



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

DETERMINAÇÃO DA INTENSIDADE E DA DIREÇÃO DOS VENTOS PREDOMINANTES INCIDENTES NO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE ILHA SOLTEIRA

Jorge Eliécer Ibarra Hernández¹ ; Liliane Lazzari Albertin¹ & Milton Dall'Aglio Sobrinho¹

RESUMO – Muitos reservatórios brasileiros utilizados para geração de energia e outras finalidades sofrem o processo de erosão em suas margens e as consequências causadas por ela. As ondas formadas nas águas do reservatório devido à ação dos ventos incidentes podem ser um dos principais fatores que impulsionam o processo erosivo. Por esta razão, é imprescindível o conhecimento das intensidades do vento e a sua frequência de ocorrência. Neste artigo, foram calculadas as intensidades do vento com uma frequência de ocorrência igualada ou superada em 75% do tempo da série histórica de dados considerada, atendendo a hipótese de que são mais representativas no processo erosivo as ondas produzidas por ventos com intensidades com maior frequência de ocorrência do que as produzidas por ventos máximos que poderiam não ser muito frequentes. Com estes valores de intensidades do vento podem ser simuladas as ondas geradas no lago, para se estudar como elas interferem no processo erosivo.

ABSTRACT– Many Brazilian reservoirs used for power generation and other purposes undergo the process of erosion on its banks and the consequences caused by it. The waves formed in the waters of the reservoir due to the action of winds incidents can be one of the main factors driving the erosion process. For this reason, it is imperative to know the intensity of the wind and its frequency of occurrence. In this article, we calculated the intensity of the wind with a frequency equaled or exceeded in 75% of the time in the time series data considered occurrence, given the hypothesis that are more representative of the erosion produced by wind waves with intensities more frequently to occur than those produced by maximum winds that could not be very frequent. With these values of intensities can be simulated wind-generated waves on the lake, to study how they affect the erosion process.

Palavras-Chave – Erosão de margens, Curva de permanência, Frequência de ocorrência.

1) Univ. Estadual Paulista, Avenida Brasil, 56, Centro, CEP: 15385-000, Ilha Solteira, SP, (18) 3743-1204, jorge.ibarrah@gmail.com, liliane@dec.feis.unesp.br, milton@dec.feis.unesp.br

INTRODUÇÃO

A extensão das margens dos reservatórios naturais e artificiais brasileiros é superior à de sua costa oceânica. Segundo dados da Agência Nacional de Águas (2005), só os 10 principais reservatórios nacionais destinados ao aproveitamento turístico somam mais de 22.000 km de margens, superior aos 9.200 km de costa brasileira.

Siqueira e Azevedo (2011) afirmam que a erosão em margens de reservatórios é um tema recentemente estudado no Brasil. Em consequência das políticas nacionais de meio ambiente, o tema tem se desenvolvido de forma positiva e promissora no país.

Com a mesma opinião, Marques e Guetter (2011b) asseguram que se verifica no Brasil o aumento das atenções voltadas para os reservatórios artificiais, talvez pelo aumento das exigências ambientais para implantação de usinas hidrelétricas (UHEs), estimulando pesquisas orientadas à quantificação dos fatores intervenientes neste meio.

Como referência de estudos já realizados sobre o tema, destaca-se Fendrich (1988). Nesse estudo ele calculou as alturas de ondas a partir de dados de ventos máximos incidentes sobre o reservatório de Itaipu, para identificar pontos passíveis de erosão em suas margens.

No reservatório da UHE de Ilha Solteira são desenvolvidos estudos de monitoramento dos ventos e da geração de ondas. O primeiro deles foi concebido em 1999 pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, chamado Projeto ONDISA, com o objetivo de fornecer informações aos comboios de barcas para apoio e segurança da navegação.

Além desse, Lima et al. (2003) estimaram as máximas alturas de ondas geradas pelos ventos máximos no reservatório de Ilha Solteira com o objetivo de fornecer subsídios para investigações do potencial energético das ondas e as consequências que estas poderiam vir a causar na navegação e nas margens expostas à sua atuação. Maciel e Moraes (2008), em sua pesquisa, utilizaram o valor do vento com maior intensidade registrado em 2003 para estudar como reagem as ondas produzidas por este vento com a vegetação aquática presente nas margens do reservatório de Ilha Solteira.

