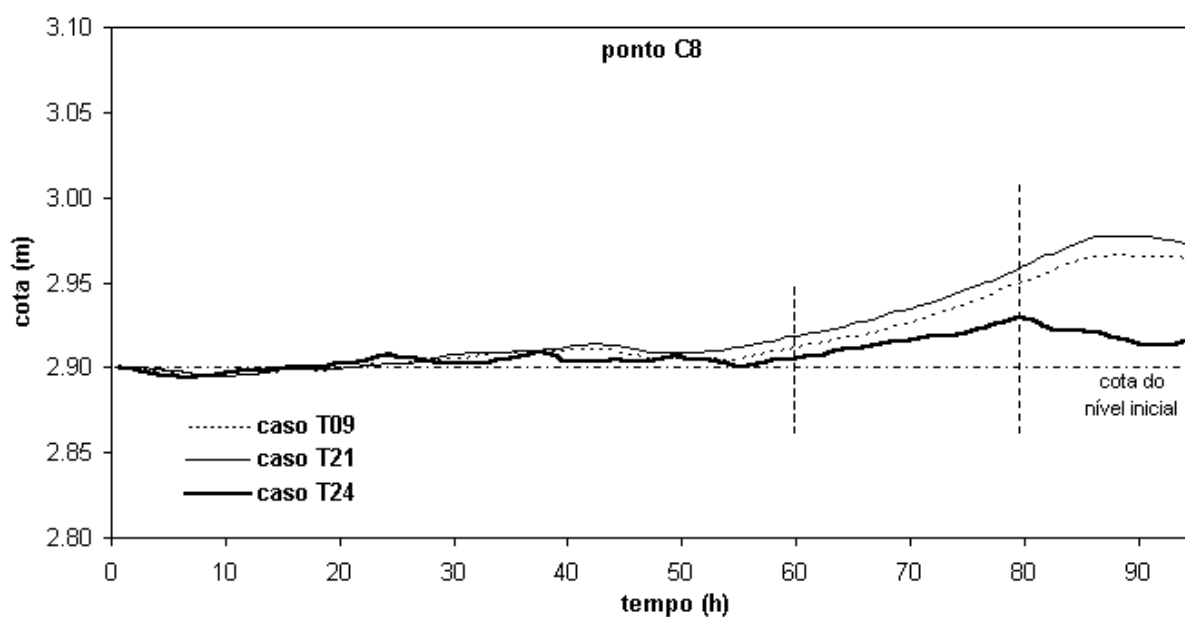


Figura 6.28. Nível da água no ponto C8, para três casos simulados com a configuração de vegetação B.

Quando a atuação do vento foi restrita à lagoa Mangueira (casos T20, T21 e T22), observou-se uma circulação da água no banhado do Taim direcionada pelo fluxo afluyente da lagoa Mangueira, como se observa através dos campos de velocidade mostrados nas figuras 6.30 a 6.32. A comparação entre os resultados referentes às três configurações de vegetação permite verificar o quanto a ocorrência de vegetação no banhado e, principalmente, na

interface entre este e a lagoa, condicionou a circulação da água no mesmo, induzida pela oscilação dos níveis na Mangueira.

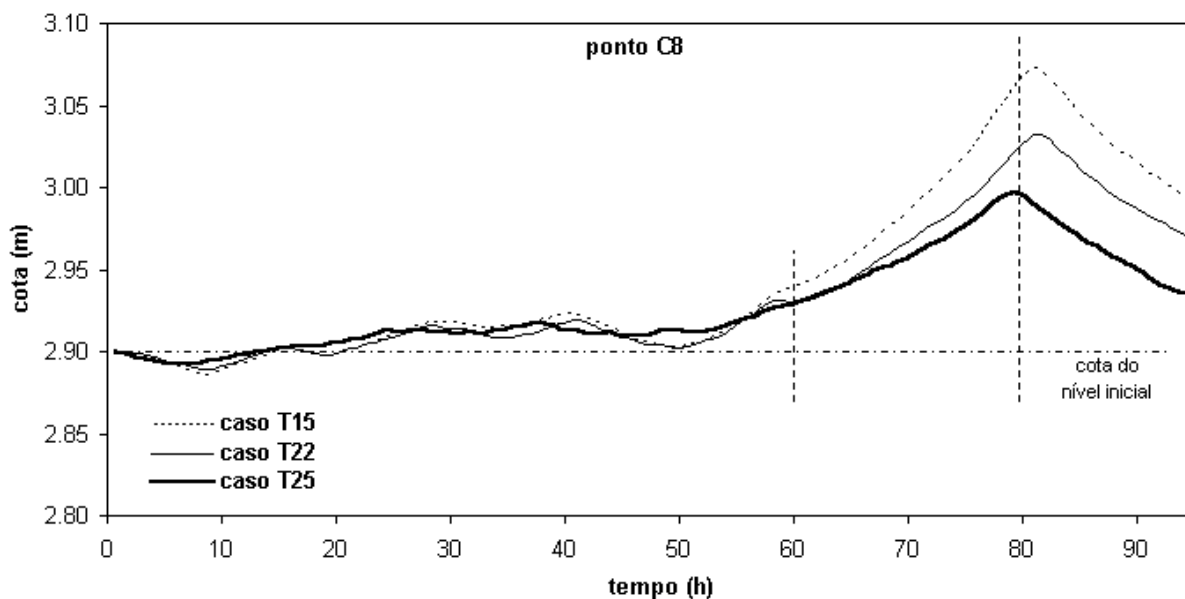


Figura 6.29. Nível da água no ponto C8, para três casos simulados com a configuração de vegetação C.

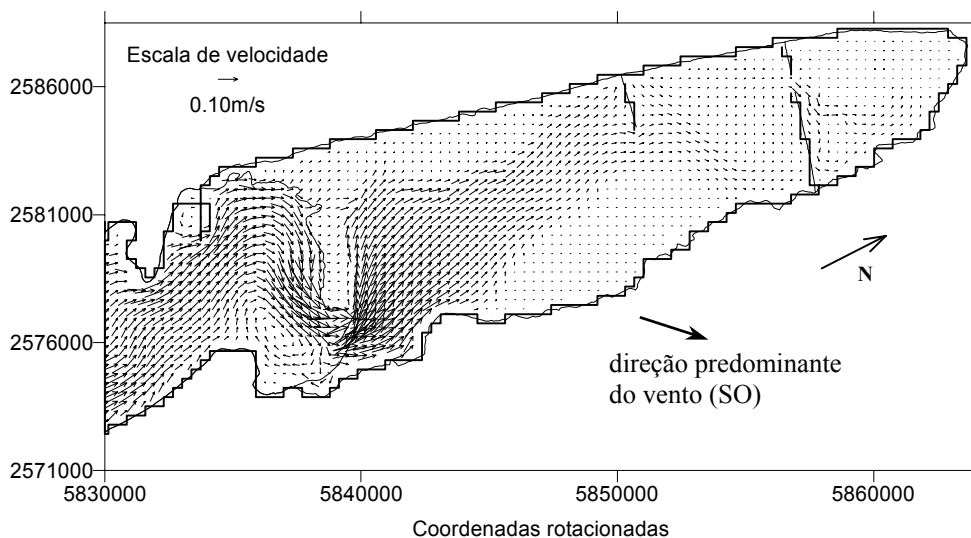


Figura 6.30. Campo de velocidades no banhado, para o caso T20 (veg. A), em $t = 60$ h.

Nas distribuições espaciais tipos A e C (figuras 6.18 e 6.20), a ausência de vegetação nas regiões leste e oeste da interface, respectivamente, permitiram uma maior troca de volume de água entre os dois sistemas (figuras 6.30 e 6.32, respectivamente), sendo maior no primeiro caso, devido à continuidade de uma grande extensão de área sem vegetação, desde a interface. No caso da configuração B (figura 6.19), toda a interface está coberta por vegetação, o que proporcionou uma grande obstrução ao fluxo afluyente da lagoa para o

banhado (figura 6.31), fazendo com que a circulação da água neste, induzida pela variação dos níveis na lagoa, fosse bem menos intensa do que nos casos anteriores.

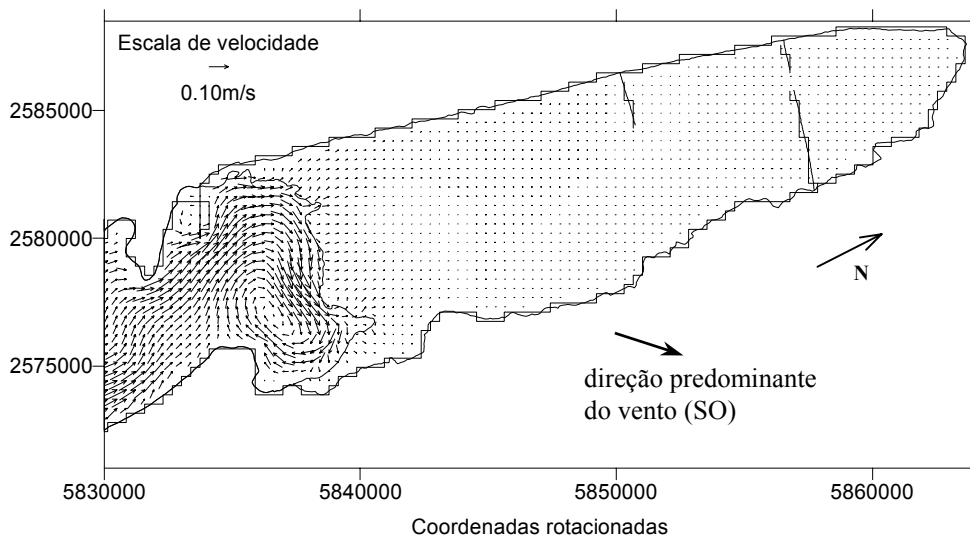


Figura 6.31. Campo de velocidades no banhado, para o caso T21 (veg. B), em $t = 60$ h.

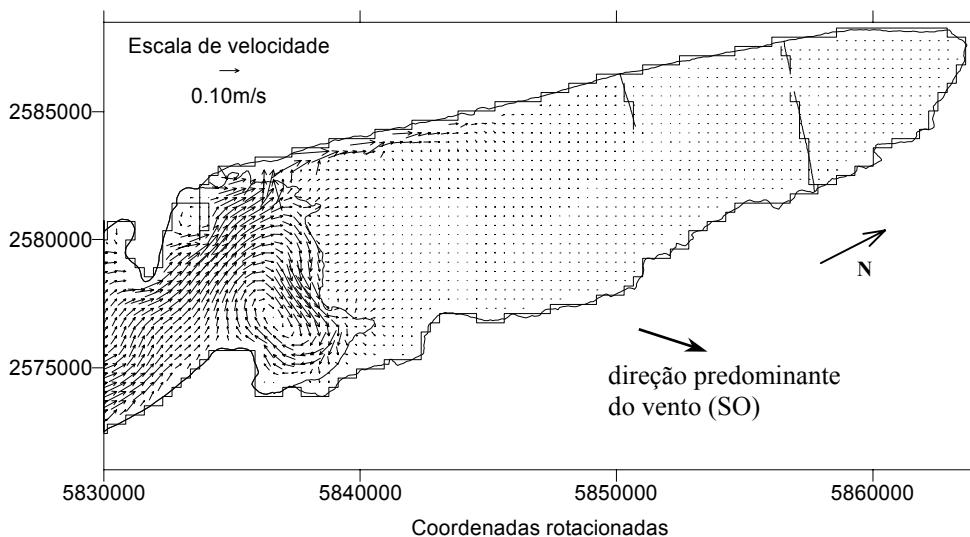


Figura 6.32. Campo de velocidades no banhado, para o caso T22 (veg. C), em $t = 60$ h.

6.5.3.2 Quanto à direção predominante do vento

As duas séries de ventos adotadas nas simulações caracterizam situações bem distintas, na medida que o vento com direção em torno de Sudoeste favorece a afluência de água da lagoa para o banhado e o vento com direção predominante Nordeste atua de forma contrária (figuras 5.17 e 5.18). Como era esperado, tais ventos provocaram, de modo geral, comportamentos hidrodinâmicos do sistema Mangueira-Taim bem distintos entre si.

Considerando um nível d'água inicial alto e as configurações de vegetação tipos A e B, a ação de um vento Nordeste (casos T02 e T08) provocou o rebaixamento dos níveis no banhado, de forma que a região central leste, que possui cotas mais elevadas, tornou-se seca, como mostram as figuras 6.33 e 6.34. Sob a ação de um vento Sudoeste (casos T01 e T07), favorável à afluência de água da lagoa para o banhado, isso não foi verificado, como ilustram os campos de velocidade das figuras 6.35 e 6.36. A secagem da região mencionada não foi verificada para as simulações com o mapa da distribuição espacial de vegetação tipo C (casos T13 e T14), devido ao efeito da ocorrência de vegetação, que ocupava quase toda a área em questão.

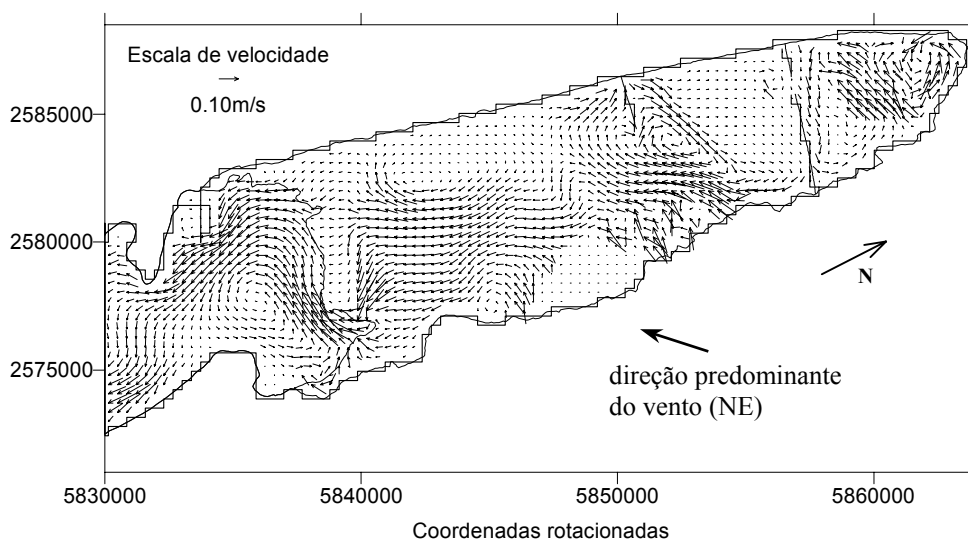


Figura 6.33. Campo de velocidades no banhado, para o caso T02, em t = 60 h.

