

MORFOMETRIA E TAXA DE SEDIMENTAÇÃO DO RESERVATÓRIO DE RETIRO BAIXO, RIO PARAÓPEBA (MG)

Diego de Souza Sardinha ¹
Jéssica Teixeira Silveira ²
Letícia Hirata Godoy ³
Sheila Cardoso da Silva ⁴
Rodrigo Leandro Bonifácio ⁵
Gunther Brucha ⁶

RESUMO

A morfologia de um reservatório pode ser quantificada a partir de parâmetros morfométricos que são descritores das feições e das dimensões das áreas alagadas e influenciam diretamente na qualidade das águas. A taxa de sedimentação permite estudar mudanças na dinâmica da sedimentação, como a evolução da descarga de sedimentos de um rio. O reservatório de Retiro Baixo é um empreendimento para geração de eletricidade, construído no baixo curso do Rio Paraopeba, onde a alguns quilômetros a jusante, deságua no lago da usina hidrelétrica de Três Marias, no Rio São Francisco. Neste estudo, investigou-se os parâmetros morfométricos primários e secundários do reservatório de Retiro Baixo a partir de fichas técnicas, batimetrias e software de geoprocessamento. Utilizando amostrador manual de sedimento tubular de gravidade (testemunhador modelo Kajak-Brinkhurst K-B corer), amostras de sedimentos de fundo foram coletadas no dia 23 de fevereiro de 2022, na região central ou zona intermédia do reservatório (7 amostras de 0 a 35 cm). As amostras foram submetidas à análise de ²¹⁰Pb e ²²⁶Ra por espectrometria gama com detector CANBERRA de cristal de germânio hiperpuro (HPGe) no LAPOC/CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear. Para a taxa de sedimentação, foi utilizado o modelo de concentração inicial constante (CIC) em que, para cada camada de uma sequência sedimentar, há uma mesma atividade não suportada de ²¹⁰Pb no momento da sua deposição. Os resultados indicam que o reservatório se situa a 619 m acima do nível do mar, com área inundada (A_r) de 22,58 km² e volume (V_r) de 0,24 km³ ($2,41 \times 10^8$ m³), inserindo-se na categoria de médio reservatório. O comprimento máximo (L_{max}) é de 37,60 km, larguras máximas (L_{max}) e média (L_{med}) de 2930,15 e 600,53 metros, respectivamente, o caracterizam como irregular alongado e orientado N-S, com inflexões para NE-SW. Com uma profundidade máxima (Z_{max}) de 45 metros, média (Z) de 10,70 m e relativa (Z_r) de 0,84%, o reservatório é caracterizado com dinâmicas predominantes de fundo (erosão-transporte-acumulação), de limitações morfológicas para a completa mistura da massa d'água, e pequena dimensão com uma grande área de contribuição, ou seja, capacidade de diluição pequena em relação à grande área de drenagem da bacia, propenso ao assoreamento e eutrofização. Os

¹ Professor do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas - MG, diego.sardinha@unifal-mg.edu.br;

² Doutoranda do Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal de Alfenas - MG, jessica.teixeira@sou.unifal-mg.edu.br;

³ Doutora pelo Curso de Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - SP, leticiahirata@gmail.com;

⁴ Professora visitante do Curso de Ciências Ambientais da Universidade Federal de Alfenas - MG, sheila.silva@unifal-mg.edu.br;

⁵ Pesquisador da Comissão Nacional de Energia Nuclear, Laboratório de Poços de Caldas - MG, rodrigo.bonifacio@cnen.gov.br;

⁶ Professor do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas - MG, gunther.brucha@unifal-mg.edu.br;



valores de ^{226}Ra no reservatório de Retiro Baixo variam de 104 a 80 Bq/kg com uma média de $92,7 \pm 5,4$ Bq/kg e os de ^{210}Pb de 145 a 92 Bq/kg com uma média de $115,3 \pm 10,1$ Bq/kg. Os valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (média de $22,6 \pm 8,6$) indicam que o tempo de deposição da camada sedimentar, obtido com referência ao ano de amostragem dos sedimentos (2022) corresponde a 50 anos. A taxa de sedimentação linear e o tempo de deposição em relação à profundidade de 2,5 a 12,5 cm foi de 2,4 mm/ano (equivalente ao ano de 2003) e de 17,5 a 32,5 cm de 8,5 mm/ano (equivalente ao ano de 1972) e podem estar relacionadas com diferentes fases de erosão e ocupação da terra na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba.

