

Dinâmica e ressuspensão por ondas no Lago Guaíba (RS, Brasil) e implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano

João Luiz NICOLODI^{1*}, Elirio E. TOLDO², Jr. & Leandro FARINA³

1. Instituto de Oceanografia, Universidade Federal de Rio Grande. Av. Itália, Km 8, S/N. Campus Carreiro, CEP: 96201-900, Rio Grande, Rio Grande do Sul. Email: jl.nicolodi@bol.com.br.

2. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Bloco I, Prédio 43113, Campus do Vale, CEP: 91540-000, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Email: toldo@ufrgs.br.

3. Instituto de Matemática, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43111, CEP: 91.540-000, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. Email: farina@mat.ufrgs.br.

Recebido em 03/2009. Aceito para publicação em 08/2010.

Versão online publicada em 11/11/2010 (www.pesquisasemgeociencias.ufrgs.br)

Resumo - Pesquisas referentes à dinâmica sedimentar do Lago Guaíba são escassas e a maioria trata da distribuição e textura dos sedimentos, sendo raras aquelas que fazem menção ao padrão de ondas e suas relações com a ressuspensão destes sedimentos e suas consequências. A presente pesquisa analisa, por meio da aplicação do software SWAN (*Simulating Waves Nearshore*), as características das ondas incidentes no Lago Guaíba quanto a seus principais parâmetros: altura significativa (H_s), período (T), direção de propagação e suas relações com a ressuspensão de sedimentos junto ao fundo. Os maiores valores de altura de ondas modelados foi de 0.55 m, particularmente quando de ventos do quadrante S e SE e com velocidades maiores que 7 m/s. Em termos gerais, as características das ondas seguem os padrões de intensidade e direção dos ventos, atingindo seus máximos valores aproximadamente 1 ou 2 horas após a velocidade de pico dos ventos. Os ambientes de sedimentação do lago foram mapeados e classificados da seguinte forma: 1) Ambientes Depositionais (51% da área do lago); 2) Ambientes Transicionais (41%); e 3) Ambientes Erosionais ou de não deposição (8%). Como forma de contribuir à gestão ambiental da região, foram gerados subsídios referentes ao potencial de concentração de material particulado em suspensão. Este potencial foi definido em função do percentual de tempo, ao longo do ano, em que a ressuspensão de sedimentos de fundo gerada por ondas pode incrementar os níveis de poluição nos locais onde a água é atualmente captada para o abastecimento público no município de Porto Alegre.

Palavras-chave: modelagem de ondas, ambientes sedimentares, SWAN.

Abstract - WAVE DYNAMICS AND RESUSPENSION IN LAKE GUAIBA WITH IMPLICATIONS ON POINTS OF WATER ABSTRACTION FOR HUMAN SUPPLY. Researches on the sediment dynamics of Lake Guaíba are scarce, and most of them analyses just some aspects like texture of the sediments. This research examines the characteristics of Guaíba's Lake waves with regard to their main parameters; significant wave height (H_s), period (T), direction of wave propagation and its connections with the resuspension of sediments at the bottom. To this end, SWAN (Simulating Waves Nearshore) a type of software using mathematical modeling techniques, has been validated and applied, with its main inputs being the lake's bathymetry, direction, wind speed and frequency in the region (between 1996 and 1997) in addition to currents, water level, density, and maximum and minimum frequencies, among others. The highest waves modeled reached 0.55 m in a few points of the lake, particularly when winds were blowing from the S and SE quadrants with an intensity of over 7 m.s⁻¹ec. Generally speaking, waves follow wind intensity and direction patterns, and reach maximum values in about 1 to 2 hours after wind speed peaks. Whenever winds were stronger, waves took some 2 hours to reach 0.10 m, but with weak to moderate winds, they took around 3 hours. In addition to speed and direction, wind regularity proved relevant in generating and propagating waves on Lake Guaíba. The lake's sediment environments were mapped and rated as follows: 1) Depositional Environment (51% of the lake); 2) Transitional Environment (41%); and 3) Erosional or Non-Depositional Environment (8%). As a contribution to the region's environmental management, subsidies have been created with relation to the concentration of particulate suspended matter. This potential has been defined as a percentage of time, throughout the year, in which the wave-created resuspension of environment sediments can increase the pollution levels at places where water is currently captured for public supply in the Porto Alegre area.

Keywords: wave modeling, sediment environments, SWAN

1. Introdução

1.1. Generalidades

O abastecimento de água potável constitui-se em um grande desafio para os centros urbanos, não apenas pela quantidade demandada, mas principalmente pela qualidade. A primeira etapa deste processo é a captação da água pelas adutoras, onde sua qualidade apresenta relação direta com o grau de tratamento necessário.

No caso de Porto Alegre, cidade com mais de 1,4 milhões de habitantes, a captação de água é feita em dois mananciais: no Lago Guaíba, de onde vêm 96,4% da água bruta, e na Represa da Lomba do Sabão, que colabora com 3,6% da água captada. Após receber o tratamento necessário, a água é distribuída, contabilizando um volume de aproximadamente 17 milhões de m³, o qual é suficiente para abastecer com água encanada quase 100% da população (Bendati *et al.*, 1998).

Encaixado nas terras baixas da porção limítrofe do Escudo Cristalino com a Planície Costeira do Rio Grande do Sul, encontra-se o Lago Guaíba (em tupi - guarani *baía de todas as águas*), com 496

km² de superfície. O lago recebe o deságue de oito sub-bacias que se estendem pelo centro e nordeste do Rio Grande do Sul, em uma área aproximada de 84.763,5 km² que abrange mais de 250 municípios. Esta área é a mais densamente habitada do Estado, com aproximadamente 6,5 milhões de habitantes, que respondem por quase 70% do PIB do Estado. Inclui-se aí a capital, Porto Alegre, que utiliza as águas do lago para abastecimento público (Fig. 1).

A convivência do ser humano com o Guaíba nem sempre foi harmoniosa e ainda hoje é possível observar tendências a um comportamento meramente utilitário em relação ao lago, quando não depredador. A resultante deste tipo de visão não pode ser outra que não a perda, lenta, mas constante, de qualidade ambiental e a consequente queda de qualidade de vida da população.

Na áspera tarefa de gerenciar este tipo de ambiente, alguns instrumentos são previstos pela legislação brasileira de Recursos Hídricos, como por exemplo, os Comitês de Bacias Hidrográficas - colegiados onde diversos setores da sociedade atuam com objetivo de auxiliar na tomada de decisão dos poderes públicos quanto à gestão integrada de recursos hídricos e meio ambiente.

Esta situação foi verificada por Innocentini (2001) em lagos no Rio de Janeiro, quando um ciclone extra-tropical passou pela cidade, gerando ondas suficientemente altas a ponto de ressuspender sedimentos do leito, devolvendo poluentes químicos, esgoto e demais matérias orgânicas à coluna d'água. Este fato ocasionou a mortandade de toneladas de peixes por asfixia, além de ocasionar mau cheiro, ardor nos olhos e acelerada corrosão nos metais.

O presente trabalho pretende contribuir na geração de subsídios necessários para a definição de locais de captação de água para abastecimento humano da região metropolitana de Porto Alegre a partir do conhecimento das ondas no Lago Guaíba e suas interações com a ressuspensão dos sedimentos depositados em seu leito.

