

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS E TOXICIDADE AGUDA DO SEDIMENTO DO RIO DOCE UTILIZANDO *Hyaella azteca*

Daniel Macedo de Assis¹, Letícia Pacheco Ribeiro¹, Diego Lacerda de Souza²,
Higor Santos de Oliveira¹ e Cristiane dos Santos Vergílio¹.

1 Universidade Federal do Espírito Santo – Campus Alegre/Centro de Ciências Exatas, Naturais e da Saúde, Laboratório de Ecotoxicologia, Alto Universitário, S/N, Guararema – 29500-000 – Alegre-ES, Brasil, Alegre-ES, Brasil, daniel.m.assis@edu.ufes.br, leticia.p.ribeiro@edu.ufes.br, higorso.20@gmail.com, cristiane.vergilio@ufes.br

2 Laboratório de Ciências Ambientais, Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Avenida Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, 28013-602, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil. lacerdadesouza@hotmail.com.br

Resumo

O rompimento da barragem de Fundão é considerado o maior desastre envolvendo barragens de rejeito no mundo. O rejeito liberado sofreu decantação para o sedimento de fundo, além de processos de transporte em direção à foz. Alguns eventos podem atuar na ressuspensão dos sedimentos ao longo do rio Doce no decorrer do tempo. Nesse cenário, estudos que monitorem a evolução dos impactos a longo prazo para a biota são de grande importância. O presente estudo avaliou a toxicidade do sedimento de diferentes pontos amostrais ao longo do rio Doce após cinco anos do rompimento da barragem de minério utilizando o bioindicador *Hyaella azteca*. O sedimento de Aimorés se destacou na acumulação de diversos metais (Pb, Ba, Al, Cu e Zn, Cr), sendo o único que gerou mortalidade significativa para os organismos. O ponto de ser coletado à montante da Usina Hidrelétrica de Aimorés (UHE), que retem o material transportado ao longo do rio Doce, pode ter influenciado nos resultados. Apesar da ausência de toxicidade aguda para os outros pontos, estudos a longo prazo são necessários devido a elevada concentração de metais nos pontos de coleta.

Palavras-chave: Bento Rodrigues. Bentos. Ecotoxicologia. Rejeito.

Área do Conhecimento: Ciências Biológicas – Ecologia.

Introdução

O rompimento da barragem de Fundão que ocorreu em 05 de novembro de 2015 em Bento Rodrigues (Mariana-MG) é considerado o maior desastre envolvendo barragens de rejeito no mundo (VERGILIO *et al.*, 2020). Dezenove pessoas morreram na tragédia e foram liberados cerca de 45 milhões de metros cúbicos de rejeito no meio ambiente, causando a destruição de 1439 hectares, incluindo áreas de preservação permanente (IBAMA, 2020). Os rejeitos liberados foram transportados por 663,2 km ao longo dos cursos d'água, sendo carregados até o litoral do Espírito Santo (IBAMA, 2020). No entanto, parte do material liberado também sofreu deposição para o sedimento de fundo dos rios. Altas concentrações de diversos elementos como ferro, manganês, alumínio e arsênio foram observadas na constituição do rejeito (CARMO *et al.*, 2017). O incremento na concentração desses elementos no sedimento pode apresentar riscos para a fauna bentônica e para todo o ecossistema no caso da mobilização dos compostos presentes no rejeito para a água.

Nesse cenário, estudos que monitorem a evolução dos impactos relacionados ao desastre são de grande importância. De acordo com Burger (2006), organismos bioindicadores são uma ferramenta eficiente para avaliar alterações no meio ambiente que possam resultar em riscos para espécies individuais, populações, comunidades ou ecossistemas. Para o entendimento do nível de toxicidade de sedimentos, as espécies bioindicadoras de hábito bentônico são as mais eficientes, justamente por seu maior contato com o sedimento (BURTON *et al.*, 2001). *Hyaella azteca* é um amphipoda epibentônico distribuído na América Central e do Norte, amplamente encontrado em lagoas e lagos (PASCOE; OTHMAN, 2001). Devido a sua comum ocorrência no ambiente natural, apresentar um ciclo

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

de vida curto, facilidade no cultivo e sensibilidade a poluentes, *Hyalella azteca* mostra-se um bom bioindicador para monitorar a toxicidade de sedimentos (BLOCKWELL; MAUND; PASCOE, 1999).

