

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

AVALIAÇÃO TEMPORAL DA TÓXICIDADE CRÔNICA DA ÁGUA DO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE MINÉRIO DE FERRO

Nayra Bento Côgo, Thaciana Fabíola Marques, Raquel Moura Ferraço, Higor Santos de Oliveira, Cristiane dos Santos Vergílio.

Universidade Federal do Espírito Santo, Laboratório de Ecotoxicologia Alto universitário, S/N – Guararema, Alegre – ES, 29500-000, Brasil, nayracogo@gmail.com, thacianafmarques@gmail.com, raquelmferraco@gmail.com, higorso.20@gmail.com, cristiane.vergilio@ufes.br.

Resumo

No dia 5 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem Fundão, que resultou na liberação de mais de 45 milhões m³ volume de rejeitos ao longo do rio Gualaxo do Norte, Carmo e rio Doce. O objetivo deste estudo é avaliar temporalmente a qualidade da água do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão por meio de ensaios de toxicidade crônica com a microalga *Raphidocelis subcapitata* exposta as amostras de água de pontos ao longo da calha principal do rio Doce, provenientes de diferentes anos de coleta (ano 1, ano 2, ano 5 e ano 6) após o rompimento da barragem de minério de ferro. Nos ensaios com *R. subcapitata* foi observada uma tendência de redução da toxicidade ao longo dos anos analisados. Apesar dos indícios de redução da toxicidade ao longo dos anos, é fundamental manter um monitoramento contínuo do rio Doce, em função do risco de ressuspensão dos elementos do sedimento para a coluna d'água e incorporação pela biota local.

Palavras-chave: Ensaios ecotoxicológicos; *Raphidocelis subcapitata*; Rio Doce, Rejeito.

Área do Conhecimento: Biologia Geral.

Introdução

O rompimento da barragem de de Fundão localizada no distrito de Mariana, Minas Gerais ocorreu em 5 de novembro de 2015 e devido à quantidade de rejeitos de minério de ferro liberados, sendo considerado um dos maiores desastres ambientais da história brasileira e do mundo envolvendo barragens de rejeitos (Burritt e Christ, 2018).

O rompimento da barragem de Fundão resultou em um dos maiores volumes de rejeitos já registrados, totalizando mais de 45 milhões de m³, e causou extensos danos ao longo de 663,2 Km de cursos d'água. Os poluentes percorreram 55 Km no rio Gualaxo do Norte até o rio Carmo, e os outros 22 Km até o rio Doce. O fluxo dos rejeitos continuou até a foz, desaguardo no Oceano Atlântico (IBAMA, 2015; Burritt e Christ, 2018).

A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) também registrou teores de elementos químicos, que possuíam concentrações acima do permitido pela CONAMA 357/2005 para água de classe II, como o Alumínio (Al) e Ferro (Fe) (CPRM, 2016). O nível elevado desses elementos nos corpos d'água é motivo de preocupação, pois podem ser absorvidos diretamente pela biota local, ou sofrer deposição para o sedimento de fundo (Magalhães e Filho, 2008).

Em função disso, se torna crucial expandir as pesquisas a fim de compreender o potencial tóxico dos rejeitos de minério de ferro para várias espécies no ambiente. Para esse propósito, a avaliação ecotoxicológica pode ser empregada como uma ferramenta exploratória para investigar a toxicidade dos rejeitos em diferentes organismos bioindicadores. As algas são amplamente reconhecidas como os principais produtores primários nos ecossistemas aquáticos, desempenhando um papel fundamental na cadeia alimentar. Assim, qualquer alteração na dinâmica das comunidades de algas pode afetar os níveis tróficos superiores do ecossistema além de, possuírem um ciclo de vida relativamente curto, possibilitando a observação de efeitos tóxicos ao longo das gerações (Reginatto, 1998; Costa et al., 2008). Em vista disso, o objetivo deste trabalho avaliar ao longo do tempo a toxicidade crônica da água do rio Doce em relação à microalga *Raphidocelis subcapitata*, após o incidente de rompimento da barragem de minério de ferro de Fundão.

