ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Formação de ondas e os processos erosivos nas margens do lago da UHE Xingó

Francisco Sandro Rodrigues Holanda¹; Lilian de Lins Wanderley; Bruno de Santana Mendonça³; Igor Pinheiro da Rocha⁴; Luiz Diego Vidal Santos⁵; Alceu Pedrotti¹

¹Professor Titular, Universidade Federal de Sergipe-UFS, Cidade Universitária Prof. José Aloisio de Campos; São Cristóvão, SE, fholanda@infonet.com.br, ²Professora Associada, Universidade Federal de Sergipe, lilianwanderley@uol.com.br, ³Acadêmico de engenharia agrônoma, UFS, brunoestudo8@gmail.com, ⁴engenheiro florestal, Iândé Engenharia Sustentável, igor@iande.eng.br, ⁵mestrando de Ciência da Propriedade Intelectual, vidal.center@academico.ufs.br

Artigo recebido em 13/09/2019 e aceito em 24/03/2020

RESUMO

As características dos ventos têm uma grande influência no modo como as ondas são geradas, se propagam e promovem erosão nas margens de rios e lagos. Entre essas características, a velocidade e a direção do vento assumem um papel muito importante, influenciando os principais parâmetros que caracterizam as ondas, como a altura de onda e o seu período (tempo de duração). Esse trabalho teve como objetivo caracterizar a geração de ondas no Lago da UHE Xingó e as consequências nos processos erosivos na sua margem. Foram levantados dados *in situ* e das fontes disponíveis no SIMA - Monitoramento Integrado de Monitoração Ambiental. A coleta de dados de vento *in loco* foi realizada a partir da utilização de um anemômetro instalado em momentos e em pontos diferentes na margem do lago, para que permitisse a comparação com os dados pretéritos coletados pelo SIMA. Os focos de erosão reconhecidos na extensão das pistas de vento, foram georeferenciados sendo realizada a sua associação com a direção dominante dos ventos, que promovem a consequente formação de ondas. Percebeu-se ventos diurnos maiores que os ventos noturnos nos períodos mais secos, e também o desenvolvimento de ondas acompanhando essa tendência, ou seja, menores à noite do que no período diurno. Foram identificados 8 (oito) fetchs representativos dos ventos dominantes no Lago da UHE Xingó, todos com forte relação com os focos de erosão identificados, e percebeu-se pouca variação nos valores máximos de altura de ondas em todas as pistas de vento, não ultrapassando o valor de 0,16m, ocorrente no período diurno. Palavras-Chave: Velocidade do vento; Pistas de vento; Rio São Francisco; erosão.

Wave formation and erosive processes in the margins of Lake Xingó

ABSTRACT

The characteristics of the winds have a great influence in the way the waves are generated, they propagate and they promote erosion in the riverbanks and lakes. Among these characteristics, wind speed and direction play an important role, influencing the main parameters that characterize waves, namely wave height and period (duration time). The objective of this work was to characterize the generation of waves in the Xingó Power Dam and the consequences on the erosive processes. Data were collected *in situ* and compiled from the available sources in the SIMA - Integrated Environmental Monitoring System. Wind data collection was carried out using an anemometer installed at specific periods of the year, at different points in the lake margin, to allow the comparison with previous data collected by SIMA. The erosion recognized in the extension of the fetchs were georeferenced, and their association with the dominant direction of the winds was carried out, which promote the consequent formation of waves. Higher daytime winds were observed than the nocturnal ones in drier periods, and also the development of waves accompanying this trend, that is, smaller at night than in the daytime. Eight (8) representative fetchs of the prevailing winds in the Xingó Power Dam were identified, all of them strongly related to the identified erosion spots, and with few variation in the maximum wave heights values for all identified values not exceeding the value of 0.16m and in the daytime period.

Keywords: Wind speed, fetch; São Francisco River; erosion.

Introdução

Estudos demonstram que o vento somado a outros fatores climáticos pode ser causa de primeira ordem na geração de ondas em oceanos e lagos, e circulação vertical em estuários (Guo, Subrahmanyam, & Li, 2020). As características dos ventos têm grande influência no modo como as ondas são geradas e se propagam, influenciando os principais parâmetros que as formam, designadamente a altura das ondas e período de surgimento (Wang e Liao, 2016). A velocidade e a direção do vento também assumem papéis de grande importância na formação de ondas, afetando a estabilidade das margens de lagos (Gopikrishna; Deo, 2018; evers; Boes, 2019), da mesma forma que interferem na quantidade de oxigênio dissolvido (Yin, Zhang, Ma, & Feng, 2020).

Ondas são importantes fontes de energia cinética, por apresentar cargas mecânicas de grande potência e movimentação constante, e possuem diversas faixas de operação, que podem ser exploradas na produção energética (Esteban, López-Gutiérrez, Negro, Laviña, e Muñoz-Sánchez, 2018). Esta mesma energia contribui para o transporte de sedimentos e ações erosivas como a ressuspensão de sedimentos (Illig e Bachèlery, 2019), e estão associadas ao cisalhamentos induzido por ondas e correntes em lagos, assim como, por meio das movimentações de partículas, surgimento de cristas resultantes do recuo da margem (Elsey-Quirk, Mariotti, Valentine, e Raper, 2019), que aumentam a turbidez d'água, alterando a dinâmica da cadeia trófica e muitas vezes promovendo a sustentação de uma condição de eutrofização (Tedford, Halferdahl, Pieters, e Lawrence, 2019). As características dos ventos têm uma grande influência no modo como as ondas são geradas e se propagam, envolvidas com mudanças de temperatura, podendo acarretar transformações drásticas (Jalil et al., 2019; Meehl et al., 2019) potencializando a carga cinética das ondas (Oleinik, Marques, e Kirinus, 2016).