Ao considerar a complexa dinâmica do rejeito no ambiente, o presente estudo teve como objetivo realizar a caracterização ambiental (através de análises granulométricas e concentração de metais) e avaliar o potencial tóxico do sedimento de diferentes pontos amostrais ao longo do rio Doce após cinco anos do rompimento da barragem de mineração de ferro através de ensaios com o organismo bentônico *Hyalella azteca*.

Metodologia

A coleta das amostras ambientais foi realizada no período entre 21 e 29 de junho de 2021 (período seco) em 10 pontos ao longo da calha principal do rio Doce (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição dos pontos de amostragem ao longo do rio Doce utilizados no presente estudo.

Código do ponto de coleta	Descrição do ponto	Localidade	Latitude	Longitude
BEN	Córrego Santarém	Bento Rodrigues - MG	20°14'26.4"S	43°24'41.4"O
BAR	Rio Gualaxo do Norte	Barra Longa - MG	20°17'10.4"S	43°03'57.8"O
RDO	Rio Doce	Rio Doce - MG	20°14'52.7"S	42°53'08.4"O
IPA	Rio Doce	Ipatinga - MG	19°28'47.0"S	42°28'51.6"O
GOV	Rio Doce	Governador Valadares - MG	18°52'58.0"S	41°57'14.2"O
RES	Rio Doce	Resplendor - MG	19°19'34.2"S	41°15'12.1"O
AIM	Rio Doce	Aimorés - MG	19°27'06.6"S	41°05'32.7"O
COL	Rio Doce	Colatina - ES	19°32'06.8"S	40°38'08.0"O
LIN	Rio Doce	Linhares - ES	19°24'23.1"S	40°04'03.1"O
REG	Rio Doce	Regência - ES	19°38'45.2"S	39°49'23.5"O

Fonte: Próprio autor.

As amostras de sedimento superficial (2 a 6 cm) foram coletadas com auxílio de um amostrador de fundo do tipo Van Veen. As amostras foram armazenadas em sacos plásticos e mantidas sob refrigeração a -4 °C. Posteriormente, uma fração foi separada análise de metais, caracterização granulométrica e realização dos ensaios ecotoxicológicos.

Para a granulometria, a fração menor do que 2 mm foi utilizada, sem a remoção da matéria orgânica e de carbonatos. Utilizou-se o analisador de partícula por difração a laser (Shimadzu modelo SALD-3101). A classificação foi feita baseando-se na escala Wentworth (areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina, areia muito fina, silte grosso, silte médio, silte fino, silte muito fino e argila). No presente estudo, as sub-categorias de areia, silte e argila foram agrupadas.

Para a determinação de metais no sedimento, uma alíquota de 0,5 g foi submetida a digestão ácida seguindo o método 3052 USEPA em forno micro-ondas (Mars 5 Xpress CEM-Corporation). A determinação dos elementos Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb e Zn foi realizada através de espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado (ICP-OES, Varian 720-ES). Para controle analítico de precisão foram realizadas triplicatas analíticas a cada grupo de 5 amostras, sendo considerados os resultados de coeficiente de variação inferiores a 10%. Também foram analisados brancos analíticos a cada grupo de 10 amostras, nos quais foram realizadas as mesmas etapas realizadas para as amostras.