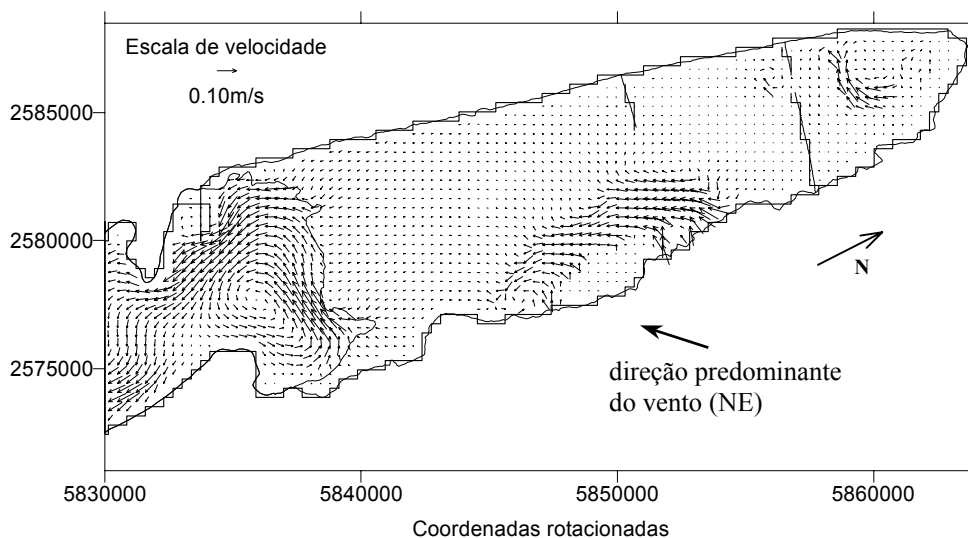


Figura 6.34. Campo de velocidades no banhado, para o caso T08, em t = 60 h.

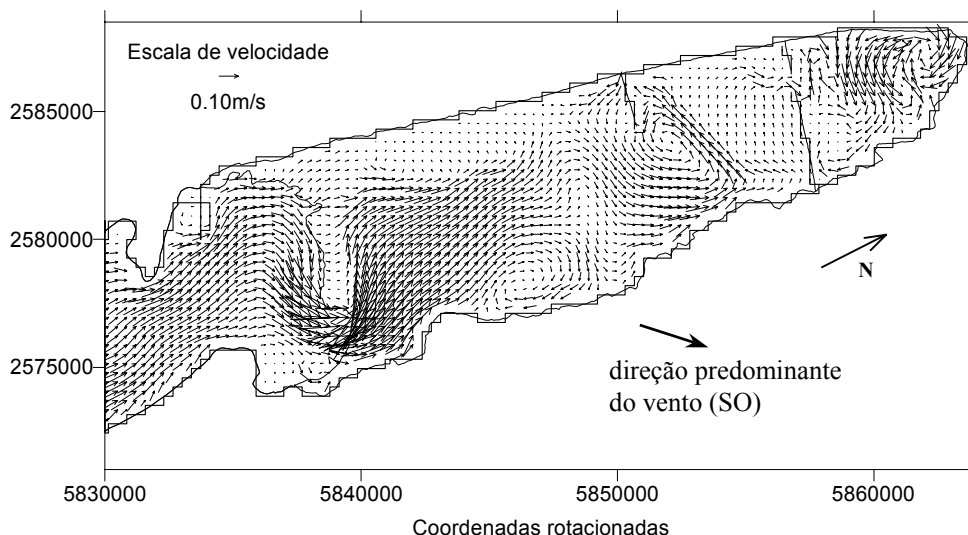


Figura 6.35. Campo de velocidades no banhado, para o caso T01, em $t = 60$ h.

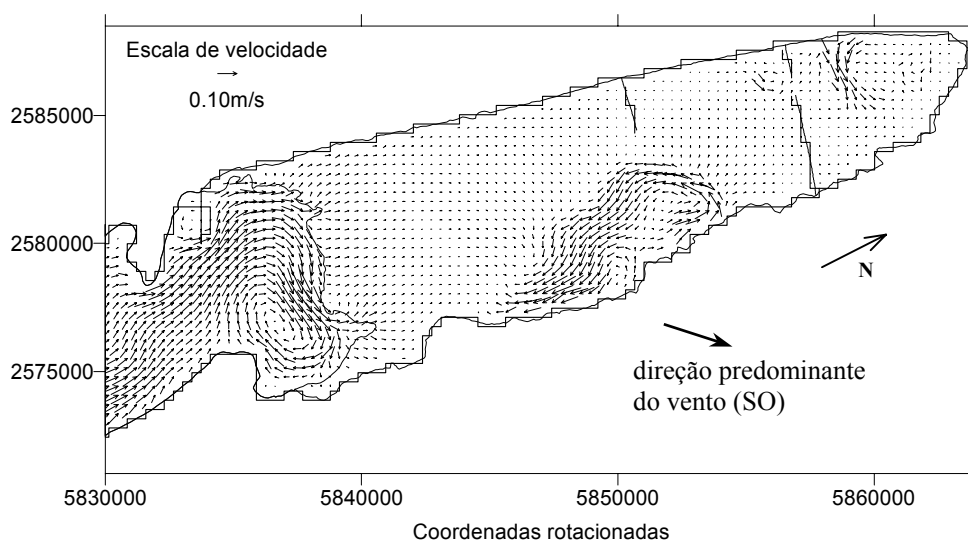


Figura 6.36. Campo de velocidades no banhado, para o caso T07, em $t = 60$ h.

Nas figuras 6.37 e 6.38, são apresentadas as variações do nível d'água na lagoa Jacaré (ponto C10), onde se observa a diferença no comportamento da lagoa Jacaré, em função da direção do vento predominante, principalmente após 60 h de simulação, quando o vento apresentou maiores velocidades. Os efeitos de elevação e rebaixamento do nível, provocados pela ação de um vento com direção em torno de Sudoeste e Nordeste, respectivamente, foram intensificados conforme a menor ocorrência de vegetação no banhado. Desse modo, a amplitude de oscilação do nível da lagoa, para a configuração A, que apresenta a menor área de vegetação, foi bem superior às demais, mostrando como a distribuição espacial da vegetação teve influência sobre a região em questão e como a vegetação amorteceu a onda de cheia gerada pelo vento.

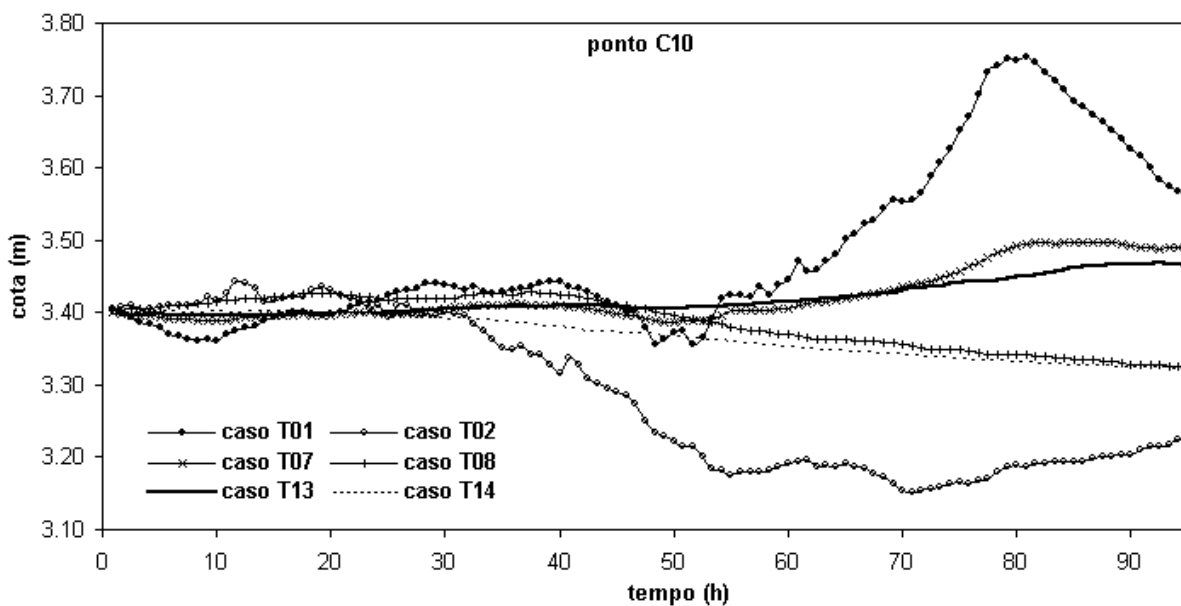


Figura 6.37. Nível da água na lagoa Jacaré (ponto C10), nas simulações com um nível inicial alto (cota 3,40m).

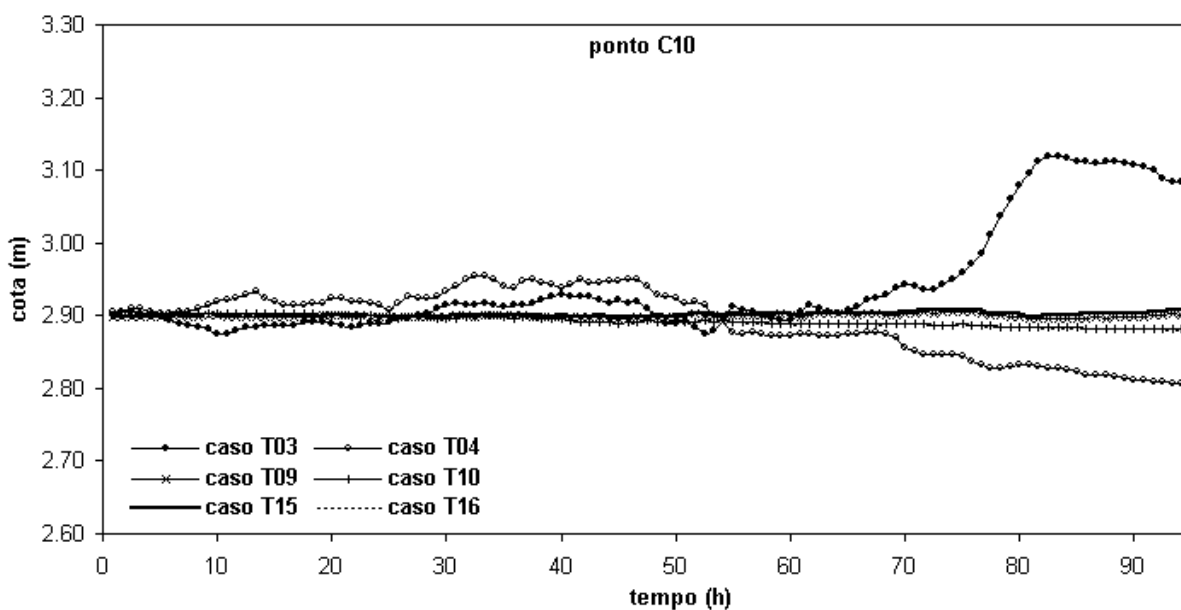


Figura 6.38. Nível da água na lagoa Jacaré (ponto C10), nas simulações com um nível inicial médio (cota 2,90 m).

O efeito de elevação ou rebaixamento do nível da água, na lagoa Mangueira, conforme a direção predominante do vento adotada na simulação, pode ser observado pelas figuras 6.39 e 6.40, referentes ao ponto C5 (extremo norte da lagoa). Entretanto, os comportamentos do nível da água, para as diferentes distribuições espaciais de vegetação no banhado, foram bem próximos entre si, ao contrário do comentado sobre a região da lagoa Jacaré. As configurações tipos B e C apresentaram resultados praticamente idênticos entre si, ao passo que o mapa tipo A diferiu um pouco dos anteriores, para vento NE principalmente. Isso é justificado pela maior semelhança entre as distribuições espaciais B e C (figuras 6.19 e

6.20), que apresentam a grande maioria da área do banhado coberta por vegetação, ao contrário da configuração A (figura 6.18). De toda maneira, a hidrodinâmica da lagoa Mangueira pouco foi influenciada pela distribuição espacial da vegetação no banhado do Taim.

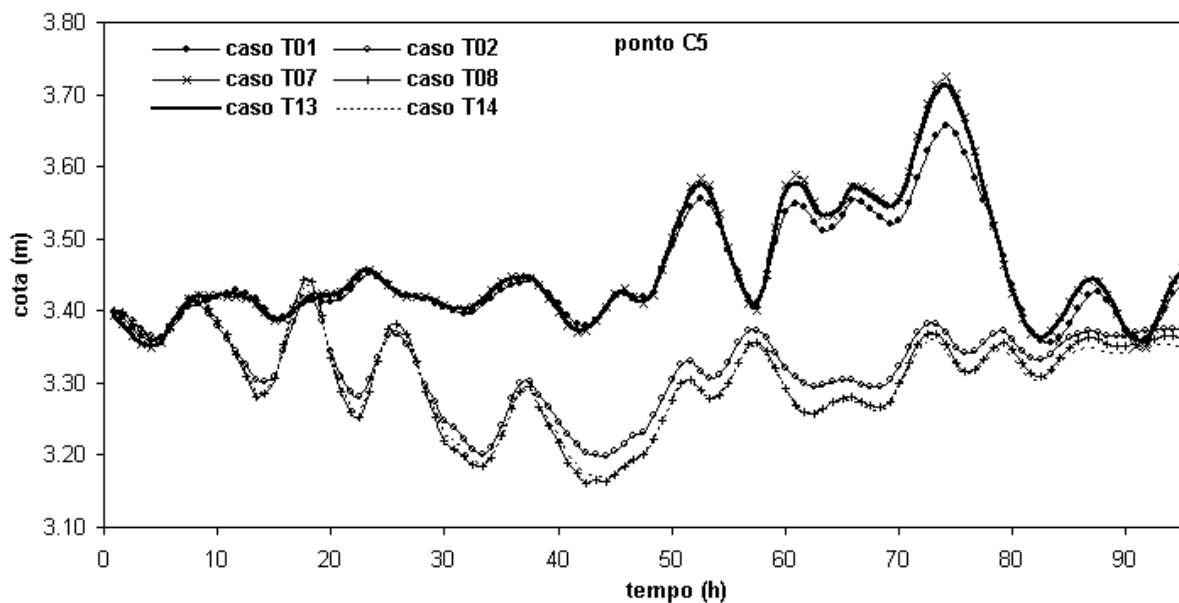


Figura 6.39. Nível da água no extremo norte da lagoa Mangueira (ponto C5), para as simulações com um nível inicial alto (cota 3,40 m).

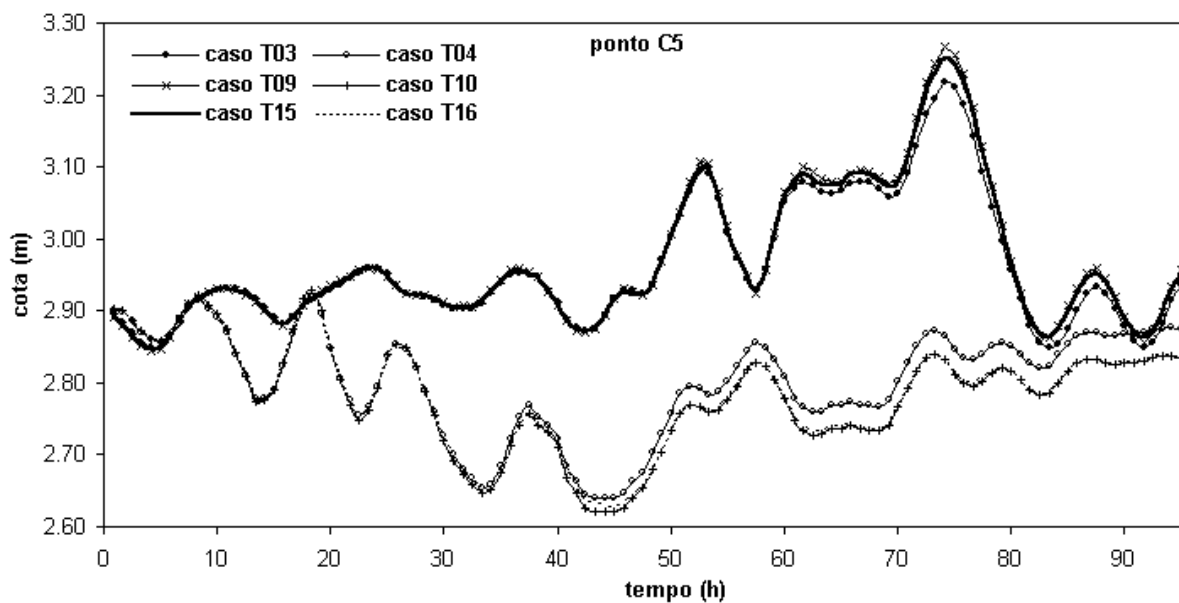


Figura 6.40. Nível da água no extremo norte da lagoa Mangueira (ponto C5), para as simulações com um nível inicial médio (cota 2,90 m).

