

POTENCIAL TÓXICO DO SEDIMENTO DA FOZ DO RIO DOCE APÓS CINCO DO ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE MINERAÇÃO

Ingrid Ferreira dos Santos¹, Ana Luiza Gonçalves Sepulcro², Jéssica Dutra Ferreira¹, Diego Lacerda de Souza², Cristiane dos Santos Vergilio¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo/ CCENS, Alto Universitário, S/N - Guararema, Alegre - ES, 29500-000, Brasil, ingrid.f.santos@edu.ufes.br, ana.l.sepulcro@edu.ufes.br, jessicadutra017@gmail.com, cristiane.vergilio@ufes.br.

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, 28013-602, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil, diegolacerda@uenf.br.

Resumo

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG) que ocorreu em 2015, considerada uma das maiores tragédias ambientais do Brasil, onde foi lançado mais de 40 milhões de m³ de rejeito de minério de ferro, que afetou a qualidade da água em toda a extensão do Rio Doce. Parte desse material foi transportado para a foz do Rio Doce, tornando necessária a avaliação do potencial tóxico do sedimento dessa região. Com isso, o presente estudo visa avaliar a toxicidade do sedimento da foz do rio Doce cinco anos após a tragédia, por meio da análise de metais e ensaios ecotoxicológicos com *Nitokra sp.* Uma redução da prole foi observada nos pontos da foz central (FC1 e FC2) e da foz sul (FS3) no período seco (2021), enquanto todos os pontos apresentaram toxicidade no período chuvoso (2022). Em relação aos metais, os elementos Cr e Cu apresentaram concentrações acima do TEL (NOAA), indicando limiar para indução de efeitos tóxicos para a biota. Os resultados mostram que, mesmo após cinco anos do rompimento, o Rio Doce ainda apresenta potencial de toxicidade no sedimento, reforçando a relevância do monitoramento ambiental a longo prazo.

Palavras-chave: Ensaios ecotoxicológicos, Metais, Monitoramento, *Nitokra sp.*

Área do Conhecimento: Ciências Biológicas - Ecologia

Introdução

Em 2015, o rompimento da barragem de Fundão em Mariana – MG provocou um dos maiores desastres ambientais do Brasil, lançando no ambiente um volume superior a 40 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro, que afetou áreas ao longo do curso do Rio Doce, entre os estados de Minas Gerais a Espírito Santo, gerando um impacto negativo em toda região costeira (Dias et al., 2018). Os rejeitos consistiam de um material fino contendo minério de ferro (Fe) e sílica (SiO₂), mas também possuíam traços de metais como arsênio (As), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb). Entre os efeitos imediatos foram observadas mudanças abióticas, como variações do pH, aumento da turbidez, e acumulação de metais na água, além da destruição da vegetação ribeirinha, entre outros (Foesch, et al., 2018).

Parte do material liberado foi transportado em direção a foz e se depositou no sedimento de fundo (Segura et al., 2016.). Com isso, o sedimento se torna uma matriz importante para estudos de monitoramento ambiental à longo prazo, visto que parte do material depositado pode sofrer eventos de ressuspensão para a coluna d'água (Vergilio et al., 2020). Nesse sentido, mesmo após 5 anos do rompimento ainda são importantes estudos de monitoramento ambiental. Nessa perspectiva, os ensaios ecotoxicológicos podem ser usados como uma alternativa para investigação da qualidade do sedimento das diferentes áreas afetadas pela pluma de rejeitos de minério de ferro.

