UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Campus Regional Montes Claros
Instituto de Ciências Agrárias

Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais

ANA LUIZA RAMIRO BENEVENUTE

DETERMINAÇÃO DOS METAIS Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn EM SOLO DE PARACATU DE BAIXO – SUBDISTRITO DE MARIANA, MG 8 ANOS APÓS ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Montes Claros
2024

ANA LUIZA RAMIRO BENEVENUTE

DETERMINAÇÃO DOS METAIS Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn EM SOLO DE PARACATU DE BAIXO – SUBDISTRITO DE MARIANA, MG 8 ANOS APÓS ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO.

Trabalho final de especialização apresentado ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de especialista em Recursos Hídricos e Ambientais.

Orientadora**:** Prof. Dra. Júlia Ferreira da Silva

Montes Claros, MG
2024

Benevenute, Ana Luiza Ramiro.

B465d
2024

Determinação dos metais Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, em solo de Paracatu de Baixo - subdistrito de Mariana, MG 8 anos após rompimento da barragem de Fundão [manuscrito]/ Ana Luiza Ramiro Benevenute. Montes Claros, 2024.

31 f.: il.

Monografia (especialização) - Área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais. Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientadora: Júlia Ferreira da Silva

Banca examinadora: Charles Martins Aguilar, Francinete Veloso Duarte, Luciano Vieira Lima.

Inclui referências: f. 26-30

1. Barragem. 2. Metais. 3. Solos -- Poluição. I. Silva, Júlia Ferreira da. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 628.39

ELABORADA PELA BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA DO ICA/UFMG

Nádia Cristina Oliveira Pires / CRB-6/2781

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
ESPECIALIZAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

DETERMINAÇÃO DOS METAIS Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, EM SOLO DE PARACATU DE BAIXO – SUBDISTRITO DE MARIANA, MG 8 ANOS APÓS ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

ANA LUIZA RAMIRO BENEVENUTE

Trabalho Final de Curso de Especialização (TFCE) submetido à Comissão de Avaliação designada pela Comissão de Coordenação do curso de Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Recursos Hídricos e Ambientais.

TFCE aprovado em dois de dezembro de 2024 pela comissão de avaliação constituída pelos membros:

Júlia Ferreira da Silva
Orientadora - ICA/UFMG

Charles Martins Aguilar
Avaliador - ICA/UFMG

Francinete Veloso Duarte
Avaliadora - ICA/UFMG

Luciano Vieira Lima
Avaliador - ICA/UFMG

Montes Claros, data da assinatura eletrônica.

Dalton Rocha Pereira
Coordenador de Pós-graduação *Lato Sensu*

Documento assinado eletronicamente por **Dalton Rocha Pereira, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 24/12/2024, às 09:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3838525** e o código CRC **31615A3B**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio ao longo dessa e de muitas outras jornadas. Ao meu pai, Luiz Cláudio, que realizou as 30 perfurações para a coleta de solo em Paracatu de Baixo, à minha mãe, Eliana, que auxiliou na identificação e coleta das amostragens e à minha irmã, Mariana, pelo incentivo nessa e em outras aventuras.

Também agradeço à professora Júlia Ferreira da Silva, por aceitar orientar o presente trabalho e pelas contribuições, ao técnico Luciano Vieira Lima pelo apoio e esclarecimentos para a realização das atividades das disciplinas e nas viagens técnicas.

Obrigada ao professor Flaviano Oliveira Silvério e aos técnicos do Laboratório de Química Instrumental (LQI-UFMG) pelas análises quantitativas dos metais.

Agradeço também aos colegas de trabalho na Vigilância Ambiental da Prefeitura de Mariana, pelo compartilhamento de conhecimentos com motivação e entusiasmo, sempre trabalhando para garantir segurança à população.

E, por fim, agradeço a Deus, pelas experiências e oportunidade de ter essas pessoas em minha trajetória.

RESUMO

No dia 5 de novembro de 2015, no município de Mariana, MG, a barragem de Fundão, que armazenava rejeito de beneficiamento de minério de ferro, rompeu-se, lançando no ambiente aproximadamente 34 milhões de m³ de rejeito. Entre as áreas afetadas pela lama está o subdistrito de Paracatu de Baixo, que pertence ao território de Mariana. Considerando que, mesmo após parcial destruição da localidade alguns moradores ainda permanecem residindo no local, o objetivo deste estudo foi verificar a existência e a concentração de metais ecotóxicos (Cu, Cr, Zn, Pb, Fe, Mn e Ni) em áreas afetadas pelo rejeito, por meio de análise das diferenças entre as concentrações encontradas para esses elementos e os valores permitidos pela legislação. A metodologia da execução deste trabalho caracteriza-se como descritiva exploratória. Foram realizadas 6 coletas de solo a uma profundidade de 20 cm, sendo 4 coletas em áreas afetadas pelo rejeito e 2 em áreas não impactadas. Cada ponto de coleta foi composto por 5 subamostras. As subamostras de cada ponto foram posteriormente homogeneizadas e 50 g de cada ponto amostrado foram enviados para análise no Laboratório de Química Instrumental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (LQI-ICA-UFMG) no campus regional de Montes Claros, MG. As quantificações dos metais: Pb, Cu, Cr, Ni Fe, Mn e Zn foram realizadas em Espectrofotômetro de Absorção Atômica da Varian (AAS 240 FS) no modo chamas. Os resultados mostraram que, após 8 anos do rompimento da barragem, ferro e manganês ainda ocorrem em todas as áreas de coleta e apresentam os maiores valores dentre os metais analisados. A concentração desses metais é significativamente maior nas áreas impactadas pelo rejeito que nas áreas não afetadas. Cromo, níquel e cobre não tiveram valores quantificados em nenhum dos pontos de coleta. Das áreas analisadas apenas duas não apresentaram a presença do metal chumbo, ambas contaminadas por rejeito e o zinco esteve presente em todas as áreas coletadas, sem relação significativa de concentração com áreas impactadas ou não. Todos os metais avaliados apresentaram concentrações inferiores aos Valores de Referência de Qualidade (VQRs) preconizados pela Deliberação Normativa COPAM 166/2011, à exceção dos metais ferro e manganês, que não possuem valores referenciais nesta deliberação.

Palavras-chave: barragem de mineração; metais ecotóxicos; contaminação de solo.

