



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



---

**VANESSA REZENDE CERCEAU IBRAIM**

**AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DO  
ELEMENTO FERRO ( $Fe^{2+}$ ) NA SOBREVIVÊNCIA E REPRODUÇÃO DE  
*CERIODAPHNIA CORNUTA* (CRUSTACEA, CLADOCERA)**

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**Ouro Preto, 2021**

**VANESSA REZENDE CERCEAU IBRAIM**

**AVALIAÇÃO PRELIMINAR DE DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DO  
ELEMENTO FERRO (FE<sup>2+</sup>) NA SOBREVIVÊNCIA E REPRODUÇÃO DE  
*CERIODAPHNIA CORNUTA* (CRUSTACEA, CLADOCERA)**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Eneida Maria Eskinazi-Sant'Anna

**Ouro Preto, 2021**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE BIODIVERSIDADE, EVOLUÇÃO E MEIO AMBIENTE



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Vanessa Rezende Cerceau Ibraim**

**Avaliação Preliminar de Diferentes Concentrações do Elemento Ferro ( $Fe^{2+}$ ) na Sobrevivência e Reprodução de *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera)**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental

Aprovada em 20 de julho de 2021

Membros da banca

Dra. Eneida Eskinazi Sant'Anna - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. César Falcão Barella - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dra. Gleice Souza Santos - Universidade Federal de Ouro Preto

Eneida Eskinazi Sant'Anna, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 04/08/2021



Documento assinado eletronicamente por **Eneida Maria Eskinazi Sant'anna, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/08/2021, às 09:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0202039** e o código CRC **DA64ED90**.

**Referência:** Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.007837/2021-18

SEI nº 0202039

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000  
Telefone: 3135591747 - www.ufop.br

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais e a toda a minha família  
que sempre me apoiaram.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus durante todos esses anos pela fé, coragem e persistência para nunca desistir diante das dificuldades.

Aos meus pais Antônio e Vilma pelo apoio, compreensão e amor, por nunca desistirem de mim e sempre fazendo com que o ensino e a educação fossem primordiais em minha vida.

A minha irmã e melhor amiga Ana por estar junto comigo nessa caminhada sempre me escutando e aconselhando.

As minhas sobrinhas Beatriz, Clara e Olívia pela alegria e carinho.

A toda a minha família, a minha avó, aos meus tios e primos por toda a força.

Ao Rômulo, meu companheiro durante esses anos, pelo incentivo, paciência e sempre estar presente em todos os momentos.

As minhas amigas Ana, Fran, Isa, Lê, Tamis e Mim, pelos anos de amizade e apoio, conselhos e amizade. E aos amigos que fiz durante minha graduação, cada um foi de suma importância, em especial ao CA.

A todos do laboratório LAECO, em especial a minha orientadora Eneida, a Edissa a Gleice e o Davi, que me ajudaram muito durante todo o experimento e cujos ensinamentos e incentivos foram fundamentais para o meu aprendizado durante a graduação.

Aos professores do departamento de Engenharia Ambiental e a toda a UFOP pelo ensino de qualidade sendo essenciais para a minha formação.

## RESUMO

A extração de minerais metálicos tem um papel importante para a economia nacional brasileira, porém provocam extremas mudanças no ambiente. O rompimento de barragens de rejeitos dos últimos anos tem gerado impactos graves, provocando redução da qualidade ambiental e riscos à saúde humana. Concentrações elevadas de contaminantes, principalmente metais, em ambientes lacustres, podem ocasionar inúmeros impactos aos ecossistemas aquáticos, especialmente à biota aquática. Os efeitos agudos e crônicos do elemento ferro nas taxas de sobrevivência e reprodução de organismos zooplânctônicos de ambientes limnéticos ainda são pouco estudados, especialmente em Minas Gerais. Esse trabalho teve como objetivo analisar o efeito da exposição crônica do elemento ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) nas concentrações de 0,2 mg/Fe/L e 0,02 mg/Fe/L, utilizando como organismo teste o cladóceros *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera). Primeiramente foi realizada uma exposição aguda com as concentrações de 2,0 mg/Fe/L; 0,2 mg/Fe/L e 0,02 mg/Fe/L onde a maior concentração apresentou efeito letal aos organismos, sendo utilizada as concentrações de 0,2 mg/Fe/L e 0,02 mg/Fe/L para as análises de efeito crônico. Foram analisados durante 30 dias o tamanho, a reprodução através do número de indivíduos produzidos por fêmeas e a mortalidade dos organismos. Os testes não indicaram diferença estatística (ANOVA) entre os tratamentos, sendo realizado um segundo experimento. Em ambos os experimentos não foram observados nas concentrações de 0,2 mg/Fe/L e 0,02 mg/Fe/L nenhum efeito negativo significativo no tamanho sobrevivência e reprodução do cladóceros *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera). Devido a pandemia da COVID-19 não foi possível a repetição do experimento com condições de cultivos melhoradas.

**Palavras-chaves:** Ciclo de vida, ferro, cladóceros, efeito crônico

## ABSTRACT

The extraction of metallic minerals plays an important role in the Brazilian national economy, but it causes extreme changes in the environment. The collapse of tailings dams in recent years has had serious impacts, causing a reduction in environmental quality and risks to human health. High concentrations of contaminants, especially metals, in lacustrine environments can cause numerous impacts to aquatic ecosystems, especially aquatic biota. The acute and chronic effects of the element iron on the incidence and reproduction rates of zooplankton organisms from limnetic environments are still poorly studied, especially in Minas Gerais. This work aimed to analyze the effect of chronic exposure to the element iron ( $\text{Fe}^{2+}$ ) in tools of 0.2 mg / Fe / L and 0.02 mg / Fe / L, using as test organism the cladoceran *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea , Cladocera ) First, an acute exposure was performed with the rules of 2.0 mg / Fe / L; 0.2 mg / Fe / L and 0.02 mg / Fe / L where the highest concentration has a lethal effect to organisms, being used as tools of 0.2 mg / Fe / L and 0.02 mg / Fe / L for chronic effect analyses. Were transmitted 30 days the size, reproduction through the number of research necessary for the mortality of organisms. The tests did not indicate difference statistics (ANOVA) between treatments, being carried out a second experiment. In both experiments, no significant negative effect on size and reproduction of the cladoceran *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera) was observed in the practices of 0.2 mg / Fe / L and 0.02 mg / Fe / L. Due to a COVID-19 pandemic, it was not possible to repeat the experiment with other culture conditions.

**Keywords:** Life cycle, iron, cladocerans, chronic effect

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b> Métodos de alteamento de barragens de mineração .....	16
<b>Figura 2-</b> Encontro do Rio do Carmo e do Rio Gualaxo do Norte, ainda com rejeito da barragem da mineradora Samarco.....	20
<b>Figura 3-</b> Representação dos diferentes organismos zooplanctônicos. A: espécimes do zooplâncton (copépodos Cyclopoida, náuplios e cladóceros). B: cladóceros <i>Daphnia laevis</i> em destaque. C: cladóceros <i>Ceriodaphnia dubia</i> . D: rotífero <i>Filinia</i> sp. E: cladóceros <i>Diaphanosoma</i> sp. F) rotífero <i>Plationus patulus</i> G: Copépodo <i>Cyclopoida</i> .....	22
<b>Figura 4-</b> Imagem do Google Earth da localização da Lagoa dos Coutos.....	25
<b>Figura 5-</b> Dia da coleta na Lagoa dos Coutos no período de seca.....	26
<b>Figura 6-</b> (a) Amostra de sedimento preparada para a eclosão dos ovos e (b) placa de cultivo com as fêmeas adultas .....	27
<b>Figura 7-</b> Variação do tamanho de <i>C. cornuta</i> , em 3 diferentes tratamentos ao longo de 30 dias de exposição as concentrações de $Fe^{2+}$ (controle; 0,02 e 0,2 mg. L <sup>-1</sup> ).....	31
<b>Figura 8-</b> Comprimento corporal médio ( $\mu m$ ) de <i>Ceriodaphnia cornuta</i> durante 30 dias de exposição as concentrações de $Fe^{2+}$ (controle; 0,02 e 0,2 mg. L <sup>-1</sup> ) .....	31
<b>Figura 9-</b> Número total de neonatos produzido por fêmeas para cada tratamento ao final dos 30 dias de experimento.....	33
<b>Figura 10-</b> Mortalidade total de cada tratamento ao final dos 30 dias de experimento .....	34
<b>Figura 11-</b> Número diário de organismos que morreram em cada tratamento nos 30 dias do experimento. ....	34
<b>Figura 12-</b> Variação do tamanho de <i>C. cornuta</i> , em 3 diferentes tratamentos ao longo de 30 dias de exposição as concentrações de $Fe^{2+}$ (controle; 0,02 e 0,2 mg. L <sup>-1</sup> ) no segundo experimento.....	36
<b>Figura 13-</b> Comprimento corporal médio ( $\mu m$ ) de <i>Ceriodaphnia cornuta</i> durante 30 dias de exposição as concentrações de $Fe^{2+}$ (controle; 0,02 e 0,2 mg. L <sup>-1</sup> ) no segundo experimento.....	37
<b>Figura 14-</b> Número total de neonatos produzido por fêmeas para cada tratamento ao final dos 30 dias do segundo experimento. ....	39



<b>Figura 15-</b> Mortalidade total de cada tratamento ao final dos 30 dias do segundo experimento.....	40
<b>Figura 16-</b> Número diário de organismos que morreram em cada tratamento nos 30 dias do segundo experimento .....	40

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Composição química dos minerais normalmente encontrados em rejeitos da mineração de ferro. ....	17
<b>Tabela 2-</b> Resultado das análises feita com o grupo controle e os tratamentos com $Fe^{2+}$ nas concentrações de 0,02 mg. L <sup>-1</sup> e 0,2 mg. L <sup>-1</sup> (ANOVA, P< 0,05). ....	30
<b>Tabela 3-</b> Valores dos tamanhos corporais médio ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão (SD) de <i>Ceriodaphnia cornuta</i> durante 30 dias de exposição as concentrações de $Fe^{2+}$ (controle; 0,02 e 0,2 mg. L <sup>-1</sup> ) no experimento 1.....	32
<b>Tabela 4-</b> Resultado das análises feita com o grupo controle e os tratamentos com $Fe^{2+}$ nas concentrações de 0,02 mg. L <sup>-1</sup> e 0,2 mg.L <sup>-1</sup> (ANOVA, P< 0,05)para o segundo experimento.....	35
<b>Tabela 5-</b> Valores dos tamanhos corporais médio ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão (SD) de <i>Ceriodaphnia cornuta</i> durante 30 dias de exposição as concentrações de $Fe^{2+}$ (controle; 0,02 e 0,2 mg. L <sup>-1</sup> ) no experimento 2.....	37

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
4.1.	Obtenção de indivíduos do organismo-teste <i>C. cornuta</i> .....	24
4.2.	Organismos-Teste .....	26
4.3.	Solução teste .....	27
4.4.	Teste de efeito agudo e crônico com Fe <sup>2+</sup> .....	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>29</b>
5.1.	Primeiro experimento .....	29
5.2.	Segundo experimento .....	34
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>43</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O forte crescimento da indústria da mineração devido ao aumento constante da demanda de *commodities* tem tido grande destaque no Brasil, que possui reservas minerais em quase todo o seu território, proporcionando ao país geração de emprego e expressiva contribuição para o crescimento econômico nacional. No ano de 2016, o setor produziu cerca de R\$72 bilhões, dos quais 77% correspondem a produção de minerais metálicos, principalmente de ferro, ouro, alumínio, cobre, estanho, manganês, nióbio e níquel (ANM, 2018). Dentre estes, o ferro, a maior *commodity* mineral brasileira, é responsável por mais de 64% do valor da produção total. Com elevada produção, também são geradas quantidades significativas de rejeitos que são estocados em barragens, e podem ser tóxicos e causar danos severos à natureza se não contidos e tratados (ANM, 2018).

Gomes (2017) fez um levantamento onde mostrou que, apenas no ano de 2014, mais de 110 milhões de toneladas de rejeito de minério de ferro foram estocadas em barragens de rejeito no estado de Minas Gerais (MG). Cidades como Belo Horizonte, Itabira, Itabirito, Mariana, Nova Lima, Ouro Preto, Sabará, entre outras, além de abrigarem grandes empreendimentos de minério de ferro também abrigam outras minas e barragens de minerais como ouro, calcário, bauxita, manganês, argila, caulim, entre outros (Roeser, 2010).