Os trabalhos destacados foram realizados a partir de dados de intensidades máximas de ventos incidentes em reservatórios. O objetivo deste artigo é apresentar uma metodologia para a determinação de intensidades de ventos com maior frequência de ocorrência, supondo-se que as ondas produzidas por ventos máximos não são tão frequentes e, portanto, não são tão representativas no processo erosivo em comparação com aquelas que ocorrem com uma frequência maior.

As informações deste artigo podem ser utilizadas para se estimar as alturas das ondas e verificar sua influência no processo erosivo do reservatório de Ilha Solteira e servir como orientação para outros reservatórios.

METODOLOGIA

O reservatório de Ilha Solteira se localiza ao noroeste do Estado de São Paulo, na bacia do rio Paraná, entre os estados de São Paulo, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. Seus maiores tributários são os rios Paranaíba e Grande, formadores do rio Paraná. Sua barragem se localiza entre os municípios de Ilha Solteira (Estado de São Paulo) e Selvíria (Estado do Mato Grosso do Sul). A localização do reservatório pode ser visualizada na Figura 1

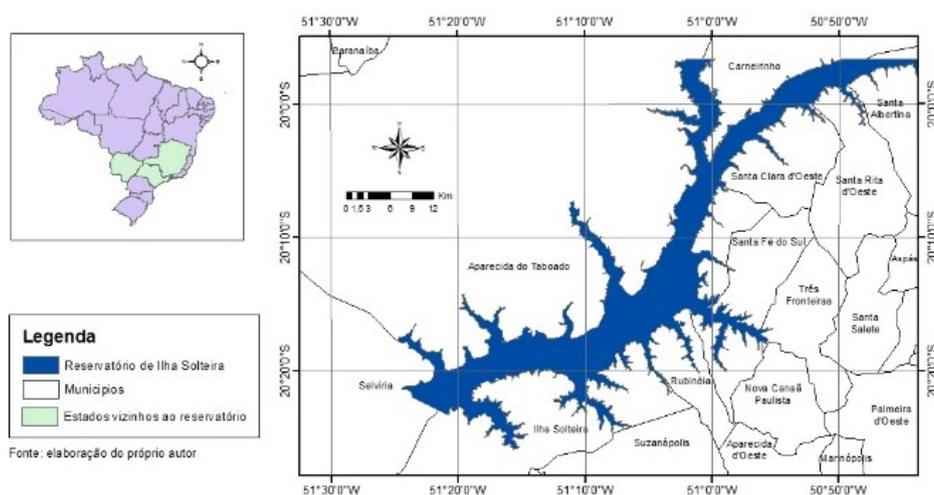


Figura 1 – Localização do Reservatório de Ilha Solteira

Este estudo se baseou em uma série histórica de 14 anos de dados de ventos registrados durante os anos de 1977 a 1990, disponibilizada em formato digital pela Companhia Energética de São Paulo (CESP) para a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Ilha Solteira. Estes dados foram registrados na estação meteorológica de Ilha Solteira que era operada pela CESP, nas vizinhanças do canteiro de obras da construção da usina, a jusante da barragem, situada a 326,00 m de altitude, nas coordenadas: Latitude $20^{\circ} 25' 23,5''$ S e Longitude $51^{\circ} 21' 12,6''$ W.

Os dados disponíveis para as oito principais direções do vento são a direção predominante do vento diário, em (%), e a velocidade média diária, em (m/s), medidos a uma elevação de 6 m.

A metodologia aplicada nesta pesquisa consistiu em estimar a direção com maior frequência de ocorrência e em estimar a intensidade do vento com uma frequência de ocorrência que fora igualada ou superada em 75% do tempo na série histórica de dados considerada.