A pista de vento é a área de geração de ondas definida como sendo a região na qual a velocidade e direção do vento podem ser consideradas aproximadamente constantes. Segundo *Army Coastal Engineering Research Center* (USACERC-U.S), (ARMY, 2019), esta velocidade é considerada constante quando as variações não excedem 2,5 m/s, partindo da velocidade média. Com efeito, a geração de ondas

por ventos tem origem nessa zona confinada denominada *fetch*, ou pista de vento, que é compreendida como a medida em linha reta sem cortar qualquer obstáculo físico como ilhas e penínsulas até o barramento (Zhang & Hu, 2020). Estas ondas dependem das condições que os ventos incidem sobre os corpos de água a serem movidos, designadamente a sua velocidade e a sua direção (Marques, Andrade, e Guetter, 2013). Obermann et al. (2018), observaram que o desenvolvimento das pistas de ondas é o resultado da transferência da energia presente nos campos de ventos para a superfície dos corpos d'água, da perda de energia por arrebentação e da troca de energia entre as ondas de diversos comprimentos. Tais ventos tem alta influência na simetria das ondas e no atraso de fase entre as regiões do lado do mar e as do sotavento, sendo este um fator importante a ter em conta, uma vez que pode levar a forças potencialmente danosas em barreiras existentes (Lira-Loarca, Baquerizo, e Longo, 2019). Estas condições, somadas, influenciarão na extensão do *fetch*.

Segundo Pinceel et al. (2019) em águas presentes em porções interiores como barragens e lagos, as pistas de ventos se limitam ao formato das margens que formam os corpos d'água, influenciando diretamente nas características dos sedimentos depositados. Pistas de vento que apresentem diferença em comprimento, comparando a largura, são frequentemente encontradas em tais corpos, e a extensão do entorno não deve ser descartada. Margens de lagos afetadas são resultantes de altura de ondas significativamente menores se comparadas às mesmas condições de geração em corpos de água sem limitação marginal, como baías e oceanos. Pistas de vento de grande comprimento, se comparado à largura, são constantemente identificadas (E. D. V. Santos, 2018), embora bastante diferente de ambientes marinhos, uma vez que nesse ambiente lacustre a geração de ondas se mostrou afetada pela proximidade das margens (Lobo, Santos, e Lavenère-Wanderley, 2017).

Também é de extrema importância o conhecimento da altura de onda, para que seja possível elaborar modelos previsionais precisos quanto a velocidade máxima de fluxos, reduzindo as incertezas em mecanismos de falha, gerar dados mais precisos quanto a resistências de diques e taludes, podendo ser usado para melhorar as avaliações e projetos das estruturas de proteção contra inundações (Li, Zang, Liu, Jia, e Chen

2019), ou até as movimentações dos corpos d'água em detrimento da estabilidade das margens do lago, sob a ação das ondas geradas naquele ambiente (Evers e Boes, 2019). Em tempo, o valor da altura de onda significativa (H_{mo}) é um dos parâmetros mais importantes para o dimensionamento e a análise das condições de estabilidade de uma determinada estrutura sob a ação das ondas, como para a verificação da estabilidade de um parâmetro vertical de uma barragem de terra e para a estabilidade das margens de um determinado lago, sob a ação das ondas, geradas nesse lago.

Quando a onda é gerada pela ação do vento, a altura da onda fica condicionada a três fatores: a velocidade, a duração e a pista sobre a qual ele sopra (Yang, Fong, Lo, & Monismith, 2019). Tais fatores geram grandes desafios para o cálculo das alturas de onda em águas restritas. Se faz necessário observar que, ao contrário das estimativas de onda em oceano aberto, onde as pistas de vento são extensas, sem barreiras físicas, no caso de águas restritas existem várias limitações. Em primeiro lugar, a geometria, em geral recortada, de lagos interiores e reservatórios de usinas hidroelétricas limita a pista de vento. Em segundo lugar, o relevo em torno do lago influencia a distribuição espacial do vento que atua sobre o espelho d'água, como também induz a formação de esteiras de vórtices a sotavento de morros ou formações rochosas próximas (Izdori, Semiao, & Perona, 2019; Yang et al., 2019).

Os fundos de oceanos, rios ou lagos podem interferir com propagação da onda (Cannon e Troy, 2018). Já a modulação das ondas em lagos geradas por vento é em grande parte impulsionada pelas interações entre a circulação lateral induzida pelo vento, batimetria e mistura vertical (Matias et al., 2019). Para corpos d'água resultantes de represamentos, é de grande interesse o conhecimento da profundidade do canal ou reservatório, por meio da sua batimetria, para se efetuar uma previsão da altura de onda mais correta. A profundidade do canal será determinante para a altura de onda, já que, a batimetria também influencia nos processos de mistura e movimentação de nutrientes presentes no fundo dos lagos, e regula a depleção de oxigênio nas águas mais profundas dos lagos e bacias (Saber, James, & Hayes, 2019).

A erosão ocasionada em estruturas lânticas pode ser induzida ou intensificada com a incidência constante de ondas de alta velocidade. Diversas pesquisas tem se debruçado em reduzir os

efeitos deletérios das ondas presentes nestes ambiente, a exemplo o uso de técnicas de bioengenharia de solos, para dissipar as ondas e fornecer proteção durante os estágios iniciais de swash e colisão de ventos (Odériz et al., 2020). Em resposta, as ações mecânicas de ondas, podem influenciar os processos de erosão costeira, variando de uma situação estável a erosão ativa, podendo esta ação ser combinada com outros fatores como a abrasão térmica, desnudação térmica, ação de pistas de vento, entre outros (Sinitsyn, Guegan, Shabanova, Kokin, & Ogorodov, 2020).

Nesse sentido, entender os padrões de distribuição de energia dos ventos para as ondas que surgem ao longo das margens de lagos e rios e linhas costeiras, contribui para a prevenção de possíveis mudanças nas perdas econômicas e ambientais. objetivo desse trabalho foi caracterizar a geração de ondas no Lago da UHE Xingó e as consequências nos processos erosivos na sua margem.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A Usina Hidrelétrica de Xingó está localizada na froneira dos estados de Alagoas e Sergipe, situando-se a 12 quilômetros do município de Piranhas (Alagoas) e a 6 quilômetros do município de Canindé de São Francisco (Sergipe). A posição da usina, localizada na calha do rio São Francisco, é de cerca de 65 km à jusante do Complexo de Paulo Afonso (Bahia), constituindo-se o seu reservatório, face as condições naturais de localização num canyon, uma fonte de turismo na região, através da navegação no trecho entre Paulo Afonso e Xingó, além de prestar-se ao desenvolvimento de projetos de irrigação e ao abastecimento d'água para a cidade de Canindé/SE.

