MODELAGEM COMPUTACIONAL DOS CAMPOS DE FETCH E PROFUNDIDADE DE MISTURA NO LAGO GEORGE, FLÓRIDA, EUA

Giovana da Silva de Moraes e Kathlein Aparecida Alves Bernardo (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Marcelo Marques (Orientador), Marcelo Rosolem Luchetti, Teodósio das Neves Milisse Nzualo. E-mail: mmarques@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Meio Ambiente, Campus Regional de Umuarama

Área e subárea do conhecimento: Engenharias / Engenharia Sanitária e Recursos Hídricos

Palavras-chave: Pistas de vento; JONSWAP; ONDACAD

RESUMO

A ação do vento sobre lagos e reservatórios gera ondas capazes de promover mistura vertical da coluna d'água e, em condições suficientemente energéticas, interação com o fundo e ressuspensão de sedimentos. Este trabalho teve como objetivo analisar os campos de fetch e a profundidade de mistura no Lago George, Flórida, EUA, para diferentes direções e velocidades do vento, identificando as condições de maior potencial de mistura. A geometria da superfície livre do lago foi representada no software ONDACAD, sendo os campos de fetch determinados para 16 direções pelo método de Saville. A partir desses campos, foram realizadas simulações pelo modelo paramétrico bidimensional, associado ao espectro JONSWAP, considerando ventos estacionários de 5, 10, 15 e 20 m s^{-1}, totalizando 64 cenários. Os valores máximos de fetch variaram entre 11,1 km, na direção ENE, e 14,1 km, na direção S. As profundidades máximas de mistura variaram de 3,5–3,9 m para ventos de 5 m s^{-1}, 8,0–8,8 m para 10 m s^{-1}, 12,4–13,9 m para 15 m s^{-1} e 16,9–18,9 m para 20 m s^{-1}. Os maiores valores estiveram associados principalmente ao eixo Norte–Sul, enquanto ENE apresentou as menores respostas. Considerando o caráter raso do Lago George, com profundidade média inferior a 5 m, os resultados indicam elevado potencial de mistura completa da coluna d'água e de interação das ondas com o fundo sob ventos mais intensos. Conclui-se que a intensidade do vento e a geometria do lago controlam conjuntamente sua resposta hidrodinâmica, e que a metodologia empregada constitui ferramenta útil para identificar áreas suscetíveis à desestratificação térmica e à ressuspensão de sedimentos.

INTRODUÇÃO

A ação do vento sobre lagos e reservatórios gera ondas e turbulência, controlando processos de mistura vertical e influenciando a dinâmica física e ecológica da coluna d'água. A intensidade dessas ondas depende da velocidade do vento e do fetch,

definido como a extensão da superfície livre sobre a qual o vento atua. Em condições de pista limitada, o espectro JONSWAP permite estimar as características das ondas a partir dessas variáveis. A profundidade de mistura pode ser estimada por ($z<L/2$), sendo L o comprimento de onda, representando a profundidade até a qual sua influência se torna significativa. Quando essa influência alcança regiões profundas, pode favorecer a desestratificação térmica e, ao atingir o fundo, contribuir para a ressuspensão de sedimentos, com implicações sobre turbidez, nutrientes e qualidade da água. A análise espacial desses processos pode ser realizada pelo modelo paramétrico bidimensional implementado no software ONDACAD, que transforma campos de fetch em campos associados às ondas e à profundidade de mistura. Assim, este trabalho objetiva analisar os campos de fetch e a profundidade de mistura no Lago George, Flórida, EUA, para diferentes direções e velocidades do vento, identificando as condições de maior potencial de mistura da coluna d'água.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido para o Lago George, localizado no nordeste da Flórida, Estados Unidos, e integrado ao sistema do rio St. Johns. Trata-se de um lago natural de grande extensão superficial, com aproximadamente 46.000 acres, predominantemente raso, condição que favorece a influência das ondas geradas pelo vento sobre a coluna d'água e o fundo. A geometria da superfície livre do lago foi representada no software ONDACAD, no qual foram determinados campos de fetch para as 16 direções.

Os comprimentos efetivos de fetch foram calculados pelo método de Saville, que considera, para cada ponto da superfície, as distâncias até as margens dentro de um setor de ±45° em relação à direção principal do vento, atribuindo menor contribuição às direções progressivamente afastadas do eixo principal. No ONDACAD, o procedimento foi aplicado em alta resolução angular, com radiais espaçadas em 1°, permitindo gerar uma representação bidimensional contínua da exposição da superfície do lago ao vento para cada direção analisada. Essa abordagem amplia espacialmente o conceito convencional de fetch, produzindo campos distribuídos sobre toda a superfície livre.

Os campos de fetch constituíram a base geométrica para as simulações pelo modelo paramétrico bidimensional (MPB), procedimento que permite transformar a distribuição espacial do fetch em campos associados às ondas. Essa concepção é compatível com a metodologia anteriormente empregada no ONDACAD para obtenção de campos de profundidade de mistura. Foram aplicados campos de vento estacionários com velocidades de 5, 10, 15 e 20 m s^{-1} para cada uma das 16 direções consideradas. Dessa combinação resultaram 64 cenários de simulação (16 direções × 4 velocidades), a partir dos quais foram obtidos os campos de ondas e calculadas as respectivas profundidades de mistura, possibilitando avaliar a variabilidade espacial da resposta hidrodinâmica do Lago George sob diferentes condições de vento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os campos de fetch evidenciaram variação espacial associada à geometria do Lago George, com valores máximos entre 11,1 km (ENE) e 14,1 km (S). A Tabela 1 integra os valores máximos de fetch e as respectivas profundidades de mistura obtidas para as quatro velocidades de vento simuladas.

