

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**TECNOSSOLOS FORMADOS POR REJEITO DE MINÉRIO: ESTRATÉGIAS DE  
RECUPERAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E QUALIDADE DO SOLO**

**Carolina Tosetto Pimentel**

**2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**TECNOSSOLOS FORMADOS POR REJEITO DE MINÉRIO: ESTRATÉGIAS DE  
RECUPERAÇÃO, CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E QUALIDADE DO SOLO**

**CAROLINA TOSETTO PIMENTEL**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Márcio Rocha Francelino**

*e Co-orientação do Professor*  
**Teógenes Senna de Oliveira**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração Conservação da Natureza.

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2022

P644t Pimentel, Carolina Tosetto, 1985-  
Tecnossolos formados por rejeito de minério:  
estratégias de recuperação, caracterização química e  
qualidade do solo. / Carolina Tosetto Pimentel. -  
Caçapava, 2022.  
74 f.: il.

Orientador: Márcio Rocha Francelino.  
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal Rural do  
Rio de Janeiro, Ciências Ambientais e Florestais,2022.

1. barragem de Fundão. 2. matéria orgânica do solo.  
3. fracionamento físico do solo. I. Francelino, MárcioRocha,  
1966-, orient. II Universidade Federal Rural  
do Rio de Janeiro. Ciências Ambientais e Florestais  
III. Título.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Finance Code 001.”

**UNIVERSIDADE FERERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**CAROLINA TOSETTO PIMENTEL**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração em Conservação da Natureza.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28/02/2022

---

Márcio Rocha Francelino. Prof. Dr. UFV/PPGCAF  
(Orientador)

---

André Thomazini. Prof. Dr. UFJF

---

Bruno Araújo Furtado de Mendonça. Prof. Dr. UFRRJ



---

Emitido em 2022

**TERMO Nº 405/2022 - PPGCAF (12.28.01.00.00.00.27)**

**(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)**

*(Assinado digitalmente em 19/04/2022 05:45 )*  
BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONCA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)  
Matricula: 2145654

*(Assinado digitalmente em 28/04/2022 13:38 )*  
ANDRÉ THOMAZINI  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 114.300.787-58

*(Assinado digitalmente em 28/04/2022 09:38 )*  
MARCIO ROCHA FRANCELINO  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 825.207.127-91

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrrj.br/documentos/> informando seu número:  
**405**, ano: **2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **18/04/2022** e o código de verificação: **da121f01a8**

## RESUMO GERAL

PIMENTEL, Carolina Tosetto. **Tecnossolos formados por rejeito de minério: estratégias de recuperação, caracterização química e qualidade do solo.** 2022. 74 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

No dia 05 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana/MG, quando 43,7 Mm<sup>3</sup> de rejeitos de mineração de ferro foram lançados nos leitos e terraços dos rios a jusante. Quando depositados nos terraços fluviais, se criou condições para formação de Tecnossolos, com características muito particulares, e a necessidade de estudos específicos para essa região a fim de se mitigar os impactos gerados. No primeiro capítulo deste trabalho, é apresentado o histórico envolvendo o rompimento de barragens de rejeitos ao redor do mundo e no Brasil e as intervenções realizadas pela fundação responsável pela recuperação para estabilização dos rejeitos na área impactada pelo rompimento da barragem de Fundão. Se levantou 13 acidentes envolvendo barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil, sendo 10 em Minas Gerais. Constatou-se que cada trecho foi afetado pelo rompimento da barragem de Fundão de uma forma específica e a fundação realizou várias práticas para estabilização dos rejeitos. As ações de recomposição florestal permitiram que áreas degradadas antes do rompimento pudessem ser recuperadas. O segundo capítulo, trata da caracterização química e análise quantitativa das frações da matéria orgânica do solo - MOS em amostras coletadas em dezembro de 2020 e janeiro de 2021 em 14 áreas distribuídas nos terraços dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, cinco anos após o rompimento da barragem. Se identificou que a maioria dessas áreas foi classificada como fracamente ácida, e há uma tendência de incremento de MOS na área afetada. As áreas 12 e 13, que eram reentrância do rio e foram aterradas, se diferenciaram das demais em vários atributos químicos do solo: MOS, Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, e CTCe, entretanto, a cobertura vegetal de ambas são distintas, apresentando principalmente arbustos na 12 e gramíneas esparsas e áreas de solo exposto na 13. No fracionamento físico, se identificou que os teores de matéria orgânica particulada - MOP foram superiores nas áreas em relação a matéria orgânica associada a minerais - MOAM, porém nas duas últimas áreas, 13 e 14, houve a inversão dessa granulometria, o que evidencia que nesses locais ocorreu acúmulo de material mais fino, tanto pela maior distância da barragem, como pelo maior acúmulo de rejeitos. O C, N e C-lábil da fração MOAM foram mais representativos em relação a MOP da MOS e o teores de ambas as frações foram baixos, o que pode ser justificado pelo fato de a área apresentar pouco aporte de matéria orgânica. Áreas com cobertura florestal apresentaram maiores teores de C e N nas frações MOP E MOAM.

**Palavras - chave:** barragem de Fundão, matéria orgânica do solo, fracionamento físico do solo.

## GENERAL ABSTRACT

PIMENTEL, Carolina Tosetto. **Technosols formed by ore tailings: recovery strategies, chemical characterization and soil quality.** 2022. 74 p. Dissertation (Master Science in Environmental and Forest Sciences). Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

On November 5th 2015, the Fundão dam, in the city of Mariana/MG, ruptured, when 43.7 Mm<sup>3</sup> of iron mining tailings were released into the river terraces downstream. When deposited on river terraces, conditions were created for the formation of Technosols, with very particular characteristics, and the need for specific studies for this region in order to mitigate the impacts generated. In the first chapter of this study, the history involving the rupture of tailings dams around the world and in Brazil is presented, as well as the interventions carried out by the foundation responsible for the recovery to stabilize the tailings in the area impacted by the Fundão dam failure. There were 13 accidents involving mining tailings containment dams in Brazil, 10 of which in Minas Gerais. It was found that each stretch was affected by the rupture of the Fundão dam in a specific way and the foundation carried out several practices to stabilize the tailings, where in the areas of forest restoration, the lack of maintenance compromised its efficiency. These recomposition actions allowed areas degraded before the rupture to be recovered. The second chapter deals with the chemical characterization and quantitative analysis of soil organic matter fractions in samples collected in December 2020 and January 2021 in 14 areas distributed on the terraces of the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers, five years after the rupture. It was identified that most of this areas was classified as weakly acidic, and there is a tendency to increase SOM in the affected area, even so this attribute remains deficient in the region. Areas 12 and 13, which were recesses of the river and were filled in, differed from the others in several soil chemical attributes: SOM, Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, and CTCe. However, the vegetation cover of both areas is different, present mainly shrubs at 12 and sparse grasses and areas of exposed soil at 13. In the physical fractionation, it was identified that the MOP contents were higher in the areas in relation to the MOAM, but in areas 13 and 14 there was an inversion of this granulometry, which shows that in these places there was an accumulation of finer material, both due to the longer distance of the dam, as well as the higher accumulation of tailings. The C, N and C-labile of the MOAM fraction were more representative in relation to the MOP of the MOS and the contents of both fractions were low, which can be explained by the fact that the area has little input of organic matter. Areas with forest cover showed higher levels of C and N in the MOP and MOAM fractions.

**Keywords:** Fundão dam, soil organic matter, soil physical fractionation.

## Sumário

RESUMO GERAL .....	6
GENERAL ABSTRACT.....	7
INTRODUÇÃO GERAL .....	10
CAPÍTULO I – IMPACTOS OCASIONADOS POR ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	12
RESUMO .....	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUÇÃO .....	14
2. FALHAS EM BARRAGEM DE REJEITOS .....	14
2.1 Desastres com barragens de contenção ao redor do Mundo.....	15
2.2 Desastres com barragens de contenção de minério no Brasil.....	17
3. A FUNDAÇÃO RENOVA E AS ESTRATÉGIAS PARA RECUPERAÇÃO AMBIENTAL ..	18
3.1 Plano de Recuperação Ambiental Integrado .....	18
3.1.1 Plantio Emergencial .....	18
3.1.2 Recuperação dos Tributários.....	20
3.1.3 Plano de Recuperação de Nascentes e APPs Degradadas.....	211
3.2 Plano de Manejo de Rejeito .....	211
4. OPERAÇÃO WATU .....	222
4.1 Restauração florestal.....	28
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
CAPÍTULO II - FRACIONAMENTO FÍSICO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM TECNOSSOLOS ORIUNDOS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO.....	35
RESUMO.....	35
ABSTRACT.....	36
1. INTRODUÇÃO .....	37
2. MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
2.1 Área de estudo.....	38
2.2 Descrição dos locais de coleta.....	39
2.3 Amostragem.....	44
2.4 Análise química do solo.....	44
2.5 Fracionamento físico da MOS.....	44
2.5.1 Determinação de C,N e C-lábil.....	45
2.6 Análise estatística.....	46
3. RESULTADOS .....	46



3.1 Análise química do solo .....	46
3.2 Fracionamento da MOS.....	50
3.3 Carbono das frações da MOS: C-MOP e C-MOAM.....	52
3.4 Nitrogênio da fração da MOS.....	53
3.5 Carbono lábil da fração da MOS.....	55
3.6 Análise PCA.....	56
4. DISCUSSÃO.....	60
5. CONCLUSÃO .....	66
REFERÊNCIAS.....	67

## INTRODUÇÃO GERAL

O estado de Minas Gerais é responsável por 60% da produção brasileira de minério de ferro (IBRAM, 2018). A bacia do Rio Doce, com 86% do seu território nesse estado, tem em seu processo de ocupação econômica um papel importante com a produção de carvão vegetal e extrações minerais, destacando-se a extração de ferro, ouro, bauxita, manganês, pedras preciosas e outros (COSTA, 2001). A utilização de barragens de rejeito para o armazenamento de resíduos provenientes do beneficiamento de minério de ferro é uma prática comum em complexos minerários. Porém, esta prática oferece uma série de riscos ao meio ambiente e à população estabelecida na área de influência, tal como pode ser verificado pelos diversos incidentes já ocorridos no Brasil (MAIA; PEREIRA, 2017).

