



134 - USO DA FITORREMEDIAÇÃO NA REMOÇÃO DE METAIS DE ÁGUAS CONTAMINADAS POR REJEITOS DE MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO DA BARRAGEM DE FUNDÃO, MARIANA-MG

Mariana de Oliveira⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade do Estado de Minas Gerais Unidade João Monlevade
Pós-graduanda em Engenharia do Saneamento Básico pela Universidade Vale do Rio Verde

Jocilene Ferreira da Costa⁽²⁾

Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos
Professora da Universidade do Estado de Minas Gerais Unidade João Monlevade

Tamara Daiane de Souza⁽³⁾

Doutora em Recursos Hídricos e Ambientais
Professora Adjunta da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

Bárbara Carolina Reis⁽⁴⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade do Estado de Minas Gerais Unidade João Monlevade
Pós-graduanda em Engenharia do Saneamento Básico pela Universidade Vale do Rio Verde

Endereço⁽¹⁾: Rua Capitão Gomes, 352 - Centro - Cipotânea – Minas Gerais - CEP: 36265-000 - Brasil – Cel.: +55 (32) 98465-5556 - e-mail: marianadeoliveira.mdo@gmail.com

RESUMO

Os produtos resultantes da atividade de mineração são essenciais ao desenvolvimento socioeconômico e apresentam posição de destaque no cenário brasileiro. Entretanto, tal fato não pode ocultar os inúmeros impactos ambientais negativos inerentes a esta atividade. Além destes impactos, a atividade de mineração no Brasil acumula um histórico de desastres que resultaram em enormes danos sociais e ambientais. Em novembro de 2015 ocorreu, em Mariana-MG, o rompimento de uma barragem de rejeitos da mineradora Samarco S.A., estima-se que 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram liberados para o ambiente nesse episódio que ficou conhecido como o maior desastre ambiental do Brasil. Visto que elevado volume deste material atingiu cursos d'água por grande extensão e dada a presença de diferentes metais em sua constituição, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial da espécie *Salvinia auriculata* de remover os metais Ferro, Manganês e Alumínio, existentes no Rio Gualaxo do Norte através da técnica de fitorremediação. Foram realizados dois experimentos, no Experimento I, a *Salvinia auriculata* foi submetida a período de aclimação e se mostrou eficiente na remoção dos metais em 37,41%, 67,68% e 68,52%, e no Experimento II, em que não houve aclimação, a média de remoção foi de 36,4%, 70,3% e 44,07% para o Ferro, Manganês e Alumínio, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: mineração, impactos, meio ambiente, fitorremediação

INTRODUÇÃO

A mineração caracteriza-se por atividade de exploração de minerais ou compostos minerais, que se concentram naturalmente na superfície terrestre e possuem valor econômico. O setor minerário fornece matéria-prima para indústrias secundárias através da exploração e/ou modificação dos recursos naturais, transformando-os em produtos primários, portanto, é essencial ao desenvolvimento econômico e melhoria da qualidade de vida das pessoas (LOPES, 2017).

Concomitante aos processos de exploração e transformação dos recursos naturais realizados pela mineração surgem impasses ambientais que variam quanto à diversidade e amplitude. Para Farias (2002), no Brasil, os impactos negativos causados pela atividade de mineração podem ser agrupados em quatro categorias: poluição da água, poluição do ar, poluição sonora e subsidência do terreno.

De acordo com Mechi e Sanches (2010), a qualidade das águas a jusante da mineração pode ser alterada pelo aumento da turbidez, devido à presença de sedimentos finos em suspensão e por contaminação com substâncias como metais pesados, óleos e graxas, que são lixiviadas para os cursos d'água próximos ou estão

presentes nos efluentes gerados pelo empreendimento. Já poluição atmosférica e sonora se dá basicamente pela emissão de material particulado e gases, e por vibrações ocasionadas devido à utilização de explosivos para o desmonte de rochas. Além disso, a atividade implica na supressão de vegetação, o solo superficial de maior fertilidade é removido, sendo submetidos a processos erosivos que podem ainda resultar no assoreamento de corpos d'água no entorno.

Dois tipos de resíduos, por serem gerados em grande escala, se destacam na atividade mineradora: os estéreis e os rejeitos, devido ao grande volume gerado. Os estéreis são resíduos sólidos sem nenhum valor econômico produzidos no decapeamento da jazida, são dispostos em estruturas implantadas para acumular material sólido, conhecidas como pilhas de estéril. Os rejeitos são materiais descartados na etapa de beneficiamento de minério, também sem valor econômico, possuem alto grau de toxicidade e presença de partículas dissolvidas e em suspensão, metais pesados e outros reagentes. As características granulométricas do rejeito de minério de ferro têm a classificação de areias finas (lama) e médias, de alta permeabilidade (LOZANO, 2006; CAMPOS *et al.*, s.d.).

Apesar de não possuírem valor econômico agregado, os rejeitos devem ser devidamente armazenados para proteção ambiental devido às suas características poluidoras, que variam de acordo com o tipo de mineral explorado e de seu beneficiamento. Para a sua disposição é necessária a construção de grandes estruturas, que são as barragens feitas ao longo do tempo, um dique de partida é construído inicialmente e há alteamentos sucessivos durante a vida útil da barragem, que pode ser construída com materiais provenientes da área ou com o próprio rejeito (ANA, 2016). A disposição final dos rejeitos de mineração é um investimento sem retorno financeiro para as mineradoras, portanto, durante muitos anos, as variáveis consideradas para determinar o local e demais critérios de construção destas estruturas se limitaram às econômicas. Com o tempo, normas ambientais foram elaboradas, assim como critérios estruturais de segurança e risco, obrigando mineradores considerarem outras variáveis (LOZANO, 2006).

É considerável a frequência de acidentes no ramo da mineração que resultam em intensos e extensos danos ao meio ambiente, entre estes, o rompimento de barragens de rejeitos é recorrente no Brasil e já causou enormes danos ambientais e sociais. Dentre os fatores que levam ao rompimento destas estão as legislações negligentes, a corrupção dos agentes públicos e fatores naturais, como solos instáveis e ausência de planejamento e tecnologias adequadas nas construções. O número de barragens rompidas no Brasil nos últimos anos é alarmante, principalmente no estado de Minas Gerais, onde 6(seis) se romperam até o ano de 2015. Recentemente, em 25 de janeiro de 2019, houve o rompimento de uma das barragens de rejeito da mina Córrego do Feijão, da Vale, em Brumadinho – MG, o maior desastre em termos de tragédia humana (MACHADO; AZEEZ, 2018, VALE, 2019).

