



## INFLUÊNCIAS DO CLIMA NAS TAXAS DE SEDIMENTAÇÃO DE ALUMÍNIO NO PLANALTO DE POÇOS DE CALDAS (MG)

Diego de Souza Sardinha<sup>1</sup>

Letícia Hirata Godoy<sup>2</sup>

Rodrigo Leandro Bonifácio<sup>3</sup>

Heber Luiz Caponi Alberti<sup>4</sup>

Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes<sup>5</sup>

Antônio Donizetti Gonçalves de Souza<sup>6</sup>

Eveline Ramos<sup>7</sup>

### RESUMO

A exploração mineral é uma das grandes fontes de riqueza do município de Poços de Caldas, que atualmente conta com aproximadamente 13 empresas mineradoras operando em 96 lavras e uma empresa produtora de alumínio primário. Os depósitos de bauxita se localizam, em sua maioria, no norte do Planalto de Poços de Caldas, em uma área praticamente contínua no dique anelar da caldeira vulcânica. Já no interior do Planalto, estes estão distribuídos numa região de argilas residuais, sendo o principal mineral a gibbsita, acompanhado de óxidos e hidróxidos de alumínio, provenientes da alteração das rochas alcalinas. A bacia hidrográfica do Ribeirão das Antas possui suas nascentes localizadas na borda sul da caldeira vulcânica, a aproximadamente 1.600 m de altitude, e num percurso aproximado de 50 km a norte, drena uma área de cerca de 380 km<sup>2</sup> antes de formar o reservatório Bortolan a cerca de 1.250 m de altitude. O reservatório foi inaugurado em 1956 e tem capacidade para armazenar um volume aproximado de 7 milhões m<sup>3</sup> de água, alagando uma área de 3,45 km<sup>2</sup>. A região sudeste do Brasil sofreu durante os verões 2013/2014 e 2015/2016 importantes déficits de precipitação, resultando em condições de seca e baixas vazões no Ribeirão das Antas e conseqüentemente no reservatório Bortolan. Utilizando amostrador manual de sedimento tubular de gravidade (testemunhador modelo Kajak-Brinkhurst K-B corer), amostras de sedimentos de fundo foram coletadas no dia 24 de outubro de 2023, perto do vertedouro ou zona lacustre (11 amostras de 0 a 55 cm). As amostras foram submetidas à análise de alumínio por ICP-OES, <sup>210</sup>Pb e <sup>226</sup>Ra 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 seqüência sedimentar, há uma mesma atividade não suportada de <sup>210</sup>Pb no momento da sua deposição. Os valores de <sup>226</sup>Ra variam de 227 a 130 Bq/kg com uma média de 196 ± 18 Bq/kg e os de <sup>210</sup>Pb de 330 a 176

<sup>1</sup> Professor do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas - MG, [diego.sardinha@unifal-mg.edu.br](mailto:diego.sardinha@unifal-mg.edu.br);

<sup>2</sup> Doutora pelo Curso de Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - SP, [leticiahirata@gmail.com](mailto:leticiahirata@gmail.com);

<sup>3</sup> Pesquisador da Comissão Nacional de Energia Nuclear, Laboratório de Poços de Caldas - MG, [rodrigo.bonifacio@cnen.gov.br](mailto:rodrigo.bonifacio@cnen.gov.br);

<sup>4</sup> Pesquisador da Comissão Nacional de Energia Nuclear, Laboratório de Poços de Caldas - MG, [heber.alberti@cnen.gov.br](mailto:heber.alberti@cnen.gov.br);

<sup>5</sup> Professor do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas - MG, [paulo.menezes@unifal-mg.edu.br](mailto:paulo.menezes@unifal-mg.edu.br);

<sup>6</sup> Professor do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas - MG, [adonizetti@unifal-mg.edu.br](mailto:adonizetti@unifal-mg.edu.br);

<sup>7</sup> Técnica de laboratório na área de Química e mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas - MG, [eveline.ramos@unifal-mg.edu.br](mailto:eveline.ramos@unifal-mg.edu.br);