Para tanto, foram utilizadas técnicas de modelagem matemática em predição de ondas (reunidas no *software* SWAN), aliadas às ferramentas disponíveis nos sistemas de informações geográficas (SIG). O objetivo é descrever os padrões da ondulação no Guaíba, tanto no tempo quanto no espaço, identificando os locais mais sujeitos à ação das ondas e/ou com maior predisposição à ressuspensão dos sedimentos do fundo. Para este fim, os seguintes parâmetros foram analisados: altura significativa da onda, direção de propagação, período médio e de pico e velocidade orbital junto ao fundo.

1.2. A Dinâmica do Lago

Os primeiros estudos sobre a sedimentação do Guaíba foram realizados por Cunha (1971) quando da caracterização morfológica, mineralógica e textural do lago. Em linhas gerais, pode-se dizer que os terrenos drenados pela Bacia do Sudeste do Rio Grande do Sul, formados por rochas plutônicas, vulcânicas e sedimentares, constituem-se nas terras altas, responsáveis pela produção de expressivos volumes de sedimentos que são transportados para o Guaíba, principalmente através dos rios Jacuí, Sinos, Taquari e Gravataí (Toldo Jr., 1994).

O regime fluvial dos tributários perde competência como agente transportador ao ingressar na ampla bacia deposicional do Guaíba, sendo que os sedimentos mais grosseiros são ali retidos, dando origem ao Delta do Jacuí (Fig. 1). Os sedimentos finos ingressam no lago como plumas de material em suspensão.

A intensidade da sedimentação do Guaíba

pode ser mensurada pelas taxas de sedimentação de longo período registradas por Toldo Jr. et al. (2000), para a bacia lagunar, com valores médios de 0,52 mm/ano. Entretanto, taxas de sedimentação de curto período, obtidas pelo método ^{210}Pb , indicam valores entre 3,5 e 8,3 mm/ano para os últimos 150 anos (Martins et al., 1989), refletindo o resultado da ação antrópica, relacionada principalmente a agricultura, em áreas de influência da bacia de drenagem.

A deposição dos sedimentos finos ocorre, prioritariamente, a partir da isóbata de 3 m. Entre a linha de praia e a isóbata de 3 m, o fundo caracteriza-se pela presença de sedimentos arenosos sem cobertura de sedimentos finos (Bachi et al., 2000). Esta ausência é explicada pela ação das ondas, que por meio da turbulência causada na coluna d'água, ressuspende o sedimento, fazendo com que o destino da partícula dependa também da ação de correntes e do tempo de duração do fluxo de turbulento.

O regime hidrodinâmico do sistema lagunar, no qual se insere o Lago Guaíba, é complexo, tanto na época das cheias como na época de estiagem. As relações de causa e efeito dos diversos fatores que intervêm no escoamento do Guaíba, em especial, a forte influência da ação dos ventos, mostram que o lago não é só um canal de extensão dos seus tributários, mas um tipo de reservatório, intimamente ligado à Lagoa dos Patos.

O Lago Guaíba tem comportamento similar a um reservatório, cuja seção de Itapuã funciona como um controle, dirigido por condições de níveis de montante e jusante. Apesar de predominar o sentido natural de escoamento (Guaíba – Lagoa dos Patos), as águas do lago sofrem forte influência eólica, o que causa represamento e inversão dos fluxos, no caso de ventos do quadrante Sul (Casalas & Cybis, 1985). A variação de níveis é a principal força para a geração de correntes no Guaíba, sendo que sua complexa dinâmica é pouco conhecida, resumindo-se a trabalhos de pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Casalas & Cybis, 1985), da Universidade Federal de Rio Grande (Moller et al., 2001; Castelão & Moller, 2003) e de órgãos públicos ligados à gestão de águas (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE e Departamento Municipal de de Águas e Esgotos - DMAE).

As oscilações diárias no nível do Guaíba são causadas pelas variações na velocidade do vento e apresentam características relativamente regula-

res, sendo que a direção do vento, a força de Coriolis e maré em Rio Grande (cidade localizada no estuário da Lagoa dos Patos), agem como fatores secundários de acréscimo ou decréscimo destas oscilações. No período de cheias, as variações de nível são menos sensíveis à velocidade eólica. Já em períodos normais ou de seca, ventos de aproximadamente 7 m.s^{-1} podem produzir oscilações superiores a 50 cm.

2. Métodos e Resultados

Para a análise proposta neste estudo foram seguidas as seguintes etapas: 1) elaboração de modelo batimétrico do lago; 2) análise de dados de modelo batimétrico do lago; 2) análise de dados de ventos; 3) modelagem matemática de ondas; 4) análise do potencial de ressuspensão de sedimentos na coluna d'água; 5) relação dos resultados com os pontos de captação de água para abastecimento de Porto Alegre.

2.1. Elaboração de modelo batimétrico do lago

Este modelo (Fig. 2) foi concebido a partir da compilação de dados pré-existentes oriundos das seguintes fontes: a) Mapa físico do Atlas Ambiental de Porto Alegre, elaborado por Irgang *et al.* (1997); b) Base de dados do Projeto "Sedimentação do Complexo do Guaíba" (CECO, 1999; Bachi *et al.*, 2000), e c) Dados obtidos em 14 perfis topográficos realizados de praias do Parque Estadual de Itapuã, localizado na porção sul do lago (Nicolodi, 2002; Nicolodi & Toldo Jr., 2003).

A interpolação dos dados foi realizada com resolução espacial de 2 m, no software SURFER 8.0, utilizando o método de Kriging, que é um interpolador estatístico de ajuste local (Weber, 1995). As interpolações foram realizadas em pequenos setores, com varredura por quadrante na direção preferencial NW-SE, em função da orientação e das características de contorno do lago. A validação desse modelo se deu por meio de comparação entre perfis interpolados e medidos em campo por meio de ecobatímetro registrador quando da execução do projeto "Mecânica de Correntes do Guaíba" (DNAEE, 1983). Seguiu-se a metodologia descrita por Plan *et al.* (2002), a qual já havia sido aplicada no Rio Grande do Sul, em trabalhos sobre a delimitação da antepraia na plataforma continental de Tramandaí (Gruber & Nicolodi, 1998).

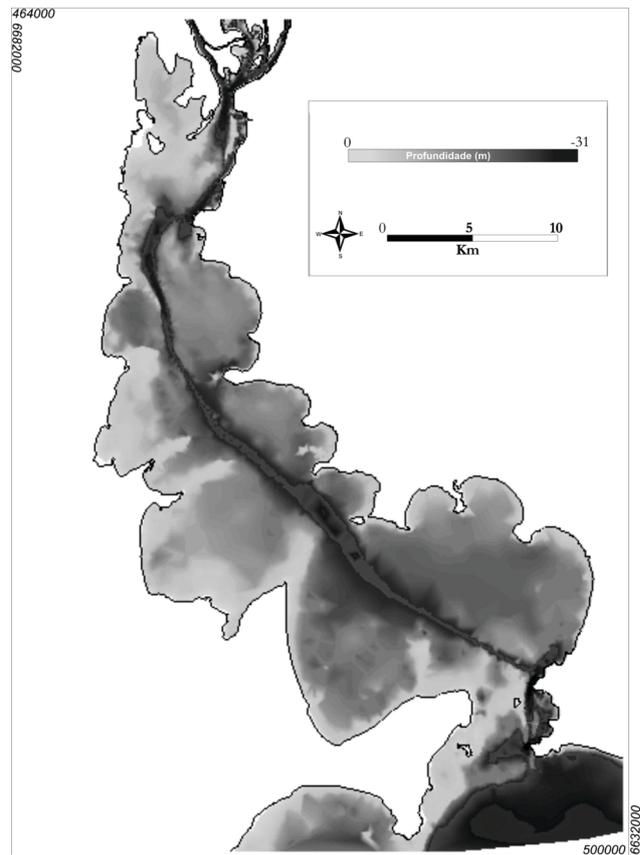


Figura 2. Modelo batimétrico do Lago Guaíba.

