

Citotoxicidade e genotoxicidade da água e sedimentos do Rio Doce na cidade de Governador Valadares - MG

Cytotoxicity and genotoxicity of water and sediments from the Doce River in the city of Governador Valadares - MG

Selton Salomão de Oliveira Pinho; Webert Luiz Oliveira Silva Arão; Ângelo Márcio Leite Denadai; Andréia Peraro do Nascimento; Leonardo Meneghin Mendonça*

Universidade Federal de Juiz de Fora, campus Governador Valadares, Instituto de Ciências da Vida, Departamento de Farmácia.

***Autor correspondente:** Leonardo Meneghin Mendonça. ORCID: 0000-0001-7351-6356. Universidade Federal de Juiz de Fora Campus Governador Valadares. R. Manoel Byrro, 241 - Vila Bretas, Gov. Valadares - MG, CEP 35032-620.

E-mail: leonardo.mendonca@ufjf.br. Telefone: +55 (33) 9 9871-3303.

Data de Submissão: 27/08/2025; **Data do Aceite:** 21/06/2026.

Citar: PINHO, S.S.O; ARÃO, W.L.O.S; DENADAI, A.M.L; NASCIMENTO, A.P; MENDONÇA, L.M. Citotoxicidade e genotoxicidade da água e sedimentos do Rio Doce na cidade de Governador Valadares - MG. **Brazilian Journal of Health and Pharmacy**, v. 8, n. 06, p. 76 - 87, 2026. DOI: <https://doi.org/XXXXXX>.

RESUMO

Após o desastre ambiental causado pelo rompimento da barragem de Fundão, em Minas Gerais (MG), rejeitos de minério foram despejados no Rio Doce, impactando a qualidade da água, ecossistemas e comunidades locais. O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial citotóxico e genotóxico de amostras de água e sedimentos do Rio Doce por meio do bioensaio com *Allium cepa*, que permite a análise do potencial tóxico de componentes na água a partir de seu efeito em células vegetais. Amostras de água bruta e sedimentos foram coletadas em diferentes locais e períodos na região de Governador Valadares, para análise macroscópica e microscópica das raízes de *A. cepa*. A análise físico-química revelou que os valores de pH, condutividade e turbidez estavam adequados. Entre os sedimentos, apenas a fração magnética apresentou citotoxicidade e genotoxicidade, evidenciadas pela redução no índice mitótico e formação de micronúcleos, respectivamente. Em contraste, as amostras de água bruta não mostraram alterações nos parâmetros avaliados, exceto pelo aumento significativo no crescimento das raízes. Não foram detectadas diferenças significativas relacionadas à sazonalidade ou localidade de coleta. Os resultados sugerem que, embora as amostras de água do Rio Doce não apresentem toxicidade aguda ou crônica frente ao modelo biológico utilizado, a fração magnética dos sedimentos apresentou um potencial tóxico, que pode representar riscos ambientais a longo prazo. Assim, são recomendados novos estudos e monitoramento contínuo para avaliar os impactos desses sedimentos e assegurar a qualidade ambiental da região.

Palavras-chave: *Allium cepa*; bioensaio; toxicidade; índice mitótico; mutagênese.

ABSTRACT

After the environmental disaster caused by the collapse of the Fundão dam, in Minas Gerais (MG), ore waste was dumped into the Doce River, impacting water quality, ecosystems and local communities. This work aimed to evaluate the cytotoxic and genotoxic potential of water and sediment samples from the Doce River through bioassay with *Allium cepa*, which allows an analysis of the toxic potential of components in the water based on their effect on plant cells. Raw water and sediment samples were collected in different locations and periods of the year, in the Governador Valadares region, for macroscopic and microscopic analysis of *A. cepa* roots. The physicochemical analysis revealed that pH, conductivity and turbidity values were adequate. Among the sediments, only the magnetic fraction showed cytotoxicity and genotoxicity, evidenced by the reduction in the mitotic index and micronuclei formation, respectively. In contrast, raw water samples showed no changes in the parameters evaluated, except for a significant increase in root growth. No significant differences related to seasonality or collection location were identified. The results suggest that, although the waters of the Doce River do not present acute or

chronic toxicity, the magnetic fraction of the sediments has a toxic potential, which may represent long-term environmental risks. Therefore, new studies and continuous monitoring are recommended to assess the impacts of these sediments and guarantee the water quality of the region.

Keywords: *Allium cepa*; biological assay; toxicity; mitotic index; mutagenesis.

.....

INTRODUÇÃO

O Rio Doce é um dos principais rios da região sudeste do Brasil, atravessando os estados de Minas Gerais (MG) e Espírito Santo (ES), com cerca de 853 km de extensão. Em Governador Valadares, além de fornecer água para o abastecimento público, o rio é essencial para atividades econômicas como agricultura, pesca e abastecimento industrial (Gomes et al., 2017; Viana, 2016).