6.5.3.3 Quanto ao nível d'água inicial

Com base nas figuras 6.37 e 6.38, referentes à oscilação do nível na lagoa Jacaré (ponto C10), pode-se analisar a diferença entre as simulações com os níveis d'água iniciais

alto (casos T01, T07, T13, T02, T08 e T14) e médio (casos T03, T09, T15, T04, T10 e T16), respectivamente. As menores profundidades do escoamento, no segundo caso, tornaram o efeito da vegetação mais intenso e foram responsáveis pela menor amplitude de variação dos níveis, relativamente ao primeiro caso, o que foi constatado para as três configurações de vegetação.

Para o nível d'água classificado como baixo (casos T05, T11, T17, T06, T12 e T18), grande parte da área do banhado está seca, como mostrado no capítulo 5 (figura 5.15), o que, aliado à presença de vegetação e seus efeitos sobre o escoamento, fez com que as lagoas Nicola e Jacaré ficassem praticamente isoladas do restante do banhado e, portanto, da lagoa Mangueira, durante as simulações considerando o referido nível como inicial. A ação do vento provocou a circulação da água nas lagoas internas do banhado, como exemplifica a figura 6.41 para o mapa de vegetação tipo A, mas com quase nenhuma oscilação da superfície da água, indicando não haver trocas significativas de volume de água com as áreas vizinhas (figura 6.42).

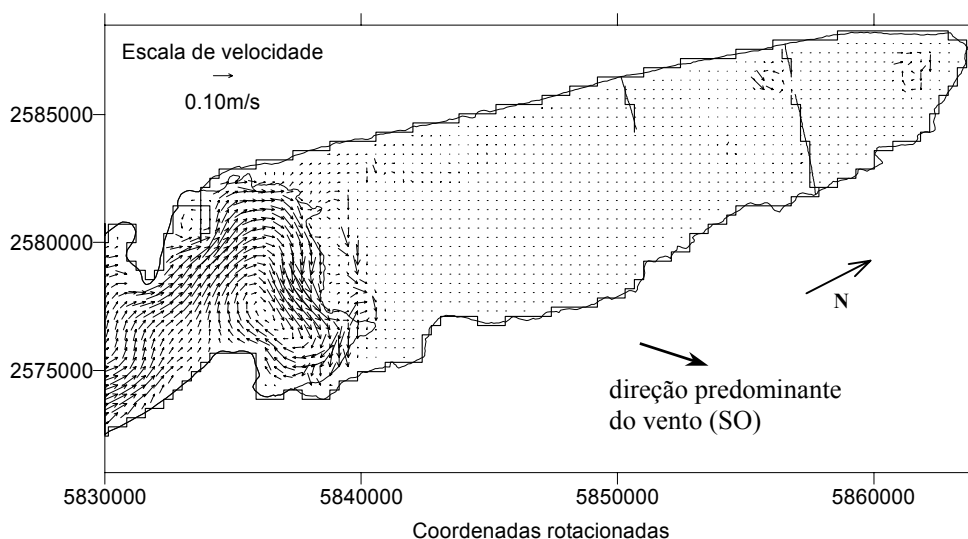


Figura 6.41. Campo de velocidades no banhado, para o caso T05, após 60 h de simulação.

No caso da lagoa Mangueira, a simulação com níveis de água em cotas menores teve efeito inverso ao constatado para o banhado, em particular, para o relatado para a lagoa Jacaré. Como mostrado nas figuras 6.39 e 6.40, as simulações com um nível médio proporcionaram maior amplitude de oscilação do nível na lagoa do que aquelas referentes ao nível alto, embora tal diferença tenha sido relativamente pequena.

Com o nível d'água inicial baixo, além da variação do nível na lagoa Mangueira ter sido maior do que nos casos anteriores, não houve diferença quanto aos resultados referentes às três configurações de vegetação consideradas, como mostra a figura 6.43, tanto

para o vento com direção predominante Sudoeste (casos T05, T11 e T17), como para o vento Nordeste (casos T06, T12 e T18).

Quanto ao comportamento do nível da água na lagoa Mangueira, relativo ao nível inicial, observou-se que, quanto maior o impedimento à circulação da água no banhado do Taim, seja pela maior presença de vegetação, seja pela menor área disponível para o escoamento (maior área seca), menor foi o volume de água trocado entre os dois sistemas e, logo, maior foi a oscilação da lagoa.

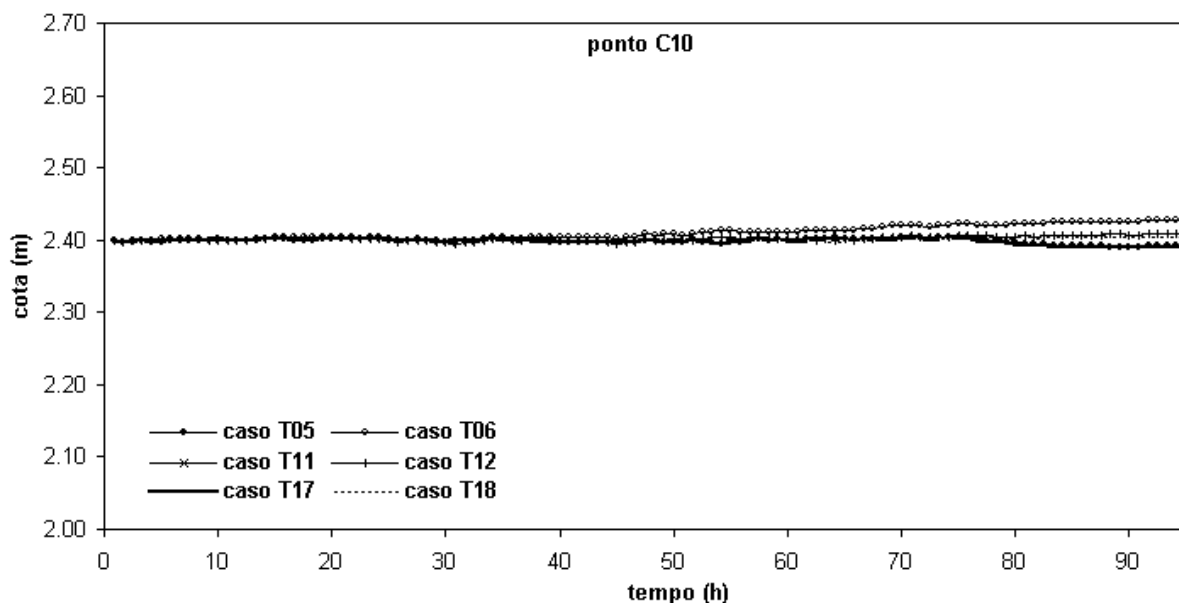


Figura 6.42. Nível da água na lagoa Jacaré (ponto C10), para as simulações com um nível inicial baixo (cota 2,40 m).

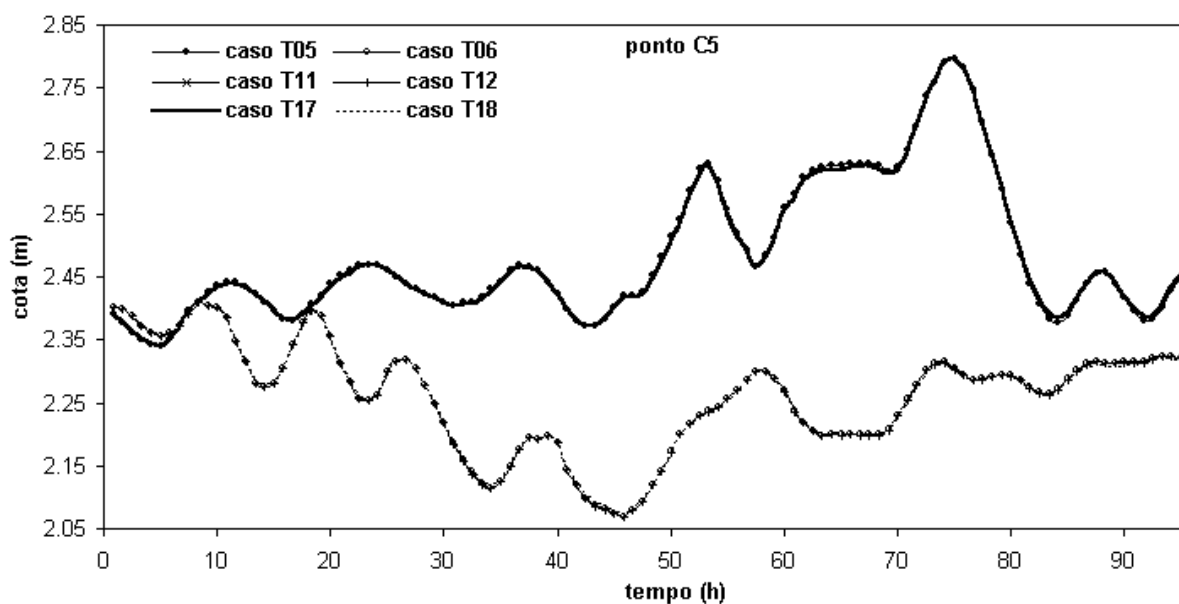


Figura 6.43. Nível da água no extremo norte da lagoa Mangueira (ponto C5), para as simulações com um nível inicial baixo (cota 2,90 m).

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1 CONCLUSÕES

7.1.1 Sobre a metodologia empregada

O desenvolvimento de um algoritmo de secagem/inundação, e sua implementação no modelo IPH-A, foi de grande importância, permitindo a simulação com níveis de água reduzidos. Sem tal algoritmo, o estudo ficaria limitado a níveis de água altos, que mantivessem uma lâmina de água mínima sobre todo o banhado, o que reduziria a amplitude de situações possíveis de serem analisadas. A alternativa, que demandaria mais trabalho, seria a definição de um contorno do banhado para cada nível de água, porém a custo de tornar a representação do sistema estudado mais distante da realidade.

A simulação conjunta da lagoa Mangueira com o banhado do Taim permitiu uma melhor representação do comportamento hidrodinâmico do Taim, relativamente à simulação do banhado isoladamente, e a limitação computacional, restringindo a resolução da malha numérica, não constituiu uma simplificação significativa.

A resistência ao escoamento proporcionada pela vegetação foi representada na modelagem pela adoção de um coeficiente de Manning de valor elevado (superior ao adotado para as áreas sem vegetação) e o efeito protetor contra a ação do vento causada pela vegetação foi considerado através da adoção de um coeficiente redutor da tensão de cisalhamento do vento na superfície da água. A consideração da heterogeneidade espacial de tais coeficientes demonstrou ser necessária à modelagem do banhado, face à variabilidade espacial das características do mesmo, já que as áreas consideradas com e sem vegetação apresentaram campos de velocidade bastante diferentes entre si.

7.1.2 Sobre o comportamento hidrodinâmico do Taim

A complexidade do banhado do Taim e a ausência de dados e informações sobre a região conduziram este estudo na direção de avaliar a influência de diversos fatores sobre o comportamento hidrodinâmico do referido sistema, e não de procurar reproduzi-lo ou descrevê-lo detalhadamente.

De modo geral, verificou-se que os fatores supostos como intervenientes na hidrodinâmica do Taim realmente desempenham tal papel: a ocorrência de vegetação e a sua distribuição espacial, a ação do vento e a influência da lagoa Mangueira. Ressalta-se, novamente, que a vegetação foi modelada adotando um coeficiente de Manning de valor superior ao considerado para as áreas sem vegetação e reduzindo a tensão de cisalhamento na superfície da água, mediante um coeficiente denominado de coeficiente redutor da ação do vento.

Verificou-se que a contribuição do efeito de Coriolis sobre a hidrodinâmica do sistema formado pela lagoa Mangueira e pelo banhado do Taim é desprezível. Na lagoa, esse efeito é pouco significativo quando comparado à ação do vento, que é o principal agente de circulação da água. A forma da lagoa, alongada e estreita, contribui para diminuir o efeito de Coriolis. Quanto ao banhado, além das dimensões relativamente pequenas, a presença de macrófitas aquáticas proporciona grande resistência adicional ao escoamento, inibindo o referido efeito.

Observou-se que, para períodos de tempo relativamente curtos (cerca de 4 dias), a operação das comportas de saída do Taim para a lagoa Mirim não é relevante para a hidrodinâmica do banhado, de modo que a consideração das comportas fechadas não representa uma simplificação significativa para estudos daquela natureza.

Entretanto, o volume de água que sai pelas comportas, a longo prazo, deve ser considerado. Além disso, é importante ressaltar que, como a vegetação apresenta limites de profundidade suportáveis, a longo período, a permanência do nível da água em determinada cota, ou mesmo a oscilação distinta da natural, tem, entre outras conseqüências, impacto sobre as macrófitas aquáticas, repercutindo no comportamento hidrodinâmico do banhado. Portanto, a operação das comportas pode constituir um fator fundamental quanto ao funcionamento de todos os processos associados ao banhado, para períodos de tempo maiores do que alguns dias.

Por ser uma região extremamente plana e com velocidades do escoamento muito pequenas, a topografia tem bastante importância sobre a hidrodinâmica do banhado. Como as profundidades são muito pequenas, pouca variação do nível da água é suficiente para que determinadas áreas do banhado fiquem secas ou não, o que altera, substancialmente, o padrão da circulação da água na região. Conforme a direção predominante do vento, o banhado do Taim pode apresentar diferentes áreas secas, principalmente na região central leste, cuja topografia é mais elevada. Pelos resultados das simulações, observou-se que a ocorrência de ventos com direção predominante Nordeste contribui para que essa região fique seca, caso o nível da água já esteja próximo ao fundo. Isso pode ser intensificado ou reduzido conforme a

menor ou maior presença de macrófitas, devido à resistência ao escoamento que elas proporcionam.

A topografia do terreno também influi na a hidrodinâmica do Taim de modo indireto, na medida que a ocorrência de macrófitas aquáticas emergentes é dependente das profundidades de água de cada área. Convém ressaltar que o nível da água, ou melhor, seu padrão de variação, é um dos principais fatores condicionantes da distribuição espacial da vegetação aquática, associado ao padrão de circulação da água. E, como se observou neste estudo, a distribuição espacial da vegetação constitui o fator primordial sobre a hidrodinâmica do Taim.