Em 05 de novembro 2015, na cidade de Mariana-MG, houve o rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro da empresa Samarco Mineração SA, subsidiária da Companhia Vale do Rio Doce e da anglo-australiana BHP – Billiton. A barragem de Fundão, pertencente ao complexo de Germano, se rompeu e liberou cerca de 34 (trinta e quatro) milhões de metros cúbicos de rejeito no meio ambiente. Esta tragédia, apesar de não ter sido a pior em termos de fatalidade, ficou conhecida como o maior desastre ambiental do Brasil devido ao volume de lama despejado no meio ambiente e a extensão atingida pela onda de lama (IBAMA, 2015).

A lama de rejeitos proveniente da barragem de Fundão dizimou o Distrito de Bento Rodrigues, que era situado a jusante do ponto de rompimento. Em seguida alcançou o Rio Gualaxo do Norte, primeiro curso d'água atingido pela lama de rejeitos, que posteriormente desaguou no Rio do Carmo e Rio Doce, onde percorreu cerca de 680 quilômetros até a cidade de Linhares, no Espírito Santo, adentrando cerca de 60 quilômetros no Oceano Atlântico (FEAM, 2016). Além de destruir o Distrito de Bento Rodrigues, a onda de lama causou sérios transtornos a outros 7 (sete) distritos de Mariana – MG, aniquilou vidas humanas, soterrou nascentes, causou a contaminação de recursos hídricos por grande extensão, destruiu áreas de preservação permanente e causou prejuízos sociais, econômicos e culturais de grande amplitude.

Diante de estudos realizados pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA verificou-se que o evento provocou diversas alterações no meio ambiente aquático, como, por exemplo, o aumento de índices de turbidez e dos níveis de contaminantes inorgânicos associados à lama de rejeito. A onda de lama ocasionou a mortandade de organismos aquáticos (em especial peixes e invertebrados), principalmente pela quantidade de sedimentos que ficaram disponíveis na coluna d'água (IBAMA, 2015).



Segundo dados divulgados pela no portal da Samarco sobre o rompimento da barragem, o maior impacto à qualidade da água ocorreu nos primeiros 80 quilômetros da bacia. A pluma de rejeitos afetou a captação direta de água do Rio Doce, comprometendo o abastecimento de água em nove cidades. O município de Governador Valadares, em Minas Gerais, e o de Colatina, no Espírito Santo, tiveram a captação de água afetada por oito e sete dias respectivamente (SAMARCO, 2019). O minério de ferro é composto tanto de metais que apresentam valor econômico agregado, quanto de outros que não possuem valor econômico. Assim, no processo de beneficiamento do material explorado são gerados rejeitos com diferentes minerais em sua composição (ANDRADE, 2014).

Os metais provenientes das atividades de extração, quando entram na dinâmica do sistema hídrico, representam riscos consideráveis de contaminação porque não se degradam, permanecendo solubilizados nas águas ou precipitados dependendo das condições físico-químicas. O conhecimento sobre estas alterações causadas no meio pelas atividades de mineração é fundamental para a tomada de decisões na implementação de medidas mitigadoras de impactos ambientais (COSTA, 2001). Em análises preliminares realizadas pelo IBAMA no ano de 2015, logo após o desastre os resultados das amostras de água dos rios afetados pelo rejeito apontam para alteração dos seguintes parâmetros de acordo com os limites de concentração de metais sendo eles: Metais totais: Alumínio (Al); Bário (Ba); Cálcio (Ca); Chumbo (Pb); Cobalto (Co); Cobre (Cu), Cromo (Cr); Estanho (Sn); Ferro (Fe); Magnésio (Mg); Manganês (Mn); Níquel (Ni); Potássio (K) ; Sódio (Na) e Metais dissolvidos: Alumínio (Al); Ferro (Fe) e Manganês (Mn)

Além da presença destes metais nos cursos d'água, o acúmulo de rejeitos da mineração de ferro nas margens e sedimentos dos rios pode ser revolvido aos cursos d'água na ocorrência de eventos climáticos ou por influência do homem. As águas do Rio Doce estarão sujeitas a novos picos de turbidez, quedas nos teores de oxigênio e aumento nas concentrações de metais, causando prejuízos para dependentes destes recursos hídricos por um período incalculável (SASSINE, 2015). Estes metais, mesmo quando ingeridos em pequenas concentrações, podem causar efeitos tóxicos ao homem, pois possuem capacidade de bioacumulação e biomagnificação na cadeia trófica (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2008).

De acordo com Ruppenthal (2013), os efeitos nocivos dos metais pesados ao organismo humano podem ocorrer em médio ou longo prazo, devido às suas propriedades de bioacumulação e biomagnificação. Quanto a parte toxicológica, estes metais possuem capacidade de afetar diferentes órgãos e tecidos do organismo, por serem altamente reativos do ponto de vista químico e não destrutíveis. A presença de outros metais e alteração de diversos parâmetros indica a necessidade de monitoramento contínuo do ambiente afetado, assim como sua remediação ou recuperação, que devem ser executadas com base no comportamento dos parâmetros alterados no ambiente hídrico (IBAMA, 2015).

Diante deste cenário, torna-se essencial o estudo de métodos que visem recuperar as condições originais de todo o ambiente afetado. Neste trabalho, será analisado o potencial de uma macrófita aquática, a espécie *Salvinia auriculata*, em remover os metais Fe, Mn e Al, de amostras de água do Rio Gualaxo do Norte através da fitorremediação. A fitorremediação é uma técnica que consiste em utilizar plantas para reduzir as concentrações de poluentes orgânicos ou inorgânicos no solo, sedimentos ou águas contaminadas. Este método é frequentemente aplicado na remediação de metais pesados e poluentes orgânicos. Concomitante à redução destes contaminantes, contribui com melhorias físicas, químicas e biológicas no meio em que é aplicada (LAMBERT *et al.*, 2012).

Alguns requisitos devem ser atendidos para a utilização de determinada espécie vegetal na fitorremediação, a planta deve ser tolerante a altas concentrações do poluente, produzir grandes quantidades de biomassa, ser capaz de se adaptar as condições do ambiente impactado e apresentar resistência a pragas e doenças (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

A *Salvinia auriculata* é uma pteridófito pertencente à família *Salviniaceae*. Presentes em ambientes aquáticos, estas plantas são amplamente encontradas em regiões de clima tropical, e tem sido uma das espécies estudadas no processo de bioacumulação de íons metálicos encontrados em águas e efluentes, o que associado ao baixo custo da técnica de fitorremediação viabiliza seu emprego em larga escala (DELAQUA, 2016).



OBJETIVOS

Avaliar os níveis da concentração dos metais Ferro, Manganês e Alumínio da água coletada em três pontos do Rio Gualaxo do Norte, curso d'água atingido pelos rejeitos da barragem de Fundão, bem como realizar estudos do potencial de aplicação da técnica de fitorremediação utilizando a espécie *Salvinia auriculata* para a melhoria da qualidade da água, com vista na remoção dos metais Fe, Mn e Al.