Em 2015, o rompimento da barragem da Samarco, em Mariana - MG, causou um dos maiores desastres ambientais do Brasil, liberando rejeitos de mineração no Rio Doce e afetando a qualidade da água, o ecossistema e as populações ribeirinhas ao longo de sua bacia (Dias et al., 2018; Espindola et al., 2019). Além dos impactos ambientais, o desastre provocou a destruição da vila de Bento Rodrigues, resultando em 19 mortes e interrupção do abastecimento de água para mais de 500.000 pessoas (Gabriel et al., 2021; Quadra et al., 2019). Os efeitos também atingiram atividades econômicas dependentes do Rio Doce, incluindo abastecimento urbano, agricultura, pesca, indústria e geração de energia elétrica (Silva et al., 2019).

A avaliação toxicológica ambiental é essencial para proteger ecossistemas e a saúde humana contra os efeitos adversos de substâncias químicas. Este processo envolve a análise do impacto de poluentes, pesticidas, metais pesados e outras substâncias tóxicas liberadas no meio ambiente, garantindo a identificação de riscos potenciais à fauna, flora e aos recursos hídricos. Ao monitorar e prever os efeitos de poluentes ambientais, é possível mitigar danos ecológicos e evitar a contaminação de cadeias

alimentares e seres humanos (Vieira, Batista, 2023).

O teste *Allium cepa* L. é amplamente utilizado na avaliação toxicológica de citotoxicidade e genotoxicidade ambiental devido à sua simplicidade, baixo custo e sensibilidade. Esse teste é eficiente em avaliar a qualidade da água e sedimentos, fornecendo um indicador sobre os potenciais efeitos nocivos das substâncias poluentes no meio ambiente. Neste ensaio, as raízes de cebolas (*Allium cepa* L.) são expostas a amostras ambientais, e a análise das células meristemáticas permite detectar danos ao DNA (genotoxicidade) e alterações no ciclo celular (citotoxicidade) (Hoshina, Marin-Morales, 2009; Leme, Marin-Morales, 2009).

Os biomarcadores mais utilizados no teste de *A. cepa* são a diferença do tamanho da raiz (TR), que pode indicar de forma preliminar a presença de determinado contaminante no ecossistema, avaliando o potencial tóxico de um composto; o índice mitótico (IM), para a avaliação de citotoxicidade; e a frequência de micronúcleos (MN), para avaliar a genotoxicidade (Almeida et al., 2021).

Apesar dos estudos já realizados após o desastre de Mariana, ainda existem lacunas quanto à avaliação da citotoxicidade e genotoxicidade associadas à água e aos sedimentos do Rio Doce. Além disso, estudos envolvendo especificamente a fração magnética dos sedimentos, potencialmente com maior concentração de metais associados aos rejeitos de mineração, ainda são limitados. Nesse contexto, torna-se relevante investigar os potenciais efeitos tóxicos dessas matrizes ambientais utilizando bioensaios sensíveis, como o teste de *Allium cepa*. Assim, o presente estudo

teve como objetivo avaliar o potencial citotóxico e genotóxico de amostras de água, sedimentos e da fração magnética do sedimento do Rio Doce, na região de Governador Valadares. Para essa análise, foram utilizadas células meristemáticas da ponta da raiz de *A. cepa* para avaliação do índice mitótico, da formação de micronúcleos e do crescimento radicular como indicadores de toxicidade.

MÉTODOS

Coleta e preparo das amostras

Sedimentos

Amostra de sedimento foi coletada em Governador Valadares – MG, no bairro Ilha dos Araújos, em janeiro de 2022, dois dias após uma enchente que acometeu a região, após a redução do volume do rio, quando encontrava-se depositado sobre vias públicas.

A amostra foi seca em estufa por 2h à 100 °C, em seguida desagregada em gral e pistilo de ágata natural, e finalmente peneirada em Tamis (marca: Bertel 8" X 2" inox 304) com abertura de 250 μ m para fins de padronização em termos de granulometria e teor de água no estado sólido, sendo denominada a partir deste ponto como sedimento bruto (SB) e sedimento tamisado (ST).

Parte da amostra foi processada para separação da fração magnética. Para separação magnética, em 5 g do material seco e tamisado, adicionou-se 10 mL de água ultrapura (Milli-Q Direct-Q® 3 UV) usando uma micropipeta volumétrica e realizando homogeneização com uma espátula de inox. Em seguida, aproximou-se da parede do béquer um ímã de neodímio 5 cm x 5 cm x 1,2 cm e aguardou-se 2 min para que a separação ocorresse. Vencido o tempo, descartou-se o líquido e repetiu-se essa etapa por 15 vezes. Por fim, obteve-se uma fração magnética (FM) que foi seca em estufa por 2 h à 100 °C.

Água

Amostras brutas de água foram obtidas na margem do Rio Doce, em Governador Valadares - MG, em dois períodos diferentes (no período chuvoso, em fevereiro de 2024; e no período de seca, em julho de 2024), e em dois locais distintos (nos bairros São Pedro - 18°50'46"S 41°55'31"W e Ilha dos Araújos - 18°52'19"S 41°57'01"W), como demonstrado na Figura 1. Frascos de vidro borossilicato foram utilizados para coletar 1 L de cada amostra e, após a coleta, foram acondicionadas sob refrigeração até que as análises fossem realizadas.