De acordo com a *United Nations Office for Disaster Risk Reduction* (UNDRR, 2015) desastre é definido como uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou sociedade envolvendo perdas humanas, materiais, econômicos e ambientais de grande extensão, cujos impactos excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade afetada de arcar com seus próprios recursos. Pela Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade, 2012) o rompimento ou colapso de barragens é considerado um desastre do tipo tecnológico.

No dia 05 de novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, no complexo minerário de Germano, no município de Mariana/MG, pertencente a empresa Samarco S.A. e que continha 43,7 Mm<sup>3</sup> de rejeitos de mineração de ferro (IBAMA, 2015). Trata-se de resíduo classificado como não perigoso e não inerte para ferro e manganês conforme NBR 10.004 (ABNT, 1987). Inicialmente, esse rejeito atingiu a barragem de Santarém logo a jusante, causando seu galgamento e forçando a passagem de uma onda de lama por 55 km no rio Gualaxo do Norte até desaguar no rio do Carmo. Neste, os rejeitos percorreram outros 22 km até seu encontro com o rio Doce. O desastre em análise, quanto à intensidade, classifica-se como Desastre de Nível IV, “desastre de muito grande porte”, conforme classificação da Defesa Civil (IBAMA, 2015).

A partir desse evento apresentou-se um novo cenário, onde segundo Schaefer et al. (2015), foi gerado um Tecnosolo, que é caracterizado como solos que se desenvolvem de substratos decorrentes da atividade antrópica, inclusive da mineração (ROSSITER, 2007). De acordo com a WRB (2006), para ser considerado um Tecnosolo, o solo artificial deve conter mais de 20% de material tecnogênico nos primeiros 100 cm, entendendo por estes materiais como ladrilhos, cerâmicas, vidros, pedras trituradas, resíduos industriais, resíduos de minas dentre outros. O principal problema do Tecnosolo gerado pelo rompimento da barragem de Fundão é de ordem físicas, que são maiores que os químicos para a recuperação ambiental, formando uma crosta dura na superfície quando seco, mas altamente susceptível ao transporte quando umedecido (SCHAEFER et al., 2015). Santos et. al. (2022) constatou que comparando com os solos do entorno não afetados pelo rompimento identificou-se que os Tecnosolos apresentaram pobreza química ligeiramente maior e limitações físicas maiores.

Ações de mitigação aos danos ambientais estão sendo realizadas por diferentes empresas contratadas pela Fundação Renova que foi criada especificamente para gerenciar as ações de recuperação, englobando obras de engenharia e plantios de recuperação. Essas informações foram registradas em uma série de documentos e relatórios contendo as ações compensatórias, monitoramento e manutenção, como o Plano de Manejo de Rejeitos (PMR, 2017), relatórios sucessivos do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais (SISEMA, 2016) e Plano de Recuperação Ambiental Integrado (PRAI, 2017).

Determinados impactos ambientais podem provocar grandes mudanças no solo e em sua qualidade, onde a matéria orgânica pode ser um importante indicador da qualidade do

solo. A quantificação e caracterização química da sua constituição permite o entendimento de seus processos envolvidos na ciclagem de carbono e práticas de manejo para otimizar os serviços ecossistêmicos fornecidos pelo solo (KÖGEL-KNABNER; RUMPEL, 2018). A fim de se ter uma melhor compreensão dos processos e mecanismos em que a matéria orgânica do solo participa é interessante compartimentalizar suas frações. Cada fração fornece respostas quanto ao comportamento, função ou propriedades e ajuda a compreender melhor sua complexidade.

Visando a caracterização da área de estudo após cinco anos do evento de rompimento da barragem, este trabalho foi dividido em dois capítulos. Primeiro é apresentado um histórico envolvendo o rompimento de barragens de rejeitos de mineração ao redor do mundo e no Brasil e as intervenções realizadas pela Fundação Renova para estabilização de rejeitos na área impactada pelo rompimento da barragem de Fundão. O segundo capítulo é referente a análise química do solo, bem como a quantificação de carbono, nitrogênio e carbono lábil dos componentes fracionados fisicamente da matéria orgânica do solo a fim de avaliar a qualidade e a recuperação do mesmo ao longo do tempo.

## **CAPITULO I - IMPACTOS OCASIONADOS POR ROMPIMENTO DE BARRAGEM DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

### **RESUMO**

Há registros de situações de falhas em barragens de contenção de rejeitos em todos os continentes, que inevitavelmente causaram impactos ambientais, sociais e econômicos negativos. O registro mais antigo que se tem conhecimento aconteceu em Barahona, no Chile, em 1928, matando mais de 50 pessoas, resultando numa inundação catastrófica. No Brasil há registros de que ocorreram 13 acidentes envolvendo barragens de contenção de rejeitos de mineração; o caso mais antigo foi em 1986 no município de Itabirito/MG, sendo esta a cidade com maior número de ocorrências além de Ouro Preto/MG, ambas com três registros cada. O Estado de Minas Gerais lidera em quantidade de acidentes, sendo o cenário dos rompimentos das barragens de Fundão no município de Mariana, em novembro de 2015, e da Barragem da Mina Córrego do Feijão em Brumadinho em janeiro de 2019, os mais recentes e maiores em termos de abrangência espacial e de número de vítimas fatais. Nos meses que se sucederam ao desastre de Mariana, foram elaborados diversos planos de intervenções, entre eles se destacam o Plano de Recuperação Ambiental Integrado – PRAI e o Plano de Manejo de Rejeitos – PMR. Já a Operação Watu, realizada pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais – SISEMA/MG, teve como objetivo principal acompanhar e fiscalizar as atividades de recuperação das áreas impactadas pelo rompimento, o que realizou com êxito. Cada trecho foi afetado de uma forma específica e observou-se que no trecho inicial, nas proximidades da usina Risoleta Neves, ocorreu intervenções de reparação mais expressivas. As ações de recomposição florestal permitiram que áreas degradadas antes do rompimento pudessem ser recuperadas.

**Palavras-chave:** Desastres tecnológicos; acidentes ambientais; barragem de Fundão.

## ABSTRACT

All over the world there are records of failure situations in tailings containment dams, which inevitably caused negative environmental, social and economic impacts. The oldest known record was in Barahona, Chile, in 1928, killing more than 50 people, resulting in a catastrophic flood. In Brazil there are indications that there were 13 accidents involving mining tailings containment dams; the oldest case was in 1986 in the city of Itabirito/MG, which is the city with the highest number of occurrences besides Ouro Preto/MG, both with three records each. The State of Minas Gerais leads in terms of number of accidents, with the failures of the Fundão dams in the city of Mariana, in November 2015, and the Córrego do Feijão Mine Dam in Brumadinho in January 2019, the most recent and largest in terms of spatial coverage and number of fatalities. In the following months of the Mariana disaster, several intervention plans were drawn up, including the Integrated Environmental Recovery Plan – PRAI and the Tailings Management Plan – PMR. Operation Watu, carried out by the Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais (State System of Environment and Water Resources of the State of Minas Gerais) – SISEMA/MG, had as main objective to monitor and supervise the recovery activities of the areas impacted by the rupture, which it successfully carried out. Each section was affected in a specific way and it was observed that in the initial section, near the Risoleta Neves power, there were more significant repair interventions. The restoration actions allowed areas degraded before the rupture to be recovered.

**Keywords:** Technological disasters; environmental accidents; Fundão dam.

## **1. INTRODUÇÃO**

A utilização de barragens de contenção de rejeitos é uma prática comum no processo de beneficiamento de minérios e os sistemas de disposição exigem grande responsabilidade, pois no caso de falhas, além de paralisar as atividades da mina e afetar a produção, podem gerar grandes catástrofes (LIMA, 2016). Acidentes com barragens de rejeitos acontecem a partir de uma ou mais falhas, seja no projeto, na construção ou na operação, este último incluindo erro humano e também organizacional (DAVIES, 2002).

Em novembro de 2015 no município de Mariana/MG, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão, quando extravasou cerca de 43,7 milhões de m<sup>3</sup> rejeitos de mineração de ferro (IBAMA, 2015), gerando impactos de ordem ambiental, social e econômica em grande parte da bacia do Rio Doce. Após o evento, sucessivos documentos e ações foram elaborados a partir de estudos técnicos com variados níveis de aprofundamento, como o Plano de Recuperação Ambiental Integrado – PRAI, o Plano de Manejo de Rejeitos – PMR e os relatórios realizados pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais – SISEMA/MG e a Operação Watu.

As ações de mitigação dos danos ambientais causados pelo rompimento da barragem fazem parte do PRAI, incluindo análises de impacto e execução de obras de recuperação ambiental em 650 km de extensão, seguidos de monitoramento, manutenção e recuperação do meio. O PMR tem como objetivo principal apresentar diretrizes, conceitos, metodologias, técnicas, critérios e indicadores para tomada de decisão quanto ao manejo dos rejeitos para elaboração e execução de projetos aplicáveis a cada fração territorial nas áreas afetadas pelo rompimento. Já a Operação Watu tem como finalidade acompanhar e fiscalizar as atividades de recuperação das áreas, buscando a estabilidade dos trechos percorridos (SISEMA, 2019). Os relatórios gerados pelas vistorias das equipes de campo possuem informações acerca da situação da área frente ao acidente, ações executadas pela empresa responsável, informações gerais e recomendações para as ações futuras.

Foi apresentado neste capítulo exemplos de acidentes com barragens de contenção ao redor do mundo e realizado o levantamento de todos os eventos envolvendo barragens de minério no Brasil, assim como evidências das intervenções realizadas para contenção de rejeitos na área impactada pelo rompimento da barragem de Fundão, registradas pela equipe do SISEMA e por visita de campo em dezembro de 2020, janeiro e julho de 2021.

## **2. FALHAS EM BARRAGEM DE REJEITOS**

Rejeitos são resíduos de mineração, resultantes dos processos de beneficiamento a que se submetem os minérios e são constituídos por água, partículas de rocha e as substâncias químicas envolvidas no processo (SANTOS, 2007). Devido à sua densidade, os estragos decorrentes de vazamentos ou de rupturas de barragens de contenção são muito maiores se comparados à danos por vazamentos do mesmo volume de água (PENMAN, 1998). Com isso, é essencial a segurança nas operações de mineração, para a proteção da vida, e meio ambiente.

As barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais são estruturas complexas e dinâmicas que requerem cuidados especiais na elaboração dos projetos de engenharia, operação e manutenção das estruturas (DUARTE, 2008). Pelo histórico de acidentes citados pelo ICOLD - Committee on Tailings Dams and Waste Lagoons (2001), as principais causas de rompimento de barragens são problemas de fundação, capacidade

inadequada dos vertedouros, instabilidade dos taludes, falta de controle da erosão, deficiências no controle e inspeção pós-fechamento e falta de dispositivos graduais de segurança ao longo da vida útil da estrutura.

A probabilidade de uma falha ocorrer pode ser baixa, porém as consequências podem ser desastrosas, o risco imposto será específico para o local, dependendo, por exemplo, do projeto, da construção e manutenção da barragem, das características da rocha subjacente, das condições de precipitação e da atividade sísmica na área; cada aspecto deve receber a devida atenção, de modo a evitar falhas e acidentes (DUARTE, 2008).

## **2.1 Desastres com barragens de contenção ao redor do mundo**

Em várias partes do mundo há registros de situações de falhas em barragens de contenção de rejeitos, que inevitavelmente causaram danos, custaram vidas, resultando em grandes volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente. Pelo ICOLD - Committee on Tailings Dams and Waste Lagoons (2001) foram registrados 221 eventos de rompimento de barragens até o ano de 2001.

A primeira ruptura de uma barragem tradicional registrada foi a de Barahona, no Chile, onde durante um grande terremoto em 1928, a barragem se rompeu, matando mais de 50 pessoas, resultando em uma grande inundação, sendo posteriormente a barragem substituída por uma mais estável (ICOLD, 2001).

Exemplos de falhas em barragens de contenção de rejeitos de mineração e resíduos industriais que geraram impactos ambientais, sociais e econômicos negativos são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Exemplos de falhas em barragens de rejeitos no cenário internacional

<b>Mês e ano</b>	<b>Ocorrência</b>
Outubro/2000	Martin Country Coal Corporation, Kentucky, EUA: 0,95 milhões de m <sup>3</sup> de rejeitos derramados nos rios a jusante, ocorrendo mortalidade de peixes e tornando água imprópria ao abastecimento.
Setembro/2000	Mina de Aitik, Suécia: 1,8 milhões de m <sup>3</sup> de água liberada.
Março/2000	Borsa, Romênia: 22.000 toneladas de rejeitos contaminados por metais pesados foram liberados, contaminando água e solo.
Janeiro/2000	Baia Maré, Romênia: 100.000 m <sup>3</sup> de cianeto contaminaram água com os rejeitos derramados.
Abril/1999	Placer, Surigao del Norte, Filipinas: 700.000 toneladas de rejeitos contaminados com cianeto foram derramadas, 17 casas destruídas.
Dezembro/1998	Haelva, Espanha: 50.000 m <sup>3</sup> liberados de água tóxica e ácida.
Abril/1998	Aznalcóllar, Espanha: liberação de 4-5 milhões de m <sup>3</sup> água tóxica e lodo.
Outubro/1997	Pinto Valley, EUA: liberação de 230.000 m <sup>3</sup> de rejeitos.
Agosto/1996	El Porco, Bolívia: 400.000 toneladas envolvidas.
Março/1996	Marcopper, Filipinas: 1.5 milhões de toneladas de rejeitos.
Setembro/1995	Placer, Filipinas: 50.000 m <sup>3</sup> , 12 mortos.
Agosto/1995	Omai, Guiana: 4.2 milhões de m <sup>3</sup> lodo cianeto.
Fevereiro/1994	Merriespruit, África do sul: 17 mortos, 500.000 m <sup>3</sup> de lodo seguiram por 2 km.
Julho/1985	Stava, Itália: 269 mortes, rejeitos seguiram por 8 km.
Janeiro/1978	Arcturus, Zimbawe: 20.000 m <sup>3</sup> fluindo por 300 m, 1 morte.
Novembro/1974	Bafokeng, África do Sul: 3 milhões de m <sup>3</sup> de lodo seguiram por 45 km, 12 mortes.
Fevereiro/1972	Buffalo Creek, EUA: 125 mortes, 500 casas destruídas.
Setembro/1970	Mufilira, Zambia: 89 mortes, 68.000 m <sup>3</sup> derramados na área de mineração.

Fonte: adaptado de ICOLD, 2001.



## 2.2 Acidentes com barragens de contenção de minério no Brasil

De acordo com a Agência Nacional de Mineração – ANM, há no Brasil 907 barragens de mineração, sendo 350 em Minas Gerais, que corresponde à 38,58% do total, o que o caracteriza como o estado de maior número de barragens.

No Brasil, ocorreram 13 acidentes envolvendo barragens de contenção de rejeitos de mineração. O acidente mais antigo registrado foi em 1986 no município de Itabirito, Minas Gerais. As duas cidades com maior número de ocorrências são Itabirito e Ouro Preto, ambas com três registros cada. O Estado de Minas Gerais lidera por quantidade de acidentes, provavelmente devido ao elevado número de barragens e a intensa atividade minerária que requer esse tipo de estrutura. A Tabela 2 sintetiza as principais informações encontradas.

**Tabela 2.** Acidentes com barragens de rejeitos de mineração no Brasil

Município	Estado	Barragem	Empresa	Ano	Óbitos	Volume (Mm <sup>3</sup> )	Minério	Extensão (Km)
Itabirito	MG	Fernandinho	Itaminas	1986	7	350	Ferro	12
Itabirito	MG	Pico de São Luís	Mineração Brasileira Reunidas	1986	-	-	-	10
Crixás	GO	Serra Grande	Mineração Serra Grande	1994	0	2,25	Ouro	-
Nova Lima	MG	Rio Verde	Rio Verde	2001	5	600	Ferro	6,3
Ouro Preto	MG	Forquilha II	Vale	2002	-	-	Ferro	-
Catalão	GO	Ultrafértil	Ultrafértil	2004	0	-	Magnetita	7
Miraí	MG	Rio Pomba	Rio Pomba Cataguases	2007	0	2.000	Bauxita	-
Itabirito	MG	Mina do Engenho	Herculano	2014	3	-	Ferro e Manganês	-
Mariana	MG	Fundão	Samarco	2015	19	43,7	Ferro	-
Brumadinho	MG	Córrego do Feijão	Vale	2019	264	12,7	-	-
Machadinho D'Oeste	RO	Metalmig	Metalmig	2019	0	-	Cassiterita	-
Ouro Preto	MG	Fernandinho	-	-	0	-	Ferro	-
Ouro Preto	MG	Forquilha	Vale	-	0	-	Ferro	-

Fonte: a autora.

As informações do histórico de acidentes envolvendo barragem de contenção de rejeitos da mineração no Brasil é falho, sem detalhes das causas e em muitos casos não é conhecido o volume extravasado. Inclusive não há dados científicos de todos os eventos, como o ocorrido em Machadinho D'Oeste/RO, onde os registros são restritos a mídia.

### **3. A FUNDAÇÃO RENOVA E AS ESTRATÉGIAS PARA RECUPERAÇÃO AMBIENTAL**

A Fundação Renova foi criada em junho de 2016, com o objetivo de executar as ações de reparação e compensação dos impactos associados ao rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015. O Termo de Transação e Ajustamento de Conduta (TTAC) é o documento que define o escopo de atuação da Fundação, formado por 42 programas e projetos que estão sendo implementados na área impactada do rio Doce e afluentes, em 40 municípios em um trecho de aproximadamente 650 km de extensão. O Termo foi firmado entre Samarco Mineração S.A. (Samarco), suas acionistas, Vale S.A. (Vale) e BHP Billiton Brasil Ltda. (BHP), e Governo Federal, Governos Estaduais de Minas Gerais e Espírito Santo, e outros órgãos governamentais.

Nos meses após o rompimento da barragem, foram elaborados diversos documentos técnicos a partir de uma série de estudos de caracterização da área a fim de conciliar as ações urgentes no curto prazo com a necessidade de se desenvolver um projeto de recuperação de caráter abrangente e integrado no longo prazo. Dois planos se destacam quando se trata de recuperação ambiental para fins de controle e estabilização do rejeito: o Plano de Recuperação Ambiental Integrado (PRAI, 2017) e o Plano de Manejo de Rejeito (PMR, 2017).

#### **3.1 Plano de Recuperação Ambiental Integrado**

As ações de mitigação aos danos ambientais causadas pelo rompimento fizeram parte do Plano de Recuperação Ambiental Integrado - PRAI. Esse documento, que é público e disponível de forma online, seguiu uma abordagem baseada em riscos, incluindo análises de impacto e execução de obras de recuperação ambiental em 650 km de extensão, seguidos de monitoramento, manutenção e recuperação do meio. Está alinhado ao TTAC e o primeiro relatório foi disponibilizado em novembro de 2016, e houve diversas atualizações desde então, sendo a última em março de 2017.

O foco do documento é expor as ações de recuperação ambiental, bem como ações compensatórias que estão sendo desenvolvidas pela Fundação Renova. Estas ações envolvem as diretrizes para manejo de rejeitos; a recuperação ambiental da área onde houve deposição de rejeitos nas calhas e margens dos rios; as atividades de compensação para recuperação de nascentes e APPs degradadas na bacia do rio Doce; o diagnóstico de impactos à fauna aquática, terrestre e a unidades de conservação, direcionando ações de reparação; melhorias nos sistemas de tratamento de água e monitoramento da qualidade da água na bacia do rio Doce, mar e zona estuarina.

Por ser um plano de recuperação ambiental, a abordagem objetiva amplamente: evitar que haja aporte de sedimentos e aumento da turbidez nos cursos hídricos impactados; recompor a mata ciliar e o ecossistema fluvial; e recuperar a infraestrutura social e econômica das comunidades afetadas no menor prazo possível.

As ações para mitigar os danos ambientais, em especial aquelas que visam a estabilização e controle de erosão foram abordadas em tópicos específicos no PRAI. A seguir serão apresentados algumas práticas referentes à recuperação florestal da região.

##### **3.1.1 Plantio emergencial**

Com o intuito de reduzir o carreamento de partículas sólidas para os cursos de água por erosão superficial, medidas de controle erosivo foram tomadas por meio da implantação de uma cobertura vegetal de rápido crescimento sobre os rejeitos de minério depositados às

margens dos cursos d'água impactados. Foram priorizadas grandes superfícies expostas nas proximidades das comunidades afetadas e das Áreas de Preservação Permanente (APP). (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017a).

