AVALIAÇÃO DO POTENCIAL FITOTÓXICO DE SEDIMENTOS DO ESTUÁRIO DO RIO DOCE ATRAVÉS DO BIOENSAIO COM *Allium cepa* L.

Márcio Vinícius Vidal Cypriano Silva[1], Échily Sartori[1], Carlos Eduardo de Rezende[1], Cristiane dos Santos Vergilio[2], Diego Lacerda[1]

[1]Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Biociências e Biotecnologia, Avenida Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia - 28013-602 - Campos dos Goytacazes-RJ, Brasil, marcioviniciusvidal2006@gmail.com, echilysartori1@gmail.com, crezende@uenf.br, diegolacerda@uenf.br.
[2]Laboratório de Ecotoxicologia, Departamento de Biologia, Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Universidade Federal do Espírito Santo, Campus Alegre. Alto Universitário, S/N Guararema, Alegre - ES, 29500-000, Brasil, cristianesvergilio@gmail.com.

Resumo
O rompimento da barragem de Fundão provocou a liberação de rejeitos de mineração que atingiram a bacia do Rio Doce e seu estuário. Este estudo avaliou a variação temporal das concentrações de metais e as respostas fitotóxicas associadas a sedimentos do estuário do Rio Doce coletados em 2016, 2019 e 2022, utilizando o bioensaio com *Allium cepa* L. Também foi analisada uma amostra de rejeito de Bento Rodrigues – local de rompimento da barragem – coletada em 2016. Foram determinadas as concentrações dos metais nos sedimentos, além da taxa de germinação e do comprimento radicular. Os resultados evidenciaram variação temporal nas concentrações com aumento acentuado de Cr, Ni, Cu, Pb e As em 2019, em relação a 2016 e ao rejeito, e redução em 2022. Fe, Mn e Zn permaneceram elevados mesmo em 2022. A taxa de germinação apresentou pouca variação entre os tratamentos, enquanto o menor comprimento radicular médio foi observado nas sementes expostas ao sedimento de 2019. Os resultados demonstram mudanças temporais na composição química dos sedimentos e no potencial fitotóxico, indicando a importância do monitoramento de longo prazo e da integração de análises químicas e respostas biológicas.

Palavras-chave: Ecotoxicologia. Biogeoquímica ambiental. Rejeitos de mineração. Poluição hídrica.

Área do Conhecimento: Ciências Biológicas - Ecologia.

Introdução

No dia 5 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, da mineradora Samarco, em Mariana (MG). Os rejeitos da mineração formaram uma onda de lama que afetou diretamente 663 km no Rio Doce e seus afluentes, chegando ao seu estuário, em Linhares (ES), em 21/11/2015 (IBAMA, 2016). O material liberado pelo rompimento da barragem era composto principalmente de areia e argila, com predominância de elementos como Fe, Al, Mn e Ti. Outros elementos potencialmente tóxicos também foram detectados como U, Cd, Pb, As, Sn e Hg, porém em menores quantidades (Queiroz *et al.*, 2018; Segura *et al.*, 2016).

Após sua entrada no sistema fluvial, esses materiais passaram a estar sujeitos a processos de transporte, deposição e remobilização, capazes de modificar sua distribuição e composição ao longo do tempo. Estudos realizados no Rio Doce após o rompimento demonstraram alterações temporais nas concentrações de metais e metaloides nos sedimentos, indicando que os impactos não devem ser avaliados apenas imediatamente após o desastre (Duarte *et al.*, 2021; Sá *et al.*, 2021; Vergilio *et al.*, 2021). Nesse contexto, o acompanhamento de sedimentos coletados em diferentes anos é importante para compreender a persistência e a evolução das alterações químicas no estuário e seus possíveis efeitos biológicos.