2.2. Análise de dados de ventos

Em relação ao padrão de ventos locais incidentes, utilizou-se uma série de dados referente a doze meses, entre 1996 e 1997, obtida junto ao Aeroporto Salgado Filho (Fig. 1), sendo as mesmas realizadas diariamente, na altura padrão de 10 m e em intervalos de uma hora.

Os resultados podem ser observados na figura 3, que apresenta o histograma dos dados de direção e velocidade dos ventos. Os dados foram transformados em imagens com 365 linhas e 24 colunas, sendo que cada pixel equivale ao registro de uma hora (Fig. 3).

Os ventos predominantes na região de Porto Alegre sopraram dos quadrantes SE e E em 29% e 22% dos registros, respectivamente, seguidos pelos ventos de S, NW, N e W, com 12%, 10%, 8,8% e 7%. Os ventos com menor incidência foram provenientes dos quadrantes NE e SW, com 4,1% e 4,3% dos registros analisados. Em relação às velocidades, a média foi de $2,52 \text{ m.s}^{-1}$ e a máxima foi de 13 m.s^{-1} . As calmarias e dados sem registros somam 13,7% dos dados do conjunto.

Os resultados estatísticos deste conjunto de dados foram correlacionados com padrões climáti-

cos conhecidos para a região de Porto Alegre (Coussirat de Araújo, 1930; Moreno, 1961; Livi, 1998; Camargo, 2002). A correlação positiva entre os conjuntos de dados permite a aplicação dos resultados tanto em situações pretéritas quanto

em previsões, uma vez que os anos de 1996 e 1997 foram considerados dentro da “normalidade” no que diz respeito aos parâmetros climatológicos utilizados.

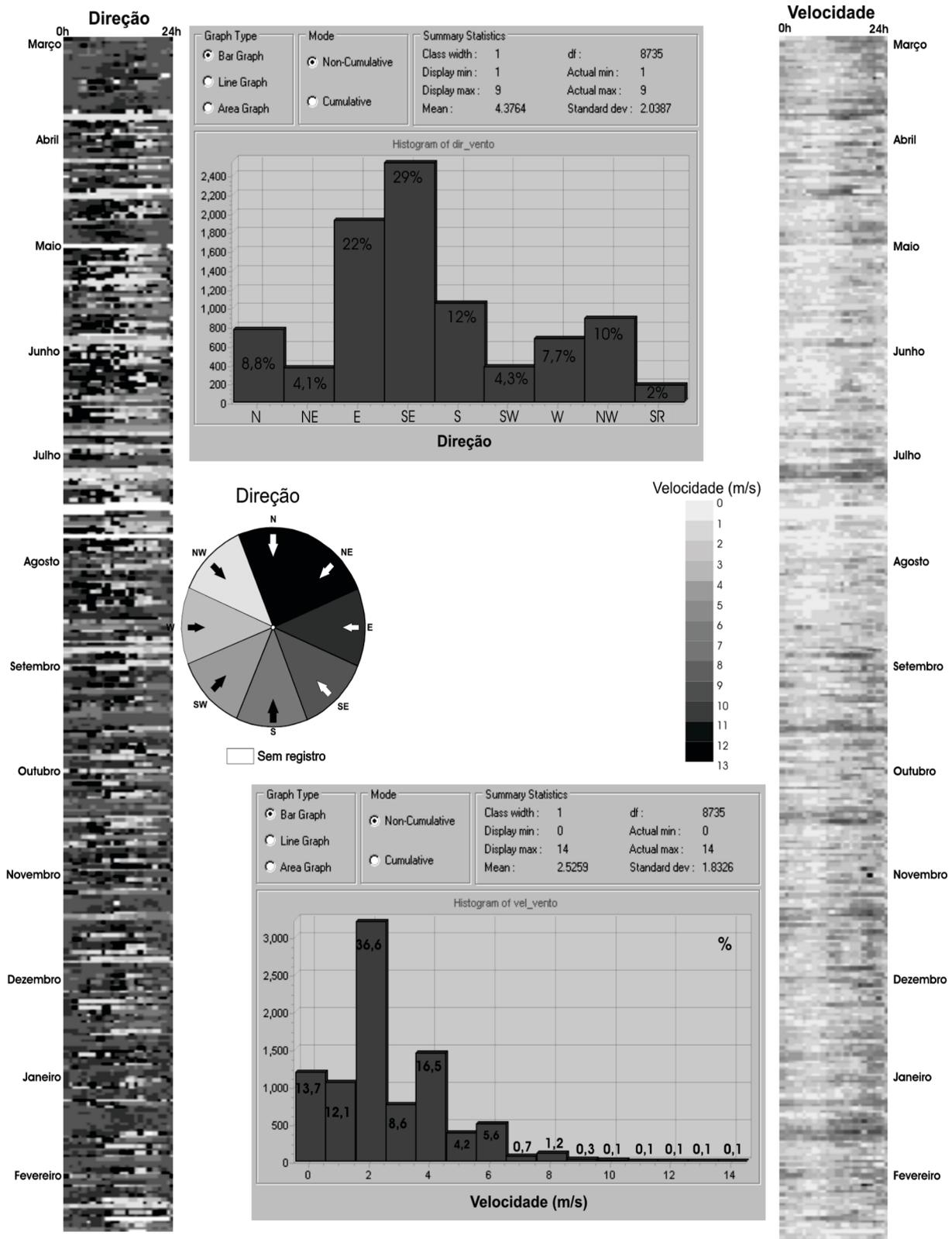


Figura 3. Análise dos dados de ventos. A coluna da esquerda e o histograma superior se referem à direção; a coluna da direita e o histograma inferior se referem à velocidade.

2.3. Modelagem de ondas

Para a modelagem de ondas, optou-se pela utilização do *software* SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), que constitui um modelo numérico utilizado para obter análises do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos e estuários. Trabalhos como os de Lin *et al.* (1998) e Jin & Ji (2001) verificaram a aplicabilidade do SWAN em ambientes abrigados (Baía de Chesapeake e Lago Okeechobee, respectivamente) quando da comparação com outros modelos e com dados medidos em campo, obtendo resultados considerados satisfatórios.

O modelo é baseado em uma equação de balanço de energia e segue a mesma filosofia de modelos de ondas de terceira geração, como por exemplo, dos modelos WWATCH e WAM (Tolman, 1997, 1999), mas com a física de ondas mais apropriada para águas rasas. As ondas no SWAN são descritas através do espectro de densidade de ação $N(\sigma, \theta)$ ao invés do espectro de densidade de energia $E(\sigma, \theta)$, porque a densidade de ação é conservada na presença de correntes, ao contrário da densidade de energia (Whitham, 1974 *apud* Holthuijsen, 2000), conforme a equação:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

Onde: σ é a frequência angular e θ é a direção de ondas.