Através da série de simulações realizadas, verificou-se que os dois grupos de ventos mais freqüentes na região, que são aqueles com direções predominantes em torno de Nordeste e Sudoeste, proporcionam padrões de circulação da água bem distintos no sistema Mangueira-Taim. O segundo deles, que atua no sentido favorável à afluência de água da lagoa para o banhado, tem a ação mais influenciada pela distribuição espacial da vegetação no banhado, do que o primeiro, que age no sentido banhado-lagoa.

Além da ação direta do vento sobre cada um dos sub-sistemas (lagoa Mangueira e banhado do Taim), procurou-se avaliar a contribuição indireta do vento, ou seja, o quanto a circulação no banhado era induzida pela ação do vento sobre a lagoa, e vice-versa. De forma geral, os resultados mostraram que a circulação da água na lagoa Mangueira é governada pela ação direta do vento, sendo desprezível a contribuição devido à variação do nível da água no Taim, causada pela ação do vento sobre o mesmo. Por outro lado, o banhado sofre influência da lagoa Mangueira, devido à ação do vento sobre esta, mas que é dependente da forma com que vegetação está espacialmente distribuída no banhado, principalmente na interface entre os dois sistemas.

Através das simulações com vento constante, por um período de tempo prolongado (2 dias), observou-se que o banhado do Taim não tem influência sobre a inclinação da superfície da água da lagoa Mangueira. Essa conclusão foi baseada nos resultados supondo a lagoa como um corpo d'água isolado, como se não existisse o banhado no extremo norte. Verificou-se que o desnível entre os extremos norte e sul da lagoa Mangueira, decorrente da ação contínua do vento constante, foi o mesmo que o obtido para o caso dos dois sistemas integrados, como são na realidade.

Outra situação foi analisada, supondo que o banhado do Taim não apresentasse macrófitas aquáticas emergentes, ou seja, como se se tratasse de uma lagoa, sem a resistência adicional devido à vegetação. Também nesse caso, o desnível atingido pela superfície da

lagoa Mangueira, após 2 dias de vento constante, foi o mesmo obtido para a situação considerada real (banhado com vegetação, integrado à lagoa).

As simulações com ventos de velocidade entre 20 e 30 km/h resultaram em desníveis de cerca de 22 a 63 cm entre os extremos norte e sul da lagoa, conforme a direção do vento. O máximo desnível (63 cm) foi obtido devido à atuação de um vento constante e alinhado com a orientação da lagoa Mangueira (direção intermediária entre SSO e SO ou cerca de 213° em relação ao Norte), que proporciona o maior *fetch*.

As simulações citadas anteriormente também mostraram que, para um nível de água alto (cota 3,4 m), a ação de um vento constante proporcionou menor inclinação da superfície da água da lagoa Mangueira do que para um nível médio (cota 2,9 m), mantidas as demais condições inalteradas. Essa observação indica que a ação de cisalhamento do vento sobre a superfície da água da lagoa teve seu efeito ampliado para profundidades menores.

Apesar do banhado exercer influência desprezível sobre o desnível da superfície da lagoa Mangueira, como já comentado, o mesmo não ocorre em relação à elevação/rebaixamento do nível na lagoa. Observou-se que, para ventos constantes e orientados no sentido lagoa-banhado, após 2 dias, caso não existisse o banhado, a superfície da lagoa se elevaria cerca de 5 cm a mais, em relação à situação real, devido ao volume de água afluente da lagoa para o banhado. Entretanto, com vento de sentido inverso, não ocorreria diferença entre as duas situações (lagoa e banhado ou lagoa isolada). Isso foi atribuído à resistência ao escoamento proporcionada pela vegetação do banhado. Tal efeito foi mais intenso inibindo o escoamento do banhado para a lagoa, quando da ocorrência de vento nesse sentido (em torno de Nordeste), do que para o escoamento no sentido contrário. Em outras palavras, a vegetação, ou sua resistência ao escoamento, foi mais “eficiente” em evitar ou diminuir a “perda” de volume de água do banhado para a lagoa do que em inibir a afluência de água no sentido inverso.

Os diversos casos simulados levaram à conclusão de que, caso não existisse macrófitas aquáticas no banhado do Taim, o volume de água trocado com a lagoa Mangueira seria maior, ocasionando rebaixamento do nível na lagoa, quando da atuação de um vento de direção em torno de Sudoeste.

A seiche da lagoa Mangueira, induzida pela brusca interrupção de um vento constante, também foi analisada, procurando inferir quanto à influência do banhado sobre a mesma. Para as condições de simulação adotadas, verificou-se que a seiche da lagoa apresentou um período de oscilação de cerca de 9 h, estando de acordo com o valor estimado pela equação de Meriam (10,2 h), citada na literatura, e amplitudes relativamente reduzidas (5 a 10 cm). Supondo a lagoa como um sistema isolado, não integrado ao banhado, os resultados

indicaram que a amplitude da seiche seria aumentada (poucos centímetros), mas permanecendo o mesmo período de oscilação. Na outra situação estudada, que foi a consideração da lagoa integrada ao banhado, e este sem vegetação, a amplitude da seiche teria uma amplitude de oscilação intermediária aos dois casos já citados, e com período semelhante.

Todas as simulações realizadas mostraram que a distribuição espacial das macrófitas aquáticas influencia fortemente a hidrodinâmica do Taim, tanto em termos de oscilação do nível, circulação da água e proteção contra a ação do vento. Nas zonas consideradas com vegetação, o escoamento e a variação do nível foram muito distintos daquelas áreas consideradas sem vegetação, na medida que as primeiras são caracterizadas pela forte resistência ao escoamento, acarretando velocidades muito pequenas e grande amortecimento da oscilação do nível.

Em particular, observou-se que a presença de vegetação no extremo sul do banhado, na interface com a lagoa Mangueira, tem um impacto considerável sobre o padrão de circulação da água no mesmo, interferindo, significativamente, na interação entre os dois sistemas. A ocupação de toda a interface banhado-lagoa por macrófitas aquáticas emergentes reduz a influência da lagoa sobre o banhado, repercutindo na diminuição do volume de água trocado entre eles.

Além da ocorrência de macrófitas na interface, o fato de haver ou não uma continuidade de áreas sem vegetação no banhado, ligada diretamente à lagoa Mangueira, também se mostrou relevante. Caso haja uma área com tais características, a influência da oscilação do nível na lagoa Mangueira sobre o banhado é maior e se estende ao longo deste por uma maior área. As simulações realizadas permitiram verificar que a área de influência da oscilação do nível da lagoa sobre o banhado fica mais restrita à região sul deste, caso grande parte da sua área esteja coberta por vegetação, e, por outro lado, consegue se estender até próximo à porção norte do banhado, caso exista uma área contínua sem vegetação, desde a interface entre os dois sistemas.

De modo geral, observou-se que as lagoas internas do banhado (lagoas Jacaré e Nicola) têm o comportamento hidrodinâmico diretamente influenciado pela distribuição espacial da vegetação no restante do banhado e da ação direta do vento sobre elas. Tais lagoas se tornam mais “confinadas”, do ponto de vista hidrodinâmico, quando a vegetação ocupa maior área do banhado, principalmente na região circunvizinha. Também são altamente influenciadas pela cota do nível da água, já que níveis maiores tornam todo o banhado hidrodinamicamente interligado, enquanto que níveis menores tornam as lagoas mais isoladas.

Nesse último caso, a circulação da água nas lagoas Nicola e Jacaré fica restrita às correntes induzidas pela ação direta do vento sobre as mesmas.

Os resultados obtidos com esta pesquisa puderam ressaltar como a hidrodinâmica do banhado é influenciada pela distribuição espacial da vegetação, pela ação do vento e pela lagoa Mangueira. Além do mais, mostrou que tais fatores não atuam isoladamente, pelo contrário, estão relacionados de tal forma que torna ainda mais complexo o estudo do comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim.

A importância dos fatores citados sobre a hidrodinâmica do Taim, em particular a presença de vegetação aquática e sua distribuição espacial, diretamente associada ao hidroperíodo, ressalta a necessidade de um gerenciamento adequado do referido sistema. Para tanto, tornam-se fundamentais estudos que procurem identificar a oscilação natural do nível da água no banhado do Taim (hidroperíodo), e como as ações antrópicas na região são capazes de impactá-la.

7.2 RECOMENDAÇÕES

Embora o banhado do Taim apresente uma complexidade inerente à sua natureza, caso existissem mais informações sobre a região, seria possível obter uma melhor representação da mesma.

Recomenda-se fazer levantamentos batimétricos com maior detalhamento, principalmente na região da interface com a lagoa Mangueira, apesar da dificuldade de tal processo, face à grande presença de macrófitas aquáticas emergentes.

O comportamento hidrodinâmico das lagoas internas do banhado – lagoas Nicola e Jacaré – poderia ser melhor analisado mediante a redução da resolução da malha numérica de cálculo, desde que associada à alimentação do modelo com informações mais detalhadas.

Como ressaltado neste estudo, a variabilidade espacial da presença de vegetação é fundamental para explicar o padrão de circulação da água no banhado, de modo que uma ferramenta de grande utilidade seria a geração de mapas indicando as características da vegetação predominante em cada região. O referido material também teria ampla aplicação em pesquisas de cunho mais ecológico e biológico, já que a vegetação está intimamente relacionada a diversos processos físicos, químicos e biológicos do ecossistema. Para isso, recomenda-se o uso de sensoriamento remoto, através da obtenção de índices espectrais de vegetação, associado a campanhas de coleta de amostras em campo. Uma dificuldade extra reside no fato das profundidades serem muito pequenas, estando o solo e a superfície da água muito próximos entre si, além, é claro, das diferentes condições de ocorrência de vegetação,

que pode estar submersa, emergente ou flutuante. Tais características tornam a análise das imagens de satélite mais difíceis e complexas.

Os mapas de vegetação poderiam ser empregados com o propósito de distinguir áreas que proporcionam diferentes resistências ao escoamento, em função das características da vegetação predominante. Analogamente, seriam estabelecidas áreas que oferecem a mesma proteção contra o efeito da ação do vento. Na modelagem hidrodinâmica, seriam atribuídos diferentes coeficientes de rugosidade e redutor da ação do vento, baseados nas regiões consideradas de mesma resistência e mesma proteção contra o vento, respectivamente.

Durante o desenvolvimento desta pesquisa, chegou-se a calcular alguns índices espectrais de vegetação, que procuram traduzir uma maior ou menor quantidade de biomassa vegetal. Entretanto, face à complexidade do sistema e à falta de informações sobre as características locais da vegetação, não foi possível distinguir áreas de diferentes graus de resistência ao escoamento.

O uso de um sistema de informação geográfica, aplicado à região, facilitaria o acesso às informações, o desenvolvimento dos estudos e a interação entre os diversos pesquisadores, que estariam trabalhando sobre o mesmo banco de informações. Isso evitaria a ambigüidade de dados e tornaria mais rápido e mais útil o acesso aos resultados de cada pesquisa.

Um estudo interessante que poderia ser realizado no banhado do Taim é a avaliação do transporte de constituintes e do tempo de residência da água, questões bastante relevantes para possibilitar a análise de riscos ambientais, do transporte de nutrientes e outros compostos empregados na agricultura, de derramamentos acidentais de cargas tóxicas e para a construção de banhados artificiais, visando o tratamento de águas servidas. Para tanto, recomenda-se a modelagem hidrodinâmica em conjunto com equações de transporte de constituintes e de reações cinéticas.

Na mesma linha, estudos relativos ao transporte e proliferação de macrófitas aquáticas, fitoplâncton e zooplâncton também são factíveis e podem gerar resultados de grande aplicabilidade no entendimento de diversos processos do banhado.

Alguns dos estudos recomendados já estão sendo desenvolvidos, fazendo parte do programa PELD (Pesquisas Ecológicas de Longa Duração) – Sistema Hidrológico do Taim (sítio 7), ao qual esta pesquisa está associada, e a conclusão deles trará os benefícios comentados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, Michael B. **Computational hydraulics - Elements of the theory of free surface flows**. Pitman Advanced Publishing Program, Londres, 326 p., 1979.

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

ALMEIDA, Luís E. et al. Simulação da circulação induzida por vento na Lagoa dos Patos. In: **XIV Congresso Latino-Americano de Hidráulica**, Anais, p. 1251-1263, Montevideu, Uruguai, 1990.

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

AWRUCH, Armando M. Introdução de contornos móveis na solução das equações de águas rasas através de elementos finitos. In: **VII Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM)**, Anais, Uberlândia, p.295-304, 1983.

BELTRAME, Lawson et al. **Estudo para avaliação da disponibilidade hídrica da bacia da lagoa Mirim**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

BENNETT, Sean J. et al. Using simulated emergent vegetation to alter stream flow direction within a straight experimental channel. **Geomorphology**, 44, p. 115-126, 2002.

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

BOLSTER, Carl H.; SAIERS, James E. 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, 2002.

BOUDREAU, P.; LECLERC, M. Linking 1D and 2D finite element models of free surface flow with a multiple constraints imposition method. In: GAMBOLATI, G. (ed.), **Computational methods in surface hydrology**, Veneza, Itália, p. 125-131, 1990.

BROOKS, Robert P. An overview of ecological functions and economic values of wetlands. In: MAJUNDAR, Shyamal K. et al. (eds.), **Wetlands ecology and conservation: emphasis in Pennsylvania**, The Pennsylvania Academy of Science, c. 2, p. 11-19, 1989.

CANCINO, L.; NEVES, R. Hydrodynamic and sediment suspension modelling in estuarine systems - part 1: description of the numerical models. **Journal of Marine Systems**, 22, p. 105-116, 1999.

CASALAS, Alejandro B., 2002. Comunicação pessoal.

_____. **IPH-A – Aplicativo para modelação de estuários e lagoas, Manual de Uso**. Recursos Hídricos, n. 33, 37 p., 1996.

_____. **Modelo matemático de correntologia do estuário do rio Guaíba**. Recursos Hídricos, Publicação n. 12, 68 p., IPH/UFRGS, 1985.

CASULLI, V. Numerical simulation of shallow water flow. In: GAMBOLATI, G. (ed.), **Computational methods in surface hydrology**, p. 13-22, Venezia, Itália, 1990.

CASULLI, V.; CATTANI, E. Stability, accuracy and efficiency of a semi-implicit method for three-dimensional shallow water flow. **Computers Math. Applic.**, vol. 27, n. 4, p. 99-112, 1994.

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

CRÓSTA, Alvaro P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. UNICAMP, Campinas, 170 p., 1992.

CROWDER, D. W.; DIPLAS, P. Using two-dimensional hydrodynamic models at scales of ecological importance. **Journal of Hydrology**, 230, p. 172-191, 2000.

CUNGE, J. A. et al. **Practical aspects of computational river hydraulics**. Pitman Advanced Publishing Program, Boston, 420 p., 1980.

CZM. 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.

DAVID, Peter G. Changes in plant communities relative to hydrologic conditions in the Florida Everglades. **Wetlands**, v. 16, n. 1, p. 15-23, 1996.

DIBIKE, Yonas B. Developing generic hydrodynamic models using artificial neural networks. **Journal of Hydraulic Research**, v. 40, n. 2, p. 183-190, 2002.

EIGER, S. Modelos de escoamento turbulentos. In: SILVA, R. V. (ed.). **Métodos numéricos em recursos hídricos**, ABRH, v. 1, c.2, p. 84-155, 1989.