Com uma superfície de 908,2km², o Lago de Xingó é circundado por terras dos municípios de Canindé do São Francisco (SE) e de Paulo Afonso (BA), na sua margem direita, e por terras alagoanas dos municípios de Piranhas, Delmiro Gouveia (AL) e Olho d'Água do Casado (AL), situados na sua margem esquerda. Em ambas as margens acham instalados atracadouros de catamarãs, principalmente em Canindé de São Francisco, além de embarcações menores que compõem a frota essencial da infraestrutura do chamado *pólo turístico de Xingó*. A inserção político-administrativa e física da área de estudo é

mostrada nas Figuras 1 e 2 (CPRM, 2018; Wanderley & Lima, 2017).

Figura 1. Municípios da área de estudo e inserção regional.

Figura 2. Inserção do Lago de Xingó no curso do Rio São Francisco

Em 05 de julho de 2009 foi criado o Monumento Natural do Rio São Francisco, por meio do Decreto Federal (Brasil, 2009), unidade de

conservação de proteção integral que circunscreve o Lago de Xingó e zonas do entorno e compreende uma área de 26.736,30 ha, parcialmente distribuída

entre os municípios de Piranhas, Olho D'Água do Casado e Delmiro Gouveia, em Alagoas, Canindé de São Francisco, no Estado de Sergipe, e Paulo Afonso, no Estado da Bahia. É administrado pelo ICMBio -Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade e tem sua gestão partilhada com o Conselho Consultivo, cuja criação foi homologada em 29 de março de 2016 e nele estão representados vinte e oito segmentos institucionais, empresariais, científicos e comunitários.

Em termos da geologia e da geomorfologia da área considerou-se uma faixa longitudinal marginal ao Lago iniciada a montante da barragem, estendida de Canindé de São Francisco até Paulo Afonso.

A litoestratigrafia se caracteriza por rochas neoproterozóicas da Suite Curralinho e da Suite Xingó, em Canindé e Piranhas, predominando quartzos, leucogranitos e granodioritos. Já nas margens pertencentes a Canindé de São Francisco e Olho d'Água do Casado predominam rochas paleozóicas de conglomerados e arenitos de granulometria variada da Formação Tacaratu, enquanto o maior trecho do canyon, com margens em Paulo Afonso e Delmiro Gouveia, é formado por leucogranitos e granodioritos da suite magmática Xingó, do Neoproterozoico. Em tal contexto geológico de rochas cristalinas predominantemente metamórficas, as feições atuais do relevo, na faixa que abrange ambas as margens do Lago, pertencem aos padrões Superfícies Aplainadas Degradadas e Colinas Dissecadas, resultantes, entre outros fatores, do lento soerguimento epirogenético da plataforma brasileira em cerca de 100 metros durante o Cenozóico, que conforme (CPRM, 2018) levou o

Rio São Francisco ao aprofundamento do seu leito e à formação do canyon nesses municípios dos estados de Sergipe, Alagoas e Bahia e que são por ele separados. Localmente, no sopé desses taludes, estreitos depósitos sedimentares tidos como pequenas praias fluviais remetem a processos de acumulação aluvial, em curso.

O clima é do tipo megatérmico árido, temperatura média no ano de 25,8°C (Intituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, 2019), precipitação pluviométrica média anual de 485,5 mm e período chuvoso de março a julho ("INMET - Instituto Nacional de Meteorologia", 2018). A forma de relevo é de superfície Pediplanada e Dissecada, com Colinas e fraco aprofundamento da drenagem.

Coleta de dados

Buscando identificar, tipificar e analisar os componentes climáticos que determinam a geração de ondas no Lago da UHE Xingó e seus efeitos nos processos erosivos das margens, foram adaptadas diferentes metodologias, que permitem estimar, de forma mais precisa o processo de geração de ondas. A fase inicial se deu com o reconhecimento dos pontos de erosão, a definição dos transectos para levantamento dos perfis batimétricos, identificação de pontos para instalação de equipamentos (anemômetro) para coletas de dados meteorológicos em período de média duração. Nesse sentido foi gerado um mapa base, georeferenciando os vários pontos de interesse como apresentado na Figura 3.

Figura 3. Levantamento prévio dos pontos de interesse para aprofundamento dos estudos no Lago da UHE Xingó. Período de Junho-Julho de 2017.

Execução da topobatimetria dos pontos de interesse no Lago da UHE Xingó

Os equipamentos utilizados para a realização deste trabalho foram o instrumento ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*) - Modelo Rio Grande para a execução do levantamento batimétrico, e o GPS-Sistema de Posicionamento Global para a determinação do posicionamento do equipamento durante os trabalhos. Com o ADCP as profundidades são medidas por sonar (tempo de propagação), bem como a velocidade relativa do barco em relação ao fundo fixo (efeito Doppler) e a velocidade relativa das partículas em suspensão na água, ou seja, a velocidade da própria massa líquida (igualmente por efeito Doppler). A orientação foi determinada por uma bússola eletrônica. Processando estas informações em tempo real, durante a travessia, o software determinou entre outras coisas, a velocidade da corrente normal à seção descrita pela trajetória do barco e o espaço percorrido e, conseqüentemente a vazão, que é o produto da integração das áreas e velocidades normais

Levantamento de dados meteorológicos *in loco* e nas diversas fontes de pesquisa disponíveis

Os dados climáticos foram levantados *in situ* e compilados das fontes disponíveis como o INPE por meio do SIMA - Sistema Integrado de

Monitoramento Ambiental (INPE, 2019). O SIMA faz uso de um sistema autônomo, constituído de uma boia onde são instalados sensores, eletrônica de armazenamento, bateria e antena de transmissão.