Palavras-chave: Fator de envolvimento, Método CIC, Erosão.

INTRODUÇÃO

A água armazenada em lagos, em represas e em açudes apresenta variações de qualidade, as quais podem estar estreitamente ligadas à morfologia do ambiente (SPERLING, 1999, p.20). Segundo BARROSO et al., (2014) a morfologia de um lago pode ser quantificada a partir de parâmetros morfométricos que são descritores das feições e das dimensões das áreas alagadas. Essas características podem influenciar na qualidade das águas, uma vez que condicionam as trocas de calor e gases, misturas da coluna de água e sedimentos, dinâmica hidroquímica e na distribuição de nutrientes (HAKANSON, 2005; MOSES et al., 2011; GONÇALVES et al., 2016; ANDA et al., 2019).

De acordo com MORTATTI et al., (2010) estudos geoquímicos dos sedimentos fluviais, normalmente conduzidos em amostras de sedimento de fundo, permitem uma avaliação histórica da origem e distribuição dos metais pesados na área de drenagem. Segundo WILKEN et al., (1986) o ^{210}Pb é utilizado como traçador geoquímico para determinar as taxas de sedimentação em sedimentos recentes e para identificar as entradas antropogênicas associadas à industrialização nos últimos 100 anos.

A Bacia do Rio Paraopeba está localizada na região sudeste do Estado de Minas Gerais com sua nascente situada no extremo sul da Serra do Espinhaço, município de Cristiano Ottoni, percorrendo uma distância aproximada de 510 km até sua foz na represa de Três Marias no Rio São Francisco (Figura 1). Segundo SARDINHA et al. (2025) a bacia é caracterizada por planaltos, depressões e áreas dissecadas resultantes predominantemente da alternância de atuação de processos morfoclimáticos associados ao condicionamento geológico. Quanto ao uso da terra, predominam as minerações de ferro e manganês, exploração agrícola, pastagens, ocupação urbana, áreas de cerrado e mata nativa, plantio de eucalipto e extensa área de solo exposto.