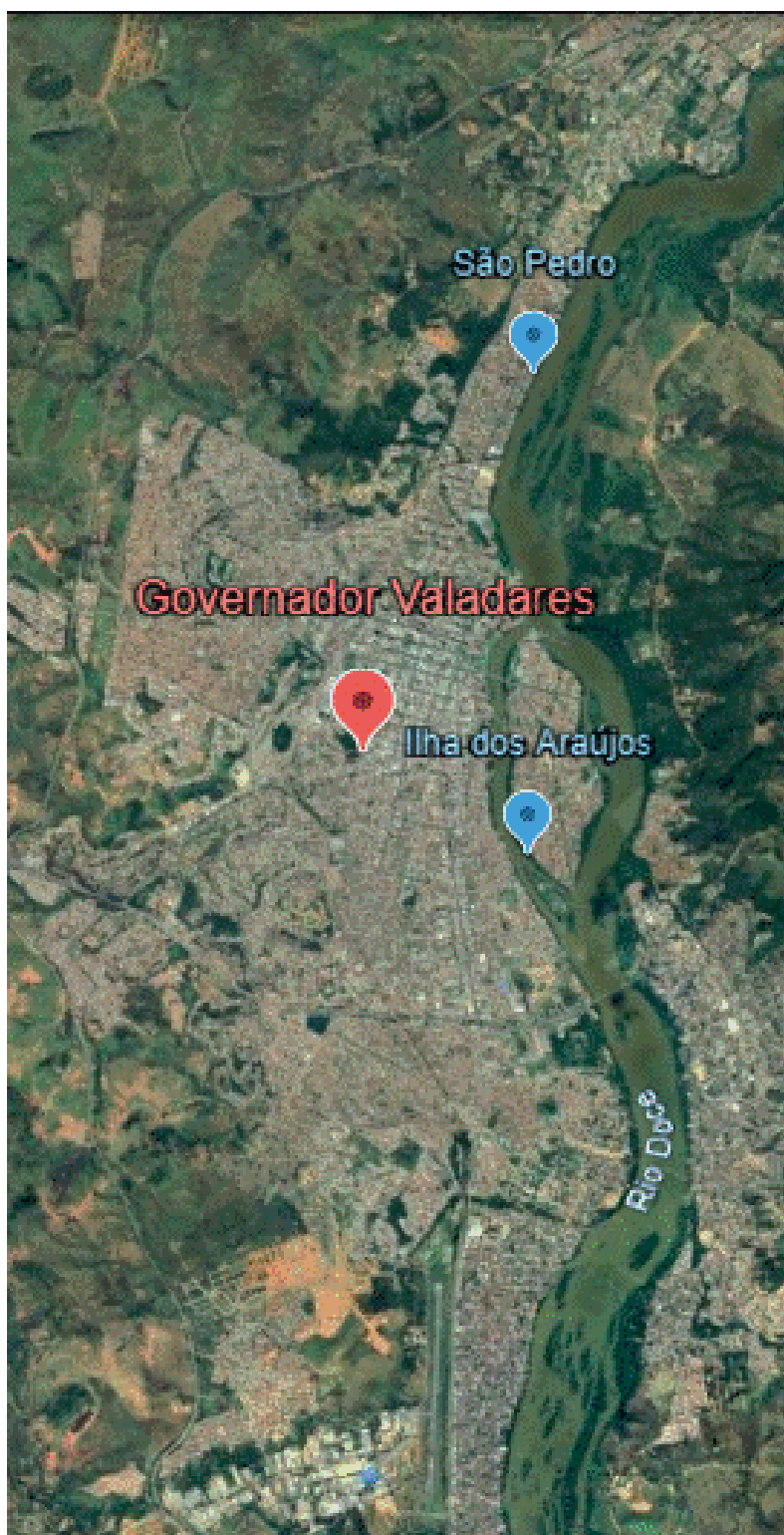


Figura 1: Imagem de satélite do Rio Doce na região de Governador Valadares com os pontos de coleta marcados em azul. **Fonte:** Google Earth.

Análises físico-químicas

A determinação do pH das amostras foi realizada por medição direta utilizando-se pHmetro da marca Mettler Toledo modelo S220 e calibrado no momento do uso. A condutividade foi determinada através de medição direta em condutivímetro da marca Mettler Toledo modelo S23. A determinação da turbidez foi realizada por método turbidimétrico utilizando-se turbidímetro modelo Turbidímetro Bancada AP2000 PoliControl. O equipamento foi calibrado com soluções de calibração de concentrações <0,1 NTU, 20 NTU, 100 NTU e 800 NTU. A amostra sem tratamento prévio foi transferida para uma cubeta de 8 cm de altura com tampa de rosca e acondicionada no aparelho, sendo a turbidez expressa em NTU (unidade nefelométrica de turbidez).

Análise citotóxica e genotóxica por meio do teste *Allium cepa* L.

