

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E
SANEAMENTO**

ALMIR NUNES DE BRITO JÚNIOR

**MODELAGEM DOS FLUXOS DE RESSUSPENSÃO DE SEDIMENTOS DE UM
LAGO RASO SUBTROPICAL**

**Maceió
2015**

ALMIR NUNES DE BRITO JÚNIOR

**MODELAGEM DOS FLUXOS DE RESSUSPENSÃO DE SEDIMENTOS DE UM
LAGO RASO SUBTROPICAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso
Júnior

**Maceió
2015**

Catlogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Maria Helena Mendes Lessa

B862m

Brito Júnior, Almir Nunes de.
Modelagem dos fluxos de ressuspensão de sedimentos de um lago raso subtropical – Maceió, 2015.
28 f. : il.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Júnior.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2015.

Bibliografia: f. 25-28.

1. Ressuspensão de sedimentos. 2. Modelagem ecológica. 3. Lagos rasos.
I. Título.

CDU: 556.55

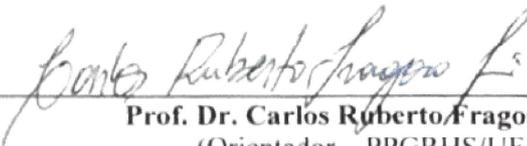


**MODELAGEM DOS FLUXOS DE RESSUSPENSÃO DE SEDIMENTOS DE
UM LAGO RASO SUBTROPICAL**

ALMIR NUNES DE BRITO JÚNIOR

Dissertação submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Alagoas e aprovada no dia 30 de abril do ano de 2015.

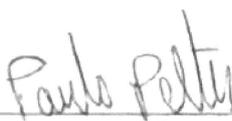
Banca Examinadora:



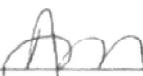
Prof. Dr. Carlos Roberto Fragozo Júnior
(Orientador – PPGRHS/UFAL)



Prof. Dr. Marllus Ferreira Passos das Neves
(PPGRHS /UFAL)



Prof. Dr. Paulo Ricardo Petter Medeiros
(UFAL)



Prof. Dr. David Manuel Lelinho da Motta Marques
(UFRGS)

Dedico este trabalho aos meus pais e a Ágatha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai por sempre me provocar, me incentivar a correr atrás e me ensinar que o caminho sem bondade e humildade não vale a pena.

Agradeço à minha mãe por me ensinar o bêabá, por me obrigar a ir à escola, pelas conversas, pela amizade e por ser só carinho e amor inesgotável.

Agradeço ao Professor Ruberto Fragoso pelos conselhos, ensinamentos, pelo exemplo de dedicação e profissionalismo e por me receber em sua sala sempre com paciência e boa vontade.

Agradeço ao Professor David da Motta Marques por me receber durante minha visita ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas de forma bastante atenciosa e pelos ensinamentos passados.

Agradeço aos amigos Rafael, Eugênio e Carlos por me receberem em Porto Alegre, serem família para mim e dividirem experiências inesquecíveis.

Agradeço aos amigos Aline, Denis, Gláucia, Helen e Mahelvson, por enfrentarem comigo essa jornada sempre com muita alegria e parceria.

Por fim, agradeço à minha companheira Ágatha pelo carinho com o qual me apoiou nos momentos mais difíceis da realização desse trabalho. Veio de você a força que me ajudou a colocar o ponto final nessas folhas.

RESUMO

O processo de ressuspensão de sedimentos é de fundamental importância para os ecossistemas aquáticos rasos. A ressuspensão leva ao aumento de turbidez e ao aumento dos fluxos verticais de nutrientes, alterando a dinâmica da cadeia trófica deste corpo d'água e muitas vezes favorecendo a manutenção de uma condição de eutrofização. Este estudo avaliou o comportamento da concentração de sólidos em suspensão na Lagoa Mangueira (RS) através do uso de modelo matemático que representa os fluxos de ressuspensão desses sedimentos em diferentes episódios de ventos medidos na Lagoa. Uma formulação de ressuspensão que considera as tensões cisalhantes aplicadas e as características físicas dos sedimentos foi implementada no modelo ecológico IPH-ECO. A dinâmica dos sólidos em suspensão da Lagoa foi bem representada nos resultados simulados. Na comparação das concentrações medidas com os resultados simulados as medianas foram bem representadas. Na análise das distribuições espaciais, os fluxos de ressuspensão foram predominantemente mais intensos na porção oeste da lagoa, devido à predominância de ventos que incidem nesta região.

Palavras-chave: Ressuspensão de Sedimentos, Modelagem Ecológica, Lagos Rasos.

ABSTRACT

The sediments resuspension process is of fundamental importance for the shallow water ecosystems. The resuspension leads to increased turbidity and increased vertical nutrient flows by changing the dynamics of the food chain of this water body and often favoring the maintenance of eutrophic states. This study evaluated the behavior of the suspended solids concentration in Lake Mangueira through the use of a mathematical model that represents the sediments resuspension rates in different episodes of measured winds. A formulation that considers the applied shear stress and the physical characteristics of sediments was implemented in the ecological model IPH-ECO. The suspended solids dynamics was well represented in the simulated results. In comparing the concentrations measured with the simulated results the medians were well represented. In the analysis of spatial distributions, the resuspension rates were predominantly more intense in the western portion of the lagoon, due to the predominance of eastern winds that affect this region.

Keywords: Sediment Resuspension Rates, Ecological Modeling, Shallow Lakes.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	METODOLOGIA.....	11
2.1	Área de estudo.....	11
2.2	Descrição do Modelo.....	13
2.2.1	Módulo Hidrodinâmico (IPH-ECO).....	13
2.2.2	Modelagem dos fluxos verticais de sedimentos.....	14
2.2.3	Método SMB.....	16
2.3	Parametrização do modelo.....	18
2.4	Avaliação do módulo de ressuspensão.....	18
3	RESULTADOS.....	19
3.1	Calibração do módulo de ressuspensão.....	19
3.2.	Fatores governantes na ressuspensão.....	20
3.3.	Simulação da distribuição de Sólidos Suspensos.....	22
4.	DISCUSSÕES.....	24
	REFERÊNCIAS.....	26

1. INTRODUÇÃO

A ressuspensão de sedimentos em lagos rasos é um processo que influencia diretamente na qualidade da água desses corpos hídricos. A ressuspensão atua na dinâmica de nutrientes e poluentes armazenados ao longo do tempo nas camadas de sedimentos do leito, podendo eventualmente liberá-los na coluna d'água causando impactos na estrutura trófica bem como favorecendo a manutenção de uma condição de eutrofização (HAMILTON & MITCHELL, 1997; JI, 2008; CHUNG *et al*, 2009). Outro efeito da ressuspensão na qualidade da água dos lagos é no aumento da turbidez e, conseqüentemente, na absorção de luz (COZAR *et al*, 2005). Tal condição ambiental limita o estabelecimento e o desenvolvimento de macrófitas submersas (SCHEFFER, 1990, SCHEFFER, 1993 e SCHEFFER, 2007). A ressuspensão de sedimentos em lagos rasos pode ocorrer pela ação de diversos mecanismos, tais como ondas geradas por ventos, correntes e bioturbação.

