

**RECUO DAS MARGENS E MODELAGEM DA ENERGIA DE ONDAS NO TRECHO INFERIOR DO RESERVATÓRIO DA UHE ROSANA SP/PR**

Elaine Patricia Arantes <sup>1</sup>; Marta Luzia de Souza <sup>2</sup>

**Resumo** – A construção de reservatórios hidrelétricos gera diversos impactos ambientais. Dentre eles, tem-se os processos erosivos marginais, os quais podem provocar a degradação da paisagem, a perda de terras produtivas e o assoreamento dos reservatórios. A presente pesquisa objetivou avaliar a relação entre a magnitude do recuo marginal e a energia das ondas, ao longo de cinco pontos de monitoramento, no trecho inferior do reservatório da UHE Rosana (SP/PR), durante o período de junho/2017 a setembro/2017. Os procedimentos utilizados consistiram de trabalhos de campo, para determinação do recuo das margens através da técnica das estacas, e trabalhos de gabinete para a determinação da energia das ondas, bem como para a análise estatística. Foi comprovado estatisticamente que o recuo das margens depende da energia equivalente das ondas que atingem as mesmas. O coeficiente de determinação ( $R^2=94\%$ ), mostrou que o modelo adotado é bastante adequado. Os resultados obtidos colaboram para a compreensão do desenvolvimento desses processos erosivos, aliados com outros fatores intervenientes.

**Abstract** – The construction of hydroelectric reservoirs engenders many environmental impacts. Among these are the processes of shore erosion, which may cause degradation of the landscape, loss of productive lands and silting of the reservoirs. This research aims to evaluate the correlation between the magnitude of shore reduction and the wave energy along five points of monitoring, in the lower stretch of the UHE Rosana (SP/PR) reservoir, between June/2017 and September/2017. The methods included field researches to determine the shore reduction through a stakes technique, and desk researches to determine the wave energy, as well as statistical analysis. It was statistically proven that the shore reduction depends on the equivalent wave energy that reaches it. The coefficient of determination shows that the model adopted is quite adequate. The results obtained collaborate to the understanding of the development of processes of erosion, combined with other participant factors.

**Palavras-Chave** – Erosão marginal; corpos d'água; energia equivalente.

---

<sup>1</sup> Eng., Msc, Universidade Estadual de Maringá, (44) 3621-9300, eparantesl@uem.br

<sup>2</sup> Eng. Geól., Dr<sup>a</sup>, Universidade Estadual de Maringá, (44) 3011-4372, mlsouza@uem.br

## 1. INTRODUÇÃO

A formação de um reservatório está associada a uma série de alterações no meio físico, com consequentes impactos ambientais. A erosão e a instabilidade de taludes marginais configuram-se entre estes impactos, ocorrendo na maioria dos grandes reservatórios com diferentes graus de criticidade. Existe ainda uma crescente demanda de energia no Brasil e a opção do país pela hidroeletricidade indica que a construção de reservatórios tende a aumentar (MORAIS, 2015).

Muitas pesquisas atribuem às ondas geradas pelo vento, ao fator de ação deflagrador do processo erosivo nas margens dos reservatórios, pois a área superficial formada pela construção destes torna propícia a formação dessas ondas. As ondas atuam contra às margens fazendo com que o embate das mesmas provoque a desagregação de materiais rochosos e inconsolidados, podendo desenvolver margens cujas inclinações favoreçam a atuação dos processos gravitacionais. Tal, processo pode provocar o recuo das margens com a redução de áreas produtivas, além de prejudicar a qualidade da água devido ao aumento da turbidez ocasionada pelo aumento da concentração de partículas sólidas em suspensão, assim como podem contribuir para o assoreamento do reservatório devido ao aporte de sedimentos.

Nas últimas décadas no Brasil, iniciaram-se pesquisas sobre a erosão causadas por ondas geradas pelo vento nas margens de reservatórios com o intuito de compreender a dinâmica deste processo e as reações na morfologia dos reservatórios. A produção científica deste tema em climas diferentes do Brasil, principalmente o temperado, é bem expressiva, mas em países de clima tropical e subtropical os estudos são relativamente recentes. Vários trabalhos apontam os fatores intervenientes a serem analisados, como as ondas geradas pelo vento.