ABSTRACT

On November 5, 2015, in the municipality of Mariana, MG, the Fundão dam, which stored waste from iron ore processing, ruptured, releasing approximately 34 million m³ of ore tailing into the environment. Among the areas affected by the mud is the subdistrict of Paracatu de Baixo, which belongs to the territory of Mariana. Considering that, even after partial destruction of the location, some residents still reside there, the main goal of this study were to verify the existence and concentration of ecotoxic metals (Cu, Cr, Zn, Pb, Fe, Mn and Ni) in areas affected by the waste, through analysis of differences between the concentrations found for these elements and the values allowed by legislation. The methodology used to develop this work is characterized as exploratory descriptive. Six soil collections were carried out at a depth of 20cm, 4 collections in areas affected by waste and 2 in non-impacted areas. Each collection point consisted of 5 subsamples. The subsamples from each point were subsequently homogenized and 50g from each sampled point were sent for analysis at the Laboratório de Química Instrumental do Instituto de Ciências Agrárias from Universidade Federal de Minas Gerais (LQI-ICA-UFMG) on the regional campus of Montes Claros, MG. Quantifications of the metals: Pb, Cu, Cr, Ni Fe, Mn and Zn were carried out in a Varian Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS 240 FS) in flame mode. The results showed that, 8 years after the dam collapse, iron and manganese still occur in all collection areas and present the highest values among the metals analyzed. The concentration of these metals is significantly higher in areas impacted by waste than in unaffected areas. Chromium, nickel and copper had no quantified values at any of the collection points. Of the areas analyzed, only two did not show the presence of lead metal, both were contaminated by waste and zinc was present in all areas collected, with no significant relationship in concentration with impacted areas or not. All metals evaluated presented concentrations lower than the Quality Reference Values (VQRs) recommended by Deliberação Normativa COPAM 166/2011, with the exception of iron and manganese metals, which do not have reference values in this deliberation.

Keywords: mining dam; ecotoxic metals; soil contamination.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....8

2 REFERENCIAL TEÓRICO.....10

3 MATERIAL E MÉTODOS.....12

3.1 Local de estudo.....12

3.2 Coleta das amostras de solo.....13

3.3. Preparo de amostras para análise.....17

3.4 Metodologia das análises.....17

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....19

5 CONCLUSÃO.....25

REFERÊNCIAS.....26

1 INTRODUÇÃO

Em 5 de novembro de 2015, a barragem de Fundão, pertencente à mineradora Samarco, rompeu-se liberando aproximadamente 34 milhões de metros cúbicos de rejeito de beneficiamento de minério de ferro no ambiente (Ibama, 2015).

O trajeto percorrido pela lama causou inúmeros impactos, dentre os quais: perdas de vidas humanas, mortandade de flora e fauna terrestre e aquática, perda e fragmentação de habitats, alteração dos padrões de qualidade de água e solo e destruição de patrimônio público e privado (Ibama, 2015; Serra, 2018).

Entre as localidades afetadas destacam-se os subdistritos da cidade de Mariana: Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo (PMM, 2024). O subdistrito de Bento Rodrigues se localizava a 6 km da barragem de Fundão e foi significativamente afetado pela onda de rejeitos. A população sobrevivente precisou ser realocada na sede enquanto aguardava a conclusão do reassentamento de Novo Bento, sob responsabilidade da Fundação Renova (Fundação Renova, 2016, 2023; MPMG, 2020).

Já a localidade de Paracatu de Baixo, a 70 km de Bento Rodrigues, foi parcialmente afetada, sendo os maiores impactos observados na parte baixa da comunidade onde se localizavam a Capela de Santo Antônio, a Escola Fundamental de Paracatu de Baixo e algumas das residências; a parte mais elevada da localidade não foi alcançada pela onda de rejeitos (Almeida *et al.*, 2018).

Embora o reassentamento para a população da localidade também esteja em andamento, alguns moradores retornaram para Paracatu de Baixo, em especial para as áreas não afetadas. No entanto, esta população permanece convivendo próximo a um local em que houve deposição do rejeito da barragem de Fundão. Essa condição pode facilitar o encontro com substâncias tóxicas provenientes do rejeito e que podem ser revolvidas da água ou do solo tornando-se disponíveis para contaminar os recursos naturais empregados para consumo, ou mesmo tornar-se presente na poeira que pode ser inalada do ambiente.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo verificar a existência dos metais Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Zinco (Zn), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) no solo de Paracatu de Baixo – subdistrito de Mariana, MG, 8 anos após rompimento da barragem de fundão e analisar as diferenças entre os valores

encontrados e os Valores de Referência de Qualidade do Solo (VRQs) para Minas Gerais.

Apesar do reconhecido potencial nocivo à saúde representado pelo metal arsênio, não foi possível executar as análises da presença e da quantificação deste elemento durante o desenvolvimento deste trabalho, devidos às particularidades na cessão das análises realizadas no laboratório.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O minério de ferro é encontrado no ambiente na forma de óxidos minerais como a hematita (Fe_2O_3), a magnetita (Fe_3O_4) ou a goethita (α-FeOOH) e em menores proporções na limonita ($FeO(OH).nH_2O$) (Caxito; Dias, 2018). No Brasil, os maiores depósitos onde esse minério é encontrado são as chamadas Formações Ferríferas Bandadas (FFB), conhecidas também como itabirito (Bezerra, 2017; Caxito; Dias, 2018). O município de Mariana se encontra em uma das principais regiões produtoras de minério de ferro no Brasil: o Quadrilátero Ferrífero, que inclui mais de 10 municípios (Bezerra, 2017; UFOP, 2018).

O processo de beneficiamento do minério de ferro tem o objetivo de transformar a forma bruta do metal em uma condição adequada para ser usada na indústria e, de forma geral, consiste em britagem, lavagem e peneiramento, gerando produtos como: ferro granulado, hematitinha, *sínter-feed* e lama de lavagem (Bezerra, 2017, Mulholland *et al.*, 2022). Os rejeitos produzidos nessas etapas estão na forma de polpa ou lama e eram descartados em barragens de contenção que poderiam incluir aquelas à montante, como a de Fundão, porém, com a aplicação da Lei nº14.066 de setembro de 2020, essa possibilidade passou a ser proibida e as barragens desse estilo deveriam ser descaracterizadas (Brasil, 2020).

A composição do rejeito proveniente do beneficiamento de ferro pode incluir óxidos de: silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), cálcio (CaO), ferro, manganês, enxofre, fosfatos (PO_4^{-3}) e algumas composições de metais ecotóxicos incluindo arsênio, cobalto, cobre, chumbo, níquel e zinco (Silva, 2012).

Silva et al. (2018), com o intuito de estimar a distribuição e mobilidade de traços de As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn e determinar as concentrações em águas, realizaram coletas de lama, água e solo entre abril e novembro de 2015 e abril de 2016 em pontos ao longo de toda a extensão do Rio do Carmo, Minas Gerais, observaram a presença dos metais: cádmio, cobre, níquel, cobalto, cromo, chumbo e zinco, antes e depois da tragédia. Contudo, relataram que após o rompimento da barragem as concentrações desses elementos tornaram-se maiores que as registradas anteriormente para os mesmos pontos de coleta. Também destacaram a elevação das concentrações de ferro e manganês no solo, principais produtos liberados do processo de beneficiamento da mineração de ferro.