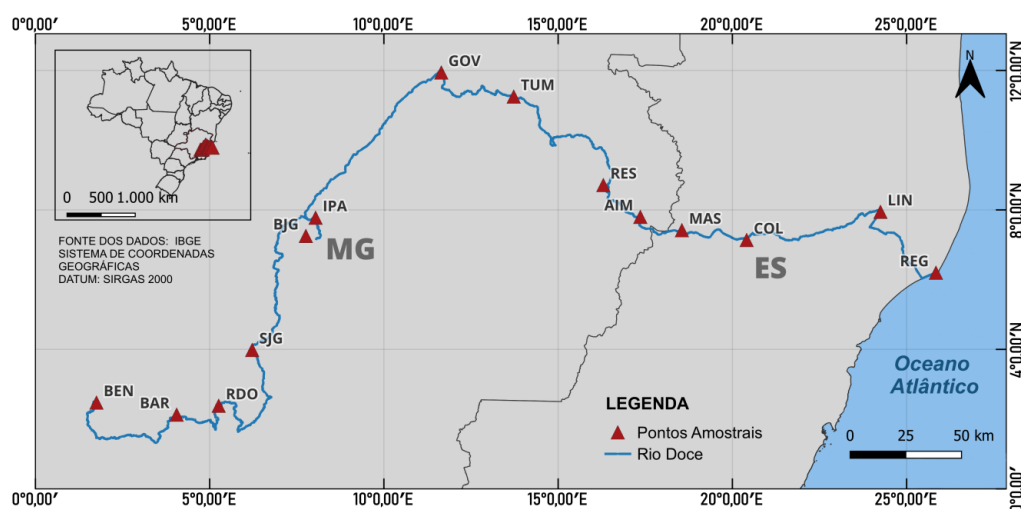
A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Metodologia

A área de estudo onde ocorreu o rompimento da barragem de Fundão está localizada próximo ao Quadrilátero Ferrífero, uma região que engloba um bloco de estruturas geológicas do Pré-cambriano e é considerada a província mineral mais relevante do sudeste do Brasil. A área é caracterizada por uma variedade de características hidrológicas, pedológicas, topográficas, dentre outras características. Dentre as características hidrológicas podemos destacar a presença de duas grandes bacias hidrográficas denominadas bacia do rio Doce e a bacia do rio São Francisco (Azevedo, 2012). A maior parte bacia hidrográfica do rio Doce está situada na região leste de Minas Gerais, enquanto o restante se encontra no centro do Espírito Santo (Marcuzzo, 2011).

As amostras de água do rio Doce (Figura 1) foram coletadas em diferentes anos ao longo da calha principal do rio Doce (dulcícolas/estuarino) com o auxílio de balde de aço inox 5 litros de água superficial, provenientes dos primeiros 30 cm da lâmina d'água para cada ponto amostral. A primeira coleta (ano 1) foi realizada logo após o rompimento da barragem (23 a 27 de novembro de 2015), durante a estação chuvosa, quando os rejeitos chegaram ao mar, em nove pontos de amostragem sendo eles: Ipatinga, Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor, Aimorés, Mascarenhas, Colatina, Linhares e Regência. A segunda coleta (ano 2) foi realizada durante a estação seca, seis meses após o rompimento da barragem (9 a 12 de maio de 2016), em treze locais de amostragem sendo eles: Bento Rodrigues, Gualaxo (Barra Longa), São José do Goiabal, Bom Jesus do Galho, Ipatinga, Governador Valadares, Tumiritinga, Resplendor, Aimorés, Mascarenhas, Colatina, Linhares e Regência. A terceira coleta (ano 5) foi realizada cinco anos após o rompimento da barragem, durante a estação seca (21 a 29 de junho de 2021) e a quarta coleta (ano 6), na estação chuvosa (10 a 19 de fevereiro de 2022), em dez pontos amostrais sendo eles: Bento Rodrigues, Barra Longa, Rio Doce, Ipatinga, Governador Valadares, Resplendor, Aimorés, Colatina, Linhares e Regência.

Figura 1 - Mapa da distribuição espacial dos pontos de amostragem nos ambientes dulcícola/estuarino. Legenda: Bento Rodrigues (BEN), Barra Longa (BAR), Rio Doce (RDO), São José do Goiabal (SJG), Bom Jesus do Galha (BJG), Ipatinga (IPA), Governador Valadares (GOV), Tumiritinga (TUM), Resplendor (RES), Aimores (AIM), Mascarenhas (MAS), Colatina (COL), Linhares (LIN), Regência (REG).



Fonte: Próprio autor.