Bq/kg com uma média de  $290 \pm 29$  Bq/kg. Os valores de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$  (média de  $93,4 \pm 19,8$ ) indicam que o tempo de deposição da camada sedimentar, obtido com referência ao ano de amostragem dos sedimentos (2023) corresponde a 34 anos. A taxa de sedimentação linear e o tempo de deposição em relação à profundidade de 2,5 a 7,5 cm foi de 1,68 cm/ano (equivalente ao ano de 2018) e de 12,5 a 52,5 cm de 1,35 cm/ano (equivalente ao ano de 1989). As concentrações de Al variaram de  $107 \times 10^3$  mg/kg na profundidade de 12,5 cm (equivalente ao ano de 2015) a  $67,9 \times 10^3$  mg/kg na profundidade de 17,5 cm (equivalente ao ano de 2012), ou seja, durante e antes do início da estiagem severa e déficits de precipitação na região. Os resultados indicam como o clima pode exercer uma influência significativa nas taxas de sedimentação, afetando a produção e transporte de sedimentos na bacia do Ribeirão das Antas.

**Palavras-chave:** Seca severa, Reservatório Bortolan, Tempo de deposição.

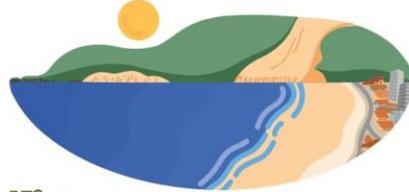
## INTRODUÇÃO

A caldeira vulcânica de Poços de Caldas está localizada na região Sul do estado de Minas Gerais (Figura 1), abrangendo os municípios de Águas da Prata (SP), Andradas, Caldas (MG) e Poços de Caldas (MG). A região possui uma formação geológica rica em bauxita com depósitos que tem como principal mineral a gibbsita, acompanhado de óxidos e hidróxidos de alumínio, provenientes da alteração das rochas alcalinas.

A extração da bauxita é normalmente realizada em pequenas covas com vida útil da mina entre 2 e 8 anos, em áreas de até 50 hectares e produções de minério entre 15.000 e 20.000 toneladas/mês e o uso da terra antes da mineração é predominantemente agrícola em uma paisagem com áreas de florestas nativas que atualmente não são mineradas (MELO e SANCHES, 2020, p. 247).

Segundo BARROS et al. (2012), a mineração de bauxita implica na retirada do horizonte A, bem como das camadas do subsolo, em especial os horizontes B e C comprometendo o perfil topográfico com o rebaixamento da cota e a permeabilidade do restante do terreno. As evidências encontradas em algumas minas reabilitadas na região de Poços de Caldas, de acordo com MELO e SANCHES (2020), indicam uma série de problemas recorrentes, como erosão do solo e sedimentação de riachos resultantes do rápido escoamento superficial.

A região sudeste do Brasil sofreu durante os verões 2013/2014 e 2014/2015 importantes déficits de precipitação, resultando no estabelecimento de condições de seca e uma crítica crise de água com impactos em diversos setores da sociedade, incluindo o abastecimento humano, agricultura e a geração de energia hidrelétrica (COELHO et al., 2016, p. 3737). Conforme MARENGO et al. (2016) no ano de 2014,



## 15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

um bloqueio atmosférico foi responsável simultaneamente pela crise hídrica do Sudeste e pelas inundações históricas no sul da Amazônia e durante 2015, a atuação de um novo sistema de alta pressão, embora mais fraco e curto, não permitiu a recuperação da umidade do solo gerando um “círculo vicioso” no ciclo hidrológico.

A bacia hidrográfica do Ribeirão das Antas possui suas nascentes localizadas na borda sul da caldeira vulcânica, a aproximadamente 1.600 m de altitude, e num percurso aproximado de 50 km a norte, drena uma área de cerca de 380 km<sup>2</sup> antes de formar o reservatório Bortolan a cerca de 1.250 m de altitude (Figura 1). O reservatório foi inaugurado em 1956 e com o objetivo de regularizar a vazão para Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), mas também se tornou um local de usos múltiplos, sendo também utilizada para lazer, esportes náuticos e pesca. Atualmente tem a capacidade para armazenar um volume aproximado de 7 milhões m<sup>3</sup> de água, alagando uma área de 3,45 km<sup>2</sup>.