Segura *et al.* (2016) em coletas nos corpos d'água da área de Bento Rodrigues realizadas seis dias após o rompimento da barragem encontraram valores de manganês (135 ± 254 µg L-1) e ferro (1166 ± 2583 µg L-1), que superaram o permitido pela Resolução CONAMA 430/2011 que estabelece o valor máximo de 15,000 µg L-1 para ferro e 1000 µg L-1 para manganês. Os autores acrescentam que os elementos bário, estrôncio, ferro, manganês e alumínio encontrados na lama possuem maior capacidade de mobilização, ou seja, têm maior capacidade de deslocarem-se da lama para o ambiente, caso o meio contenha cálcio ou outra substância alcalina, que facilite a interação química e a transferência desses elementos.

Davila *et al.* (2020) realizaram estudos de material coletado dentro da barragem de Fundão, de áreas não afetadas e afetadas pela lama em agosto de 2017, ao longo do trecho entre Bento Rodrigues e a Usina Hidrelétrica de Candonga. Eles apontam que manganês, bário, cromo e cobre, elementos encontrados em pontos de amostragem, apresentam elevados riscos de mobilização da lama para o ambiente. Destacam também a presença do arsênio, cujo maior valor (48,2 mg kg^{-1}) foi encontrado em um dos pontos de amostragem impactados por rejeito do Rio do Carmo (P26), representando riscos para populações com residência permanente nas áreas afetadas. O arsênio é associado ao risco de vários tipos de cânceres como pele, pulmão e fígado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Com base nos objetivos apresentados associados aos procedimentos utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, a mesma caracteriza-se como descritivo-exploratória, de modo que houve a definição do local de estudo, a realização de coletas e preparação de amostras de solos, análise e interpretação sobre as informações obtidas.

A pesquisa descritiva tem por objetivo a descrição de fatos ou fenômenos da realidade através de observação, registro, análise e correlação fatos (variáveis) sem manipulá-los. A pesquisa exploratória demanda ações como familiarização do pesquisador com o problema de pesquisa, levantamento bibliográfico, utilização de referências que estimulem a compreensão como um estudo de caso, por exemplo (COSTA, 2018; MATTOS, 2016).”

3.1 Local de estudo

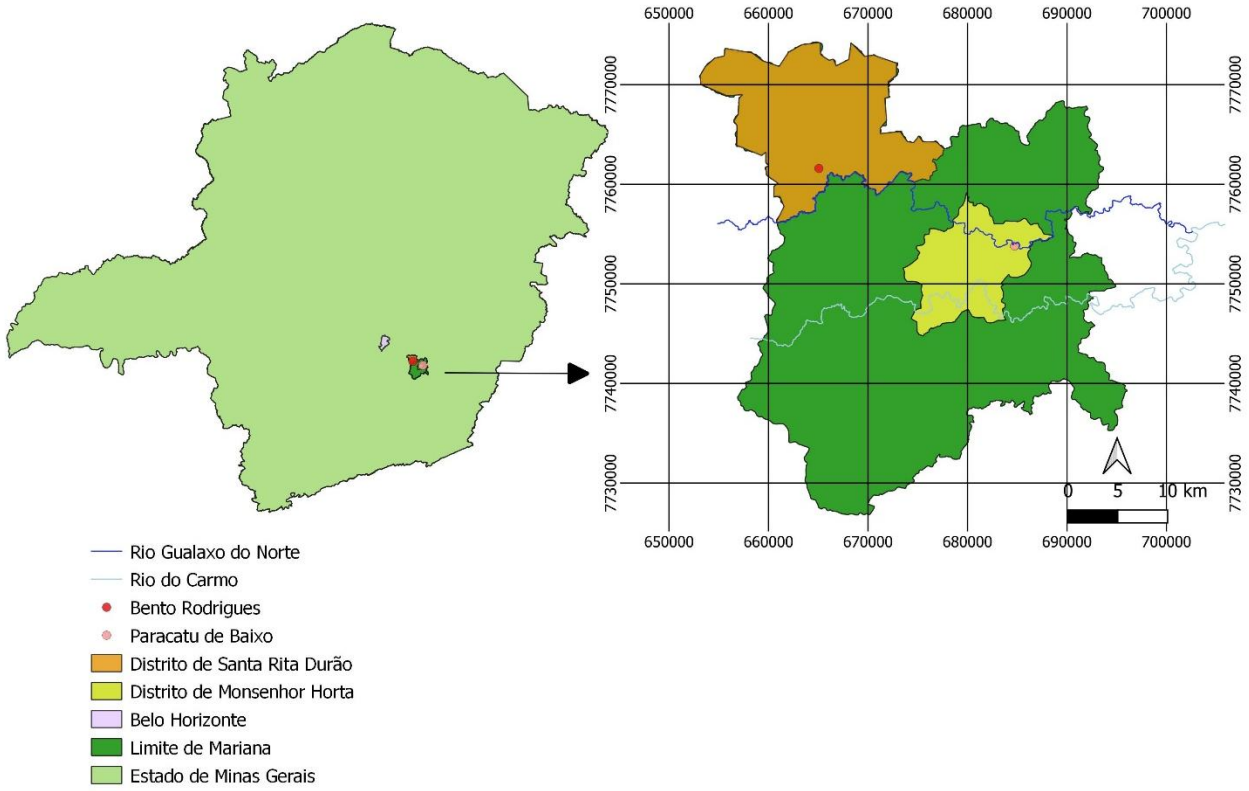
As coletas foram realizadas no subdistrito de Paracatu de Baixo, localidade pertencente ao distrito de Monsenhor Horta, que integra o município de Mariana-MG (Figura 1). O território situa-se na Bacia do Rio Doce e é banhado pelo Rio do Carmo que possui dois afluentes: Gualaxo do Sul e Gualaxo do Norte, este último atravessa a localidade de Paracatu de Baixo. O subdistrito está situado a aproximadamente 34 km da sede e a aproximadamente 70 km do subdistrito de Bento Rodrigues.

As áreas de amostragem incluíram a parte central da localidade, que foi impactada pelo rejeito e abrigava muitas residências, a Capela de Santo Antônio, quadra poliesportiva, e a Escola Municipal de Paracatu de Baixo. Atualmente esta região é empregada como área de pastagem para gado.

A principal estrada que passa pela localidade, margeia parte do curso do rio Gualaxo do Norte, quando se deixa Paracatu de Baixo com destino a Águas Claras, nesta área também foi coletada amostras de solo.

Também foram realizadas coletas na parte alta da localidade não afetada pela lama de rejeitos, onde se encontram alguns residentes, um campinho de futebol simples, o cemitério e áreas de vegetação rasteira

Figura 1. Mapa da localização da cidade de Mariana, os limites do distrito de Monsenhor Horta e a localidade de Paracatu de Baixo.