Não foi considerada a velocidade máxima do vento, partindo da hipótese que são mais representativas no processo erosivo as ondas produzidas por ventos com intensidades com maior frequência de ocorrência do que as produzidas por ventos máximos, que poderiam não ser muito frequentes. A probabilidade de ocorrência considerada foi a frequência observada.

Para estimar a direção com maior frequência de ocorrência foram realizadas duas análises. A primeira análise consistiu em calcular as médias mensais da direção predominante do vento diário de

toda a série de dados, agrupando os valores médios dos meses iguais e tirando a média destes valores (média de longo termo), para depois calcular a média trimestral, a fim de analisar o comportamento sazonal. A segunda análise tratou-se em calcular a média para cada uma das direções, através dos valores médios mensais de toda a série de dados, com o propósito de avaliar a distribuição percentual de ocorrência do vento de toda a campanha de medição.

Para estimar a intensidade do vento com uma frequência de ocorrência igualada ou superada em 75% do tempo foram arranjos os dados das intensidades médias diárias de cada uma das direções em distribuições de frequência e foram elaborados histogramas e curvas de permanência para cada uma das direções. De acordo com Naghettini e Pinto (2007), a curva de permanência representa a porcentagem de um intervalo de tempo específico em que o valor da variável foi igualado ou superado. A variável analisada, no caso a velocidade do vento, em (m/s), é indicada no eixo das ordenadas, e a porcentagem é indicada no eixo das abscissas. A curva de permanência é muito usada para ilustrar o padrão de variação da variável analisada.

Assim, destas curvas foram extraídos os valores das intensidades do vento que são igualados ou superados em 75% do tempo. Ou seja, estes valores representam uma intensidade do vento que acontece pelo menos em três quartos de tempo da série de dados considerada.

Para que estes valores de intensidades do vento sejam utilizados para a previsão de ondas, de acordo com o estabelecido pelo U.S. Army Coastal Engineering Research Center (1983), foram feitas as correções devido aos efeitos de elevação, localização, estabilidade térmica, velocidade média e coeficiente de arraste.

Na correção das intensidades do vento devido à elevação, a bibliografia diz que se os ventos são medidos a uma elevação diferente de 10 m, as velocidades devem ser ajustadas para a altura de medição padrão. Como neste caso os valores de velocidade do vento foram medidos a uma elevação de 6 m, de acordo com as características da estação meteorológica, se procedeu ao desenvolvimento da equação (1).

$$U_{(10)} = U_{(z)} \left(\frac{10}{z} \right)^{1/7} \quad (1)$$

Onde:

z: é a elevação em que está sendo realizada a medição (m); e

U: é a intensidade do vento igualada ou superada em 75% do tempo de cada uma das direções (m/s).

Através do procedimento anterior foi obtida a correção das intensidades devido à elevação para cada uma das direções do vento.

Na correção das intensidades do vento devido à localização, é considerada a localização do equipamento de medição. Se ele for localizado próximo à costa, os ventos que sopram da água em

direção à terra não necessitam de ajuste, ou seja, adota-se $RL = 1,0$. Como a estação meteorológica se encontra aproximadamente 3 km a jusante da barragem, todas as direções sofreram correção. Assim, de acordo com o diagrama da Figura 2, foram estimados os coeficientes RL , que posteriormente foram multiplicados pelas intensidades do vento anteriormente calculadas, conseguindo-se, desta maneira, a correção devido à localização.

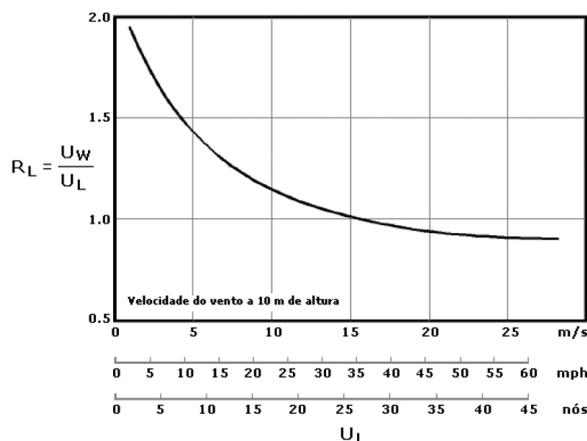


Figura 2 – Fator de correção devido à localização em terra do ponto de medição
 Fonte: U.S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (1983)

Com relação à correção devido à estabilidade térmica, como não se dispõe de dados para esta estimativa, se considerou a recomendação do método para este caso, adotando-se $RT = 1,1$. Portanto, a correção devido à estabilidade térmica resultou em multiplicar o coeficiente de correção $RT = 1,1$ pelos valores das intensidades de cada uma das direções previamente calculadas.