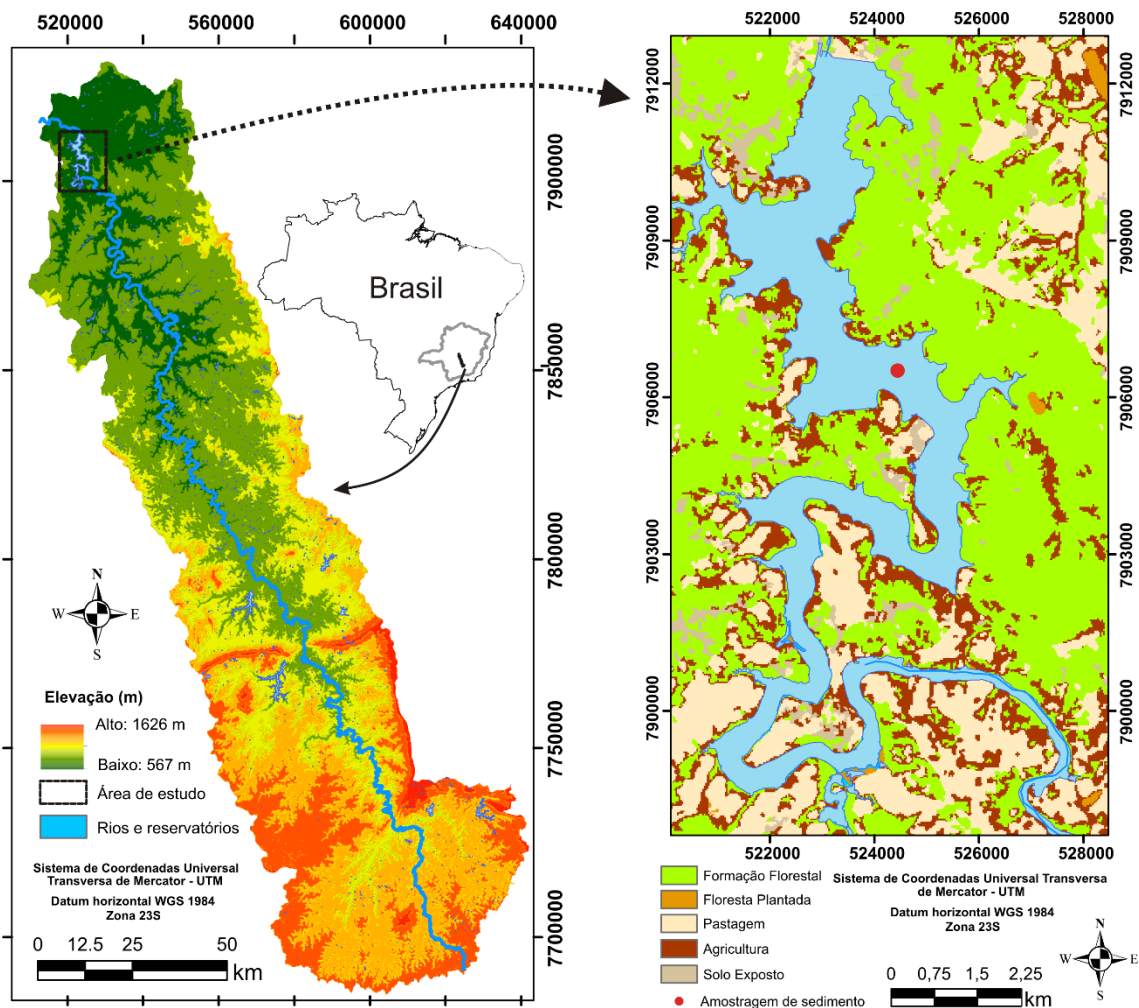


Figura 1. Bacia do Rio Paraopeba com a localização do Reservatório de Retiro Baixo.

Modificado: SARDINHA et al. (2024).

O reservatório da Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo está localizado no baixo curso do rio Paraopeba, entre os municípios de Curvelo e Pompeu e possui um volume útil de 241.590 m³, área inundada de 22,58 km², comprimento de 37.600 metros e profundidade média de 22 metros, sendo utilizado para regularização da vazão para a geração de energia elétrica (82 MW) que opera comercialmente desde março de 2010 (ELETROBRÁS, 2025).

A área do reservatório está situada onde afloram rochas do Grupo Bambuí, subdividido em Subgrupo Paraopeba e Formação Três Marias. Os relevos formados por morros e colinas que margeiam o reservatório fazem parte da Depressão do Alto Rio São Francisco, onde predominam Cambissolos Háplicos nas áreas de relevo levemente



ondulado e Latossolos Vermelhos em áreas de topografia plana. O uso da terra é marcado por exploração agrícola e pastagens, com pequenas casas de veraneio em torno do reservatório.

Como a região carece de estudos relacionados a sua caracterização fisiográfica, o presente trabalho tem como objetivo a investigação dos parâmetros morfométricos primários e secundários e da taxa de sedimentação no reservatório de Retiro Baixo, Rio Paraopeba (MG), localizado a montante da usina hidrelétrica de Três Marias, no Rio São Francisco.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo, foram investigados os parâmetros morfométricos primários de comprimento máximo ($L_{\max}$), área do reservatório (A_r), volume do reservatório (V_r) e profundidade máxima ($Z_{\max}$) a partir das fichas técnicas e batimetrias fornecidas por (ELETROBRÁS, 2025). Através de software de geoprocessamento, foram estimados o perímetro (M) e a largura máxima ($La_{\max}$). Por meio do levantamento dos dados e com base em (HAKANSON, 1981; WETZEL, 1991; SPERLING, 1999; HAKANSON, 2004; TUNDISI e TUNDISI, 2008), foram calculados os parâmetros morfométricos secundários de largura média ($L_{\text{méd}}$), profundidade média (Z), profundidade relativa (Z_r), índice de desenvolvimento de margem (D_s), índice de desenvolvimento de volume (D_v) e fator de envolvimento (F_e).