Além da utilização de dados sobre vento e batimetria, outras definições foram necessárias para a utilização do SWAN:

- correntes: a influência de correntes sobre o clima de ondas foi descartada em função das baixas velocidades observadas. Bhowmik & Stall (1978) e Burrows & Hedges (1985) demonstraram que correntes horizontais em lagos rasos apenas interferem significativamente na altura das ondas quando de velocidades a partir de 0,5 m/s. No Lago Guaíba as correntes apresentam velocidade média de 0,1 m/s e máxima de 0,15 m/s (DNAEE, 1983; Nicolodi, 2007);
- nível d'água: assim como nos trabalhos de Toldo Jr. (1994) e Toldo Jr. *et al.* (2000), Wood *et al.* (2001), Jin & Ji (2001) e Nunes (2002), o nível foi considerado constante para fins de modelagem;
- densidade da água: 1.000 kg/m³;
- domínio do espectro: definido no intervalo de 0,3 a 1 Hz de forma a caracterizar o maior número de ondas possível.

Foram utilizadas coordenadas cartesianas, sistema de projeção de Mercator e convenção náutica para as direções de ventos e ondas. A grade espacial foi composta de uma malha retangular com resolução de 200 m, onde qualquer cota igual ou superior a zero foi considerada nula. Os contornos do Lago Guaíba (Delta do Rio Jacuí e entrada da Lagoa dos Patos) foram considerados fechados.

Como o SWAN parte de uma condição inicial estática, o mesmo é inicializado com um espectro de JONSWAP, computado através das velocidades de vento, a 10 m da interface ar-mar. A computação utiliza ainda a curva de crescimento de águas profundas de Kahma & Calkoen (1992 *apud* Holthuijsen, 2000) e os valores de altura significativa e frequência de pico do espectro de Pierson e Moskowitz (Holthuijsen, 2000).

Os dados gerados pelo SWAN foram analisados no Sistema de Informações Geográficas IDRISI (versões 3.2 e kilimanjaro) através de uma interface computacional automática desenvolvida para esse estudo. O "casamento" entre modelos matemáticos complexos como SWAN e *softwares* de geoprocessamento traz possibilidades ímpares, já que a gama de ferramentas disponíveis nestes programas é imensa, permitindo o cruzamento dos dados obtidos no modelo com qualquer tipo de dado que tenha a variável espacial georreferenciada.

O modelo de ondas foi validado por meio da correlação dos dados obtidos com aqueles medidos por um ondógrafo FSI3D da *Falmouth Scientific, Inc.*, fundeado próximo ao clube Jangadeiros, na zona sul de Porto Alegre (UTM 22S 474233 e 6667179) entre os meses de junho e agosto de 2005 (Fig. 1). Os resultados foram considerados dentro da expectativa, sendo que a correlação obtida assemelha-se àquela obtida na maioria dos trabalhos consultados na literatura, considerados satisfatórios (Ris *et al.*, 1999; Gorman & Nielson, 1999; Wood *et al.*, 2001; Shan-Hwei *et al.*, 2002; Pires-Silva *et al.*, 2002; Rusu *et al.*, 2002; Ou *et al.*, 2002; Rogers *et al.*, 2003; Hsu *et al.*, 2005; Zijlema & Westhuysen, 2005).

As maiores discrepâncias ocorreram nas últimas horas do monitoramento, quando a partir das 8 h do dia 05/07 os ventos enfraqueceram e a direção de proveniência migrou do quadrante S para W. Neste momento, as ondas medidas pelo FSI apresentaram uma redução acentuada em sua altura, o que não foi acompanhado pelos resultados do SWAN, os quais demonstraram esta queda, mas de

maneira menos acentuada. Isto indica uma tendência do SWAN a responder de maneira mais lenta às rápidas variações dos ventos, principalmente em ambientes abrigados como o Guaíba, onde as ondas são totalmente dependentes da energia eólica. O

mesmo fenômeno foi observado por Jin & Ji (2001) quando da aplicação do SWAN no Lago Okeechobee, na Flórida. Este tipo de discrepância pode ser creditado às interações não lineares (triplas ou quádruplas) entre as ondas (Fig. 4).

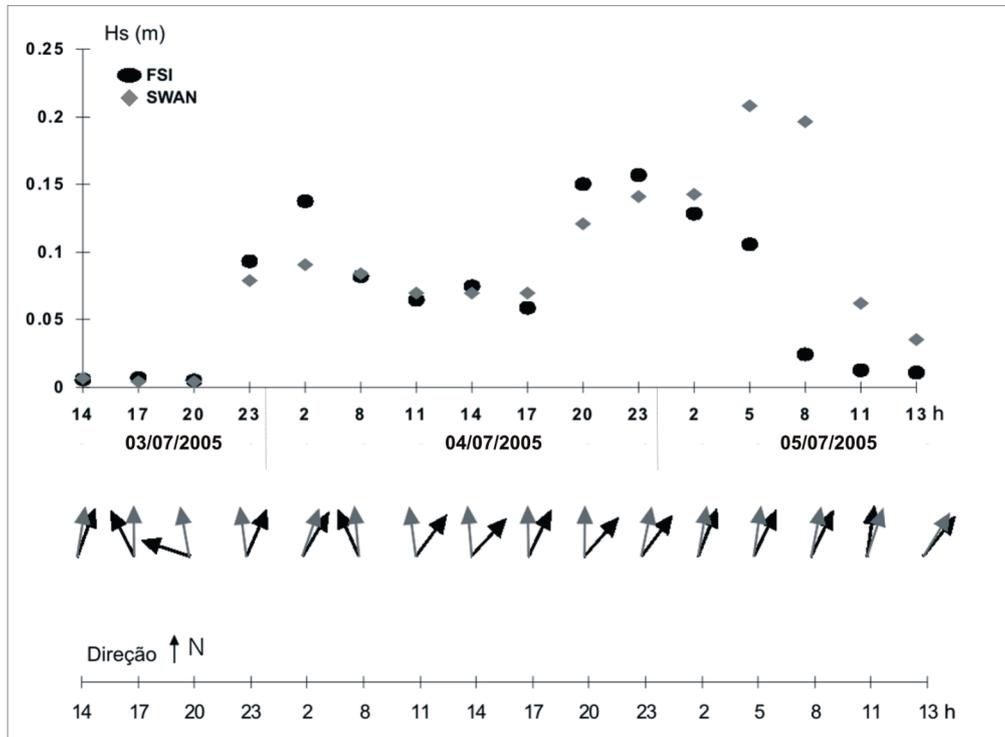


Figura 4. Dados de altura significativa (Hs) e direção de ondas medidos pelo ondógrafo FSI e modelados pelo software SWAN no Lago Guaíba.

As ondas no Guaíba acompanham os padrões de intensidade e direção do vento, atingindo os valores máximos aproximadamente entre 1 e 2 horas após os picos de velocidade dos mesmos. Nas situações onde os ventos sopraram com maior intensidade, as ondas levaram aproximadamente 2 horas para atingir 0,10 m, sendo que não necessariamente as direções eram constantes. Em situações com ventos soprando com menor intensidade, este tempo foi de aproximadamente 4 horas. As duas situações em que o tempo de resposta foi menor coincidiram com aquelas em que a intensidade do vento foi inferior a 4 m/s. O crescimento das ondas se mostrou mais acentuado para ventos com velocidades acima de 7 m/s.

Além disso, foi identificada uma situação de saturação do espectro de ondas, devido às condições de profundidade e *fetch* do Lago Guaíba, quando das simulações com ventos que sopraram durante 8 horas com velocidades acima de 25 m/s. Nestes casos, o crescimento na altura das ondas (0,55 m) não refletiu a forte intensidade dos ven-

tos. Além de velocidade e direção, outro fator que se mostrou relevante na geração e propagação de ondas de gravidade no Guaíba foi a regularidade dos ventos. Nas situações onde o vento soprou com constância, a tendência de crescimento das ondas foi mais acentuada.