A correção por velocidade média no tempo não se fez necessária, já que os dados de vento considerados são os valores médios e não os máximos. Portanto, o coeficiente RU possui valor unitário.

Para a correção do coeficiente de arraste foi desenvolvida a equação (2), onde U é a intensidade do vento igualada ou superada em 75% do tempo de cada uma das direções (m/s).

$$U_A = 0,71 U^{1,23} \quad (2)$$

Finalmente, para se encontrar a intensidade do vento corrigida em cada uma das direções, foi calculada a média entre as cinco correções estimadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como mencionado anteriormente, para a estimativa da direção do vento com maior frequência de ocorrência foram realizadas duas análises. A primeira para se observar o comportamento sazonal da série de dados e a segunda para se avaliar a distribuição percentual de ocorrência do vento de toda a campanha de medição.

Na Tabela 1 são apresentadas as frequências médias mensais de toda a série de dados e seu valor médio para cada uma das direções do vento consideradas.

A partir destes dados foram calculadas as médias trimestrais, que são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1 – Frequências mensais em (%) no período 1977 a 1990

Mês	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calmo
Jan.	13,1	22,8	13,7	13,2	5,5	7,9	7,2	12,1	3,2
Fev.	9,9	22,3	18,9	11,1	6,0	10,2	6,6	8,7	4,2
Mar.	7,5	21,5	21,0	15,0	6,4	10,7	5,9	6,7	5,0
Abr.	5,6	20,5	23,4	18,3	7,9	9,3	4,0	4,5	4,9
Mai.	6,0	20,1	23,5	14,8	8,5	10,4	3,1	4,0	5,7
Jun.	6,5	22,5	24,3	12,9	7,4	11,3	2,2	3,2	5,6
Jul.	8,0	24,9	25,3	13,0	6,0	10,5	2,1	3,8	5,1
Ago.	5,2	23,2	24,8	14,4	5,0	13,3	2,8	3,1	4,2
Set.	5,5	18,8	22,6	19,6	7,9	14,8	2,9	4,1	3,5
Out.	6,7	19,1	19,7	16,6	7,7	14,0	4,8	7,0	4,6
Nov.	9,7	23,0	16,6	13,2	6,2	11,6	5,5	9,4	4,1
Dez.	12,8	22,3	13,3	12,2	5,3	8,3	6,0	12,1	3,3
Média	8,0	21,7	20,6	14,5	6,6	11,0	4,4	6,6	4,4

Tabela 2 – Média trimestral dos valores da frequência em (%)

Mês	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Calmo
Jan.	10,2	22,2	17,8	13,1	6,0	9,6	6,5	9,2	4,2
Fev.									
Mar.									
Abr.	6,1	21,0	23,7	15,3	8,0	10,3	3,1	3,9	5,4
Mai.									
Jun.									
Jul.	6,2	22,3	24,2	15,7	6,3	12,9	2,6	3,7	4,3
Ago.									
Set.									
Out.	9,7	21,5	16,5	14,0	6,4	11,3	5,4	9,5	4,0
Nov.									
Dez.									

A Figura 3 exibe o padrão da distribuição média da ocorrência de ventos em toda a campanha de medição, assim como a sua distribuição trimestral, podendo-se, a partir dela, examinar a sazonalidade do padrão de ocorrência de ventos.

Da Figura 3 é possível notar que tanto na média mensal quanto na média trimestral dos dados, existe uma predominância dos ventos nas direções NE e E, seguido pela direção SE. Na média trimestral, apresenta-se um incremento de aproximadamente 16% na direção E nos meses de abril-maio-junho e julho-agosto-setembro, e um pequeno aumento nas direções NE e NW entre os meses de outubro a março.