Objetivos específicos:

- Avaliar a qualidade das águas superficiais em três pontos situados no Rio Gualaxo do Norte com relação ao pH, turbidez e íons metálicos Ferro total, Manganês total e Alumínio total;
- Estudar o potencial da espécie *Salvinia auriculata* quanto a remoção dos metais Fe, Mn e Al das amostras coletadas no Rio Gualaxo do Norte após prévia aclimação das plantas e
- Estudar o potencial da *Salvinia auriculata* quanto à remoção dos metais Fe, Mn e Al das amostras coletadas no Rio Gualaxo do Norte sem prévia aclimação das plantas.

METODOLOGIA UTILIZADA

Foram realizados dois experimentos de fitorremediação, o primeiro foi feito após o período de aclimação da *Salvinia auriculata* em laboratório, que compreendeu a adaptação das plantas em novo ambiente, onde foram submetidas a fotoperíodo controlado em 12 horas de luz/12 horas de escuro, simulando o recebimento de luz de seu habitat natural e submetidas à uma solução para sua adaptação ao novo meio. O primeiro experimento realizado, em que houve aclimação das plantas, será mencionado neste trabalho como Experimento I, enquanto o segundo, em que as plantas foram transferidas diretamente de seu meio de origem para a água coletada no Rio Gualaxo do Norte, será mencionado como Experimento II.

Em cada campanha, foram coletadas amostras em três pontos situados no Rio Gualaxo do Norte, definidos para fins de estudo como P1, P2 e P3. A localização destes três pontos pode ser visualizada na Figura 1.

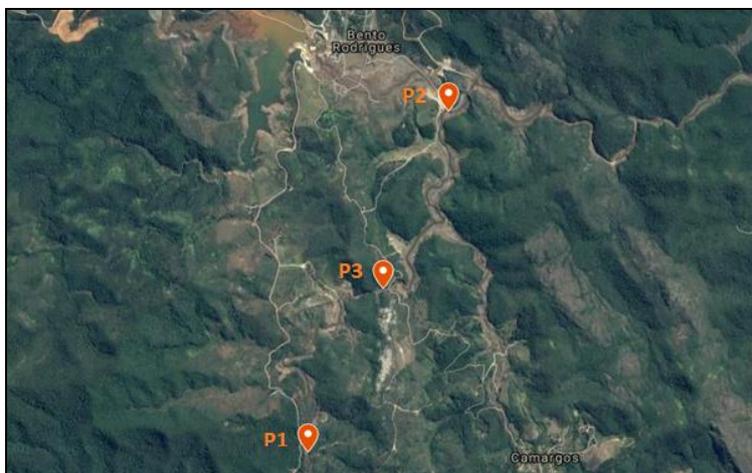


Figura 1 – Pontos de coleta

O primeiro ponto de coleta, P1, está localizado a montante do ponto em que a lama desaguou no Rio Gualaxo do Norte e dos pontos P2 e P3, próximo ao local conhecido como Santinha pelos moradores da região. A área em seu entorno será destinada à construção do novo Distrito de Bento Rodrigues. Apesar de estar localizado à montante do ponto em que houve o primeiro contato da lama com o curso d'água, este local foi atingido devido ao revolvimento da lama por determinada extensão do canal, sendo que P1 está próximo do limite alcançado pela lama rio acima. Na Figura 1 pode-se verificar as imagens à montante e à jusante do primeiro ponto em que foi efetuada a coleta.



Figura 2 – (a) montante de P1, (b) jusante de P1

O segundo ponto, P2, localiza-se na altura do rio em que houve o primeiro contato da lama com o curso d'água, à jusante de P1 e P3. Após percorrer a área do antigo Distrito de Bento Rodrigues a lama atingiu o Rio Gualaxo do Norte neste ponto, sendo revolvida para montante e seguindo à jusante até o seu despejo no Oceano Atlântico. As imagens de montante e jusante deste ponto podem ser visualizadas na Figura 3.

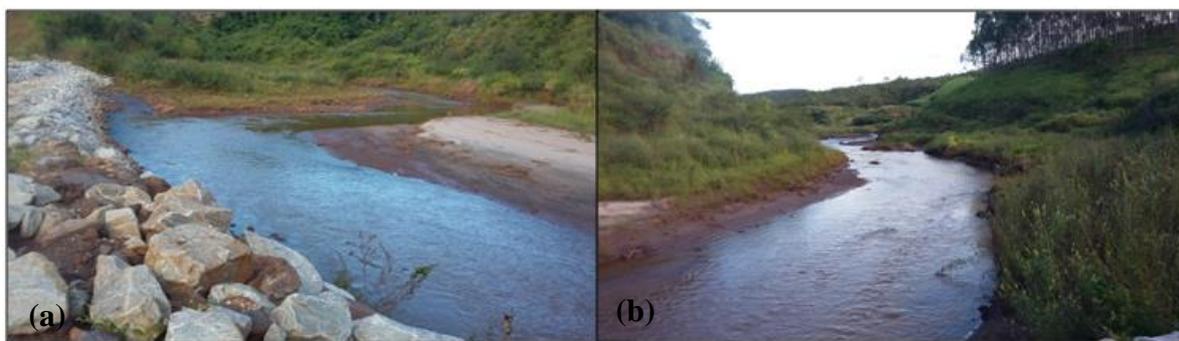


Figura 3 – (a) montante de P2, (b) jusante de P2

O terceiro ponto, P3, localiza-se entre os pontos P1 e P2, próximo à ponte que ligava Bento Rodrigues a Camargos, outro Distrito de Mariana. Com a passagem da onda de lama a ponte existente no local foi completamente destruída, portanto, pode-se observar maior acúmulo de resíduos a jusante deste ponto em relação aos outros pontos, provavelmente devido a este acontecimento. As imagens da Figura 4 são do curso d'água a montante e a jusante de P3.



Figura 4 – (a) montante de P3, (b) jusante de P3

Após as coletas, amostras de cada ponto estudado foram enviadas para laboratório terceirizado para a análise inicial dos íons metálicos, onde foram analisados os teores dos metais Ferro, Alumínio e Manganês, determinados após revisão bibliográfica em relatórios de monitoramento hídrico emitidos pela ANA (2016) e pelo IBAMA (2015). As análises de turbidez e pH foram realizadas em Laboratório da Universidade do Estado de Minas Gerais Unidade João Monlevade/MG.

Para a coleta da *Salvinia auriculata*, as espécies foram selecionadas pelos seus aspectos morfológicos, levando em consideração a aparência das folhas e raízes e tamanho uniforme para cada experimento. As plantas foram



coletadas em lagoas que possuem águas livres de contaminação e transportadas em caixas de isopor, onde havia água do seu local de origem, até o laboratório localizado na Universidade do Estado de Minas Gerais Unidade João Monlevade (UEMG/JM).