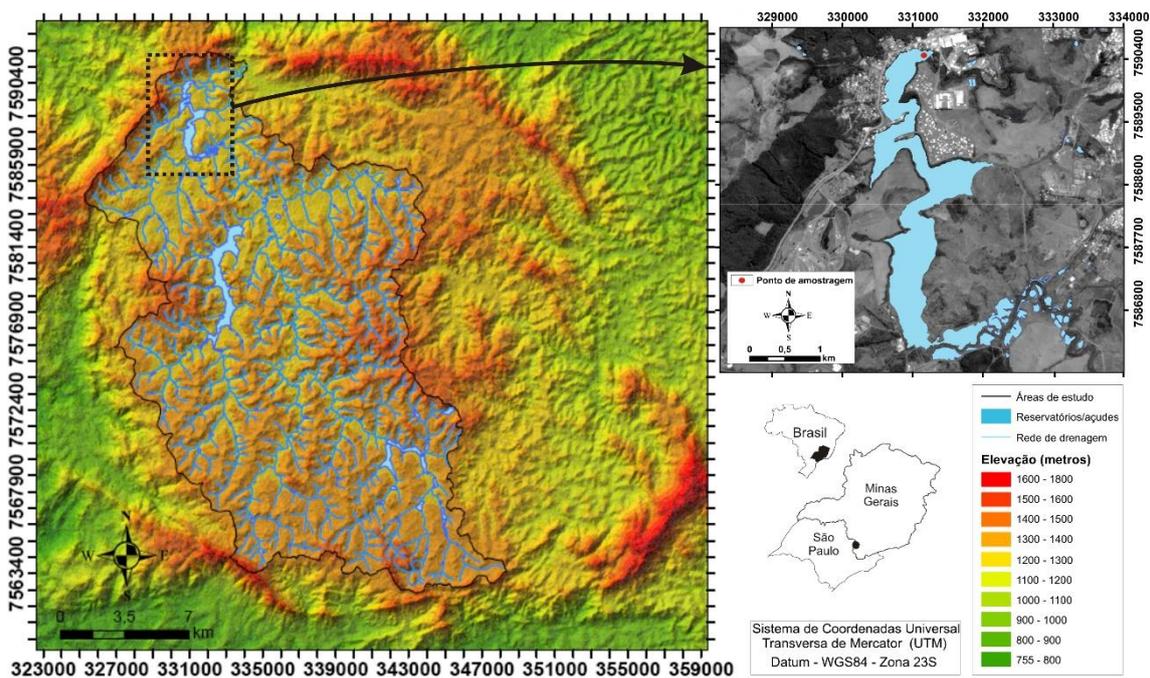


Figura 1. Localização da área de estudo com detalhe para a Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas, área de influência da bacia do Ribeirão das Antas e reservatório Bortolan.

Como a região sudeste do Brasil sofreu durante os verões 2013/2014 e 2014/2015 importantes déficits de precipitação, resultando em condições de seca e baixas vazões no Ribeirão das Antas, o presente estudo tem como objetivo a



investigação das influências do clima nas taxas de sedimentação de alumínio no reservatório Bortolan, localizado no planalto de Poços de Caldas (MG).

## MATERIAIS E MÉTODOS

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). Uma parte da alíquota passou por digestão ácida assistida por micro-ondas e Espectrometria por Plasma com Emissão Ótica - ICP-OES para determinação das concentrações de alumínio. Outra parte foi 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  $^{226}\text{Ra}$  e seus filhos  $^{214}\text{Pb}$  e  $^{214}\text{Bi}$ .

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  $^{226}\text{Ra}$  foi realizada pelos fotopicos 609 keV e 1020 keV do  $^{214}\text{Bi}$  e 351 keV do  $^{214}\text{Pb}$ . Para a determinação do  $^{210}\text{Pb}$  foi utilizado o fotopico em 46,5 keV. Os limites inferiores típicos de detecção para espectrometria gama são 3 Bq/kg para  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{210}\text{Pb}$ .