Para a realização do teste, foi feito o procedimento proposto por Rodrigues e colaboradores (2011), com algumas modificações. Foram retiradas as cascas das cebolas e as raízes secas com o auxílio de um estilete. Em seguida, foi adicionada água obtida por osmose reversa em 5 béqueres de 50 mL de maneira que, ao adicionar os bulbos, as raízes destes fossem submersas. Depois de 24 h a água de cada béquer foi trocada. Ao completar 48 h, a água de todos os béqueres foi descartada e, com o auxílio de uma régua, foram medidos e registrados os tamanhos das 3 maiores raízes de cada cebola. Logo após foi adicionada cada solução teste em seu respectivo béquer devidamente identificado, sendo elas: controle positivo (solução de metanosulfonato de metila – MMS, a 10 µg/mL), controle negativo (água), e as amostras de sedimento e água bruta. O sedimento bruto, sedimento tamizado e a fração magnética foram diluídos em água, separadamente, e utilizados como tratamento na concentração de 1 mg/mL. Essa concentração foi definida com base no limite de dispersão/solubilidade da fração magnética em água.

A mesma concentração foi mantida para as demais amostras de sedimento com o objetivo de padronizar as condições experimentais entre os tratamentos. As amostras de água bruta armazenadas sob refrigeração foram homogeneizadas e utilizadas também como tratamento. Todas essas soluções foram trocadas mais uma vez ao alcançar 72 h do experimento e, ao completar 96 h, as 3 maiores raízes de cada cebola foram medidas novamente e, em seguida, as soluções teste foram descartadas para seguir para o próximo passo.

Para preparar as lâminas, foram destacadas, com estilete e pinça, as extremidades de duas raízes de cada cebola, regiões com alta divisão celular, transferindo-as para lâminas de vidro identificadas. As células foram coradas com orceína acética a 1%, aplicada sobre as raízes com uma pipeta Pasteur e deixadas em repouso por 10 min. Em seguida, foi colocada a lamínula, e a lâmina foi aquecida em chama por 3 s, repetindo o ciclo três vezes para fixação. Após a fixação, as raízes foram esmagadas manualmente com pressão dos polegares sobre a lamínula. O excesso de corante foi removido com papel toalha, e as lâminas foram levadas ao microscópio óptico para visualização das células meristemáticas.

Os parâmetros avaliados no teste foram a diferença nos tamanhos medidos das raízes (TR), o índice mitótico (IM) e a presença de micronúcleos (MN), conforme ilustrado na figura 2, que mostra a visualização das células para análise microscópica. Para cada lâmina, foram analisadas 1.000 células meristemáticas, sendo confeccionadas três lâminas independentes por tratamento, totalizando aproximadamente 3.000 células analisadas por grupo experimental. O índice mitótico correspondeu ao número de células em divisão a cada 1.000 células observadas (Figura 2).