A coleta de dados de vento *in loco* foi realizada a partir da utilização de um anemômetro instalado, em pontos diferentes da margem do lago, para que permitisse a comparação com os dados pretéritos coletados pelo SIMA. A princípio esse equipamento foi instalado em diferentes pontos, inicialmente no Canyon (621.169,790 e 8.948.164,914 UTM), no restaurante Karrancas (630.397,652 e 8.936.677,504 UTM¹) e Pousada Monte Cristo (629.046,595 e 8.940.142,790 UTM). Os dados coletados nas três localidades citadas permitem uma comparação com os dados que foram disponibilizados pelo INPE por meio do seu website SIMA (SIMA, 2019).

Mapeamento dos focos de erosão associados aos Fetches (pistas de vento)

Foram levantados *in situ* os focos de erosão, assim como o comprimento das maiores pistas de vento ou fetch no lago da UHE Xingó.

A identificação das pistas de vento e dos focos de erosão foi realizada em várias campanhas diretamente no campo.

¹ Geralmente as coordenadas UTM são acompanhadas das suas referências, por exemplo: 630.397,652 E e 8.936.677,504 W.

Esses focos de erosão foram reconhecidos na extensão das pistas, georeferenciados, sendo realizada a sua associação com a direção dominante dos ventos, que promovem a consequente formação de ondas.

Caracterização da altura de ondas geradas pelos ventos

Para os cálculos de ondas no Lago da UHE Xingó foi usada a metodologia de Hasselman et al (1976), apud USACERC (1984).

Inicialmente foi calculada a Velocidade do Vento considerando os efeitos da estabilidade (U_T), e para isso foi necessária a determinação do R_T (Coeficiente de estabilidade), por meio da fórmula:

$$U_T = R_T * U$$

Onde: U = velocidade do vento medida.

Em seguida calculou-se U_A , que é a pressão que atua na superfície da água, por meio da fórmula:

$$U_A^2 = 0,71 * U^{1,23}$$

Onde: U_{10} = velocidade que atua na superfície da água

Na sequência foi calculada H_{mo} , ou altura de onda significativa, pela seguinte fórmula:

$$H_{mo}^3 = 5,112 * 10^{-4} * U_A * F^{1/2}$$

Onde: F = Extensão do Fetch (m)

Por meio do Método de Saville foi calculado o F_e ou Fetch efetivo, pela seguinte fórmula:

$$F_e = 1,054 * W^{0,6} * F^{0,4}$$

Onde: W = Largura da massa de água e, F = extensão do Fetch

Realizada essa operação foi então substituído “ F ” pelo “ F_e ”.

O método de Hasselman et al (1976) também permitiu calcular o período de onda (T_m) pela seguinte expressão:

$$T_m = 6,238 * 10^{-2} * (U_A F)^{1/3}$$

Onde: U_A = Pressão que atua na superfície da água e F = extensão do Fetch

Resultados e discussão

Velocidade dos ventos ocorrentes no Lago da UHE Xingó

Foi observada pouca variação no comportamento dos ventos diurnos na comparação mensal, alcançando uma velocidade média próxima a 4 m/s ou 18 km/h (Figura 4), embora ocorram picos de 9 m/s ou 32 km/h em diferentes meses do ano.

Gomes (2014) destaca que para que as ações dos ventos sejam melhor percebidas, os ventos atuantes tem que apresentar velocidades superiores a 0,23 m/s.

Figura 4. Velocidade média dos ventos (km/h) durante o dia no período de 2012 a 2017.

A velocidade média dos ventos no período noturno apresenta uma variação não observada no

² Foi calculada a pressão que atua na superfície da água (U_A) para os períodos diurno e noturno.

³ Foi calculada a altura de onda significativa (H_{mo}) para os períodos diurno e noturno

período diurno, uma vez que nos meses mais frios, no período de abril a agosto, observou-se menor velocidade média dos ventos (Figura 5). Esse comportamento mostra uma linha de velocidade

média para os períodos noturnos variável a depender da estação do ano, como observado por Munhoz e Garcia (Odériz et al., 2020).

Figura 5. Velocidade média dos ventos (km/h) durante a noite no período de 2012 a 2017.

Observou-se também que a velocidade média do vento alcançou picos de 10 m/s ou 37 km/h nos meses de temperaturas mais altas (setembro a março), superando as velocidades registradas nos períodos diurnos, apresentando aumentos superiores a 10%. Esta tendência de ventos diurnos maiores que os noturnos nos períodos mais secos deve-se ao aquecimento do solo, que aquece o ar, que ascende, e é ocupado pelo ar mais frio, ocasionando um gradiente térmico, e na sequência um gradiente de pressão que desloca o ar da zona de maior pressão para a zona de menor pressão. No período noturno, como o gradiente térmico é menor, a velocidade do vento diminui (Jiménez, Grau, & Cuxart, 2020).

Caracterização dos Fetchs ou Pistas de ventos

Quando a onda é gerada pela ação do vento, a altura da onda fica condicionada a três fatores relacionados ao vento: a velocidade, a duração e a pista sobre a qual ele sopra (Meehl et al., 2019). As velocidades médias dos ventos no Lago da UHE Xingó, nos diferentes períodos do ano excedem com bastante folga o que pode ser considerado como velocidades constantes.

Foram identificados 8 (oito) fetchs representativos dos ventos dominantes no Lago da UHE Xingó, todos com forte relação com os focos de erosão identificados (Tabela 1).

Tabela 1. Fetches ou pistas de vento (m) mais representativos identificados no Lago da UHE Xingó

Fetch	Segmento	Direção	Pista máxima (m)
1	I	SE	5.356,05
2	II	SE	3.224,06
3	II	SE	2.175,04
4	II	SE	1.148,18
5	III	SE	2.473,46
6	III	SE	1.962,93
7	IV	SE	2.400,62
8	IV	SE	2.313,53

Os fetchs mais representativos nesse ambiente lacustre apresentam comprimento variável, não tão extensos na sua maioria, situação bem diferente dos ambientes marinhos. De acordo com Pinceel et al. (2019) em águas interiores, as pistas são limitadas pelo formato das margens que contornam tais corpos d'água. As Pistas de vento de grande comprimento, quando comparadas à largura, são frequentes, e a influência do entorno das pistas não podem ser desprezadas. Estes casos de área de geração afetada pela margem resultam em altura de ondas expressivamente menores se comparadas às mesmas condições de geração em

corpos de água sem limitação marginal, como nos oceanos.