Contribuem ainda para a definição de padrões de comportamento das ondas a orientação do Lago Guaíba, cujo alinhamento geral NW-SE favorece a geração e propagação de ondas para determinados tipos de ventos, e o processo de refração das ondas, que causa um alinhamento da zona de rebentação, de tal maneira que ela tende a ser paralela à linha de praia.

2.4. Análise do potencial de ressuspensão de sedimentos na coluna d'água

Segundo Iron & Zollmer (1990 *apud* Laybauer & Bidone, 2001), boa parte da contaminação causada por compostos orgânicos e inorgânicos é transportada na água, preferencialmente junto ao

material em suspensão. Dependendo das características hidrodinâmicas do meio, partículas finas (constituídas, principalmente por matéria orgânica, argilo-minerais e óxidos/hidróxidos de Fe e Mn) podem decantar, depositando-se no substrato sedimentar. Portanto, locais de acumulação de sedimentos finos representam sítios preferenciais nos quais fica registrado, além das características geológicas, o histórico de ocupação e contaminação da bacia hidrográfica.

A relação entre a energia das ondas e o início do movimento dos sedimentos de fundo torna-se então, uma componente fundamental a ser analisada.

Dois são os principais procedimentos para essa avaliação: a) velocidade orbital (U_m) e b) tensão de cisalhamento (τ_0). Embora possuam diferenças metodológicas significativas entre si, eles apresentam em comum o parâmetro da velocidade orbital das ondas, o qual é deduzido a partir de medidas de altura (H) e período (T) da onda de superfície. Desta maneira, a efetividade da onda em provocar o início do movimento dos sedimentos é função da velocidade orbital próxima ao fundo e da sua frequência ($1/T$).

Os dados de velocidade orbital da onda junto ao fundo foram extraídos do SWAN, que apresenta essa variável inserida na formulação de fricção de fundo (*bottom friction*) que incluem os modelos empíricos de JONSWAP (Hasselmann *et al.*, 1973), o modelo de coeficiente de arrasto (*drag law*) de Collins (1972) e o modelo de viscosidade em regime turbulento (*eddy-viscosity*) de Madsen *et al.* (1998).

A interação entre água e superfície de fundo envolve forças de fricção que atuam dentro de uma camada limite. Em ambientes de águas rasas, esta camada pode ocupar uma significativa fração da profundidade total, sendo que, sob determinadas condições, a camada limite pode compreender a quase totalidade da coluna d'água, como em locais de águas rasas, onde ocorre a quebra da onda.

A distribuição vertical e horizontal da velocidade orbital é modificada próximo ao fundo, em decorrência da estrutura da camada limite. A espessura desta camada é definida como a distância a partir do fundo até o valor da velocidade máxima relacionada ao fluxo livre.

A região ocupada pela camada limite possui maior energia envolvida em sua dinâmica, quando comparada a outros sistemas naturais, afetando significativamente a ressuspensão e o transporte

de sedimentos. Por consequência, configura-se como um agente modelador da topografia de águas rasas (Swift *et al* 1983 *apud* Toldo Jr., 1994).

Foram efetuados cálculos que definiram o percentual do tempo em que as velocidades orbitais das ondas atingem o limite mínimo para início do movimento de sedimentos das frações silte e areia muito fina (15 cm.s^{-1}) por meio de um cruzamento das informações referentes à frequência de ocorrência de ventos, em função de intervalos de velocidade e direção, com os resultados referentes à velocidade orbital (U_m). O resultado pode ser observado no mapa da figura 5, que representa o percentual de tempo com potencial de ressuspensão de siltes e areias finas por ação de ondas.

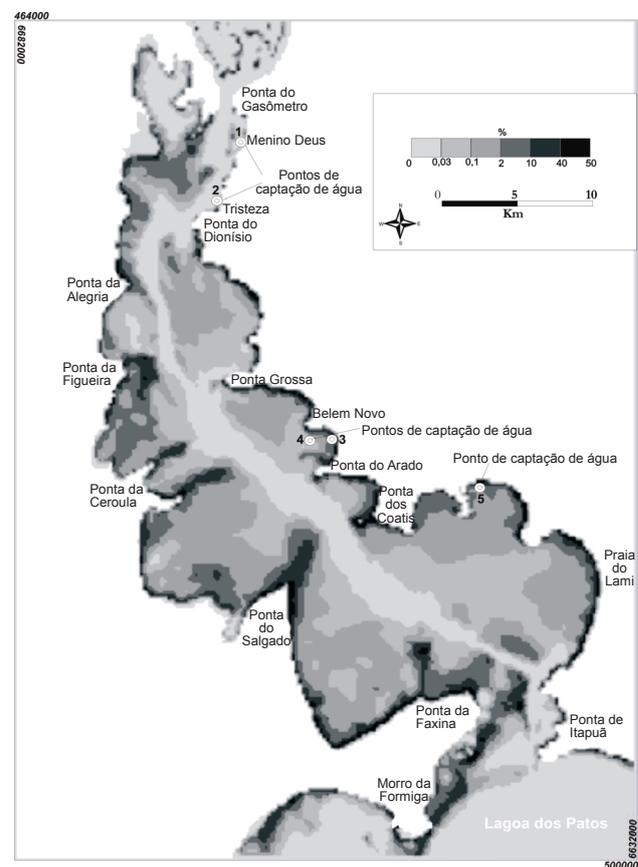


Figura 5. Mapa do percentual de tempo com potencial de ressuspensão de silte e areia muito fina por ação de ondas no Lago Guaíba. Valores referentes ao percentual de tempo em que a velocidade orbital da onda (U_m) foi igual ou superior a 15 cm/s entre março de 1996 e fevereiro de 1997.

Com base na sistematização das informações da distribuição sedimentar, das características das ondas incidentes, da velocidade orbital, da camada limite e do início do fluxo turbulento, foram definidos três ambientes de sedimentação no Lago Guaíba (Fig. 6). Estes ambientes foram classificados

como (1) fundo deposicional, (2) fundo transicional e (3) fundo erosional e possuem distribuição espacial fortemente condicionada pela geometria e batimetria do lago.

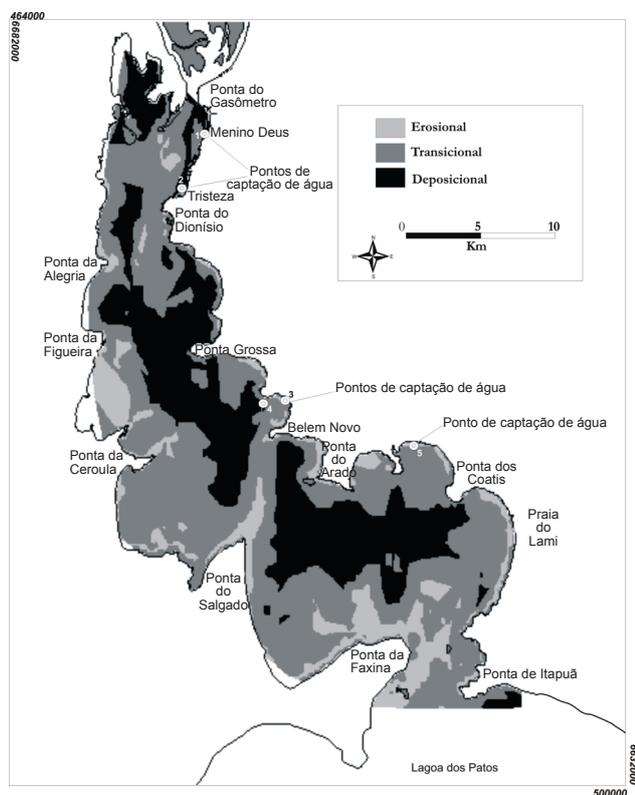


Figura 6. Mapa dos ambientes sedimentares do Lago Guaíba.