Em toda a área do Quadrilátero Ferrífero há influência das atividades da mineração nos recursos ambientais, principalmente na qualidade dos mananciais hídricos. Dentre os impactos ambientais gerados pela mineração a ruptura de barragens de rejeito vêm sendo de grande preocupação. No dia 5 de novembro de 2015 o rompimento da Barragem de Fundão, da mineradora Samarco/BHP, atingindo o distrito de Bento Rodrigues – MG, vários outros municípios ao longo de cerca de 650 quilômetros de extensão do rio Doce (MG) até o mar do Espírito Santo (ES). Recentemente em 25 de janeiro de 2019 no município de Brumadinho, ocorreu o rompimento da barragem 1 da mina córrego do Feijão, pertencente a mineradora Vale S.A. Nesses desastres foram despejados milhões de metros cúbicos de resíduos na calha principal do rio Doce, e no rio Paraopeba respectivamente, trazendo inúmeras

consequências sociais, econômicas e ambientais (Gomes *et al.*, 2019.; Segura *et al.*, 2016).

Estudos realizados por Segura (2016) com amostras de lama de rejeito, solo e água após o rompimento de Fundão, mostraram que a retenção de lama na água apresentou concentrações de Fe e Mn aproximadamente 4 vezes superior ao limite máximo, equivalente a  $0,3 \text{ mg. L}^{-1}$  Fe dissolvido para águas de classes 1 e 2 (Brasil, 2005), para avaliação da qualidade dos corpos d'água, de acordo com as leis brasileiras e ainda um maior potencial de mobilidade para vários compartimentos ambientais, como água do mar e sedimentos (Segura *et al.*, 2016). Além disso, as análises dos metais presentes em sedimentos do estuário do rio Doce, localizado no distrito de Linhares (ES), apresentou elevada concentração principalmente, ferro, manganês, níquel e cobre, ultrapassando os níveis mundiais permitidos e propostos na literatura, considerando o Nível de Efeito Limite (TEL) e o Nível de Efeito Provável (PEL) (Romero, 2017).

O rompimento das barragens de rejeito pode causar grandes problemas sócio econômicos, de saúde pública e ao meio ambiente. Nos ecossistemas aquáticos, a presença do rejeito pode causar o aumento de sólidos totais em suspensão, turbidez, aumento de metais pesados, interferência no pH, influência no nível freático, entre outros (Carvalho *et al.*, 2017; Cross *et al.*, 2017; Dias *et al.*, 2018). Esses fatores, além de influenciarem o meio abiótico, vão agir diretamente sobre a comunidade biótica, causando redução na abundância e na riqueza dos organismos aquáticos, podendo afetar toda a cadeia trófica (César, 2003; Edwards *et al.*, 2003; IBAMA, 2015; Segura *et al.*, 2016).

Dentre a biota dos ecossistemas aquáticos, a comunidade zooplanctônica se destaca pela enorme riqueza de espécies, sendo representada principalmente pelos grupos que compreende organismos invertebrados bentônicos e pelágicos, incluindo principalmente os grupos de rotíferos, cladóceros e copépodes (De-Carli, 2018, apud Tundisi & Matsumura- Tundisi, 2008). Devido ao curto ciclo de vida, rápida reprodução e a sensibilidade de algumas espécies às mudanças ambientais, os organismos zooplanctônicos tem grande importância ecológica, pois são considerados bioindicadores nos ecossistemas aquáticos (De-Carli, 2018; Zannatul, 2009), além de ter um papel fundamental no fluxo de energia e na ciclagem de nutrientes (Santos *et al.*, 2009; Sousa *et al.*, 2008).

Muitos estudos vêm sendo realizados com organismos zooplanctônicos, para determinar o efeito tóxico de elementos químicos, em diferentes concentrações, sobre sua taxa de reprodução e sobrevivência (Sales, 2013). Estudos realizados por Gebara (2019), sobre a toxicidade crônica de nanopartículas de óxido de ferro (nano-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), encontrou que essas nanopartículas causaram uma inibição significativa no crescimento e na reprodução de *Ceriodaphnia silvestrii*, parâmetros essenciais para manutenção desta espécie em ambientes naturais (Gebara, 2019). Sofyan *et al.* (2006) também relataram que altas concentrações de Cd e Cu influenciam negativamente as taxas de alimentação, reprodução e sobrevivência de *Ceriodaphnia dubia*.

A investigação dos possíveis efeitos de agentes tóxicos sobre a reprodução e crescimento de microcrustáceos pode ser analisada por meio de testes ecotoxicológicos, considerados de extrema relevância, uma vez que é através da reprodução que os cladóceros garantem a renovação de suas populações e a perpetuação de suas espécies (Gebara, 2019). Um dos elementos tóxicos de maior concentração no rejeito de minério oriundo de barragens de mineração é o ferro, cuja concentração nos ambientes aquáticos atingidos pela intrusão do rejeito variou em todo o percurso do rio Doce até sua foz, mostrando um aumento gradual, o que indica que o Fe está sendo mobilizado e se tornando mais biodisponível ao longo de seu transporte (Hatje *et al.* 2017).

O Fe é um elemento muito afetado pelas condições de oxi-redução do meio e está presente nos principais óxidos como hematita e goethita, na forma de Fe<sup>3+</sup> (Muggler *et al.*, 2005). Geralmente os óxidos de Fe, devido à sua natureza química, podem adsorver ânions e cátions, incluindo os metais pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, etc), o que os torna importantes em estudos de avaliação de impacto ambiental (Muggler *et al.*, 2005).

Nesse contexto, diante das questões apresentadas, estudos sobre os efeitos da exposição do metal ferro sobre a taxa de sobrevivência, reprodução e tamanho de cladóceros em ambientes limnéticos são necessários, uma vez que os cladóceros constituem um dos grupos mais diversos no zooplâncton de água doce, com expressiva contribuição para o fluxo de energia na cadeia alimentar (Gebara, 2019; Casali Pereira, 2013).

Este trabalho avaliou o efeito crônico que o ferro na forma  $Fe^{2+}$  causa sobre o cladócero *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera), observando os possíveis efeitos negativos no ciclo de vida desse organismo. Esperamos que esse estudo possa contribuir para melhor compreensão do efeito a longo prazo de metais presentes nos ecossistemas aquáticos.

## 2 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho foi determinar experimentalmente o efeito da exposição crônica do elemento ferro ( $Fe^{2+}$ ), presente no rejeito de mineração, sobre a taxa de sobrevivência, reprodução e tamanho do cladócero *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera).

Hipóteses:

-Concentrações de 0,2 mg/Fe/L e 0,02 mg/Fe/L do elemento ferro afetam negativamente a taxa de crescimento e reprodução do cladócero *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera) através do efeito tóxico, o elemento  $Fe^{2+}$  atuará inibindo a produção de ovos e a taxa de crescimento dos cladóceros.

-Concentrações de 0,2 mg/Fe/L e 0,02 mg/Fe/L do elemento ferro afetarão negativamente aumentando a mortalidade do cladócero *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera) através do efeito tóxico.

## 3 REVISÃO DA LITERATURA

### 3.1. Barragem de rejeitos

As barragens podem ser destinadas a diversos usos tais como de infra-estrutura para aterros ou diques, para retenção de resíduos industriais, para acumulação de água, geração de energia, barragens de contenção de rejeitos de mineração, entre outros. Na mineração, a etapa de beneficiamento do minério, que tem por objetivo separar o minério como maior valor econômico, gera uma elevada produção de rejeitos, tornando viável a construção de diques para estocagem deste material formando então as barragens de rejeitos (Souza Junior, 2018). Todavia, se essas

estruturas são construídas de forma inadequada, e não forem monitoradas, representam um grande risco para sociedade, meio ambiente e também para a economia (Souza Junior, 2018). No Brasil, existem inúmeras barragens de diversas dimensões que devem atender às exigências de proteção ambiental e de segurança.

A Lei n. ° 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), além de definir barragens como qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas (Brasil, 2010). A presente lei também tem como objetivos garantir o cumprimento de padrões, regulamentar e promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, junto à população potencialmente afetada (Brasil, 2010).

De acordo com o último relatório divulgado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens- SNISB, no ano de 2019 estão cadastradas no sistema 19388 barragens, das quais somente 45% possuem ato de autorização, outorga ou licenciamento e cerca de 27 % se submetem a PNSB, se tornando um fator preocupante para os órgãos fiscalizadores.

As construções das barragens ocorreram de acordo com o desenvolvimento da tecnologia e equipamentos de cada época e podem ser executadas com diferentes tipos de técnicas e materiais, sendo que as de rejeito de mineração são construídas com o próprio material proveniente da atividade (ANA, 2019; Souza Junior, 2018). Os rejeitos são lançados em diques de contenção, formando depósitos de armazenamento, e a partir do momento em que a capacidade operacional é atingida, é necessário que o dique seja elevado gradualmente, com fim de acumular mais resíduos. Esse processo é denominado de alteamento, e pode ser executado geralmente de 3 formas diferentes como mostrado na Figura 1.



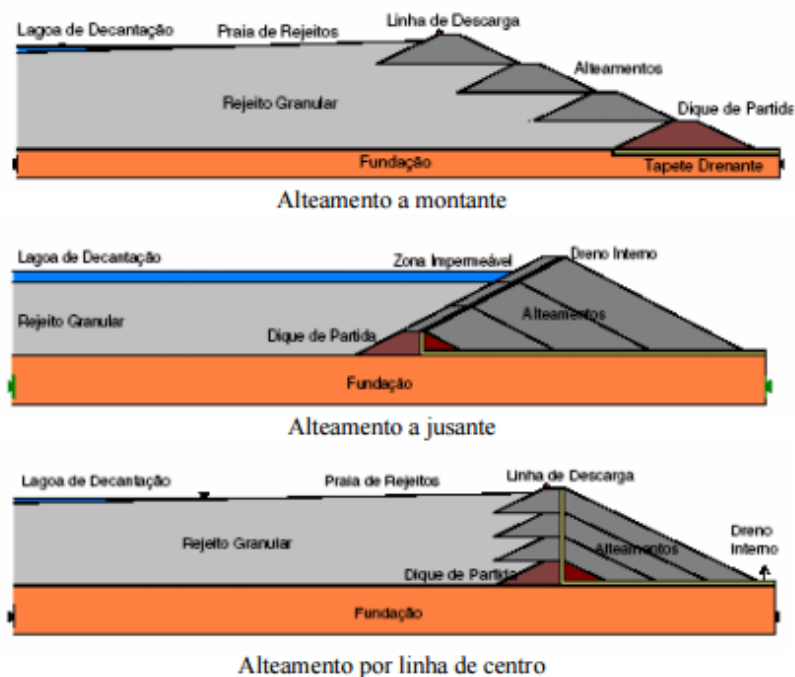


Figura 1 - Métodos de alteamento de barragens de mineração. Fonte: Gazolla, 2019.

Os rompimentos que aconteceram em Mariana e em Brumadinho tinham como método de alteamento à montante, que apresentam como vantagens o baixo custo de construção e a rápida velocidade de alteamento, porém esse método possui um maior risco de ruptura.

Devido à redução das condições de segurança ao longo da vida útil das barragens se faz necessário o monitoramento e a inspeção para evitar diversos acidentes e incidentes que causam grandes desastres ao meio ambiente da região e as comunidades locais. Nos últimos anos foram vários rompimentos com barragens no Brasil, e muitos deles se localizaram no estado de Minas Gerais.

Consequentemente além das diversas vidas humanas que foram perdidas em todos esses desastres que ocorrem em todo o mundo, os ecossistemas foram e ainda são prejudicados e o meio ambiente foi diretamente afetado devido a composição do rejeito da barragem, que contém diferentes minerais. Nos estudos realizados por Andrade (2014), ele cita que a composição do rejeito de minério de ferro é basicamente óxidos de ferro, sílica e alumínio, apresentando maior percentual de ferro em suas menores frações e maiores teores de sílica em suas maiores frações, como pode ser observado na Tabela 1:

Tabela 1- Composição química dos minerais normalmente encontrados em rejeitos da mineração de ferro.