_____. Simulação numérica bidimensional em plano vertical de escoamentos em reservatórios – comparação entre duas abordagens. In: SILVA, R. V. (ed.). **Métodos numéricos em recursos hídricos**, ABRH, v. 3, c. 2, p. 121-228, 1999.

EPA, U. S. Environmental Protection Agency. **Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters – manual**. National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, EUA, EPA/625/R-99/010, 154 p., 2000.

_____, U.S Environmental Protection Agency. **The quality of our nation's water: 1992, 1992**.

ESDI. Earth Science Data Interface, **Global Land Cover Facility**. Disponível em: <<http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/glcf/esdi?command=searchMap>>. Acesso em 20/nov/2003.

FATHI-MAGHADAM, M.; KOUWEN, N. Nonrigid, nonsubmerged, vegetative roughness on floodplains. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 123, n.1, p. 51-57, 1997.

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

FISCHER-ANTZE, Tim et al. 3D numerical modelling of open-channel flow with submerged vegetation. **Journal of Hydraulic Research**, v. 39, n. 3, p. 303-310, 2001.

FREEMAN, G. E. et al. **Determination of resistance due to shrubs and woody vegetation**. Final Report ERDC/CHL TR-00-25, Coastal and Hydraulics Laboratory, U.S. Army Corps of Engineers, 33 p., 2000.

GUARDO, Mariano; TOMASELLO, Richard S. Hydrodynamic simulations of a constructed wetland in South Florida. **Water Resources Bulletin**, v. 31, n. 4, p. 687-701, 1995.

GUNTENSPERGEN, Glenn R.; STEARNS, Forest. Ecological perspectives on wetland systems. In: GODFREY, Paul J. et al. (eds.), **Ecological considerations in wetlands treatment of municipal wastewaters**, Van Nostrand Reinhold Company, Nova York, c. 5, p. 69-95, 1985.

HAMMER, D. E.; KADLEC, R. H. A model for wetland surface water dynamics. **Water Resources Research**, v. 22, n. 13, p. 1951-1958, 1986.

- HAMMER, Donald E. **Creating freshwater wetlands**. Lewis Publishers, 1992.
- HEATHWAITE, A. L., 1995. Overview of the hydrology of british wetlands. In: HUGHES, J. M. R.; HEATHWAITE, L. (eds), **Hydrology and hydrochemistry of british wetlands**, John Wiley & Sons, c. 2, p. 11-20.
- HOUAISS, Antonio et al. **Dicionário HOUAISS da Língua Portuguesa**, Instituto Antônio Houaiss de Lexicografia, Objetiva, Rio de Janeiro, 2001.
- IBAMA, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Estação Ecológica do Taim**. Disponível em: <<http://www2.ibama.gov.br/unidades/estacoes/reuc/3017.htm>>, Acesso em 20 fev. 2003.
- JADHAV, Ranjit S.; BUCHBERGER, Steven G. Effects of vegetation on flow through free water surface wetlands. **Ecological Engineering**, n. 5, p. 481-496, 1995.
- JÓZSA, J. et al. Calibration of modelled shallow lake flow using wind field modification. In: GAMBOLATI, G. (ed.), **Computational methods in surface hydrology**, p. 165-170, Veneza, Itália, 1990.
- KADLEC, Robert H. Overland flow in wetlands: vegetation resistance. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 5, p. 691-706, 1990.
- LAUTENSCHLAGER, Sandro R.; EIGER, Sérgio. Modelagem do desempenho de wetlands construídas. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Aracajú, 2001.
- LE PAPE, O.; MENESGUEN, A. Hydrodynamic prevention of eutrophication in the bay of Brest (France), a modelling approach. **Journal of Marine Systems**, 12, p. 171-186, 1997.
- LEITÃO, Paulo M. C. **Integração de escalas e de processos na modelação do ambiente marinho**. Tese de Doutorado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 466 p., 2002.
- LÓPEZ, Fabián; GARCÍA, Marcelo. Open-channel flow through simulated vegetation: suspended sediment transport modeling. **Water Resources Research**, v. 34, n. 9, p. 2341-2352, 1998.
- MARBLE, Anne D. **A guide to wetland functional design**, Lewis Publishers, Boca Raton, EUA, 222 p., 1992.
- MARQUES, David M. Comunicação pessoal, 2002.

- MARQUES, David M. et al. 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. 1-8, Salvador, 1997.
- MARQUES, David M.; VILLANUEVA, Adolfo O. N. **Regime hidrológico do banhado do Taim e sua conservação**. ABRH Notícias, Revista Informativa da ABRH, n. 4, p. 22-61, 2001.
- MARTIN, J. L.; MCCUTCHEON, S. C. **Hydrodynamics and transport for water quality modeling**. Lewis Publishers, 1999.
- MENDES, Carlos A. B.; CIRILO, José A. **Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação**. ABRH, Coleção Geoprocessamento, v. 1, 533 p., 2001.
- MITSCH, William J.; GOSELINK, James G. **Wetlands**. Van Nostrand Reinhold, Nova York, EUA, 539 p., 1986.
- NEPF, H. M.; VIVONI, E. R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. c12, p. 28.547-28.557, 2000.
- NEWALL, A. M.; HUGHES, J. M. R. Microflow environments of aquatic plants in flowing water wetlands. In: HUGHES, J. M. R.; HEATHWAITE, L. (eds), **Hydrology and hydrochemistry of british wetlands**, John Wiley & Sons, c. 19, p. 363-381, 1995.
- PEDRAZZI, Iria. **Banhado do Taim: Sinfonia da natureza**. Mares do Sul, Florianópolis, 1977.
- PELD. 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, Sylvester; BOSMAJIAN III, George. Analysis of flow through vegetation. **Journal of Hydraulics Division**, v. 101, n. HY7, p. 871-884, 1975.
- PINHO, J. L. S. et al. Utilização de um modelo matemático bidimensional no estudo da hidrodinâmica da ria de Arosa. In: **XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, ABRH, Aracajú, 2001.
- PITLO, R. H.; DAWSON, F. H. Flow-resistance of aquatic weeds. In: PEITERSE, A. H.; MIRPHY, K. J. **Aquatic weeds**, Oxford University Press, p. 74-84, Oxford, 1993.
- PODSETCHEV, Victor; SCHERNEWSKI, Gerald. The influence of spatial wind inhomogeneity on flow patterns in a small lake. **Water Research**, v. 33, n. 15, p. 3348-3356, 1999.

RAJAR, Rudi et al. Hydrodynamic and water quality modelling: case studies. **Ecological Modelling**, 101, p. 209-228, 1997.

RAMMING, Hans-Gerhard. 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, 1979.

RIBEIRO, Paulo A. R. **Desprendimento de vórtices e controle em esteira de cilindros por simulação numérica direta**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 109 p., 2002.

ROSAURO, Nara M. L.; SCHETTINI, Edith B. C. Aplicação de um modelo bi-dimensional à Laguna dos Patos – RS – Brasil. In: **6º Encuentro Nacional de Investigadores y Usuarios del Metodo de los Elementos Finitos**, Anais, San Carlos de Bariloche, Argentina, 1989.

ROSMAN, Paulo C. Modelos de circulação em corpos d'água rasos. In: SILVA, R. V. (ed.). **Métodos numéricos em recursos hídricos**, ABRH, v. 1, c. 3, p. 156-221, 1989.

_____. Subsídios para modelagem de sistemas estuarinos. In: SILVA, R. V. (ed.). **Métodos numéricos em recursos hídricos**, ABRH, v. 3, c. 3, p. 229-343, 1999.

_____. Um sistema computacional de hidrodinâmica ambiental. In: SILVA, R. V. (ed.). **Métodos numéricos em recursos hídricos**, ABRH, v. 5, c. 1, p. 1-161, 2001.

SANZONE, Stephanie; McELROY, Anne (eds.). **Ecological impacts and evaluation criteria for the use of structures in marsh management**. U. S. Environmental Protection Agency (EPA), Science Advisory Board, Washington, EUA, 63 p., 1998.

SCHETTINI, Edith B. C. **Modelo matemático bidimensional de transporte de massa em elementos finitos com ênfase em estuários**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 90 p., 1991.

SCHLICHTING, Hermann. **Boundary-layer theory**. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, Nova York, 7ª edição, 812 p., 1979.

SILVEIRA, André L. L. **Modelo hidrodinâmico bidimensional com aplicação ao rio Guaíba**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 237 p., 1986.

SHAY, Jennifer M. et al. Changes in shoreline vegetation over a 50-year period in the Delta marsh, Manitoba in response to water levels. **Wetlands**, v. 19, n. 2, p. 413-425, 1999.

SHIH, S. F.; RAHI, G. S. 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, 1981.

SOMES, Nicholas L. et al. Numerical simulation of wetland hydrodynamics. **Environment International**, v. 25, n. 6/7, p. 773-779, 1999.

STEPHAN, Ursula; GUTKNECHT, Dieter. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation. **Journal of Hydrology**, 269, p. 27-43, 2002.

STERN, David A. et al. Description of flow through a natural wetland using dye tracer tests. **Ecological Engineering**, n. 18, p. 173-184, 2001.

STREETER, Victor L. **Handbook of fluid dynamics**. McGraw-Hill Book Company, Nova York, 1961.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. **A first course of turbulence**. The Massachusetts Institute of Technology, 1972.

TORMA, Caroline; MELO, Itamar. Lindeiros temem perder terras para o Taim. **Jornal Zero Hora**. Porto Alegre, p. 4-5, 07 jun. 2003.

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

TURNER, A. K. et al. Discharge-depth equation for shallow flow. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 104, n. IR1, p. 95-110, 1978.

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

VILLANUEVA, Adolfo O. N. Comunicação pessoal, 2002.

_____. **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, 125 p., 1997.

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

WEIYAN, Tan. **Shallow water hydrodynamics – mathematical theory and numerical solution of a two-dimensional system of shallow water equations**. Elsevier Oceanography Series, 55, 1992.

WHEELER, B. D.; SHAW, S. C. Plants as hydrologists? An assessment of the value of plants as indicators of water conditions in fens. In: HUGHES, J. M. R.; HEATHWAITE, L. (eds), **Hydrology and hydrochemistry of british wetlands**, John Wiley & Sons, c. 5, p. 63-82, 1995.

WHITE, Frank M. **Fluid mechanics**. McGraw-Hill Kogakusha, 701 p., 1979.

_____. **Viscous fluid flow**. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, McGraw-Hill, 2^a edição, 614 p., 1991.

WU, F.-C. et al. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, n. 9, p. 934-942, 1999.

YU, Liren; RIGHETTO, Antonio M. Modelos de turbulência e aplicações a corpos de água naturais. In: SILVA, R. C. V (ed.), **Métodos numéricos em recursos hídricos**, v. 4, c. 1, p. 1-122, 1999.

ZHANG, B. et al. A shallow water finite element model for moving fronts. In: GAMBOLATI, G. (ed.), **Computational methods in surface hydrology**, Venezia, Itália, p. 91-97, 1990.

ANEXO A1

ESQUEMA NUMÉRICO EM DIFERENÇAS FINITAS DO MODELO IPH-A

O modelo IPH-A utiliza um esquema numérico tipo ADI, com algumas modificações, cuja discretização numérica em diferenças finitas, adotada para cada um dos termos das equações matemáticas que descrevem o escoamento, é apresentada a seguir.

A1.1 CÁLCULO POR LINHAS: 1º SEMI-INTERVALO DE TEMPO (N, N+1/2)

A1.1.1 Discretização da equação da continuidade

A equação da continuidade é da seguinte forma:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UH) + \frac{\partial}{\partial y}(VH) = 0, \quad (A1.1)$$

cujos termos são discretizados conforme mostrado a seguir.

- termo $\frac{\partial \eta}{\partial t}$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} \cong \frac{\eta_{j,k}^{n+1/2} - \eta_{j,k}^n}{\Delta t / 2} = \frac{2}{\Delta t} [\eta_{j,k}^{n+1/2} - \eta_{j,k}^n] \quad (A1.2)$$

- termo $\frac{\partial(HU)}{\partial x}$

Esse termo é aproximado da forma:

$$\frac{\partial(HU)}{\partial x} \cong \frac{1}{\Delta x} [(HU)_{j,k} - (HU)_{j-1,k}], \quad (A1.3)$$

e, usando a relação $H = h + \eta$ (onde se toma a componente hu para representar a batimetria h), tem-se:

$$(HU)_{j,k} = \left[hu_{j,k} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j+1,k}^n}{2} \right] \cdot U_{j,k}^{n+1/2} \quad (A1.4)$$

$$(HU)_{j-1,k} = \left[hu_{j-1,k} + \frac{\eta_{j-1,k}^n + \eta_{j,k}^n}{2} \right] \cdot U_{j-1,k}^{n+1/2} \quad (A1.5)$$

Assim, substituindo as expressões (A1.4) e (A1.5) em (A1.3), tem-se:

$$\frac{\partial(HU)}{\partial x} \cong \frac{1}{\Delta x} \left[\left(hu_{j,k} + \frac{\eta_{j+1,k}^n + \eta_{j,k}^n}{2} \right) U_{j,k}^{n+1/2} - \left(hu_{j-1,k} + \frac{\eta_{j-1,k}^n + \eta_{j,k}^n}{2} \right) U_{j-1,k}^{n+1/2} \right] \quad (A1.6)$$

$$\text{- termo } \frac{\partial(\text{HV})}{\partial y}$$

De forma análoga à discretização do termo anterior, tem-se:

$$\frac{\partial(\text{HV})}{\partial y} \cong \frac{1}{\Delta y} [(\text{HV})_{j,k} - (\text{HV})_{j,k-1}], \quad (\text{A1.7})$$

e, tomando a componente hv para representar a batimetria h, tem-se:

$$(\text{HV})_{j,k} = \left[hv_{j,k} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j,k+1}^n}{2} \right] \cdot V_{j,k}^n \quad (\text{A1.8})$$

$$(\text{HV})_{j,k-1} = \left[hv_{j,k-1} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j,k-1}^n}{2} \right] \cdot V_{j,k-1}^n \quad (\text{A1.9})$$

Substituindo as expressões (A1.8) e (A1.9) em (A1.7), resulta:

$$\frac{\partial(\text{HV})}{\partial y} \cong \frac{1}{\Delta y} \left[\left(hv_{j,k} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j,k+1}^n}{2} \right) V_{j,k}^n - \left(hv_{j,k-1} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j,k-1}^n}{2} \right) V_{j,k-1}^n \right] \quad (\text{A1.10})$$

Portanto, a equação da continuidade discretizada fica:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\Delta t} [\eta_{j,k}^{n+1/2} - \eta_{j,k}^n] + \frac{1}{\Delta x} \left(hu_{j,k} + \frac{\eta_{j+1,k}^n + \eta_{j,k}^n}{2} \right) U_{j,k}^{n+1/2} - \frac{1}{\Delta x} \left(hu_{j-1,k} + \frac{\eta_{j-1,k}^n + \eta_{j,k}^n}{2} \right) U_{j-1,k}^{n+1/2} + \\ & + \frac{1}{\Delta y} \left(hv_{j,k} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j,k+1}^n}{2} \right) V_{j,k}^n - \frac{1}{\Delta y} \left(hv_{j,k-1} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j,k-1}^n}{2} \right) V_{j,k-1}^n = 0 \end{aligned} \quad (\text{A1.11})$$