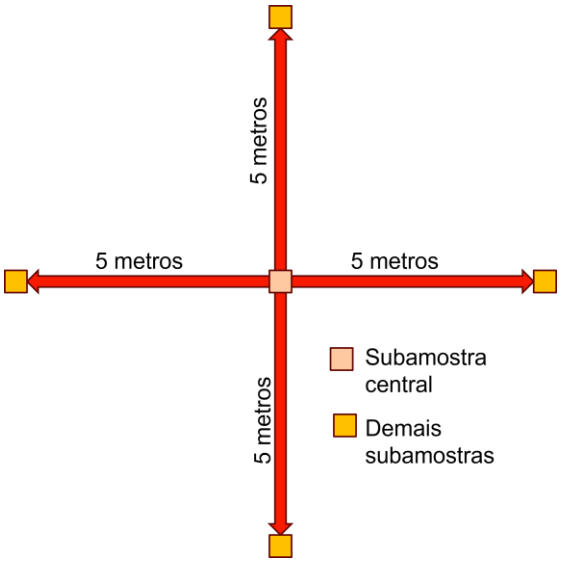
Fonte: Elaborado pela autora com base nos shapefiles dos limites das unidades federativas e municipais originários do IBGE (2022) e limite dos distritos OSM Place Search. As fontes das bases hidrográficas são da ANA (2017), 2024.

3.2 Coleta das amostras de solo

No dia 30 de setembro de 2023 das 10:40 às 13:40 foram realizadas seis amostragens de solo, cada uma composta por cinco subamostras. Quatro coletas foram realizadas nas áreas onde houve a passagem de lama e duas foram na parte alta da localidade, onde não houve contato com o material de rejeito da barragem.

O método de coleta foi baseado nos procedimentos citados por Abrahão e Marques (2013) e Serrat *et al.* (2002). Nas áreas de amostragens delimitou-se um ponto central a partir do qual foram medidos cinco metros no sentido das quatro posições cardeais (norte, sul, leste e oeste) para a formação de mais 4 pontos de amostragem, conforme apresentado na Figura 2. Cada um desses cinco pontos foi considerado como subamostra de uma amostra.

Figura 2. Representação do processo de composição de uma amostra de solo.



Fonte: Autora, 2024.

Em cada um dos pontos amostrais foram medidos 20 cm de profundidade com o auxílio de trena. Os furos foram feitos usando-se uma cavadeira articulada e as subamostras foram coletadas por meio de pá. Cada subamostra foi pesada em uma balança digital com capacidade de 10kg e armazenada em sacos plásticos individuais, identificados por meio da área coletada e subamostra. Nesta etapa foram coletados aproximadamente 235 g de solo de cada ponto.

Após a realização da coleta de uma amostra foi realizada a limpeza da escavadeira articulada e da pá, usando escova de cerdas de nylon.

O Quadro 1 apresenta a relação entre as coletas realizadas, seus respectivos dados de geoposicionamento e a descrição de referência das áreas amostradas.

Quadro 1. Relação entre a identificação das amostras, georreferenciamento e referências.

Número da amostra	Referência do ponto de coleta	Área impactada por rejeito?	Georreferenciamento
1	Estrada próxima ao Rio Gualaxo do Norte (área para pastagem)	Sim	20º18’25.63”S 43º13’27.71”O
2	Campinho de futebol	Não	20º18’26.77”S 43º13’52.33”O
3	Campo de vegetação ao lado do campo de futebol	Não	20º18’26.56”S 43º13’54.04”O
4	Lateral da Capela (área para pastagem)	Sim	20º18’15.09”S 43º13’49.50”O
5	Entrada da Escola	Sim	20º18’17.37”S 43º13’49.23”O
6	Atrás da quadra poliesportiva (área de pastagem)	Sim	20º18’16.68”S 43º13’46.88”O

Fonte: Autora, 2024.

A Figura 3 apresenta uma imagem de satélite obtida por meio do software Google Earth na qual é possível observar a distribuição dos pontos de amostragem conforme georreferenciamentos apresentados no Quadro 1. Os pontos de coleta impactados pela lama de rejeitos são representados por ícones vermelhos, enquanto os pontos não impactados são representados por ícones verdes. Em amarelo estão plotados cinco pontos de referência da localidade sendo um deles o Rio Gualaxo do Norte e os demais distribuídos entre:

- Localizados na parte baixa: Capela de Santo Antônio, Quadra poliesportiva e Escola Fundamental;
- Localizado na parte alta: Cemitério.

Figura 3. Distribuição dos pontos de amostragem na localidade.

Fonte: Google Earth, 2024. Imagens correspondem a data de 16/08/2024 a uma altitude de 1,37km.
Pontos 1,2,3,4,5, e 6 correspondem ao número da amostra de cada área coletada, conforme detalhado no Quadro 1.

3.3 Preparo de amostras para análises

O método de preparo das amostras foi adaptado de Abrahão e Marques (2013) e da metodologia descrita por Silva *et al.* (2021). Para cada uma das seis amostras coletadas foi realizada a homogeneização de suas respectivas subamostras constituintes. Para isso, pesou-se 20g de cada subamostra e o conteúdo foi depositado em um recipiente plástico com tampa e homogeneizado em movimentos vigorosos. Dessa forma, uma amostra constituiu-se de 100 g dos quais 50 g foram enviados para análise em recipientes de plástico opaco com tampa de rosca.

Após a realização da homogeneização de uma amostra, recipiente e tampa foram higienizados com água corrente e sabão neutro e secados com papel toalha.

3.4 Metodologia das análises

Foram realizadas análises de quantificação dos metais: cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn).

As análises foram conduzidas pela equipe do Laboratório de Química Instrumental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (LQI-ICA-UFMG), no campus regional de Montes Claros, MG, em novembro de 2023.

Segundo Relatório Técnico disponibilizado pelo LQI-ICA-UFMG, o preparo das amostras seguiu a metodologia baseada em Flame Atomic Absorption Spectrometry Method Development ePrimer (Agilent, 2021). O preparo correu em recipiente *Erlenmeyer* sendo adicionadas 0,5 g de amostra e 10 mL de HNO_3 P.A 65% (v/v) e aqueceu-se o sistema por 30 min em chapa de aquecimento a 150 °C. Na sequência adicionou-se 2 mL de H_2O_2 P.A 35% (v/v) e novamente o sistema foi aquecido na mesma temperatura por 10 min. Os extratos obtidos foram filtrados, recuperados em volume final de 25,0 mL com água ultrapura e armazenados até o momento das análises.

As quantificações dos metais: Pb, Cu, Cr, Ni Fe, Mn e Zn foram realizadas em Espectrofotômetro de Absorção Atômica da Varian (AAS 240 FS) no modo chamas.

Para a quantificação dos metais, foram elaboradas curvas analíticas e os Limites de Quantificação (LQ) são mostrados na Tabela 1:

Tabela 1. Metais analisados em laboratório e seus respectivos limites quantificáveis (LQ).