<b>Mineral</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Composição</b>
		Silicato de alumíniohidratado:
Caulinita	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	39,5% de $\text{Al}_2\text{O}_3$ 46,5% de $\text{SiO}_2$ 14,0% $\text{H}_2\text{O}$
		Hidróxido de alumínio:
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	65,4% de $\text{Al}_2\text{O}_3$ 34,6% de $\text{H}_2\text{O}$
		Óxido de ferro hidratado:
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$	90,0% de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 10,0% de $\text{H}_2\text{O}$
		Óxido de ferro:
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	70,0% de Fe 30,0% de O
		Óxido de ferro:
Magnetita	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	31,0% de FeO 69,0% de $\text{Fe}_2\text{O}_3$
		Óxido de silício:
Quartzo (Sílica)	$\text{SiO}_2$	46,74 % de Si 53,26 % de O

Fonte: Andrade, 2014

A composição do rejeito de minério de ferro contido nas barragens, pode causar inúmeros impactos nas comunidades biológicas associadas aos ecossistemas terrestres e aquáticos uma vez que as altas cargas de sedimentos produzidos além de elevarem os níveis de turbidez, com a passagem da lama podem causar a resuspensão de outros metais, e ainda causar alterações químicas e físicas no meio ambiente que podem comprometer a biodiversidade (Conceição, 2021; Fernandes; 2020). Diante disso houve a criação de leis mais rígidas e estudos mais aprofundados vêm sendo feitos sobre os impactos decorrentes de curto, médio e longo prazo.

### 3.2. Impactos ambientais associados a barragem de rejeito da mineração

A mineração é uma das atividades mais antiga exercida pelo homem para a produção de bens industriais e sociais, gerando conflito entre a necessidade de preservação do meio ambiente e o desenvolvimento econômico que esta atividade gera, pois são inúmeros os impactos ambientais associados a mineração desde o início até o final da vida útil de uma mina (Machado, 2007). Como exemplo podemos citar a supressão da vegetação, perda de parcelas de áreas de preservação permanente (APP), afugentamento da fauna, alteração das propriedades do solo, poluição sonora, poluição do ar, a poluição das águas que também são causadas por substâncias lixiviadas e carreadas ou contidas nos efluentes das áreas de mineração, alteração na dinâmica de ecossistemas aquáticos, entre diversas outras.

Todos os impactos anteriormente mencionados podem ter efeitos nocivos no equilíbrio dos ecossistemas, e, a partir da necessidade de se estabelecerem as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, através da Resolução nº 1 de 23 de janeiro de 1986, define a expressão impacto ambiental como:

“...qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I - A saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II - As atividades sociais e econômicas;
- III - A biota;
- IV - As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V - A qualidade dos recursos ambientais (Brasil, 1986).”

A avaliação de impactos ambientais é algo específico de cada empreendimento, mas segundo Andrade (2014) analisando as barragens de rejeito de ferro, podemos ter uma ideia geral do impacto nas fases de construção, operação e desativação. São diversos os danos ambientais causados pelos rompimentos de barragens ao longo dos anos no Estado de Minas Gerais. O rompimento de 2006, em Miraí, que lançou

por 36 horas os rejeitos no córrego bom jardim, ocasionaram impactos em grandes proporções nas áreas de jusante, como a inundação de áreas agriculturáveis, o aumento de turbidez das águas do Córrego Bom Jardim, Ribeirão Fubá e Rio Muriaé, a eliminação de ecossistemas ribeirinhos, interferência na biota aquática com mortalidade de peixes e a interferência no consumo de água de várias cidades de jusante (Lima, 2016).

O rompimento da mineração Herculano na barragem B1, no município de Itabirito atingiu um riacho e deixou 300 residências sem fornecimento de água e de energia elétrica. Além disso, causou graves impactos ambientais em córregos da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, que abastece a região metropolitana de Belo Horizonte (Andrade, 2014).

Nos anos de 2015 e 2019, o rompimento no município de Mariana e Brumadinho. causaram impactos notáveis sobre o solo, água e o ar através da contaminação dos rios, do solo e atmosférica, mortalidade da biota aquática e da fauna terrestre dependente da água, alteração dos ciclos de vetores, hospedeiros e reservatórios de doenças, além de impactos socioeconômicos como os danos às habitações e infraestrutura locais, devido à grande quantidade de rejeito de minério de ferro e pela elevada dimensão da área afetada (Oliveira, 2019 apud Freitas *et al.*, 2019; Segura *et al.*, 2016).

É evidente como o rompimento da barragem de contenção de rejeitos de Fundão em Mariana (MG) provocou mudanças significativas na paisagem, com claros impactos sobre os rios, e também sobre a vegetação presente tanto nas proximidades da barragem, quanto na vegetação nativa as margens dos cursos d'água. Também ocorreram em áreas mais distantes da barragem. A Figura 2 evidencia como a chegada da lama altera as características do rio através do elevado aporte de sedimentos, demonstrando a magnitude dos impactos ambientais derivados do rompimento da barragem de rejeitos.



Figura 2 - Encontro do Rio do Carmo e do Rio Gualaxo do Norte, ainda com rejeito da barragem da mineradora Samarco. Fonte: <https://abes-es.org.br>

A região do Quadrilátero Ferrífero, onde situava a barragem de Fundão, já era citada por vários autores que tratavam do impacto da mineração, sobretudo nos sedimentos e na qualidade da água, de elementos como arsênio, mercúrio, cromo, chumbo e cádmio (Castro, 2017; Romero, 2017; Sales, 2013). Sendo um dos maiores desastres ambientais da história brasileira, vários estudos vêm sendo feitos para se ter a descrição e análise da destruição ecológica causada pelos rejeitos minerais ao longo do Rio Doce e no litoral do Espírito Santo e valorar os danos ao ecossistema, uma vez que os impactos sobre a biota aquática ainda não são totalmente compreendidos (Fernandes *et al.*, 2020).

Atualmente, além das análises físicas, químicas e microbiológicas para avaliar as prováveis causas da degradação ambiental, são utilizadas algumas comunidades como: a fitoplanctônica, que compreende as microalgas; a zooplanctônica, que corresponde aos animais que vivem em suspensão na coluna d'água e a zoobentônica, representada pelos animais que habitam os sedimentos, como técnica de biomonitoramento (CETESB, 2006).

Um estudo realizado por Leppanen (2018) mostrou que organismos zooplânctônicos foram estudados em muitos casos de poluição relacionada à mineração e a maioria das pesquisas foi conduzida na América do Norte, Europa

Central e Brasil. Rodrigues (2021) cita que nos ambientes marinhos atingidos pela lama de rejeito, os organismos zooplânctônicos, que são fonte de alimento para os peixes, responderam negativamente, apresentando baixa taxa de diversidade, além das alterações na estrutura da comunidade fitoplanctônica, devido as altas carga de Fe presente na água, que podem favorecer o aparecimento de espécies tóxicas. As altas concentrações de ferro e de metais presentes no rejeito de minério podem ainda bioacumular nos organismos aquáticos, sendo prejudiciais a sobrevivência e reprodução dos mesmos (Gebara, 2019; Passos, 2020). De Souza Santos (2021) realizou um estudo com o rejeito coletado após 40 dias do rompimento da barragem (dezembro de 2015) no rio Gualaxo do Norte, um afluente do rio Doce, e demonstrou que o rejeito de minas enriquecido com ferro tem um efeito negativo sobre banco de ovos em repouso de zooplâncton em ecossistemas naturais quando exposto a diferentes concentrações, com impactos potenciais na restauração de comunidades, mesmo após exposições de curto prazo.

### **3.3. Efeito dos metais sobre organismos zooplânctônicos**

Por definição, zooplâncton é o conjunto de organismos aquáticos heterotróficos, constituída de animais invertebrados microscópicos, incluindo principalmente rotíferos, cladóceros, copépodes, larvas de insetos, moluscos, nematóides, ostracodes, entre outros (Figura 3 ). Vivem na coluna superficial da água, seja de rios, lagos ou no oceano e normalmente apresentam pouca capacidade locomotora, sendo arrastados pelas correntes oceânicas ou pela vazão de um rio.

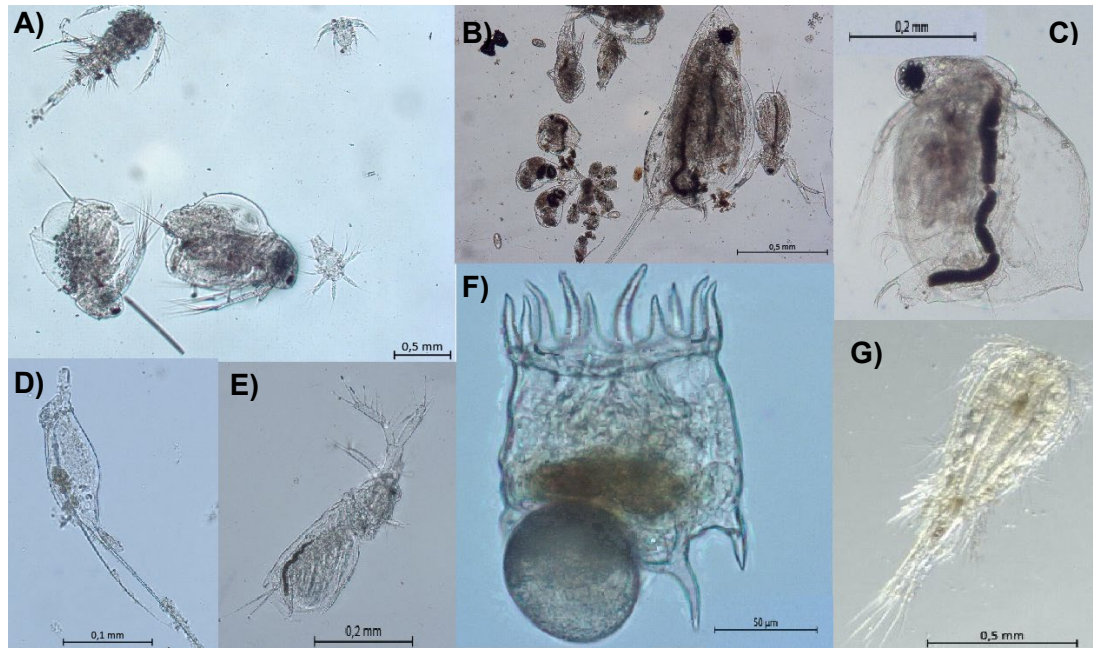


Figura 3 - Representação dos diferentes organismos zooplanctônicos. A: espécimes do zooplâncton (copépodes Cyclopoida, náuplios de Copepoda e cladóceros). B: cladócero *Daphnia laevis* em destaque. C: cladócero *Ceriodaphnia dubia*. D: rotífero *Filinia sp.* E: cladócero *Diaphanosoma sp.* F) rotífero *Plationus patulus*. G: Copépode Cyclopoida Fonte: LAECO.

Possuem um importante papel na cadeia trófica, pois são produtores primários para os consumidores de níveis superiores e representam uma fonte alimentar essencial devido ao seu alto valor nutritivo e a fácil captura por peixes. Grande parte destes possui ciclo de vida curto e tem um papel importante como condutor do fluxo de energia. Em condições de estresse ambiental, organismos zooplanctônicos aumentam a taxa de produção de ovos de resistência, que permanecem em diapausa no sedimento de ambientes lacustres até que as condições ambientais estejam novamente favoráveis (De Stasio, 1990).

A comunidade zooplanctônica pode ser usada como índice de avaliação ambiental em ambientes aquáticos, pois apresenta a capacidade de se adaptar as mudanças no meio em que vivem (Pereira, 2014). Vários autores afirmam que os fatores que mais influenciam na heterogeneidade desses organismos é a predação, a temperatura, a qualidade e a disponibilidade de nutrientes (Dantas-Silva, 2017 apud Sampaio *et al.* 2002, Perbiche-Neves *et al.* 2007, Ghidini *et al.* 2009, Serafim-Júnior *et al.* 2010). A alteração de qualquer uma dessas características pode gerar estresse e provocar alterações estruturais, como uma redução no número total de espécies ou

organismos presentes nas comunidades, e pode ser o primeiro passo para detectar mudanças em grande escala consequentes da eutrofização e toxicidade (CETESB,2006; Dantas-Silva, 2017).

Dentre os organismos representantes do zooplâncton, os cladóceros, organismos teste utilizados nesse estudo, são facilmente cultivados em laboratório e comumente recomendados em testes de toxicidade que objetiva avaliar o efeito sobre organismos vivos de substância naturais ou artificiais, de forma a aferir os danos que causam aos organismos aquáticos e o risco para o meio ambiente (Gebara, 2019; Casali Pereira, 2013). Esses testes são realizados para se obter respostas das interferências que acontecem no ciclo de vida desses organismos, avaliando parâmetros como mortalidade, taxa de natalidade, crescimento, tamanho corporal médio, taxa de alimentação, etc.