O copepoda *Nitokra sp.* é um animal bentônico que vive especificamente em estuários e tem um ciclo de vida de aproximadamente 3 a 4 semanas (Lotufo & Abessa, 2002). As vantagens do uso do copépodo *Nitokra sp.* em testes de toxicidade incluem a alta sensibilidade a contaminantes, resistência a variações de salinidade, grande abundância na comunidade bentônica, ciclo de vida curto, facilidade de cultivo em laboratório e pequeno tamanho dos organismos, o que facilita a realização dos testes sem exigir grandes espaços (Lotufo & Abessa, 2002). A análise ecotoxicológica envolvendo o copépodo *Nitokra sp.*, especialmente em sedimentos, é de particular importância, visto que são altamente

sensíveis a mudanças na qualidade do sedimento e da água, tornando-os excelentes bioindicadores de poluição ambiental (Lotufo & Abessa, 2002).

Metodologia

1.1. Coleta do sedimento da foz do Rio Doce

A primeira campanha de coleta das amostras ambientais foi realizada no período entre 21 a 29 de junho de 2021 (Estação Seca), enquanto que a segunda coleta foi realizada entre 10 a 19/02/2022 (Estação Chuvosa). A amostragem foi realizada em 8 estações de coleta da região da foz do Rio Doce, sendo três na foz sul, dois na foz central e três na foz norte. Em cada local de amostragem foram medidos os parâmetros físico-químicos pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e turbidez. As amostras de sedimento superficial (camada superficial de sedimento de 2 cm a 6 cm) foram coletadas com auxílio de um amostrador de fundo do tipo Van Veen, sendo armazenadas em sacos plásticos e mantidos sob refrigeração a -4 °C até as análises. Alíquotas de sedimento foram coletadas para as análises químicas, e ensaios ecotoxicológicos.

1.2. Ensaio de toxicidade com sedimento superficial com o copépodo *Nitokra sp.*

Os ensaios ecotoxicológicos para avaliação da toxicidade do sedimento foram realizados com o copépodo *Nitokra sp.* de acordo com a metodologia proposta por Lotufo & Abessa (2002). Os organismos utilizados foram do cultivo do Laboratório de Ecotoxicologia da Universidade Federal do Espírito Santo (LABTOX/UFES). As amostras de sedimento foram distribuídas em recipientes-teste, contendo aproximadamente 2,0 g de sedimento homogeneizado, onde adicionou-se 15 mL de água do mar reconstituída com salinidade de 35. Para os testes de toxicidade realizados utilizou-se 5 réplicas por amostra, para que fosse possível avaliar a variabilidade entre os organismos testados. Em cada recipiente-teste foram adicionadas 10 fêmeas ovígeras que ficaram mantidas pelo tempo de exposição de 10 dias. Os recipientes-teste foram aerados e forneceu-se alimentação apenas no primeiro dia de ensaio com 0,2 mL de suspensão algácea (1×10^5 células/mL). Os recipientes-teste foram mantidos em incubadora BOD à 24° C e fotoperíodo 16:8. Houve a medição dos parâmetros físico-químicos (oxigênio dissolvido - OD, pH, temperatura, salinidade e condutividade) no início e no fim do experimento. Ao final do experimento foi utilizada 0,5 mL de solução de formaldeído 10% com corante rosa bengala foi adicionada por 48 h para posterior contagem dos organismos. Em seguida, as amostras foram peneiradas, utilizando uma peneira com malha de 45 mm, para a contagem dos indivíduos com auxílio de lupa e pipeta. Essa contagem avaliou o potencial de toxicidade do sedimento na reprodução dos organismos testados, a partir da fecundidade das fêmeas que foram expostas, sendo contabilizado os estágios: copepoditos, náuplios, adultos e fêmeas ovadas.