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  $^{210}\text{Pb}$  (cerca de 150 anos).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na região de Poços de Caldas há dois períodos de precipitação distintos, o período chuvoso, que vai de outubro a março, e o seco, que vai de abril a setembro (Figura 2a). No período chuvoso é registrado cerca de 80% (1218 mm) da precipitação anual total e no seco os 19% restantes (296 mm).

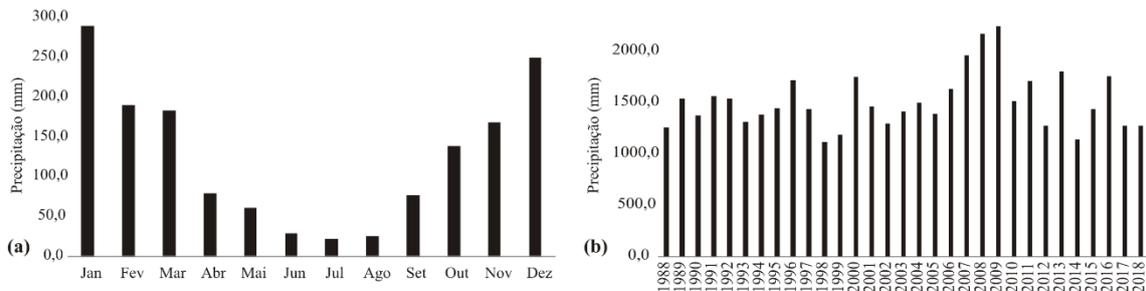


Figura 2. a) Precipitação média mensal entre 1988 e 2018. b) Precipitação média anual entre 1988 e 2018. Dados com base nas estações pluviométricas do Laboratório de Poços de Caldas (Lapoc) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e da Universidade Federal de Alfenas (Unifal), Campus de Poços de Caldas.

A média de precipitação total anual, durante o período de 1988 à 2018 foi de 1514 mm. Os anos com maiores volumes de precipitações foram 2009 (2248 mm), 2008 (2170 mm), 2007 (1960 mm) e 2016 com (1761 mm) e os menores 1998 (1120 mm), 2014 (1141 mm), 1999 (1188 mm) e 1988 com (1257 mm), conforme a Figura 2b. A Figura 2b também indica que a região, com base no período de estudo, apresenta déficits de precipitação semelhantes a 2013/2014 e 2014/2015 como observados em 1988/1989 e 1998/1999.

A abundância de chuvas da região favorece o intemperismo químico com lixiviação dos cátions básicos (Ca, Mg, K, Na) e silício que são liberados durante a alteração dos minerais e o ambiente oxidante favorece a formação de óxidos de ferro e de alumínio, que tendem a se acumular. Conforme MONIZ (1969) a seqüência de argilas formadas pela ação do intemperismo a partir das rochas alcalinas encontradas no planalto de Poços de Caldas é de mica e caulinita, sendo a gibbsita e hidróxidos de alumínio os principais minerais encontrados nos perfis bauxíticos.

Apesar das cavas de mineração causarem impactos ambientais, não representam grandes áreas, quando comparadas com as atividades de agricultura e pecuária na bacia do Ribeirão das Antas que, juntamente com os processos de intemperismo químico,

podem contribuir com a produção e composição dos sedimentos transportados e depositados no reservatório Bortolan. Conforme observado na Tabela 1, as concentrações de alumínio variam de  $107 \times 10^3$  mg/kg na profundidade de 12,5 cm a  $67,9 \times 10^3$  mg/kg na profundidade de 17,5 cm com média de  $81,0 \times 10^3$  mg/kg  $\pm 9,9 \times 10^3$  mg/kg.

A concentrações de  $^{226}\text{Ra}$  variam de 104 a 80 Bq/kg com uma média de  $92,7 \pm 5,4$  Bq/kg e  $^{210}\text{Pb}$  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  $93,4 \pm 19,8$ ) indicam que o tempo de deposição da camada sedimentar, obtido com referência ao ano de amostragem dos sedimentos (2023) corresponde a 34 anos (Tabela 1).