Reorganizando a equação anterior, em função das variáveis definidas no final do semi-intervalo de tempo (n+1/2), tem-se:

$$AU_{j-1,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2} + BU_{j,k}^{n+1/2} = D \quad (\text{A1.12})$$

onde:

$$A = \frac{-\Delta t}{2\Delta x} \left(hu_{j-1,k} + \frac{\eta_{j-1,k}^n + \eta_{j,k}^n}{2} \right) \quad (\text{A1.13})$$

$$B = \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(hu_{j,k} + \frac{\eta_{j+1,k}^n + \eta_{j,k}^n}{2} \right) \quad (\text{A1.14})$$

$$D = \eta_{j,k}^n - \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[\left(hv_{j,k} + \frac{\eta_{j,k+1}^n + \eta_{j,k}^n}{2} \right) V_{j,k}^n \right] + \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left[\left(hv_{j,k-1} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j,k-1}^n}{2} \right) V_{j,k-1}^n \right] \quad (\text{A1.15})$$

A1.1.2 Discretização da equação dinâmica no eixo x

A seguir é apresentada a discretização dos termos da equação dinâmica no eixo x (eq. A1.16), correspondente ao 1º semi-intervalo de tempo.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \Omega V + \frac{\rho_{\text{ar}} C_D \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho H} - g \frac{U \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} + \varepsilon \nabla^2 U \quad (\text{A1.16})$$

- termo $\frac{\partial U}{\partial t}$

$$\frac{\partial U}{\partial t} \cong \frac{1}{\Delta t} [U_{j,k}^{n+1/2} - U_{j,k}^{n-1/2}] \quad (\text{A1.17})$$

- termo $U \frac{\partial U}{\partial x}$

$$U \frac{\partial U}{\partial x} \cong \frac{U_{j,k}^{n+1/2}}{2\Delta x} [U_{j+1,k}^{n-1/2} - U_{j-1,k}^{n-1/2}] \quad (\text{A1.18})$$

- termo $V \frac{\partial U}{\partial y}$

$$V \frac{\partial U}{\partial y} \cong \frac{\bar{V}_{j,k}^n}{2\Delta y} [U_{j,k+1}^{n-1/2} - U_{j,k-1}^{n-1/2}] \quad (\text{A1.19})$$

onde:

$$\bar{V}_{j,k}^n = \frac{1}{4} (V_{j,k}^n + V_{j+1,k}^n + V_{j,k-1}^n + V_{j+1,k-1}^n) \quad (\text{A1.20})$$

- termo ΩV

$$\Omega V \cong \Omega \bar{V}_{j,k}^n \quad (\text{A1.21})$$

onde $\bar{V}_{j,k}^n$ está definido em (A1.20).

- termo $\left(-g \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)$

A derivada $\frac{\partial \eta}{\partial x}$ é calculada como a média das derivadas nos tempos (n+1/2) e (n-1/2):

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} \cong \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^{n+1/2} + \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right)^{n-1/2} \right] = \frac{1}{2\Delta x} (\eta_{j+1,k}^{n+1/2} - \eta_{j,k}^{n+1/2} + \eta_{j+1,k}^{n-1/2} - \eta_{j,k}^{n-1/2}), \quad (\text{A1.22})$$

e, portanto:

$$-g \frac{\partial \eta}{\partial x} \cong \frac{-g}{2\Delta x} (\eta_{j+1,k}^{n+1/2} - \eta_{j,k}^{n+1/2} + \eta_{j+1,k}^{n-1/2} - \eta_{j,k}^{n-1/2}) \quad (\text{A1.23})$$

$$\text{- termo} \left(-g \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} \right)$$

Esse termo é discretizado da seguinte forma:

$$-g \frac{U\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} \cong \frac{-g}{2} [U_{j,k}^{n+1/2} + U_{j,k}^{n-1/2}] \frac{\sqrt{(U_{j,k}^{n-1/2})^2 + (\bar{V}_{j,k}^n)^2}}{\bar{H}_{j,k}^n (Cu_{j,k}^n)^2} \quad (\text{A1.24})$$

onde $\bar{H}_{j,k}^n$ é definido assim:

$$\bar{H}_{j,k}^n = hu_{j,k} + \frac{\eta_{j,k}^n + \eta_{j+1,k}^n}{2} \quad (\text{A1.25})$$

e o coeficiente de Chézy $(Cu_{j,k}^n)$ pode ser informado diretamente ou calculado em função da altura d'água $\bar{H}_{j,k}^n$ como, por exemplo, através das fórmulas:

$$Cu_{j,k}^n = \frac{(\bar{H}_{j,k}^n)^{1/6}}{n_M} \quad (\text{A1.26})$$

$$Cu_{j,k}^n = \frac{\sqrt{g}}{k} \left[\ln \left(\frac{\bar{H}_{j,k}^n}{z_0} \right) - 1 \right] \quad (\text{A1.27})$$

onde n_M é o coeficiente de Manning, κ é a constante de Kármán e z_0 é a rugosidade do fundo.

$$\text{- termo} \frac{\rho_{ar} C_D \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho H}$$

A discretização numérica do termo referente à tensão de cisalhamento do vento na superfície é da seguinte forma:

$$\frac{\rho_{ar} C_D \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho H} \cong \frac{\rho_{ar} C_D \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho \bar{H}_{j,k}^n} = \frac{Cv1 \cdot \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\bar{H}_{j,k}^n} \quad (\text{A1.28})$$

onde $\bar{H}_{j,k}^n$ é definido em (A1.25) e $Cv1$ é um coeficiente dado por $Cv1 = \rho_{ar} C_D / \rho$.

$$\text{- termo} \quad \varepsilon \nabla^2 U$$

Na discretização desse termo, cada uma das derivadas segundas é aproximada em função de 3 pontos, resultando em:

$$\varepsilon \nabla^2 U = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \cong \varepsilon \left(\frac{U_{j+1,k}^{n-1/2} - 2U_{j,k}^{n-1/2} + U_{j-1,k}^{n-1/2}}{\Delta x^2} \right) + \varepsilon \left(\frac{U_{j,k+1}^{n-1/2} - 2U_{j,k}^{n-1/2} + U_{j,k-1}^{n-1/2}}{\Delta y^2} \right) \quad (\text{A1.29})$$

Assim, reunindo os termos, a equação dinâmica no eixo x , discretizada em diferenças finitas, para o 1º semi-intervalo de tempo, é a seguinte:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\Delta t} (U_{j,k}^{n+1/2} - U_{j,k}^{n-1/2}) + U_{j,k}^{n+1/2} \frac{1}{2\Delta x} (U_{j+1,k}^{n-1/2} - U_{j-1,k}^{n-1/2}) + \bar{V}_{j,k}^n \frac{1}{2\Delta y} (U_{j,k+1}^{n-1/2} - U_{j,k-1}^{n-1/2}) = \\ & = \Omega \bar{V}_{j,k}^n - \frac{g}{2\Delta x} (\eta_{j+1,k}^{n+1/2} - \eta_{j,k}^{n+1/2} + \eta_{j+1,k}^{n-1/2} - \eta_{j,k}^{n-1/2}) - \frac{g(U_{j,k}^{n+1/2} + U_{j,k}^{n-1/2})}{2\bar{H}_{j,k}^n (Cu_{j,k}^n)^2} \sqrt{(U_{j,k}^{n-1/2})^2 + (\bar{V}_{j,k}^n)^2} + \\ & + \frac{Cv1 \cdot \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\bar{H}_{j,k}^n} + \frac{\varepsilon}{\Delta x^2} (U_{j+1,k}^{n-1/2} - 2U_{j,k}^{n-1/2} + U_{j-1,k}^{n-1/2}) + \frac{\varepsilon}{\Delta y^2} (U_{j,k+1}^{n-1/2} - 2U_{j,k}^{n-1/2} + U_{j,k-1}^{n-1/2}) \end{aligned} \quad (\text{A1.30})$$

Agrupando os termos em função das variáveis no tempo ($n+1/2$), a equação anterior pode ser reescrita sob a seguinte forma:

$$E\eta_{j,k}^{n+1/2} + F U_{j,k}^{n+1/2} + G\eta_{j+1,k}^{n+1/2} = L \quad (\text{A1.31})$$

onde

$$E = -\frac{g\Delta t}{2\Delta x} \quad (\text{A1.32})$$

$$G = \frac{g\Delta t}{2\Delta x} \quad (\text{A1.33})$$

$$F = 1 + \frac{\Delta t}{2\Delta x} (U_{j+1,k}^{n-1/2} - U_{j-1,k}^{n-1/2}) + \frac{g\Delta t}{2\bar{H}_{j,k}^n (Cu_{j,k}^n)^2} \sqrt{(U_{j,k}^{n-1/2})^2 + (\bar{V}_{j,k}^n)^2} \quad (\text{A1.34})$$

$$\begin{aligned} L = & U_{j,k}^{n-1/2} - \bar{V}_{j,k}^n \frac{\Delta t}{2\Delta y} (U_{j,k+1}^{n-1/2} - U_{j,k-1}^{n-1/2}) + \Omega \bar{V}_{j,k}^n \Delta t - \frac{g\Delta t}{2\Delta x} (\eta_{j+1,k}^{n-1/2} - \eta_{j,k}^{n-1/2}) + \\ & - \frac{g\Delta t U_{j,k}^{n-1/2}}{2\bar{H}_{j,k}^n (Cu_{j,k}^n)^2} \sqrt{(U_{j,k}^{n-1/2})^2 + (\bar{V}_{j,k}^n)^2} + \frac{Cv1 \cdot \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\bar{H}_{j,k}^n} \Delta t + \\ & + \frac{\varepsilon\Delta t}{\Delta x^2} (U_{j+1,k}^{n-1/2} - 2U_{j,k}^{n-1/2} + U_{j-1,k}^{n-1/2}) + \frac{\varepsilon\Delta t}{\Delta y^2} (U_{j,k+1}^{n-1/2} - 2U_{j,k}^{n-1/2} + U_{j,k-1}^{n-1/2}) \end{aligned} \quad (\text{A1.35})$$

A1.2 CÁLCULO POR COLUNAS: 2º SEMI-INTERVALO DE TEMPO (N+1/2,N+1)

A1.2.1 Discretização da equação da continuidade

- termo $\frac{\partial \eta}{\partial t}$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} \cong \frac{2}{\Delta t} [\eta_{j,k}^{n+1} - \eta_{j,k}^{n+1/2}] \quad (\text{A1.36})$$

- termo $\frac{\partial(HU)}{\partial x}$

Esse termo é aproximado da forma:

$$\frac{\partial(HU)}{\partial x} \cong \frac{1}{\Delta x} [(HU)_{j,k} - (HU)_{j-1,k}], \quad (\text{A1.37})$$

e, usando a relação $H = h + \eta$ (onde se toma a componente hu para representar a batimetria h), tem-se:

$$(HU)_{j,k} = \left[hu_{j,k} + \frac{\eta_{j,k}^{n+1/2} + \eta_{j+1,k}^{n+1/2}}{2} \right] \cdot U_{j,k}^{n+1/2} \quad (\text{A1.38})$$

$$(HU)_{j-1,k} = \left[hu_{j-1,k} + \frac{\eta_{j-1,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right] \cdot U_{j-1,k}^{n+1/2} \quad (\text{A1.39})$$

Assim, substituindo as expressões (A1.38) e (A1.39) em (A1.37), tem-se:

$$\frac{\partial(HU)}{\partial x} \cong \frac{1}{\Delta x} \left[\left(hu_{j,k} + \frac{\eta_{j+1,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) U_{j,k}^{n+1/2} - \left(hu_{j-1,k} + \frac{\eta_{j-1,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) U_{j-1,k}^{n+1/2} \right] \quad (\text{A1.40})$$

- termo $\frac{\partial(HV)}{\partial y}$

Procedendo de modo análogo ao item anterior, obtém-se:

$$\frac{\partial(HV)}{\partial y} \cong \frac{1}{\Delta y} [(HV)_{j,k} - (HV)_{j,k-1}], \quad (\text{A1.41})$$

e, tomando a componente hv para representar a batimetria h , tem-se:

$$(HV)_{j,k} = \left[hv_{j,k} + \frac{\eta_{j,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k+1}^{n+1/2}}{2} \right] \cdot V_{j,k}^{n+1} \quad (\text{A1.42})$$

$$(HV)_{j,k-1} = \left[hv_{j,k-1} + \frac{\eta_{j,k-1}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right] \cdot V_{j,k-1}^{n+1} \quad (A1.43)$$

Substituindo (A1.42) e (A1.43) em (A1.41):

$$\frac{\partial(HV)}{\partial y} \cong \frac{1}{\Delta y} \left[\left(hv_{j,k} + \frac{\eta_{j,k+1}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) V_{j,k}^{n+1} - \left(hv_{j,k-1} + \frac{\eta_{j,k-1}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) V_{j,k-1}^{n+1} \right] \quad (A1.44)$$

Assim, a equação da continuidade discretizada em diferenças finitas, para o 2º semi-intervalo de tempo tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\Delta t} [\eta_{j,k}^{n+1} - \eta_{j,k}^{n+1/2}] + \frac{1}{\Delta x} \left(hu_{j,k} + \frac{\eta_{j+1,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) U_{j,k}^{n+1/2} - \frac{1}{\Delta x} \left(hu_{j-1,k} + \frac{\eta_{j-1,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) U_{j-1,k}^{n+1/2} + \\ & + \frac{1}{\Delta y} \left(hv_{j,k} + \frac{\eta_{j,k+1}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) V_{j,k}^{n+1} - \frac{1}{\Delta y} \left(hv_{j,k-1} + \frac{\eta_{j,k-1}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) V_{j,k-1}^{n+1} = 0 \end{aligned} \quad (A1.45)$$

A equação anterior pode ser reescrita sob a seguinte forma:

$$MV_{j,k-1}^{n+1} + \eta_{j,k}^{n+1} + OV_{j,k}^{n+1} = Q \quad (A1.46)$$

onde:

$$M = \frac{-\Delta t}{2\Delta y} \left(hv_{j,k-1} + \frac{\eta_{j,k-1}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) \quad (A1.47)$$

$$O = \frac{\Delta t}{2\Delta y} \left(hv_{j,k} + \frac{\eta_{j,k+1}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) \quad (A1.48)$$

$$Q = \eta_{j,k}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(hu_{j-1,k} + \frac{\eta_{j-1,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \right) U_{j-1,k}^{n+1/2} - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left(hu_{j,k} + \frac{\eta_{j,k}^{n+1/2} + \eta_{j+1,k}^{n+1/2}}{2} \right) U_{j,k}^{n+1/2} \quad (A1.49)$$

A1.2.2 Discretização da equação dinâmica no eixo y

A discretização de cada um dos termos da equação dinâmica na direção y

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \Omega U + \frac{\rho_{ar} C_D \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho H} - g \frac{V \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} + \varepsilon \nabla^2 V \quad (A1.50)$$