Foi realizado um furo de sondagem, no dia 23 de fevereiro de 2022 (Figura 1), utilizando amostrador manual de sedimento tubular de gravidade (testemunhador modelo Kajak-Brinkhurst K-B corer) com tubo de acrílico (~ 7 cm de diâmetro e ~ 50 cm de comprimento). Os sedimentos foram encaminhados ao Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN-Poços de Caldas/MG) e acondicionadas em um recipiente de acrílico (62 mm de diâmetro e 23 mm de altura), lacrado por até quatro semanas, tempo suficiente para assegurar o equilíbrio radioativo entre o ^{226}Ra e seus filhos ^{214}Pb e ^{214}Bi .

As amostras foram submetidas à análise por espectrometria gama usando um detector CANBERRA com cristal de germânio hiperpuro (HPGe), eficiência de 20% e software Genie 2000 de análise espectral. A determinação do ^{226}Ra foi realizada pelos fotopicos 609 keV e 1020 keV do ^{214}Bi e 351 keV do ^{214}Pb . Para a determinação do



^{210}Pb foi utilizado o fotopico em 46,5 keV. Os limites inferiores típicos de detecção para espectrometria gama são 3 Bq/kg para ^{226}Ra e ^{210}Pb .

A datação e a taxa de sedimentação foram determinadas com base em (GALE et al., 1995; STA MARIA et al., 2009; FERREIRA et al., 2015; RUSAKOV et al., 2024) utilizando o modelo CIC (*Constant Initial Concentration*). Segundo FERREIRA et al. (2015), o modelo CIC resulta em um valor médio de taxa de sedimentação para o período amostrado no testemunho sem variações temporais na taxa de sedimentação, próprias para a determinação de datação em reservatórios, cujas variações temporais são insignificantes perante o intervalo de tempo estudado através do radionuclídeo ^{210}Pb (cerca de 150 anos).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Reservatório de Retiro Baixo situa-se a 619 m acima do nível do mar, possui uma da área inundada (A_r) de 22,58 km² e um volume (V_r) de 0,24 km³ ($2,41 \times 10^8$ m³), inserindo-se na categoria de médio reservatório (10² a 10⁴ km² e 10⁸ a 10¹¹ m³) conforme TUNDISI e TUNDISI (2008), vide Tabela 1. O reservatório, cujo comprimento máximo ($L_{\max}$) é de 37,60 km, larguras máxima ($La_{\max}$) e média (L_{med}) de 2930,15 e 600,53 metros, respectivamente, é irregular alongado e orientado N-S, com inflexões para NE-SW (Figura 1). O formato juntamente com $La_{\max}$ e L_{med} , tratam-se de parâmetros importantes que, segundo HAKANSON (1981), influenciam nos contextos morfológicos de margem e estabelecem situações dinâmicas predominantes no fundo do reservatório (erosão-transporte-acumulação).

Os reservatórios artificiais podem apresentar profundidades máximas mais significativas, conforme dados de SPERLING (1999) para Itaipu com 170 m e Serra da Mesa com 150 m. No Reservatório de Três Marias, TUNDISI e TUNDISI (2008), encontraram uma profundidade máxima de 30 m e média de 6,8 m. O Reservatório de Retiro Baixo apresenta uma profundidade máxima ($Z_{\max}$) de 45 metros, média (Z) de 10,70 m e relativa (Z_r) de 0,84% (Tabela 1).

O perímetro (M) de 132,84 km e a área (A_r) de 22,58 km² indicam um desenvolvimento de margem (D_s) de 7,89, sugerindo margens de formato irregular. Para TUNDISI e TUNDISI (2008), lagos dendríticos muito irregulares tem valores entre 3 e 5 e, represas artificiais com padrão dendrítico acentuado e morfometria complexa



apresentam alto índice de desenvolvimento de margem. O índice de desenvolvimento de volume D_v é de 0,71, ou seja, forma convexa que apresenta certa relação com a profundidade relativa (Z_r) e juntamente com ($Z/Z_{\max} = 0,24$), expressam aspectos da forma de lagos que se aproximam de um formato em V.

Tabela 1. Parâmetros morfométricos referentes ao Reservatório de Retiro Baixo.