Para a realização do Experimento I, as plantas foram lavadas em água corrente e desinfetadas em solução de hipoclorito de sódio 10% com o objetivo de retirar possíveis impurezas contidas nas plantas. Antes da exposição à água coletada no Rio Gualaxo do Norte, as plantas utilizadas neste experimento permaneceram em período de aclimação por 15 dias, em que foram mantidas em solução nutritiva seguindo o método utilizado por Clark (1975) em seu estudo. A referida solução encontra-se apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Solução nutritiva Clark

Elemento	Concentração (mmol L ⁻¹)
Ca	2,6
K	1,8
Mg	0,6
N-NH ₄	0,9
N-NO ₃	6,9
S	0,5
Cl	0,5
P	0,069
Mn	0,007
B	0,019
Zn	0,002
Mo	0,0006
Cu	0,0005
Fe - FeEDTA	0,038

No Experimento II as plantas foram coletadas de seu habitat natural e transportadas até o laboratório da UEMG/JM, onde foram transferidas diretamente para as amostras de água coletadas no Rio Gualaxo do Norte, sem realização de limpeza dos sedimentos presentes em suas raízes e sem serem submetidas a um período de aclimação.

Em cada experimento foi utilizado volume de dois litros de água de cada ponto de amostragem no rio, a água foi acondicionada em recipientes de acrílico com volume aproximado de 3l (três litros). O fotoperíodo foi controlado com luz branca fria, sendo assim, as plantas foram expostas a períodos de 12h de iluminação e 12h de escuro, o que foi realizado com o auxílio de uma estrutura de madeira e duas lâmpadas fluorescentes tubulares de luz branca fria. A utilização do fotoperíodo se justifica pela simulação às condições de iluminação natural, às quais o habitat de origem das plantas é submetido, já que o experimento foi realizado em escala de laboratório, sem contato direto da luz solar.

Nos dois experimentos realizados, colocou-se as plantas em contato com a água contaminada por um período de 15 dias. Ao final de cada experimento foram enviadas ao mesmo laboratório em que foram feitas as análises iniciais dos íons metálicos, amostras da água de cada ponto do rio que passou pelo processo de fitorremediação, para realização de nova análise dos teores dos metais Ferro, Alumínio e Manganês.

Para o cálculo da eficiência da *Salvinia* no processo de fitorremediação considerou-se a concentração corrigida dos metais Fe, Al e Mn em cada ponto estudado. Foi considerado o volume de água evaporado durante o experimento, portanto, houve a necessidade de corrigir a concentração dos metais de acordo com o volume inicial existente em cada recipiente.

O volume evaporado foi calculado considerando o volume de água perdido para a atmosfera em forma de vapor, através da diferença entre o volume inicial (2L) e o volume final presente em cada recipiente, não sendo analisado o volume perdido pela ação fisiológica das plantas (evapotranspiração).

Para corrigir a concentração de cada íon metálico obtida nas análises realizadas após submissão ao processo de fitorremediação foi calculada a concentração do íon para o volume de dois litros de água, o volume inicial de cada recipiente, de acordo com a Equação 1.



$$C = Mf / v$$

Equação (1)

Em que:

C = concentração final corrigida (mg/L)

Mf = massa final (mg)

v = volume (L)

A eficiência obtida no processo de fitorremediação foi calculada através da diferença entre a concentração final corrigida de cada íon metálico seguindo a Equação 2.

$$E = (C_0 - C / C_0) * 100$$

Equação (2)

Onde:

E = eficiência

C₀ = concentração inicial do íon metálico (mg/L)

C = concentração final corrigida (mg/L)

RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados dos parâmetros pH e turbidez nas amostras de água coletadas apresentaram valores (Tabela 2) abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, para cursos d'água Classe 2, em todos os pontos nas duas amostragens. Porém, identificou-se pequeno aumento dos índices de turbidez e decaimento do pH na segunda campanha realizada.

Tabela 2 – Valores de pH e Turbidez

PONTOS	Primeira Campanha Outubro/2017		Segunda Campanha Abril/2018	
	pH	Turbidez (UNT)	pH	Turbidez (UNT)
Ponto 1	7,5	2,4	6,13	8,67
Ponto 2	7,7	10,2	6,21	26,02
Ponto 3	7,9	10,2	6,08	11,72
MÉDIA	7,7	7,6	6,14	15,47

As concentrações dos metais Ferro total, Manganês Total e Alumínio Total das duas campanhas de coleta, nos três pontos do Rio Gualaxo do Norte estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Teores de metais na água superficial – Rio Gualaxo do Norte

PONTOS	Concentração dos metais antes do processo de fitorremediação (mg/L)					
	Primeira Campanha Outubro/2017			Segunda Campanha Abril/2018		
	Ferro	Manganês	Alumínio	Ferro	Manganês	Alumínio
Ponto 1	0,22	0,06	0,52	0,22	0,15	<0,05
Ponto 2	0,35	0,05	0,55	0,36	0,13	<0,05
Ponto 3	0,36	0,07	0,56	0,34	0,18	0,10
MÉDIA	0,31	0,06	0,54	0,31	0,15	0,07

Nota-se que nas duas amostragens as concentrações de Ferro alcançaram valores similares, enquanto houve aumento das concentrações de Manganês e decaimento na de Alumínio na segunda campanha nos três pontos analisados em relação à primeira campanha.

A Figura 5 mostra a *Salvinia auriculata* em processo de aclimação durante o Experimento I.



Figura 5 – *Salvinia auriculata* em solução nutritiva durante período de aclimação

Após 15 dias em contato com a solução nutritiva, as plantas apresentaram aspecto visivelmente seco e amarronzado, como pode ser visualizado na Figura 6, que apresenta a *Salvinia auriculata* no primeiro dia do Experimento I.



Figura 6 – *Salvinia auriculata* em contato com a água coletada (Primeiro dia)

A Figura 7 apresenta a macrófita estudada após 15 dias em processo de fitorremediação. Como pode ser visto na imagem, as plantas apresentaram aspecto ainda mais ressecado após o processo de fitorremediação, o que pode estar associado a intolerância causada pela presença de altas concentrações de metais nas amostras do Rio Gualaxo do Norte.



Figura 7 – Último dia do processo de fitorremediação – Experimento I

Como não houve reposição de água nos recipientes, observou-se redução do volume de água devido a evapotranspiração e conseqüentemente houve a necessidade de correção das concentrações do metal. A Tabela 4 mostra o volume evapotranspirado e as concentrações corrigidas dos metais na água de cada um dos três pontos.