O movimento oscilatório da onda gerada por vento promove uma velocidade orbital que se propaga ao longo da coluna d'água, podendo atingir o fundo e provocando ressuspensão devido à tensão de cisalhamento gerada. Na presença de correntes próximas ao leito ocorre uma combinação da tensão cisalhante provocada pela onda com a provocada pelas correntes, aumentando a ressuspensão (JIN & JI, 2004). Apesar de também aplicar uma tensão de cisalhamento na camada de sedimentos, geralmente o efeito das correntes na ressuspensão é pequeno comparado ao originado pelas ondas (LUETTICH *et al*, 1990), limitando o papel dessas correntes na dinâmica de sedimentos ao transporte na coluna d'água das partículas que já foram desprendidas do leito (LEUTTICH *et al*, 1990; HAMILTON & MITCHELL, 1996). A bioturbação, definida como o revolvimento da camada de sedimentos por peixes ou organismos bênticos, pode ter papel significativo no fluxo vertical de sedimentos quando o ambiente aquático possui quantidade significativa destes organismos (DAVIS, 1993; ZAMBRANO, 2005; DE VICENTE *et al*, 2010).

O banco de macrófitas submersas de um lago raso age como um mecanismo de atenuação da ressuspensão de sedimentos depositados no leito do lago, impedindo que a energia da onda de superfície e das correntes atuem com totalidade na interface água-sedimentos (BARKO & JAMES, 1997; JAMES *et al* 2004; KOSTEN *et al.*, 2009). Com a presença de macrófitas submersas o fluxo vertical de nutrientes, que afeta o crescimento de produtores primários e comunidades zooplactônicas na coluna d'água, é reduzido, melhorando as condições de transparência da água (JEPESSEN *et al*, 1997, ROOZEN *et al* 2007). Macrófitas submersas

podem ainda atuar interceptando os sedimentos em suspensão favorecendo o fluxo de sedimentação. Portanto, as macrófitas submersas apresentam papel chave na manutenção do estado de águas claras, melhorando a qualidade deste lago. Por exemplo, uma estratégia que pode ser adotada pelo comitê gestor do lago na restauração da qualidade da água, é a indução do crescimento e manutenção de uma comunidade estável de macrófitas (WU *et al*, 2003 e DOKULIL & TEUBNER, 2003).

A importância da ressuspensão de sedimentos para a qualidade da água de lagos rasos levou nas últimas décadas ao desenvolvimento de diversas formulações que representassem este processo, desde as mais simples, que fazem uma relação direta entre a velocidade do vento e as taxas de liberação do sedimento na coluna d'água (SOMLYÓDY, 1986), até formulações mais complexas que levam em consideração as tensões cisalhantes aplicadas e características físicas destes sedimentos como densidade e granulometria (EINSTEIN, 1950; VAN RIJIN, 1984; AKIYAMA & FUKUSHIMA, 1986; GARCÍA & PARKER, 1991). GARCÍA & PARKER (1991; 1993) comparou através de experimentos em laboratório, utilizando um canal aberto, sete formulações de ressuspensão de sedimentos e propôs uma que obteve o melhor ajuste dentre as demais para os dados observados. CHUNG *et al.* (2009) aplicou, no lago Salton Sea (Estados Unidos), a formulação proposta por GARCÍA & PARKER (G&P) e obteve fluxos de ressuspensão estimados próximos dos fluxos medidos *in situ*, indicando que esta formulação, inicialmente desenvolvida para canais abertos, pode ter sua aplicabilidade estendida para lagos rasos. Entretanto, esta formulação ainda não foi amplamente testada para diferentes características morfológicas, de clima e de eventos de meteorológicos extremos, como, por exemplo, na Lagoa Mangueira, um lago subtropical, situado no sul do Brasil, que tem sua hidrodinâmica e diversos processos ecológicos altamente influenciados pelo vento (FRAGOSO JR *et al.*, 2008). Além disso este corpo d'água apresenta aspectos singulares que afetam diretamente nos fluxos de ressuspensão, como, por exemplo, sua forma alongada com 92 km de comprimento que possibilita grandes pistas de vento (*fetch*) para algumas direções de vento e rajadas intensas de ventos (> 100 km/h), principalmente, na passagem de frentes frias. Apesar de todo este potencial de dinâmica de sedimentos intensa, o entendimento dos fatores envolvidos nesta dinâmica para lagoas com tais características ainda é pouco conhecido.

Desta forma, este estudo avaliou os fluxos de ressuspensão na Lagoa Mangueira utilizando a formulação proposta GARCIA & PARKER (1991). Para validação da aplicação, as concentrações de sólidos em suspensão estimadas foram comparadas com os dados observados para diferentes eventos de ventos. Além disso foram analisados os principais

padrões de distribuição espacial da concentração de sólidos suspensos por consequência dos fluxos de ressuspensão.

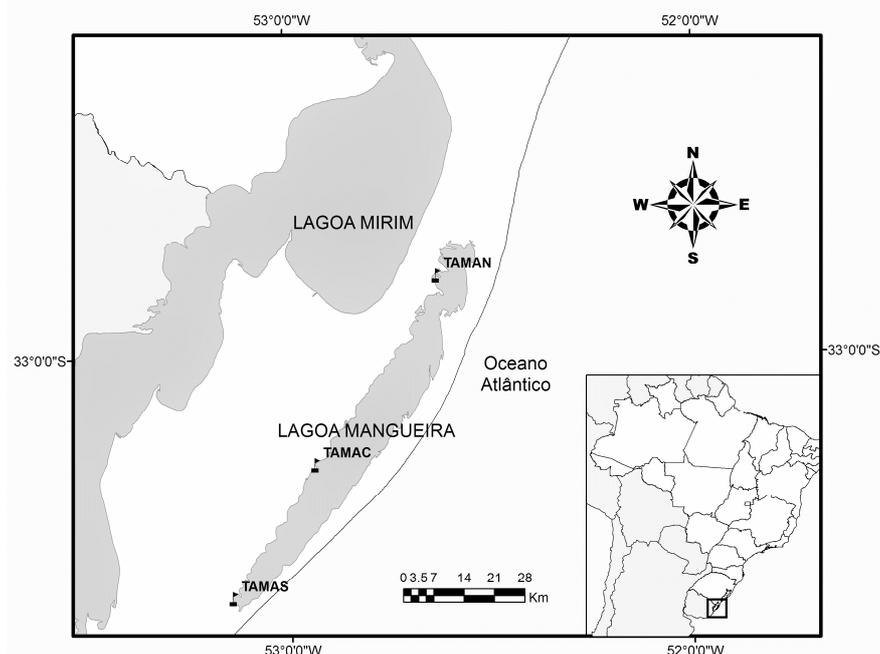
2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A Lagoa Mangueira (Figura 1) faz parte do Sistema Hidrológico do Taim (SHT), uma extensa área úmida com aproximadamente 2254 km², compreendendo partes dos Municípios de Santa Vitória do Palmar e do Rio Grande entre as latitudes 32°20'S e 33°00' S, e a Lagoa Mirim e o Oceano Atlântico Sul entre as longitudes 52°20'W e 52°45'W.

A Lagoa Mangueira é um sistema raso (profundidade média de 2,6 metros e máxima de 6 metros) e possui uma área aproximada de 820 km² ao longo do Oceano Atlântico. Este ecossistema é caracterizado como um binômio Lagoa-Banhado. Esta região é representativa de ambientes lacustres costeiros de água doce tipicamente complexos no que diz respeito a biodiversidade e a dinâmica da estrutura trófica (FERREIRA *et al.*, 2007). O seu estado varia de oligotrófico para mesotrófico, com concentração anual média de PO₄ de 35 mg/m³, variando de 5 a 51 mg/m³ (FRAGOSO JR *et al.*, 2011).

Figura 1 - Localização da Lagoa Mangueira e estações de medição de variáveis limnológicas da lagoa (TAMAN – Norte; TAMAC – Centro; TAMAS – Sul).