Os organismos-teste utilizados no estudo foram obtidos do cultivo do Laboratório de Ecotoxicologia (LABTOX) da Universidade Federal do Espírito Santo Campus Alegre. O cultivo original do LABTOX foi iniciado a partir de organismos cedidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Para o cultivo e o ensaio com os organismos, foram seguidas as recomendações ABNT NBR 15.470: 2013 – Ecotoxicologia Aquática – Toxicidade Aguda e Crônica – Método de ensaio com *Hyalella spp* (Amphipoda). No cultivo, os organismos foram divididos em 4 cubas, cada uma contendo 100 organismos adultos, mantidos em um cristalizador contendo 2 litros de meio MS, com aeração constante e fotoperíodo de 16:8 horas claro/escuro. As cubas receberam aeração constante e alimentação diária composta por um solubilizado de ração de peixe fermentada e leveduras com adição de óleo de primula.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Os ensaios ecotoxicológicos com *H. azteca* foram realizados com quatro réplicas experimentais. Para cada ponto amostral foram pesadas réplicas de 100 g do sedimento, seguidos da adição de 200 mL de meio de cultura (MS) em recipientes-teste com capacidade para 350 mL. Para o controle, foram usados recipientes-teste sem sedimento, contendo apenas plantas aquáticas do gênero *Elodea sp.* e 200 mL de meio MS. Após 24 h de decantação, foram medidos os parâmetros físico-químicos (condutividade, pH e oxigênio dissolvido) e adicionados 10 organismos (de 1 a 14 dias) em cada réplica de cada tratamento.

Ao longo do experimento foi realizada a troca de 1/3 da água dos recipientes a cada três dias, sendo fornecida a alimentação e monitorados os níveis de oxigênio dissolvido. Ao final de 10 dias de experimento foi avaliada a sobrevivência dos organismos em cada uma das amostras para avaliação do efeito tóxico.

Para as análises dos dados foi realizado uma Análise de Variância (ANOVA) seguido do teste de Tukey, sendo considerada uma margem de erro de 5%. Os cálculos e os gráficos foram realizados com a utilização do software R.

Resultados

Em relação a determinação de metais, Al, Fe e Mn apresentaram maiores concentrações entre os metais em todos os pontos de coleta. O ponto de Bento Rodrigues, localizado a apenas 0,5 Km da barragem, lidera nas concentrações de Mn, Fe e Cd, enquanto que Barra longa (71 km da barragem) destaca-se pelas concentrações de Cr, Fe e Mn. Ao longo do leito principal do rio Doce, outro ponto que se destaca é Aimorés, onde são observadas altas concentrações da maioria dos metais detectados, em especial Pb, Ba, Al, Cr, Cu e Zn (Tabela 1). Em Regência, o ponto mais distante da barragem, foram observadas a maior concentração de Zn (Tabela 1).

Tabela 1 - Concentração de metais (µg/g) nas amostras de sedimento dos pontos de coleta ao longo do rio Doce. Níveis de TEL (nível de efeito limite para biota) e PEL (nível de efeito provável a biota) estabelecido para os metais citados, determinados metais não possuem valor estabelecido.

Local	Distância da barragem (km)	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Córrego Santarém (Bento Rodrigues)	0,5	14.244,5	235,4	1,1	19,0	6,3	196.873,2	1.305,0	2,0	10,1
Gualaxo do Norte - Barra Longa	71	17.445,3	197,8	0,6	56,7	8,6	155.082,9	780,0	5,3	10,5
Rio Doce - Rio Doce	102	21.931,7	218,6	0,2	30,6	5,0	41.689,5	279,7	7,9	14,2
Rio Doce - Ipatinga	247	49.032,2	227,4	0,6	38,1	11,5	123.066,9	119,6	5,1	10,7
Rio Doce - Governador Valadares	365	31.597,7	197,8	0,4	30,2	4,3	73.097,6	382,4	5,5	20,4
Rio Doce - Resplendor	476	33.454,4	233,9		15,8	3,8	20.710,2	128,3	8,8	6,0
Rio Doce - Aimorés	500	34.764,8	559,5	0,1	32,5	9,5	36.804,9	306,1	12,6	20,5
Rio Doce - Colatina	556	30.662,3	245,7		22,3	5,7	23.652,9	140,2	3,0	14,2
Rio Doce - Linhares	622	25.207,0	115,4		23,1	6,5	21.460,2	215,9	2,7	8,9
Rio Doce - Regência	666	11.841,7	150,1		6,2	2,4	7.185,7	30,1	1,9	37,9
NOAA TEL (ppb)				0,6	37,3	35,7			35,0	123,0
NOAA PEL (ppb)				3,5	90,0	197,0			91,3	315,0