De acordo com o Plano de Recuperação Ambiental (2017), foram consideradas quatro alternativas para o programa inicial de revegetação: semeadura de braquiária; semeadura do mix de gramíneas e leguminosas; condução da regeneração natural e plantio de mudas arbóreas.

Para a preparação da composição do mix de sementes, foram utilizadas espécies herbáceas ou arbustivas de leguminosas (*Fabaceae*), gramíneas (*Poaceae*) e uma espécie de outra família (*Brassicaceae*), sendo que a semeadura nas diferentes áreas dependeu da disponibilidade comercial das mesmas. A compilação de espécies passíveis de serem utilizadas é apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3.** Espécies que compõe o mix de sementes

<b>Nome Científico</b>	<b>Nome Popular</b>
<i>Crotalaria spp.</i>	Chocalho de cascavel
<i>Canavalia ensiformis</i>	Feijão de porco
<i>Cajanus cajan</i>	Feijão Guandu
<i>Mucuna aterrina</i>	Mucuna preta
<i>Mucuna pruriens</i>	Mucuna cinza
<i>Pueraria phaseoloides</i>	Pueraria
<i>Glycine wightii</i>	Soja-perene
<i>Stylosanthes spp.</i>	Estilosante
<i>Lupinus albus</i>	Tremoço branco
<i>Vicia sativa</i>	Ervilhaça
<i>Arachis pintoii</i>	Amendoim-forrageiro
<i>Desmodium spp.</i>	Pega-pegas
<i>Vigna unguiculata</i>	Feijão-miúdo
<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo-forrageiro
<i>Avena spp.</i>	Aveia-amarela, aveia-preta
<i>Cynodon dactylum</i>	Capim-vaqueiro
<i>Lolium multiflorum</i>	Azevém
<i>Paspalum notatum</i>	Batatais, pensacola
<i>Axonopus spp.</i>	Sempre-verde
<i>Raphanus sativus</i>	Nabo-forrageiro

Fonte: adaptado de PRAI, 2017.

Além destas espécies, também foi utilizado o enriquecimento do mix com sementes de espécies ruderais, listadas na Tabela 4, observadas em campo em dezembro de 2015, disponíveis para coleta nas beiras de tributários a montante das áreas afetadas. Essas sementes foram utilizadas na área de maior impacto físico nas margens dos cursos de água observada entre o distrito de Bento Rodrigues e o Reservatório de Risoleta Neves.

**Tabela 4.** Espécies nativas ruderais

<b>Família</b>	<b>Nome Científico</b>	<b>Nome Popular</b>
<i>Fabaceae</i>	<i>Mimosa pigra</i>	Mimosa-de-espinho
<i>Fabaceae</i>	<i>Mimosa pudica</i>	Sensitiva
<i>Fabaceae</i>	<i>Indigofera spp.</i>	Anis-selvagem
<i>Fabaceae</i>	<i>Sesbania punicea</i>	Flamboiant-mirim
<i>Fabaceae</i>	<i>Desmodium spp.</i>	Pega-pega
<i>Boraginaceae</i>	<i>Varronia curassavica</i>	balieira
<i>Verbenaceae</i>	<i>Lantana sp.</i>	Lantana
<i>Poaceae</i>	<i>Gynerium sagittatum</i>	Cana-do-rio
<i>Solanaceae</i>	<i>Solanum spp.</i>	-
<i>Convolvulaceae</i>	<i>Ipomoea cairica</i>	Corriola

Fonte: adaptado de PRAI, 2017.

Nas ações de plantio emergencial foram executadas um total de 808,5 hectares de área revegetada, tendo sido concluída em julho de 2016, prosseguindo para a etapa de manutenção dessas áreas.

Os serviços de manutenção da revegetação visaram garantir eventuais falhas ocorridas durante o processo, considerando serviços de ressemeadura do mix de gramíneas e leguminosas nos locais onde não houve desenvolvimento satisfatório da vegetação, adubação de cobertura, controle de pragas e eliminação de pequenos ravinamentos (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017a).

### 3.1.2 Recuperação dos tributários

De modo geral, a recuperação ambiental dos córregos tributários envolveu a limpeza do mesmo, incluindo a remoção dos rejeitos presentes na calha destes cursos de água; e a reconstrução da seção de escoamento, tomando como base métodos de bioengenharia adequados para cada tributário, incluindo a proteção de margens para evitar novos aportes de solo e sedimentos aos cursos de água.

Para análise das alternativas de metodologias para a recuperação, foram considerados principalmente os objetivos que incluem: minimizar o volume de rejeitos depositados que migram para os rios principais; e restaurar os valores do habitat para uma condição comparável com a que existia antes do rompimento da barragem.

Sendo assim, foram estudadas 21 alternativas de revestimento ou proteção das calhas dos tributários. As alternativas avaliadas incluíram uma combinação de métodos tradicionais de engenharia (ex: enrocamento), bioengenharia (ex: revegetação) e materiais geossintéticos (ex: geogrelhas) (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017a).

### **3.1.3 Plano de recuperação de nascentes e APPs degradadas**

Tendo em vista o que foi definido no TTAC, a Fundação Renova se comprometeu a recuperar 40.000 ha de APPs – Áreas de Preservação Permanente e 5.000 nascentes, em caráter compensatório, na bacia do rio Doce, sendo que as ações serão realizadas ao longo de 10 anos.

Dos 40.000 ha de APPs degradadas a serem recuperadas, foi previsto que 10.000 ha serão por reflorestamento e 30.000 ha por condução da regeneração natural e das 5.000 nascentes, 500 deverão ser recuperadas por ano. No TTAC também foi previsto a implementação de projetos de produção de sementes e de mudas de espécies nativas florestais.

O processo de recuperação das nascentes degradadas ainda está em andamento e foi iniciado em parceria com o Instituto Terra, responsável pelas primeiras 500 nascentes no período de 2016/2017, ao longo de trechos definidos pelo Comitê de Bacias Hidrográficas do Doce (CBH-Doce). O processo consiste em realizar a proteção ou cercamento, seguido de avaliação das espécies em regeneração natural, para posterior execução dos tratamentos culturais e plantio de mudas representativas para o local.

De acordo com a Fundação Renova, até março de 2021, havia mais de mil hectares de APP e áreas de recarga hídrica e cerca de 900 nascentes em fase de implantação para recomposição florestal nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo e com a participação de 325 proprietários rurais.

### **3.2 Plano de Manejo de Rejeito**

O Plano de Manejo de Rejeito – PMR criado em função do rompimento da barragem de Fundão, é um documento fruto da participação de aproximadamente 30 instituições, especialistas, professores universitários e partes interessadas que, contribuíram com temas prioritários, objetivos, metodologias, técnicas de manejo e ressalvas, dentre outros. A versão revisada foi disponibilizada em julho de 2017.

As Cláusulas 150 a 157 do TTAC detalham ações e compromissos específicos quanto ao manejo de rejeito, os quais foram incorporados no PMR que tem como objetivo realizar estudos de identificação e de avaliação detalhada da Área Ambiental 1, e o manejo de rejeitos conforme resultados dos estudos previstos neste programa, considerando os fatores ambientais, sociais e econômicos da região.

A Área Ambiental 1 é definida pelo TTAC em sua Cláusula 1ª como “as áreas abrangidas pela deposição de rejeitos nas calhas e margens dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, considerando os respectivos trechos de seus formadores e tributários, bem como as regiões estuarinas, costeiras e marinha na porção impactada pelo evento”. Essa área engloba aproximadamente 668 km de rios desde o rio Gualaxo do Norte até a região marinha na foz do Rio Doce, extensão na qual ocorreram alterações bastante diversificadas, tanto em termos de processos como de abrangência espacial (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017b).

A abrangência do PMR considera todos os tipos de depósitos de rejeitos identificados na área impactada, sendo: depósitos extra calha (encostas, planícies aluvionares e margens), cuja remobilização natural se dá por processos de erosão pluvial; e depósitos na calha dos rios, cuja movimentação é fortemente influenciada pela dinâmica fluvial.

O PMR tem como objetivo principal apresentar diretrizes, conceitos, metodologias, técnicas, critérios e indicadores para tomada de decisão quanto ao manejo dos rejeitos para elaboração e execução de projetos aplicáveis a cada fração territorial nas áreas afetadas pelo

rompimento da barragem de Fundão. Foram definidas cinco fases para o processo de tomada de decisão, sendo:

Fase 1A: realizar a caracterização do processo de transporte e deposição de rejeito bem como identificar aspectos físico-químicos do material e estimar os valores de volume;

Fase 1B: complementação da caracterização ambiental da área afetada;

Fase 2: tomada de decisão e seleção das alternativas de manejo, incluindo a seleção da metodologia a ser aplicada na área;

Fase 3: avaliação técnica governamental da proposta apresentada, sendo que a validação se refere à aprovação do plano de ações e se restringe ao corpo técnico dos órgãos ambientais, Câmaras Técnicas e outros envolvidos nesta etapa;

Fase 4: comunicação aos proprietários das áreas que porventura possam sofrer intervenções, a fim de se obter a anuência do mesmo;

Fase 5: implementação e monitoramento da alternativa de manejo selecionada.

Todos os principais estudos, planos e programas realizados relacionados ao manejo de rejeito e/ou à recuperação das áreas degradadas foram incorporados ao PMR, como anexos, a fim de facilitar a consulta e o entendimento dos fatos. Os anexos são:

I - Definição de Metodologias de Remoção, Transporte e Disposição do Rejeito de Áreas Degradadas;

II - Diretrizes de Recuperação das Áreas Impactadas;

III - Plano de Trabalho Bento Rodrigues;

IV - Plano de Trabalho para Elaboração de Avaliação de Riscos à Saúde Humana em Áreas Piloto;

V - PMQQS - Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo de Água e Sedimento;

VI - Plano de Trabalho UHE Risoleta Neves – Candonga;

VII - Anotação de Responsabilidade Técnica (ART);

VIII - Controle das Revisões Efetuadas.

As ações em andamento voltadas ao manejo de rejeito foram descritas no âmbito do Plano de Recuperação Ambiental Integrado - PRAI.

#### **4. OPERAÇÃO WATU**

Após o rompimento da barragem de Fundão, a Samarco Mineração S.A. realizou diversos estudos ambientais nas áreas afetadas com intuito de definir qual seria a melhor estratégia de remediação dos passivos deixados por aquele evento e optou por dividir a parte mineira da Bacia do Rio Doce em trechos e classificá-los quanto à prioridade para a realização de intervenções, definindo inicialmente 16 Trechos Prioritários, que possuíam alto potencial de remobilização de rejeito, e 11 Trechos Não Prioritários, que, apesar de necessitarem de intervenções, possuíam menor potencial de remobilização do rejeito em curto prazo.