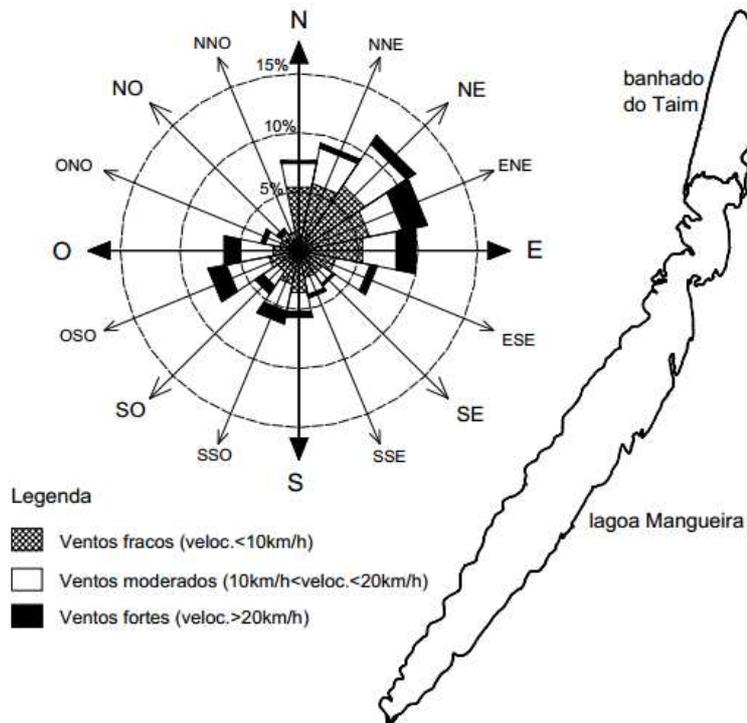


Fonte: Autor.

Dados de monitoramento de sólidos suspensos fixos (SSF) realizados entre os anos de 2001 a 2006, apresentaram como valores médios 16 mg/L, 16,3 mg/L e 21,3 mg/L, nas estações TAMAN, TAMAC e TAMAS, respectivamente. Uma recente caracterização de sólidos suspensos totais (SST) da Lagoa Mangueira foi realizada por KIST (2012), e apontou como valores médios 13,31 mg/L, 13,06 mg/L e 10,27 mg/L, nas estações TAMAN, TAMAC e TAMAS, respectivamente.

Paz (2003) avaliou o regime de ventos na região e observou que a intensidade do vento apresentou valor máximo de 43,6 km/h, velocidade mínima de zero e, como valor médio, a velocidade de 10,9 km/h. Quanto à direção média, observou-se uma predominância de ventos originários do primeiro quadrante (N, NNE, NE, ENE, e E) como 48,8 % da frequência total (Figura 2).

Figura 2 - Rosa dos ventos com distribuição de frequência dos ventos, agrupados em 3 classes (conforme legenda)

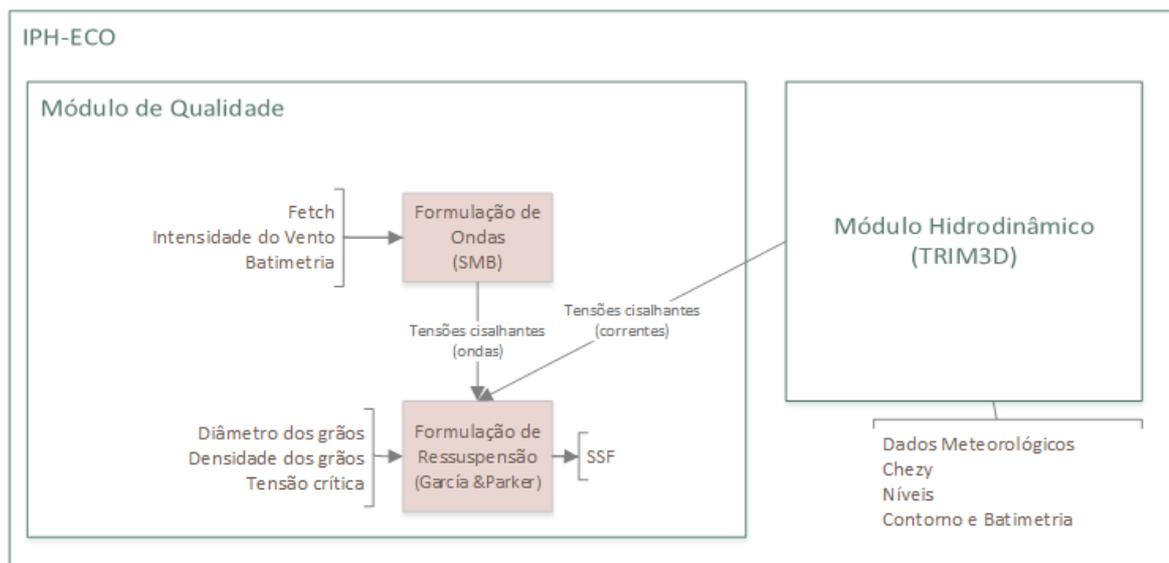


Fonte: Paz, 2003

2.2. Descrição do Modelo

Neste trabalho a formulação de ressuspensão de G&P foi implementada no módulo de qualidade da água do modelo ecológico IPH-ECO (FRAGOSO JR, 2009). A formulação de G&P requer informações sobre ondas e correntes, as quais foram obtidas através do método SMB e do módulo hidrodinâmico do próprio modelo IPH-ECO (Figura 3), respectivamente. Na sequência são apresentados mais detalhes sobre o modelo IPH-ECO, o método SMB e a formulação de G&P.

Figura 3 - Fluxo de dados utilizados no modelo IPH-ECO. O módulo hidrodinâmico e a formulação de ondas calculam as tensões cisalhantes usadas na estimativa da ressuspensão.



Fonte: Autor.

2.2.1. Módulo Hidrodinâmico (IPH-ECO)

O modelo IPH-ECO, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), é capaz de representar os processos físicos, químicos e biológicos de corpos d'água rasos e profundos. O modelo consiste basicamente de dois módulos: módulo hidrodinâmico, que trata dos fluxos de água no ambiente e o módulo de qualidade, que trata da dinâmica de nutrientes e organismos aquáticos. Uma descrição mais detalhada do modelo pode ser encontrada em FRAGOSO JR *et al* (2009).

O módulo hidrodinâmico tem a finalidade de simular as variáveis de escoamento de interesse em três dimensões (i.e., velocidade e superfície de elevação da água), visando minimizar os esforços computacionais. Este módulo é uma adaptação do modelo TRIM3D, desenvolvido por CASULLI & CHENG (1992). O TRIM3D é um modelo de diferenças finitas e emprega o esquema semi-implícito para a solução do sistema de equações composto pelas equações de Navier-Stokes (quantidade de movimento e conservação da massa) com uma abordagem mista Euleriana-Lagrangiana para os termos convectivos (CASULLI & CATTANI, 1994). Este modelo vem sendo aplicado por agências de recursos hídricos nos EUA (FULFORD, 2003), Alemanha (BAW, 1990) e em estudos específicos (CHENG et al., 1993).

O TRIM3D assume duas condições de contorno para integrar as equações de Navier-Stokes na coluna d'água. Na superfície livre as condições de contorno são prescritas pelas tensões de cisalhamento provocadas pelo vento, e na interface água-sedimento são prescritas de acordo com a tensão de cisalhamento no fundo através da formula de Manning-Chezy

A tensão cisalhante na interface água-sedimento (γ) provocada pelas correntes é calculada por:

$$\gamma = g \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{c_v^2 H} \quad (1)$$

onde $u(x,y,z,t)$ e $v(x,y,z,t)$ são as componentes de velocidade nas direções x e y (m/s); g corresponde à aceleração da gravidade (m/s^2); $H(y, x, t) = h(h, y) + \eta(x, y, t)$ é a profundidade total (m); e c_v é o coeficiente de Chezy.