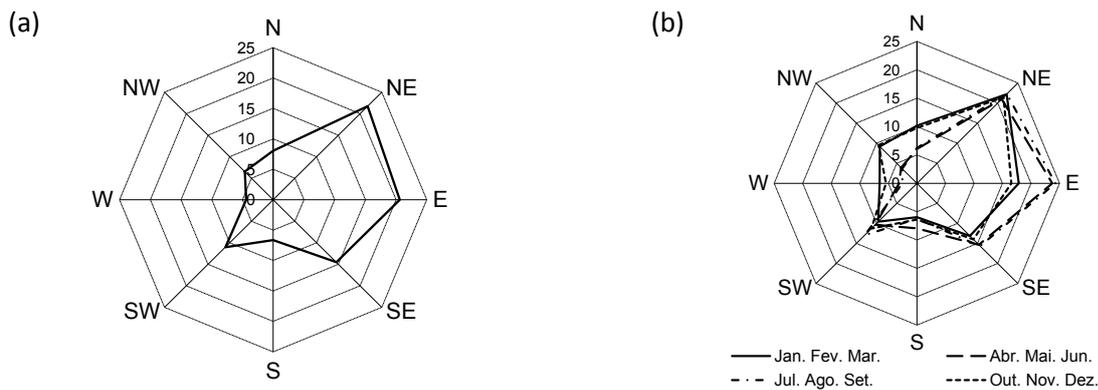


Figura 3 – Distribuição percentual de ventos: a) média mensal; b) média trimestral. Estação Ilha Solteira – CESP, período 1977-1990.

Nas Figura 4 a 11 são apresentadas as distribuições das velocidades médias do vento para cada uma das direções consideradas, representadas nos histogramas resultantes da análise estatística realizada. As curvas de permanência são apresentadas nas Figuras 12 a 15.