No Brasil, existem um grande número de informações e técnicas para testes de toxicidade, sendo as espécies de água doce do gênero *Daphnia* e *Ceriodaphnia* bastante utilizadas. Essas espécies são sensíveis a vários contaminantes do ambiente aquáticos e a reprodução assexuada por partenogênese garante a produção de organismos geneticamente idênticos permitindo, assim, a obtenção de organismos-teste com sensibilidade constante (Costa, 2008). Nos estudos desenvolvidos em áreas de mineração e beneficiamento de ouro, Sales (2013) observou o aumento da toxicidade de arsênio na presença de íons ferro, quando conduziu testes de toxicidade utilizando como organismos teste a *Daphnia similis* e *Ceriodaphnia silvestri*. Segundo esse mesmo autor, esses resultados demonstram o risco da contaminação desse metal em ambientes aquáticos impactados pela presença de ferro. Outros efeitos adversos também são observados quando os testes são realizados com esses organismos e concentrações distintas de metais como cádmio, zinco e nanopartículas de óxido de ferro (Yu e Wang ,2002; Robinson *et al.*, 2003; Gebara, 2017).

Muitas pesquisas discutem sobre o impacto ambiental que o rejeito de minério e metais tóxicos ou associados a outros elementos vem causando no ambiente, principalmente em águas lóxicas, como rios, riachos e córregos uma vez que os efluentes são liberados em águas correntes. Leppanen (2018) mostrou em seus estudos o efeito que diversos metais como por exemplo ferro, alumínio, ouro, cobre, níquel, entre outros, causam sobre os cladóceros quando expostos a água de mina em ambientes lênticos, nos quais as águas apresentam pouco ou nenhum fluxo, como



os lagos e reservatórios. O autor cita alguns efeitos sobre os organismos como a diminuição da diversidade e riqueza de espécies, variação na densidade e tamanho da ninhada.

## **4 MATERIAIS E METÓDOS**

### **4.1. Obtenção de indivíduos do organismo-teste *C. cornuta***

As amostras de sedimento foram coletadas no dia 25 de outubro de 2019 na Lagoa dos Coutos (19°59'6.54"S; 43°33'4.75"W), localizada em Barão de Cocais -MG (Figura 4), um dos municípios pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero (QF). A cidade fica distante cerca de 100 km de Belo Horizonte, abrange uma porção da Serra do Gandarela, que integra uma importante área de proteção ambiental da região central de Minas Gerais, incluindo córregos e riachos com águas de classe especial como definido pela resolução CONAMA nº 357/2005 (Dias, 2014). A Serra do Gandarela é também um importante corredor ecológico, unindo a Serra do Caraça a duas importantes bacias: o rio Doce/Piracicaba e São Francisco/Rio das Velhas (Dias; 2014).

Na serra, são encontrados floresta estacional semidecidual e uma área rica em ferro cercada por vegetação de canga, na qual se encontra a Lagoa dos Coutos. Embora esta lagoa não seja alimentada por córregos ou rios, ela está localizada na bacia do rio Doce (Leibowitz, 2016), situada a 1072 m acima do nível do mar, cuja

área é de aproximadamente 10,53 hectares de lâmina d'água. O clima da região é subtropical de altitude, com inverno seco e verão chuvoso (Do Carmo, 2010).



Figura 4 - Imagem do Google Earth da localização da Lagoa dos Coutos. Fonte: Google Earth.

As amostras foram coletadas com a finalidade de se obter indivíduos vivos para a realização dos experimentos, a partir dos ovos de resistência que são depositados no sedimento e eclodem quando as condições de sobrevivência são favoráveis aos organismos. Por ser uma lagoa temporária com regime hidrológico sazonal, a lagoa dos Coutos se encontrava completamente seca durante o período de coleta (Figura 5), possibilitando a coleta de sedimento em vários pontos distintos, o que proporcionou uma amostragem mais homogênea e representativa do local de estudo.

Foram acondicionados aproximadamente 5 kg de amostra, em um único saco plástico, e levada para o laboratório de Ecologia Aquática (LAECO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), onde foi homogeneizada e mantida sobre refrigeração para a preservação da amostra.



Figura 5 - Dia da coleta na Lagoa dos Coutos no período de seca. Fonte: Autora

#### 4.2. Organismos-Teste

Para a realização dos ensaios, uma fração da amostra de sedimento coletada na lagoa dos Coutos foi acondicionada em um béquer de 2 litros, com água destilada (Figura 6 -a), que foi mantido em câmara incubadora (Modelo Sheldon Manufacturing Inc.) a uma temperatura constante de 23°C e fotoperíodo com ciclo claro/escuro de 16h/8h. A amostra foi observada diariamente até a eclosão dos ovos de resistência. Para o experimento, foi utilizada a espécie mais abundante de cladócea, uma vez que do ponto de vista ecotoxicológico, é aconselhável obter um banco de ovos de resistência com um número razoável de organismos para a montagem do teste (Rodgher *et al.*, 2009).

Após a eclosão, os indivíduos foram identificados sob microscópio estereomicroscópico óptico binocular Axio Lab.A1, ao menor nível taxonômico identificado, com auxílio de chave de identificação (ELMOOR-LOUREIRO, 1997). O organismo identificado e utilizado para esse experimento foi a espécie *Ceriodaphnia cornuta*, selecionada por ser amplamente encontrada em ambientes de água doce, e por ser uma espécie considerada como organismo-teste em estudos de ecotoxicidade (Villalobos & Gonzales, 2006; Ribeiro, 2011). Fêmeas adultas foram separadas e

cultivadas em placas de cultivo (Corning®) (Figura 6 - b), utilizando-se água de cultivo obtida de acordo com as normas nacionais desenvolvidas para espécies de cladóceros (ABNT NBR 13373). Para alimentação, foi utilizada solução mista de microalgas obtidas em amostras de ambientes naturais e mantida sobre refrigeração, além de alimento composto constituído por uma mistura de partes iguais das soluções a base de levedura e ração para peixe (ABNT NBR 13373).

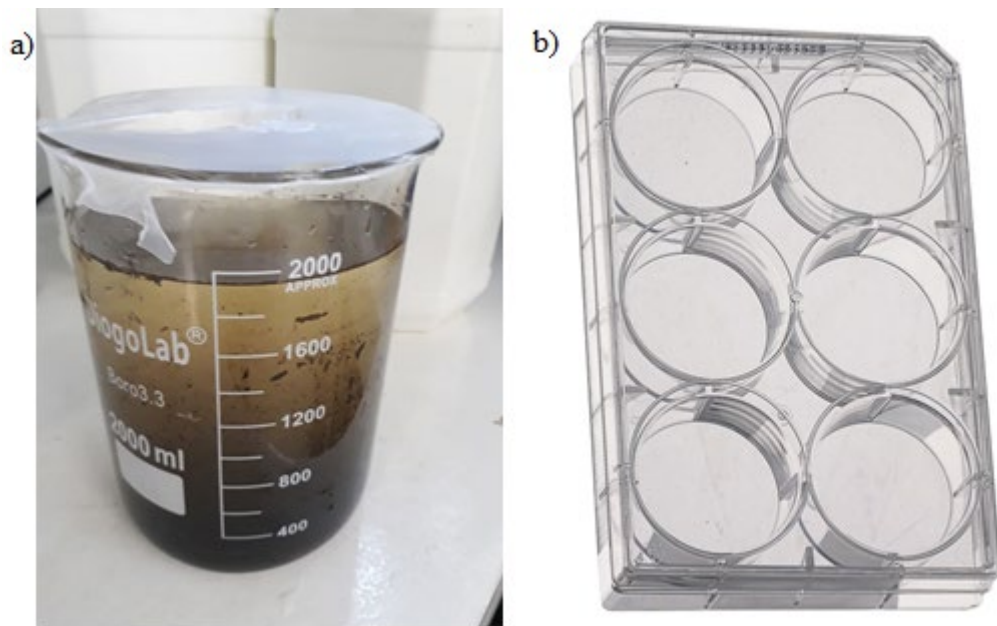


Figura 6 - (a) Amostra de sedimento preparada para a eclosão dos ovos e (b) placa de cultivo com as fêmeas adultas. Fonte: Autora

#### 4.3. Solução teste

As soluções testes são preparadas com a finalidade de expor os organismos ao contaminante de interesse por meio da exposição aguda e crônica. Os testes de caráter agudo caracterizam-se pelo curto tempo de exposição (24 a 96 horas, conforme o organismo-teste) a concentrações geralmente elevadas de uma substância química. Já os testes crônicos permitem avaliar os possíveis efeitos adversos resultantes de uma exposição prolongada (abrangendo parte ou todo o ciclo de vida do organismo) a concentrações subletais de um agente tóxico (Mendes, 2002; Sales, 2013).

Os testes de efeito agudo foram realizados utilizando-se três concentrações nominais de  $\text{Fe}^{2+}$  (0,02; 0,2 e 2,0 mg.  $\text{L}^{-1}$ ) (Sales, 2013), para aferir se as concentrações eram subletais para os organismos. Os testes de efeito crônico foram então, realizados utilizando as duas concentrações nominais de  $\text{Fe}^{2+}$  (0,02 e 0,2, mg.  $\text{L}^{-1}$ ) preparadas a partir da dissolução do reagente analítico sulfato de ferro ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) da marca Synth com 99,0% de pureza. As soluções-estoque foram preparadas com água destilada em concentração de 2,0 mg.  $\text{L}^{-1}$ . O preparo das soluções seguiu as normas nacionais desenvolvidas para espécies de cladóceros tropicais- ABNT NBR 13373.

#### **4.4. Teste de efeito agudo e crônico com $\text{Fe}^{2+}$**

Os ensaios de toxicidade foram realizados com neonatos de *C. cornuta* com menos de 24 h de vida, como descritos na Norma ABNT-NBR 13373 (2017). Os filhotes foram introduzidos em placas de cultivo (Corning®) com a solução teste. É importante mencionar que nestes, avaliou-se, também, a utilização de 10 ml de solução teste por réplica para o preparo das concentrações desejadas (ao invés de 15 ml, conforme previsto no procedimento de referência). Devido ao seu pequeno tamanho, os espécimes de *Ceriodaphnia* necessitam de menores volumes de amostras-teste e água de diluição do que os testes realizados com algas e peixes (Costa, 2008).

A princípio, foi realizado um teste para avaliar o efeito agudo com as concentrações 2,0 mg/Fe/L; 0,2 mg/Fe/L e 0,02 mg/Fe/L. Para cada tratamento foram preparadas 2 réplicas contendo 5 organismos, mantidos em câmara incubadora a uma temperatura constante de 20°C, fotoperíodo com ciclo claro/escuro de 16h/8h e sem alimentação por um período de 48 horas, para a avaliação dos organismos mortos e imóveis.

A partir dos resultados obtidos no teste de toxicidade aguda, foram realizados dois experimentos teste para avaliar os efeitos da exposição crônica para as concentrações subletais (0,2 mg/Fe/L e 0,02 mg/Fe/L). Para cada solução e para o controle foram preparadas 10 réplicas contendo um organismo (com idade inferior a 24 horas) por replicata. Os testes de toxicidade com  $\text{Fe}^{2+}$  seguiram a norma nacional

ligeiramente modificada, a saber: ao invés de 7 a 8 dias (período que compreende o teste crônico), a duração total do teste foi de 30 dias. Segundo Luchetta *et al.* (2010), o efeito crônico é provocado por contaminantes presentes em pequenas doses e a longa duração do ensaio permitem a manifestação de estressores ambientais que não são detectáveis em testes curtos. Estes testes avaliam a ação dos compostos sobre parte ou o ciclo completo de vida do organismo testado, como por exemplo a *Daphnia magna*, que mostra uma significativa redução na reprodução dos indivíduos em testes realizados por 21 dias (Luchetta *et al.*, 2010).

Para o primeiro experimento os indivíduos foram mantidos em câmara incubadora a uma temperatura constante de 20°C e fotoperíodo com ciclo claro/escuro de 16/8 h. Diariamente, a sobrevivência e o tamanho foram quantificados. Neste mesmo período a água foi renovada a cada dois dias, sendo fornecido aos organismos 0,1 ml ind<sup>-1</sup> de alimento com cultivo misto à base de microalgas e 0,03 ml ind<sup>-1</sup> alimento composto (ABNT NBR 13373).

O segundo experimento foi realizado sob as mesmas condições do experimento anterior, porém os indivíduos foram mantidos em câmara incubadora a uma temperatura constante de 23°C, para melhorar as condições de cultivo dos organismos.

A partir dos dados de efeito crônico obtidos no presente trabalho, foram feitas no *software* Excel, a análise estatística ANOVA fator único com nível de significância  $\alpha = 0,05$ , e no *software* STATICA 10.0 o teste de normalidade para verificar se existe diferença significativa entre os tratamentos.