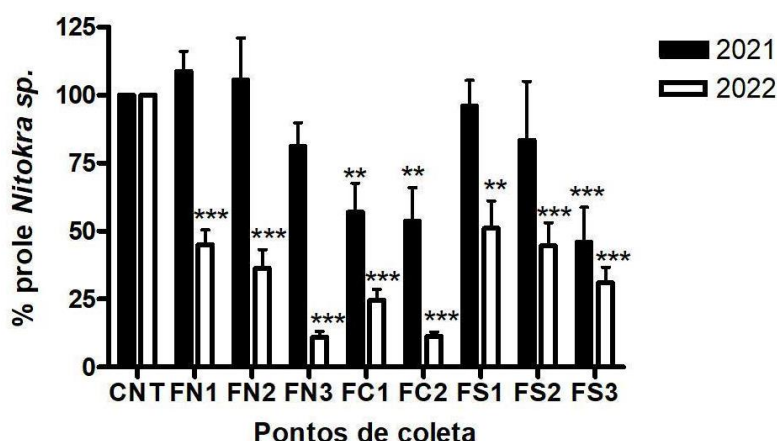
1.3. Determinação dos metais no sedimento

Para o sedimento, uma alíquota de 0,5 g foi digerida de acordo com o método 3052 da USEPA (1995) em uma solução de HNO₃ (9 mL) + HF (4 mL) + HCl (4 mL) com o auxílio de microondas (Mars 5 Xpress CEM-Corporation) por 40 minutos, aquecidos a +180°C com tempo de rampa de 10 minutos e depois mantidos por 20 minutos nessa temperatura. Em seguida adicionou-se 25 mL de solução de H₃BO₃ 4% (m/v) com o objetivo de complexação do possível resíduo de HF. O extrato final também reaquecido a 180°C com tempo de rampa de 10 minutos e depois mantido por 20 minutos nessa temperatura. Após resfriamento, os extratos foram filtrados em papel filtro (Whatman 40), aferidos a 50 mL com água desmineralizada e encaminhadas para as análises. Todas as amostras foram preparadas em triplicatas analíticas, sendo considerado um coeficiente de variação menor do que 10%. A determinação de metais (Al, Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, e Zn) nas diferentes matrizes ambientais foi realizada com o auxílio de um Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Acoplado (ICP – OES Varian-Liberty Series II) no Laboratório de Ciências Ambientais do CBB-UENF.

Resultados

O ensaio de toxicidade com *Nitokra sp.* consiste na exposição das fêmeas ovadas às amostras de sedimento. Uma redução da prole foi observada para os pontos da foz central (FC1 e FC2) e da foz sul (FS3) no período seco (2021), enquanto todos os pontos amostrais apresentaram toxicidade no período chuvoso (2022) (Figura 1). A redução de prole é um indicativo de toxicidade crônica aos organismos expostos.

Figura 1 - Percentual da prole de *Nitokra sp.* obtida após a exposição das fêmeas ovadas às amostras de sedimento da foz do Rio Doce.



Legenda: CNT: Controle, FN1: Foz Norte 1, FN2: Foz Norte 2, FN3: Foz Norte 3, FC1: Foz Central 1, FC2: Foz Central 2, FS1: Foz Sul 1, FS2: Foz Sul 2, FS3: Foz Sul 3.

Fonte: Produção do próprio autor

Em relação à concentração de metais, os elementos Mn, Zn, Cu e Cr apresentaram concentrações mais elevadas em diferentes pontos de coleta, o que pode ser devido à ressuspensão de partículas para coluna d'água, aumentando assim os níveis encontrados na estação chuvosa. Enquanto que os metais os metais Al, Fe, Ba e Pb tiveram aumento em suas concentrações predominantemente durante a estação seca, o que pode estar ligado à redução do volume hídrico, consequentemente a menor diluição na coluna d'água, alguns desses elementos como Fe e Al que tendem a se depositar no sedimento (Sparks, 2005) (Tabela 1).

Os níveis de metais do sedimento foram comparados com valores de referência internacionais estabelecidos pela National Oceanic and Atmospheric Administration – (NOAA) que define o nível limiar (TEL) e o nível de provável efeito (PEL)(Buchman, Michael F, 1999). Os resultados demonstram que não foram observadas concentrações superiores ao PEL em nenhum ponto ou estação analisados. No entanto, foram verificadas concentrações acima do TEL para Cr em praticamente em todos os pontos analisados, exceto o ponto FS2, para o Cu nos pontos FC2, FS3, e FS2, o que pode indicar potencial risco ecotoxicológico para organismos bentônicos associado a tais elementos. Os elementos Pb, Zn, Fe e Al apresentaram concentrações inferiores ao TEL em todos os pontos (Tabela 1).