2.2.2. Modelagem dos fluxos verticais de sedimentos

O fluxo vertical de partículas na interface sedimento-água (ϑ , $g \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) é definido pela diferença entre erosão (E , $g \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e sedimentação (S , $g \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (SHENG & LICK, 1979):

$$\vartheta = E - S \quad (2)$$

Neste estudo estes fluxos foram modificados no módulo de qualidade de água do modelo IPH-ECO. O fluxo deposicional utilizado neste trabalho é uma simplificação da formulação

presente no IPH-ECO (JANSE, 2005), retirando-se os fatores referentes ao lutum. A sedimentação foi então representada matematicamente pela expressão (ADMIRAAL *et al.*, 2000):

$$S = w_s \times ca \quad (3)$$

onde w_s é a velocidade final da partícula no fluido em repouso ($m\ s^{-1}$) e ca é a concentração de sedimentos suspensos na profundidade média ($g.m^{-3}$). Na condição de equilíbrio entre os fluxos da equação 2 e utilizando a equação de sedimentação 3, obtém-se:

$$ca = \frac{E}{w_s} \quad (4)$$

A estimativa dos fluxos de ressuspensão neste estudo, foi realizada através da formulação proposta por G&P. No modelo IPH-ECO, originalmente, o fluxo de ressuspensão é calculado através de uma relação proporcional ao excesso de tensão cisalhante (Luettich *et al.*, 1990), já a formulação utilizada considera as características dos sedimentos além das tensões cisalhantes.

Esta formulação foi avaliada em estudo recente (CHUNG, 2009) em comparação com outros três modelos de ressuspensão calibrados e aplicados no lago raso Salton Sea, Estados Unidos, e obteve melhor resultado na representação das tendências sazonais e variações de curto prazo para a maior parte das variáveis de qualidade da água. A formulação de GARCÍA & PARKER (1991) é idealizada para aplicação em sedimentos não coesivos e é expressa por:

$$E_s = \frac{AZ_u^5}{(1 + \frac{A}{0,3}Z_u^5)} \quad (5)$$

$$Z_u = \frac{u_*}{w_s} f(Re_p) \quad (6)$$

$$Re_p = \frac{\sqrt{gRD^3}}{\nu} \quad (7)$$

$$R = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (8)$$

onde A é uma constante ($1,3 \times 10^{-7}$), podendo ser um parâmetro de calibração para o modelo; u_* é a velocidade de fricção com o leito definida por $u_* = \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho}}$ (GARCÍA, 1999), onde τ_b é a tensão cisalhante aplicada; Re_p é o número de Reynolds explícito da partícula; R é a densidade específica da partícula submersa; ρ é a densidade da água; ρ_s é a densidade do sedimento; D é o tamanho do grão; g é a aceleração da gravidade; ν é a viscosidade cinemática da água; e $f(Re_p) = 0,586Re_p^{1,23}$ válida para $1 < Re_p < 3$.

2.2.3. Método SMB

Na ausência de medições diretas da tensão cisalhante no leito do lago, um modelo de onda gerada por vento foi utilizado para estimar os parâmetros da onda. O método escolhido para ser utilizado neste estudo foi o modelo de equações empíricas chamado SMB (*Sverdrup, Munk and Bretschneider*).

A altura e período da onda são calculados da seguinte forma (CHUNG e CRAIG, 2009):

$$H = 0,283 \alpha \frac{V_w^2}{g} \tanh\left(\frac{0,0125}{\alpha} \left(\frac{gF}{V_w^2}\right)^{0,42}\right) \quad (9)$$

$$T = 7,54\beta \frac{V_w}{g} \tanh\left(\frac{0,077}{\beta} \left(\frac{gF}{V_w^2}\right)^{0,25}\right)$$

(10)

$$\alpha = \tanh\left(0,53 \left(\frac{gh}{V_w^2}\right)^{0,75}\right) \quad (11)$$

$$\beta = \tanh\left(0,833 \left(\frac{gh}{V_w^2}\right)^{0,375}\right)$$

(12)

onde H é a altura da onda (m), T é o período da onda (s), h é a profundidade da água (m), V_w é a velocidade do vento (m/s) e F é o *fetch* do vento da margem até o ponto em estudo na direção do vento (m).

Este modelo assume que o tempo que o vento atua em uma direção é suficiente para atingir o equilíbrio da propagação da onda e que a velocidade do vento e a profundidade da água são espacialmente uniformes ao longo do *fetch*.

O comprimento significativo (L_d , metros) da onda pode ser calculado por:

$$L_d = L \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (13)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (14)$$

As ondas geradas por vento juntamente com as correntes presentes na coluna d'água implicam à interface água-sedimentos uma tensão cisalhante (τ_f , N/m²), quando essa tensão é maior que a tensão crítica (τ_c) acontece a ressuspensão. A tensão cisalhante máxima aplicada pela onda é dada pela relação:

$$\tau_f = 0,5\rho f_w U^2 \quad (15)$$

onde f_w é um fator de fricção do fundo, ρ é a densidade da água (kg/m³). O fator de fricção de fundo é dado por (FRAGOSO JR, 2009):

$$f_w = 0,4\left(\frac{A}{k_n}\right)^{\frac{3}{4}} \quad (16)$$

sendo, $A = \frac{h}{2 \sinh\frac{2\pi h}{L}}$ e k_n a rugosidade de fundo.

A tensão cisalhante crítica foi estimada baseada na metodologia de Shields (1936). Shields determinou experimentalmente uma tensão, denominada de tensão crítica de Shields (τ_c^*), no qual se faz necessária para o início da movimentação não coesiva das partículas do sedimento. Parker (2004) apresentou o seguinte ajuste para as observações experimentais de Shields:

$$\tau_c^* = 0.5 \left[0.22 Re_p^{-0.6} + 0.06 * 10^{-7.7 Re_p^{-0.6}} \right] \quad (17)$$

A tensão de Shields é então convertida em tensão crítica através da equação:

$$\tau_c = \tau_c^* * (s - 1) \rho * g * d_{50} \quad (18)$$

onde τ_c é a tensão crítica (Pa), s é a densidade específica das partículas e d_{50} é a mediana do diâmetro da partícula (m).

2.3. Parametrização do modelo

A Lagoa Mangueira foi discretizada em grade regular de 500 metros de resolução horizontal para uma simulação em 2D e o passo de tempo adotado para a solução numérica do modelo foi de 30 segundos. Os dados meteorológicos e de nível que serviram de entrada para o módulo hidrodinâmico foram medidos nas estações de monitoramento com frequência horária de medição, incluindo: Temperatura do ar, radiação solar, precipitação, evaporação, umidade relativa do ar, intensidade e direção do vento. O valor de Chezy, utilizado no módulo hidrodinâmico para calcular a tensão cisalhante na interface sedimento-água, foi adotado constante igual à 60, este valor foi obtido de outros estudos que aplicaram o IPH-ECO na Lagoa Mangueira e mostraram bons resultados na representação da hidrodinâmica (FRAGOSO JR *et al*, 2009; CAVALCANTI, 2013).

Os parâmetros da formulação de ressuspensão foram obtidos através de estudos realizados em sedimentos de lagos em outras regiões como JANSE (2005) e SCHELSKE (1997).