O fundo deposicional corresponde a 51 % da área do lago. Constitui um ambiente de baixa energia hidrodinâmica que favorece a deposição de sedimentos finos. Estes depósitos estão localizados nas áreas mais profundas do lago, onde está situado o canal de navegação, e se encontram abrigados das principais forças de ressuspensão, que podem ser geradas pelos ventos dos quadrantes E e SE.

O fundo transicional engloba 41 % da área do lago. Corresponde a um ambiente de baixa energia na maior parte do tempo, sendo o substrato composto basicamente por areia e silte, remobilizados em determinadas situações associadas às condições de ondas geradas por ventos com velocidades iguais ou superiores a 11 m.s^{-1} . Em situações com ventos mais fracos, pode ocorrer erosão em áreas de pequena profundidade. A distribuição espacial destas áreas se dá entre os ambientes de deposição e de erosão, refletindo a transição entre locais de baixa e alta energia.

O fundo erosional corresponde a 8 % da área do lago. Constitui um ambiente onde predominam

condições de erosão ou não deposição de sedimentos finos, por ação de ondas com velocidades orbitais superiores a 15 cm.s^{-1} ao longo de no mínimo 50% do tempo. Este ambiente se caracteriza por um fundo composto por areia, uma vez que os sedimentos finos são constantemente remobilizados e inseridos na coluna d'água. Nos períodos sem ondas incidentes, pode ocorrer deposição sobre este tipo de fundo, que volta a ser remobilizado pela turbulência subsequente.

2.5. Relação dos resultados com os pontos de captação de água para abastecimento humano em Porto Alegre

A questão da qualidade de água em bacias de captação possui relação direta com a concentração e distribuição de matéria em suspensão, já que boa parte da contaminação causada por compostos orgânicos e inorgânicos é transportada na água, preferencialmente junto ao material em suspensão. Desta forma, informações sobre ressuspensão e transporte de sedimentos são dados importantes para a definição de pontos de captação de água.

Após a obtenção dos dados relativos ao potencial de ressuspensão no Lago Guaíba, os mesmos foram cruzados com os pontos de coleta de água para abastecimento de Porto Alegre (Figs. 5 e 6) com objetivo de verificar a relação destes pontos com a dinâmica de transporte sedimentar de fundo. Os pontos de captação instalados em locais com alto potencial de ressuspensão, mesmo que por poucos dias do ano, não são recomendáveis, a não ser que amparados por um estudo consistente sobre correntes horizontais.

Os resultados desta análise são apresentados no quadro 1, o qual demonstra a relação entre os pontos de captação e o potencial de ressuspensão de sedimentos em seu contexto em quanto ambientes de sedimentação. Além disso, foram inseridas as principais características das estações de tratamento (ETA) para a qual a água captada é destinada.

Os pontos foram classificados em: Ruim (local não apropriado para captação de água), Razoável (local condicionado a estudos mais aprofundados para viabilidade de captação) e Boa (local apropriado para captação de água).

Após a obtenção dos dados relativos ao potencial de ressuspensão no Lago Guaíba, os mesmos foram cruzados com os pontos de coleta de água para abastecimento de Porto Alegre (Figs. 5 e

6) com objetivo de verificar a relação destes pontos com a dinâmica de transporte sedimentar de fundo. Os pontos de captação instalados em locais com alto potencial de ressuspensão, mesmo que por poucos dias do ano, não são recomendáveis, a não ser que amparados por um estudo consistente sobre correntes horizontais.

Os resultados desta análise são apresentados no quadro 1, o qual demonstra a relação entre os pontos de captação e o potencial de ressuspen-

são de sedimentos em seu contexto em quanto ambientes de sedimentação. Além disso, foram inseridas as principais características das estações de tratamento (ETA) para a qual a água captada é destinada.

Os pontos foram classificados em: Ruim (local não apropriado para captação de água), Razoável (local condicionado a estudos mais aprofundados para viabilidade de captação) e Boa (local apropriado para captação de água).

Quadro 1. Relação entre os pontos de coleta estudados, dados de ETA, tempo de ressuspensão dos sedimentos, ambientes de sedimentação e respectiva classificação em termos de captação de água no Lago Guaíba.

Pontos de Captação	Características da ETA	Percentual do tempo com potencial de ressuspensão de sedimentos	Ambientes de Sedimentação	Classificação
Menino Deus	Capacidade: 2.000 L/s População Atendida: 418 mil hab.	0,03 e 0,1%	Fundo Depositional	Boa
Tristeza	Capacidade: 200 L/s População Atendida: 49 mil hab.	< 0,1%	Fundo Depositional	Boa
Belém Novo A: Ponto de captação antigo Belém Novo B: Ponto de captação atual	Capacidade: 1.000 L/s População Atendida: 48 mil hab.	A: 10-40% B: < 0,1%	A: Fundo transicional B: Fundo deposicional	A: Ruim B: Boa
Lami	Capacidade: 20 L/s População Atendida: 1.150 hab.	10 – 40%	Fundo Erosional	Ruim

No que se refere aos parâmetros relacionados à dinâmica sedimentar do Lago Guaíba, a análise destas informações permite inferir um bom grau de coerência na localização das adutoras que fazem a captação de água para o abastecimento de Porto Alegre.

O ponto de captação Menino Deus é responsável por 33% da água distribuída na cidade, localizado aproximadamente a 70 m da margem do Guaíba, em um local com mais de 4 m de profundidade. Nesta área, a ação dos ventos tem alguma influência quando estes incidem de SW e W. Entretanto, estes ventos são insuficientes para gerar ondas com alturas superiores a 0,20 m, fato que indica um baixo potencial de ressuspensão de sedimentos. Também contribui para isto a morfologia do lago, que apresenta, a oeste deste ponto, um depósito de

sedimentos finos que reduz a energia das ondas incidentes.

O ponto de captação vinculado a ETA Tristeza, responsável por 3,5% do abastecimento, localiza-se a 500 m da margem do lago. Neste caso, as principais situações favoráveis à geração e propagação de ondas se referem à incidência de ventos de W e SW. Esta área caracteriza-se por ser um ambiente com duas situações distintas: baixa energia em áreas de maior profundidade e moderada energia em áreas mais rasas. Embora este ponto possa ser considerado apropriado, cabe a ressalva de que o mesmo encontra-se em uma área limítrofe entre dois ambientes (fundo deposicional e transicional), sendo aconselhável uma realocação do posicionamento da adutora em direção ao canal de navegação.

Já a ETA Belém Novo era abastecida por um ponto de captação localizado a 150 m da margem do lago. O mesmo foi deslocado 1,8 km no sentido do canal de navegação. A análise dos processos relacionados à dinâmica sedimentar, expostos no quadro 1, indica que esta medida foi acertada, uma vez que, nesse ponto, o potencial de ressuspensão de sedimentos ao longo do ano pode chegar a 40%. Este novo local de captação está inserido em outro contexto, uma vez que a maior profundidade deste local (4 m) faz com que, mesmo com incidência de ondas maiores que 0,40 m, as velocidades orbitais junto ao fundo sejam reduzidas, com potencial de tempo de ressuspensão de sedimentos de no máximo 2% ao ano.