é apresentada a seguir:

$$\text{- termo } \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} \cong \frac{1}{\Delta t} [V_{j,k}^{n+1} - V_{j,k}^n] \quad (\text{A1.51})$$

$$\text{- termo } U \frac{\partial V}{\partial x}$$

$$U \frac{\partial V}{\partial x} \cong \frac{\bar{U}_{j,k}^{n+1/2}}{2\Delta x} [V_{j+1,k}^n - V_{j-1,k}^n] \quad (\text{A1.52})$$

onde:

$$\bar{U}_{j,k}^{n+1/2} = \frac{1}{4} (U_{j-1,k+1}^{n+1/2} + U_{j-1,k}^{n+1/2} + U_{j,k}^{n+1/2} + U_{j,k+1}^{n+1/2}) \quad (\text{A1.53})$$

$$\text{- termo } V \frac{\partial V}{\partial y}$$

$$V \frac{\partial V}{\partial y} \cong \frac{V_{j,k}^{n+1}}{2\Delta y} [V_{j,k+1}^n - V_{j,k-1}^n] \quad (\text{A1.54})$$

$$\text{- termo } (-\Omega U)$$

$$-\Omega U \cong -\Omega \bar{U}_{j,k}^{n+1/2} \quad (\text{A1.55})$$

onde $\bar{U}_{j,k}^{n+1/2}$ está definido em (A1.53).

$$\text{- termo } \left(-g \frac{\partial \eta}{\partial y} \right)$$

A derivada $\frac{\partial \eta}{\partial y}$ é calculada como a média das derivadas nos tempos (n+1) e (n):

$$\frac{\partial \eta}{\partial y} \cong \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^{n+1} + \left(\frac{\partial \eta}{\partial y} \right)^n \right], \quad (\text{A1.56})$$

e, desse modo:

$$-g \frac{\partial \eta}{\partial y} \cong \frac{-g}{2\Delta y} (\eta_{j,k+1}^{n+1} - \eta_{j,k}^{n+1} + \eta_{j,k+1}^n - \eta_{j,k}^n) \quad (\text{A1.57})$$

$$\text{- termo } \left(-g \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} \right)$$

$$-g \frac{V\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H} \cong \frac{-g}{2} [V_{j,k}^{n+1} + V_{j,k}^n] \frac{\sqrt{(\bar{U}_{j,k}^{n+1/2})^2 + (V_{j,k}^n)^2}}{\bar{H}_{j,k}^{n+1/2} (Cv_{j,k}^{n+1/2})^2} \quad (A1.58)$$

onde $\bar{U}_{j,k}^{n+1/2}$ está definido em (A1.53) e $\bar{H}_{j,k}^{n+1/2}$ é definido da seguinte forma:

$$\bar{H}_{j,k}^{n+1/2} = h v_{j,k} + \frac{\eta_{j,k+1}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2}}{2} \quad (A1.59)$$

e o coeficiente de Chèzy ($Cv_{j,k}^{n+1/2}$) pode ser um valor conhecido ou calculado por uma expressão em função da altura d'água $\bar{H}_{j,k}^{n+1/2}$, de maneira análoga à equação dinâmica no eixo x , como, por exemplo, através das fórmulas:

$$Cv_{j,k}^{n+1/2} = \frac{(\bar{H}_{j,k}^{n+1/2})^{1/6}}{n_M} \quad (A1.60)$$

$$Cv_{j,k}^{n+1/2} = \frac{\sqrt{g}}{k} \left[\ln \left(\frac{\bar{H}_{j,k}^{n+1/2}}{z_0} \right) - 1 \right] \quad (A1.61)$$

$$- \text{ termo } \frac{\rho_{ar} C_D \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho H}$$

O termo relativo à tensão de cisalhamento do vento na direção y é discretizado da seguinte forma:

$$\frac{\rho_{ar} C_D \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho H} \cong \frac{Cv1 \cdot \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\bar{H}_{j,k}^{n+1/2}}, \quad (A1.62)$$

onde $\bar{H}_{j,k}^{n+1/2}$ é definido em (A1.59) e $Cv1$ é um coeficiente dado por $Cv1 = \rho_{ar} C_D / \rho$.

- termo $\varepsilon \nabla^2 V$

$$\varepsilon \nabla^2 V = \varepsilon \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \cong \varepsilon \left(\frac{V_{j-1,k}^n - 2V_{j,k}^n + V_{j+1,k}^n}{\Delta x^2} \right) + \varepsilon \left(\frac{V_{j,k+1}^n - 2V_{j,k}^n + V_{j,k-1}^n}{\Delta y^2} \right) \quad (A1.63)$$

Então, reunindo cada um dos termos discretizados na equação (A1.50), tem-se:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\Delta t} (\mathbf{V}_{j,k}^{n+1} - \mathbf{V}_{j,k}^n) + \bar{U}_{j,k}^{n+1/2} \frac{1}{2\Delta x} (\mathbf{V}_{j+1,k}^n - \mathbf{V}_{j-1,k}^n) + \mathbf{V}_{j,k}^{n+1} \frac{1}{2\Delta y} (\mathbf{V}_{j,k+1}^n - \mathbf{V}_{j,k-1}^n) = \\
& = -\Omega \bar{U}_{j,k}^{n+1/2} - \frac{g}{2\Delta y} (\eta_{j,k+1}^{n+1} - \eta_{j,k}^{n+1} + \eta_{j,k+1}^n - \eta_{j,k}^n) - \frac{g(\mathbf{V}_{j,k}^{n+1} + \mathbf{V}_{j,k}^n)}{2\bar{H}_{j,k}^{n+1/2} (Cv_{j,k}^{n+1/2})^2} \sqrt{(\bar{U}_{j,k}^{n+1/2})^2 + (\mathbf{V}_{j,k}^n)^2} + \\
& + \frac{Cv1 \cdot \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\bar{H}_{j,k}^{n+1/2}} + \frac{\varepsilon}{\Delta x^2} (\mathbf{V}_{j-1,k}^n - 2\mathbf{V}_{j,k}^n + \mathbf{V}_{j+1,k}^n) + \frac{\varepsilon}{\Delta y^2} (\mathbf{V}_{j,k+1}^n - 2\mathbf{V}_{j,k}^n + \mathbf{V}_{j,k-1}^n)
\end{aligned} \tag{A1.64}$$

Ou, de outra forma, a equação anterior fica:

$$R\eta_{j,k}^{n+1} + S\mathbf{V}_{j,k}^{n+1} + T\eta_{j,k+1}^{n+1} = Z \tag{A1.65}$$

onde:

$$R = -\frac{g\Delta t}{2\Delta y} \tag{A1.66}$$

$$T = \frac{g\Delta t}{2\Delta y} \tag{A1.67}$$

$$S = 1 + \frac{\Delta t}{2\Delta y} (\mathbf{V}_{j,k+1}^n - \mathbf{V}_{j,k-1}^n) + \frac{g\Delta t}{2\bar{H}_{j,k}^{n+1/2} (Cv_{j,k}^{n+1/2})^2} \sqrt{(\bar{U}_{j,k}^{n+1/2})^2 + (\mathbf{V}_{j,k}^n)^2} \tag{A1.68}$$

$$\begin{aligned}
Z = & \mathbf{V}_{j,k}^n - \bar{U}_{j,k}^{n+1/2} \frac{\Delta t}{2\Delta x} (\mathbf{V}_{j+1,k}^n - \mathbf{V}_{j-1,k}^n) - \Omega \bar{U}_{j,k}^{n+1/2} \Delta t - \frac{g\Delta t}{2\Delta y} (\eta_{j,k+1}^n - \eta_{j,k}^n) + \\
& - \frac{g\Delta t \mathbf{V}_{j,k}^n}{2\bar{H}_{j,k}^{n+1/2} (Cv_{j,k}^{n+1/2})^2} \sqrt{(\bar{U}_{j,k}^{n+1/2})^2 + (\mathbf{V}_{j,k}^n)^2} + \frac{Cv1 \cdot \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\bar{H}_{j,k}^{n+1/2}} \Delta t + \frac{\varepsilon \Delta t}{\Delta x^2} (\mathbf{V}_{j-1,k}^n - 2\mathbf{V}_{j,k}^n + \mathbf{V}_{j+1,k}^n) + \\
& + \frac{\varepsilon \Delta t}{\Delta y^2} (\mathbf{V}_{j,k+1}^n - 2\mathbf{V}_{j,k}^n + \mathbf{V}_{j,k-1}^n)
\end{aligned} \tag{A1.69}$$

A1.3 RESOLUÇÃO DO SISTEMA DE EQUAÇÕES

A1.3.1 Cálculo por linhas: 1º semi-intervalo de tempo (n, n+1/2)

Definidas as equações em termos de diferenças finitas, o esquema ADI de Leendertse resolve, para o 1º semi-intervalo de tempo (n, n+1/2), um sistema de equações para cada linha, composto por equações da continuidade e dinâmicas no eixo x , relacionando as quadrículas da linha. Considerando uma quadrícula genérica situada na linha k e coluna j , tais equações são discretizadas da seguinte forma:

informação de valores conhecidos de velocidade ou de nível, ao longo da simulação (ao longo do tempo). Portanto, em função das condições de contorno apresentadas, uma linha pode ser classificada em quatro tipos: aberta-aberta, aberta-fechada, fechada-aberta e fechada-fechada.

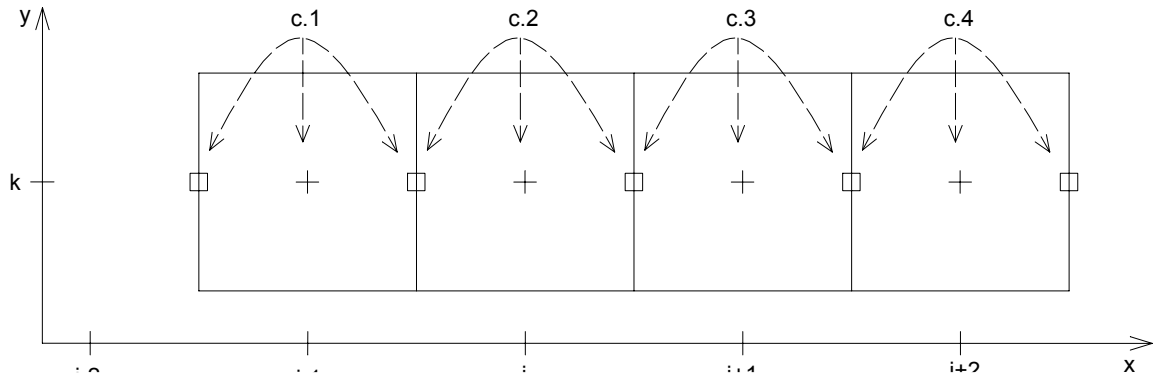


Figura A1.2. Esquema da localização das equações da continuidade, em uma linha genérica k.

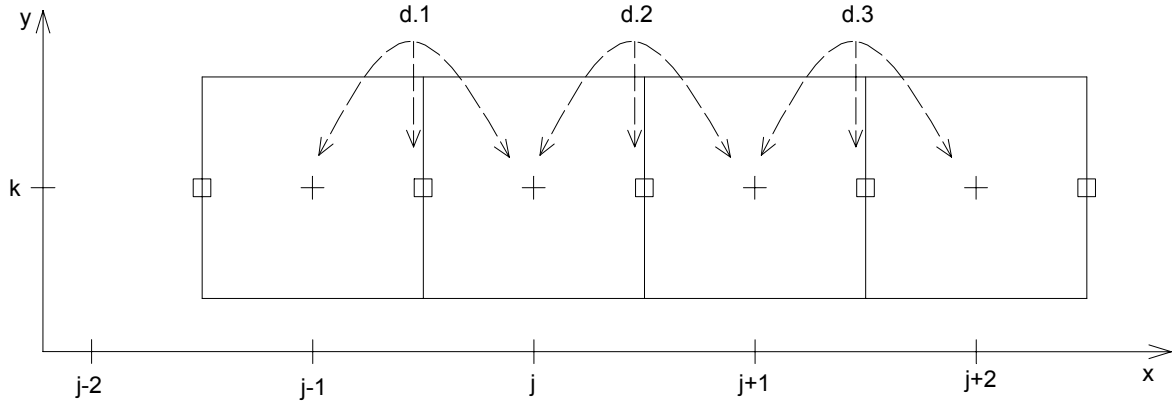


Figura A1.3. Esquema da localização das equações dinâmicas no eixo x, em uma linha genérica k.

A seguir é apresentado o sistema de equações da continuidade e dinâmicas, além das condições de contorno, referentes à linha k mostrada na figura A1.1, onde cada uma das equações está referenciada nas figuras A1.2 ou A1.3.

$$(c.1) \quad A_1 U_{j-2,k}^{n+1/2} + \eta_{j-1,k}^{n+1/2} + B_1 U_{j-1,k}^{n+1/2} = D_1 \quad (A1.70)$$

$$(d.1) \quad E_1 \eta_{j-1,k}^{n+1/2} + F_1 U_{j-1,k}^{n+1/2} + G_1 \eta_{j,k}^{n+1/2} = L_1 \quad (A1.71)$$

$$(c.2) \quad A_2 U_{j-1,k}^{n+1/2} + \eta_{j,k}^{n+1/2} + B_2 U_{j,k}^{n+1/2} = D_2 \quad (A1.72)$$

$$(d.2) \quad E_2 \eta_{j,k}^{n+1/2} + F_2 U_{j,k}^{n+1/2} + G_2 \eta_{j+1,k}^{n+1/2} = L_2 \quad (A1.73)$$

$$(c.3) \quad A_3 U_{j,k}^{n+1/2} + \eta_{j+1,k}^{n+1/2} + B_3 U_{j+1,k}^{n+1/2} = D_3 \quad (A1.74)$$

$$(d.3) \quad E_3 \eta_{j+1,k}^{n+1/2} + F_3 U_{j+1,k}^{n+1/2} + G_3 \eta_{j+2,k}^{n+1/2} = L_3 \quad (A1.75)$$

$$(c.4) \quad A_4 U_{j+1,k}^{n+1/2} + \eta_{j+2,k}^{n+1/2} + B_4 U_{j+2,k}^{n+1/2} = D_4 \quad (A1.76)$$

O sistema anterior, escrito na forma matricial, fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} A_1 & 1 & B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_1 & F_1 & G_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_2 & 1 & B_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & E_2 & F_2 & G_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & A_3 & 1 & B_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & E_3 & F_3 & G_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_4 & 1 & B_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{j-2,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j-1,k}^{n+1/2} \\ U_{j-1,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j,k}^{n+1/2} \\ U_{j,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j+1,k}^{n+1/2} \\ U_{j+1,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j+2,k}^{n+1/2} \\ U_{j+2,k}^{n+1/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ L_1 \\ D_2 \\ L_2 \\ D_3 \\ L_3 \\ D_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A1.77})$$

(i) Caso a linha k seja do tipo fechada-fechada, isto é, apresente condições de contorno fechadas nas duas extremidades, então:

$$U_{j-2,k} = 0 \text{ e } U_{j+2,k} = 0, \quad (\text{A1.78})$$

e o sistema anterior se reduz à:

$$\begin{bmatrix} 1 & B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_1 & F_1 & G_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 1 & B_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_2 & F_2 & G_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_3 & 1 & B_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_3 & F_3 & G_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_4 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \eta_{j-1,k}^{n+1/2} \\ U_{j-1,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j,k}^{n+1/2} \\ U_{j,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j+1,k}^{n+1/2} \\ U_{j+1,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j+2,k}^{n+1/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ L_1 \\ D_2 \\ L_2 \\ D_3 \\ L_3 \\ D_4 \end{bmatrix}, \quad (\text{A1.79})$$

já que a condição (A1.78) implica que o valor dos coeficientes A_1 e B_4 não importa para a resolução do sistema. Nesse caso, o sistema (A1.79) é composto por 7 equações e 7 incógnitas, sendo matematicamente determinado. Assim, resolvendo-se tal sistema e determinando-se os valores das incógnitas da linha k , no instante $(n+1/2)$, o cálculo prossegue para a linha $k+1$, onde são determinadas as incógnitas para o mesmo instante de tempo.