Fonte: Próprio autor.

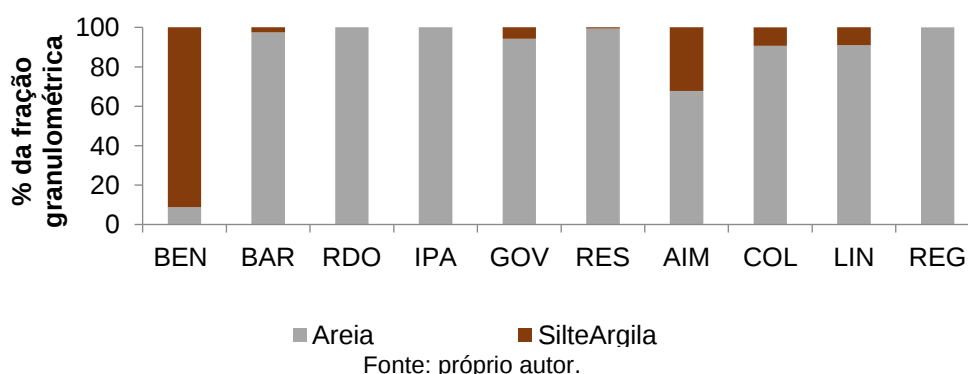
As concentrações obtidas foram comparadas com níveis de referência internacionais descritos pela NOAA - National Oceanic & Atmospheric Administration, que estabelece valores de TEL (nível de limiar de efeitos adversos à comunidade biológica) e PEL (nível de efeitos adversos prováveis à comunidade biológica). Em Bento Rodrigues, Barra Longa e Ipatinga os níveis de Cd estão no nível ou

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

acima do TEL. Níveis acima do TEL também foram observados para Cr em Barra Longa e Ipatinga, o que levanta preocupação em relação a possível indução de efeitos tóxicos na biota.

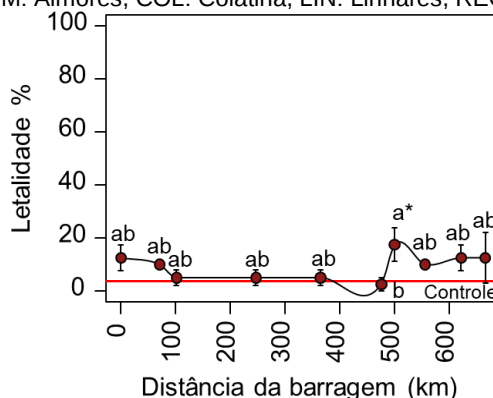
Em relação a granulometria, o ponto de Bento Rodrigues foi o ponto que apresentou o sedimento com a composição granulométrica mais fina, apresentado a maior composição de silte/argila (91%), seguido de Aimorés com 32% de composição silte-argilosa. Os demais pontos de coleta apresentaram composição arenosa predominante (acima de 90 % de areia) (Figura 1).

Figura 1 – Porcentagem das frações granulométricas observadas nas amostras de sedimento coletados no Rio Doce. BEN: Bento Rodrigues, BAR: Barra Longa, RDO: Rio Doce, IPA: Ipatinga, GOV: Governador Valadares, RES: Resplendor, AIM: Aimorés, COL: Colatina, LIN: Linhares, REG: Regência.