A taxa de sedimentação, considerando os dados da base (52,5 cm = 128 Bq/Kg de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) e do topo (2,5 cm = 80 Bq/Kg de  $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ ) do perfil de sedimentos é de 1,55 cm/ano indicando uma deposição exponencial ( $R = 0,50$ ) de 15,5 mm/ano, considerando o método aplicado. No levando-se em conta uma taxa de sedimentação linear e o tempo de deposição em relação à profundidade de 2,5 a 7,5 cm, a taxa é de 1,68 cm/ano ou 16,8 mm ( $R = 1,0$  equivalente aos anos de 2018 à 2023) e em 12,5 a 52,5 cm de 1,35 cm/ano ou 13,5 mm ( $R = 0,63$  equivalente aos anos de 1989 à 2015), conforme a Figura 3a.

Tabela 1. Dados analíticos dos perfis de sedimentos do reservatório Bortolan.

Prof. Média	Al	$^{210}\text{Pb}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{226}\text{Ra}$	Deposição	Tempo	
cm	mg/kg	Bq/Kg	Bq/Kg	Ln	dpm/Kg		(ano)		
2,5	85000	$270 \pm 51$	$190 \pm 22$	80	4,38	16200	11400	2021	2
7,5	80800	$314 \pm 39$	$227 \pm 19$	87	4,47	18840	13620	2018	5
12,5	107000	$176 \pm 28$	$130 \pm 14$	46	3,83	10560	7800	2015	8
17,5	67900	$298 \pm 39$	$226 \pm 23$	72	4,28	17880	13560	2012	11
22,5	78100	$300 \pm 40$	$219 \pm 23$	81	4,39	18000	13140	2008	15
27,5	78200	$271 \pm 51$	$185 \pm 22$	86	4,45	16260	11100	2005	18
32,5	85400	$329 \pm 34$	$195 \pm 29$	134	4,9	19740	11700	2002	21
37,5	71200	$284 \pm 27$	$188 \pm 23$	96	4,56	17040	11280	1999	24
42,5	69100	$330 \pm 32$	$205 \pm 27$	125	4,83	19800	12300	1996	27
47,5	77400	$299 \pm 40$	$206 \pm 26$	93	4,53	17940	12360	1992	31
52,5	86500	$318 \pm 28$	$190 \pm 24$	128	4,85	19080	11400	1989	34

Quando comparadas as concentrações de alumínio com o ano de deposição em relação à profundidade (Figura 3b) e os dados históricos de precipitação da Figura 2b

observa-se que, após dois eventos e/ou períodos com menores índices pluviométricos, de 1988 (1257 mm) e 2014 (1141 mm) as concentrações de alumínio nos sedimentos tendem a aumentar nos anos seguintes. Outro ponto verificado neste estudo, são os anos de 1998 (1120 mm) e 1999 (1188 mm), onde as concentrações de alumínio também tendem a aumentar nos sedimentos datados após os eventos de pouca precipitação, como no ano de 2002 (Figura 3b).

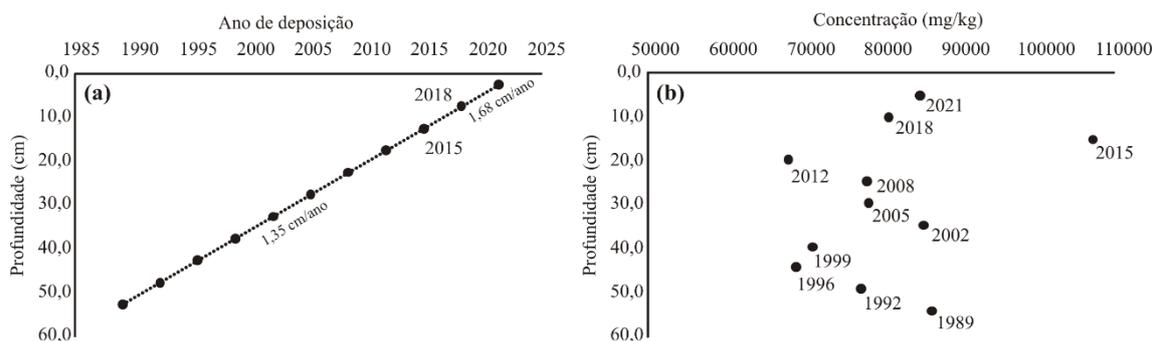


Figura 3. (a) Representação do ano de deposição dos sedimentos em relação à profundidade. (b) Representação da concentração de alumínio com o ano de deposição em relação à profundidade.