No Brasil, dentre os reservatórios já estudados com relação ao tema estão os reservatórios de: Itaipu (Brasil/Paraguai), Porto Primavera (SP/MS), Chavantes e Rosana, estes dois últimos na divisa entre os estados de São Paulo e Paraná. A área teste da presente pesquisa é a UHE Rosana-SP/PR.

As interações entre o homem e o relevo e os processos geomorfológicos resultantes, por estarem diretamente relacionadas a necessidades do uso e ocupação dos solos, provocam sempre a necessidade de estudos e análises cada vez mais específicas.

Com base no exposto, o objetivo deste trabalho foi identificar a relação entre as ondas geradas pelo vento e o recuo das margens no trecho inferior do reservatório da UHE Rosana (SP/PR).

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 2.1. LOCALIZAÇÃO

A formação do reservatório da UHE Rosana (SP/PR), na década de 1980, inundou terras dos municípios de Diamante do Norte, Terra Rica, Paranaíba, Santo Antonio do Caiuá, Inajá, Paranapoema, Jardim Olinda e Itaguajé, no Paraná; e dos municípios de Rosana, Euclides da Cunha Paulista, Teodoro Sampaio, Mirante do Paranapanema e Sandovalina, em São Paulo (DUKE ENERGY, 2004). A Figura 1 apresenta a localização da área de estudo entre os Estados de São Paulo e Paraná.

O reservatório foi concluído em novembro de 1986, possui uma área de 220Km<sup>2</sup>, perímetro de 433Km e volume total de 1.920 x 106m<sup>3</sup> (DUKE ENERGY, 2013). O eixo da barragem se localiza entre os municípios de Diamante do Norte (PR) e Primavera (SP), a 20km da foz do rio Paranapanema (KIPPER et al, 2011). O reservatório é a fio d'água, ou seja, sem capacidade de acumulação, apresenta 116km de extensão, profundidade média de 12m na região fluvial e intermediária, e 30m na lacustre (FELISBERTO e RODRIGUES, 2011).

A UHE Rosana (SP/PR) integra o complexo energético das onze hidrelétricas presentes no rio Paranapanema (SP/PR). O rio possui uma série de reservatórios em cascata, sendo que o

primeiro é o reservatório de Jurumirim (568m de altitude) e o último o reservatório de Rosana (258m de altitude).