Os ensaios de toxicidade aguda com *Hyalella azteca* demonstraram a ocorrência de efeito tóxico (indução de mortalidade) apenas nos organismos expostos ao sedimento de Aimorés, que apresenta 500 km de distância da barragem de fundão (Figura 2).

Figura 2 – Letalidade dos organismos de *Hyalella azteca* expostos às amostras de sedimento do rio Doce após cinco anos do rompimento da barragem de Fundão. Os resultados estão demonstrados na seguinte ordem: BEN: Bento Rodrigues, BAR: Barra Longa, RDO: Rio Doce, IPA: Ipatinga, GOV: Governador Valadares, RES: Resplendor, AIM: Aimorés, COL: Colatina, LIN: Linhares, REG: Regência.



Discussão

Os metais principais da composição do rejeito (Fe e Mn) foram encontrados em maior concentração no sedimento do ponto de Bento Rodrigues (Tabela 1), o ponto de coleta mais próximo da barragem. Esse ponto também apresentou 91% de silte/argila na composição do sedimento (Figura 1). Essa predominância de silte/argila pode estar relacionado com a presença do rejeito. Destaca-se ainda a tendência de redução das concentrações de metais no sedimento com o distanciamento do ponto de rompimento. Isso pode ser observado nas menores concentrações de Fe, Mn, Pb, Cu, Al e Cr em Regência, isso pode estar relacionado com a presença de quatro usinas hidroelétricas ao longo do curso do rejeito, que podem ter atuado retraindo grande parte do rejeito liberado. Além disso, em

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Regência está localizada na foz do rio Doce, com isso, processos de transporte podem estar atuando no carreamento dos sedimentos para área marinha. O ponto de Aimorés apresentou um pico de concentração de diferentes elementos (Pb, Ba, Al, Cu e Zn, Cr). Isso pode ser explicado pela localização do ponto de coleta ser à montante da Usina Hidrelétrica de Aimorés (UHE), que atua retraindo o material transportado ao longo do rio Doce. Além disso, Aimorés apresentou a segunda maior concentração de silte/argila em seu sedimento, sendo outro fator que pode justificar essa maior presença de metais.

Os pontos de Bento Rodrigues (apenas para Cd), Barra Longa e Ipatinga destacam-se ainda por apresentar níveis de Cd e Cr acima do TEL. Valores acima do TEL mostram a possibilidade de efeitos adversos para biota exposta a esses sedimentos mesmo após cinco anos do rompimento da barragem de Fundão.

Considerando os riscos para a biota local, destaca-se que atividade pesqueira era amplamente difundida na região antes do rompimento. Mesmo sendo proibida a pesca após o acidente, o consumo de peixes provenientes dessa região desperta preocupação, sendo que o consumo de peixes e frutos do mar são um dos principais responsáveis pela contaminação humana por metais tóxicos (DANG; WANG, 2012). Isso se deve principalmente ao processo de bioacumulação e biomagnificação que ocorre com alguns elementos, que pode promover um incremento das concentrações nos organismos expostos, especialmente em níveis tróficos superiores. Dentre os elementos encontrados nos pontos de coleta, o Cd e o Pb representam os maiores riscos para as populações humanas. Os efeitos característicos do Cd em humanos envolvem nefrotoxicidade, carcinogenicidade e doenças circulatórias. Em relação ao Pb, sua toxicidade está relacionada com impactos no sistema nervoso central e periférico.