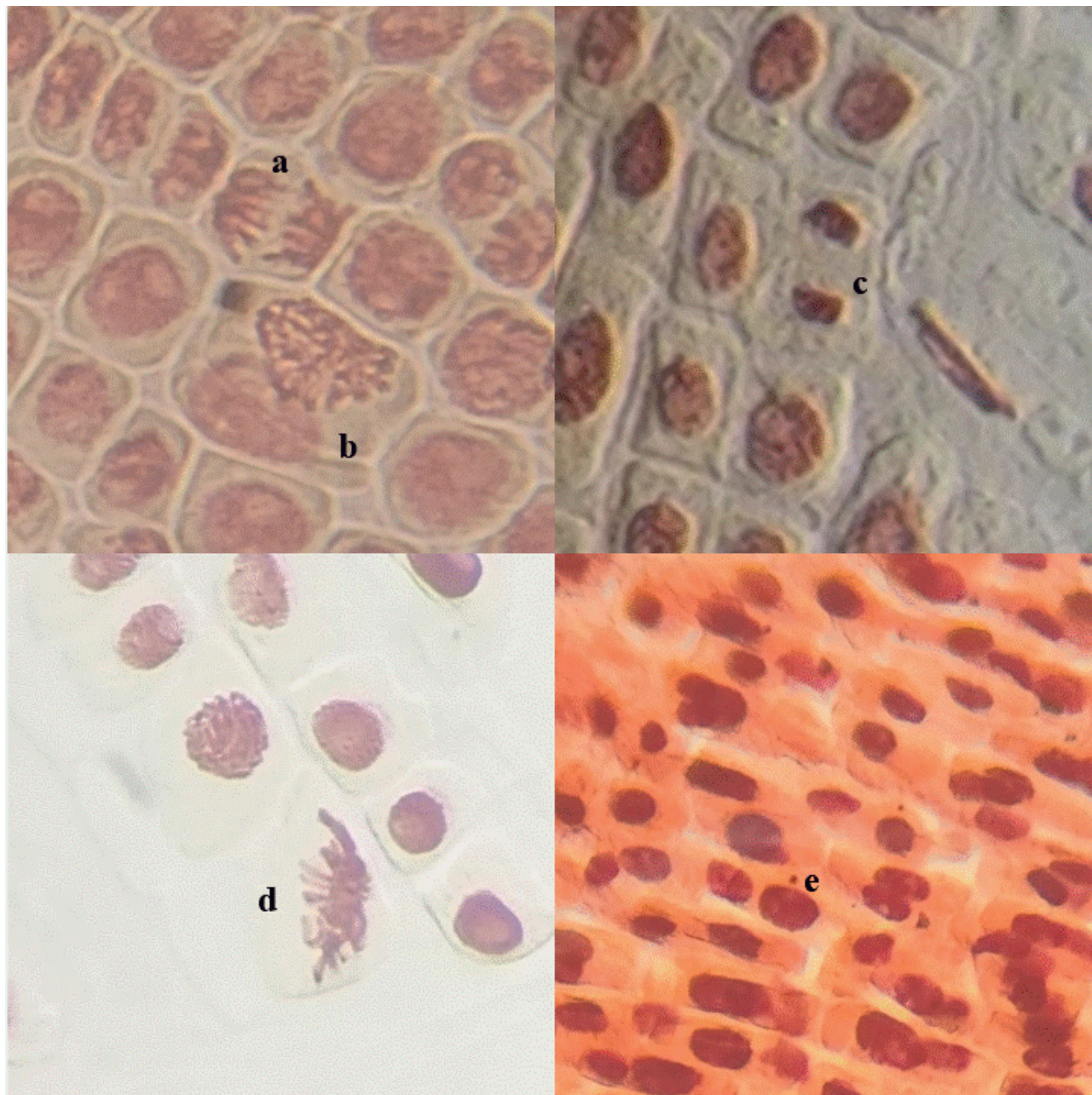


Figura 2: Representação das diferentes fases do ciclo celular observadas na análise microscópica, utilizadas como parâmetro para a avaliação da citotoxicidade e genotoxicidade em células meristemáticas de *A. cepa*. (a) Anáfase e (b) prófase, (c) telófase, (d) metáfase; (e) micronúcleo. Imagem obtida por microscopia óptica (aumento de 400x). **Fonte:** elaborado pelo autor (2024).

Análise estatística

Foram realizados três experimentos independentes para cada tratamento, sendo os resultados analisados com auxílio do programa GraphPad Prism. A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk. Considerando a distribuição não normal dos dados, foram utilizados testes não paramétricos para as análises estatísticas. O teste de Kruskal-Wallis foi aplicado para avaliação global entre os grupos. Posteriormente, comparações par a par entre grupos específicos de interesse foram realizadas utilizando o teste de Mann-Whitney. Considerou-se estatisticamente significativo $p < 0,05$.

RESULTADOS

Análises físico-químicas

Entre os parâmetros avaliados, cujos resultados se encontram na tabela 1, observou-se que os valores de pH estavam dentro dos recomendados pela resolução CONAMA nº 357 (Brasil, 2005), que estabelece uma faixa ideal de 6 a 9. A condutividade e a turbidez das amostras também se encontravam dentro dos limites estabelecidos, que são até 100 NTU para turbidez, de acordo com Brasil (2005), e condutividade até 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, segundo CETESB (2008), uma vez que valores acima deste servem como indicativo indireto de contaminação por poluentes.

Tabela 1: Análise físico-química das amostras de água coletadas do Rio Doce, em Governador Valadares-MG.

Amostras	pH	Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Turbidez (NTU*)
São Pedro (chuvoso)	7,2	54,1	60,0
Ilha dos Araújos (chuvoso)	7,1	47,2	57,0
São Pedro (seco)	6,9	65,4	22,0
Ilha dos Araújos (seco)	7,6	64,0	24,0

*NTU = unidade nefelométrica de turbidez.

Sedimentos

A Tabela 2 apresenta os resultados da avaliação dos efeitos citotóxicos e genotóxicos nas células de *A. cepa* expostas às amostras de sedimento. A fração magnética demonstrou efeito citotóxico e genotóxico, com uma redução de cerca de 60% no IM e um aumento significativo na formação de MN. Em contraste, os tratamentos com amostras de sedimento bruto e tamizado não produziram alterações significativas nos valores de IM, MN e TR, sugerindo ausência de toxicidade para essas amostras. Como esperado, o controle positivo tratado com MMS resultou em redução acentuada no IM, aumento nos níveis de MN e inibição do crescimento das raízes.

Tabela 2: Índice mitótico (IM), frequência de micronúcleos (MN) e diferença no crescimento das raízes (TR) de *A. cepa* após exposição às amostras de sedimento do Rio Doce, em Governador Valadares - MG.

Amostras	IM	MN	Diferença entre os tamanhos das raízes (cm)
Controle negativo	29,5 ± 22,3	0	1,48 ± 0,64
Controle positivo	9,25 ± 11,5	20,50 ± 25,47*	0,66 ± 0,73
Sedimento bruto	38,5 ± 12,5	0,75 ± 0,50	2,02 ± 0,47
Sedimento tamisado	31,3 ± 15,5	1,00 ± 1,00	2,74 ± 0,17
Fração magnética	12,0 ± 12,2	7,33 ± 5,51	1,82 ± 0,98

* Diferença significativa em relação ao controle negativo ($p < 0.05$), de acordo com o teste de Mann-Whitney. Ausência de símbolo indica ausência de diferença estatística significativa. Controle positivo corresponde ao tratamento com MMS na concentração de 10 µg/mL. O tratamento com as amostras de sedimento foi realizado na concentração de 1 mg/mL.