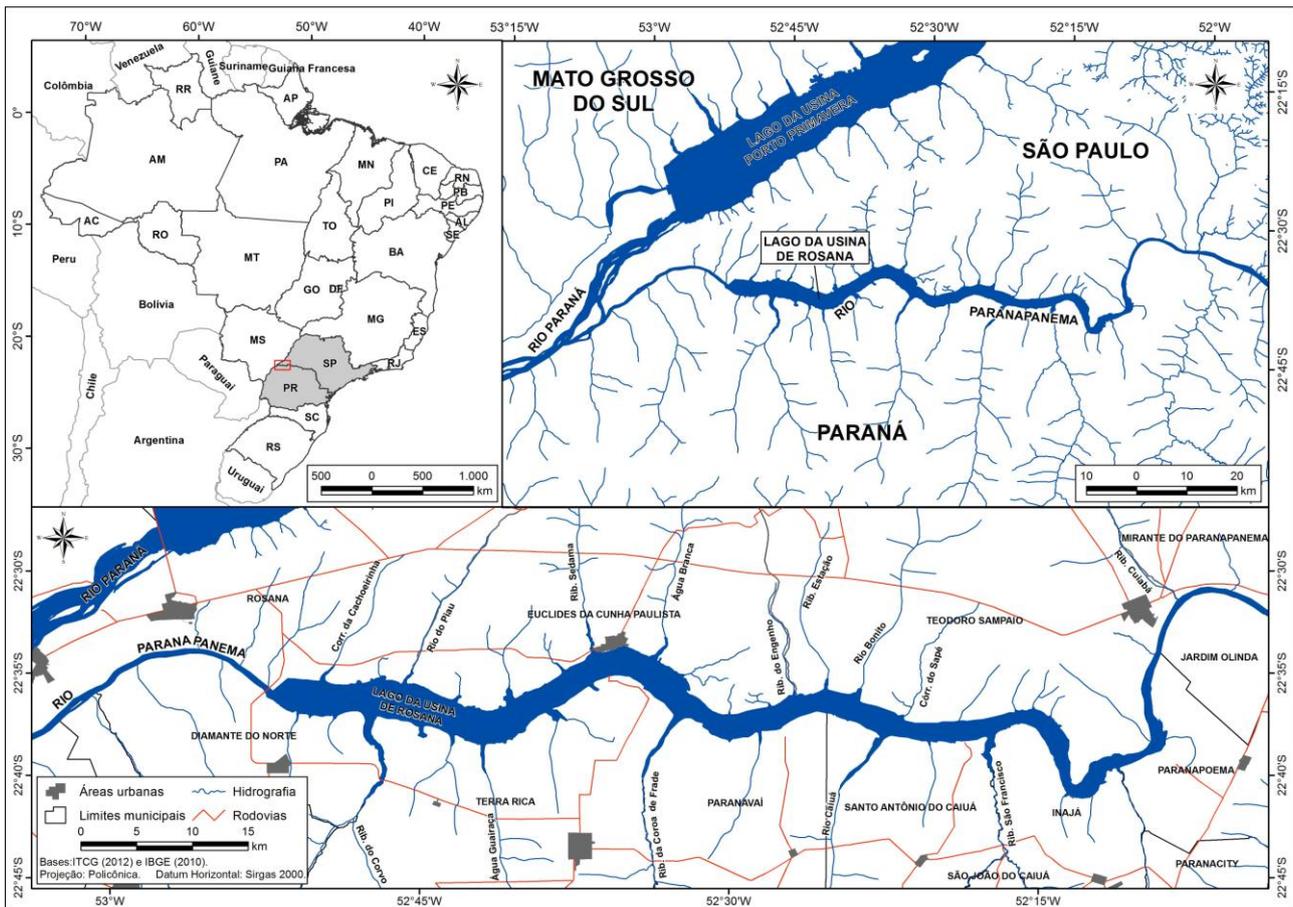


Figura 1. Mapa de localização da área estudada, UHE Rosana (SP/PR)

Atualmente, a UHE Rosana (SP/PR) está sob concessão da CTG Brasil (China Three Gorges Corporation), a qual adquiriu os ativos da Duke Energy no Brasil em 2017.

## 2.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A região do reservatório de Rosana (SP/PR), foi caracterizada com um clima temperado quente, sendo a temperatura atmosférica média anual de 21°C, com valores mais baixos entre maio e agosto (média mínima de 13°C) e mais altos entre janeiro e março (média máxima de 32°C), sendo que possui duas estações climáticas em função do regime pluviométrico, estação chuvosa e de seca, Duke Energy (2001, apud FEITOSA, 2011).

Com relação à geomorfologia, o reservatório está situado sob a morfoestrutura da Bacia Sedimentar do Paraná, enquanto que com relação as morfoesculturas, a margem paulista está situada no Planalto Ocidental Paulista, e a margem paranaense no Terceiro Planalto Paranaense, segundo Nunes et al (2016).

Em pesquisa sobre as erosões marginais no reservatório de Rosana, Rubio (2014) fez um levantamento tanto das condições geológicas quanto pedológicas das margens do mesmo. Tais levantamentos basearam-se em produtos cartográficos gerados pela Duke Energy e Regeo (2013 apud RUBIO, 2014). Com base nestes levantamentos, em relação às condições geológicas das margens, o reservatório apresenta três formações: Depósitos Aluvionares, Formação Caiuá e Grupo São Bento, sendo que a Formação Caiuá corresponde a 61,09% do

comprimento total das margens do reservatório, os Depósitos Aluvionares correspondem a 33,69% e o Grupo São Bento a 5,22%.