Finalmente, a estação de captação do Lami abastecia uma população de 1.150 habitantes até o final de 2006, quando foi desativada pela Prefeitura. O local onde a água era captada encontra-se em uma porção do lago relativamente bem abrigada, onde as direções de proveniência de ventos são dos quadrantes S e SW, com alturas de ondas que podem atingir 0,45 m. O potencial de ressuspensão de sedimentos ao longo do ano pode chegar a 40%, configurando um ambiente de fundo erosional.

Sob o ponto de vista da ressuspensão de sedimentos, pode-se considerar correta a decisão de desativar essa estação de bombeamento de água bruta, uma vez que são consideráveis as probabilidades dos poluentes depositados junto aos sedimentos de fundo serem lançados na coluna d' água, em períodos de baixa energia.

3. Conclusões

Considerando que o conhecimento da hidrodinâmica e da morfologia de corpos d' água é pré-requisito básico para a gestão de bacias hidrográficas e que a ação de ondas na camada superficial do leito de lagos e lagoas pode desencadear a ressuspensão de sedimentos e a reintrodução de poluentes na coluna d' água, o presente trabalho analisou a dinâmica e ressuspensão por ondas no Lago Guaíba e suas implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano.

No caso do Lago Guaíba, o clima de ondas incidentes foi modelado para os anos de 1996 e 1997, permitindo a caracterização de seus principais parâmetros como altura significativa, direção de propagação, período médio e de pico e velocidade orbital. Com base nessas informações foram

gerados mapas de potencial de ressuspensão de sedimentos e ambientes de sedimentação no Guaíba.

Em linhas gerais, pode-se dizer que as ondas acompanharam os padrões de intensidade e direção do vento, atingindo os valores máximos aproximadamente entre 1 e 2 horas após os picos de velocidade dos mesmos. Nas situações onde os ventos sopraram com maior intensidade nas primeiras horas, as ondas levaram aproximadamente 2 horas para atingir 0,10 m. O crescimento das ondas se mostrou mais acentuado para ventos com velocidades acima de 7 m.s-1.

Características como a geometria e a geomorfologia do lago também se mostraram importantes, mais especificamente quando da presença de bancos arenosos, feição que age como dissipador de parte da energia das ondas, resultando em valores de H reduzidos, mesmo para situações de *fetch* significativo.

Pode-se dizer que as ondas incidentes no Guaíba têm potencial para gerar turbulência junto ao fundo em diferentes situações. Entretanto, a profundidade máxima não excede a 1,9 m, para ventos do quadrante S e velocidades mínimas de 11 m.s-1. Já a espessura da camada limite, onde se verifica o início do fluxo turbulento, apresenta valores bastante reduzidos, de até 1 cm.

Locais de baixa profundidade e com presença de areia fina a muito fina e silte podem apresentar excessiva turbulência, sendo que, em alguns locais, a turbulência ocupa toda a coluna d' água. Esta condição resulta em erosão dos sedimentos depositados no leito do Guaíba, geralmente a profundidades inferiores a 1,5 m. A situação de deposição do material transportado na coluna d' água ocorre quando da inexistência de fluxo turbulento ou quando o mesmo é insignificante junto ao fundo.

A sistematização de informações referentes à distribuição sedimentar, características das ondas incidentes, velocidade orbital, camada limite e início do fluxo turbulento, possibilitou a definição de três ambientes de sedimentação no lago Guaíba: 1) fundo deposicional; 2) fundo transicional e 3) fundo erosional ou de não deposição. Comparando-se as áreas ocupadas por cada um destes ambientes no âmbito do lago, pode-se afirmar que o Guaíba é um grande importador de sedimentos, pois a superfície de fundo com deposição é mais significativa que a superfície de fundo com erosão. Além disso, a erosão, governada pelos processos de ressuspensão, é restringida pelas ondulações de

pequena altura e baixa frequência.

O resultados discutidos neste trabalho têm relação direta com os padrões de sedimentação do Lago Guaíba, que constituem-se em um intrincado sistema onde causas e efeitos muitas vezes se sobrepõem. A batimetria, por exemplo, é fator fundamental para todo o sistema, já que é uma definidora dos padrões de ondas, mas ao mesmo tempo é definida, entre outras coisas, pela ação das ondas. Os ambientes de sedimentação identificados são a resultante desse processo, o que os torna uma fonte de subsídios para a gestão de ambientes lagunares como por exemplo, no que diz respeito à extração mineral, construção de terminais de navegação e, mais importante, a qualidade das águas.

Todo este arcabouço de informações técnicas apresenta relação direta com a qualidade da água que é captada para as estações de tratamento na região de Porto Alegre.

Estas análises permitiram inferir um bom grau de coerência na localização das adutoras que fazem a captação de água para o abastecimento. Os únicos locais classificados como ruins para captação foram o antigo ponto de Belém Novo e o ponto do Lami.

Coincidentemente, estes dois pontos já foram desativados pelo DMAE. O antigo ponto de Belém Novo (localizado a 150 m da margem) foi realocado 1,8 km em direção ao canal de navegação e atualmente abastece também a população do bairro Lami.

Por sua vez, o atual local de captação está inserido em outro contexto. A maior profundidade deste local, com 4 m, faz com que, mesmo sob incidência de ondas maiores que 0,40m, as velocidades orbitais junto ao fundo sejam insignificantes.

A desativação e alteração destes pontos de captação de água bruta podem ser consideradas como ações positivas tomadas por parte do poder público, pois potencialmente reduziram a carga de poluentes direcionadas às estações de tratamento, contribuindo assim para a efetividade do sistema de abastecimento da região de Porto Alegre.

Os resultados do presente trabalho servem ainda como subsídio a outros estudos que necessitem considerar a dinâmica das ondas incidentes no lago e suas consequências na distribuição sedimentar e nos fluxos energéticos associados a este corpo d'água.

Referências

- Bachi, F. A., Barboza, E. G. & Toldo Jr. E.E. 2000. Estudo da sedimentação do Guaíba. *Ecos*, 17: 32-35.
- Bendati, M. M., Staurk, J. & Soares. P.R. 1998. Água potável e esgotamento sanitário. O ciclo urbano da água. In: Menegat, R., Porto, M.L., Carraro, C.C., Fernandes, L.A.D.(Eds) *Atlas Ambiental de Porto Alegre*, Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p 177-184
- Bhowmik, N.G. & Stall, J.B. 1978. Circulation patterns in the Fox chain of lakes in Illinois. *Water Resources*, 14: 633-642.
- Burrows, R. & Hedges, T.S. 1985. The Influence of Currents on Ocean Wave Climates. *Coastal Engineering*, 9: 247-260.
- Camargo, O.A. 2002. *Atlas Eólico: Rio Grande do Sul. 2002*. Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre: SEMC, 70 p.
- Casalas, A. & Cybis, L.F. 1985. Modelo matemático de circulação e de qualidade das águas do estuário do Rio Guaíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 6., 1985, São Paulo. *Anais...* São Paulo, ABRH, v 1., p 419-432.
- Castelão, R.M. & Möller Jr, O.O. 2003. Sobre a Circulação Tridimensional forçada por Ventos na Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 25(2): 91-106.
- CECO. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica. 1999. *Projeto Sedimentação do Complexo Guaíba. Convênio CECO/IG/UFRGS - DVP/DEMAE*. Porto Alegre. 17 p.
- Collins, J.I. 1972. Prediction of shallow water spectra. *Journal of Geophysical Research*, 77 (15), 2693 – 2707.
- Coussirat de Araújo, L. 1930. *Memória sobre o clima do Rio Grande do Sul*. Diretoria de meteorologia. Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio. Rio de Janeiro. 38p.
- Cunha, R. 1971. *O Estuário do Guaíba: características texturais, mineralógicas e morfológicas*. Porto Alegre, RS. 51p. Dissertação de Mestrado em Geociências. Programa de Pos-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- DNAEE. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. 1983. *Mecânica de Correntes do Guaíba. Relatório Síntese* Ministério das Minas e Energia.
- Gorman, R.M., Neilson, C.G.. 1999. Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary. *Coastal Engineering*, 36: 197-217.