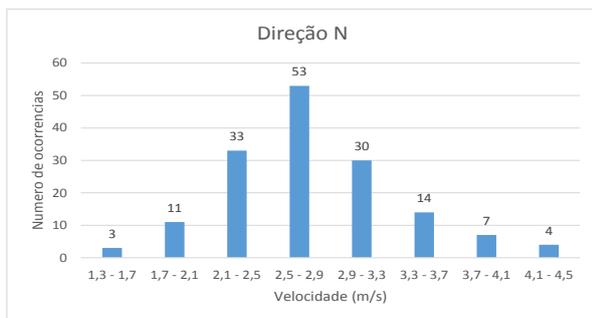


Figura 4 – Histograma das velocidades médias observadas Direção N

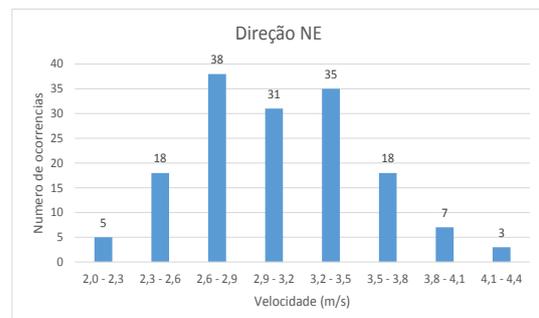


Figura 5 – Histograma das velocidades médias observadas Direção NE

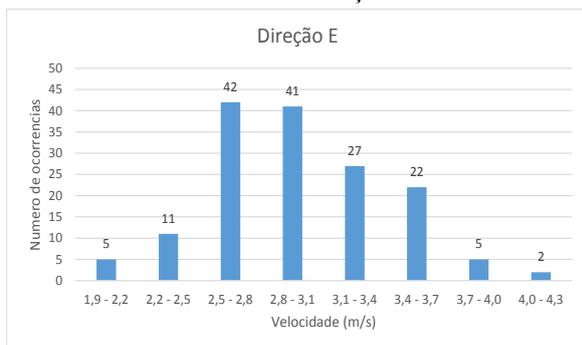


Figura 6 – Histograma das velocidades médias observadas Direção E



Figura 7 – Histograma das velocidades médias observadas Direção SE

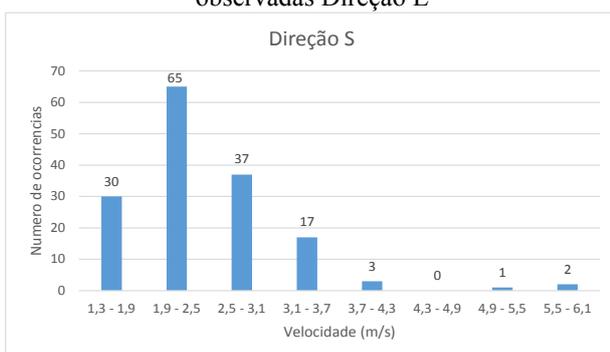


Figura 8 – Histograma das velocidades médias observadas Direção S

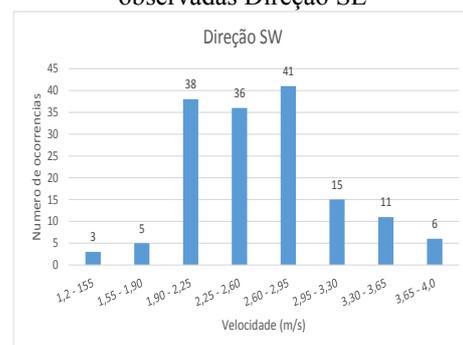


Figura 9 – Histograma das velocidades médias observadas Direção SW

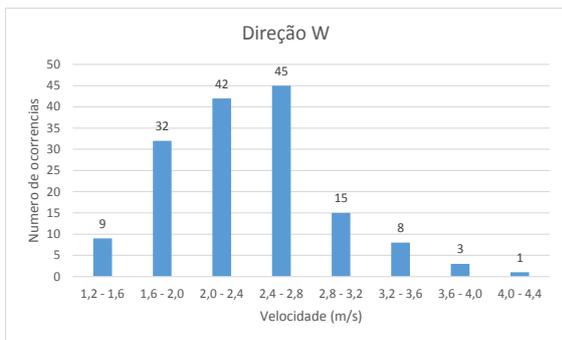


Figura 10 – Histograma das velocidades médias observadas Direção W

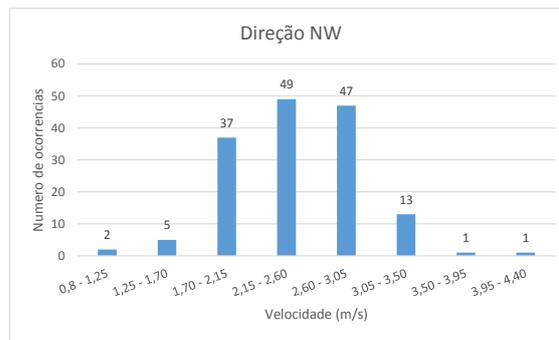


Figura 11 – Histograma das velocidades médias observadas Direção NW

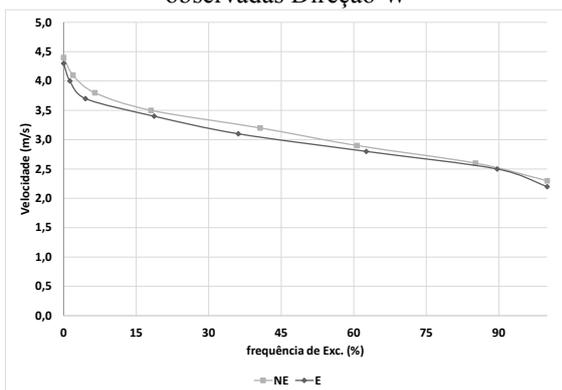


Figura 12 – Curva de permanência das velocidades médias observadas: Direção NE e N