Quanto às condições pedológicas, tem-se os seguintes percentuais de distribuição nas margens: 57,07% de Argissolos Vermelho-Amarelos, 7,56% de Gleissolos, 23,72% de Latossolos Vermelhos e 11,65% de Neossolos Flúvicos, segundo Rubio (2014).

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para correlacionar o recuo das margens com a energia das ondas atuantes nas mesmas, foram monitorados cinco locais, conforme Figura 2, durante o período de junho de 2017 a setembro de 2017, de modo a abranger o período seco na área do reservatório de Rosana (SP/PR).

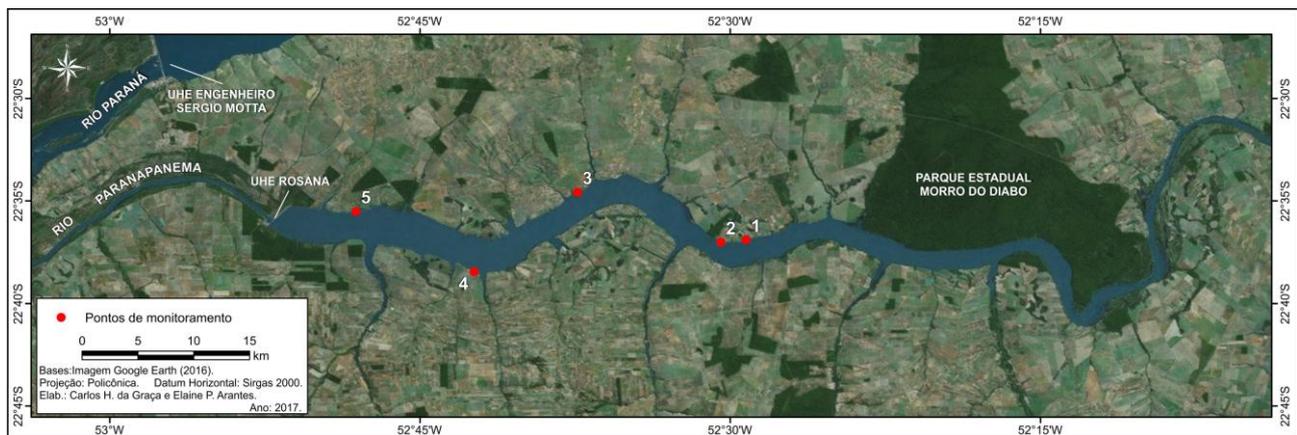


Figura 2. Imagem com a localização dos pontos de monitoramento (Google Earth, 2016).

Para quantificar o recuo das margens foi utilizado o Método das Estacas empregado inicialmente por Hughes (1977). Na presente pesquisa foi utilizada estacas de madeira e/ou árvores como referência. As estacas foram posicionadas próximas à margem, a uma distância de 3m da borda do talude, de forma que não fossem afetadas por desmoronamentos. Foram fixadas na posição vertical e georreferenciadas com GPS (Global Positioning System). Concomitantemente foram medidas as alturas das margens em cada ponto monitorado.

Devido à necessidade de um detalhamento, para o melhor entendimento da dinâmica erosiva presente nas margens do reservatório, foi realizada a identificação dos tipos de solos, em perfis verticais envolvendo a análise granulométrica realizada para os pontos de monitoramento, segundo critérios pedológicos.

As amostras de solo coletadas em campo foram manuseadas no laboratório, do GEMA (Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente) da Universidade Estadual de Maringá, onde foi realizada a análise granulométrica das mesmas, que foi composta de duas fases: peneiramento e sedimentação. O método utilizado para a análise foi o da Embrapa (1997).

Para a obtenção da energia das ondas, foi necessário a obtenção de dados de intensidade e direção do vento durante o período monitorado. Tais, foram provenientes da Estação Meteorológica Automática (EMA) de Diamante do Norte (PR), em funcionamento desde 08/03/2008, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situada a 368m de altitude, nas coordenadas: Latitude 22° 38' 21,72" S e Longitude 52° 53' 24,56" W.