Entretanto, a caracterização química dos sedimentos, isoladamente, não permite determinar diretamente seus efeitos sobre os organismos, uma vez que as concentrações totais dos elementos não representam necessariamente sua fração biodisponível. A integração de análises químicas com bioensaios constitui, portanto, uma abordagem complementar para avaliar possíveis efeitos tóxicos associados aos sedimentos. Entre os organismos utilizados para essa finalidade, *Allium cepa* L. apresenta vantagens como facilidade de manipulação em laboratório e a possibilidade de avaliar

respostas como germinação, crescimento radicular, índice mitótico, aberrações cromossômicas e formação de micronúcleos (Barbério *et al.*, 2009; Leme; Marin-Morales, 2009).

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a variação temporal da composição elementar (Fe, Al, Ti, Mn, Ba, Zn, Cr, Ni, Cu, Pb, Cd e As) e dos efeitos biológicos associados a sedimentos do estuário do Rio Doce coletados em 2016, 2019 e 2022. Para isso, foram determinadas as concentrações de elementos nos sedimentos e avaliadas as respostas fitotóxicas em *A. cepa*. Uma amostra de rejeito coletada em Bento Rodrigues em 2016 também foi utilizada como referência para comparação com os sedimentos estuarinos.

Metodologia

Todas as amostras de sedimento utilizadas neste estudo haviam sido previamente coletadas no estuário do Rio Doce, em Linhares (ES), nos anos de 2016, 2019 e 2022. Adicionalmente, foi utilizada uma amostra de rejeito coletada em Bento Rodrigues, Mariana (MG), em 2016 (Tabela 1). As amostras foram armazenadas no Laboratório de Ciências Ambientais (LCA/UENF) até a realização das análises.

Tabela 1 - Localização, data de coleta e características das amostras de sedimento do estuário do Rio Doce e do rejeito de Bento Rodrigues utilizadas nos bioensaios com *Allium cepa*.

Município	Local	Data de Coleta	Fração granulométrica	Latitude	Longitude
Linhares	Estuário do Rio Doce	13/02/2022	< 2mm	-19,645889	-39,823194
Linhares	Estuário do Rio Doce	25/11/2019	< 2mm	-19,650222	-39,81525
Linhares	Estuário do Rio Doce	19/05/2016	< 2mm	-19,645889	-39,823194
Mariana	Bento Rodrigues	19/05/2016	< 2mm	-20,238501	-43,421401

Fonte: Autores, 2026.

Para a determinação dos elementos (Fe, Al, Ti, Mn, Ba, Zn, Cr, Ni, Cu, Pb, Cd e As), as amostras superficiais de sedimento foram peneiradas, utilizando-se a fração menor que 2 mm, e posteriormente homogeneizadas. Aproximadamente 0,5 g de sedimento seco foram submetidos à digestão ácida em forno de micro-ondas, conforme o método US EPA 3052, utilizando ácido nítrico a 65%, ácido fluorídrico a 48% e ácido clorídrico a 37%. Após a digestão, foi adicionada solução de ácido bórico a 4% para complexação do HF residual. Os extratos foram filtrados e o volume completado para 50 mL com HNO_3 0,5 mol L^{-1}. As concentrações dos elementos foram determinadas por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). A qualidade analítica foi verificada por meio de brancos e do material de referência certificado NIST 1646a (Estuarine Sediment).

Para a preparação dos elutriatos, sedimento e água ultrapura foram misturados na proporção de 1 g de sedimento para 4 mL de água durante 2 h em agitação (150 rpm). Após esse período, as suspensões permaneceram em decantação por aproximadamente 40 min, sendo a fase líquida utilizada nos bioensaios.

Os bioensaios foram realizados utilizando sementes de *A. cepa*, variedade Baia Herval, seguindo protocolo previamente estabelecido para avaliação da toxicidade de sedimentos. As sementes foram distribuídas em placas de Petri contendo papel-filtro umedecido com os respectivos elutriatos e mantidas em câmara de germinação a 24 °C, na ausência de luz, durante 72 h (Da Silva Souza *et al.*, 2024). O tratamento Controle foi preparado com água ultrapura e mantido nas mesmas condições experimentais. Foram distribuídas aproximadamente 25 sementes em cada placa de Petri.