2.4. Avaliação do módulo de ressuspensão

Este estudo avaliou os fluxos de ressuspensão da Lagoa Mangueira a partir da consequente alteração das concentrações de sólidos suspensos na coluna d'água em três pontos distribuídos (Norte, Centro e Sul), correspondentes as posições das estações de monitoramento presentes, de profundidade de aproximadamente 0,5 m. Os dados medidos de sólidos suspensos

foram comparados com os valores correspondentes obtidos na simulação. Os dados observados são referentes às concentrações de sólidos suspensos fixos (SSF) obtidos em campanhas de campo promovidas pelo Grupo de Pesquisa em Limnologia do IPH/UFRGS, um total de 18 dias distribuídos no ano de 2001. As coletas foram realizadas logo abaixo da superfície da água através de amostrador tipo Van Dorn suspenso horizontalmente e em seguida análises de laboratório (APHA, 2005) determinaram as concentrações.

As alterações nos sólidos em suspensão foram associadas ao comportamento do vento na região. A intensidade e direção do vento foram medidas com frequência horária por anemômetros posicionados no interior da lagoa. O *fetch* em 8 direções foi calculado pelo IPH-ECO e sua média diária foi utilizada na avaliação do comportamento das concentrações observadas e simuladas.

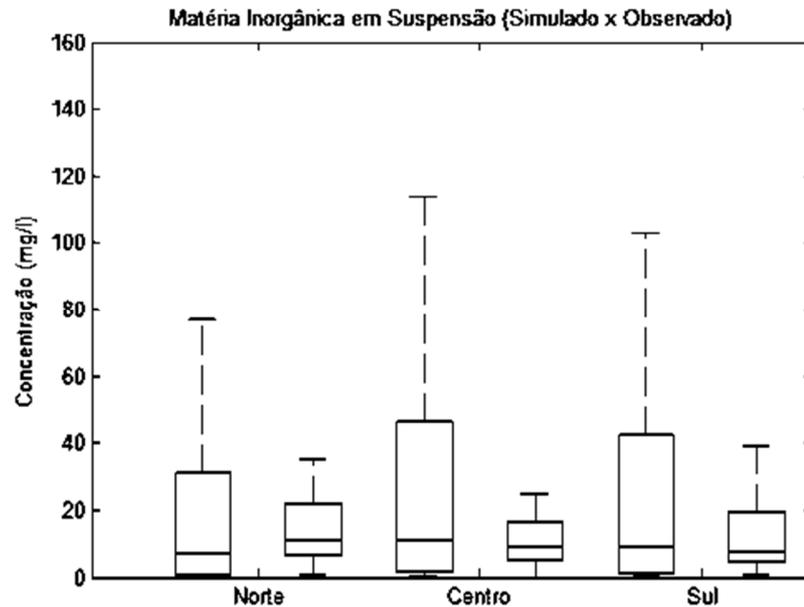
A avaliação da distribuição espacial dos sólidos em suspensão foi feita visualmente através de mapas gerados pela simulação em duas dimensões. Os dias da série de ventos com possível maior efeito na ressuspensão, ou seja, maiores intensidades e maiores *fetchs*, foram selecionados para avaliação dos resultados e a resposta destes eventos nas diferentes regiões da lagoa foi discutida.

3. RESULTADOS

3.1. Calibração do módulo de ressuspensão

A comparação entre as concentrações de sedimentos inorgânicos simulados e os valores medidos de SSF na posição das estações TAMAN, TAMAC e TAMAS são apresentados na FIGURA 4. As medianas observadas e simuladas apresentaram valores aproximados nos três pontos de análise. Observa-se uma maior diferença entre os valores máximos e mínimos nos digramas das concentrações simuladas em comparação com os diagramas dos dados observados.

Figura 4 - Comparação entre o diagrama de caixas correspondentes a 18 amostras de Sólidos Suspensos Fixos (SSF, mg/l) (2001) e as concentrações simuladas de matéria inorgânica na coluna d'água em 3 pontos da Lagoa Mangureira (TAMAN = norte, TAMAC = centro e TAMAS = sul).



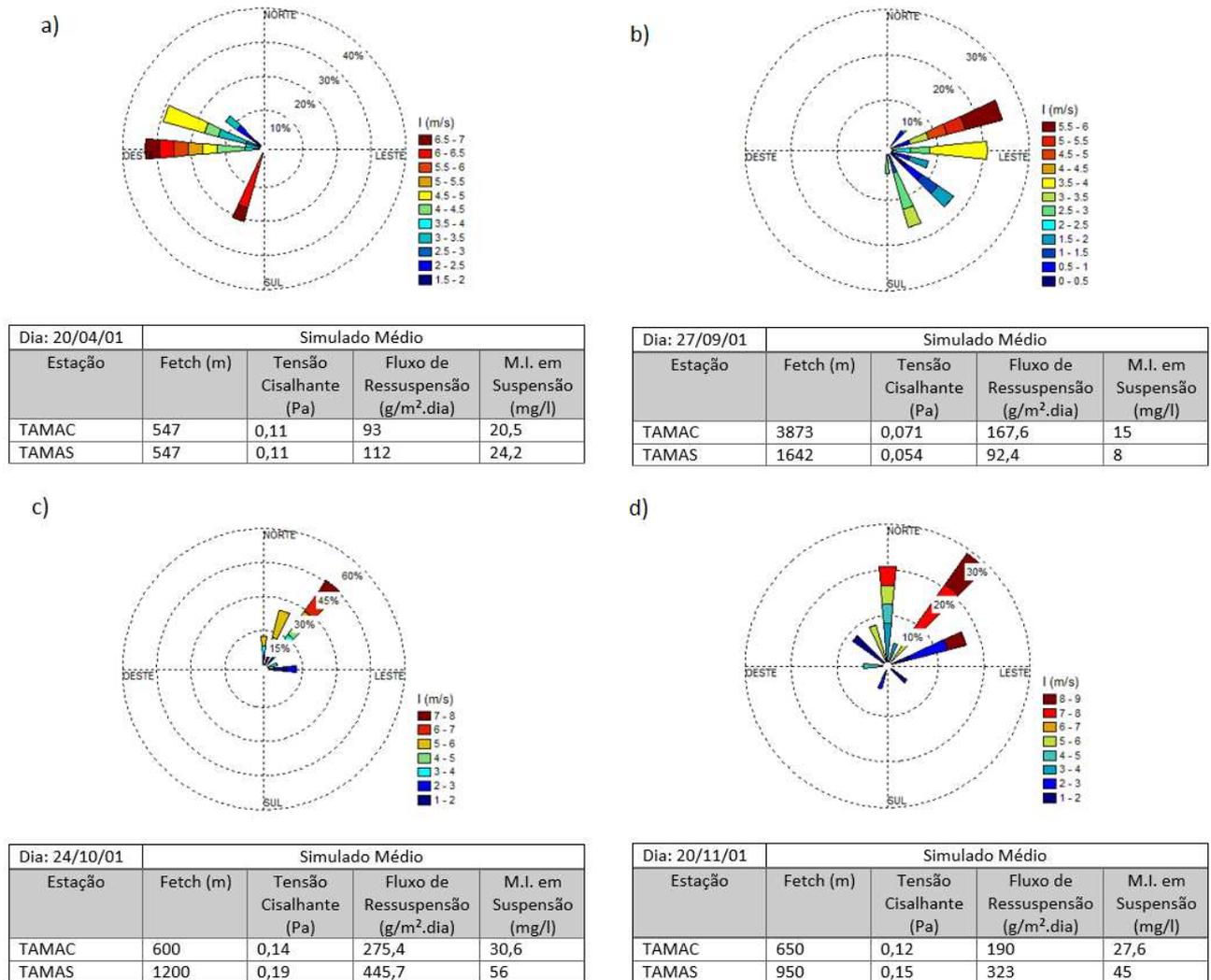
Fonte: Autor.