## 5 RESULTADOS

### 5.1. Primeiro experimento

O resultado do teste de toxicidade aguda revelou que a solução Fe<sup>2+</sup> na concentração de 2,0 mg. L<sup>-1</sup> causou mortalidade de 100% para os organismos após 48 horas de exposição, sugerindo toxicidade aguda letal para as *Ceriodaphnia cornuta*. Os resultados para as concentrações de 0,02 mg. L<sup>-1</sup> e 0,2 mg. L<sup>-1</sup> apontaram efeitos subletais (que não provocam a morte) após a exposição de 48 horas, sendo realizado os testes de toxicidade crônica com essas duas concentrações.

Análises de variância (ANOVA) com nível de significância com  $\alpha < 0,05$  foi realizada para testar se houve diferença estatística entre os resultados encontrados. Tanto para as análises do tamanho médio corporal, quanto para a reprodução e mortalidade, não foram detectadas diferenças entre os tratamentos e o grupo controle com  $\alpha > 0,05$  (Tabela 2).

Tabela 2- Resultado das análises feita com o grupo controle e os tratamentos com  $\text{Fe}^{2+}$  nas concentrações de  $0,02 \text{ mg. L}^{-1}$  e  $0,2 \text{ mg. L}^{-1}$ . SQ: Soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: quadrado médio; F: estatística F (ANOVA,  $\alpha = 0,05$ ).

	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tamanho médio	8078,26	2	4039,13	0,68	0,5	3,10
Reprodução	2,82	2	1,41	1,10	0,3	3,10
Mortalidade	0,16	2	0,08	1,48	0,2	3,10

Fonte: Autora

Os resultados dos testes de efeito crônico indicaram que não houve diferença em relação ao tamanho médio do controle e de cada tratamento ( $\alpha > 0,05$ ), conforme observado na Figura 7. Durante os 30 dias de exposição o comprimento médio dos organismos expostos a soluções de  $0,02 \text{ mg. L}^{-1}$  e  $0,2 \text{ mg. L}^{-1}$  seguiu a mesma média do grupo controle conforme apresentado na curva de crescimento (Figura 8).

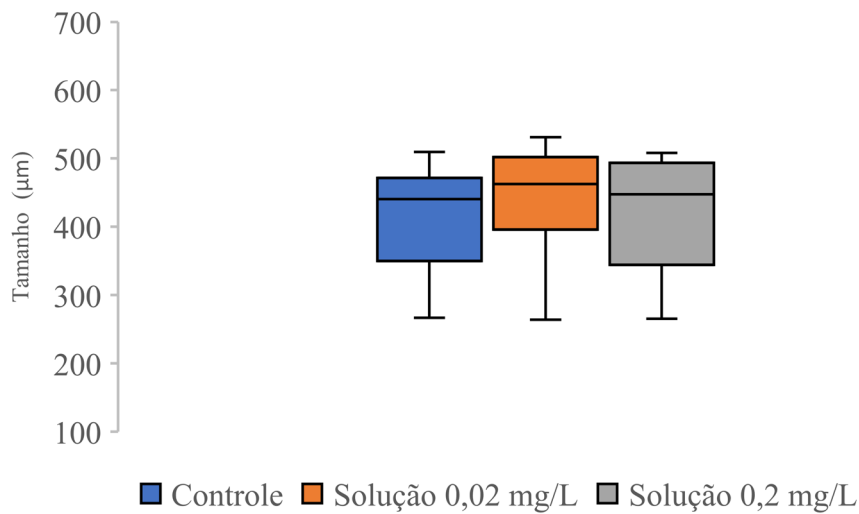


Figura 7 -Variação do tamanho de *C. cornuta*, em 3 diferentes tratamentos ao longo de 30 dias de exposição as concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  (controle; 0,02 e 0,2 mg.  $\text{L}^{-1}$ ). Fonte: Autora.

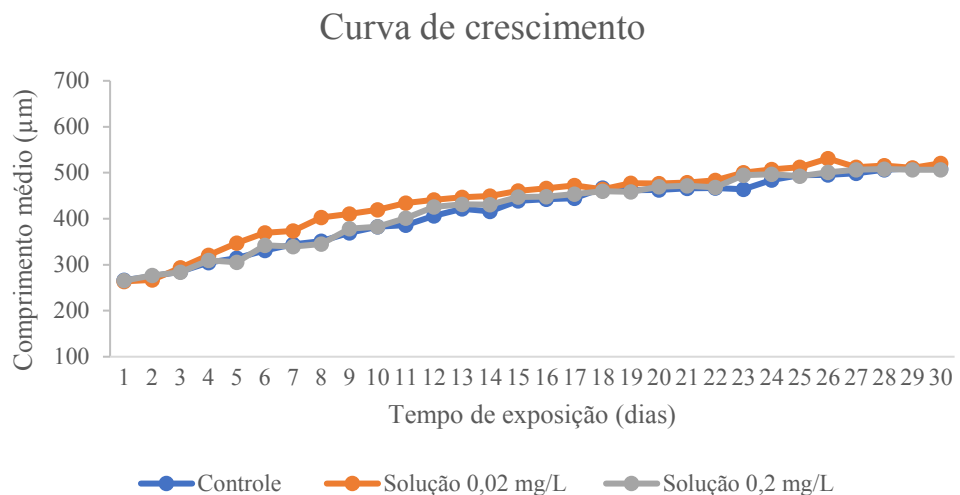


Figura 8 - Comprimento corporal médio ( $\mu\text{m}$ ) de *Ceriodaphnia cornuta* durante 30 dias de exposição as concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  (controle; 0,02 e 0,2 mg.  $\text{L}^{-1}$ ). Fonte: Autora.

A Tabela 3 apresenta os valores com os dados médios e o desvio padrão de *Ceriodaphnia cornuta* durante 30 dias de exposição. No primeiro dia de experimento o tamanho médio dos tratamentos foi  $265,33 \pm 1,4 \mu\text{m}$  e após os 30 dias o tamanho chegou a uma média de  $512,20 \pm 7,5 \mu\text{m}$ .



Tabela 3 - Valores dos tamanhos corporais médio ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão (SD) de *Ceriodaphnia cornuta* durante 30 dias de exposição as concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  (controle; 0,02 e 0,2  $\text{mg. L}^{-1}$ ) no experimento 1.

	Grupo Controle ( $\mu\text{m}$ )		Solução 0,02 $\text{mg. L}^{-1}$ ( $\mu\text{m}$ )		Solução 0,2 $\text{mg. L}^{-1}$ ( $\mu\text{m}$ )	
	$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD
<b>1 dia</b>	266,70	7,7	263,90	6,2	265,40	15,8
<b>2 dias</b>	274,70	8,9	267,22	9,5	276,70	11,9
<b>3 dias</b>	285,00	15,8	293,89	26,1	283,90	17,8
<b>4 dias</b>	305,00	19,6	320,44	17,0	309,50	20,2
<b>5 dias</b>	314,30	23,8	346,89	47,7	305,60	16,7
<b>6 dias</b>	331,40	26,3	369,67	18,0	342,30	34,2
<b>7 dias</b>	344,40	21,0	373,89	26,7	339,40	30,8
<b>8 dias</b>	351,70	29,6	402,89	26,4	345,10	26,4
<b>9 dias</b>	369,70	34,4	410,44	19,9	378,60	31,4
<b>10 dias</b>	382,50	31,0	419,78	39,1	382,50	35,6
<b>11 dias</b>	386,20	29,1	433,88	18,9	401,60	34,1
<b>12 dias</b>	406,60	34,3	441,38	16,7	425,56	23,8
<b>13 dias</b>	421,50	26,2	446,50	22,2	431,11	31,4
<b>14 dias</b>	416,30	37,6	449,50	17,5	431,00	23,0
<b>15 dias</b>	438,90	19,2	461,00	9,7	447,25	30,2
<b>16 dias</b>	442,50	18,3	466,38	15,4	448,25	24,7
<b>17 dias</b>	444,60	22,9	472,75	24,3	453,63	25,1
<b>18 dias</b>	466,80	24,7	464,13	23,3	460,17	23,3
<b>19 dias</b>	462,11	20,7	477,43	20,9	458,86	25,1
<b>20 dias</b>	462,90	21,5	476,33	19,8	469,86	30,9
<b>21 dias</b>	466,56	13,2	479,00	16,0	471,50	30,4
<b>22 dias</b>	467,13	18,0	483,86	17,6	468,00	29,8
<b>23 dias</b>	464,11	18,5	500,00	25,4	494,71	22,2
<b>24 dias</b>	484,60	18,7	507,50	23,4	497,20	16,6
<b>25 dias</b>	495,00	13,1	512,00	16,7	493,00	23,1
<b>26 dias</b>	495,71	16,9	531,14	56,7	501,29	19,5
<b>27 dias</b>	498,71	23,2	512,14	22,8	506,83	30,8
<b>28 dias</b>	506,88	11,6	516,00	19,5	508,29	22,5
<b>29 dias</b>	509,63	21,0	510,86	19,9	506,71	28,7
<b>30 dias</b>	509,00	21,9	520,80	18,7	506,80	29,5

Fonte: Autora.

Não foram observados efeitos na reprodução ( $\alpha > 0,05$ ), embora os indivíduos de *C. cornuta* tenham apresentado menor produção de neonatos nas concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  de  $0,02 \text{ mg. L}^{-1}$  e no tratamento  $0,2 \text{ mg. L}^{-1}$  em relação ao controle (Figura 9).

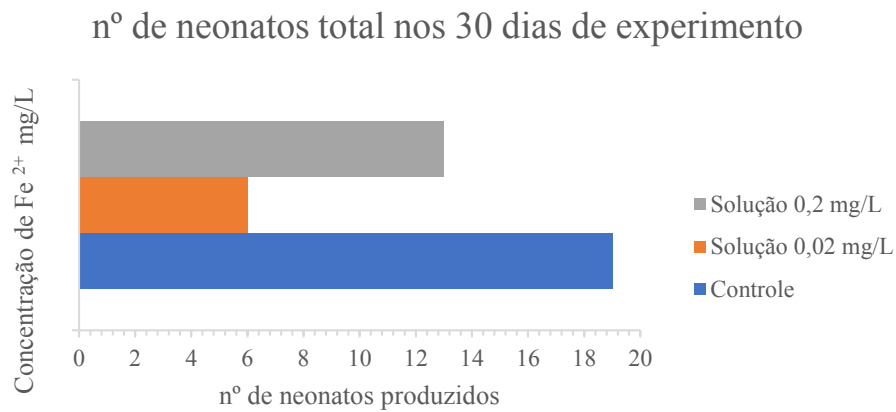


Figura 9 - Número total de neonatos produzidos por fêmeas para cada tratamento ao final dos 30 dias de experimento. Fonte: Autora.

Durante os 30 dias de experimento, conforme observado na Figura 10, não ocorreu a morte de nenhum organismo do tratamento controle, já no tratamento de  $0,02 \text{ mg. L}^{-1}$  ocorreu uma morte nos dias 2, 19 e 30 (Figura 11), totalizando 3 mortes e no tratamento de  $0,2 \text{ mg. L}^{-1}$  ocorreu uma morte nos dias 15 e 18, com 2 mortes ao total.

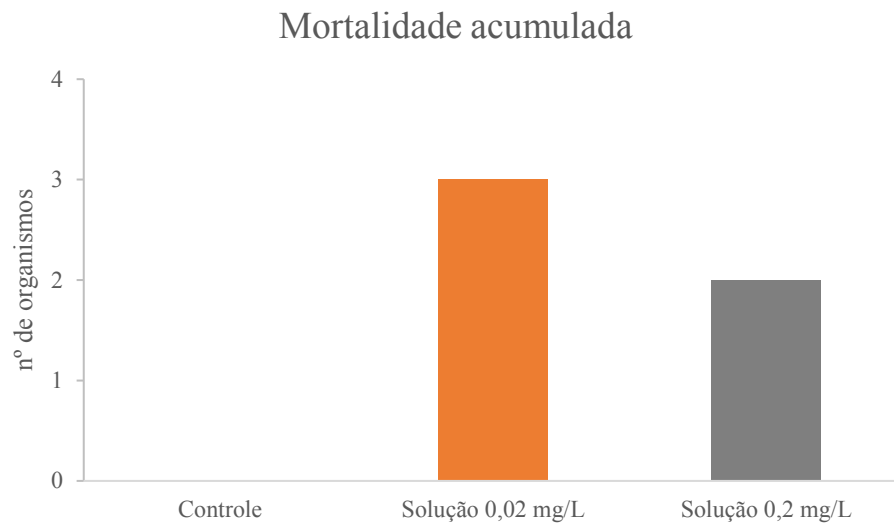


Figura 10 -Mortalidade total de cada tratamento ao final dos 30 dias de experimento. Fonte: Autora.