Após 72 h de exposição, foram determinadas a taxa de germinação (TG) e o comprimento radicular (CR). A TG foi calculada pela razão entre o número de sementes germinadas e o número total de sementes em cada placa, expressa em porcentagem. Para determinação do CR, as raízes foram

posicionadas sobre papel quadriculado e fotografadas, sendo seus comprimentos mensurados utilizando o software ImageJ, versão 1.54p.

As diferenças no comprimento radicular entre o Controle, o rejeito de Bento Rodrigues de 2016 e os sedimentos estuarinos de 2016, 2019 e 2022 foram avaliadas por análise de variância de uma via (ANOVA), considerando o tratamento como fator. Quando aplicável, comparações múltiplas entre os grupos foram realizadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Resultados

Quantificação dos Metais

Os resultados evidenciaram variações temporais tanto na composição elementar dos sedimentos do estuário do Rio Doce quanto nas respostas fitotóxicas de *A. cepa*. Inicialmente, foram observadas diferenças nas concentrações dos elementos entre os anos avaliados e em relação ao rejeito de Bento Rodrigues. No estuário, as concentrações de Cr, Ni, Cu, Pb e As aumentaram acentuadamente em 2019 e diminuíram em 2022. A presença de Fe, Mn e Zn aumentou em 2019 e permaneceu alta em 2022. O valor de Al apresentou sua maior quantidade em 2022, tendo aumentado já em 2019. O Ba diminuiu em 2019, porém aumentou em 2022. O rejeito de Bento Rodrigues de 2016 apresentou concentrações elevadas de Fe, Mn, Ti e Ba (Tabela 2).

Tabela 2 - Concentrações totais de elementos no rejeito de Bento Rodrigues e sedimentos do estuário do Rio Doce, coletadas em 2016, 2019 e 2022. Fe, Al e Ti são expressos em mg g^{-1}, os demais elementos em µg g^{-1}. O símbolo "<" indica concentração abaixo do limite de quantificação.

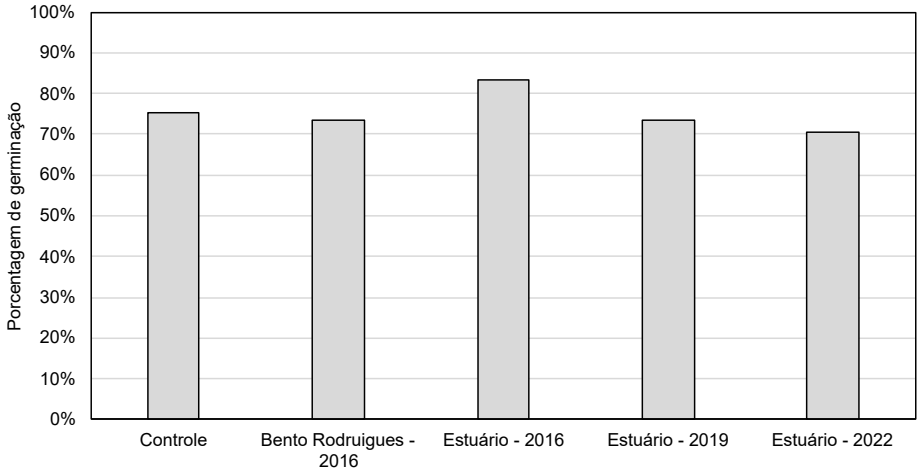
Elemento	Bento Rodrigues	Estuário		
Ano	**2016**	**2016**	**2019**	**2022**
Fe	286,6	9,8	34,2	32,7
Al	22,5	8,2	24,3	44,3
Ti	485,8	171,0	438,9	332,4
Mn	665,7	47,6	292,7	286,8
Ba	140,8	130,5	106,6	152,9
Zn	31,4	9,0	37,8	40,7
Cr	36,7	7,0	166,4	38,5
Ni	9,5	2,7	54,5	13,1
Cu	3,9	3,0	32,5	9,3
Pb	8,3	3,3	20,8	6,6
Cd	4,2	0,4	0,9	0,7
As	<0.900	<0.900	51,2	11,0

Fonte: Autores, 2026.