Parâmetros morfométricos	Símbolo	Dimensão	Valor
Área da Bacia do Rio Paraopeba	A_b	km^2	12054,25
Área do reservatório de Retiro Baixo	(A_r)	km^2	22,58
Comprimento máximo	$(L_{\max})$	km	37,60
Perímetro	(M)	km	132,84
Volume do reservatório	(V_r)	m^3	$2,41 \times 10^8$
Profundidade máxima	$(Z_{\max})$	m	45,00
Largura máxima	$(L_{\max})$	m	2930,15
Largura média	(L_{med})	m	600,53
Profundidade média	(Z)	m	10,70
Profundidade relativa	(Z_r)	%	0,84
Índice de desenvolvimento de margem	(D_s)	adimensional	7,89
Índice de desenvolvimento de volume	(D_v)	adimensional	0,71
Fator de envolvimento	(F_e)	adimensional	533,85

Outro índice importante calculado neste trabalho é o fator de envolvimento ($F_e = 533,85$) que indica que o reservatório é um ambiente de pequena dimensão ($A_r = 22,58 \text{ km}^2$) com uma grande área de contribuição ($A_b = 12054,25 \text{ km}^2$). Isto demonstra que a capacidade de diluição do reservatório pode ser pequena em relação à grande área de drenagem da bacia do Rio Paraopeba, estando propensa ao assoreamento e eutrofização.

Os resultados das análises de ^{210}Pb e ^{226}Ra e os dados de $\ln(^{210}\text{Pb}_{\text{xs}})$ calculados a partir da atividade do excesso de ^{210}Pb dos perfis de sedimentos são apresentados na Tabela 2. O comportamento vertical das atividades de ^{210}Pb e ^{226}Ra pode ser observado na Tabela 2 nas Figuras 2a e 2b com valores de ^{226}Ra variando de 104 a 80 Bq/kg com uma média de $92,7 \pm 5,4 \text{ Bq/kg}$ e ^{210}Pb de 145 a 92 Bq/kg com uma média de $115,3 \pm 10,1 \text{ Bq/kg}$.

O $^{210}\text{Pb}_{\text{total}}$ pelo seu decaimento radioativo deve possuir um comportamento exponencial ao longo do testemunho permanecendo com valores próximos aos de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (média de $22,6 \pm 8,6$). Os valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, calculado pela diferença entre a atividade dos radionuclídeos de ^{210}Pb e ^{226}Ra , não seguem um perfil de variação

exponencial ideal com a profundidade, mas em forma de potência ($R = 0,30$) com decréscimo não linear e curvado.

Tabela 2. Dados analíticos dos perfis de sedimentos do reservatório de Retiro Baixo.

Prof. média	²¹⁰ Pb	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb _{xs}		²¹⁰ Pb	²²⁶ Ra	Deposição	Tempo
(cm)	Bq/Kg		Bq/Kg	Ln	dpm/Kg		(ano)	
2,5	110 ± 16	104 ± 7	6	1,79	6600	6240	2018	4
7,5	145 ± 30	98 ± 8	47	3,85	8700	5880	2011	12
12,5	112 ± 26	90 ± 8	22	3,09	6720	5400	2003	19
17,5	92 ± 24	80 ± 8	12	2,48	5520	4800	1995	27
22,5	113 ± 28	93 ± 8	20	2,99	6780	5580	1988	34
27,5	121 ± 28	95 ± 8	26	3,25	7260	5700	1980	42
32,5	114 ± 30	89 ± 8	25	3,21	6840	5340	1972	50