Realizada pelo Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais – SISEMA/MG, por meio de suas entidades vinculadas: Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SEMAD, Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM e Instituto Estadual de Florestas – IEF, o principal objetivo da Operação Watu é acompanhar e fiscalizar as atividades de recuperação das áreas prioritárias e não prioritárias impactadas pelo evento do rompimento da barragem, buscando a estabilidade dos trechos percorridos (SISEMA, 2019).

Até a presente data, se realizou dez fases da operação, iniciado em novembro de 2016 até janeiro de 2021, gerando um total de nove relatórios que contém detalhes das áreas vistoriadas pelas equipes de campo, disponíveis no site da Secretaria de Estado de Meio

Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais – Semad. Os relatórios possuem informações acerca da situação da área frente ao acidente, ações executadas pela Samarco, informações gerais e recomendações, bem como as coordenadas geográficas dos pontos visitados e respectivo trecho.

Por haver várias equipes, a linguagem da escrita dos relatórios não foi homogênea, tornando seu entendimento confuso em algumas situações, principalmente ao comparar áreas e períodos. Por conta desse fator e a fim de facilitar o entendimento dos processos realizados e em andamento, a seguir é resumido todos os relatórios e mapeamento das obras. A fundação responsável pelas intervenções não disponibiliza nenhum documento com o histórico de acompanhamento das obras que estavam sendo realizadas e o trecho específico, ficando a cargo da operação Watu relatar os acontecimentos mais recentes.

Os onze trechos denominados “não prioritários”, tiveram o início das vistorias a partir da fase III, em maio de 2017, e até então eram áreas degradadas pelo rompimento da barragem que ainda não haviam passado por obras.

A partir da fase VI, realizada em 2018, muitas obras de estabilização já haviam sido concluídas, e os técnicos de campo realizaram novas vistorias para avaliação de todos os trechos e caracterização das áreas que seriam trabalhadas no âmbito do Plano de Manejo de Rejeitos e portanto, trechos acompanhados pela Operação Watu foram inseridos no referido plano. Dessa forma, os demais relatórios compreendem a análise e aplicação do Plano de Manejo de alguns trechos onde se apresenta as intervenções realizadas além das ações emergências, ou seja, as que compreendem o emprego de técnicas e estudos mais elaborados sobre a recuperação ambiental, restauração florestal, manejo empregado para a adequação do rejeito depositado e uma comparação histórica e evolutiva dos locais percorridos.

A Operação Watu Fase VII de fevereiro de 2019, além da participação dos servidores do SISEMA, também contou com a equipe do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para a realização das vistorias. A operação de fiscalização ambiental Watu, realizada pelo SISEMA é o mecanismo oficial de acompanhamento das ações de recuperação realizadas pela Fundação e acontece paralelamente à Operação Augias, realizada pelo IBAMA que possui o mesmo caráter. As metodologias de fiscalização adotadas nas duas operações são padronizadas com o IBAMA, atuando nos rios tributários e, o SISEMA, nos corpos principais dos rios atingidos pelos rejeitos.

Por conta da pandemia de COVID-19, as intervenções foram paralisadas e retomadas em agosto de 2020, sendo a fase IX, de fevereiro de 2020, anterior a este fato, e a fase X que aconteceu em outubro e novembro de 2020, após a retomada das atividades e a última fiscalização até o presente momento.

As intervenções para redução de processos erosivos e consequente contenção dos rejeitos foram de ordem mecânica, abrangendo obras como enrocamentos e paliçadas, e plantios para recuperação florestal das áreas. Essas intervenções foram realizadas por empresas terceirizadas contratadas pela Samarco, por intermédio da Fundação Renova. Seguem as ações encontradas pelas equipes da Operação Watu durante as vistorias nos trechos prioritário e não prioritários das áreas afetadas.

**Diques:** construção de novos diques e reconstrução de outros já existentes, como o diques S4 (Figura 1A) que compõem o sistema de contenção de rejeitos e melhoram a qualidade da água do córrego Santarém, em Mariana. Em geral são estruturas construídas com o propósito de servir como uma bacia de sedimentação para os rejeitos, a fim de minimizar o carreamento de sedimentos da área das barragens para o meio ambiente e melhorar a qualidade da água.

**Retentor de sedimentos:** em alguns pontos foram instalados retentores de sedimentos (Figura 1B e C), para evitar o carreamento de rejeitos para o corpo d’água. Consiste em rolos

de palha e fibras naturais, disposto com um cordão de isolamento em margens, para filtrar os sedimentos e impedir que cheguem a calha por ação da chuva (FUNDAÇÃO RENOVA, 2020).

**Paliçada:** consiste em barreira em forma de grade, montada em bambu ou madeira, e apoiada nas encostas de pequenos barrancos para evitar a passagem de sedimentos, contendo o processo erosivo (FUNDAÇÃO RENOVA, 2020). Na Figura 1D, em uma área com relevo mais acidentado foram feitas paliçadas para contenção de rejeitos ainda na fase emergencial e é possível observar que foram efetivos.

**Muro de gabião:** essa opção envolve o uso de gaiolas de tela de aço preenchidas com pedras para criar um colchão cobrindo grandes áreas que necessitam de proteção contra erosão, principalmente ao redor de curvas externas dos cursos d'água (Figura 1E). Entretanto, a durabilidade das gaiolas de arame é questionável durante tempestades de maior intensidade e com o decorrer do tempo (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017a).

**Remoção de material lenhoso:** se fez necessário a remoção do excesso de material lenhoso, galhos e troncos, que foram carregados devido ao evento de rompimento da barragem e depositados nas margens e calha dos rios

**Reconstrução de margem:** em muitos trechos foi necessária a ação de correção e regularização dos contornos e inclinações das margens dos rios e transectos, com o auxílio de tratores, escavadeiras ou com ferramentas manuais para prevenir erosão (FUNDAÇÃO RENOVA, 2020).

**Drenagem de planícies:** compreende a construção de caminhos para escoamento de água de chuva de planícies vizinhas às margens, de modo a canalizá-la em direção a calha (FUNDAÇÃO RENOVA, 2020) (Figura 1F). As ações de disciplinamento das drenagens têm como objetivo a redução do fluxo e da velocidade do escoamento superficial das águas de chuva que incidem sobre os locais atingidos pelo rejeito, redução do arraste de sedimentos (rejeitos) evitando o desenvolvimento de processos erosivos e consequente assoreamento dos corpos hídricos, bem como a proteção de suas margens contra solapamentos causados pela oscilação do nível do curso de água. Permite a estabilização das áreas nos trechos impactados pelo rejeito, fator preponderante para a prática de recuperação ambiental e restauração florestal (SISEMA, 2019).

**Biomanta:** manta de fibras naturais, que protege o solo contra erosão, contribuindo com a fertilidade dele ao se degradar, retém umidade e facilita a germinação de vegetação sobre ela (FUNDAÇÃO RENOVA, 2020) (Figura 1H). Com base na topografia da área e das curvas de nível, conforme visualizado pela Figura 1G, construíram canaletas de crista e de berma para direcionamento das águas pluviais. Essas canaletas foram revestidas com biomanta.

**Enrocamento:** disposição de pedras na margem dos rios para estabilizar seu contorno, prevenir a erosão pela força da correnteza e reduzir a passagem de sedimentos das margens para a calha, conforme demonstrado na Figura 1I e J abaixo.







**Figura 1.** A) Dique em construção. B) Retentores de sedimentos. C) Taludes do rio reconformados com biomanta e retentores. D) Paliçadas e manta geotextêis. E) Muro de gabião. F) Depressão para direcionamento da água de chuva para o rio. G) Canaletas de crista e de berma revestidas com biomanta. H) Proteção com a biomanta. H) Biomanta e enrocamento do rio. I) Intervenções de enrocamento realizadas em um tributário.  
 Fonte: Operação Watu.

Vale ressaltar que de maneira geral, as ações de contenção foram utilizadas de forma simultânea de acordo com a necessidade de intervenção na área, como se observar em algumas áreas com enrocamento, paliçada seguidos de biomanta e revegetação com mix de sementes.

Em dezembro de 2020, janeiro e julho de 2021, foi verificado em campo algumas das intervenções relatadas pela operação Watu. As margens do rio Gualaxo do Norte, verifica-se pela Figura 2 a utilização de enrocamento.



**Figura 2.** Utilização de enrocamento no rio.  
Fonte: a autora.

Em outro trecho é possível verificar também o enrocamento do rio (Figura 3A) e construção de canal de drenagem com pedras (Figura 3B) na mesma área da margem do rio Gualaxo do Norte.



**Figura 3.** A) Vista de enrocamento do rio. B) Canal de drenagem.  
Fonte: a autora.

As margens do rio Doce foi construído em um trecho aterrado, uma área extensa com pedras de tamanho grande a fim de direcionar a água das chuvas e reduzir processos erosivos (Figura 4).



**Figura 4.** Pedregulhos depositados em trecho do terraço.  
Fonte: a autora.

A maior parte das intervenções de obras encontradas estava em boas condições de conservação e várias ainda em andamento, principalmente no trecho próximo à usina de Risoleta Neves.

#### **4.1 Restauração florestal**

As atividades de restauração ecológica nessas áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão combinando diferentes métodos e técnicas de restauração ativa e passiva estão sendo aplicadas para recuperar a diversidade de plantas e serviços ecossistêmicos (CAMPANHARO et al., 2021a). Esses métodos são normalmente usados em condições contrastantes dependentes do contexto por exemplo, a restauração passiva geralmente é bem sucedida onde a vegetação se recupera por regeneração natural (HOLL & AIDE 2011; HOLL 2017), enquanto a restauração ativa é recomendado em áreas degradadas onde a regeneração natural é dificultada ou limitada (HOLL 2012; MARTINS 2018; CAMPANHARO et al. 2020).