Água

A Tabela 3 apresenta os resultados da análise de citotoxicidade e genotoxicidade nas células de *A. cepa* expostas às amostras de água bruta. Não foram observadas diferenças significativas nos valores de IM e MN em nenhuma das amostras avaliadas. No entanto, todos os tratamentos com amostras de água promoveram um aumento significativo no crescimento das raízes. Nenhum parâmetro foi alterado pela sazonalidade, sem diferença significativa entre os períodos chuvoso e seco. Como esperado, o controle positivo com MMS causou redução do IM, aumento de MN e inibição do crescimento das raízes.

Tabela 3: Índice mitótico (IM), frequência de micronúcleos (MN) e crescimento das raízes (TR) em *A. cepa* expostas a amostras de água do Rio Doce, em Governador Valadares - MG.

Amostras	IM	MN	Diferença entre os tamanhos das raízes (cm)
Controle negativo	45 ± 13,1	0	1,63 ± 0,72
Controle positivo	12,5 ± 9,9*	5,67 ± 5,08*	0,022 ± 0,028*
São Pedro (chuvoso)	63,3 ± 46,5	0,33 ± 0,57	2,67 ± 0,40
Ilha dos Araújos (chuvoso)	50,0 ± 20,1	0	3,38 ± 0,86 *
São Pedro (seco)	42,3 ± 11,1	0	3,24 ± 0,31 *
Ilha dos Araújos (seco)	37,7 ± 3,1	0	3,19 ± 0,48 *

* Diferença estatisticamente significativa em relação ao controle negativo ($p < 0,05$), de acordo com o teste de Mann-Whitney. Ausência de símbolo indica ausência de diferença estatística significativa.

DISCUSSÃO

A análise dos efeitos citotóxicos e genotóxicos em células de *A. cepa* expostas a amostras de sedimento e água do Rio Doce revelou resultados significativos, destacando a importância do monitoramento ambiental. Entre as amostras de sedimentos, a fração magnética induziu aumento de micronúcleos (MN) e uma redução acentuada no índice mitótico (IM), indicando sua toxicidade. Em contraste, as amostras de água bruta não apresentaram alterações significativas nos parâmetros de IM e frequência de MN, embora tenham promovido um crescimento considerável das raízes. Importante ressaltar que não houve influência da sazonalidade nos resultados, uma vez que não foram observadas alterações significativas quando comparados os dois períodos e locais em que as amostras de água foram coletadas.

A análise físico-química das amostras de água bruta revelou que o pH, a condutividade e a turbidez estavam dentro da normalidade segundo a resolução CONAMA nº 357 (Brasil, 2005) e CETESB (2008), que determinam valores de pH entre 6 e 9, turbidez até 100 NTU e condutividade até 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como normais. Embora a acidez da água tenha baixa relevância sanitária, valores de pH anormais podem indicar a presença de agentes tóxicos que podem prejudicar o metabolismo de organismos aquáticos (Richter, Netto, 1991), podendo também exercer influência na precipitação de componentes tóxicos na água, como metais tóxicos (CETESB, 2008).

No bioensaio com *A. cepa*, a presença de compostos tóxicos provoca inibição do crescimento das raízes, sendo esse crescimento um parâmetro amplamente utilizado para avaliar o desenvolvimento do organismo avaliado (Oliveira et al., 2012). Enquanto as alterações no IM também podem servir como indicadores de danos a esses organismos, por avaliação de alterações no ciclo celular (Braga, Lopes, 2015), uma vez que a diminuição ou aumento no IM pode indicar um efeito tóxico, podendo estar relacionado com a alterações

na sinalização das atividades mitóticas das células ou desordem na divisão celular (Malakahmad et al., 2018).

A frequência de MN em células de *Allium cepa* é amplamente utilizada como biomarcador de genotoxicidade, pois reflete danos cromossômicos ou alterações no fuso mitótico. Dessa forma, esse parâmetro contribui para o rastreamento de efeitos genotóxicos associados à exposição a contaminantes ambientais (Hoshina, Marin-Morales, 2009; Wirz et al., 2005).

Nossos resultados mostraram que apenas a fração magnética do sedimento apresentou efeitos citotóxicos e genotóxicos, evidenciados pela diminuição do IM e pelo aumento da frequência de MN. Esse efeito pode estar relacionado à possível concentração de metais na fração magnética do sedimento. Estudos envolvendo rejeitos de minério de ferro demonstram que a separação magnética pode concentrar minerais ricos em ferro, como hematita, magnetita e goethita, além de outros componentes associados aos rejeitos de mineração (Gomes et al., 2011). Dessa forma, a fração magnética pode apresentar maior potencial citotóxico e genotóxico em comparação às demais frações avaliadas, reforçando a relevância de investigar a biodisponibilidade de contaminantes em diferentes matrizes ambientais.