Metal	LQ (mg L-1)
Zn	0,075
Pb	0,500
Cu	0,100
Fe	1,250
Mn	0,500
Ni	0,250
Cr	0,625

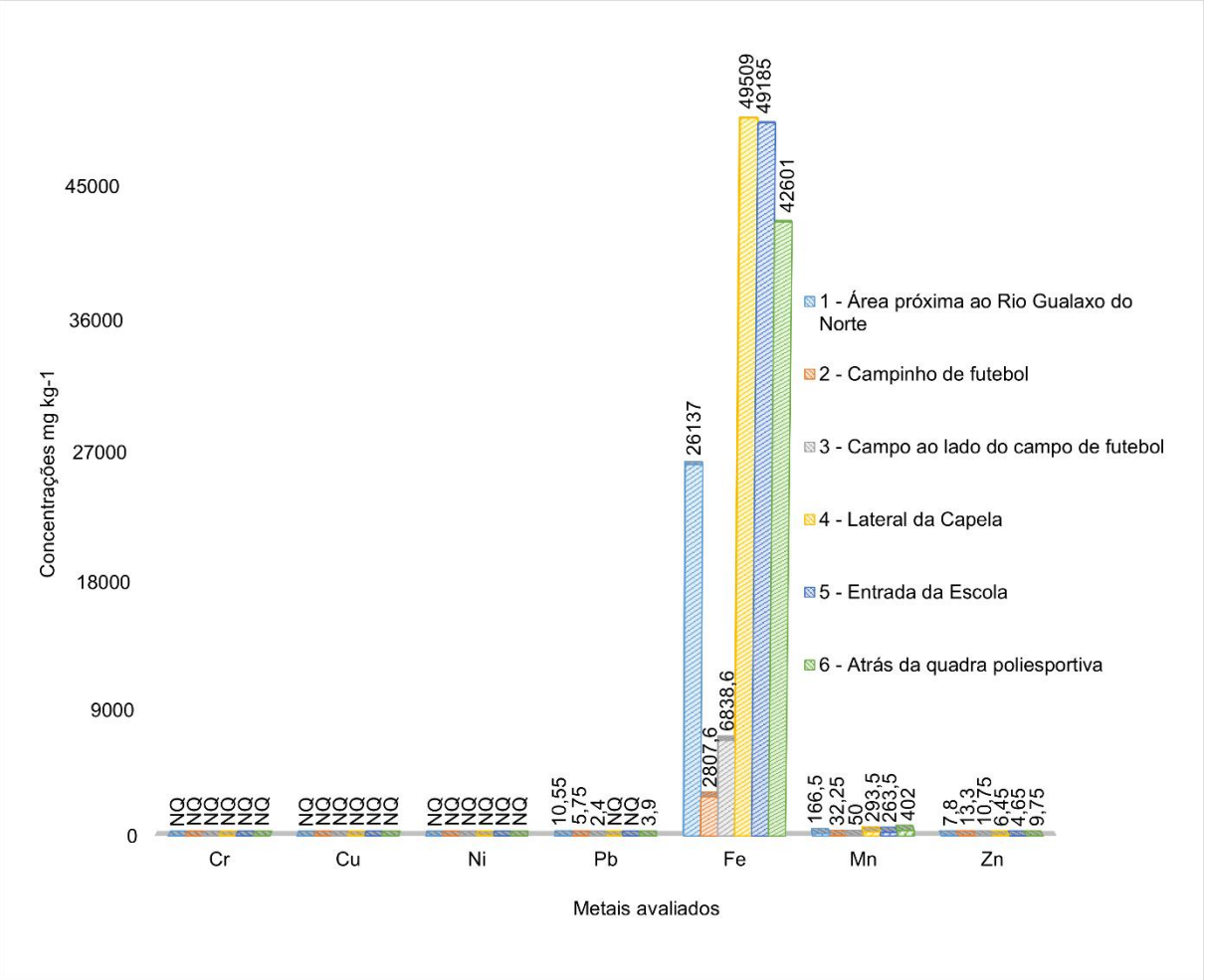
Fonte: Laboratório de Química Instrumental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (LQI-ICA-UFMG), 2024.

A referência empregada para analisar se os valores encontrados para os metais no solo implicavam algum risco à saúde humana foi a Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011, que estabelece os Valores de Referência de Qualidade para os solos de Minas Gerais. O comparativo levou em consideração os valores apresentados na coluna de Referência de Qualidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As concentrações dos metais analisados em cada um dos pontos de coleta são apresentadas na Figura 4:

Figura 4. Relação entre as concentrações dos metais analisados para cada um dos pontos amostrados.



NQ: Não Quantificado.
Fonte: Autora, 2024.

Conforme apresentado pela Figura 4, as concentrações de ferro são significativamente superiores às concentrações dos demais metais coletados e apresentam-se elevadas em todos os locais amostrados. Na sequência, porém com considerável diferença quantitativa em relação ao ferro, o manganês foi o metal que apresentou as maiores concentrações, em seguida o zinco e finalmente o chumbo. Cromo, cobre e níquel não foram quantificados em nenhuma das 6 áreas de coleta.

As concentrações de manganês foram menores nos pontos não alcançados pela lama de rejeitos, apresentando valores de 32,25 mg kg^{-1} e 50 mg kg^{-1} para os

pontos 2 e 3, respectivamente, enquanto nas áreas contaminadas representadas pelos pontos 1, 4, 5 e 6 os valores foram significativamente mais elevados: 166,5 mg kg-1; 293,5 mg kg-1; 263,5 mg kg-1 e 402 mg kg-1, respectivamente. Valores de referência para manganês e ferro não ocorrem na Resolução COPAM nº 166/2011, desta maneira não foi possível realizar uma análise comparativa entre possíveis irregularidades que poderiam existir entre os valores obtidos na análise e aqueles considerados comuns para os solos do estado de Minas Gerais.

Segundo Caxito; Dias (2018), o manganês não existe na natureza de maneira isolada, ele é encontrado em associação a óxidos, silicatos e hidróxidos. Ocorre na província do Quadrilátero Ferrífero, sendo o Morro da Mina (Conselheiro Lafaiete) a principal área de exploração deste metal em Minas Gerais. Ele torna-se prejudicial à saúde em situações nas quais a exposição aos processos nos quais é empregado é contínua e desprovida de proteção: indústria química, fabricação de ligas metálicas, por exemplo. A principal via de contaminação nesses casos é por meio da inalação das partículas, resultando em inflamação dos pulmões, fadiga, e, nos casos de maior concentração de partículas, danos neurológicos. No meio aquático, a bioacumulação e biomagnificação desse metal não parece significativamente prejudicial (CETESB, 2024).