Tabela 4 – Volume evaporado e concentração final corrigida

PONTOS	VOLUME EVAPORADO (L)	CONCENTRAÇÃO FINAL (mg/L)		
		FERRO	MANGANÊS	ALUMÍNIO
Ponto 1	0,86	0,20	0,02	0,27
Ponto 2	1,21	0,40	0,03	0,15
Ponto 3	1,24	0,06	0,00	0,09
MÉDIA	1,10	0,22	0,02	0,17

Os resultados da concentração final dos metais Fe, Mn e Al após o processo de fitorremediação mostraram decaimento em relação às análises iniciais, exceto para a concentração de Ferro no Ponto 2. O Ferro passou de uma concentração inicial média de 0,31 mg/L para 0,22 mg/L. O Alumínio, detectado inicialmente em teores muito altos, apresentou concentração final média igual a 0,17 mg/L, enquanto sua concentração inicial média foi de 0,57 mg/L na primeira análise. O Manganês, que apresentou concentração inicial média de 0,06 mg/L passou para 0,02 mg/L após o processo.

A Figura 8 mostra a eficiência obtida no Experimento I, de acordo com a massa de cada íon metálico removida. A *Salvinia auriculata* apresentou eficiência média de 31,10%, 67,68% e 68,52% para os metais Ferro, Manganês e Alumínio respectivamente.

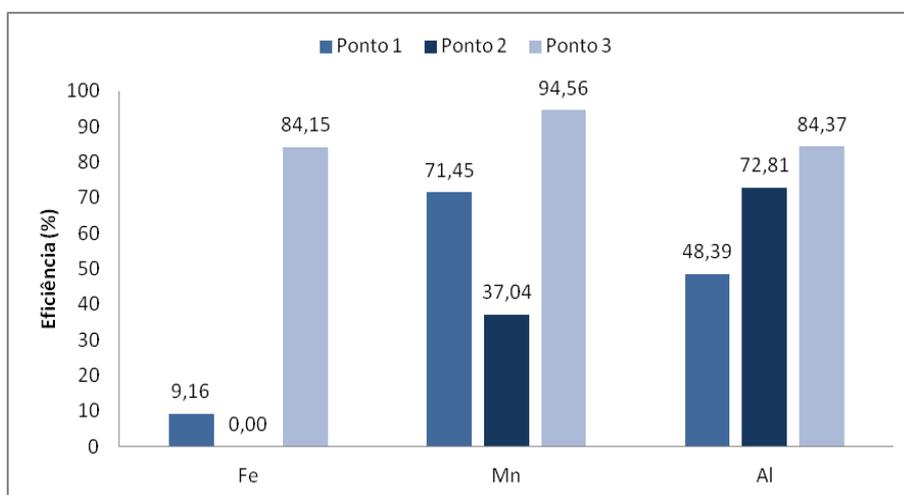


Figura 8 – Eficiência da *Salvinia auriculata* na remoção dos metais no Experimento I

As plantas utilizadas no Experimento II apresentaram boa adaptação, que pode ter sido resultado dos sedimentos provenientes de seu meio de origem, ainda agregados nas raízes, já que estas não foram submetidas à prévia higienização e desinfecção. Na Figura 9 pode-se observar as plantas no primeiro dia do processo de fitorremediação do Experimento II.



Figura 9 – *Salvinia auriculata* em contato com a água coletada no primeiro dia do Experimento II

Pode-se notar ainda, na Figura 9, que as plantas apresentaram aspecto sadio no primeiro dia do Experimento II, diferentemente do primeiro dia do Experimento I, em que as plantas passaram por período de aclimação e já foram submetidas à água contaminada por metais com aspecto amarronzado e seco.

A Figura 10 mostra as plantas em contato com a água coletada no 15º dia do experimento.



Figura 10 - Último dia do processo de fitorremediação – Experimento II

Apesar de apresentar aspecto levemente amarronzado, a *Salvinia* se adaptou bem às condições do Experimento II. É possível visualizar na Figura 10 que, mesmo após os 15 dias em contato com a água contaminada, as plantas apresentaram aspecto sadio e esverdeado, sem sinais de grandes deficiências ou prejuízos em seu crescimento.

No Experimento II a *Salvinia auriculata* não apresentou eficiência na remoção de Ferro do Ponto 2 e de Alumínio nos Pontos 1 e 2, o que pode estar associado ao fato das plantas não terem passado pelo processo de desinfecção e aclimação, condição que possivelmente dificultou a assimilação de metais pelas plantas, já que havia presença de sedimentos originados do seu meio natural aderido em suas raízes. O volume evaporado e as concentrações finais corrigidas dos metais estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Volume evaporado e concentração final corrigida

PONTOS	VOLUME EVAPORADO (L)	CONCENTRAÇÃO FINAL (MG/L)		
		FERRO	MANGANÊS	ALUMÍNIO
Ponto 1	0,38	0,14	0,06	0,06
Ponto 2	0,40	0,39	0,06	0,18
Ponto 3	0,40	0,10	0,02	0,06
MÉDIA	0,39	0,21	0,05	0,10

No Experimento II o Ferro apresentou concentração final média de 0,21 mg/L, enquanto nas análises iniciais a concentração média foi de 0,31 mg/L. O Alumínio passou da concentração média 0,07 mg/L para 0,10 mg/L, ou seja, a massa de Alumínio aumentou após o processo de fitorremediação, apresentando eficiência apenas no Ponto 3, em que sua concentração passou de 0,1 mg/L para 0,06 mg/L. O volume de água evaporado registrado no Experimento II apresentou taxas menores que o registrado no Experimento I, fato que pode ter sido ocasionado pelo período em que o Experimento II foi realizado e pela massa vegetal da *Salvinia auriculata* no Experimento II, que apresentou aspecto mais denso e volumoso, limitando o contato da água com o ar ambiente e proporcionou menor perda do líquido para a atmosfera.

Na Figura 11 pode-se verificar as eficiências da *Salvinia auriculata* na remoção de cada íon metálico nos pontos estudados.

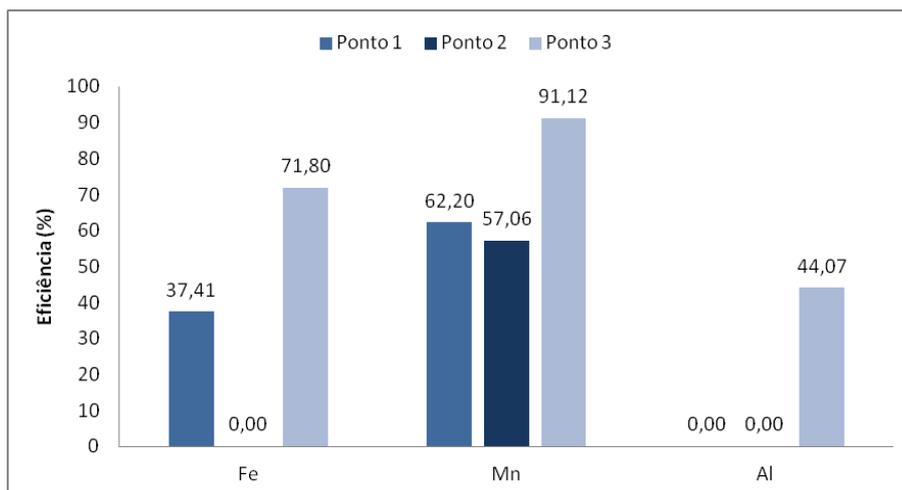


Figura 11 – Eficiência da *Salvinia auriculata* na remoção dos metais no Experimento II

No Experimento II a eficiência média de remoção dos metais pela salvinia foi de 36,4%, 70,3% e 44,07% para o Ferro, Manganês e Alumínio respectivamente.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A turbidez é medida pela dificuldade de um feixe de luz atravessar uma determinada quantidade de água, esta dificuldade é resultante da presença de sólidos em suspensão (silte, argila, coloides, matéria orgânica, entre outros). A ocorrência de chuvas pode ser fator determinante para o aumento da turbidez, visto que provoca o revolvimento de material sólido existente nos leitos dos rios pelo aumento da velocidade da água e carreamento de materiais depositados nas margens, movimentando partículas sólidas para a coluna d'água (CORREIA *et al.*, 2008; IGAM, 2018).