Em nosso estudo, a ausência de efeitos citotóxicos e genotóxicos nas amostras de água bruta e nos sedimentos bruto e tamizado pode ser explicada pela redistribuição de metais ao longo do tempo. Segundo Vergilio e colaboradores (2021), o rompimento da barragem em 2015 levou a liberação de vários elementos dos minérios, principalmente o ferro e manganês, além de outros metais tóxicos, como cromo, chumbo, mercúrio e arsênio, que apresentaram elevadas concentrações na água após 15 dias do rompimento da barragem, mas com uma diminuição após 6 meses. Entretanto, o contrário ocorreu para os mesmos elementos nos sedimentos, indicando

que, com o passar do tempo, partículas suspensas se depositaram no fundo e ao longo do rio. Por isso se dá a importância da realização do monitoramento ambiental que avaliem a acumulação desses elementos na biota a longo prazo.

Estudos anteriores corroboram parcialmente nossos achados. Abessa et al. (2023) não observaram toxicidade aguda ou crônica em *Daphnia similis* e *Chironomus sancticaroli* expostos a amostras de água doce e sedimentos do Rio Doce. Os autores sugerem que, em sedimentos ricos em ferro, metais eventualmente liberados durante processos de ressuspensão podem ser rapidamente adsorvidos a oxihidróxidos, carbonatos, matéria orgânica e partículas em suspensão, reduzindo sua biodisponibilidade. Esses achados podem explicar, em parte, a ausência de efeitos citotóxicos e genotóxicos observada nas amostras de água bruta e nos sedimentos bruto e tamizado do presente estudo. Entretanto, os efeitos detectados na fração magnética indicam que frações específicas do sedimento podem apresentar respostas subletais, como alterações no índice mitótico e formação de micronúcleos, mesmo quando a matriz ambiental total não apresenta toxicidade evidente.

Dados disponíveis na literatura não são unânimes. Gomes e colaboradores (2018) observaram genotoxicidade em peixes (*Geophagus brasiliensis*) expostos às águas do Rio Doce, tanto antes quanto logo após o rompimento da barragem. Esses peixes apresentaram aumento significativo de danos ao DNA, atribuídos aos efeitos sinérgicos de metais presentes nos rejeitos de mineração. Da mesma forma, Quadra e colaboradores (2019) também relataram citotoxicidade observada em células meristemáticas de sementes de *A. cepa*, sugerindo que esses efeitos também poderiam se estender aos organismos que vivem no Rio Doce. Dessa forma, de acordo com Segura et al. (2016), a ausência de genotoxicidade observada em nosso estudo pode ser explicada por processos

biológicos, químicos ou físicos que podem ocorrer no ambiente, como a própria diluição da água pela chuva. Contudo, tais processos não eliminam completamente a presença de poluentes, uma vez que muitos podem se acumular em sedimentos, como evidenciado pela fração magnética analisada em nosso estudo.

O monitoramento contínuo e análises toxicológicas de longo prazo são essenciais para avaliar os impactos acumulativos no ecossistema do Rio Doce, especialmente diante da magnitude do desastre e da escassez de estudos realizados (Parvan et al., 2020; Vergilio et al., 2021). A dinâmica de composição da água e dos sedimentos pode variar significativamente ao longo do tempo, influenciada por fatores naturais e antrópicos. Essas variações podem alterar a biodisponibilidade e a toxicidade dos metais, impactando diretamente a qualidade ambiental e os efeitos no ecossistema.

Este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas, incluindo a utilização de uma única concentração nos ensaios com sedimentos e a ausência de caracterização química detalhada das amostras, especialmente da fração magnética. Além disso, o uso de um único modelo biológico limita extrapolações mais amplas sobre os efeitos ecotoxicológicos observados. Assim, estudos futuros envolvendo diferentes concentrações, análises químicas complementares e outros organismos bioindicadores são necessários para melhor compreensão dos impactos associados às matrizes analisadas.

CONCLUSÃO

O bioensaio utilizando *Allium cepa* mostrou-se útil para avaliar a citotoxicidade e genotoxicidade de amostras ambientais do Rio Doce. Este estudo demonstrou que as amostras de água analisadas não apresentaram citotoxicidade ou genotoxicidade frente ao modelo biológico utilizado. Entretanto, a fração magnética do sedimento provocou redução do índice

mitótico e indução da formação de micronúcleos nas células de *Allium cepa*, indicando potencial citotóxico e genotóxico. Esses achados reforçam a importância do monitoramento ambiental não apenas da água, mas também dos sedimentos, especialmente de frações que podem concentrar contaminantes. Assim, políticas e ações de monitoramento devem considerar os sedimentos como reservatórios potenciais de substâncias tóxicas, uma vez que processos de ressuspensão podem afetar a qualidade da água.

CONFLITO DE INTERESSE

Nada a declarar.

REFERÊNCIAS

ABESSA, D. et al. Has the Rio Doce “time bomb” been defused? Using a weight-of-evidence approach to determine sediment quality. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 20, n. 1, p. 148-158, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1002/ieam.4785>.