Na avaliação da toxicidade aguda do sedimento do rio Doce utilizando a espécie indicadora *Hyaella azteca*, o único ponto que apresentou letalidade significativa foi Aimorés. Os dados obtidos com a análise de metais justificam a maior letalidade apresentada nesse ponto, sendo observado altos níveis de metais tóxicos. Apesar dos elevados níveis de elementos observado em Bento Rodrigues, o sedimento desse local não induziu toxicidade aguda nos ensaios com a *H. azteca*. No entanto, em função dos elevados níveis de diversos elementos, inclusive de Cd acima do TEL recomenda-se a realização de ensaios adicionais com outras espécies bioindicadoras mais sensíveis e também com a fração elutriado, para avaliação dos elementos mais biodisponíveis para a coluna d'água e atestar a ausência de toxicidade para a biota desse ponto. Destaca-se ainda que a coleta das amostras ocorreu durante a estação seca, na qual em geral ocorrem menos processos de ressuspensão do sedimento de fundo. Com isso, a avaliação dos sedimentos da estação chuvosa também será importante para o fornecimento de um diagnóstico sobre o potencial de toxicidade.

Conclusão

O sedimento de diferentes pontos ao longo do leito principal do rio Doce ainda desperta preocupação em função da elevada concentração diversos elementos e potencial tóxico mesmo após cinco anos do rompimento da barragem de Fundão (Bento Rodrigues-MG). O ponto de Aimorés foi o que mais se destacou em relação a presença de níveis elevados de diversos elementos (Pb, Ba, Al, Cu e Zn, Cr), juntamente com o seu potencial de induzir letalidade no ensaio de toxicidade aguda com *Hyaella azteca*. Com isso, estudos à longo prazo ainda são necessários para compreender a dimensão dos impactos para o ambiente e para a biota, o que inclui análises com a matriz elutriado e de água.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15470: ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda e crônica – Método de ensaio com *Hyaella* spp em sedimentos. Rio de Janeiro, 2013.

BLOCKWELL, Stephen J.; MAUND, Stephen J.; PASCOE, David. Effects of the organochlorine insecticide lindane (γ -C₆H₆Cl₆) on the population responses of the freshwater amphipod *Hyaella azteca*. **Environmental Toxicology And Chemistry**, [S.L.], v. 18, n. 6, p. 1264-1269, jun. 1999. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/etc.5620180628>.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

BRASIL. Ibama. Ministério do Meio Ambiente. **Rompimento da Barragem de Fundão**: documentos relacionados ao desastre da samarco em mariana/mg. Documentos relacionados ao desastre da Samarco em Mariana/MG. 2020. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/recuperacao-ambiental/rompimento-da-barragem-de-fundao-desastre-da-samarco/documentos-relacionados-ao-desastre-da-samarco-em-mariana-mg>. Acesso em: 20 ago. 2022.

BURGER, Joanna. Bioindicators: a review of their use in the environmental literature 1970-2005. **Environmental Bioindicators**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 136-144, jul. 2006. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15555270600701540>.

BURTON, Allen G. Jr *et al.* Assessing sediment contamination using six toxicity assays. *Journal of Limnology*, v. 60, n. 2, p. 263-267, 2001.

CARMO, Flávio Fonseca do *et al.* Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of brazilian mining in global context. **Perspectives In Ecology And Conservation**, [S.L.], v. 15, n. 3, p. 145-151, jul. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>.

DANG, Fei; WANG, Wen-xiong. Why mercury concentration increases with fish size? Biokinetic explanation. *Environmental Pollution*, [s.l.], v. 163, p. 192-198, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.12.026>.

PASCOE, David; OTHMAN, M. Shuhaimi. Growth, development and reproduction of *Hyalella azteca* (Saussure, 1858) in laboratory culture. **Crustaceana**, v. 74, n. 2, p. 171-181, 2001.

Vergilio, C.d.S., Lacerda, D., Oliveira, B.C.V.d. *et al.* Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). *Sci Rep* **10**, 5936 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62700-w>

Agradecimentos

Ao LABTOX UFES, LCA UENF, PIIC UFES. Os dados são parte integrante do projeto financiado na CHAMADA FAPES/FAPEMIG/FUNDAÇÃO RENOVA - RECUPERAÇÃO DE ÁREAS IMPACTADAS PELO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO/MG (Termo de Outorga: 006/2021) (Processo: 2021-5KQR9).