A restauração florestal indicada pela Fundação Renova para alguns trechos em decorrência da característica originária das áreas afetadas, compreende as seguintes etapas: isolamento da APP mediante cercamento; preparação do solo, mediante aplicação de *mix* de sementes de gramíneas e leguminosas (adubação verde) sobre as áreas recobertas por rejeito; incorporação no solo da biomassa formada a partir da adubação verde; coveamento; coroamento; plantio de mudas de espécies florestais nativas do bioma Mata Atlântica; controle de pragas e formigas cortadeiras; e atividades de manutenção dos plantios, mediante o coroamento das mudas e reposição de indivíduos mortos (SISEMA, 2019).

Inicialmente, com a finalidade de melhorar a condição do solo foi utilizado o *mix* de sementes, contendo espécies variáveis com função de adubação verde e cobertura do solo. O processo de semeadura priorizou espécies de plantas de crescimento rápido nas margens dos córregos e rios para evitar a erosão e melhorar a condição do solo (FUNDAÇÃO RENOVA, 2020). A revegetação realizada no trecho com o *mix* de sementes teve caráter emergencial com objetivo de reter os sedimentos (SISEMA, 2016). O cercamento das áreas de restauração se fez necessário para evitar entrada de animais de grande porte, como gado e cavalo, a fim de facilitar a regeneração natural e não danificar as mudas. Mesmo assim, se constatou muitas áreas de APP sendo utilizadas como pastagem e presença de animais em

áreas de recomposição florestal, como mostra a Figura 5, em trecho do rio Gualaxo do Norte em Mariana/MG.



**Figura 5.** Animais em área de recomposição florestal em dezembro de 2020.  
Fonte: a autora.

Na antiga PCH Bicas, localizada no rio Gualaxo do Norte, em Mariana, em dezembro de 2020, foi verificado que em área de recomposição florestal as mudas apresentava-se bem desenvolvida, apesar da presença de gramíneas (Figura 6). As mudas estavam bem espaçadas entre si. Vale destacar a presença de fragmentos florestais no entorno, o que pode ter contribuído para o sucesso da recomposição. Essa área sofreu intervenções na fase emergencial, que foi terraplanada e recebeu sementeira logo após o evento.



**Figura 6.** Área de recomposição florestal, coordenadas geográficas: 671143,48, 7759052,81.  
Fonte: a autora.

Já em outro ponto (Figura 7), próximo ao trecho urbano de Barra Longa, para o mesmo período observou-se que as gramíneas invasoras impediram o desenvolvimento das espécies florestais, impossibilitando o avanço da recomposição. Campanharo et al. (2021) indicam que a regeneração natural em área afetada pelo evento de rompimento em Mariana/MG foi limitada pela competição com gramíneas invasoras, pois Pilocelli (2020), também estudando uma área que enfrentou o mesmo impacto, encontrou alta abundância e riqueza de árvores naturalmente regeneradas onde invasoras gramíneas não eram um problema.

A margem mais próxima do rio estava cercada, provavelmente pelo fato de tratar-se de área de preservação permanente (APP), porém, a densidade da gramínea era a mesma, sendo

homogênea em toda a extensão da área, o que indica que não houve uma intervenção de roçada no trecho isolado do pasto no período visitado (dezembro 2020).



**Figura 7.** Pasto denso, onde as gramíneas impediram o desenvolvimento das mudas coordenadas geográficas: 685362,00, 7753559,00.  
Fonte: a autora.

Nessa mesma área, em julho de 2021, o pasto se manteve denso (Figura 8), mesmo em regime seco de chuvas, podendo ser diferenciado a densidade da gramínea na área com isolamento da cerca.

Em ambos os períodos foi possível visualizar somente algumas poucas mudas esparsas ao longo do terraço e muitas covas vazias, o que indica uma alta mortalidade no processo de recuperação florestal deste trecho. Outra questão que provavelmente interferiu negativamente foi a presença de animais pastando na área não cercada, porém não foi um fator determinante pois a mesma tendência de mortalidade florestal foi identificada na area isolada.



**Figura 8.** Imagem aérea de VANT em pasto denso e da APP cercada.  
Fonte: a autora.

Tratando-se de outro local, com o apoio do proprietário, foi plantado um mix de sementes de cobertura do solo na margem do rio, no município de Barra Longa. Nota-se que mesmo em período seco (julho/2021) a vegetação se manteve (Figura 9).

Anteriormente ao evento de rompimento, a área era utilizada como pastagem, com predomínio de braquiária (*brachiaria spp*), sendo então a posterior, realizada intervenção de recomposição com a cobertura do mix, possuindo diversas espécies, com adaptação para períodos secos e chuvosos. Na semeadura, houve aplicação de adubação nitrogenada e utilização de húmus e esterco.

Apesar do bom desenvolvimento do mix para a recomposição, observou-se grande quantidade da espécie invasora *Xanthium spp*, além de gramíneas. Foi observada falta de manutenção para controle dessas invasoras para dar sequência ao processo de recuperação florestal da área.



**Figura 9.** Área com mix de leguminosas, julho de 2021, coordenadas geográficas: 701136,15, 7756189,48.

Fonte: a autora.

No município de Mariana, próximo à ponte do Gama, também com o apoio do proprietário, havia uma área de intervenção plantada com mudas nativas, intercalado com fileira de palmeiras. Na Figura 10 observa-se a área no período chuvoso (dezembro/2020).



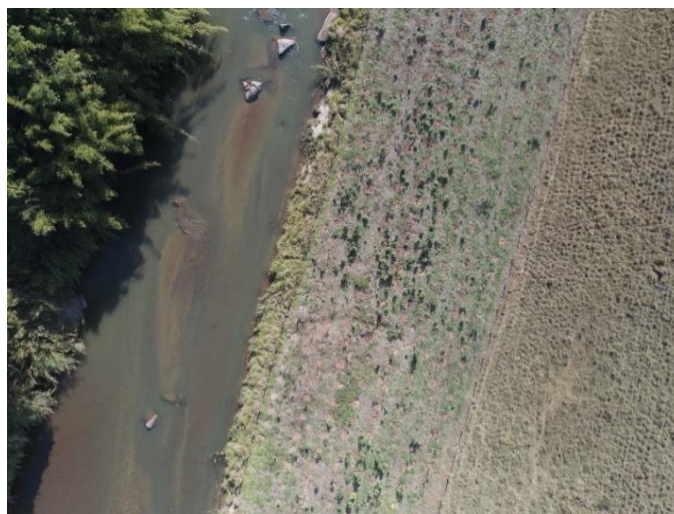
**Figura 10.** Área de recomposição com palmeiras e nativas, período chuvoso.

Fonte: a autora.

Percebeu-se que no período seco houve mortalidade de mudas, tanto das palmeiras como das espécies nativas, comprometendo a recomposição e cobertura do solo. Porém o proprietário mantém a manutenção na área com a roçada das gramíneas invasoras e isolamento de grandes animais com cerca na área de intervenção.

Em outro local, também particular, no município de Barra Longa, foi visitada uma área extensa de recomposição florestal de mudas nativas, plantadas diretamente sobre o rejeito, com aplicação de adubos somente nas covas, de acordo com o proprietário. Na Figura 11, é possível verificar o plantio por imagem aérea de VANT. Algumas espécies, como angico (*Anadenanthera macrocarpa* Benth.), tiveram maior sucesso no desenvolvimento. Mesmo no período seco, a recomposição se manteve, com pouca mortalidade das mudas.

Percebe-se a presença de gramíneas invasoras, mas há o controle por parte do proprietário de roçada manual e uso de defensivos químicos.



**Figura 11.** Vista aérea de área de recomposição florestal, em julho de 2021. Coordenadas geográficas: 699477,92, 7756702,42.

Fonte: a autora.

Gramíneas invasoras muitas vezes dificultam regeneração natural atuando como barreiras ao desenvolvimento de espécies nativas (Gioria et al. 2012; Gioria & Pyšek 2015). Campanharo et al. (2021) acreditam que o principal filtro para a regeneração na área de rejeitos em Mariana foi a forte competição com gramíneas invasoras, como *Urochloa* sp e *Cynodon dactylon*. Além disso, Pilocelli (2020) encontrou regeneração natural rápida e alta diversidade estudando um área afetada pelos rejeitos de mineração no mesmo município, mas onde espécies invasoras não era um filtro biótico, presumindo então que a restauração ativa tenha um efeito positivo no controle e redução de gramíneas invasoras, que são notadamente dominantes nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão.

Ainda, estudos anteriores sobre a estabilização do solo mostraram que o manejo de espécies de plantas daninhas durante a restauração passiva é desejável para reduzir as espécies exóticas invasoras e, posteriormente, aumentar a diversidade de espécies lenhosas nativas (Gornish, 2017).

Campanharo et al. (2021) explica que provavelmente o crescimento radicular em recomposição ativa pode contribuir para a restauração do solo, através da estruturação do Tecnosolo e ciclagem de nutrientes, bem como, a melhoria das propriedades do solo através da incorporação de matéria orgânica, nutrientes e prevenção de processos erosivos (Brevik et al. 2015). Dessa forma, a contribuição para a estruturação dos Tecnosolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão pode fornecer valiosos serviços ecossistêmicos



durante a recuperação florestal, como por exemplo, estoque de carbono do solo (Ruiz et al. 2020).

Os estudos de DA SILVA et al. (2021), mostraram que há um banco de sementes viável nas camadas superficiais nos rejeitos de mineração acumulados nas áreas afetadas de Mariana, composto principalmente por espécies nativas, apresentando boa qualidade e potencial para regeneração natural. Estudos de florestas tropicais relatam que sementes viáveis de espécies pioneiras armazenadas no solo podem desempenhar um papel importante na rápida regeneração após distúrbios naturais ou antropogênicos (por exemplo, Dalling, Swaine, & Garwood, 1998; Martins & Engel, 2007; Mall & Singh, 2014; Sousa et al., 2017).

Em área atingida pelo rejeito, em Mariana, Campanharo et al. (2021) compararam a regeneração natural da floresta, a semeadura direta e o plantio de mudas sob diferentes tratamentos e, em geral, a restauração ativa manifestou maior riqueza e abundância de espécies arbóreas levando a uma maior recuperação de biomassa, embora a biomassa não tenha sido significativamente diferente entre os tratamentos.

Porém a regeneração natural também pode ser uma alternativa interessante, pois estudos anteriores, como de Barral et al. (2015), descobriram que as ações de restauração passiva e ativa não diferiram significativamente nos níveis de biodiversidade ou serviços ecossistêmicos em agroecossistemas. Meli et al. (2017) concluíram que o plantio de espécies arbóreas em áreas anteriores de agricultura não resultou em recuperação consistentemente mais rápida ou mais completa do que restaurada passivamente. Já, Crouzeilles et al. (2017) descobriram que o sucesso da restauração ecológica é maior para regeneração natural do que para restauração ativa em florestas tropicais.