Na segunda campanha, realizada em abril de 2018, observou-se pequeno aumento nos índices de turbidez em relação à primeira campanha, fato que pode estar correlacionado a episódios de chuva na região. De acordo com Galvani (s.d.) o Município de Mariana, ao qual pertence o Subdistrito de Bento Rodrigues, está inserido no sudeste brasileiro, região onde predomina o clima tropical, caracterizado por inverno frio e seco e verão quente e chuvoso. O verão compreende o período de dezembro à março, sendo assim, a segunda campanha de coleta ocorreu logo após o período de chuvas na região.

O Ponto 2 apresentou turbidez elevada em relação aos outros, portanto, cabe destacar a existência de obras próximas a este ponto de coleta, onde a empresa Samarco estava trabalhando na construção de um reservatório ao lado deste local. A movimentação de máquinas e equipamentos causa a movimentação de partículas sólidas, podendo estas serem carregadas para mananciais superficiais e causar o aumento de sólidos em suspensão na água.

A turbidez elevada impede a entrada de luz solar na água, inviabilizando a fotossíntese e consequentemente prejudicando a sobrevivência de organismos aquáticos, como do fitoplâncton e macrófitas. Assim, o aumento deste parâmetro é decisivo na ocorrência de impactos negativos, o que inclui falhas na operação de equipamentos hidromecânicos, mortalidade de peixes e inviabilidade do tratamento de água para abastecimento da população (IBAMA, 2015; ANA, 2016).

O potencial hidrogeniônico – pH, representa as condições ácidas ou alcalinas da água por meio da medição de íons de hidrogênio, varia entre 0 e 14, representando condições ácidas quando inferior a 7 e básicas quando superior (FUNASA, 2014). Os valores do pH nas amostras da segunda campanha mostraram resultados inferiores aos da primeira, passando de uma característica com tendências à basicidade para leve tendência à acidez, apresentando médias de 6,14 e 7,7 respectivamente. Apesar de observada esta diferença entre as duas campanhas, não se pode, com os dados obtidos, determinar o que causou a queda de seus valores, sendo necessários estudos mais aprofundados e em períodos maiores. O parâmetro pH pode ser considerado como uma das variáveis ambientais mais importantes, porém uma das mais difíceis de se interpretar, complexidade justificada pelos inúmeros fatores que podem influenciá-la (MESSIAS, 2008).



As águas do Rio Gualaxo do Norte são consideradas Classe 2 pela Resolução CONAMA 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Algumas destinações das águas enquadradas nesta classe são abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional, à proteção de comunidades aquáticas, à irrigação de hortaliças, à atividades de pesca, entre outras (BRASIL, 2005). Esta resolução estabelece limites para alguns parâmetros de acordo com a classe em que o corpo hídrico é enquadrado. Em nenhuma das amostras os valores dos parâmetros pH e turbidez ultrapassaram o limite estabelecido por esta resolução para cursos d'água Classe 2, em que o limite é de 100 Unidades de Turbidez e uma faixa de pH de 6,0 a 9,0 (BRASIL, 2005).

A concentração de íons metálicos na água nos ambientes naturais em condições normais (em que não haja despejo de efluentes domésticos, industriais, uso de pesticidas ou de outras atividades que descartem compostos químicos nos cursos d'água) é baixa, não causando efeitos tóxicos às plantas e animais. Em áreas com existência de atividades antrópicas, como agricultura, atividades industriais e mineração, a concentração destes metais em água tende a aumentar, resultando em sua acumulação no ecossistema (FORNAZIER et al., 2002).

No caso estudado, os elevados teores de metais na água são consequências de um impacto ambiental negativo da atividade de mineração de ferro, que no episódio de rompimento da barragem de Fundão despejou grande volume de lama de rejeitos nos cursos d'água, alterando a qualidade dos recursos hídricos e violando vários parâmetros estabelecidos pela legislação. Entre eles, os metais Fe, Mn e Al, segundo dados do monitoramento realizado pelo IBAMA, ultrapassaram os limites quanto à sua concentração nos sedimentos e na água após a passagem da onda de lama (IBAMA, 2015).

O limite estabelecido para águas Classe 2 pela CONAMA nº 357/2005 para o Ferro dissolvido é de 0,3 mg/L, enquanto a média obtida para o Ferro total foi de 0,31 mg/L, considerando que o resultado de Ferro total inclui todos os íons de Ferro presentes na água, em solução e suspensos, os teores de Ferro das águas do Rio Gualaxo do Norte apresentaram valores aceitáveis e com tendências ao decaimento quando também observados os dados históricos do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), que chegou a alcançar 0,951 mg/L em 2015 e em 2017 apresentou valor máximo de 0,398 mg/L para o Ferro dissolvido (IGAM, 2018).

O Ferro acumula-se nos tecidos do homem ao longo do tempo e seus níveis tóxicos tem sido associados a doenças neurológicas, como doença de Parkinson e Demência de Alzheimer. Apesar de ser fundamental para o processo de regulação que mantém o organismo em constante equilíbrio (homeostase), o ferro em excesso desencadeia um desequilíbrio entre a formação de radicais livres e as enzimas que defendem o organismo dos seus danos, levando à oxidação de elementos celulares fundamentais para o funcionamento normal do organismo, alterações na conformação de proteínas e aumento de sua agregabilidade, à formação de fibrilas e à neurodegeneração (FERNANDEZ *et al.*, 2017).

O Manganês apresentou teores médios de 0,06 mg/L e 0,15 mg/L na primeira e segunda campanha, respectivamente. O limite estabelecido para o Manganês total pela CONAMA 357/2005 é de 0,10 mg/L, sendo assim, na primeira campanha o parâmetro não extrapolou o limite em nenhum dos pontos analisados, enquanto na segunda campanha os resultados mostraram extrapolação do limite de Manganês em todos os três pontos analisados. Nas análises apresentadas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), os valores da concentração de Manganês ultrapassaram o limite estabelecido em todos os resultados obtidos no ponto do Rio Gualaxo do Norte entre outubro/2016 e março/2017, período que abrange época de chuvas na região. As altas concentrações de Manganês no corpo humano estão relacionadas à efeitos neurotóxicos como distúrbios cognitivos, do equilíbrio e do movimento (IGAM, 2017).