Tabela 1 - Concentração de metais ($\mu\text{g/g}$) em sedimento coletado durante a estação seca e chuvosa de áreas marinhas com influência do Rio Doce.

Área	Estação	Al	Fe	Mn	Ba	Zn	Cu	Pb	Cr
FN1	Seca	36928,1	83781	469,2	207,4	30,8	8,9	9,7	57,2
	Chuvosa	46518,5	56684,5	717,7	158,2	59,3	14,9	9,7	89,6
FN2	Seca	69852,5	84336,9	659	136,9	48,5	15,7	15,6	78,9
	Chuvosa	51568,1	59298,1	675,6	165,1	55	14,7	10,9	85,1
FN3	Seca	47866,7	115853,4	361,1	265,4	27,1	6,6	11,7	46,9
	Chuvosa	35450,6	55507,8	466,7	114,6	46,8	17,1	12,7	70,9
FC1	Seca	62303,6	79141,8	465,2	209,4	41,1	11,8	12,2	53,4
	Chuvosa	19409,0	40721,6	329,1	154,5	34	9,8	6,4	45,1
FC2	Seca	100748,9	94435,8	588,4	164,8	52,4	17,7	16,7	77,8
	Chuvosa	76549,5	86142,9	691,2	116,9	57	24	14,8	89,7
FS3	Seca	114923,9	84492,6	641	142,3	49,9	16,2	13,5	79,3
	Chuvosa	47482,4	52583,5	384,4	90	58,1	20,4	12,1	77,8
FS2	Seca	167092,1	101669,1	679,6	172,4	58,6	19,1	19	92,5
	Chuvosa	82473,9	54089,0	666	152,7	51,5	15,3	10,9	89,9
FS1	Seca	109075,1	84068,4	579,3	128,5	48,7	16,8	16,8	79,7
	Chuvosa	67420,0	53943,5	664,2	110,7	52,8	18,5	13,5	91,4
NOAA TEL		-	-	-	-	124	18,7	30,2	52,3
NOAA PEL		-	-	-	-	271	108	112	160

Fonte: Produção da própria autora.

Discussão

Nitokra sp. é um organismo bentônico, sensível às alterações da qualidade do sedimento, e por isso amplamente utilizado em ensaios ecotoxicológicos, pois os contaminantes presentes no sedimento podem exercer toxicidade para os organismos e afetar a sua reprodução (Lotufo & Abessa, 2002). Os resultados indicam que mesmo após cinco anos após o rompimento da barragem de mineração de Ferro, o Rio Doce ainda apresenta potencial de toxicidade no sedimento, uma vez que os ensaios ecotoxicológicos evidenciaram o maior efeito tóxico crônico (redução de prole) para os organismos expostos.

Os pontos de amostragem da foz (FC1 e FC2) e Foz Sul (FS3) apresentaram toxicidade em ambos os períodos de coleta, possivelmente porque são pontos mais próximos da desembocadura do Rio Doce, região que recebeu grande quantidade de rejeitos. No entanto, um maior número de pontos apresentou toxicidade no período chuvoso, em função do escoamento superficial e da ressuspensão de sedimento que intensifica a mobilização de metais e outros contaminantes (VERGILIO et al., 2020).

Os metais encontrados no sedimento foram comparados com os valores do NOAA, indicou que embora não tenham concentrações acima do valor de PEL em nenhum ponto, valores acima do TEL foram observados para Cr e Cu. Tais resultados apontam para um risco para organismos bentônicos podem estar sofrendo no ambiente natural.