Fitotoxicidade

A taxa de germinação (TG) apresentou pouca variação entre os tratamentos, com valores entre 71% e 83%. A maior TG foi observada no sedimento estuarino de 2016 (83%), seguida pelo Controle (75%), pelo rejeito de Bento Rodrigues (73%) e pelo sedimento estuarino de 2019 (73%). O menor valor foi registrado no sedimento estuarino de 2022 (71%) (Figura 1).

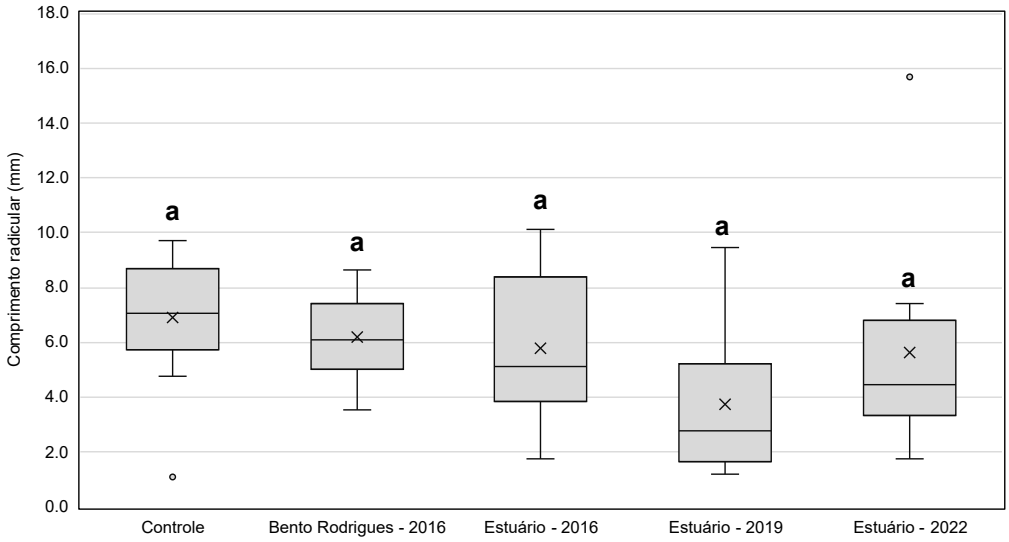
Figura 1 - Taxa de germinação (%) de sementes de *Allium cepa* expostas ao Controle, ao rejeito de Bento Rodrigues (2016) e aos sedimentos do estuário do Rio Doce coletados em 2016, 2019 e 2022.



Fonte: Autores, 2026.

O menor comprimento radicular (CR) médio foi observado no sedimento estuarino de 2019 (3,74), enquanto em 2022 o valor médio se deu em 5,61, aproximando-se do registrado em 2016 (5,80) (Figura 2). No entanto, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos (ANOVA; p = 0,202), e o teste de Tukey não indicou diferenças significativas entre os pares de grupos (p > 0,05).

Figura 2 - Distribuição do comprimento radicular (mm) de *Allium cepa* exposta ao Controle, ao rejeito de Bento Rodrigues (2016) e aos sedimentos do estuário do Rio Doce coletados em 2016, 2019 e 2022. As caixas representam o intervalo interquartil, a linha interna a mediana, o símbolo "×" a média e os círculos os valores discrepantes. Letras iguais indicam ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey (p > 0,05).



Fonte: Autores, 2026.