As concentrações de ferro, presentes em todas as amostragens, apresentaram os maiores valores dentre todos os metais analisados. Assim como o manganês, as menores concentrações também foram localizadas nos pontos 2 e 3 com os respectivos valores: 2807,6 mg kg^{-1} e 6838,6 mg kg^{-1}. Para os pontos impactados pelo rejeito a ordem decrescente dos resultados para este metal é a seguinte: 49509 mg kg^{-1} para o ponto 4 (Lateral da Capela), em seguida 49185 mg kg^{-1} para o ponto 5 (Entrada da Escola), 42601mg kg^{-1} para o ponto 6 (Atrás da quadra poliesportiva) e por fim 26137 mg kg^{-1} para o ponto 1 (Área próxima ao Rio Gualaxo do Norte)

Observa-se, portanto, uma relação entre maiores valores de ferro e manganês nas áreas afetadas pelo rejeito de Fundão quando comparada com os resultados encontrados para os pontos de coleta não afetados pela lama para este estudo. Segura *et al.* (2016); Silva *et al.* (2018) e Davila *et al.* (2020) analisaram o rejeito da barragem de Fundão e detectaram que os principais elementos presentes eram o ferro e o manganês, embora houvesse traços de chumbo, arsênio, zinco, cobre, níquel e cobalto. Sobre este contexto, a passagem da lama pelos pontos 1, 4, 5 e 6 e sua

deposição poderia ter contribuído para o aumento das concentrações de ambos os elementos nessas áreas.

Na natureza o ferro geralmente é encontrado associado a óxidos e hidróxidos, sulfetos, carbonatos e silicatos na forma de hematita e magnetita. A província do Quadrilátero Ferrífero, e em especial, territórios pertencentes à Mariana, como a Fazenda Fábrica Nova e Morro da água Quente, são áreas que concentram ferro em condição de exploração (Caxito; Dias, 2018), nesse contexto, os solos do território mineiro que estão compreendidos dentro desta província apresentariam altas concentrações de ferro e manganês.

Os menores valores encontrados para ambos os metais no ponto 1 podem ser vinculados ao curso do Rio Gualaxo do Norte. Conforme Ibama (2015), após atingir a barragem de Santarém, a lama da barragem forçou caminho pelo Rio Gualaxo do Norte antes de desaguar no Rio do Carmo, nesse momento, o encontro com a água aumentou o volume da massa de rejeitos e extravasou o conteúdo para além das margens. Uma vez que o ponto 1 foi coletado na estrada que está significativamente próxima às margens do rio, pode-se entender que, durante o período do extravasamento, parte do conteúdo do rejeito foi depositado na área, e, à medida que o fluxo do rio retornava ao normal, houve também o carreamento de parte desse material resultado na presença reduzida de manganês e ferro nessa área quando comparada aos pontos 4, 5 e 6, porém mais elevada quando comparada aos pontos não alcançados pela lama.

A Tabela 2 apresenta as comparações entre os valores quantificados dos metais avaliados em cada um dos seis pontos de coleta e os valores de referência propostos, de acordo com a Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011, para os solos de Minas Gerais.

Tabela 2. Valores de Referência e valores quantificados dos metais nas amostragens.

Pontos de coleta	Concentração dos elementos em mg kg^{-1}						
	Cr	**Cu**	**Ni**	**Pb**	**Fe²**	**Mn²**	**Zn**
COPAM 166/2011 ¹	**75**	**49**	**21,5**	**19,5**	**--**	**--**	**46,5**
Área próxima ao Rio Gualaxo do Norte[i] (1)	NQ	NQ	NQ	10,55	26137	166,5	7,800
Campinho de Futebol[n] (2)	NQ	NQ	NQ	5,750	2807,6	32,25	13,30
Campo ao lado do campo de futebol[n] (3)	NQ	NQ	NQ	2,400	6838,6	50	10,75
Lateral da Capela[i] (4)	NQ	NQ	NQ	NQ	49509	293,5	6,450
Entrada da Escola[i] (5)	NQ	NQ	NQ	NQ	49185	263,5	4,650
Atrás da quadra poliesportiva[i] (6)	NQ	NQ	NQ	3,900	42601	402	9,750

1 – Os valores apresentados são relativos aos Valores de Referência de Qualidade (VRQs).
2 – A Deliberação não fornece VRQ para ferro e manganês.
n- Área não impactada por rejeito de mineração.
i – Área impactada por rejeito de mineração
NQ – Não quantificável.
Fontes: Laboratório de Química Instrumental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2024 (LQI-ICA-UFMG) e Deliberação Normativa COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011.

Consonante apresentado pela Figura 4, não foram encontrados valores quantificáveis para os metais cromo, cobre e níquel em nenhum dos pontos de amostragem. De acordo com a Tabela 2, a ausência de valores acima dos VRQs para esses elementos nas áreas analisadas é considerada positiva para a proteção à saúde, uma vez que a ingestão de alimentos e água contaminados ou a inalação de poeira contendo partículas desses metais é potencialmente prejudicial à saúde, podendo desencadear processos de dermatites e problemas renais, hepáticos, estomacais, além de alterações sanguíneas (CETESB, 2024).

Por outro lado, níquel e cobre são considerados micronutrientes para o desenvolvimento dos vegetais, participando como cofator de enzimas envolvidas no metabolismo da fixação de nitrogênio e nas reações redox da fotossíntese (Taiz, 2021). Nesse contexto, os níveis mínimos desses elementos devem estar presentes nas áreas impactadas, caso propostas de fitorremediação venham as ser empregadas nesses locais.

Os valores quantificados para chumbo apresentaram variações entre as áreas contaminadas pela lama: apenas nos pontos 4 e 5 não foi detectado o elemento (Figura 4). As demais áreas de coleta, incluindo os pontos 2 e 3 (5,750 mg kg^{-1} e 2,400 mg kg^{-1} respectivamente) que não foram contaminados, registraram presença do metal. A maior concentração (10,55 mg kg^{-1}) foi encontrada próximo à curva do rio Gualaxo do Norte. Este valor foi o que mais se aproximou de um VRQ dentre todos os metais analisados: o VRQ preconizado para chumbo é de 19,5 mg kg^{-1} (Tabela 2).

Traços de chumbo foram detectados nos rejeitos do beneficiamento do minério de ferro em Fundão (Silva *et al.*, 2018; Queiroz *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2021). Na forma natural ele geralmente encontra-se associado a outros minérios, especialmente os que contêm zinco sendo predominantemente encontrado em solos argilosos e metamórficos resultantes de intemperismo, acumulando-se predominantemente em áreas ácidas, chegando até a 40 mg kg^{-1} de concentração natural (Souza *et al.,* 2015*)*. Uma vez que o território de Mariana está inserido no Quadrilátero Ferrífero contendo rochas metamórficas pré-cambrianas (Rios *et al.,* 2021), a presença desse elemento pode ter origem natural. Porém esse elemento também pode ser liberado na atmosfera, resultado de atividade de fundição em siderúrgicas. As partículas liberadas por esses empreendimentos se concentram especialmente nas camadas superficiais do solo, assim, as principais formas de contaminação por este metal são pela inalação e pela via oral (CETESB, 2024). Níveis de 5 µg/dL de chumbo no sangue já são suficientes para afetar o desenvolvimento neurológico em crianças, dificultando a aprendizagem e o desenvolvimento social, já em adultos, a exposição prolongada é responsável pelo aumento da pressão sanguínea, danos neurológicos e renais, além de poder causar abortos e nascimentos prematuros em mulheres grávidas (CETESB, 2024).