O melhor ajuste dos parâmetros encontrado neste trabalho, resultou de uma fração de peso seco de 0,05 g sólido/g de sedimento e diâmetro dos grãos de sedimentos em 10 μm (sedimento silteoso), este ajuste se deu de forma visual tendo por objetivo a aproximação das medianas entre simulado e medido.

3.2. Fatores governantes na ressuspensão

Os valores simulados de tensão de cisalhamento variaram entre 0 e 0,4 Pa nas três estações. As tensões de cisalhamento devido às correntes variaram entre 1 e 10% em relação aos valores de tensão de cisalhamento devido ao vento. Esta maior parcela na tensão cisalhante devido ao vento e, conseqüentemente, na ressuspensão de sedimentos pode ser observada também na relação do *fetch* e da intensidade do vento com os valores de sólidos em suspensão simulados na Lagoa (Figura 5).

Figura 5 - Comportamento das concentrações de matéria inorgânica simuladas na Lagoa Mangueira nas estações de monitoramento em 4 eventos de *fetch* e intensidade do vento.



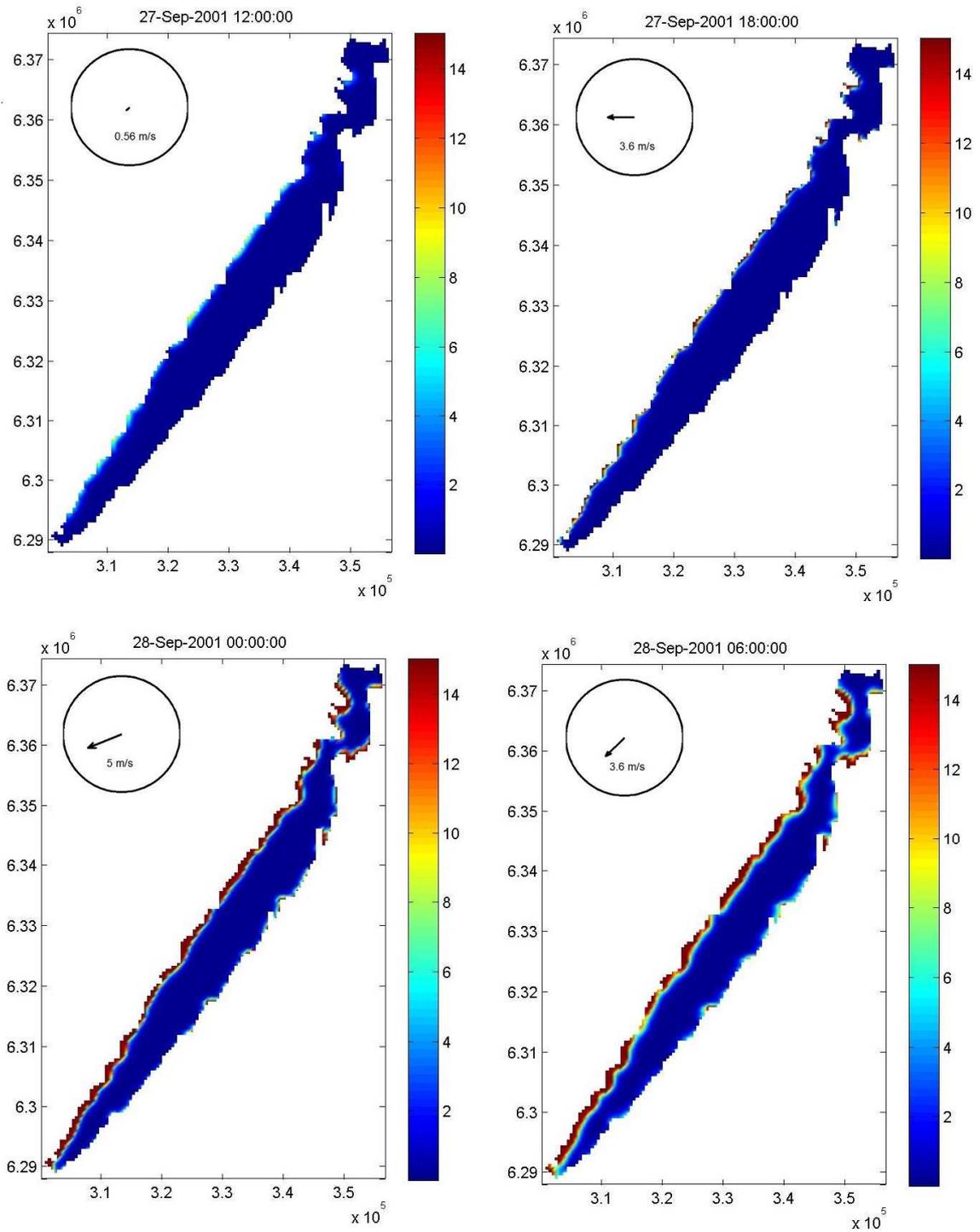
Fonte: Autor.

Nos eventos destacados da Figura 5, observa-se que os ventos de leste (NE, E e SE) provocaram maior *fetch* nos pontos centro e sul da Lagoa. A intensidade do vento se mostrou fator importante na tensão cisalhante aplicada, como pode ser observado na Figura 5b, onde apesar de apresentar o maior *fetch* dentre os eventos escolhidos teve o menor valores de tensão de cisalhamento devido as baixas velocidades de vento registradas. Na figura 5a, observa-se que ventos oeste ocasionaram *fetch* médio igual para os dois pontos de análise e mesma tensão cisalhante, porém, os fluxos de ressuspensão foram distintos.

3.3. Simulação da distribuição de Sólidos Suspensos

A distribuição espacial simulada dos sedimentos em suspensão para eventos subsequentes de rajadas entre os dias 27 e 28 de setembro de 2001 pode ser observada na Figura 6. Observa-se neste evento destacado, que a incidência de ventos leste (E, NE), provocaram ressuspensão ao longo de toda a costa oeste. Nas simulações realizadas, a ressuspensão concentrou-se próximos as margens oeste e leste da Lagoa, mas na maior parte do tempo na região oeste. Já o centro da lagoa não apresentou ressuspensão significativa em todo o período simulado e a região leste elevações leves e de curta duração na sua concentração.

Figura 6 - Concentração de sedimentos inorgânicos em suspensão (mg/l) simulados na Lagoa Mangureira. Para eventos subsequentes de ventos, diferença de duas



Fonte: Autor.

4. DISCUSSÕES

O módulo de ressuspensão de sedimentos proposto por García & Parker (1991) e implementado no modelo IPH-ECO mostrou-se uma ferramenta promissora na representação da dinâmica dos sólidos em suspensão na Lagoa Mangueira. Assim como em outros estudos nos quais a formulação foi aplicada (CHUNG *et al*, 2009; CHUNG *et al*, 2009b; LOU *et al*, 2000), as concentrações de sólidos suspensos foram bem representadas em função dos fatores considerados nesta metodologia: tensões cisalhantes aplicadas pelo vento e pelas correntes, e características dos sedimentos. Uma limitação deste estudo foi a carência de informações sobre as características do leito de sedimentos. Os parâmetros referentes a essas características foram calibrados dentro da faixa de valores usuais apresentados em outros estudos (JANSE, 2005; SCHELSKE, 1997) em lagos rasos. Outro limitante desse estudo foi a baixa frequência das concentrações de sólidos suspensos observados na Lagoa, que fez com que os eventos de tempestade (ventos intensos), não fossem registrados, o que explica a diferença entre os valores máximos de concentração simulados com os observados. Recomenda-se a utilização de amostradores automáticos em estudos futuros, para uma frequência maior nos dados observados.