Discussão

De maneira geral, os sedimentos do estuário do Rio Doce apresentaram uma mudança discrepante nas concentrações de elementos entre 2016, 2019 e 2022. As maiores quantidades de diferentes elementos foram observadas em 2019, período que também obteve a menor taxa de crescimento radicular. Em 2022, houve redução de alguns elementos em comparação com 2019, embora alguns valores permaneçam acima de 2016 e do rejeito.

As concentrações dos elementos no estuário não apresentaram uma variação temporal uniforme. Fe, Mn e Zn aumentaram em 2019 e permaneceram em valores próximos em 2022, enquanto Cr, Ni, Cu, Pb e As apresentaram alto valor em 2019 e uma redução acentuada em 2022. Os níveis de Ba e Al apresentaram seus maiores valores em 2022, após já terem aumentado em 2019. Esta alta variância sugere que diferentes grupos de elementos podem responder de maneira diferente aos processos de transporte, deposição e remobilização do sedimento. Estudos anteriores no Rio Doce também identificaram grupos de metais com perfis espaciais e temporais semelhantes, associados à deposição do material particulado e à dinâmica sedimentar após o rompimento da barragem (Duarte *et al.* 2021; Sá *et al.* 2021; Vergilio *et al.* 2021).

O rejeito de 2016 apresentou quantidades de Fe, Mn, Cd e Ti superiores ao estuário em todos os anos. Esse resultado é coerente com a proximidade de Bento Rodrigues em relação à fonte dos rejeitos. Vergilio *et al.* (2021) observaram que as maiores concentrações de metais nos sedimentos foram encontradas nas áreas mais próximas ao local do rompimento, embora o transporte fluvial tenha distribuído o material por toda a bacia do estuário.

Por outro lado, alguns elementos apresentaram concentrações no estuário superiores às observadas no rejeito, especialmente em 2019. Dessa forma, a distribuição dos metais não pode ser explicada apenas pela distância em relação à barragem, mas também pelos processos de transporte, deposição e remobilização dos sedimentos ao longo da bacia. No ambiente estuarino, características granulométricas e condições redox e a variação de maré também podem modificar a retenção e a mobilidade dos elementos, influenciando suas concentrações nos sedimentos ao longo do tempo (Sá *et al.*, 2021; Queiroz *et al.*, 2021).

A taxa de germinação apresentou pouca variação entre os tratamentos, sugerindo que esse parâmetro foi pouco sensível às diferenças entre os sedimentos avaliados. Em contraste, o comprimento radicular apresentou maior variação, com o menor valor médio observado no sedimento estuarino de 2019. Embora as raízes expostas às amostras de 2022 tenham apresentado maior comprimento médio em relação a 2019, aproximando-se dos valores observados em 2016, essas diferenças não foram estatisticamente significativas. O crescimento radicular é considerado um parâmetro sensível para avaliação de fitotoxicidade em *A. cepa*, podendo ser reduzido pela exposição a diferentes metais e misturas de contaminantes (Cunha Neto *et al.*, 2023). Estudos experimentais demonstram, por exemplo, redução do crescimento radicular de *Allium cepa* após exposição a Cu, Cd, Pb, Ni e outros metais.

O menor comprimento radicular médio ocorreu no tratamento com o sedimento estuarino de 2019, que também apresentou as maiores concentrações de Cr, Ni, Cu, Pb e As entre as amostras do estuário. Essa correspondência temporal é compatível com uma possível contribuição desses elementos para a resposta observada, mas não permite estabelecer uma relação causal ou atribuir a fitotoxicidade a um metal específico. Além da exposição ocorrer a uma mistura de elementos, as concentrações totais determinadas no sedimento não representam necessariamente a fração disponível para os organismos. A mobilidade e a biodisponibilidade dos metais podem ser modificadas por propriedades do sedimento, como composição mineralógica, presença de matéria orgânica e condições físico-químicas, além das interações entre os próprios elementos (Miranda *et al.*, 2021).