A concentração de zinco, se comportou de maneira inversa: os maiores valores foram observados nos terrenos não alcançados pela lama. Para os pontos 2 e 3, os

valores correspondem a 13,30 mg kg^{-1}e 10,75 mg kg^{-1}, respectivamente. Os pontos afetados pelos rejeitos apresentaram resultados menores, embora a diferença não seja significativa entre eles: 7,80 mg kg^{-1}; 6, 450 mg kg^{-1} e 9,750 mg kg^{-1}nos pontos 1, 4 e 6 respectivamente, o menor valor foi observado no ponto 5 (4,650 mg kg^{-1}).

Valeriano *et al.* (2018) explicam que os principais depósitos de zinco no estado de Minas Gerais ocorrem em rochas dolomíticas aglomeradas no noroeste mineiro na chamada Faixa Brasília meridional. Quando comparada a esta área, a província do Quadrilátero Ferrífero possui menores expressões de zinco e chumbo, geralmente restritas às rochas carbonáticas dos estratos inferiores do Grupo Bambuí, em Sete Lagoas. As ocorrências naturais estão relacionadas ao processo de erosão das rochas carbonáticas que ocorrem nessa província. Para a população que não está exposta aos processos industriais envolvendo zinco, a principal via de contaminação pelo metal é por consumo exagerado de suplementos que contêm esse elemento, alimentos e água contaminados. O Anexo 11 da Portaria GM/MS nº 888 de 4 de maio de 2021, estabelece concentrações de até 5 mg L^{-1} deste elemento na água potável. O consumo contínuo de água com concentrações acima do estabelecido por esta legislação pode ocasionar cólicas estomacais, vômitos e náuseas além de problemas no pâncreas e anemia (CETESB, 2024).

Maiores concentrações de zinco em áreas não afetadas também foram observadas por Silva *et al.* (2021) com variações de concentrações de 46,8 ± 36,8 mg kg^{-1}, enquanto em áreas impactadas as concentrações variavam entre 17,2 ± 9,3 mg kg^{-1}.

Todos os valores encontrados para o zinco estiveram consideravelmente inferiores ao VRQ estabelecido pela legislação para o metal (46,5 mg kg^{-1}).

5 CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se que após 8 anos de rompimento da barragem de Fundão não foram encontrados os metais cromo, cobre e níquel nas áreas estudadas. Chumbo e zinco foram quantificados, contudo, os resultados encontrados para ambos ficaram abaixo dos VRQ da Deliberação COPAM nº 166/2011 para o estado de Minas Gerais. As concentrações de ferro e manganês apresentaram valores significativos, estando presentes em todas as áreas amostradas, contudo, os maiores valores dentre todos os metais avaliados foram os de ferro, especialmente nas áreas impactadas pelo rejeito de minério de ferro. Para o manganês e o ferro, a legislação empregada para o estudo não fornece valores de referência para concentrações mínimas no solo.

Destaca-se que, para este estudo, analisou-se apenas as concentrações dos metais cromo, cobre, níquel, chumbo, zinco, ferro e manganês exclusivamente no solo nas áreas amostradas e não houve quantificação da presença dos metais na água. Deve-se observar que o material presente no solo tem alta possibilidade de alcançar os cursos d'água do território por meio de eventos de lixiviação e infiltração, levando a alterações na qualidade da água que podem violar as concentrações recomendadas pelas legislações ambientais e de saúde. O revolvimento das partículas depositadas no leito do rio também pode contribuir para alterações nos valores das substâncias estudadas. Recomenda-se a realização de estudos posteriores para prosseguir com o monitoramento das concentrações desses elementos e verificar possíveis flutuações sazonais ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, Walter Antônio Pereira; MARQUES, João José (org.). **Manual de coleta de solos para valores de referência de qualidade no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambinte, 2013. 28 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/348575282_Manual_de_Coleta_de_Solos_para_Valores_de_Referencia_de_Qualidade_no_Estado_de_Minas_Gerais. Acesso em: 30 maio 2023.

AGILENT. Flame Atomic Absorption Spectrometry Method Development ePrimer, January 2021 Edition. Disponível em: https://www.agilent.com/cs/library/brochures/AA-5991-8145EN-methods-primer.pdf. Acesso em 18 dez. 2024.

ALMEIDA, Humberto Araújo; TORRE, Felipe Della; GARCIA, Queila Souza. Cultivating vegetables in tailings from the Fundão dam collapse: metal accumulation and risks to food safety. **Environmental Monitoring And Assessment**, [S.L.], v. 194, n. 6, p. 1-8, 9 maio 2022. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s10661-022-10060-5. Disponível em: https://www-periodicos-capes-gov-br.ez27.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=&id=W4229369715 Acesso em: 03 jul. 2024.

BEZERRA, Carolina Goulart. **Caracterização do rejeito de minério de ferro (iot) e avaliação da sua influência no comportamento físico-químico e mecânico de pastas de cimento**. 2017. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/9756. Acesso em: 30 mai. 2023.

BRASIL. Lei nº 14066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). **Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Brasília, DF, 30 set. 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em: 03 jul. 2024.

CAXITO, Fabrício; DIAS, Tatiana Gonçalves. Ferro e Manganês. In: SOARES, Antônio Carlos Pedrosa *et al* (org.). Recursos Minerais de Minas Gerais**: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica e meio ambiente e mineração em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Codemge, 2018. (Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE)). Disponível em: http://recursomineralmg.codemge.com.br/. Acesso em: 04 jul. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo **Ficha de informação toxicológica - Chumbo e seus compostos**. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. Disponível em:

https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/servicos/informacoes-toxicologicas/. Acesso em: 12 ago. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Ficha de informação toxicológica - Cobre e seus compostos**. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/servicos/informacoes-toxicologicas/. Acesso em: 18 jun. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Ficha de informação toxicológica - Crômio e seus compostos**. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/servicos/informacoes-toxicologicas/. Acesso em: 18 jun. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo **Ficha de informação toxicológica – Manganês e seus compostos**. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/servicos/informacoes-toxicologicas/. Acesso em: 12 ago. 2024

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo **Ficha de informação toxicológica - Níquel e seus compostos**. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/servicos/informacoes-toxicologicas/. Acesso em: 18 jun. 2024.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo **Ficha de informação toxicológica - Zinco e seus compostos**. Divisão de Toxicologia Humana e Saúde Ambiental. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/servicos/informacoes-toxicologicas/. Acesso em: 12 ago. 2024

COSTA, C. A. **Metodologia de Pesquisa e Comunicação Científica**. Especialização em Recursos Hídricos e Ambientais. Montes Claros: Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais, 2018.