Os índices pluviométricos, após os eventos de baixa precipitação nos anos de 1988, 1998, 1999 e 2014 foram: 1989 (1538 mm), 2000 (1748 mm) e 2015 (1438 mm). Os fatos, ainda que de maneira preliminar, podem contribuir para responder se os pulsos de maiores e menores valores de precipitação podem influenciar no transporte e deposição de elementos químicos, principalmente o alumínio no reservatório Bortolan em Poços de Caldas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho realizou a análise de alumínio em amostras de sedimentos de fundo do reservatório Bortolan, localizado no baixo curso da bacia hidrográfica do Ribeirão das Antas. A região da bacia possui diversas cavas de mineração de bauxita com depósitos que tem como principal mineral a gibbsita, acompanhado de óxidos e hidróxidos de alumínio, provenientes da alteração das rochas alcalinas. Apesar das cavas de mineração, atividades de agricultura, pecuária e os processos de intemperismo



químico, também podem contribuir com a produção e composição de alumínio nos sedimentos transportados e depositados no reservatório, cujas concentrações variam de  $107 \times 10^3$  mg/kg na profundidade de 12,5 cm a  $67,9 \times 10^3$  mg/kg na profundidade de 17,5 cm com média de  $81,0 \times 10^3$  mg/kg  $\pm$   $9,9 \times 10^3$  mg/kg.

As taxas de sedimentação de 16,8 mm (equivalente aos anos de 2018 à 2023) e de 13,5 mm (equivalente aos anos de 1989 à 2015), em relação a 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.

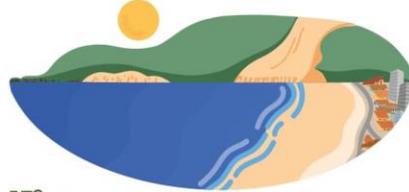
Além disso, dados climáticos de temperatura, precipitação e evapotranspiração, uso da terra em relação ao tempo, vazão de entrada e saída do reservatório, conjuntamente com mais análises geoquímicas em diferentes pontos de amostragem também devem ser realizadas para avaliar se o clima realmente possui alguma influência nas taxas de sedimentação de alumínio no planalto de Poços de Caldas (MG).

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (Processo 402613/2023-6), 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

BARROS, D.A.; GUIMARÃES, J.C.C.; PEREIRA, J.A.A.; BORGES, L.A.C.; SILVA, R.A.; PEREIRA, A.A.S. Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas alkaline massif and its socioenvironmental impacts. **REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto**, v.65, 127-133, 2012.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE  
**GEOMORFOLOGIA**

- MELO, C.E.S.; SÁNCHEZ, L.E. Evaluation of environmental rehabilitation practices in bauxite mining at the plateau of Poços de Caldas. **REM: Int. Eng. J., Ouro Preto**, v.73, 247-252, 2020.
- COELHO, C.A.S.; DE OLIVEIRA, C.P.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M.S.; CARPENEDO, C.B.; CAMPOS, J.L.P.S.; TOMAZIELLO, A.C.N.; PAMPUCH, L.A.; CUSTÓDIO, M.S.; DUTRA, L.M.M.; DA ROCHA, R.P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v.46, 3737-3752, 2016.
- MARENGO, J.A.; NOBRE, C.A.; SELUCHI, M.E.; CUARTAS, A.; ALVES, L.M.; MENDIONDO, E.M.; OBREGÓN, G.; SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, v.106, 31-44, 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.
- STA. MARIA, E.J., SIRINGAN, F.P., BULOS, A.DM., 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.
- 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.
- 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.
- MONIZ, A.C. **Estudo mineralógico de argilas do Maciço Alcalino de Poços de Caldas**. Boletins da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 138p, 1969,