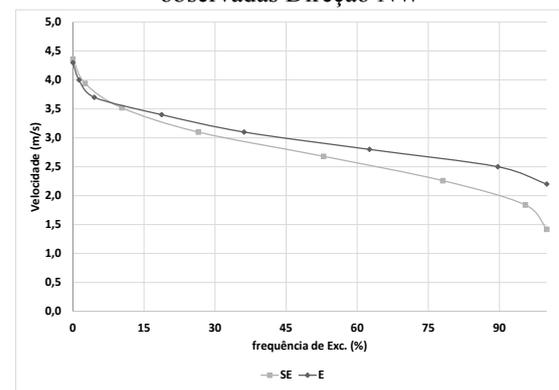


Figura 13 – Curva de permanência das velocidades médias observadas: Direção SE e E

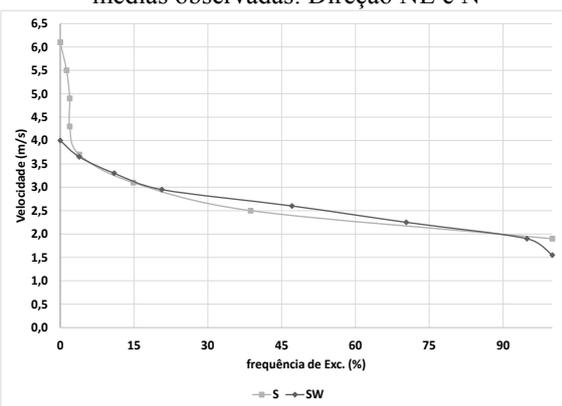


Figura 14 – Curva de permanência das velocidades médias observadas: Direção S e SW

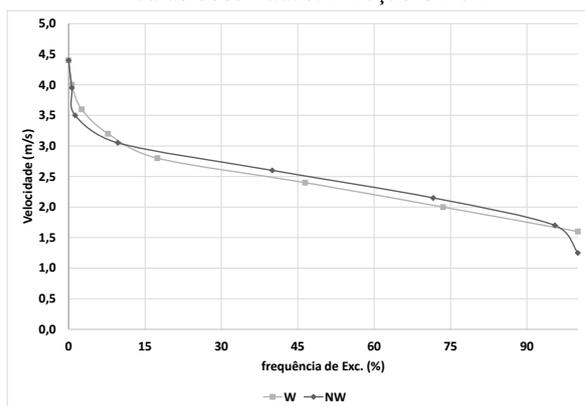


Figura 15 – Curva de permanência das velocidades médias observadas: Direção W e NW

Nos histogramas das velocidades médias é possível notar que, para todas as direções do vento, o maior número de ocorrências se dá para velocidades entre 2,5 m/s e 3,0 m/s. É possível também notar que os valores máximos variam de 3,7 m/s a 4,4 m/s, com baixo número de ocorrências.

De acordo com as curvas de permanência apresentadas, os valores das intensidades do vento correspondentes a uma frequência de excedência de 75% são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Intensidades do vento em (m/s) igualadas ou superadas em 75% do tempo, sem correção

N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2,4	2,75	2,65	2,35	2,15	2,20	2,0	2,15

Nota-se pelos dados da Tabela 3 que as maiores intensidades do vento acontecem nas direções NE e E, com valores de 2,75 m/s e 2,65 m/s, respectivamente, coincidindo com as direções de maior predominância do vento, de acordo com o apresentado na Figura 3.

Na tabela 4 são apresentados os valores dos fatores de correção devido aos efeitos de elevação (RE), localização (RL), estabilidade térmica (RT), velocidade média (RU) e coeficiente de arraste (RA).

Tabela 4 – Valores dos fatores de correção estimados para corrigir a velocidade do vento

Fatores de correção	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
R _E	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
R _L	1,72	1,66	1,68	1,71	1,77	1,75	1,78	1,77
R _T	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
R _U	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
R _A	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71

A média dos valores, resultado da multiplicação de cada um dos fatores de correção pelas intensidades do vento da Tabela 3, correspondem à intensidade do vento igualada ou superada em 75% do tempo, já na forma corrigida (Tabela 5).