A concentração média de Alumínio total na primeira campanha foi de 0,54 mg/L, com valores bastante elevados nos três pontos, e de 0,07 mg/L na segunda campanha. Porém, não se pode comparar aos limites estabelecidos pela CONAMA nº 357/2005, já que a resolução estabelece limite para o Alumínio dissolvido. Nas análises do IGAM, os valores do parâmetro Alumínio dissolvido obtidos no período chuvoso nas estações de amostragem localizadas no Rio Gualaxo do Norte apresentaram duas violações do limite de classe para o Alumínio (IGAM, 2017).

Ainda, de acordo com os dados do relatório do IGAM, de junho/2017, é possível verificar que a concentração de Alumínio veio apresentando valores altos, sendo que o maior apresentado no Rio Gualaxo do Norte após o rompimento, segundo os dados disponibilizados pelo órgão, foi de 103,8 mg/L em janeiro/2016, aproximadamente mil vezes maior que o limite estabelecido.

O alumínio, metal leve e terceiro elemento químico mais abundante na crosta terrestre, é muito utilizado mundialmente para diversos fins. Em sua forma solúvel pode ser absorvido por plantas e animais. A intoxicação do homem por esse metal pode propiciar o aparecimento de náuseas, fadiga, anorexia, à constipação intestinal, cólicas abdominais, alterações do metabolismo do cálcio (raquitismo), alterações neurológicas com graves danos ao tecido cerebral. (FERREIRA; MENDES, 2017).

Altas concentrações de metais no meio aquático representam alto poder acumulativo na biota. De acordo com Pandey; Sharma (2002), a entrada de metais na cadeia alimentar e sua bioacumulação os tornam potencialmente perigosos aos organismos vivos e ao homem. Entre os organismos se destacam os peixes, que são foco de vários estudos sobre a contaminação por metais, pois estes absorvem tanto os metais essenciais como os não essenciais a partir da água e pela ingestão de alimento, retendo-os em seu tecido muscular. O estudo da concentração de metais em peixes também é relevante por ser alimento para o homem, podendo afetar em sua saúde (JABEEN *et al.* 2012).

A ingestão de água e alimentos com acumulações de metais causam diversos prejuízos ao homem. Quando presentes em altas concentrações no organismo humano, os metais podem atingir o sistema nervoso e órgãos hepáticos (fígado e rins), e o grau de toxicidade destes elementos depende da solubilidade, transporte, da absorção pelas células e de reações químicas com outros metais presentes no organismo (VIEIRA *et al.*, 2015).

A Portaria de Consolidação nº 05/2017 do Ministério da Saúde, estabelece os valores permitidos de qualidade da água para consumo humano, que é de 0,3 mg/L, 0,1 mg/L e 0,2 mg/L para o Ferro, Manganês e Alumínio respectivamente. As análises das amostras coletadas em dezembro/2017 pelo IGAM apresentaram valores de 0,25 mg/L, 2,723 mg/L e 0,068 mg/L para o Ferro, Manganês e Alumínio, assim, pode-se notar que o Manganês apresentou violação do limite estabelecido pela Portaria (IGAM, 2017). Os resultados das concentrações de Manganês total nas análises realizadas em maio/2018 neste estudo também apresentaram valores superiores ao valor máximo permitido nos três pontos estudados, com média de 0,15 mg/L, porém, apesar de ultrapassarem o limite, os valores mostraram decaimento em relação a última análise realizada pelo IGAM, em dezembro/2017.

Neste estudo, assim como nas análises realizadas pelo IGAM e apresentadas em seu último relatório do acompanhamento especial das águas atingidas pela lama de rejeito, o valor das concentrações de metais no Rio Gualaxo do Norte, apesar de apresentarem alguns valores que violaram os limites estabelecidos pela DN/MG nº 01/08, não apresentam situação crítica à curto prazo relação aos usos múltiplos da água na região e tendem ao decaimento a medida em que o ambiente impactado recuperar seu equilíbrio. Apesar disso, ressalta-se a importância do monitoramento contínuo dos cursos d'água atingidos, já que os sedimentos acumulados nas áreas ao entorno podem ser carregados para os cursos d'água elevando novamente o teor de metais, e a necessidade de implantar medidas para amenizar os níveis de metais nos recursos hídricos, visto que a acumulação destes nos organismos de animais e do homem podem causar sérios prejuízos a longo prazo.

De modo geral, a espécie *Salvinia auriculata*, utilizada nos experimentos de fitorremediação da presente pesquisa, apresentou boa adaptação ao ambiente e à água contaminada com metais, alcançando eficiência na remoção dos metais nas duas situações às quais foram submetidas: contato com as amostras coletadas no Rio Gualaxo do Norte após processo de aclimatação em solução nutriente e fotoperíodo controlado e contato com as amostras sem passar por período de aclimatação.

No Experimento I as eficiências médias alcançadas foram de 31,10%, 67,68% e 68,52%, e no Experimento II de 36,4%, 70,13% e 14,69% para o Ferro, Manganês e Alumínio respectivamente. A eficiência média de remoção de cada íon metálico apresentou valores próximos, porém, pode-se observar maior eficiência geral de remoção no Experimento I, em que houve aclimatação das plantas.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

O episódio ocorrido em Mariana-MG foi considerado o maior desastre ambiental do mundo envolvendo barragens de rejeito de mineração e o maior desastre ambiental do Brasil. Áreas de Preservação Permanente foram completamente destruídas, os impactos causados à fauna e a flora demandarão tempo e investimentos para serem superados. Os prejuízos causados ao meio ambiente refletiram na prática de atividades pesqueiras, agropecuárias, turismo e lazer na região, que se tornaram inviáveis logo após o rompimento da barragem.

Após anos da passagem da onda de lama de rejeitos pelo Rio Gualaxo do Norte ainda são notadas alterações em sua qualidade, tornando necessária a implementação de medidas de reparação dos danos, que devem ser executadas a médio e longo prazo de modo a atender às necessidades dos usos múltiplos da água na região e reestabelecer o equilíbrio ecossistêmico dos locais afetados direta e indiretamente pela tragédia.

Pode-se afirmar, mediante resultados obtidos, que as concentrações dos metais Ferro, Manganês e Alumínio detectadas nas análises da água dos três pontos do Rio Gualaxo do Norte não representam perigo a curto prazo em termos de toxicidade, porém, o efeito da bioacumulação nos organismos e biomagnificação de íons metálicos na cadeia trófica pode trazer riscos à saúde do homem e de animais.