Conclusão

Mesmo após cinco anos do rompimento da barragem de Fundão, o sedimento da foz do Rio Doce possui potencial de toxicidade crônica, em especial na estação chuvosa, induzindo a redução da prole dos organismos expostos. Ainda são observadas concentrações elevadas de metais no sedimento da foz do Rio Doce, em especial para Cr e Cu que apresentaram níveis do acima do TEL (NOAA), que indicam o limiar para indução de efeitos tóxicos para a biota. Esses resultados despertam preocupação quanto a integridade da biota local, uma vez que os ensaios evidenciam efeitos reprodutivos, que podem estar ocorrendo nas espécies do ambiente natural, ressaltando a relevância do monitoramento ambiental à longo prazo.

Referências

- BUCHMAN, Michael F. **NOAA screening quick reference tables**. Seattle: United States National Oceanic and Atmospheric Administration, Hazardous Materials Response and Assessment Division; National Ocean Service, 1999. Disponível em: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/8310>. Acesso em: 08 set. 2025.
- COPPO, Gabriel C. et al. Long-term impacts on estuarine benthic assemblages (2015–2020) after a mine tailing spill in SE Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 196, 115616, 2023.
- DIAS, Carlos Alberto et al. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço**, 2018. Disponível em: <https://www.revistaespinhaco.ufv.br/>. Acesso em: 8 jun. 2024.
- FOESCH, M. D. S.; FRANCELINO, M. R.; ROCHA, P. A.; GOMES, A. R. L. River water contamination resulting from the Mariana disaster, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 4, 2020. DOI: 10.1590/2179-8087.013218.
- LOTUFO, G. R.; ABESSA, D. M. S. Testes de toxicidade com sedimento total e água intersticial estuarinos utilizando copépodos bentônicos. In: **Métodos em Ecotoxicologia Marinha – Aplicações no Brasil**. São Paulo: Editora Artes Gráficas e Indústria Ltda, 2002. p. 163–178. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272178543_Testes_de_toxicidade_com_sediment_total_e_agua_intersticial_estuarinos_utilizando_copepodes_bentonicos. Acesso em: 08 jun. 2024.
- SEGURA, F. R.; NUNES, E. A.; PANIZ, F. P.; PAULELLI, A. C. C.; RODRIGUES, G. B.; BRAGA, G. Ú. L.; DOS REIS PEDREIRA FILHO, W.; BARBOSA, F. Jr.; CERCHIARO, G.; SILVA, F. F.; BATISTA, B. L. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813–825, 2016. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.08.005.
- SPARKS, Donald L. Toxic metals in the environment: the role of surfaces. *Elements*, v. 1, n. 4, p. 193–197, 2005.
- VERGILIO, C. dos S.; LACERDA, D.; OLIVEIRA, B. C. V. de; SARTORI, E.; CAMPOS, G. M.; PEREIRA, A. L. de S.; AGUIAR, D. B. de; SOUZA, T. da S.; ALMEIDA, M. G. de; THOMPSON, F.; REZENDE, C. E. de. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Scientific Reports**, v. 10, 5936, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-62700-w.
- WEBER, A. A.; SALES, C. F.; DE SOUZA FARIA, F.; MELO, R. M. C.; BAZZOLI, N.; RIZZO, E. Effects of metal contamination on liver in two fish species from a highly impacted neotropical river: A case study of the Fundão dam, Brazil. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 190, 110165, 2020. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110165.

Agradecimentos

A Universidade Federal do Espírito Santo que forneceu a infraestrutura para o desenvolvimento desse trabalho, nas dependências do Laboratório de Ecotoxicologia (LABTOX) e do Laboratório de Estudos em Ciências Ambientais (LECA). Ao financiamento fornecido pela Recursos provenientes da CHAMADA FAPES/FAPEMIG/FUNDAÇÃO RENOVA - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS IMPACTADAS PELO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO/MG (Termo de Outorga: 006/2021) (Processo: 2021-5KQR9) por viabilizar o desenvolvimento desse projeto.