Porém, considerando-se a singularidade da área de estudo devido ao seu território histórico de uso baseado em pastagens para pecuária e nas deposições de rejeitos de mineração após o colapso da barragem de Fundão, destaca-se que ainda não estão claros os resultados na recuperação florestal nesta região (CAMPANHARO et al., 2021). Em geral, os estudos apoiam que o uso anterior da terra mais intenso leva a florestas secundárias com taxas de recuperação reduzidas e uma comunidade vegetal empobrecida (JAKOVAC et al. 2021). Entretanto, os métodos de restauração passiva e ativa podem ser complementares na recuperação do solo e da cobertura vegetal da comunidade (MARTINS et al., 2021).

Foi avaliado por Martins et al. (2021), os efeitos de métodos de restauração passivos e ativos por meio de diferentes técnicas de preparo de sítios, manipulando propriedades físico-químicas de substratos na cobertura de comunidades arbóreas em áreas ao longo das planícies de inundação com acúmulo de rejeitos em Mariana e constatou-se que em média, o tratamento com adubação gera maior cobertura vegetal tanto para regeneração natural quanto em semeadura direta de árvores nativas, presumindo então que as condições iniciais do local por meio de diferentes técnicas de fertilização promovem o processo de mineralização, consequentemente aumenta a fertilidade do substrato e a produção de biomassa que determinam maior cobertura da comunidade vegetal.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

É preciso conviver com os diversos tipos de desastres naturais e suas consequências, porém os desastres tecnológicos, onde se inclui os acidentes com barragens, poderiam ser evitados em muitos casos, visto que as principais causas são de origem antrópica.

A operação Watu atendeu aos objetivos propostos inicialmente, de mapear e fiscalizar as obras de recuperação realizadas pela fundação. Ressalta-se que ao longo do processo, puderam verificar várias irregularidades e problemas relatados ao longo dos nove relatórios realizados. Um ponto negativo observado foi que a linguagem da escrita dos relatórios não foi

homogênea, tornando seu entendimento confuso em algumas situações, principalmente ao comparar áreas e períodos.

Relativo ao rompimento da barragem de Fundão é notável que o trecho inicial afetado pelo evento ocorreu intervenções mais expressivas. Nas proximidades da usina Risoleta Neves houve uma maior atividade na calha e margens do rio Gualaxo, principalmente de obras de engenharia. Isso se deu provavelmente por conta dessa área da usina ficar soterrada com grande volume de rejeitos, por conta do represamento desse material e o processo de retirada da calha do rio ainda está em andamento, portanto a área ainda não está em vias de estabilização.

Cada trecho visitado foi afetado de uma forma específica e a fundação responsável pela recuperação da área realizou uma série de práticas para estabilização dos rejeitos, em maior e menor grau, variando muito as técnicas adotadas. Em muitos pontos visitados foi observado que o andamento dos processos de recomposição estava comprometido devido a não manutenção nas áreas, principalmente referente a falta de capina e controle das gramíneas invasoras, substituição das mudas mortas e presença de animais de pastejo. Entretanto, os projetos e programas da fundação proporcionaram ações de recomposição florestal em áreas que antes do rompimento já eram degradadas.

Apesar do intenso dano causado no solo e cobertura vegetal em decorrência do colapso do Fundão, estudos realizados nas áreas afetadas sugerem que as intervenções favorecem uma recuperação mais eficiente, mesmo onde acontece a regeneração natural o acompanhamento, mesmo que mínimo, para controle de invasoras pode se fazer necessário, porém se torna uma alternativa de baixo custo e viável. Além do mais foi constatado presença de banco de sementes, fator positivo para sucesso do processo de recuperação.

## **CAPÍTULO II - FRACIONAMENTO FÍSICO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM TECNOSSOLOS ORIUNDOS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO**

### **RESUMO**

A matéria orgânica (MOS) é considerada um componente fundamental do solo, pois atua nos processos químicos, físicos e biológicos do mesmo e o estudo da compartimentalização de suas frações ajuda a compreender melhor sua complexidade. Esse estudo abordou a caracterização química e análise de C, N e C-lábil nas frações da MOS, em 14 áreas dos terraços dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana/MG. Foi verificado que a maioria das áreas foi classificada como fracamente ácida, e há uma tendência de incremento de MOS na área estudada como um todo, mesmo assim esse atributo permanece com classificação baixa na região. Áreas com cobertura florestal apresentaram maiores teores de C e N nas frações MOP e MOAM. As áreas 12 e 13, que eram reentrância do rio e foram aterradas pelo evento, se diferenciaram das demais em vários atributos químicos do solo: MOS, Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, e CTCe, apesar da cobertura vegetal de ambas serem distintas. No fracionamento físico, se identificou que os teores de matéria orgânica particulada - MOP foram superiores nas áreas em relação a matéria orgânica associada a minerais - MOAM, porém nas áreas 13 e 14 houve a inversão dessas frações, o que evidencia que nesses locais ocorreu um acúmulo de material mais fino, tanto pela maior distância da barragem, como pelo maior acúmulo de rejeitos. O C, N e C-lábil da fração MOAM foram mais representativos em relação a MOP da MOS e o teores de ambas as frações foram baixos, o que pode ser justificada pelo fato da área apresentar pouco aporte de matéria orgânica.

**Palavras-chave:** carbono orgânico do solo; nitrogênio orgânico do solo; carbono lábil orgânico do solo; matéria orgânica particulada; matéria orgânica associada a minerais.

## ABSTRACT

Soil organic matter (SOM) is considered a fundamental component, as it acts in the chemical, physical and biological processes of the soil and the study of the compartmentalization of its fractions helps to better understand its complexity. This study addressed the chemical characterization and analysis of C, N and C-labile in the SOM fractions, in 14 areas of the terraces of the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers five years after the Fundão dam failure, in Mariana/MG. It was verified that most of the area was classified as weakly acidic, and there is a tendency for SOM to increase in the affected area as a whole, even so this attribute remains deficient in the region. Areas 12 and 13, which were recesses of the river and were filled in, differed from the others in several soil chemical attributes: SOM, Fe, Cu, Zn, Cr, Ni, and CTCe, however the vegetation cover of both areas is different. In area 7, topsoil was used and showed a higher content of saturation by bases (V), P, and of the metals Pb, Cd, and the pH close to neutrality (7.05) for the depth of 40-60 cm, which indicates that this method can become a viable alternative for soil attributes recovery and acidity correction. In the physical fractionation, it was identified that the MOP contents were higher in the areas in relation to the MOAM, but in areas 13 and 14 there was an inversion of this granulometry, which shows that in these places there was an accumulation of finer material, both due to the longer distance of the dam, as well as the higher accumulation of tailings. The C, N and C-labile of the MOAM fraction were more representative in relation to the MOP of the MOS and the contents of both fractions were low, which can be explained by the fact that the area has little input of organic matter.

**Keywords:** soil organic carbon; soil organic nitrogen; soil organic labile carbon; particulate organic matter; organic matter associated with minerals.

## 1. INTRODUÇÃO

A matéria orgânica do solo (MOS) pode ser definida como todos os materiais orgânicos encontrados no solo que fazem parte ou fizeram parte de organismos vivos (CHENU et al., 2015). É um contínuo de materiais em vários estágios de transformação devido a processos abióticos e bióticos. Seus principais componentes são o carbono e o nitrogênio, tendo seus estoques variando em função do aporte por resíduos animais e vegetais e das perdas decorrente da oxidação pelos microrganismos do solo e também pela erosão (SOUZA et al., 2009).

Dentre os elementos que formam a MOS está em sua maior composição o carbono (C) e o nitrogênio (N). Na profundidade de solo de 0-100 cm, as estimativas globais apontam valores de 1500 Pg de C e 136 Pg de N na matéria orgânica do solo (BATJES, 2014). O C no solo também pode ser encontrado como componente mineral, em estruturas de carbonatos. Em estruturas orgânicas pode estar na forma de resíduos de animais e plantas em diversas fases de transformação ou como carvão proveniente de eventos naturais de incêndios ou aplicado ao solo como biocarvão (EMBRAPA, 2017). O N é um nutriente de dinâmica intensa no solo e sua reserva nos solos tropicais encontra-se associada, principalmente, aos componentes da matéria orgânica, correspondendo a cerca de 95% do total de N existente no solo. Alterações nas quantidades totais de N do solo podem revelar usos que implicam perdas ou ganhos de fertilidade, face à sua estreita relação com matéria orgânica do solo (EMBRAPA, 2017).

A matéria orgânica do solo demonstra também sua relevância como reservatório natural de carbono, sendo o maior compartimento terrestre desse elemento sobre a atmosfera e a biota terrestre (LAL, 2004 e 2018). Portanto, o solo torna-se de grande importância quando se refere ao seu potencial de sequestrar carbono, pois contribui na mitigação das mudanças climáticas por influenciar na emissão de gases de efeito estufa (LIMA et al., 2015).

Mudanças de uso do solo, como a conversão da vegetação natural em áreas agrícolas, pecuárias e florestais nas regiões tropicais, levam a uma rápida perda de nitrogênio e carbono orgânico do solo, devido à combinação entre calor e umidade, que facilita a decomposição; o frequente uso de queimadas, e também, ao constante revolvimento do solo levando à oxidação do carbono (CASTRO FILHO et al., 1991) levam a perdas de matéria orgânica.

Impactos ambientais também podem provocar grandes mudanças no solo e em sua qualidade, e a matéria orgânica é um importante indicador da sua qualidade. A quantificação e caracterização química da sua constituição permite o entendimento de seus processos envolvidos na ciclagem de carbono e práticas de manejo para otimizar os serviços ecossistêmicos fornecidos pelo solo (KÖGEL-KNABNER; RUMPEL, 2018). No entanto, ela é considerada o biomaterial mais complexo da Terra (MASOOM et al., 2016) e o estudo de suas frações tem se mostrado eficiente no tocante às informações sobre processos do solo envolvendo a matéria orgânica.