Os resultados das simulações de sólidos em suspensão na Lagoa Mangueira mostram que a ação dos ventos é o motor para a alteração das concentrações deste material por meio da ressuspensão. A parcela referente às correntes na ressuspensão de sedimentos é pequena em comparação ao cisalhamento aplicado pelo vento, esta afirmação está de acordo com estudos realizados em outros lagos rasos (LEUTTICH *et al*, 1990; BAILEY & HAMILTON, 1997). O *fetch* e intensidade do vento mostraram-se fatores determinantes na dinâmica de sedimentos da Lagoa Mangueira, isso deve-se a dois fatores: primeiro, as baixas profundidades, média de 2,6 metros, e o formato alongado da lagoa que favorece altas distâncias de pista de vento. A observação de um aumento da concentração de sólidos suspensos com o aumento do *fetch* corrobora com observações de outros estudos como EVANS (1994) e HAMILTON & MITCHELL (1996). Apesar do vento ser importante fator na dinâmica dos sedimentos, os fluxos ficam limitados à disponibilidade de matéria inorgânica nos sedimentos, o que explica que pontos de análise distintos com mesma pista de vento apresentarem diferentes fluxos de ressuspensão.

Os valores simulados para as regiões Norte, Centro e Sul da Lagoa representaram a distribuição espacial esperada conforme as direções de atuação do vento no período estudado e

consequente *fetch*. A região norte apresentou os menores valores de sólidos suspensos simulados, em comparação com as demais regiões onde os fluxos de ressuspensão foram mais frequentes. Isso se deve pelas características abrigadas pelas margens na posição onde a estação TAMAN está situada, impedindo que o vento percorra uma distância elevada até esta posição. A região oeste da lagoa apresentou os maiores fluxos de ressuspensão, isto deve-se à predominância de ventos N, NNE, NE, ENE, e E. Na discretização espacial do modelo as células referentes às estações de monitoramento ficaram no limite oeste da lagoa, por isso ventos originados dessa direção corresponderam a *fetchs* baixos e até iguais entre as células. Devido as maiores profundidades, o centro da lagoa não apresentou fluxo de ressuspensão significativo e praticamente não houve alteração nas concentrações nessa região. Na comparação das concentrações medidas com os resultados simulados nas posições correspondentes às estações, as medianas foram bem representadas.

REFERÊNCIAS

- ADMIRAAL, D. M.; M. H. GARCÍA; J. F. RODRIGUE. Entrainment response of bed sediment to time-varying flows, **Water Resour. Res.**, 36, 2000. p. 335– 348.
- AKIYAMA, J.; FUKUSHIMA, Y. Entrainment of noncohesive sediment into suspension. **3rd Int. Symp. on River Sedimentation**, S. Y. Wang, H. W. Shen, and L. Z. Ding, eds., Univ. of Mississippi. 1986. p. 804-813
- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standart Methods Examination of Water and Wastewater**, U.S.A, Washington D. C., American Water Works Association, 19 th Edition, 1995.
- BAILEY, M. C.; D. P. HAMILTON. Wind induced sediment resuspension: a lakewide model. **Ecological Modeling**. 99: 1997. p. 217–228.
- BARKO J.W.; JAMES W.F. Effects of submerged aquatic macrophytes on nutrient dynamics, sedimentation and resuspension. In: Jeppesen E, Sondergaard Ma, Sondergaard Mo, Christoffersen K, editors. **The structuring role of submerged macrophytes in lakes**. Ecological studies, vol. 131. New York: Springer. 1997. p. 197–214
- BAW. Hydronumerisches Verfahren TRIM–2D. **Validierrungsdokument** Version 2.0. Bundesanstalt fur Wasserbau. Hamburg. 55p. 1990
- CASULLI, V.; CATTANI, E., Stability, Accuracy and Efficiency of a Semiimplicit Method for 3-Dimensional Shallow-Water Flow. **Computers & Mathematics with Applications** 27, 1994. p. 99-112
- CASULLI, V.; CHENG, R.T., Semiimplicit Finite-Difference Methods for 3-Dimensional Shallow-Water Flow. **Int. J. Numer. Methods Fluids** 15, 1992. p. 629-648.
- CAVALCANTI, J. R. A. **Influência da hidrodinâmica no metabolismo de lagos rasos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Porto Alegre. 92p. 2013.
- CELIK, I.; RODI, W. **A deposition entrainment model for suspended sediment transport**. Report SFB 210/T/6, Universitat Karlsruhe, Karlsruhe, West Germany. 1984.
- CHENG, R. T.; CASSULLI, V.; GARTNER, J.W. Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) model and its applications to San Francisco Bay, California. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. 36. 1993. p. 235 – 280.
- CHUNG, D. H.; CRAIG P.M. Implementation of a Wind Wave Sub-Model for the Environmental Fluid Dynamics Code, **Dynamic Solutions**, LLC. 2009
- CHUNG, E.G.; BOMBARDELLI, F.A.; SCHLADOW, S.G. Modeling linkages between sediment resuspension and water quality in a shallow, eutrophic, wind-exposed lake. **Ecological Modelling** 220 (9-10). 2009. p. 1251-1265.
- CHUNG, E.G.; BOMBARDELLI, F.A.; SCHLADOW, S.G. Sediment resuspension in a shallow lake. **Water Resources Research**. 2009b

COZAR, A.; GALVEZ, J. A.; HULL, V.; GARCIA, C. M.; LOISELLE, S. A.. Sediment resuspension by wind in a shallow lake of Esteros del Ibera (Argentina): A model based on turbidimetry, **Ecological Modelling**, 186, 2005.01.020. 2005. p. 63 – 76.

DAVIS WR The role of bioturbation in sediment resuspension and its interaction with physical shearing. **J Exp Mar Biol Ecol** 171(2). 1993. p. 187–200.

DE VICENTE, I.; CRUZ-PIZARRO, L.; RUEDA, F. J. Sediment resuspension in two adjacent shallow coastal lakes: controlling factors and consequences on phosphate dynamics. **Aquat. Sci.** , 72 . 2010. p. 21 – 31.

DOKULIL, M.T.; TEUBNER, K. Eutrophication and restoration of shallow lakes - The concept of stable equilibria revisited. **Hydrobiologia**, 506-509. 2003. p. 29-35.

EINSTEIN, H. A. **The bed load function for sediment transportation in open channels.** Technical Bulletin 1026, U.S. Dept. of Agric, Soil Conservation Service, Washington, D.C. 1950

ENGELUND, F.; FREDSOE, J. A sediment transport model for straight alluvial channels. **Nordic Hydrol.**, 7(5). 1976. p. 293-306.

EVANS, R. D.. Empirical evidence of the importance of sediment resuspension in lakes. **Hydrobiologia** 284. 1994. p. 5-12.

FERREIRA , T.F. ; VAN NES, E; SCHEFFER, M.; MOTTA MARQUES, D.M.L. Ecological modeling of submerged macrophytes in subtropical systems: could year round growth of macrophytes increase resilience of the clear water state?. **Anais do International Conference of Pollution Difusion**, Belo Horizonte, Ago. 2007.

FERREIRA, T. F. **O papel das macrófitas submersas sobre a qualidade da água, restauração e conservação de lagos rasos subtropicais : estudo de caso, a Lagoa Mangueira, RS.** Tese de doutorado. UFRGS – Porto Alegre. 164p. 2009.