A *Salvinia auriculata* proporcionou redução dos níveis de Fe, Mn e Al nas amostras de água do Rio Gualaxo do Norte, com médias de remoções do Ferro, Manganês e Alumínio de 37,41%, 67,68% e 68,52% respectivamente no Experimento I, e médias de 36,4%, 70,3% e 44,07% para o Ferro, Manganês e Alumínio no Experimento II.

Cabe ressaltar que não se pode comparar a eficiência alcançada no experimento em que houve aclimação das plantas com a eficiência obtida no experimento em que não houve processo de aclimação, devido à fatores não monitorados no presente estudo e que influenciam no potencial fitorremediador, como: temperatura, pH, ventilação, quantidade de plantas utilizadas em cada experimento e sua massa vegetal.

Conclui-se que a *Salvinia auriculata* é uma espécie com potencial de fitorremediar águas contaminadas com os íons metálicos estudados, porém, não se pode afirmar a partir deste estudo que o experimento é ideal para a remoção de íons metálicos do Rio Gualaxo do Norte por ter sido realizado em escala de laboratório.

Recomenda-se para trabalhos futuros: a realização do experimento *in loco* para constatar a viabilidade ou não de sua aplicação em escala real; a análise e monitoramento de variáveis que influenciam na técnica de fitorremediação, como temperatura e luminosidade, para otimizar a eficiência do processo; análise da concentração de metal retido na planta após o processo de fitorremediação e o estudo de técnicas de disposição final da macrófita após a remoção dos íons do meio aquático.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Relatório Técnico: Análise preliminar sobre a qualidade d'água e seus reflexos sobre o uso da água. 2016.
2. ANDRADE, L.C.R. Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
3. BRASIL. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF. 2005.
4. CAMPOS, A.A. *et al.* Características Geotécnicas do Rejeito de Minério de Ferro de uma empresa localizada na região de Brumadinho em Minas Gerais. [s.d.]. Disponível em: <http://revistapensar.com.br/engenharia/pasta_upload/artigos/a187.pdf> Acesso em 09 abr. 2019.
5. CLARK, Robert. *Characterization of phosphatase of intact maize roots. Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 23, p. 458-460, 1975.



6. CORREIA, A. *et al.* Análise da turbidez da água em diferentes estados de tratamento. Rio Grande do Norte, 2008. Artigo disponível em: < http://www.dimap.ufrn.br/~sbmac/ermac2008/Anais/Resumos%20Estendidos/Analise%20da%20turbidez_Aislan%20Correia.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2018.
7. COSTA, A.T. Geoquímica das águas e dos sedimentos da bacia do Rio Gualaxo do Norte, Leste-Sudeste do quadrilátero ferrífero (MG): Estudo de uma área afetada por atividades de extração mineral. Dissertação (Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2001.
8. DELAQUA, G.C.G. Incorporação da biomassa seca de *Salvinia Auriculata Aubl.* proveniente do processo de fitorremediação em cerâmica vermelha. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciências dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2016.
9. FARIAS, C.E.G. Mineração e Meio Ambiente no Brasil. 2002.
10. FERNANDEZ, L. L. *et al.* Ferro e Neurodegeneração. *Scientia Medica*, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 218-224, out./dez. 2007.
11. FERREIRA, E.M.P.; MENDES, G.K.P. Íons metálicos no Rio Gualaxo do norte: antes e após a contaminação pelo rejeito da barragem de Fundão pertencente à mineradora Samarco/S.A. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade do Estado de Minas Gerais – UEMG, João Monlevade, 2017.
12. FORNAZIER, R.F. *et al.* *Effects of cadmium on antioxidant enzymes activities in sugar cane. Biologia Plantarum*, v. 45, p. 91-97, 2002.
13. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE – FEAM. Inventário de barragem do Estado de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente. 2016.
14. FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE – FUNASA. Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS. 1º Ed. Brasília, 2014.
15. GALVANI, E. Climatologia I. Departamento de Geografia – USP. [s.d.]
16. INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. Laudo Técnico Preliminar. 2015, 74p.
17. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Relatório técnico: Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce Após o Rompimento da Barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG. 2017.
18. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS – IGAM. Relatório técnico: Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce Após o Rompimento da Barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG. 2018.
19. JABEEN, G. *et al.* *Assessment of heavy metals in the fish collected from the river Ravi, Pakistan. Pakistan Veterinary Journal*, 32: 107-111. 2012.
20. LAMBERT, L.F.M. *et al.* Fitorremediação como solução para recuperação de solos contaminados pelo petróleo. Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação. Palmas, Tocantins, 2012.
21. LOPES, M. O que é mineração afinal? 2014. Disponível em <<https://tecnicoemineracao.com.br/o-que-e-mineracao/>> Acesso em 10 de out. 2017.
22. LOZANO, F.A.E. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006, 142 p.
23. MACHADO, L.V.T., AZEEZ, D.G. incidentes e acidentes em barragens. 7º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade. 2018. Disponível em: https://www.itr.ufrj.br/sigabi/wp-content/uploads/7_sigabi/VASCONCELLOS_LUCAS_355a358.pdf. Acesso em: 09 abr. 2019.
24. MECHI, A.; SANCHES, D.L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. Estudos avançados. vol. 24 nº 68, São Paulo, 2010.



25. MESSIAS, T.G. Influência da toxicidade da água e dos sedimentos nos rios São Joaquim e Ribeirão Claro na bacia do Corumbataí. 2008. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
26. MINISTÉRIO DA SAÚDE – MS. Parecer técnico nº 070 CGVAM/SVS/MS/2008. 2008. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/0330EB12/ParecerTec070-08_MSaude.pdf> Acesso em 16 set. 2017.
27. OLIVEIRA, D.M. *et al.* Fitorremediação: o estado da arte. Rio de Janeiro: CETEM – MCT, 2006, 32 p.
28. PANDEY, N.; SHARMA, C. P. *Effect of heavy Co²⁺, Ni²⁺ and Cd²⁺ on growth and metabolism of cabbage. Plant Science*, v. 163, p. 753-758, 2002.
29. RUPPENTHAL, J. E. Toxicologia. Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico Industrial de Santa Maria - Rede e-Tec Brasil. Santa Maria, 2013.
30. SAMARCO. [s.d.]. Rompimento de Fundão. Disponível em: <<http://www.samarco.com/rompimento-de-fundao/>>. Acesso em: 09 abr 2019.
31. SASSINE, V. Laudo aponta que Rio Doce estará sujeito a condições imprevisíveis. Jornal O Globo. 2015. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/brasil/laudo-aponta-que-rio-doce-estara-sujeito-danosimprevisiveis-18378346>>. Acesso em: 09 de maio 2018.
32. VALE. Notícias sobre Brumadinho e outras barragens. Disponível em: <<http://www.vale.com/>>. Acesso em 09 abr. 2019.
33. VIEIRA, L.R. *et al.* Toxicidade de cádmio em plantas. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria, mai-ago. 2015.