Os dados horários adquiridos foram processados de modo a determinar as intensidades médias e as frequências do vento para cada direção do vento considerada (E, N, S, W, NE, SE, SW e NW). Os valores das intensidades médias do vento obtidos em cada uma das direções, foram corrigidas devido aos efeitos de localização, estabilidade térmica, velocidade média e

coeficiente de arraste, conforme recomendação do U. S. Army Coastal Engineering Research Center (1983).

A energia da onda atuante nos pontos monitorados foi determinada utilizando uma equação paramétrica determinada especificamente para o reservatório da UHE Rosana (SP/PR), a qual foi obtida através da técnica de Modelagem Paramétrica Bidimensional (MPB) proposta por Marques (2013). A equação paramétrica permite a determinação da altura da onda (H) em função da velocidade do vento e do *fetch*.

Considerando-se ondas regulares e águas profundas, a energia média por unidade de área superficial ( $J/m^2$ ), Equação 1, conhecida como densidade de energia ou energia específica de uma onda é dada por (KINSMAN, 1984):

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (1)$$

Sendo:  $\rho$  a massa específica da água ( $Kg/m^3$ ),  $g$  a aceleração gravitacional ( $m/s^2$ ) e  $H$  a altura da onda (m).

As dificuldades geradas pelo caráter transiente do vento e conseqüentemente, das ondas foram contornadas pela aplicação do conceito de energia equivalente.

A energia equivalente representa a taxa de energia constante que, fornecida continuamente ao longo de todo o tempo no ponto considerado, equivaleria à energia recebida pelo vento no período analisado, esse é o conceito que fundamenta o método.

Esse conceito visa substituir a intensidade e a frequência do vento, variáveis com a direção e dependentes do tempo, os campos de *fetch* e os campos de altura de ondas, por uma única variável, a taxa de energia equivalente, independente da direção do vento e referente a um determinado período.

Sendo assim, na determinação da energia equivalente, a frequência do vento, ou seja, a percentagem de tempo em que o vento sopra em cada direção, foi aplicada para cada direção, para ponderar a influência de cada direção do vento, conforme a equação (2):

$$E_{eq} = \sum_1^8 E_i f_i \text{sen} \theta \quad (2)$$

Sendo  $E_i$  a energia no ponto de monitoramento devido a direção do vento " $i$ ",  $f_i$  a frequência ou a percentagem de tempo que o vento sopra na direção " $i$ ", e  $\theta$  é o ângulo formado entre a direção do vento e a orientação da margem.

O ângulo de incidência das ondas na face do talude varia em função da orientação da margem. Sendo assim, foi utilizado na determinação da energia equivalente, a componente da energia da onda perpendicular à margem.

Para investigar a relação entre o recuo das margens e a energia equivalente foi utilizado o modelo de regressão linear simples, tendo o recuo da margem como variável resposta (eixo y) e a energia equivalente da onda (eixo x) como variável explicativa. O modelo de regressão é um dos métodos estatísticos mais usados para investigar a relação entre variáveis. O modelo foi comparado ao modelo nulo pela análise de variância, com teste F ao nível de 1% de significância. A distribuição de erros Normal foi usada na análise do modelo. Tal análise foi realizada no *software* livre R versão 1.1.423.

#### 4. RESULTADOS

Nas margens do reservatório da UHE Rosana (SP/PR), pôde ser visualizado a atuação de processos erosivos, de diferentes criticidades, com alturas dos taludes marginais variando de poucos centímetros a até aproximadamente 3m, em função do relevo do entorno serem planos a ondulados.

No início do monitoramento, quando da instrumentação das margens, pôde ser observado a atuação das ondas, as quais, através do processo de corrosão, removem os sedimentos da base do talude, gerando o solapamento da base. Tal processo foi visível nos pontos monitorados.

As formas erosivas observadas nos pontos monitorados, bem como a ocorrência de ondas durante o monitoramento podem ser visualizadas na Figura 3.



Figura 3. Formas erosivas observadas nos pontos monitorados na área de estudo

Na Tabela 1 podem se visualizadas algumas características dos pontos de monitoramento com a orientação da margem, ou seja, a altura média da margem (m), horizontes dos solos, a composição granulométrica e o uso do solo.