FRAGOSO JR, C.R. **Modelagem Tridimensional Da Estrutura Trófica Em Ecossistemas Aquáticos Continentais Rasos.** Tese de doutorado. UFRGS – Porto Alegre. 125p. 2009.

FRAGOSO JR, C.R.; MOTTA MARQUES, D.M.L.; FERREIRA, T.F.; JANSE, J.H.; VAN NES, E.H. Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake. **Environmental Modelling and Software**, 26 (11). 2011. p. 1337-1348.

FRAGOSO JR, C.R.; FERREIRA, T.F.; MOTTA MARQUES, D. **Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos.** Oficina de Textos. 304p. 2009.

FRAGOSO JR., C.R., et al. Modelling spatial heterogeneity of phytoplankton in Lake Mangueira, a large shallow subtropical lake in South Brazil. **Ecological Modelling** 219. 2008. p. 125–137.

FRAGOSO JR., C.R., Motta Marques, D., Collischonn, W., van Nes, E.H.. Modelling spatial heterogeneity of phytoplankton in Lake Mangueira, a large shallow subtropical lake in South Brazil. **Ecological Modelling** 219. 2008. p. 125–137.

FULFORD, J. M. Computacional technique and performance of transient inundation model for rivers–2 dimensional (TRIM2RD): a depth-averaged two-dimensional flow model. U.S. **Geological Survey**. Open-file report. 03-371. 2003.

GARCÍA, M. Sedimentation and Erosion Hydraulics. In Mays, L. W. [ed.], **Hydraulic Design Handbook**. McGraw-Hill. 1999.

GARCÍA, M.H.; PARKER, G. Entrainment of bed sediment into suspension. **J. Hydraul. Eng.-ASCE** 117. 1991. p. 414–435.

GARCÍA, M.H.; PARKER, G. Experiments on the entrainment of sediment into suspension by a dense bottom current. **J. Geophys. Res.-Oceans** 98. 1993. p. 4793–4807.

HAMILTON, D. P.; MITCHELL S. F.. Wave-induced shear stresses, plant nutrients and chlorophyll in seven shallow lakes. **Freshwater Biology** 38. 1997. p. 159–168.

HAMILTON, D. P.; MITCHELL S. F.. An empirical model for sediment resuspension in shallow lakes, **Hydrobiologia**, 317. 1996. p. 209 – 220.

ITAKURA, T., KISHI, T. Open channel flow with suspended sediments. **J. Hydr. Div.**, 106(8). 1980. p. 1325-1343.

JAMES, W.F.; BARKO, J.W.; BUTLER, M.G. Shear stress and sediment resuspension in relation to submersed macrophyte biomass. **Hydrobiologia** 515. 2004. p. 181–191.

JANSE, J. H. **Model studies on the eutrophication of shallow lakes and ditches**. Wageningen University. Wageningen, 376 pp. 2005.

JEPPESEN, E.; LAURINDSEN, T.L.; KAIRESALO, T.; PERROW, M.R. Impact of submerged macrophytes on fish-zooplankton interactions in lakes. In: Jeppensen, E. ed. **The structuring role of submerged macrophytes in lakes**. New York: Springer- Verlag. 1997. p 91-114.

JI, Z. **Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries**. 1 Edition. John Wiley & Sons. p. 704. 2008.

JIN, K. R. E.; WANG, K. H. Wind generated waves in lake Okeechobee. **Journal of the American Water Resources Association**. 34. 1998. p. 1099 – 1108.

JIN, K.R.; JI, Z.G.; Case study: Modeling of sediment transport and wind-wave impact in Lake Okeechobee. **Journal of Hydraulic Engineering**, 130 (11). 2004. p. 1055-1067.

KIST, D. L. **Reguladores da variação temporal e espacial da comunidade bacteriana em lagoa rasa subtropical**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Porto Alegre 105p. 2012.

KOSTEN, S.; LACEROT, G.; JEPPESEN, E.; MOTTA MARQUES, D.; VAN NES, E.H.; MAZZEO, N.; SCHEFFER, M. Effects of submerged vegetation on water clarity across climates. **Ecosystems** 12 (7), 1117e1129. 2009.

- LOU, J.; SCHWAB, D. J.; BELESKY, D.; HAWLEY, N. A model of sediment resuspension and transport dynamics in southern Lake Michigan, **J. Geophys. Res.**, 105. 2000. p. 6591–6610.
- LUETTICH, R. A. ; HARLEMAN JR., D. R. F.; SOMLYÓDY, L. . Dynamic behavior of suspended sediment concentrations in a shallow lake perturbed by episodic wind events . **Limnol . Oceanogr.** 35. 1990; p. 1050-1067.
- PARKER, G. 2004. **1D Sediment Transport Morphodynamics with applications to Rivers and Turbidity currents**. <<http://cee.uiuc.edu/people/parkerg/>>. Acesso em: 08 de jan. 2014
- PAZ, A. R. **Análise dos principais fatores intervenientes no comportamento hidrodinâmico do banhado do Taim (RS)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Porto Alegre. 155p. 2003.
- ROOZEN F.; LURLING M.; VLEK H.; KRAAN E.; IBELINGS B.W.; SCHEFFER M. Resuspension of algal cells by benthivorous fish boosts phytoplankton biomass and alters community structure in shallow lakes. **Freshw Biol** 52. 2007. p. 977–987.
- SCHEFFER, M.; VAN NES, E. H.; Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. **Hydrobiologia** 584. 2007. p. 455–466.
- SCHEFFER, M. Multiplicity of stable states in freshwater systems. **Hydrobiologia** 200/201. 1990. p. 475–486.
- SCHEFFER, M.; HOSPER, H. S.; MEIJER, M. L.; MOSS, B.; JEPPESEN, E.; Alternative equilibria in shallow lakes. **Trends in Ecology and Evolution** 8. 1993. p. 275–279.
- SCHELSKE, C.L. **Sediment and Phosphorus Deposition in Lake Apopka**. Final Report (Spec. Publ. SJ97-SP21). St. Johns River Water Management District, Palatka, FL. 1997.
- SHENG, Y. ; LICK, P. W. The transport and resuspension of sediments in a shallow lake . **J. Geophys . Res.** 84. 1979. p. 1809-1826.
- SHIELDS, A. F., **Anwendung der aehnlichkeitsmechanik und der turbulenzforschung auf die geschiebebewegung**, Ph.D. dissertation, Mitt. Preuss Ver.-Anst., Berlin, Germany (in German), (English translation by W. P. Ott and J. C. van Uchelen available as Hydrodynamics Laboratory Publication No. 167, Hydrodynamics Lab., California Inst. of Tech., Pasadena). 1936.
- SOMLYÓDY, L. Wind induced sediment resuspension in shallow lakes. In: Bhra, T.F.E.C. (Ed.), **Water Quality Modelling in the Inland Natural Environment**. BHRA, The Fluid Engineering Centre, Bournemouth, England. 1986. p. 287–298.
- VAN RIJN, L. C. Sediment transport, Part II: Suspended load transport. **J. Hydr. Engrg.**, 110(11). 1984. p. 1613-1641.
- WU, Z.; QIU, D.; HE, F.; FU, G.; CHENG, S.; MA, J. Effects of rehabilitation of submerged macrophytes on nutrient level of a eutrophic lake **Chinese Journal of Applied Ecology**, 14 (8). 2003. p. 1351-1353.

ZAMBRANO, L.; BEIJER, J.; ROOZEN, F.; SCHEFFER, M., A method for measuring effects of bioturbation and consolidation on erosion resistance of aquatic sediments. *Arch. Hydrobiol.* 162. 2005. p.. 327–337.