- Gruber, N.L.S. & Nicolodi, J.L. 1998. Delimitação da Antepraia (shoreface) na Plataforma Continental de Tramandaí - RS, com base na batimetria e distribuição sedimentar. *In: SEMANA NACIONAL DE OCEANOGRAFIA*, 11., Rio Grande. *Anais...* Rio Grande, Fundação Universidade de Rio Grande, v. 1., p. 448-451.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., & others. 1973. *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Deutsche Hydrography Supplement, 8 (A): 12.
- Holthuijsen, L.H. 2000. *SWAN - User manual*. Delft, USA. Department of Civil Engineering, Delft University of Technology. 124p.
- Hsu, T.W., Ou, S.H. & Liau, J.M. 2005. Hindcasting nearshore wind waves using a FEM code for SWAN, *Coastal Engineering*, 52: 177-195.
- Innocentini, V. 2001. Modelo de ondas aplicado ao caso 5-8 de maio de 2001. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 16(1): 10-34. Disponível em <http://www.lamma.ufrj.br/spo/teses.htm>
- Irgang, G.V., Nicolodi, J.L., Hasenack, H. & Weber, E.J. 1997. Elaboração de um Modelo Altimétrico Digital para o Município de Porto Alegre. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA*, 8, 1997. Curitiba. *Anais...* Curitiba, 1 CD-ROM.
- Jin, K.R. & Ji, Z.G., 2001. Calibration and verification of a spectral wind - wave model for Lake Okeechobee. *Ocean Engineering*, 28: 571-584.
- Laybauer, L. & Bidone, E.D. 2001. Caracterização Textural dos Sedimentos de fundo do Lago Guaíba e sua importância em Diagnósticos Ambientais. *Pesquisas em Geociências*, 28: 13-26.
- Lin, W., Sanford, L.P., Alleva, B.J. & Schwab, D.J. 1998. Surface wind wave modeling in Chesapeake Bay. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN WAVE MEASUREMENT AND ANALYSIS*, 3, 1998, Virginia. *Anais...* Virginia, v.1, p. 1048-1062.
- Livi, P. 1998. Elementos do clima: o contraste dos tempos frios e quentes. *In: Menegat, R., Porto, M.L., Carraro, C.C., Fernandes, L.A.D.* (Eds) *Atlas Ambiental de Porto Alegre*, Porto Alegre. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. p. 177-184.
- Madsen, O.S., Poon, Y.K. & Graber, H.C. 1998. Spectral wave attenuation by bottom friction: theory. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING*, 21, 1998, New York. *Anais... New York, ACE*, v.1, p. 492-504.
- Martin, J.L. & McCutcheon, S.C. 1999. *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. Ed. Lewis, 794p.
- Martins, I.R., Villwock, J.L., Martins, L.R. & Bemvenuti, C.E. 1989. The Lagoa dos Patos Estuarine Ecosystem (RS, Brazil). *Pesquisas em Geociências*, 22: 5-44.
- Moller, O.O., Castaing, P., Salomon, J-C. & Lazure, P. (2001). The influence of local and non local forcing effects on the subtidal circulation of Patos Lagoon. *Estuaries*. 24(2): 275-289.
- Moreno, J.A. 1961. *Clima do Rio Grande do Sul*. Diretoria de Terras e Colonização. Secretaria da Agricultura. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 64p.
- Nicolodi, J.L. 2002. *A Morfodinâmica Praial como Subsídio ao Gerenciamento Costeiro. O Caso da Praia de Fora - Parque Estadual de Itapuã, RS*. Porto Alegre, 138p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Nicolodi, J.L. & Toldo Jr., E. 2003. Beach Morphodynamics: A Tool for Coastal Habitat Managers. A Case Study: Praia de Fora, Itapuã State Park, RS. *Natureza & Conservação*, 1: 66-75.
- Nicolodi, J.L. 2007. *O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação*. Porto Alegre, 179p. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Nunes, P.L. 2002. *O modelo SWAN como ferramenta na análise e previsão de ondas*. 46p. Monografia de Conclusão. Departamento de Oceanografia, Instituto de Geociências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.
- Ou, S.H., Liau, J.M., Hsu, T.W. & Tzang, S.Y., 2002. Simulating typhoon waves by SWAN wave Model in coastal waters of Taiwan. *Ocean Engineerin*, 29: 947-971.
- Plan, N.G., Holland, K.T. & Puleo, J., 2002. A. Analysis of the scale of errors in nearshore bathymetric data. *Marine Geology*, 191: 71-86.
- Pires-Silva, A.A., Makarynsky, O., Monbaliu, J., Ventura-Soares, C. & Coelho, E. 2002. *Wam/Swan Simulations in an Open Coast: Comparisons with ADCP Measurements*. Littoral, The Changing Coast. EUROCOAST/EUCC, Porto Portugal Ed. EUROCOAST - Portugal.
- Ris, R.C., Booij, N. & Holthuijsen, L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions. Part II: Verification. *Journal of Geographic Research*, 104 (C4): 7667-7682.
- Rogers, W.E., Hwang, P.A. & Wang, D.W. 2003. Investigation of wave growth and decay in the SWAN model: three regional-scale applications. *Journal of Physical Oceanography*, 33: 366-389.
- Rusu, E., Ventura Soares, C., Pires Silva, A. Pinto, J.P. &

- Makarynskyy, O. 2002. *Near Real Time Assessment of the Wave Propagation in the Coastal Environment of Portugal*. Littoral 2002, The Changing Coast. EUROCOAST / EUCC, Porto - Portugal Ed. EUROCOAST - Portugal.
- Shan-Hwei, O., Jian-Ming L., Hsu, T.W. & Shiao-Yih T. 2002. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan. *Ocean Engineering*, 29: 947-971.
- Toldo Jr., E.E. 1994. *Sedimentação, predição do padrão de ondas e dinâmica sedimentar da antepraia e zona de surfe do sistema lagunas da Lagoa dos Patos, RS*. Porto Alegre. 178 p. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Toldo Jr., E.E., Dillenburg, S.R., Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. 2000. Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 16(3): 816-822.
- Tolman, H.L. 1997. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.15*. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 151, 97 pp.
- Tolman, H.L. 1999. *User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18*. NOAA / NWS / NCEP / OMB Technical Note 166, 110 pp.
- Weber, E.J. 1995. *Uso de sistemas de informação geográfica como subsídio ao planejamento em áreas agrícolas: um caso no planalto do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. 75 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Wood, D.J., Muttray, M. & Oumeraci, H., 2001. The SWAN model used to study wave evolution in a flume. *Ocean Engineering*, 28: 805-823.
- Zijlema, M. & van der Westhuysen, A.J. 2005. On convergence behaviour and numerical accuracy in stationary SWAN simulations of nearshore wind wave spectra. *Coastal Engineering*, 52: 237-256.