Tabela 5 – Intensidades do vento em (m/s) igualadas ou superadas o 75% do tempo corrigidas

N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
2,8	3,2	3,0	2,7	2,5	2,5	2,3	2,5

Em geral os valores obtidos nesta análise são baixos se comparados com a intensidade do vento utilizada por Lima *et al.* (2003) na sua pesquisa. Eles trabalharam com as intensidades máximas do vento registradas na estação Ilha Solteira no mesmo período de tempo (1977 – 1990) para obter as máximas alturas de ondas geradas no lago. O valor máximo registrado foi de 33,3 m/s na direção NE no dia 27 de janeiro de 1990.

Maciel e Moraes (2008) utilizaram na sua pesquisa a intensidade do vento dominante registrado na direção NNO no ano de 2003 no lago de Ilha Solteira, com velocidade de 5,1 m/s, para a modelação das alturas de ondas.

Independente de se obter intensidades consideradas baixas, elas acontecem pelo menos em três quartos de tempo da série de dados considerada, garantindo, portanto, a mesma frequência de ocorrência das alturas de ondas nas margens do lago. Este fato poderia ocasionar alterações desfavoráveis no processo erosivo das margens do reservatório devido às ondas geradas pela ação do vento.

Assim, com estes valores de intensidades podem ser simuladas as ondas geradas no lago e ser determinadas as alturas delas no momento em que alcançam as margens do reservatório.

Considerando juntamente variáveis como a declividade do terreno, o tipo e a cobertura do solo das margens, as alturas das ondas podem ser um outro fator para a contribuição do processo erosivo.

CONCLUSÕES

Sugere-se neste trabalho que as ondas geradas nos reservatórios devido à ação dos ventos, juntamente com variáveis como declividade do terreno, o tipo e a cobertura do solo das margens, são os principais fatores responsáveis pelo processo erosivo das margens dos reservatórios brasileiros.

Destacou-se que são mais representativas no processo erosivo as ondas produzidas por ventos com intensidades com maior frequência de ocorrência do que as produzidas por ventos máximos, que poderiam não ser muito frequentes.

O processo erosivo de margens de reservatórios é um problema real e necessita ser monitorado e controlado, uma vez que o solo retirado causa o recuo das áreas de proteção ao redor do reservatório e, uma vez depositado no curso d'água, causa o seu assoreamento.

A previsão de áreas passíveis de erosão, onde podem ser executadas estratégias de gestão ou contenção da erosão, pode ser feita, e este estudo subsidiou dados para essa finalidade.

BIBLIOGRAFIA

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **O turismo e o lazer e sua interface com o setor de recursos hídricos**. In: _____ **Cadernos de Recursos Hídricos**. Brasília, DF, 2005.
- FENDRICH, R. Formação de ondas e identificação de pontos erodíveis na margem esquerda do reservatório de Itaipu. **Revista Brasileira de Engenharia: Caderno de Recursos Hídricos**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 2, p. 7-21, 1988.
- LIMA, S. F., NASCIMENTO, M. F., UAISSONE, A. R., & NEVES, C. F. **Estimativa das maiores ondas geradas pelo vento no reservatório de ilha solteira, SP**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 15., 2003, Curitiba.. Anais... Curitiba: FAPESP, 2003.
- MACIEL, G. D. F.; MORAIS, V. S. **Sistema automatizado de previsão de ondas geradas por ventos em águas interiores e sua alteração devido à influência de vegetação aquática**. In SEMENGO 08 III SEMINARIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEANICA, (p. 17)., 2008, Rio Grande.
- MARQUES, M.; GUETTER, A. K. **Determinação da distribuição do fetch no reservatório de Itaipu**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. Anais... Maceió: ABRH, 2011.
- MARQUES, M.; GUETTER, A. K. **Estimativa com modelo paramétrico dos campos de ondas geradas por ventos severos no reservatório de Itaipu**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. Anais... Maceió: ABRH, 2011.
- NAGHETTINI, M., PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- SIQUEIRA, A. G.; AZEVEDO, A. A. Erosão em margens de reservatórios. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, São Paulo, n. 89, p. 24, 2011.
- U. S. ARMY COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER. **Shore protection manual**. 3. ed. Washington: Department of the army corps of engineers, 1983.