Em relação aos resultados da análise textural, houve predomínio da fração areia em todos os horizontes dos pontos analisados.

Os dados resultantes do processamento dos ventos para o período monitorado encontram-se na Tabela 2, a qual apresenta a frequência e a velocidade média do vento corrigida para cada direção do vento durante o período monitorado.

Verifica-se que os ventos predominantes no período foram provenientes da direção Sudeste (61,69%), seguida da direção Leste (15,01%) e Sul (7,02%). A maior velocidade média por direção foi proveniente da direção Leste (3,82m/s), seguida da direção Nordeste (3,68m/s) e Sudeste (3,50m/s).

A correlação entre o recuo marginal medido e a energia equivalente, pode ser verificada na Figura 4, onde a energia corresponde a energia equivalente calculada, em função do *fetch*, da intensidade e frequência do vento, e da orientação da margem.

A magnitude do recuo da margem variou com a energia equivalente ( $P < 0,01$ , N5), sendo observada a relação positiva entre as variáveis.

Tabela 1. Características levantadas nos pontos de monitoramento.

Ponto/ Orientação da margem	Altura média da margem (m)	Horizontes dos solos	Composição granulométrica (%)		Uso do solo
			Silte+argila	Areia	
1/S	1,65	A	9,76	90,24	Pastagem
		C1	14,24	85,76	
		C2	14,7	85,3	
		Cg1	27,52	72,48	
		Cgf	35,37	64,63	
2/SW	1,37	Gm <sub>1</sub>	34,38	65,62	Pastagem
		Gm <sub>2</sub>	36,2	63,8	
3/S	2,52	A	7,29	92,71	Reflorestamento
		AB	8,21	91,79	
		C1	19,02	80,98	
4/NE	1,82	A	18,7	81,3	Condomínio de casas utilizadas para lazer
		Bw <sub>1</sub>	32,17	67,83	
		Bw <sub>2</sub>	35,52	64,48	
5/SE	0,99	A	16,72	83,28	Pastagem
		E	17,15	82,85	
		Bt	29,95	70,05	

Tabela 2. Distribuição percentual de ocorrência do vento horário e velocidade média para cada direção do vento . Estação Diamante do Norte - PR (jun/2017-set/2017).

Direções do vento	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
Frequência (%)	1,10	4,17	15,01	61,69	7,02	5,44	4,00	1,57
Velocidade média (m/s)	2,28	3,68	3,82	3,50	2,07	1,23	1,76	2,47

Fonte: INMET (2017)

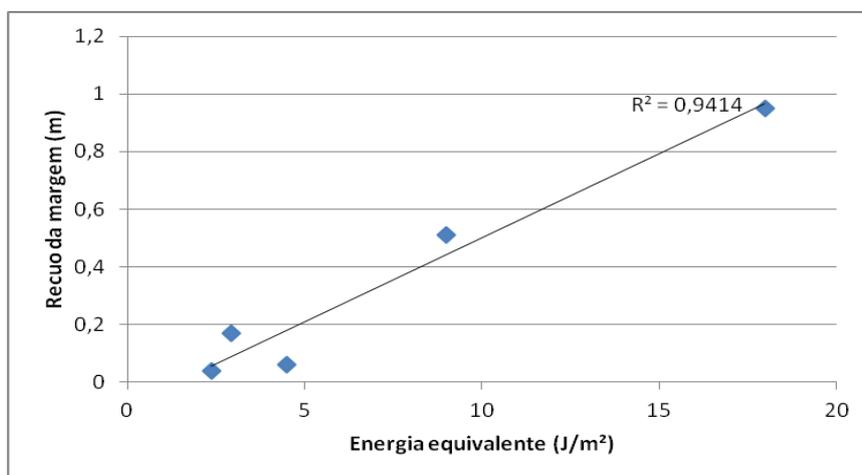


Figura 4. Relação entre o recuo da margem (m) e a energia equivalente ao longo dos pontos monitorados no reservatório da UHE Rosana SP-PR (jun/2017 a set/2017), (P<0,01).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi de 94%, portanto, 94% da variação no recuo está relacionada linearmente com a energia equivalente, sendo que apenas 6% da variação são resultantes de outros condicionantes não considerados, como os geomorfológicos, geológicos, climáticos (precipitação), uso do solo e cota d'água do reservatório. Sendo assim, grande parte da variação do recuo é explicada linearmente pela variável independente, a energia equivalente.