Na Figura 6 é apresentado o segmento I representado onde foi identificado o Fetch No. 1, com 5.356,05 m de comprimento, com direção predominante SE (Sudeste), que potencializou a ocorrência do Foco de Erosão (FE 028). Pistas de vento de grande comprimento, se comparado à largura, foram identificados, embora bastante diferente de ambientes marinhos, uma vez que nesse ambiente lacustre a geração de ondas se mostrou afetada pela proximidade das margens.

Figura 6. Mapa de pistas de vento do Segmento I do Lago da UHE Xingó. Período de 2012 a 2017.

Na Figura 7 é apresentado o segmento II representado pelos Fetchs 2, 3 e 4 com 3.224,06 metros, 2.175,04 metros e 1.148,18 metros de comprimento, respectivamente, com direção predominante SE (Sudeste), e que potencializou a ocorrência dos Focos de Erosão 1, 2, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27.

Figura 7. Mapa de pistas de vento do Segmento II do Lago da UHE Xingó. Período de 2012 a 2017.

Na Figura 8 é apresentado o segmento III representado pelos Fetchs 5 e 6 com 2.473,46 metros e 1.962,93 metros de comprimento,

respectivamente, com direção predominante SE (Sudeste), e que potencializou a ocorrência dos Focos de Erosão 3, 4, 5, 6, 14, 15, 16, 17, 18 e 19.

Figura 8. Mapa de pistas de vento do Segmento III do Lago da UHE Xingó. Período de 2012 a 2017.

Na Figura 9 é apresentado o segmento IV representado pelos Fetchs 7 e 8 com 2.400,62 metros e 2.313,53 metros de comprimento,

respectivamente, com direção predominante de SE (Sudeste), e que potencializou a ocorrência dos Focos de Erosão 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13.

Figura 9. Mapa de pistas de vento do Segmento IV do Lago de Xingó. Período de 2012 a 2017.

A altura de ondas geradas pelos ventos no Lago da UHE Xingó

A Figura 10 apresenta as alturas de ondas significativas (H_{mo}) e o período de onda (T_m) dos

períodos diurno e noturno para os 8 Fetchs avaliados.

Figura 10. (a) Altura de onda significativa (H_{mo}) do fetch n° 1 (Pista de vento), e (b) Tempo de duração das ondas (T_m), no período diurno.

Percebe-se pouca variação nos valores máximos de ondas em todas as pistas de vento. Somente no Fetch n° 1 (Figura 10), a altura ultrapassou o valor de 0,16m e no período diurno. Mesmo com discreta diferença para mais, as ondas geradas durante o dia se apresentaram maiores que as ondas noturnas.

Novamente percebe-se que, em razão de ventos diurnos maiores que os noturnos nos períodos mais secos, também o desenvolvimento de ondas acompanhou essa tendência, menores à noite do que no dia. Com efeito, isso se deve ao aquecimento do solo durante o dia, o qual também vai aquecendo o ar, que ascende, sendo ocupado

por um ar mais frio, originando um gradiente térmico (L. S. dos Santos et al., 2016) que, por sua vez, origina um gradiente de pressão causando o deslocamento do ar da zona de maior pressão para a zona de menor pressão (Simó, Martínez-Villagrasa, Jiménez, Caselles, e Cuxart, 2018).

Pode-se verificar, que o período de onda espectral é mais influenciado pelo valor da velocidade do vento do que pela extensão do Fetch, o que ocorre também nos níveis de degradação geradas por ondas insididas geleiras ao redor de lagos. Porém, não existe uma grande diferença no que diz respeito à grandeza da influência de cada

um dos dois parâmetros referidos (Jingkai Li, Ma, Liu, Zhang, & Guan, 2019).

Focos de erosão associados aos Fetches (pistas de vento)

Os principais fatores relacionados à erosão em margens de reservatórios ocorrem pela ação das ondas causadas por ventos, erosão hídrica por salpicamento, escoamento superficial e deslizamentos. Estes processos erosivos são dependentes de diversos fatores, estando relacionados principalmente à morfologia do reservatório, condições meteorológicas e pedológicas da área.

Outro fator determinante da erosão é a faixa de depleção de um reservatório, que, consiste na área da margem sobre influência direta da variação do nível de água do lago e pode ser nesta faixa que os processos erosivos se intensificam (Abouelresh et al., 2020).

Considerando ser o Lago de Xingó, uma barragem “a fio d’água”, com variações discretas na faixa de depleção, ou seja, quando a afluência e defluência são praticamente as mesmas, não parece ser a faixa de depleção uma causa determinante da ocorrência dos processos erosivos. Com efeito, a pouco expressiva variação de cota do nível da água do lago não parece se constituir em elementos contribuintes para o avanço dos processos erosivos na sua margem, que viriam aumentar as

possibilidades de solapamento na base do talude. Então, parece que os processos erosivos nessa área lacustre se mostram mais relacionados com aspectos pedológicos e meteorológicos. Observa-se, segundo Santos et al. (1998) a litologia das margens dominadas por granitoides/gnaisses com muito pouca variação e com formação de NEOSSOLOS litólicos rasos.

Nesse sentido, foi então dada ênfase à ocorrência de erosão e a sua associação com os aspectos meteorológicos representados nessa fase pela ocorrência dos ventos e suas características como direção, velocidade e formação das pistas de vento que num ambiente lacustre adquire características bem peculiares. O efeito da largura da pista de vento pode ser desprezado em áreas de geração que possuem a largura tão grande quanto, ou superiores ao comprimento. Esta situação é comumente identificada em áreas oceânicas (Różyński, 2018; Vieira, 2017).