(ii) Considerando, agora, que a linha k seja do tipo aberta-aberta, apresentando, como condição de contorno, valores conhecidos ao longo do tempo da velocidade na margem esquerda ($U_{j-2,k}$) e de nível ($\eta_{j+2,k}$) na margem direita, então o sistema é modificado da seguinte forma:

- como o valor de $U_{j-2,k}$ é conhecido, a equação (A1.70) pode ser reescrita assim:

$$\eta_{j-1,k}^{n+1/2} + B_1 U_{j-1,k}^{n+1/2} = D_1 - A_1 U_{j-2,k}^{n+1/2} \quad (\text{A1.80})$$

- pela condição de contorno de nível conhecido $\eta_{j+2,k}$ na margem direita, a equação (A1.76) não faz parte mais do sistema de equações, enquanto que a equação (A1.75) pode ser reescrita sob a forma:

$$E_3 \eta_{j+1,k}^{n+1/2} + F_3 U_{j+1,k}^{n+1/2} = L_3 - G_3 \eta_{j+2,k}^{n+1/2} \quad (\text{A1.81})$$

Com as considerações estabelecidas em (A1.80) e (A1.81), o sistema de equações (A1.77) fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & B_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ E_1 & F_1 & G_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 1 & B_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_2 & F_2 & G_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_3 & 1 & B_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & E_3 & F_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \eta_{j-1,k}^{n+1/2} \\ U_{j-1,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j,k}^{n+1/2} \\ U_{j,k}^{n+1/2} \\ \eta_{j+1,k}^{n+1/2} \\ U_{j+1,k}^{n+1/2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 - A_1 U_{j-2,k}^{n+1/2} \\ L_1 \\ D_2 \\ L_2 \\ D_3 \\ L_3 - G_3 \eta_{j+2,k}^{n+1/2} \end{bmatrix}, \quad (\text{A1.82})$$

que é um sistema matematicamente determinado, como o sistema (A1.79). E o cálculo prossegue para a próxima linha.

Portanto, para qualquer combinação de condições de contorno, ou seja, para qualquer tipo de linha, o sistema resultante é obtido de forma análoga aos casos explanados anteriormente. Após a resolução do sistema de equações para cada uma das linhas, a próxima etapa é o cálculo por colunas, referente ao 2º semi-intervalo de tempo, que é descrito a seguir.

A1.3.2 Cálculo por colunas: 2º semi-intervalo de tempo (n+1/2, n+1)

Seja a coluna de ordem j mostrada na figura A1.4, tomada aqui para exemplificar o cálculo por colunas, referente ao 2º semi-intervalo de tempo (n+1/2, n+1). Para cada coluna, o sistema de equações é constituído pelas equações da continuidade e dinâmicas no eixo y, que, para uma quadrícula (j,k) qualquer da coluna, têm a forma:

$$MV_{j,k-1}^{n+1} + \eta_{j,k}^{n+1} + OV_{j,k}^{n+1} = Q \quad (\text{A1.83})$$

$$R\eta_{j,k}^{n+1} + SV_{j,k}^{n+1} + T\eta_{j,k+1}^{n+1} = Z \quad (\text{A1.84})$$

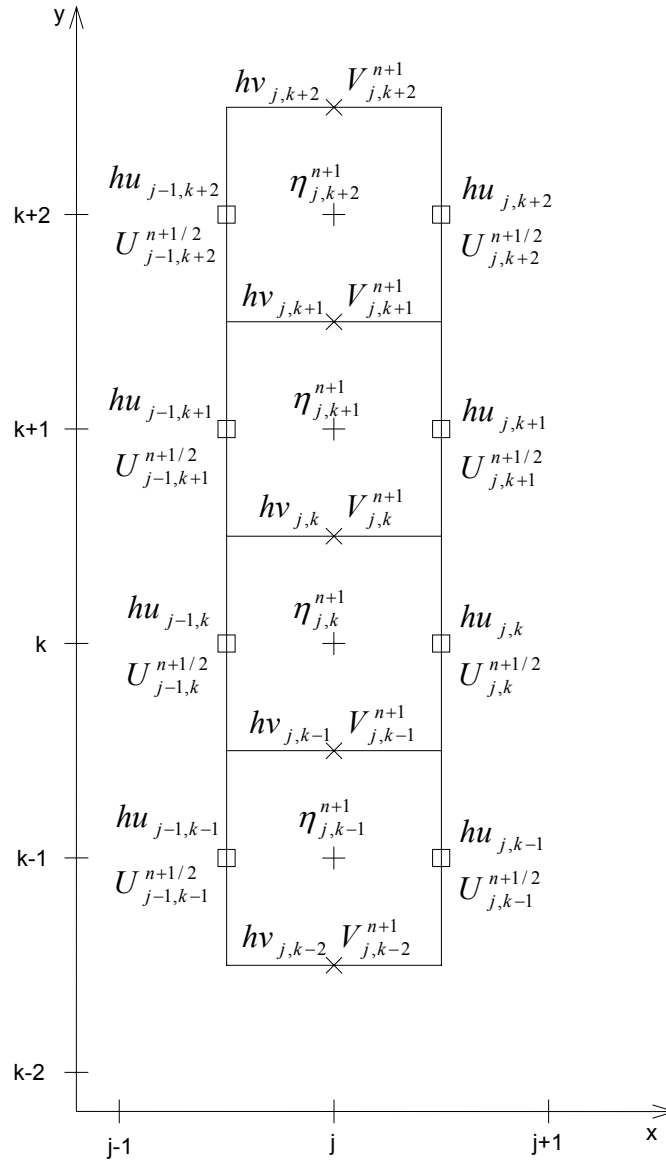


Figura A1.4. Exemplo de uma coluna genérica j com a indicação das variáveis.

De acordo com a figura A1.4 e a definição da localização das variáveis, a coluna do exemplo apresenta 9 incógnitas a serem determinadas no instante $n+1$, ou seja, ao fim do 2º semi-intervalo de tempo. Tais incógnitas são:

$$V_{j,k-2}^{n+1}, V_{j,k-1}^{n+1}, V_{j,k}^{n+1}, V_{j,k+1}^{n+1}, V_{j,k+2}^{n+1}, \eta_{j,k-1}^{n+1}, \eta_{j,k}^{n+1}, \eta_{j,k+1}^{n+1}, \eta_{j,k+2}^{n+1}$$

As figuras A1.5a e A1.5b apresentam, respectivamente, a indicação da disposição espacial das equações da continuidade, que são centradas no centro da quadrícula, e dinâmicas no eixo y , que são centradas no lado superior, na referida coluna.

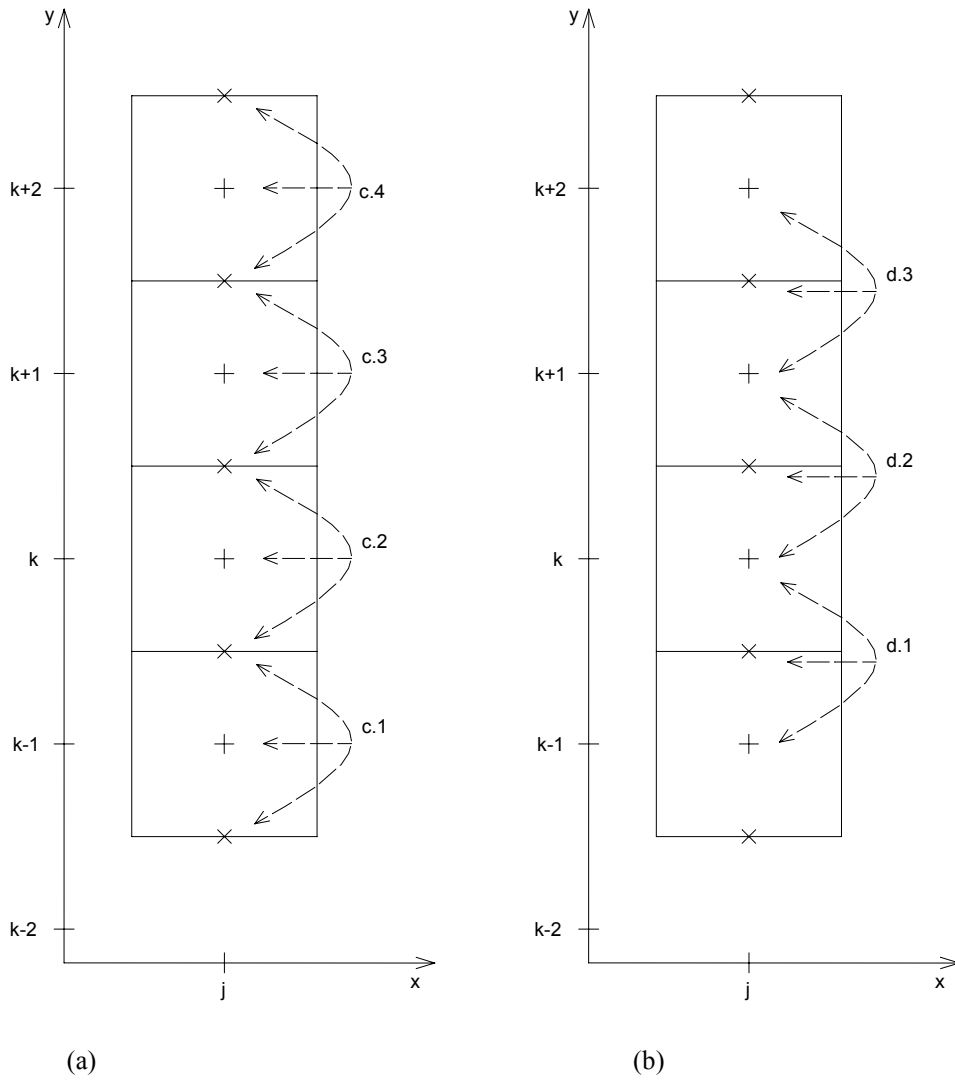


Figura A1.5 Esquema da localização das equações da continuidade (a) e dinâmicas no eixo y (b), em uma coluna genérica j .

De acordo com os esquemas mostrados nas figuras A1.5a e A1.5b, para a coluna em questão, há 4 equações da continuidade e 3 equações dinâmicas na direção do eixo y , explicitadas a seguir:

$$(c.1) \quad M_1 V_{j,k-2}^{n+1} + \eta_{j,k-1}^{n+1} + O_1 V_{j,k-1}^{n+1} = Q_1 \quad (A1.85)$$

$$(d.1) \quad R_1 \eta_{j,k-1}^{n+1} + S_1 V_{j,k-1}^{n+1} + T_1 \eta_{j,k}^{n+1} = Z_1 \quad (A1.86)$$

$$(c.2) \quad M_2 V_{j,k-1}^{n+1} + \eta_{j,k}^{n+1} + O_2 V_{j,k}^{n+1} = Q_2 \quad (A1.87)$$

$$(d.2) \quad R_2 \eta_{j,k}^{n+1} + S_2 V_{j,k}^{n+1} + T_2 \eta_{j,k+1}^{n+1} = Z_2 \quad (A1.88)$$

$$(c.3) \quad M_3 V_{j,k}^{n+1} + \eta_{j,k+1}^{n+1} + O_3 V_{j,k+1}^{n+1} = Q_3 \quad (A1.89)$$

$$(d.3) \quad R_3 \eta_{j,k+1}^{n+1} + S_3 V_{j,k+1}^{n+1} + T_3 \eta_{j,k+2}^{n+1} = Z_3 \quad (A1.90)$$

$$(c.4) \quad M_4 V_{j,k+1}^{n+1} + \eta_{j,k+2}^{n+1} + O_4 V_{j,k+2}^{n+1} = Q_4 \quad (A1.91)$$

Na forma matricial, o sistema de equações anterior tem a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} M_1 & 1 & O_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & S_1 & T_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_2 & 1 & O_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 & S_2 & T_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_3 & 1 & O_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & S_3 & T_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_4 & 1 & O_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{j,k-2}^{n+1} \\ \eta_{j,k-1}^{n+1} \\ V_{j,k-1}^{n+1} \\ \eta_{j,k}^{n+1} \\ V_{j,k}^{n+1} \\ \eta_{j,k+1}^{n+1} \\ V_{j,k+1}^{n+1} \\ \eta_{j,k+2}^{n+1} \\ V_{j,k+2}^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Z_1 \\ Q_2 \\ Z_2 \\ Q_3 \\ Z_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} \quad (\text{A1.92})$$

Analogamente ao caso da linha exemplificada no item anterior, trata-se de um sistema de equações indeterminado, composto por 9 incógnitas e 7 equações. Novamente, necessita-se da introdução de duas condições de contorno, para que o sistema possa ser resolvido e, em função de tais condições, cada coluna é classificada em quatro tipos: aberta-aberta, aberta-fechada, fechada-aberta e fechada-fechada.

Como o processo é análogo ao explicado para o cálculo por linhas, é apresentado, a seguir, apenas um caso, considerando que a coluna mostrada na figura A1.4 seja do tipo aberta-fechada, sendo a condição de contorno no extremo inferior dada em termos do valor da velocidade, ao longo do tempo. Devido à condição de contorno fechada no extremo superior, tem-se:

$$V_{j,k+2} = 0 \quad (\text{A1.93})$$

E como o valor da velocidade ($V_{j,k-2}$) é conhecido, a equação (A1.85) pode ser reescrita assim:

$$\eta_{j,k-1}^{n+1} + O_1 V_{j,k-1}^{n+1} = Q_1 - M_1 V_{j,k-2}^{n+1} \quad (\text{A1.94})$$

Com as condições estabelecidas em (A1.93) e (A1.94), o sistema (A1.92) fica:

$$\begin{bmatrix} 1 & O_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & S_1 & T_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 1 & O_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & S_2 & T_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_3 & 1 & O_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_3 & S_3 & T_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_4 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \eta_{j,k-1}^{n+1} \\ V_{j,k-1}^{n+1} \\ \eta_{j,k}^{n+1} \\ V_{j,k}^{n+1} \\ \eta_{j,k+1}^{n+1} \\ V_{j,k+1}^{n+1} \\ \eta_{j,k+2}^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 - M_1 V_{j,k-2}^{n+1} \\ Z_1 \\ Q_2 \\ Z_2 \\ Q_3 \\ Z_3 \\ Q_4 \end{bmatrix}, \quad (\text{A1.95})$$

passando a ser matematicamente determinado. Assim, resolvendo-se tal sistema, a coluna em questão tem suas variáveis definidas no instante (n+1) conhecidas e, prosseguindo de forma

análoga para as demais colunas, todas as variáveis definidas ao final do 2º semi-intervalo de tempo são determinadas.

O processo de cálculo, então, passa para o 2º intervalo de tempo, que é dividido em 2 semi-intervalos $(n+1, n+3/2)$ e $(n+3/2, n+2)$, onde é efetuado o cálculo por linhas e por colunas, respectivamente. Essa seqüência se repete até o último instante de tempo, cujos valores das variáveis se deseja conhecer.