## 5. CONCLUSÕES

O monitoramento realizado confirmou, a variabilidade espacial do recuo das margens. Tal, sendo altamente dependente da energia equivalente das ondas que atingem as margens, sendo comprovado estatisticamente. Na análise estatística, a magnitude do recuo variou de acordo com a energia equivalente atuante na margem, com  $P < 0,01$ .

O coeficiente de determinação ( $R^2=94\%$ ), utilizado como uma medida da qualidade do ajustamento do modelo linear, mostrou que o modelo adotado é bastante adequado. Tal, indica que 94% da variação no recuo está relacionada linearmente com a energia equivalente, sendo os restantes 6% da variação, resultantes de outros fatores não considerados.

As análises realizadas justificam a variação espacial dos recuos em função da energia equivalente das ondas. Tais, resultados podem auxiliar na adoção de medidas prioritárias de proteção das margens em áreas mais críticas, ou seja, expostas as maiores energias.

## AGRADECIMENTOS

A primeira autora agradece à Universidade Estadual de Maringá (UEM) pela concessão do afastamento em regime integral para cursar doutorado e ao Programa de Pós-graduação em Geografia da UEM. Os autores agradecem ao GEMA (Grupo de Estudos Multidisciplinares do Ambiente) da UEM pelo suporte oferecido.

## REFERÊNCIAS

- Duke Energy 2004. Plano de Uso e Ocupação do Reservatório da UHE Rosana.
- Duke Energy 2013. ABC da Energia. A história da Duke Energy no rio Paranapanema, 39 p.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed.rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ.
- Feitosa, M. F. 2011. Análise comparativa da dieta, seletividade alimentar e estrutura da ictiofauna, juvenis e espécies de pequeno porte, em lagoas marginais do reservatório de Rosana (Rio Paranapanema SP/PR). Tese (Doutorado em Zoologia) – Instituto de Biociências de Botucatu - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.
- Felisberto S. A., Rodrigues L. 2011. Desmídias epifíticas do reservatório de Rosana, bacia do rio Paranapanema, Paraná/São Paulo, Brasil: *Euastrum Micrasterias*(Desmidiaceae). Revista Brasileira de Biociências, p. 206-213.
- Hughes D. J. 1977. Rates of Erosion on Meander Arcs. In: GREGORY, K. J., ed. River Channel Changes, Chichester. John Wiley & Sons.
- Kinsman B. 1984. Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface. Prentice Hall, Inc., 676 pp.
- Kipper D., Bialetzki A., Santin M. 2011. Composição taxonômica da assembleia de larvas de peixes no reservatório de Rosana, Rio Paranapanema, Brasil. *Biota Neotrop.*, vol. 11, no. 1, p. 421-426

- Marques, M.; 2013. Modelagem paramétrica bidimensional para simulação de ondas em águas continentais. Tese de doutorado - Programa de Pós-Graduação Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba: Universidade Federal do Paraná. 219 p.
- Morais L. C. 2015. Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e tendências futuras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". 128p.
- Nunes J. O. R., Silva P. A. A., Cierutte G. B., Bigoni L. 2016. Caracterização física dos solos degradados por erosão marginal nos reservatórios hidrelétricos de Rosana e Chavantes. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 11, 2016, Maringá. Anais...Maringá.
- Rubio M. F. 2014. Gênese e dinâmica de erosões em margens de reservatórios. Pesquisa & Desenvolvimento no estudo de caso nas UHs Chavantes e Rosana (rio Paranapanema, SP/PR). Tese (Doutorado em Geografia Física) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, da Universidade de São Paulo, São Paulo. 255 f.
- U. S. Army Coastal Engineering Research Center 1983. Shore Protection Manual. 3. ed. Washington, DC.