Em tempo, por meio do uso de anemômetros instalados em pontos diferentes da margem do lago, foram levantados *in situ* focos de erosão, assim como o comprimento das maiores pistas de vento ou Fetch no lago da UHE Xingó. Desta forma, os pontos de erosão foram reconhecidos na extensão das pistas, georeferenciados, sendo realizada a sua associação com a direção dominante dos ventos, que promovem a consequente formação de ondas (Tabela 2).

Tabela 2 . Registro dos focos de erosão identificados na margem do Lago da UHE Xingó e Fetchs associados aos segmentos na área levantada

Ordem de campo	Foco de erosão	Coordenadas do ponto central (UTM SIRGAS 2000 24L)		Segmento ⁴ do lago	Denominação do Fetch	Localização da margem em relação ao canal
		X	Y			
1	FE027	8.933.367,34	636.514,54	II	2	Margem esquerda
2	FE026	8.931.965,44	637.573,07	II	2, 3, 5	Margem esquerda
3	FE025	8.931.860,67	637.961,34	III	3, 5	Margem esquerda
4	FE024	8.931.607,48	638.266,66	III	3, 5	Margem esquerda
5	FE023	8.932.075,87	639.364,82	III	3, 5	Margem esquerda
6	FE022	8.931.226,52	638.463,06	III	3, 5	Margem esquerda
7	FE021	8.930.250,24	639.108,24	IV	5	Margem esquerda
8	FE020	8.929.448,16	639.517,58	IV	5	Margem esquerda
9	FE001	8.925.179,81	642.329,37	IV	8	Margem esquerda
10	FE002	8.928.003,80	638.325,86	IV	7	Margem direita
11	FE003	8.927.530,08	638.560,38	IV	7	Margem direita
12	FE004	8.927.098,04	638.986,83	IV	7	Margem direita
13	FE005	8.926.618,32	639.209,49	IV	7	Margem direita
14	FE006	8.929.985,10	637.492,24	III	5	Margem direita
15	FE007	8.929.974,23	636.797,66	III	5, 6	Margem direita
16	FE008	8.929.352,18	637.108,29	III	6	Margem direita
17	FE009	8.929.364,30	636.401,38	III	6	Margem direita
18	FE010	8.930.156,40	636.659,45	III	6	Ilha
19	FE011	8.930.512,18	636.824,30	III	5	Ilha
20	FE012	8.929.756,51	635.103,45	II	3, 4	Margem direita
21	FE013	8.928.509,44	634.861,57	II	4	Margem direita
22	FE014	8.930.787,37	634.258,68	II	4	Margem direita
23	FE015	8.930.997,08	633.991,15	II	4	Margem direita
24	FE016	8.932.460,46	634.421,61	II	4	Margem direita
25	FE017	8.933.659,97	634.243,81	II	2	Margem direita
26	FE018	8.932.956,78	634.868,47	II	2	Ilha
27	FE019	8.933.754,15	635.049,33	II	1, 2	Ilha
28	FE028	8.934.147,42	633.754,95	I	1	Margem direita

Os focos de erosão identificados, que totalizaram 28, se caracterizam por apresentarem extensões diferenciadas, e uma grande descontinuidade. Alguns com perfil transversal-margem/talude marginal suave, outros íngremes, vertical na base, outros suaves com escarpatecuada (Figura 9). Muitas partes das encostas das áreas de estudo tenham sido expostas em consequência frequência de ataques das ondas, dificultando o reaparecimento da vegetação nativa e se estabelecer ou se restabelecer na frente de escarpas de erosão, (Figura 9), comportamento semelhante ao encontrado por Prahalad et al., (2015).

Também foi possível observar discreto desenvolvimento de praias, mas predominando

faixas sem praia. A formação dessas discretas faixas de praia é esperada em lagos formados por rios represados, originadas de deposição de carga sólida, por conta da redução da velocidade das águas, e impactos de ondas ao longo do tempo, (Mattheus et al., 2019). Na Figura 9 é possível observar evidências dos processos erosivos na área estudada, ocorrentes em áreas marginais de lagos, que se caracterizam pela presença de restos de troncos, erosão solapando na base, e expondo raízes (Silva, Pinho, Rondon, Souza, e Santos, 2018). Também foram observados blocos de solo com gramíneas na base, evidenciando retirada pela ação das ondas, pequena escarpa erosiva na base, desmoronamentos mesmo que não muito expressivos, mas ocorrentes, e testemunhados pela

⁴ Toda extensão do Lago de Xingó foi dividida em 04 (quatro) segmentos, assim identificados: I, II, III e IV, que se mostram de grande utilidade na espacialização das informações referentes aos focos de erosão e fetchs.

ausência de vegetação instalada. Quanto à avaliação qualitativa do nível de energia e de taxa de erosão, percebe-se a presença de processos

erosivos, mas com baixa taxa de recuo caracterizando um nível baixo de energia.

Figura 9. Focos de erosão identificados nas margens do Lago de Xingó. Agosto de 2017.

Conclusões

Foi observado que, a velocidade média dos ventos se mostrou próxima a 4 m/s ou 18 km/h, embora ocorram picos de 9 m/s ou 32 km/h em diferentes meses do ano, promovendo erosão somente nos taludes que recebiam os ventos dos fetchs dominantes;

Os Fetchs ou Pistas de vento de grande comprimento, se comparado à largura, capazes de influenciar o tamanho e força das ondas, foram identificados, embora bastante diferente daqueles normalmente identificados em ambientes marinhos;

No ambiente lacustre a geração de ondas pode ser afetada pela proximidade das margens, criando-se um ambiente de maior turbulência, e consequente maior velocidade;

Os Focos de Erosão (FE) observados, apresentaram diferentes extensões, demonstrando direta relação com os Fetchs de vento identificados, dominados pela direção Sudeste (SE) e uma grande descontinuidade ao longo das margens do lago;