O teste de toxicidade crônica utilizando a microalga dulcícola *R. subcapitata* foi realizado de acordo com a metodologia proposta pela ABNT NBR 12648:2018. Para os ensaios, dez repetições foram preparadas em tubos estéreis, contendo somente meio LC Oligo (no grupo controle) ou 10 mL de água de cada um dos pontos amostrais. A concentração de células de 1×10^4 foi adicionada a

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

cada réplica, o ensaio foi mantido na estufa incubadora BOD sob luz fluorescente branca contínua, na temperatura de 24°C durante 96 horas com agitação diária, os parâmetros físico-químicos (pH, condutividade e oxigênio dissolvido) foram aferidos ao início e ao final do teste.

Ao final do ensaio, cada réplica foi contada no microscópio óptico por meio da Câmara Neubauer na objetiva de 100x e os resultados só foram considerados válidos, quando o aumento da biomassa algácea média do controle foi 100 vezes superior à biomassa inicial, para 96 h, e o coeficiente de variação da biomassa algácea entre as réplicas do controle for menor ou igual a 20% (ABNT NBR 12648, 2018).

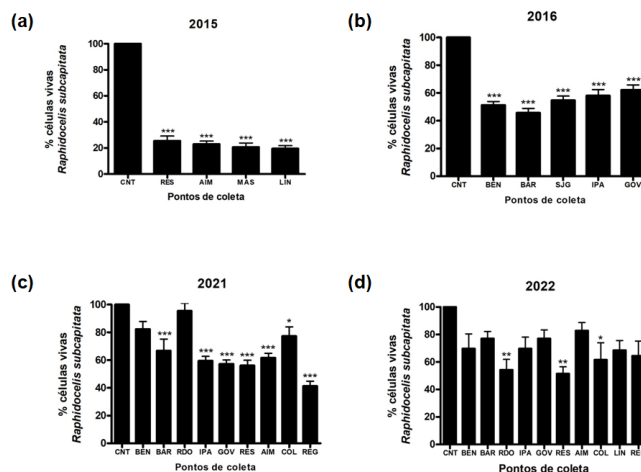
Para a análise estatística o número de células contadas foi convertido em percentual de células vivas em relação ao grupo controle. Os dados quantitativos foram comparados através de Análise de Variância (One-Way ANOVA), seguida pelo teste de comparações múltiplas de Tukey, sendo considerada uma margem de erro de 5%. Os cálculos e os gráficos foram realizados com a utilização do software Graphpad Prism.

Resultados

Nos resultados do ensaio de toxicidade crônica com a microalga dulcícola foi avaliado a multiplicação algácea seguindo as diretrizes estabelecidas na ABNT NBR 12648:2018. Os resultados encontrados demonstraram que houve ocorrência de toxicidade, evidenciada pela inibição do crescimento das células, em todos os anos analisados.

Nos anos 2015 e 2016 (Figura 2a e b), observou-se a menor taxa de crescimento algácea em relação aos anos subsequentes e ao controle, sendo observada toxicidade em todos os pontos amostrais avaliados. Conforme observado nos anos anteriores, uma inibição do crescimento algácea também foi observada na maior parte dos pontos expostos a amostras de água do ano de 2021 (Figura 2c), sendo que apenas os pontos BEN e RDO não apresentaram redução em seu crescimento algácea. Enquanto no ano de 2022 (Figura 2d), um menor número de amostras apresentou potencial de toxicidade crônica, sendo esse efeito registrado apenas nos pontos de RDO, RES e COL.

Figura 2 - Percentual de inibição do bioindicador *Raphidocelis subcapitata* exposta as amostras de água dos diferentes pontos amostrais do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão. (a) 2015 – Ano 1; (b) 2016 – Ano 2; (c) 2021 – Ano 5; (d) 2022 – Ano 6. A contagem do controle foi convertido em percentual de células, considerando que não sofreu inibição. O programa utilizado foi Graphpad versão de 2004, considerando-se * : $p < 0,05$; ** : $p < 0,01$; *** : $p < 0,001$.



Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros físico-químicos experimentais (pH, condutividade e oxigênio dissolvido) não demonstraram variabilidade (Tabela 1) de acordo com os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005 2005 para corpos de água doce para Classe 1 (acima de 6 mg/L), Classe 2 (acima de 5 mg/L) e Classe 3 (acima de 4 mg/L).

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos (oxigênio dissolvido, pH, condutividade) com as médias iniciais e finais dos ensaios da microalga *Raphidocelis subcapitata* às amostras de água do rio Doce.