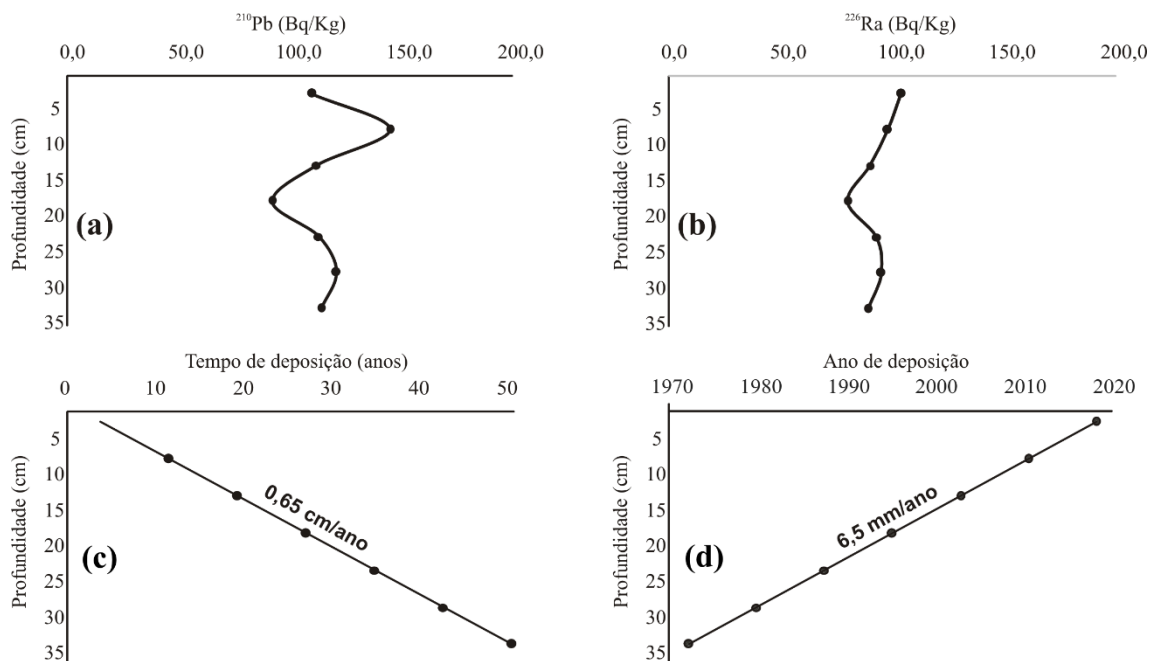


Figura 2. (a) ^{210}Pb em relação a profundidade. (b) ^{226}Ra em relação a profundidade. (c) Tempo de deposição em relação à profundidade. (d) Representação do ano de deposição dos sedimentos em relação à profundidade.

A taxa de sedimentação, considerando os dados da base (32,5 cm = 25 Bq/Kg de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) e do topo (2,5 cm = 6 Bq/Kg de $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) do perfil de sedimentos é de 0,65 cm/ano indicando uma deposição linear ($R =$) e constante de 6,5 mm/ano, considerando o método aplicado (Figura 2d). No entanto, levando-se em conta à profundidade de 2,5 a 12,5 cm, a taxa de sedimentação linear ($R = 0,40$) é de 2,4 mm/ano (equivalente até o



ano de 2003) e entre 17,5 a 32,5 cm ($R = 0,80$) de 8,5 mm/ano (equivalente até o ano de 1972) o que implicaria em novas datações tendo em vista as diferentes taxas adotadas. Adotou-se neste estudo, o valor médio de taxa de sedimentação de 0,65 cm/ano (Figura 2c) sem variações temporais na taxa de sedimentação e com intervalo de tempo estudado de 2018 a 1972 (Figura 2d).

Os resultados encontrados neste estudo podem fornecer novas percepções sobre as características morfométricas e a importância relativa da taxa de sedimentação em reservatórios artificiais, criados em vales fluviais por meio da construção de barragem, especialmente, para aqueles localizados em áreas geográficas semelhantes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou o levantamento das características morfométricas através de levantamentos primários e secundários do reservatório de Retiro Baixo, permitindo uma avaliação indireta sobre a sua dinâmica. Por outro lado, a taxa de sedimentação (0,65 cm/ano) e o tempo de deposição (2018 à 1972) em relação à profundidade permitiram o estudo da dinâmica de deposição de sedimentos, ainda que de maneira preliminar.

Estudos granulométricos, densidade e massa acumulada estão sendo realizados com o intuito de aplicar o modelo CRS (*Constant Rate of Supply*) para o cálculo e comparação das taxas de sedimentação, média e por profundidade, permitindo investigar mudanças na dinâmica da sedimentação, como a evolução da descarga de sedimentos em diferentes escalas de tempo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem os avaliadores anônimos do XV Simpósio Nacional de Geomorfologia e o Laboratório de Poços de Caldas (LAPOC) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pelas análises. Os autores também gostariam de agradecer os Programas de Pós Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) e Ciência e Engenharia Ambiental (PPGCEA) da Universidade Federal de Alfenas.