Conclusão

A composição elementar dos sedimentos estuarinos apresentou variação considerável entre 2016 e 2022, destacando-se o aumento das concentrações de diversos elementos em 2019. No bioensaio com *A. cepa*, a taxa de germinação apresentou pouca variação entre os tratamentos, enquanto o menor comprimento radicular médio foi observado nas sementes expostas ao sedimento de 2019. Entretanto, as diferenças no crescimento radicular não foram estatisticamente significativas, indicando a necessidade de estudos adicionais para confirmar esse resultado. Em conjunto, os achados evidenciam mudanças temporais na composição química dos sedimentos e reforçam a importância do monitoramento de longo prazo integrando análises químicas e respostas biológicas para avaliar a evolução das condições ambientais do estuário do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão.

Referências

BARBÉRIO, A.; BARROS, L.; VOLTOLINI, J.C.; MELLO M. L. S. Evaluation of the cytotoxic and genotoxic potential of water from the River Paraíba do Sul, in Brazil, with the *Allium cepa* L. test. **Brazilian Journal of Biology**, 69(3): 837-842, 2009. doi.org/10.1590/S1519-69842009000400010. Acesso em: 13 ago. 2026.

CUNHA NETO, A. R. *et al*. Toxicity of heavy metals that affect germination, development and cell cycle of *Allium cepa* L. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 111, n. 2, art. 22, 2023. doi.org/10.1007/s00128-023-03775-9. Acesso em: 13 ago. 2026.

DA SILVA SOUZA, T.; TAVARES, G. B.; DE SOUZA, V. V. Cytogenotoxicity of 2,4-D and Glyphosate Herbicides: Effects of Isolated and Combined Environmental Concentrations on Onion Root Tips (*Allium Cepa*). **Water, Air & Soil Pollution**, v. 235, n. 8, p. 523, ago. 2024. doi.org/10.1007/s11270-024-07282-3. Acesso em: 13 ago. 2026.

DUARTE, E. B. *et al*. Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil. **Chemosphere**, v. 262, Jan. 2021. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127879. Acesso em: 13 ago. 2026.

IBAMA, 2016. Rompimento da Barragem de Fundão: Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais**. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/notas/2020/rompimento-da-barragem-de-fundao-documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg. Acesso em: 13 ago. 2026.

LEME, D. M.; MARIN-MORALES, M. A. *Allium cepa* test in environmental monitoring: A review on its application. **Mutation Research/Reviews in Mutation Research**, v. 682, n. 1, p. 71–81, Jul. 2009. doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002. Acesso em: 13 ago. 2026.

MIRANDA, L. S. *et al.* Physico-chemical properties of sediments governing the bioavailability of heavy metals in urban waterways. **Science of the Total Environment**, v. 763, 142984, 2021. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142984. Acesso em: 13 ago. 2026.

QUEIROZ, H. M. *et al*. The Samarco mine tailing disaster: a possible time-bomb for heavy metals contamination? **Science of the Total Environment** 637, 498– 506, 2018. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.370. Acesso em: 13 ago. 2026.

QUEIROZ, H. M. *et al*. Role of Fe dynamic in release of metals at Rio Doce estuary: Unfolding of a mining disaster. **Marine Pollution Bulletin**, v. 166, 112267, 2021. doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112267. Acesso em: 13 ago. 2026.

SÁ, F. *et al.* Time-sequence development of metal(loid)s following the 2015 dam failure in the Doce river estuary, Brazil. **Science of the Total Environment**. v. 769, may. 2021. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144532. Acesso em: 13 ago. 2026.

SEGURA, F.R. *et al*., 2016. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution** 218, 813–825. doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005. Acesso em: 13 ago. 2026.

VERGILIO, C. S. *et al.* Immediate and long-term impacts of one of the worst mining tale dam failure worldwide (Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil). **Science of the Total Environment**. v. 756, Feb. 2021. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143697. Acesso em: 13 ago. 2026.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).