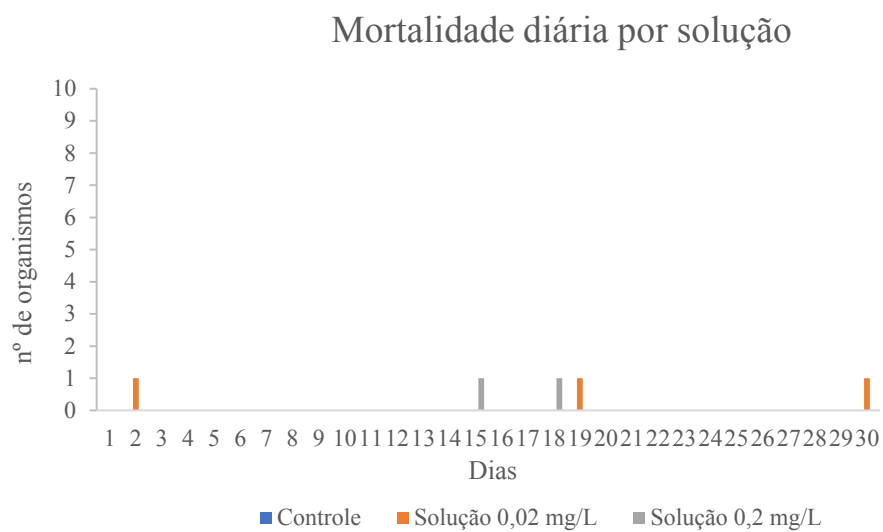


Figura 11 - Número diário de organismos que morreram em cada tratamento nos 30 dias do experimento. Fonte: Autora.

## 5.2. Segundo experimento

O experimento foi repetido em função dos primeiros resultados obtidos (sem diferença estatística entre os tratamentos). As análises de variância (ANOVA) não

identificaram diferenças estatísticas do tamanho médio corporal dos indivíduos, nem na reprodução de descendentes ou mortalidade ( $\alpha > 0,05$ ) (Tabela 4).

Tabela 4 -Resultado das análises feita com o grupo controle e os tratamentos com Fe<sup>2+</sup> nas concentrações de 0,02 mg. L<sup>-1</sup> e 0,2 mg.L<sup>-1</sup> para o segundo experimento . SQ: Soma de quadrados; gl: grau de liberdade; MQ: quadrado médio; F: estatística F (ANOVA,  $\alpha < 0,05$ ).

	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Tamanho médio	7492,8	2	3746,4	0,33	0,72	3,10
Reprodução	1,9	2	0,84	2,61	0,08	3,10
Mortalidade	0,82	2	0,41	2,76	0,07	3,10

Fonte: Autora

Como mostrado na Figura 12, o comprimento médio dos organismos expostos durante os 30 dias com as soluções de 0,02 mg. L<sup>-1</sup> e 0,2 mg. L<sup>-1</sup>, também manteve a

mesma média do grupo controle, além de também apresentarem o mesmo comprimento médio do experimento anterior (Figura 13).

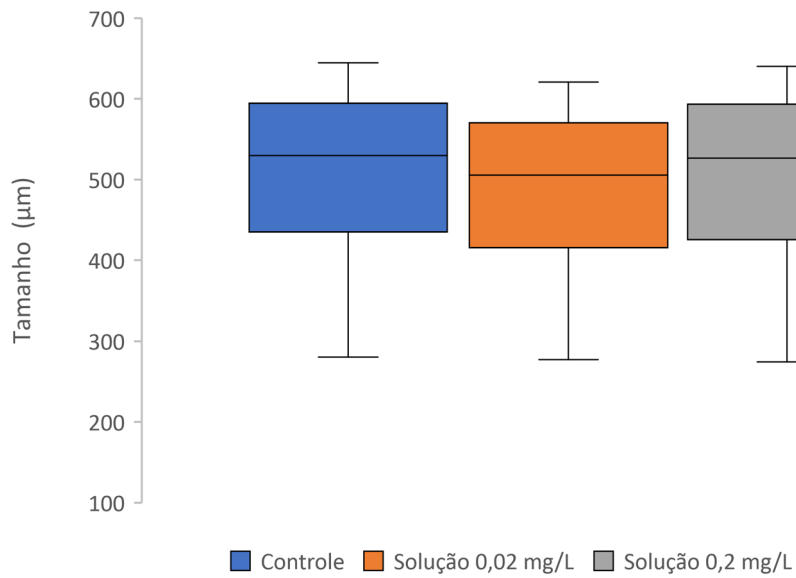


Figura 12- Variação do tamanho de *C. cornuta*, em 3 diferentes tratamentos ao longo de 30 dias de exposição as concentrações de  $Fe^{2+}$  (controle; 0,02 e 0,2 mg. L<sup>-1</sup>) no segundo experimento. Fonte: Autora

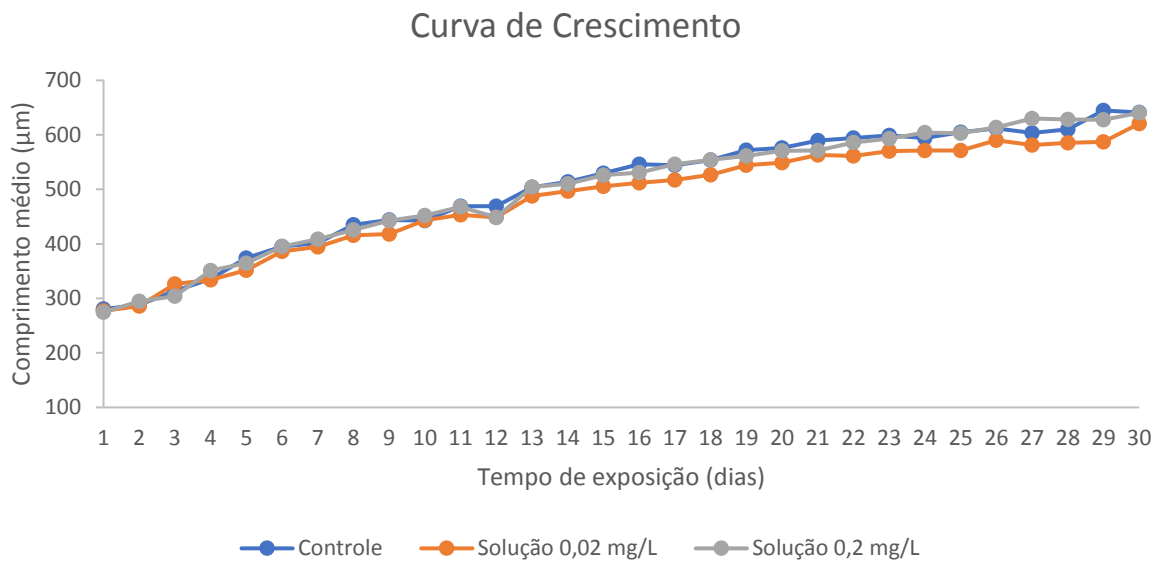


Figura 13- Comprimento corporal médio ( $\mu\text{m}$ ) de *Ceriodaphnia cornuta* durante 30 dias de exposição as concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  (controle; 0,02 e 0,2  $\text{mg. L}^{-1}$ ) no segundo experimento. Fonte: Autora.

A Tabela 5 apresenta os valores médio e o desvio padrão dos tamanhos corporais de *Ceriodaphnia cornuta* durante 30 dias de exposição as concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  (controle; 0,02 e 0,2  $\text{mg. L}^{-1}$ ). No primeiro dia de experimento o tamanho médio dos tratamentos foi  $289,64 \pm 4,4 \mu\text{m}$  e após os 30 dias o tamanho chegou a uma média de  $634,14 \pm 11,6 \mu\text{m}$ .

Tabela 5 - Valores dos tamanhos corporais médio ( $\bar{x}$ ) e desvio padrão (SD) de *Ceriodaphnia cornuta* durante 30 dias de exposição as concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  (controle; 0,02 e 0,2  $\text{mg. L}^{-1}$ ) no experimento 2.

	Grupo Controle ( $\mu\text{m}$ )		Solução 0,02 $\text{mg. L}^{-1}$ ( $\mu\text{m}$ )		Solução 0,2 $\text{mg. L}^{-1}$ ( $\mu\text{m}$ )	
	$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD	$\bar{X}$	SD
<b>1 dia</b>	288,51	15,0	285,87	16,1	294,53	11,5
<b>2 dias</b>	313,24	13,9	326,18	16,1	304,25	9,5
<b>3 dias</b>	335,67	30,1	334,11	28,0	351,13	21,3
<b>4 dias</b>	373,74	22,2	351,84	14,1	364,33	13,0
<b>5 dias</b>	394,91	31,4	386,46	34,4	394,90	21,9
<b>6 dias</b>	401,62	10,5	394,81	20,3	408,67	20,4
<b>7 dias</b>	435,08	21,1	415,61	30,0	425,42	19,5

<b>8 dias</b>	443,68	25,2	418,31	16,4	442,87	22,8
<b>9 dias</b>	442,93	16,9	443,40	18,4	452,38	21,6
<b>10 dias</b>	468,88	32,7	453,37	25,0	468,28	25,6
<b>11 dias</b>	469,22	19,3	448,72	22,3	448,69	18,2
<b>12 dias</b>	503,88	24,6	488,00	23,3	504,63	17,6
<b>13 dias</b>	514,04	25,0	496,95	24,2	510,06	27,7
<b>14 dias</b>	529,87	22,2	505,55	20,2	526,38	27,4
<b>15 dias</b>	546,36	31,4	512,20	35,3	530,64	30,1
<b>16 dias</b>	544,45	30,2	517,04	38,4	545,87	32,3
<b>17 dias</b>	553,84	30,5	526,54	32,2	554,30	24,6
<b>18 dias</b>	571,90	37,1	544,09	42,3	561,28	29,7
<b>19 dias</b>	576,10	30,4	548,86	19,4	570,55	30,8
<b>20 dias</b>	589,33	25,0	563,40	23,0	571,15	19,0
<b>21 dias</b>	594,20	45,6	561,46	11,8	585,82	27,2
<b>22 dias</b>	598,74	29,4	570,15	29,3	593,19	23,4
<b>23 dias</b>	594,38	40,6	571,51	7,1	604,03	23,6
<b>24 dias</b>	604,76	36,3	571,39	6,5	603,02	20,4
<b>25 dias</b>	611,88	30,7	589,96	14,1	613,85	20,4
<b>26 dias</b>	603,72	36,8	581,22	18,4	630,02	14,7
<b>27 dias</b>	610,30	41,4	585,69	12,3	628,42	19,6
<b>28 dias</b>	644,77	55,5	586,98	21,7	627,82	18,9
<b>29 dias</b>	641,28	28,2	620,73	13,2	640,39	20,4
<b>30 dias</b>	641,28	30,4	620,73	0,0	640,39	21,1

Fonte: Autora

Como podemos observar na Figura 14, no segundo experimento a taxa de reprodução foi baixa para o grupo controle e para o grupo exposto pela solução de 0,2 mg/L, e nula para a solução de 0,02 mg/L. Esses resultados diferem do primeiro experimento, uma vez que obtivemos a reprodução de neonatos para as soluções de 0,02 mg/L, 0,2mg/L e para o grupo controle.

## n° de neonatos total nos 30 dias de experimento

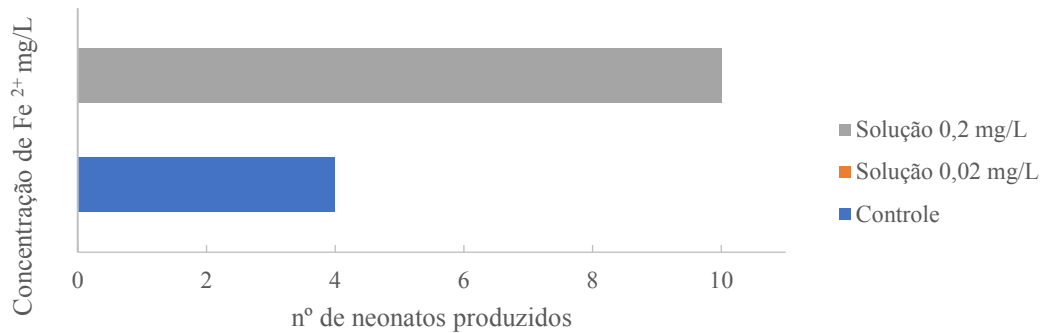


Figura 14- Número total de neonatos produzido por fêmeas para cada tratamento ao final dos 30 dias do segundo experimento. Fonte: Autora.