COPAM (MG). Deliberação Normativa nº 166, de 29 de junho de 2011. Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM CERH nº 2 de 6 de setembro de 2010, estabelecendo os Valores de Referência de Qualidade dos Solos. **Deliberação Normativa**. MG, CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Disponível em: https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414. Acesso em: 10 ago. 2024.

DAVILA, Rafael Biscotto *et al*. Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 709, p. 136151, mar. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136151. Disponível em: https://www-periodicos-capes-gov-br.ez27.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=&id=W2995384525. Acesso em: 30 mai. 2023.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Informe de Paracatu - maio de 2023**. 2023. Disponível em: https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2023/12/E51_News_Informe-de-Paracatu-.pdf. Acesso em: 01 jul. 2024.

FUNDAÇÃO RENOVA. **8 - Reconstrução de Vilas**. 2016. Disponível em: https://www.fundacaorenova.org/programa/reconstrucao-de-vilas/. Acesso em: 03 jul. 2024.

IBAMA. Ministério do Meio Ambiente. **Laudo Técnico Preliminar**: impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Brasília, 2015. 38 p. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_Ibama.pdf. Acesso em: 01 jul. 2024.

LQI-ICA-UFMG. Laboratório de Química Instrumental do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais. Relatório Técnico, 2023.

MATTOS, Sandra. **Como elaborar a Metodologia de Pesquisa**. Rio de Janeiro: Universidade Federal Fluminense, 2016.

MPMG. Ministério Público de Minas Gerais. **Rompimento da barragem de Fundão, em Mariana: resultados e desafios cinco anos após o desastre**. 2020. Disponível em: https://www.mpmg.mp.br/portal/menu/comunicacao/noticias/rompimento-da-barragem-de-fundao-em-mariana-resultados-e-desafios-cinco-anos-apos-o-desastre.shtml. Acesso em: 03 jul. 2024.

MULHOLLAND, Daniel Santos *et al*. New insights into metal(loid) dynamics in the Doce River estuary (Brazil) after a massive iron ore-processing tailing dam collapse. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 29, n. 28, p. 43072-43088, 29 jan. 2022. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-18101-1. Disponível em: https://www-periodicos-capes-gov-br.ez27.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=&id=W4210811020. Acesso em: 30 mai. 2023.

PMM. Prefeitura Municipal de Mariana. **Distritos de Mariana**. 2024. Disponível em: https://www.mariana.mg.gov.br/todos-distritos. Acesso em: 03 jul. 2024.

RIOS, Marcos Luciano *et al*.. Os Usos e Coberturas da Terra Afetados pelo Rompimento da Barragem de Fundão, Mariana – MG. **Caderno de Geografia**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 53, 8 fev. 2021. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2021v31nesp1p53. Disponível em: google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjtis--nISIAxUCqpUCHUacDFsQFnoECBQQAw&url=https%3A%2F%2Fperiodicos.pucminas.br%2Findex.php%2Fgeografia%2Farticle%2Fdownload%2F25536%2F17771%2F%23%3A~%3Atext%3DOs%2520resultados%2520do%2520mapeamento%2520indicam%2Crespectivamente%252C%2520foram%2520suprimidos%2520pelo%2520rompimento.&usg=AOvVaw3B-RVcIHwbV6LWoJ1fwmSk&opi=89978449. Acesso em: 30 mai. 2023.

SEGURA, Fabiana Roberta *et al*. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). **Environmental Pollution**, [S.L.], v. 218, p. 813-825, nov. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005. Disponível em: https://www-periodicos-capes-gov-br.ez27.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=&id=W2510508248. Acesso em: 30 mai. 2023.

SERRA, Cristina. **Tragédia em Mariana**: a história do maior desastre ambiental do brasil. Rio de Janeiro: Record, 2018. 461 p.

SERRAT, Beatriz Monte *et al*. **Amostragem do solo**: perguntas e respostas. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2002. 17 p. Disponível em: http://www.soloplan.agrarias.ufpr.br/amostragemsolo.pdf. Acesso em: 30 maio 2023.

SILVA, Aline Oliveira *et al*. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. **Environmental Monitoring And Assessment**, [S.L.], v. 193, n. 8, p. 1-18, 3 jul. 2021. Springer Science and Business Media LLC. http://dx.doi.org/10.1007/s10661-021-09234-4. https://www-periodicos-capes-gov-br.ez27.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=&id=W3173144507. Acesso em: 30 mai. 2023.

SILVA**,** Ana Paula Moreira. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas**. Brasília: Brasília, 2012. 46 p. (Relatório de Pesquisa). Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7702. Acesso em: 30 mai. 2023.

SILVA, Danilo *et al*. Trace Elements In River Waters And Sediments Before And After A Mining Dam Breach (Bento Rodrigues, Brazil). **Química Nova**, [S.L.], v. 41, p. 857-866, 26 jun. 2018. Sociedade Brasileira de Quimica (SBQ). http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170252. Disponível em: https://www-periodicos-capes-gov-br.ez27.periodicos.capes.gov.br/index.php/acervo/buscador.html?task=detalhes&source=&id=W2809956472. Acesso em: 30 mai. 2023.

SOUZA, Valmir de; KONRAD, Odorico; GONÇALVES JR, Affonso Celso; SOUSA, Ricardo Felipe Braga de. CONTAMINAÇÃO POR CHUMBO, RISCOS, LIMITES LEGAIS E ALTERNATIVAS DE REMEDIAÇÃO. Revista Destaques Acadêmicos, [S. l.], v. 7, n. 4, 2015. Disponível em: https://www.univates.br/revistas/index.php/destaques/article/view/504. Acesso em: 24 jun. 2024.

TAIZ, Lincoln *et al*. **Nutrição mineral**. In: Fisiologia vegetal. Porto Alegre: Artmed, 2021. Cap. 4. p. 83-108. Disponível em: https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786581335113/. Acesso em: 21 jun. 2024.

UFOP. Universidade Federal de Ouro Preto. **Quadrilátero Ferrífero**. 2018. Disponível em: https://qfe2050.ufop.br/news/novidades. Acesso em: 03 jul. 2024.

VALERIANO, Claudio de Morisson; DIAS, Paulo Henrique Amorim. CARVALHO, Manuela de Oliveira; HEILBRON, Monica. Zinco e Chumbo. In: SOARES, Antônio Carlos Pedrosa *et al* (org.). **Recursos Minerais de Minas Gerais**: **síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica e meio ambiente e mineração em Minas Gerais**. Belo Horizonte: Codemge, 2018. (Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE)). Disponível em: Zinco e Chumbo.pdf (codemge.com.br) /. Acesso em: 10 ago. 2024