ALMEIDA, L.M. et al. Conservação e monitoramento ambiental utilizando *Allium cepa* como indicadora de poluição das águas superficiais: uma revisão narrativa. **Águas e florestas: desafios para conservação e utilização**, v. 1, n. 1, p. 174-191, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37885/210303792>.

BRAGA, J.R.M.; LOPES, D.M. Citotoxicidade e genotoxicidade da água do rio Subaé (Humildes, Bahia, Brasil) usando *Allium cepa* L. como bioindicador. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, p. 130-140, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1459>.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Estabelece a classificação dos corpos de água e as condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União. Brasília, 2005. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005

[classificacao_corpos_agua_rtfcdaltrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf](#).

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. São Paulo, 2008. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/server/api/core/bitstreams/861cd7c7-a2c2-41a8-8902-bfb40a870fbb/content>.

DIAS, C.A. et al. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço**, v. 7, n. 1, p. 21-35, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3952940>.

ESPINDOLA, H.S.; NODARI, E.S.; SANTOS, M.A. Rio Doce: riscos e incertezas a partir do desastre de Mariana (MG). **Revista Brasileira de História**, v. 39, n. 81, p. 141-162, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-93472019v39n81-07>.

GABRIEL, F.A. et al. Long-term contamination of the rio Doce estuary as a result of Brazil's largest environmental disaster. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 19, n. 4, p. 417-428, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.09.001>.

GOMES, L.C. et al. Genotoxicity effects on *Geophagus brasiliensis* fish exposed to Doce river water after the environmental disaster in the city of Mariana, MG, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 79, n. 4, p. 659-664, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.188086>.

GOMES, L.E.O. et al. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 120, p. 28-36, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.056>.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. E. C. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, p. 201-206, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0370->

[44672011000200016](https://doi.org/10.1016/j.econenv.2009.07.002)

HOSHINA, M.M.; MARIN-MORALES, M.A. Micronucleus and chromosome aberrations induced in onion (*Allium cepa*) by a petroleum refinery effluent and by river water that receives this effluent. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 72, n. 8, p. 2090-2095, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.econenv.2009.07.002>.

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, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>.

MALAKAHMAD, A. et al. Genotoxicity assessment of raw and treated water samples using *Allium cepa* assay: evidence from Perak river, Malaysia. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 5421-5436, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0721-8>.

OLIVEIRA, J. P. W.; SANTOS, R.N.; BOEIRA, J.M. Genotoxicity and physical chemistry analysis of waters from Sinos river (RS) using *Allium cepa* and *Eichhornia crassipes* as bioindicators. **BBR-Biochemistry and Biotechnology Reports**, v. 1, n. 1, p. 15-22, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5433/2316-5200.2012v1n1p15>.

PARVAN, L.G. et al. Bioensaio com *Allium cepa* revela genotoxicidade de herbicida com flumioxazina. **Revista Pan-Amazônica de Saúde**, v. 11, p. 1-10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5123/S2176-6223202000544>.

QUADRA, G.R. et al. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. **Chemosphere**, v. 215, p. 753-757, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.104>.

RICHTER, C.A.; NETTO, J.M.A. **Tratamento de água**. 1ª ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1991.

RODRIGUES, B.C.R.R. et al. Preparo de lâmina para observação de mitose de célula vegetal ao microscópio óptico. **Biblioteca Virtual de Ciências**, 2011. Disponível em: <https://www.bdc.ib.unicamp.br/bdc/>

[visualizarMaterial.php?idMaterial=1104&alterarIdioma=sim&novoldioma=pt](#).

SEGURA, F.R. et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, v. 218, p. 813-825, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>.

SILVA, M.Z.; CAYRES, D.C.; SOUZA, L.A.M. Desastre socioambiental e Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC) como instrumento de política pública: O caso da barragem de Fundão, MG. **Civitas - Revista de Ciências Sociais**, v. 19, n. 2, p. 464-488, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15448/1984-7289.2019.2.30227>.

VERGILIO, C.S. et al. Immediate and long-term impacts of one of the worst mining tailing dam failure worldwide (Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil). **Science of the Total Environment**, v. 756, p. 143697, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143697>.

VIANA, J.P. Os pescadores da bacia do rio Doce: subsídios para a mitigação dos impactos socioambientais do desastre da Samarco em Mariana, Minas Gerais. **Nota Técnica IPEA**, n. 11, p. 3-51, 2016. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7261/1/NT_n11_Dirur.pdf.

VIEIRA, K.V.S.; BATISTA, D.C.A. De que forma o consumo de frutas e hortaliças pode impactar a toxicologia ambiental no Brasil?. **Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro**, v. 13, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.61164/rmnm.v13i1.2004>.

WIRZ, M.V.M.A.; SALDIVA, P.H.; FREIRE-MAIA, D.V. Micronucleus test for monitoring genotoxicity of polluted river water in *Rana catesbeiana* tadpoles. **Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology**, v. 75, n. 6, p. 1220-1227, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00128-005-0879-5>.