A mortalidade dos organismos no segundo experimento foi maior do que esperada, uma vez que o grupo controle obteve uma média alta (Figura 15), diferente do primeiro experimento, onde não foi observada mortalidade no grupo. Porém a mortalidade dos organismos expostos as soluções de 0,2mg/ L e 0,02 mg/ L seguiu o padrão do primeiro experimento, sendo maior na solução de 0,02 mg/L. Também foi observado que a mortalidade diária dos indivíduos de *Ceriodaphnia* foi maior a partir do décimo oitavo dia de experimento (Figura 16).



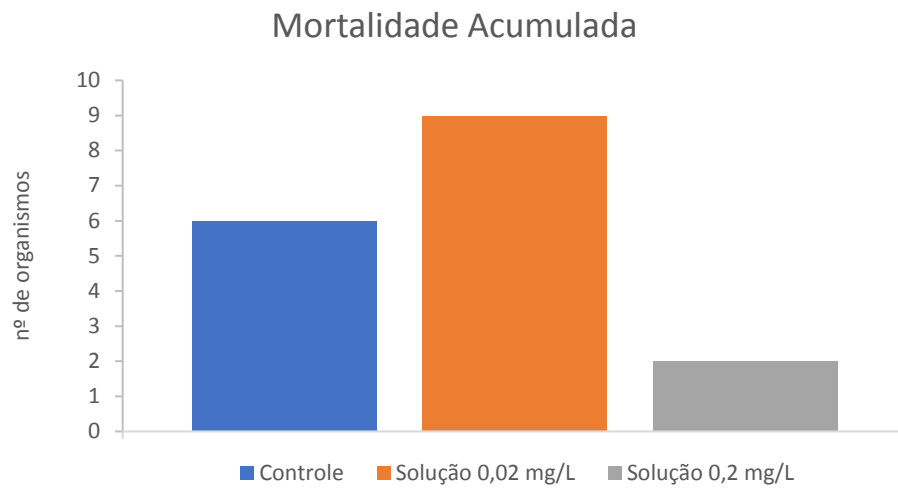


Figura 15-Mortalidade total de cada tratamento ao final dos 30 dias do segundo experimento. Fonte: Autora.

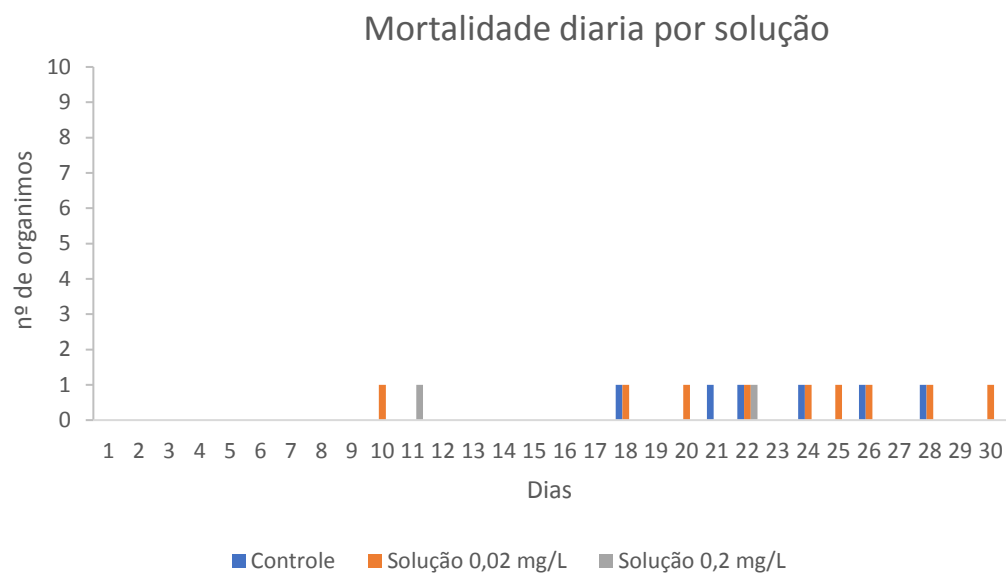


Figura 16-Número diário de organismos que morreram em cada tratamento nos 30 dias do segundo experimento. Fonte: Autora

## 6 DISCUSSÃO

Embora o presente estudo não tenha apresentado efeitos significativamente crônicos para as concentrações de 0,02 mg. L<sup>-1</sup> e 0,2 mg. L<sup>-1</sup> de Fe<sup>2+</sup>, a investigação da toxicidade deste tipo de elemento é importante para Minas Gerais. Pois o elemento Fe foi o metal mais abundante encontrado no sedimento após o rompimento da barragem de Fundão, associado principalmente a estados de menor biodisponibilidade, como Fe<sup>3+</sup>, porém o processo de degradação da matéria orgânica, pode levar à solubilização do ferro, reduzindo Fe<sup>3+</sup> em Fe<sup>2+</sup> (Passos, 2020).

Nos experimentos realizados não foram observadas diferenças no tamanho dos cladóceros submetidos às diferentes concentrações de Fe. Um estudo realizado por Villalobos & Gonzales (2006) indica que a espécie *C. Cornuta* apresenta tamanho compreendido entre 0,25 e 0,27 mm ao nascer, até 0,60 mm na fase adulta. Outros estudos apresentarem variação no tamanho de cladóceros, como os coletados em um lago impactado pelos rejeitos da mineração de bauxita (ricos em partículas sólidas muito finas em óxidos de alumínio e ferro) que apresentaram corpos menores, mas maiores pesos, explicados pela ingestão de rejeitos (Leppanen, 2018). Já nos estudos realizados por Gebara (2019), as nanopartículas de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> causaram uma inibição significativa de 12,71% no crescimento corporal de *Ceriodaphnia silvestrii*, além da diminuição no número acumulado de ovos (51,99%) e a redução de neonatas (diminuição de 61,37%) produzidos por fêmea quando expostas a concentração de 50 mg. L<sup>-1</sup> a partir do 7 aos 14 dias de experimento.

Um estudo com cladóceros do gênero *Daphnia* indicou que o Fe teve um efeito muito mais forte nas características reprodutivas em comparação com a taxa de crescimento individual (Lind e Jeyasingh, 2018). No presente trabalho, foi observada uma baixa taxa reprodutiva, apresentando números muito baixos de neonatos durante os 30 dias de experimento. Resultado semelhante foi obtido por Ribeiro (2011), após realizar experimentos individuais com contaminação de íons ferroso e férrico (Fe<sup>+2</sup>, Fe<sup>+3</sup>), conduzidos para três espécies: *C. cornuta*, *C. silvestrii* e *C. dúbia*. O autor considerou que a baixa qualidade e concentração alimentar, bem como a presença de substâncias tóxicas podem interferir nos parâmetros biológicos. Nesse experimento realizado por Ribeiro (2011), a concentração que se encontrava em excesso de cada íon ferroso e férrico era de aproximadamente 0,03 mg. L<sup>-1</sup>, um valor abaixo do estabelecido pelo CONAMA, para águas de classes 1 e 2, equivalente a 0,3

mg. L<sup>-1</sup> Fe para o parâmetro ferro dissolvido (Brasil, 2005), para garantir a saúde da biota aquática, e mesmo abaixo dos limites, a concentração de ferro dissolvido causou efeitos aos organismos.

Considerando ainda a reprodução, Gama-Flores e colaboradores (2007) relacionaram o aumento nas concentrações de cobre e o aumento no tempo de exposição deste metal aos organismos de *C. dubia*, indicando que o aumento no tempo de exposição implicou em decréscimos na reprodução. E ao contrário, baixas e médias concentrações de cobre e baixos tempos de exposição aumentaram a taxa de reprodução bruta.

Estudos realizados por Jeyasingh & Pulkkinen (2019) indicaram que Fe e proteínas contendo Fe podem ser particularmente relevantes para a reprodução porque são componentes importantes da oogênese (formação, crescimento e maturação do gameta feminino). As informações sobre o ciclo de vida de *C. cornuta* indicam (Villalobos e Gozáles, 2006) que esta espécie apresenta baixas taxas reprodutivas, com fecundidade média em torno de 6 ovos por fêmea valor que é baixo a moderado quando comparado com outras espécies da Família Daphniidae, que podem atingir, em média, 20 ovos por fêmea em espécies maiores (Villalobos e Gozáles, 2006 apud Michael, 1962; Kanaujia, 1980; Dehui, 1989). Quando monitoradas por Ribeiro (2011), ao longo do seu ciclo de vida, a espécie *C. cornuta* produziu em média 34,0 neonatas/fêmea, distribuídas em 6,8 ninhadas com 4,6 neonatas/ninhada/fêmea. Por sua vez, a espécie *C. silvestrii* produziu 111,2 neonatas/fêmea, 16,5 ninhadas e 6,4 neonatas/ninhada/fêmea e a espécie *C. dubia*, evidenciou uma produção média de 100,0 neonatas/fêmea, 15,8 ninhadas e 6,1 neonatas/ninhada/fêmea. Quando comparados com os nossos estudos, observamos valores bem baixos, como no primeiro experimento por exemplo, que a *C. cornuta* produziu 1,9 neonatas/fêmea ao longo do ciclo de vida.

No primeiro experimento a mortalidade ocorreu apenas nas soluções com concentrações de Fe como se era esperado, e apresentou uma média mais baixa em comparação com a mortalidade no segundo experimento, onde 60% dos organismos no grupo controle morreram. Embora não fosse esperada essa mortalidade dos organismos que não foram expostos as soluções contendo ferro, ela ocorreu apenas a partir do decimo oitavo dia de experimento, uma vez que as *C. cornuta* apresentam longevidade mais curta, em torno de 20,6 dias como relatado por Ribeiro (2011).

Esses organismos precisam de boa qualidade e disponibilidade de alimentos, e de metais como micronutriente ou macronutrientes, podendo causar efeitos adversos, inclusive para a sobrevivência, dependendo da concentração encontrada no ambiente (Manaham, 1994; Hernández-Flores et al., 2020).

Embora os resultados não tenham demonstrado diferenças estatísticas entre os tratamentos, o ferro é um micronutriente e quando em excesso, pode ser extremamente tóxico, principalmente por promover reações oxidativas (como por exemplo a Reação de Fenton), liberação de íons hidroxilas e sua presença em ambientes aquáticos pode ainda provocar mudanças na disponibilidade, na concentração ou aumentar a toxicidade de outros elementos, como o arsênio (Jeyasingh & Pulkkinen, 2019; Gebara, 2019), demonstrando o risco de contaminação principalmente em locais onde houve o rompimento de barragens e na região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ferro é o elemento de maior concentração encontrado no rejeito de minério nas áreas atingidas pelos rompimentos de barragens no estado de Minas Gerais. Sua disponibilidade no ambiente aquático pode ser benéfica ou prejudicial para os organismos dependendo de sua concentração. Deste modo, estudos com concentrações distintas de Fe se tornam importantes para a compreensão dos efeitos que esse elemento causa nos organismos, principalmente os consumidores primários, que são os organismos zooplânctônicos.

Diante dos resultados obtidos no presente estudo, as concentrações de  $\text{Fe}^{2+}$  nos tratamentos 0,02 mg. L<sup>-1</sup> e 0,2 mg. L<sup>-1</sup>, não causam nenhum efeito negativo significativo nas taxas de sobrevivência e reprodução do cladóceros *Ceriodaphnia cornuta* (Crustacea, Cladocera). Para melhor representação e confirmação desses dados propõe-se a repetição do experimento, em outras condições de cultivo como alteração na temperatura e na alimentação. Apesar de não ser identificada nenhuma diferença significativa entre os tratamentos, foi observado uma demora no tempo de reprodução dos organismos com relação a outros estudos da espécie de cladóceros

*Ceriodaphnia cornuta*. Devido a pandemia do coronavírus, a repetição do experimento não foi possível.

O impacto crônico do Fe sobre a comunidade zooplanctônica ainda é pouco estudado, principalmente em lagos que tendem a se recuperar lentamente devido aos tempos de residência serem mais longos. Devido aos rompimentos de barragens que aconteceram nos últimos anos, conhecer o comportamento desse elemento em diferentes concentrações, estados de oxi-redução e associação com outros elementos é de grande importância para os estudos de impactos da presença de rejeito de mineração sobre os componentes biológicos do ecossistema aquático.