Os processos erosivos no Lago de Xingó se mostram diretamente relacionados com aspectos pedológicos caracterizados pela presença de solos rasos e constituídos de material instável e meteorológicos como a direção e velocidade dos ventos dominantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem a parceria da ATOLX- Associação dos Operadores de Turismo do Lago de Xingó na realização deste trabalho

Referências

- Abouelresh, M., Babalola, L., Bokhari, A., Omer, M., Koithan, T., & Boyde, D. (2020). Sedimentology, geochemistry and reservoir potential of the organic-rich Qusaiba Shale, Tabuk Basin, NW Saudi Arabia. *Marine and Petroleum Geology*, 111, 240–260. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2019.05.001
- Army, U. S. A. E. R. and D. C. (2019). U.S. Army Engineer Research and Development Center. Recuperado 22 de março de 2020, de <https://www.erdc.usace.army.mil/Brasil>, P. da R. (2009). Decreto de 5 de Junho de 2009 Cria o Monumento Natural do Rio São Francisco. Recuperado de http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/dnn/Dnn12057.htm
- Cannon, D. J., & Troy, C. D. (2018). Observations of turbulence and mean flow in the low-energy hypolimnetic boundary layer of a large lake. *Limnology and Oceanography*, 63(6), 2762–2776. doi: 10.1002/lno.11007
- CPRM, S. G. do B. (2018). Projeto Geoparques. Recuperado 30 de março de 2020, de <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Geoparques-5414.html>
- Else-Quirk, T., Mariotti, G., Valentine, K., & Raper, K. (2019). Retreating marsh shoreline creates hotspots of high-marsh plant diversity. *Scientific Reports*, 9(1), 5795. doi: 10.1038/s41598-019-42119-8
- Esteban, M. D., López-Gutiérrez, J.-S., Negro, V., Laviña, M., & Muñoz-Sánchez, P. (2018). A New Classification of Wave Energy Converters Used for Selection of Devices. *Journal of Coastal Research*, 85, 1286–1290. doi: 10.2112/SI85-258.1
- Evers, F. M., & Boes, R. M. (2019). Impulse Wave Runup on Steep to Vertical Slopes. *Journal of*

- Marine Science and Engineering, 7(1), 8. doi: 10.3390/jmse7010008
- Gomes, D. N. de P. L. (2014). Avaliação da geração de ondas por ação do vento e de embarcações em albufeiras. Estudo de caso.
- Gopikrishna, B., & Deo, M. C. (2018). Sediment transport and shoreline shifts in response to climate change at the tidal inlets of Chilika, India: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 372–387. doi: 10.1177/1475090217748755
- Guo, B., Subrahmanyam, M. V., & Li, C. (2020). Waves on Louisiana Continental Shelf Influenced by Atmospheric Fronts. Scientific Reports, 10(1), 1–9. doi: 10.1038/s41598-019-55578-w
- Illig, S., & Bachèlery, M.-L. (2019). Propagation of Subseasonal Equatorially-Forced Coastal Trapped Waves down to the Benguela Upwelling System. Scientific Reports, 9(1), 5306. doi: 10.1038/s41598-019-41847-1
- INPE, I. N. de P. E. (2019). Sistemas de Monitoramento Ambiental (SIMA). Recuperado 22 de março de 2020, de <http://www3.inpe.br/tec/rme/sima/>
- Izdori, F., Semiao, A. J. C., & Perona, P. (2019). The Role of Environmental Variables in Waste Stabilization Ponds' Morphodynamics. Frontiers in Environmental Science, 7. doi: 10.3389/fenvs.2019.00159
- Jalil, A., Li, Y., Zhang, K., Gao, X., Wang, W., Khan, H. O. S., ... Acharya, K. (2019). Wind-induced hydrodynamic changes impact on sediment resuspension for large, shallow Lake Taihu, China. International Journal of Sediment Research, 34(3), 205–215. doi: 10.1016/j.ijsrc.2018.11.003
- Jiménez, M. A., Grau, A., & Cuxart, J. (2020). Generation of chilling hours maps using surface observations and satellite data. Atmospheric Research, 236, 104807. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104807
- Li, Jingkai, Ma, Y., Liu, Q., Zhang, W., & Guan, C. (2019). Growth of wave height with retreating ice cover in the Arctic. Cold Regions Science and Technology, 164, 102790. doi: 10.1016/j.coldregions.2019.102790
- Li, Jinxuan, Zang, J., Liu, S., Jia, W., & Chen, Q. (2019). Numerical investigation of wave propagation and transformation over a submerged reef. Coastal Engineering Journal, 0(0), 1–17. doi: 10.1080/21664250.2019.1609712
- Lira-Loarca, A., Baquerizo, A., & Longo, S. (2019). Interaction of Swell and Sea Waves with Partially Reflective Structures for Possible Engineering Applications. Journal of Marine Science and Engineering, 7(2), 31. doi: 10.3390/jmse7020031
- Lobo, M. S., Santos, B. S. S., & Lavenère-Wanderley, A. A. de O. (2017). Análise Estatística Anual e Mensal das Ondas Atuantes na Costa de Ilhéus (Bahia) Baseada na Reanálise de Série Temporal de 31 Anos do Modelo de Ondas WAVEWATCH III. Revista do Departamento de Geografia, 67–74. doi: 10.11606/rdg.v0ispe.132752
- Marques, M., Andrade, F., & Guetter, A. (2013). Conceito do Campo de Fethe e sua Aplicação ao Reservatório de Itaipu. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 18(4), 243–253. doi: 10.21168/rbrh.v18n4.p243-253
- Matias, A., Carrasco, A. R., Loureiro, C., Masselink, G., Andriolo, U., McCall, R., ... Guerreiro, M. (2019). Field measurements and hydrodynamic modelling to evaluate the importance of factors controlling overwash. Coastal Engineering, 152, 103523. doi: 10.1016/j.coastaleng.2019.103523
- Matheus, C. R., Diggins, T. P., Boyce, C., Cockrell, J., Kruske, M., & VanWinkle, M. (2019). Geomorphology of a Harbor-Breakwater Beach along a High Sand-Supply, Wave-Dominated Great Lakes Littoral Cell. Journal of Coastal Research, 35(1), 41–55. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-17-00209.1
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Chung, C. T. Y., Holland, M. M., DuVivier, A., Thompson, L., ... Bitz, C. M. (2019). Sustained ocean changes contributed to sudden Antarctic sea ice retreat in late 2016. Nature Communications, 10(1), 14. doi: 10.1038/s41467-018-07865-9
- Obermann, A., Bastin, S., Belamari, S., Conte, D., Gaertner, M. A., Li, L., & Ahrens, B. (2018). Mistral and Tramontane wind speed and wind direction patterns in regional climate simulations. Climate Dynamics, 51(3), 1059–1076. doi: 10.1007/s00382-016-3053-3
- Odériz, I., Knöchelmann, N., Silva, R., Feagin, R. A., Martínez, M. L., & Edgar Mendoza. (2020). Reinforcement of vegetated and unvegetated dunes by a rocky core: A viable alternative for dissipating waves and providing protection? Coastal Engineering, 158, 103675. doi: 10.1016/j.coastaleng.2020.103675
- Oleinik, P. H., Marques, W. C., & Kirinus, E. de P. (2016). Simulação de ondas oceânicas na costa Sul-Sudeste brasileira para análise do potencial