Ano	Pontos de Coleta	Oxigênio dissolvido (4G/L)		pH		Condutividade (µS/cm)	
		Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
2015	CNT	6,0	8,7	7,5	9,4	175,2	172,2
	RES	5,7	7,8	8,1	9,2	175,7	173,6
	AIM	5,2	8,5	8,2	10,0	175,6	174,5
	MAS	6,4	7,6	8,2	10,1	175,1	174,0
	LIN	6,7	8,3	8,0	10,0	173,4	172,8
2016	CNT	5,4	8,2	7,4	8,7	171,5	171,2
	BEM	5,5	7,8	7,5	10,2	174,5	170,9
	BAR	5,7	8,3	7,7	10,2	174,0	171,7
	SJG	5,8	9,4	7,7	10,3	175,2	949,2
	IPA	5,9	10,3	7,6	10,4	173,7	170,5
	GOV	5,9	9,5	7,5	10,1	172,3	171,8
2021	CNT	6,3	9,9	7,0	7,4	170,6	172,0
	BEM	8,3	9,6	7,3	8,7	167,6	94,2
	BAR	7,7	9,8	7,2	8,9	168,0	171,9
	RDO	7,2	10,9	7,4	9,0	169,0	170,4
	IPA	8,0	11,5	7,0	9,2	167,3	170,5
	GOV	7,2	10,9	7,3	8,8	167,6	171,4
	RES	7,7	9,9	7,2	9,2	168,1	170,8
	AIM	7,9	9,7	7,3	9,1	170,3	171,5
	COL	7,3	9,3	7,0	8,4	169,5	172,5
	REG	8,3	10,3	7,4	9,3	171,5	174,0
2022	CNT	4,0	6,7	6,35	7,7	148,8	171,05
	BEM	4,25	5,6	5,5	8,5	45,45	170,2
	BAR	4,6	6,35	5,8	8,75	46,45	170,45
	RDO	4,3	6,75	5,55	8,9	41,5	169,85
	IPA	4,15	5,95	5,8	8,4	53,65	174,7
	GOV	4,5	6,2	5,8	8,4	43,05	169,9
	RES	4,2	6,75	5,65	8,3	58,6	171,75
	AIM	4,3	6,1	5,9	8,25	69,1	172,85
	COL	4,5	6,3	5,85	8,2	84,15	171,65
	LIN	4,45	6,4	5,8	8,6	64,25	170,85
	REG	5,2	6,4	6,1	8,4	104,6	173,1

Fonte: Próprio autor.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Discussão

A complexidade e diversidade são características distintivas do ambiente aquático. Ele engloba uma ampla variedade de ecossistemas, incluindo rios, lagos, estuários, mares e oceanos. Devido à sua natureza aberta e dinâmica, os sistemas aquáticos naturais estão sujeitos a alterações contínuas em sua composição química, sendo assim, as características físicas e químicas dos ecossistemas aquáticos têm um impacto significativo na atividade biológica e na forma como agentes químicos e outros xenobióticos (substâncias estranhas ao ambiente) podem afetar esses ecossistemas (RAND et al., 1995). O rompimento de uma barragem de minério de ferro causa danos significativos, como poluição ambiental, destruição de propriedades, interrupção das comunicações (ICOLD, 2001; Schoenberger, 2016).

No presente estudo, nos anos de 2015 e 2016, observou-se a menor taxa de crescimento algáceo, sendo observada toxicidade em todos os pontos amostrais avaliados. No ano de 2021, apenas as amostras de água dos pontos BEN e RDO não apresentaram redução crescimento algáceo, enquanto no ano de 2022, um menor número de amostras apresentou um potencial de toxicidade crônica. Com isso, na comparação temporal dos resultados experimentais é possível observar um menor potencial de inibição de crescimento algáceo ao longo dos anos, o que pode indicar uma possível redução na toxicidade crônica.

Vanderlei (2022) em monitoramento realizado em Mariana, após 1 dia do rompimento da barragem e posteriormente após um, dois e três meses identificou que a densidade, o tamanho e a complexidade algácea foram afetadas nos experimentos realizados com a água logo após a contaminação com os rejeitos. O autor identificou ainda que os níveis de fluorescência da clorofila a apresentou diferença entre os tratamentos ao longo do tempo.