REFERÊNCIAS



- ANDA, J.; DÍAZ-TORRES, J.; GRADILLA-HERNÁNDEZ, M.S.; TORRE-CASTRO, L.M. Morphometric and water quality features of Lake Cajititlán, Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.191, 92. 2019.
- BARROSO, G.F.; GONÇALVES, M.A.; GARCIA, F.C. The Morphometry of Lake Palmas, a Deep Natural Lake in Brazil. **Plos One**, v.9, 11, 2014.
- ELETRÓBRAS - Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Sistema Furnas: Usina Retiro Baixo**. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/subsecao/131/usina-retiro-baixo?culture=pt>. Acesso em 05/02/2025.
- FERREIRA, P.A.L., CARDOSO-SILVA, S., POMPÊO, M., FIGUEIRA, R.C.L. **Capítulo 8 - Geocronologia e datação por radionuclídeos**, pp 109-119. In: Ecologia de reservatórios e interfaces, Marcelo Pompêo; Viviane Moschini-Carlos; Paula Yuri Nishimura; Sheila Cardoso da Silva; Julio Cesar López Doval. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2015.
- GALE, S.J., HAWORTH, R.J., PISANU, P.C. The 210Pb chronology of late Holocene deposition in an eastern Australian lake basin. **Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)**, v.14, 395-408, 1995.
- GONÇAVELS, M.A.; GARCIA, F.C.; BARROSO, G.F. Morphometry and mixing regime of a tropical lake: Lake Nova (Southeastern Brazil). **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.88, 1341-1356, 2016.
- HAKANSON, L. **A Manual of Lake Morphometry**. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1981.
- HAKANSON, L. **Lakes: Form and Function**. New Jersey: Blackburn, 2004.
- HAKANSON, L. The importance of lake morphometry and catchment characteristics in limnology – ranking based on statistical analyses. **Hydrobiologia**, v.541, 117–137, 2005.
- MORTATTI, J., HISSLER, C., PROBST, J.-L. Distribuição de metais pesados nos sedimentos de fundo ao longo da bacia do Rio Tietê. **Geologia USP. Série Científica**, v.10, 3-11, 2010.
- MOSES, S.A.; JANAKI, L.; JOSEPH, S.; JUSTUS, J.; VIMALA, S.R. Influence of lake morphology on water quality. **Environ Monit Assess**, v.182, 443–454, 2011.
- RUSAKOV, V.Y.; LUKMANOV, R.A.; SAVIN, A.S. About fluctuations in the excess 210Pb flux into the East Siberian Arctic Shelf sediments, the Laptev Sea, **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 273, 2024.
- SARDINHA, D. S., BRUCHA, G., BRETANHA JUNKER MENEZES, P. H., TEIXEIRA SILVEIRA, J., SALDANHA DE MELO, D. A., HIRATA GODOY, L., VERASSANI LAUREANO, F. Transporte fluvial do Rio Paraopeba (MG) a montante do Reservatório de Retiro Baixo: após o rompimento da Barragem de rejeitos B1. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.18, 771-787, 2025.
- SARDINHA, D.S.; PINTO, M.S.; MENEZES, P.H.B.J.; BRUCHA, G.; SILVEIRA, J.T.; GODOY, L.H.; DE MELO, D.A.S.; LAUREANO, F.V. Major, Trace and Rare Earth Elements Geochemistry of Bottom Sediments in the Retiro Baixo Reservoir after the B1 Tailings Dam Rupture, Paraopeba River (Brazil). **Minerals**, v14, 621, 2024.
- SPERLING, E.V. **Morfologia e lagos e represas**. 1ª ed. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 1999.
- STA. MARIA, E.J., SIRINGAN, F.P., BULOS, A.D.M., SOMBRITO, E.Z. Estimating sediment accumulation rates in Manila Bay, a marine pollution hot spot in the Seas of East Asia. **Marine Pollution Bulletin**, v.59, 164–174, 2009.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

TUNDISI, J.G.; TUNDISI, T.M. **Limnologia**. 1ª ed. São Paulo, Oficina de Textos: 2008.

WETZEL, R. G., LIKENS, G. E. **Limnological Analises**. 2nd. ed. New York: Springer Verlag, 1991.

WILKEN, R.D., MOREIRA. I., REBELLO, A. ^{210}Pb and ^{137}CS fluxes in a sediment core from Guanabara Bay, Brazil. **The Science of the Total Environment**, v.58, 195-198, 1986.