- energético. VETOR - Revista de Ciências Exatas e Engenharias, 26(2), 39–50.
- Pinceel, T., Vanschoenwinkel, B., Weckx, M., & Brendonck, L. (2019). An empirical test of the impact of drying events and physical disturbance on winderosion of zooplankton egg banks in temporary ponds. *Aquatic Ecology*, 1–8.
- Prahalad, V., Sharples, C., Kirkpatrick, J., & Mount, R. (2015). Is wind-wave fetch exposure related to soft shoreline change in swell-sheltered situations with low terrestrial sediment input? *Journal of Coastal Conservation*, 19(1), 23–33. doi: 10.1007/s11852-014-0352-x
- Różyński, G. (2018). Local Wave Energy Dissipation and Morphological Beach Characteristics along a Northernmost Segment of the Polish Coast. *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics*, 65(2), 91–108. doi: 10.1515/heem-2018-0007
- Saber, A., James, D. E., & Hayes, D. F. (2019). Estimation of water quality profiles in deep lakes based on easily measurable constituents at the water surface using artificial neural networks coupled with stationary wavelet transform. *Science of The Total Environment*, 694, 133690. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133690
- Santos, L. S. dos, Martorano, L. G., Batalha, S. S. A., Pontes, A. N., Silva, O. M. da, Watrin, O. dos S., & Gutierrez, C. B. B. (2016). Orbital images and infrared thermography to assess surface temperature in different soil uses and covers in the Tapajós national forest and its surroundings. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(4). doi: 10.5935/1984-2295.20160084
- Santos, R. A. dos, Martins, A. A., Neves, J. P. das, & Leal, R. A. (1998). *Geologia e recursos minerais do estado de Sergipe*.
- Santos, E. D. V. (2018). Caracterização do padrão de ondas superficiais de gravidade geradas pelo vento no complexo estuarino de São Marcos (MA). 69.
- Silva, C. M. da, Pinho, C. M. de, Rondon, R. S. da S., Souza, R. S. de, & Santos, C. C. (2018). Aplicação de protocolo de avaliação rápida, para a identificação de processos erosivos no córrego mata fria, Chapada dos Guimarães, MT. *TCC - Engenharia Ambiental*, 0(0). Recuperado de <http://www.repositoriodigital.univag.com.br/index.php/engambient/article/view/359>
- SIMA, S. I. de M. A. (2019). Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental. Recuperado 23 de maio de 2019, de <http://www.dsr.inpe.br/hidrosfera/sima/>
- Simó, G., Martínez-Villagrasa, D., Jiménez, M. A., Caselles, V., & Cuxart, J. (2018). Impact of the Surface–Atmosphere Variables on the Relation Between Air and Land Surface Temperatures. *Pure and Applied Geophysics*, 175(11), 3939–3953. doi: 10.1007/s00024-018-1930-x
- Sinitsyn, A. O., Guegan, E., Shabanova, N., Kokin, O., & Ogorodov, S. (2020). Fifty four years of coastal erosion and hydrometeorological parameters in the Varandey region, Barents Sea. *Coastal Engineering*, 157. doi: 10.1016/j.coastaleng.2019.103610
- Tedford, E., Halferdahl, G., Pieters, R., & Lawrence, G. A. (2019). Temporal variations in turbidity in an oil sands pit lake. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(2), 457–473. doi: 10.1007/s10652-018-9632-6
- Vieira, L. K. K. (2017). Desenvolvimento de quebra-mar flutuante de garrafa plástica. Recuperado de <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REP/OSIP/331328>
- Wanderley, L. de L., & Lima, A. H. de S. (2017). Nordeste do Brasil: Ocupação socioeconômica e ambiental. IV Semana Acadêmica e Cultural (SEMACE), IV. São Cristóvão-SE.
- Wang, B., & Liao, Q. (2016). Field observations of turbulent dissipation rate profiles immediately below the air-water interface. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(6), 4377–4391. doi: 10.1002/2015JC011512
- Yang, P., Fong, D. A., Lo, E. Y. M., & Monismith, S. G. (2019). Circulation patterns in a shallow tropical reservoir: Observations and modeling. *Journal of Hydro-Environment Research*, 27, 75–86. doi: 10.1016/j.jher.2019.09.002
- Yin, Z., Zhang, H., Ma, L., & Feng, Y. (2020). Hydrodynamic behavior and oxygen transfer performance of a new device utilizing wave energy to transport surface water to deep ocean zones. *Ocean Engineering*, 198, 106819. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106819
- Zhang, Y., & Hu, W. (2020). Wind wave characteristics of Lake Chaohu under the influence of typhoon [台风影响下巢湖风浪特征研究]. *Hupo Kexue/Journal of Lake Sciences*, 32(1), 236–245. doi: 10.18307/2020.0122