Para ventos de 5 m/s, as profundidades de mistura permaneceram relativamente rasas e espacialmente homogêneas, variando apenas entre 3,5 m, em ENE, e 3,9 m, observados em diferentes direções. A pequena amplitude, de apenas 0,4 m, indica que sob ventos de baixa intensidade a influência da geometria do lago e das diferenças de fetch sobre a profundidade de mistura ainda é limitada.

Com o aumento da velocidade do vento, entretanto, a resposta hidrodinâmica torna-se progressivamente mais intensa e a assimetria espacial mais evidente. Para 10 m/s, a profundidade de mistura varia de 8,0 m em ENE a 8,8 m em S, valor máximo também alcançado nas direções N e NNE. Com 15 m/s, o intervalo aumenta para 12,4 m em ENE a 13,9 m em S. Nas condições mais severas, com ventos de 20 m/s, são estimadas profundidades entre 16,9 m em ENE e 18,9 m em S, sendo este último valor também observado em NNE.

Tabela 1 – Fetch máximo e profundidade de mistura máxima no Lago George para diferentes direções e velocidades do vento

U (m/s)	Direção	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW
	Fetch máx (km)	12,6	11,1	12,0	14,0	13,9	13,7	13,7	13,4
5	Profundidade de Mistura	3,7	3,5	3,7	3,9	3,9	3,8	3,8	3,8
10		8,4	8,0	8,2	8,8	8,8	8,7	8,7	8,6
15		13,2	12,4	12,9	13,8	13,8	13,7	13,7	13,5
20		18,0	16,9	17,6	18,9	18,8	18,7	18,7	18,5

U (m/s)	Direção	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE
	Fetch máx (km)	12,3	12,3	12,1	13,4	14,1	13,7	13,5	13,8
5	Profundidade de Mistura	3,7	3,7	3,7	3,8	3,9	3,8	3,8	3,9
10		8,3	8,3	8,3	8,6	8,8	8,7	8,7	8,7
15		13,0	13,0	12,9	13,6	13,9	13,7	13,6	13,7
20		17,7	17,8	17,6	18,5	18,9	18,7	18,5	18,7

Esse comportamento demonstra a relação entre a extensão da pista disponível para geração das ondas e a penetração teórica de sua influência na coluna d'água.

A direção Sul apresentou o maior fetch do lago, 14,1 km, e as maiores profundidades de mistura para 15 e 20 m/s, caracterizando o eixo longitudinal aproximadamente Norte–Sul como a região de maior exposição à ação do vento. Em sentido oposto, ENE apresentou simultaneamente o menor fetch (11,1 km) e as menores profundidades de mistura em todas as velocidades analisadas, reforçando a influência da geometria da superfície livre sobre a resposta hidrodinâmica.

Do ponto de vista ecológico, esses resultados são particularmente relevantes devido ao caráter raso do Lago George, cuja profundidade média física é inferior a 5 m.

Assim, as profundidades teóricas de mistura calculadas para ventos de 15 e 20 m/s, superiores a 12 m em todas as direções, excedem amplamente a coluna d'água disponível, indicando condições com elevado potencial para mistura completa e desestratificação térmica. Nessas situações, o movimento orbital associado às ondas pode alcançar o fundo, favorecendo a geração de tensões capazes de promover a ressuspensão de sedimentos finos, com possíveis efeitos sobre turbidez, nutrientes e qualidade da água. Essa interpretação é consistente com estudos anteriores que relacionam profundidades de mistura superiores à profundidade do corpo hídrico à desestratificação e à possibilidade de interação das ondas com os sedimentos de fundo.

Portanto, os resultados indicam que a vulnerabilidade hidrodinâmica do Lago George é controlada conjuntamente pela intensidade do vento e pela orientação geométrica do lago, destacando-se o eixo Norte–Sul e, particularmente, a direção Sul, na qual ocorre o maior fetch e uma das maiores respostas de mistura simuladas.

CONCLUSÕES

O acoplamento entre o ONDACAD, o espectro JONSWAP e o modelo paramétrico bidimensional MARQUES mostrou-se consistente e eficaz para representar a influência conjunta da geometria do lago, do fetch e da intensidade do vento sobre a geração de ondas e a profundidade de mistura. A metodologia permite transformar campos de fetch em informações espacialmente distribuídas sobre a resposta hidrodinâmica do corpo hídrico, conforme a abordagem implementada no ONDACAD.

No Lago George, os resultados evidenciaram elevado potencial de mistura da coluna d'água, especialmente sob ventos mais intensos e ao longo do eixo Norte–Sul. Dessa forma, o acoplamento ONDACAD–JONSWAP–MARQUES apresenta potencial como ferramenta de apoio ao monitoramento e à gestão de sistemas de águas interiores, permitindo identificar áreas mais vulneráveis à desestratificação térmica e à ressuspensão de sedimentos e contribuindo para decisões relacionadas à qualidade da água e ao manejo ecológico.

AGRADECIMENTOS

À UEM, ao CNPq e à Fundação Araucária, pelo apoio institucional e ao desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

HASSELMANN, K. et al. **Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)**. Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A (8°), n. 12, p. 1-95, 1973.

MARQUES, M. **Modelagem paramétrica bidimensional para simulação de ondas em águas continentais.** 2013. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.