## 8 REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica — Método de ensaio com *Ceriodaphnia spp* (Crustacea, Cladocera)**. NBR 13373:2016. Rio de Janeiro, RJ, 2016a. 20 p.
- ANDRADE, L. C. R. de. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2014
- ANM (2018). **Principais Substâncias Metálicas**. Anuário Mineral Brasileiro, p. 43. Disponível em: <[http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serieestatisticas-e-economia-mineral/anuariomineral/anuario-mineralbrasileiro/amb\\_metalicos2017](http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serieestatisticas-e-economia-mineral/anuariomineral/anuario-mineralbrasileiro/amb_metalicos2017)> Acesso em 7 de abril de 2020.
- ANM (2019). **Relatório Anual de Segurança de Barragens de Mineração**. p. 50. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/relatorios-anuais-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao>> Acesso em 7 de abril de 2020.
- BRASIL (1986) - **Resolução CONAMA nº 1 de 23 de janeiro 1986**.. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 de fevereiro 1986.
- BRASIL (2005) - **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**.. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 de março de 2005.

- BRASIL (2010). Presidência da República. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.**
- CARMO, F. F. DO. **Importância Ambiental e Estado de Conservação dos Ecossistemas de Cangas no Quadrilátero Ferrífero e Proposta de Áreas-Alvo para Investigação e Proteção da Biodiversidade em Minas Gerais.** Programa de Pós graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (ECMVS) da Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- CARVALHO, M. S. de et al. **Concentration of metals in the Doce river in Mariana, Minas Gerais, Brazil.** Acta Brasiliensis, [S.l.], v. 1, n. 3, p. 37-41, sep. 2017. ISSN 2526-4338. doi: <https://doi.org/10.22571/Actabra13201758>.
- CASTRO, P. de T. A. et al. **Fatores que condicionam a presença e dispersão de minerais de ferro nos sedimentos arenosos das calhas, várzeas e terraços dos rios que drenam o Quadrilátero Ferrífero (MG).** São Paulo, UNESP, Geociências, v. 36, n. 3, p. 509 – 520, 2017.
- CASALI PEREIRA, M. P. **Efeitos do agrotóxico Vertimec® 18 EC para o zooplâncton e fitoplâncton: análises laboratoriais com o produto comercial e amostras de mesocosmos artificialmente contaminados.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013. doi:10.11606/D.18.2013.tde-18102013-094921
- CÉSAR, A. **Análisis ecotoxicológico integrado de la contaminación marina en los sedimentos de la costa de Murcia, el caso de Portman, Sudeste-España.**2003. Tese (Doutorado em Ecologia e Hidrologia) – Faculdade de Biología, Universidade de Murcia, Espanha, 2003.
- CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Projeto: O.S. 41.53.10.00. Atualização e Aperfeiçoamento de Metodologias Analíticas. São Paulo, 2006.
- CONCEIÇÃO, L. R. da. et al. **Copepod community structure after a mining dam disaster in the Southwestern Atlantic Ocean.** Estuarine, Coastal and Shelf Science. v.254, 2021, 107325, ISSN 0272-7714. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107325>.

- COSTA, C. R. et al. **A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação.** Química Nova [online]. 2008, v. 31, n. 7, pp. 1820-1830. ISSN 1678-7064. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000700038>.
- CROSS, A.T. et al. **One giant leap for mankind: can ecopoiesis avert mine tailings disasters?** Plant and Soil, v. 421, n. 1-2, p. 1-5, 2017.
- DANTAS-SILVA, L., & Dantas, Ê. (2017). **Zooplankton (Rotifera, Cladocera and Copepoda) and the Eutrophication in Reservoirs from Northeastern Brazil.** Oecologia Australis, 17(2), 243-248. Retrieved from <https://revistas.ufrj.br/index.php/oa/article/view/8270>
- DE-CARLI, B. P. et al. **Comunidade zooplanctônica e sua relação com a qualidade da água em reservatórios do Estado de São Paulo.** Iheringia. Série Zoologia [online]. 2018, v. 108, e2018013. Epub 11 Jun 2018. ISSN 1678-4766. <https://doi.org/10.1590/1678-4766e2018013>.
- DE STASIO, B. T. **The role of dormancy and emergence patterns in the dynamics of a freshwater zooplankton community.** *Limnology and Oceanography*, v. 35, p. 1079–1090, 1990.
- DIAS E.S. **A decomposição de macrófitas e invertebrados associados em uma lagoa rasa temporária altitudinal.** MS Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 29p, 2014.
- DIAS, C. A. et al. **Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce.** Revista Espinhaço | UFVJM, [S.l.], p. 21-35, aug. 2018. ISSN 2317-0611. Disponível em: <<http://revistaespinhaco.com/index.php/journal/article/view/203>>. Acesso em: 14 aug. 2020.
- EDWARDS, K. A. H. et al. **The impact of tailings dam spills and clean-up operations on sediment and water quality in river systems: the Ríos Agrio–Guadamar, Aznalcóllar, Spain.** Applied Geochemistry, v. 18, p. 221–239, 2003.
- ELMOOR-LOUREIRO, L. M. A. **Manual de identificação de cladóceros límnicos do Brasil.** 1997

- FERNANDES, L. F. L. et al, 2020. **Marine zooplankton dynamics after a major mining dam rupture in the Doce River, southeastern Brazil: rapid response to a changing environment.** Sci. Total Environ. 139621 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139621>, v. 736. p. 139621,2020. Acesso em: 2021-05-12
- FREITAS, C. M. de et al. **Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva.** Cadernos de Saúde Pública [online]. 2019, v. 35, n. 5, e00052519. Epub 20 Maio 2019. ISSN 1678-4464. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00052519>.
- GAMA-FLORES, J.L.; et al. (2007). **Life table demography of Ceriodaphnia dubia (Cladocera) exposed to copper at different levels and periods.** J. Environ. Biol. 28(3):691-696.
- GAZOLA, P. H. **Barragem de rejeito, Segurança, Estabilidade,** 2019. Disponível em: <https://minerajr.ufop.br/blog.texto26setembro.html>. Acesso em: 2021-05-24
- GEBARA, R. C; et al. **Effects of iron oxide nanoparticles (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) on life history and metabolism of the Neotropical cladoceran Ceriodaphnia silvestrii.** *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 186, 2019.
- GOMES, A. C. F. **Estudo de Aproveitamento de Rejeito da Mineração.** Belo Horizonte. Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. 98p. ,2017.
- GOMES, A. C. F. et al. **A review of recovery of iron ores ultrafines disposed in brazilian´s tailing dams.** XIV Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales. Catamarca, Argentina. p. 326-324, 2018.
- HATJE, V.; et al. **The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide.** Scientific Reports, 7: 10706, 2017.
- HERNÁNDEZ-FLORES, S. et al. **Evaluation of bioconcentration and toxicity of five metals in the freshwater rotifer Euchlanis dilatata Ehrenberg, 1832.** Environ Sci Pollut Res 27, 14058–14069, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07958-3>



- JEYASINGH, P. & PULKKINEN, K. (2019). **Does differential iron supply to algae affect *Daphnia* life history? An ionome-wide study.** *Oecologia*. 191. 10.1007/s00442-019-04482-1.
- LEIBOWITZ, Z. W. **Diatoms as proxies for environmental change: a paleolimnological investigation of a shallow iron outcrop lake (Lagoa dos Coutos, Serra do Gandarela, MG).** MS Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, p.91, 2016.
- LEPPANEN, J. J. **An overview of Cladoceran studies conducted in mine water impacted lakes.** *Int Aquat Res*, 2018, 10:207–221. <https://doi.org/10.1007/s40071-018-0204-7>
- LIMA, S. R. de S. **Caracterização e análise dos acidentes de barragens de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais.** 2016. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geologia de Minas e Técnicas de Lavra a Céu aberto) – Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. Disponível em: <http://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/1981>.
- LIND P.R, JEYASINGH P.D (2018) **Interactive effects of dietary *phosphorus* and iron on *Daphnia* life history.** *Limnol Oceanogr* 63:1181–1190
- LUCHETA, F. et al. **Evaluation of the Gravataí River sediment quality (Rio Grande do Sul- Brazil) using *Daphnia magna* (Straus, 1820) as the test-organism for toxicity assays.** *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2010, vol. 22, no. 4, p. 367-377. <https://doi.org/10.4322/actalb.2011.002>
- MACHADO, W. G. de F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. doi:10.11606/D.3.2007.tde-31032008-154124.
- MANAHAM, S. E. *Environmental Chemistry*. 6 ed. Lewis Publishers. 811p.1994
- MUGGLER, C. C. et al. **Conteúdos Básicos de Geologia e Pedologia.** Universidade Federal de Viçosa-Centro de Ciências Agrárias. Departamento de Solos. Viçosa; 2005.

- PASSOS, L.S. et al. **Is the Doce River elutriate or its water toxic to *Astyanax lacustris* (Teleostei: characidae) three years after the Samarco mining dam collapse?** Sci. Total Environ. 736, 1–8. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139644>. Acesso em: 2021-05-24
- PEREIRA, T. P. M. **Influência de um Predador Exótico (Tilápia) na Morfologia e História de Vida de *Daphnia***. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014
- RIBEIRO, Marcela M. **O potencial de *Ceriodaphnia cornuta* Sars (1885) *fa rigaudi* como organismo-teste em estudos ecotoxicológicos: uma comparação congênere**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais. Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre. (2011). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-8UEQQN>
- ROBINSON, K. A. et al. **Surface metal adsorption on zooplankton carapaces: implications for exposure and effects in consumer organisms**. Environ Pollut.;122(2):159-67, 2003. doi: 10.1016/s0269-7491(02)00302-0. PMID: 12531303.
- RODGHER, S. **Evaluation of the ecotoxicological effects of metals cadmium and chromium in planktonic organisms**. Ph.D. Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- RODRIGUES, L. da C. et al, 2021. **Copepod community structure after a mining dam disaster in the Southwestern Atlantic Ocean**. Estuarine, Coastal and Shelf Sci., 107325, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107325>. v. 254, 2021. Acesso em: 2021-05-12
- ROESER, H. M. P.; Roeser, P. A. **O Quadrilátero Ferrífero - MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados**. Geonomos, v. 18, p. 34-37, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11598>> Acesso em 20 de maio de 2020. DOI: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v18i1.67>.
- ROMERO, T. B. **Metais em Sedimentos do Estuário do Rio Doce (ES) após rompimento da barragem em Mariana (MG)**. Trabalho de Conclusão de Curso

(graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Curso de Oceanografia, Fortaleza, 2017.

- SALES, S. C. M. **Avaliação ecotoxicológica de impactos da contaminação por metais e arsênio em áreas de mineração e beneficiamento de ouro em Minas Gerais.** Tese Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais Instituto de Ciências Biológicas Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre. 2013.
- SANTOS, T. G. dos et al. **Zooplâncton como indicador biológico da qualidade ambiental nos estuários dos rios Carrapicho e Botafogo, Itamaracá-PE.** Revista Brasileira Engenharia de Pesca, v. 4, p. 44-56, 2009.
- 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.
- SOFYAN A. et al. **Metal trophic transfer from algae to cladocerans and the relative importance of dietary metal exposure.** Environmental Toxicology and Chemistry, v. 25, n. 4, p. 1034-41, 2006.
- SOUSA, W; Attayde J. L; Rocha, E. D. S; Eskinazi-Sant'Anna, E. M. **The response of zooplankton assemblages to variations in the water quality of four man-made lakes in semi-arid northeastern Brazil.** Journal of Plankton Research, v.30, p.699–708, 2008.
- SOUZA JÚNIOR, T. F; et al. **Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração no Brasil.** HOLOS, [S.l.], v. 5, p. 2-39, nov. 2018. ISSN 1807-1600. Disponível em: <<http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/7423>>. Acesso em: 24 maio 2021. doi:<https://doi.org/10.15628/holos.2018.7423>.
- SOUZA SANTOS, G., S, de, et al. **Impacts of exposure to mine tailings on zooplankton hatching from a resting egg bank.** Aquat Ecol 55, 545–557 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10452-021-09844-7>
- VILLALOBOS L. et al. (2006), **"Estudios sobre la biología y ecología de ceriodaphnia cornuta SARS: una revisión."** Interciencia, Vol. 31, núm.5, pp.351-357. ISSN: 0378-1844.

Yu, R. Q.; Wang, W. X. Trace metal assimilation and release budget in *Daphnia magna*. *Limnol Oceanogr* 47:495–504, 2002.

ZANNATUL, Ferdous et al. **A review: potentiality of zooplankton as bioindicator.** *American journal of applied sciences*, v. 6, n. 10, p. 1815-1819, 2009.