Os parâmetros físico-químicos demonstraram consistência ao longo dos ensaios, indicando que esses dados não exerceram influência nos resultados obtidos. Dessa forma, a constituição do rejeito pode influenciar os processos metabólicos da alga, prejudicando seu desempenho e crescimento. Isso implique nos primeiros anos após o colapso da barragem, os resíduos podem ter tido um impacto elevado, com potencial de afetar diretamente o desenvolvimento de organismos fitoplactônicos da região.

Conclusão

Os ensaios com *R. subcapitata* demonstraram uma possível redução da toxicidade da água do rio Doce após o rompimento da barragem de minério de ferro ao longo dos anos avaliados. Ainda assim, se faz necessário um contínuo monitoramento do rio Doce, em função da flutuação dos rejeitos na coluna d'água, que ainda despertam preocupação. Tais efeitos podem estar ocorrendo com espécies do ambiente natural e levantam a necessidade de estudos para a avaliação de efeitos crônicos, que demonstrem possíveis efeitos na sobrevivência e reprodução de espécies locais.

Referências

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 12648:2018. Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaio com algas (Chlorophyceae)**. 27p, 2018.

AZEVEDO, U.R., MACHADO, M.M.M., CASTRO, P.T.A., RINGER, F.E., TREVISAN A., BEATO, D.A.C. **Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta**. In: Schobbenhaus C, Silva, CR (org). Geoparques do Brasil: propostas. Vol 1. Rio de Janeiro (RJ): CPRM, 2012. CPRM - Serviço Geológico do Brasil. p 183-220, 2012.

BURRITT, R.L., CHRIST, K.L. **Water risk in mining: analysis of the Samarco dam failure**. J. Clean. Prod. 178, 196–205, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.042>.

CARMO, F.F., KAMINO, L.H.Y., JUNIOR, R.T., DE CAMPOS, I.C. **Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context**. Perspect. Ecol. Conserv. 15 (3), 145–151, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005. **Resolução nº 357: Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e as diretrizes ambientais para sua classificação, bem como estabelece as condições e padrões para o lançamento de efluentes e dá outras providências.** Recuperado de Off. Diário 053, 58–63. <http://www.mma.gov.br>.

COSTA, C. R.; OLIVI, P. BOTTA, C. M. R.; ESPINDOLA, E. L. G. **A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação.** Quim Nova. 31 : 1820-1830, 2008. Disponível em: Vol31No7_1820_37-RV07485.pdf (amazonaws.com)

CPRM, 2016. **Monitoramento Espacial da Bacia do rio Doce : Relatório 04: Hidrometria, Sedimentometria e Qualidade da Água nas Estações Fluviométricas da RHN após a Ruptura da Barragem de Rejeito.** Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Belo Horizonte, 2016.

IBAMA, 2015. **Laudo técnico Preliminar: Impactos Ambientais Decorrentes do Desastre Envolvendo O Rompimento da Barragem de Fundão, Em Mariana, Minas Gerais** [Preliminary Technical Report: Environmental Impacts of the Disaster Involving the Disruption of Fundão Dam in Mariana, Minas Gerais].

ICOLD, 2001 **Tailings Dams - Risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences** - Bulletin121. Disponível em: <https://ussdams.wildapricot.org/resources/Documents/ICOLD%202001%20Bulletin%20121.pdf>

MAGALHÃES, D.P.; FERRÃO FILHO, A.S.. **A ecotoxicologia como ferramenta no biomonitoramento de ecossistemas aquáticos.** Oecol. Bras., 12 (3): 355 – 381, 2008.

MARCUZZO, F. F. N.; ROMERO, V.; CARDOSO, M. R. D.; FILHO, R. P. **Detalhamento Hidromorfológico Da Bacia Do Rio Doce.** XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

RAND, G. M.; WELLS, P. G.; MCCARTY, L. S. **Fundamentals of Aquatic Toxicology: Effects, Environmental Fate, and Risk Assessment.** 2nd ed., Taylor & Francis: Washington, 1995, cap. 1.

REGINATTO, V.; **Avaliação do ensaio de toxicidade com a alga *Scenedesmus subspicatus* para o estudo de efluentes industriais.** Tese de Doutorado, Universidade de Campinas, Brasil, 1998.

SCHOENBERGER, E. **Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities,** Resources Policy, 49, 119-128, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.009>.

VANDERLEI, M. R. **Contaminação aquática por rejeito de mineração: o caso do desastre ambiental de Mariana (MG).** 2022. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. DOI: 10.11606/T.18.2022.tde-30112022-145535

Agradecimentos

Ao financiamento fornecido pela 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.