Diante do exposto, considerando-se a relevância da MOS sobre a qualidade do solo e processos envolvidos, o estudo das suas partes torna-se valioso. No fracionamento físico da MOS tem como parâmetro de separação o tamanho das partículas, como a matéria orgânica particulada (MOP) e a associada a minerais (MOAM). Essas frações são definidas como a matéria orgânica que se encontra com tamanho entre 2 mm e 53 $\mu$  e tamanho menor que 53 $\mu$ , respectivamente. Apresentam comportamentos que possibilitam um contraste de informações sobre propriedades da MOS e decisões quanto ao manejo (LAVALLEE; SOONG; COTRUFO, 2020).

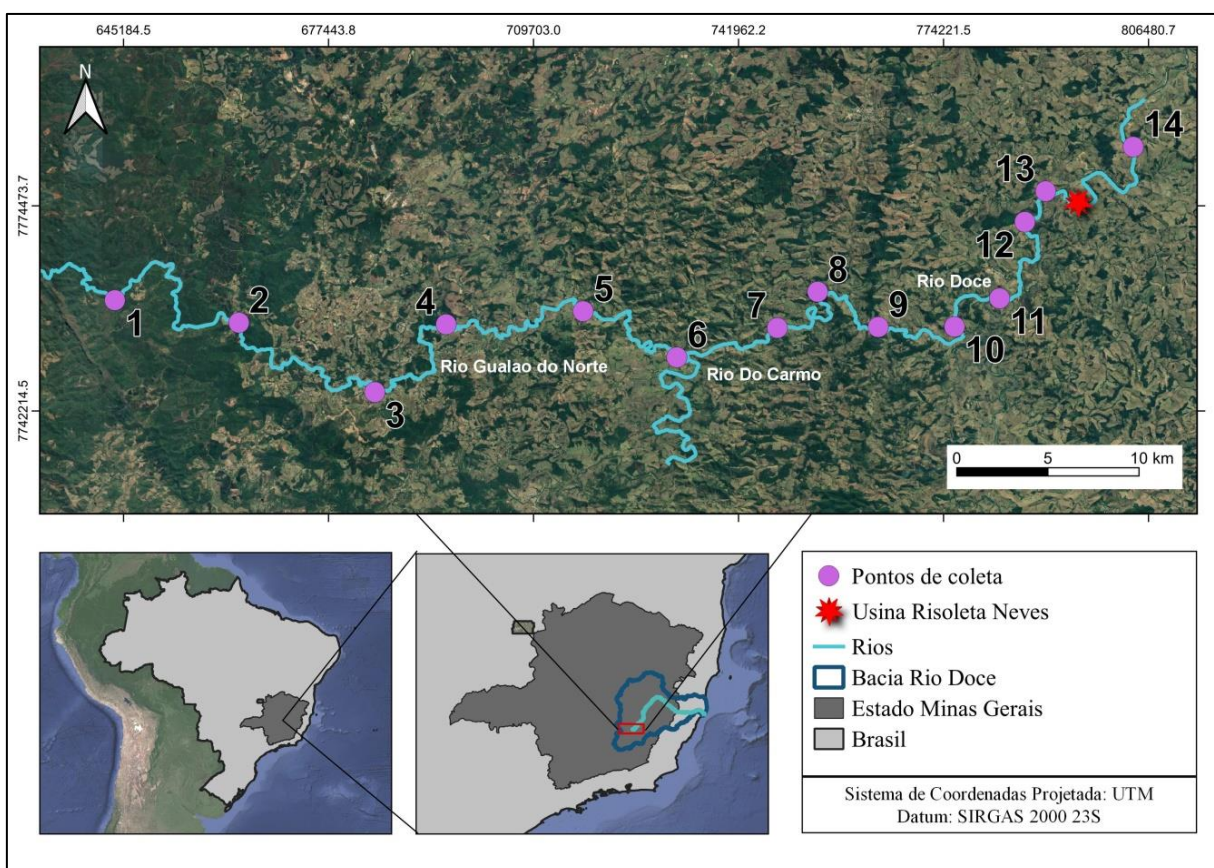
O desastre ocorrido em novembro de 2015, com o rompimento de uma barragem de rejeitos de mineração, no município de Mariana/MG, requer um contínuo controle da situação

dos solos afetados, visto que se gerou um Tecnossolo de características únicas. Ações e pesquisas com finalidade de minimizar os impactos sobre o solo e atribuir a estas áreas os usos a que antes era destinada vem ocorrendo. Assim, estudos diagnósticos dos Tecnossolos da área afetada, concentrada nos terraços fluviais dos rios a jusante da barragem, fornecem informações para sua recuperação, como denotam estudos com ênfase na matéria orgânica e transformações minerais e geoquímicas (UZAROWICZ; SKIBA, 2011; ZIKELI et al., 2002) na recuperação de estrutura e funções ecológicas do novo sistema instalado (MONSERIE et al., 2009).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada na bacia hidrográfica do Rio Doce (BHRD), compreendendo as margens dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, nos trechos das cidades de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, no estado de Minas Gerais (Figura 1). Esta região foi a que mais recebeu rejeitos uma vez que houve a sua contenção pela estrutura física da barragem da Usina Risoleta Neves, antiga “Candonga” situada na cidade de Rio Doce.



**Figura 1.** Localização da área de estudo e dos locais de coleta das amostras de solos.

Fonte: Google.

O rio Gualaxo do Norte tem suas cabeceiras próximas aos distritos de Antônio Pereira

em Ouro Preto/MG e Bento Rodrigues, Mariana/MG (SOUZA; SOBREIRA; PRADO-FILHO, 2005). Segue seu curso em direção a leste e deságua no rio do Carmo, em Barra Longa/MG (COSTA, 2001), este continua até o município de Rio Doce onde recebe a designação de rio Doce, que deságua no mar, no distrito de Regência, município de Linhares, Espírito Santo.

A BHRD compreende uma área de drenagem de cerca de 83.400 km<sup>2</sup>, dos quais 86% pertencem ao estado de Minas Gerais e o restante ao estado do Espírito Santo. (IGAM, 2012).

Morfológicamente, essa região é representada pelos Planaltos Dissecados do Centro-Sul e Leste de Minas que ocupa cerca de 70-80% da área dessas sub-bacias, e é caracterizada por colinas e cristas com vales encaixados e/ou de fundo chato, formas derivadas da dissecação fluvial atuante sobre rochas predominantemente granito-gnáissicas. As altitudes variam entre 1.000 e 1.200 m nas cristas e 500 a 800 m nos vales (COSTA, 2001).

A bacia está inserida, em 98% da sua área, dentro do Bioma Brasileiro denominado Mata Atlântica, sendo o restante pertencente ao Bioma Cerrado. Duas fitofisionomias são evidenciadas no trecho de Floresta Atlântica: a Floresta Estacional Semidecidual e a Floresta Ombrófila Densa. Sendo que em 2014, 11,6% (9.831 km<sup>2</sup>) correspondiam a remanescentes florestais (IBAMA, 2015). Os solos predominantes na região são o Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico que cobre os terraços fluviais superiores, enquanto o Latossolo Vermelho-Amarelo Dístico representando topos de morros e encostas (MARTINS et al. 2020).

Segundo a classificação de Köppen (1948) o clima da região é Cwa- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes (PEEL et al., 2007), temperatura média anual de 20,7 °C e pluviosidade média anual de 1513 mm (ALVARES et al., 2013).

## **2. 2 Descrição dos locais de coleta**

Na tabela 1, segue resumo das 14 áreas de estudo e logo abaixo um descritivo mais detalhado.

**Tabela 1.** Descrição dos pontos de coleta de solo

Área	Coordenadas geográficas		Uso pré-acidente	Cobertura do solo	Práticas de recuperação adotadas
	Oeste (X)	Sul (Y)			
1	671143,48	7759052,81	fragmento florestal	fragmento inicial	terraplanagem, adubação verde e plantio espécies florestais
2	677940,07	7757671,59	fragmento inicial	pasto com espécies florestais	plantio de espécies florestais
3	701968,26	7755394,75	fragmento inicial	gramínea pouco densa	sem intervenção aparente
4	696856,28	7758133,74	gramíneas	gramínea e arbustos	biomanta, canal de drenagem, enrocamento, etc
5	689321,31	7757455,74	pastagem\cultura agrícola	pastagem	<i>topsoil</i> de 30 cm, sem revolvimento
6	685362,00	7753559,00	pasto com espécies arbóreas	gramínea densa	plantio de espécies florestais
7	707509,24	7757040,74	pastagem	pastagem	<i>topsoil</i> de 20 cm com revolvimento
8	709747,24	7759115,73	pastagem	pastagem	NA
9	713052,83	7757024,56	fragmento inicial	fragmento inicial	regeneração natural
10	717241,44	7756989,43	fragmento inicial	fragmento inicial	regeneração natural
11	719735,60	7758607,03	fragmento inicial	fragmento inicial	regeneração natural
12	727196,64	7767325,40	reentrância do rio	arbustos	biomanta, mix de sementes, canal de drenagem
13	721182,44	7763038,37	reentrância do rio	gramínea e solo exposto	canal de drenagem
14	722350,76	7764809,33	gramíneas	gramíneas	NA

Fonte: a autora

**Área 1** : localizada no município de Mariana, região onde havia a antiga Pequena Central Hidroelétrica (PCH) Bicas, que foi destruída com o evento de rompimento, na margem direita do rio Gualaxo do Norte. A operação Watu I (agosto/2016) observou que na região havia acúmulo de materiais lenhosos e sólidos carregados e presença de solo exposto. A área sofreu intervenções na fase emergencial logo após o evento, sendo terraplanada e aplicado mix de sementes de gramíneas e leguminosas (adubação verde) sobre as áreas recobertas por rejeito.

Posteriormente, a operação Watu VIII (novembro/2019) verificou que o processo de plantio de mudas de espécies florestais nativas aconteceu, porém com baixa efetividade, apresentando falhas de plantio. Observou-se também a presença de um horizonte orgânico formado a partir da incorporação da biomassa da adubação verde. Permaneceu e ainda se mantém o capim *urochloa*, sendo atualmente predominante mais próximo da calha do rio, porém após cerca de 35 metros, se encontra a área cercada de recomposição com espécies diversas e gramíneas. Havia cavalos pastando no local. Anterior ao evento de rompimento, essa área era toda vegetada.



**Área 2:** propriedade particular a bastante tempo, próxima à ponte do Gama, onde foi plantado gramíneas na margem do rio Gualaxo do Norte, além de algumas fileiras de palmeiras, ainda em desenvolvimento, para fins de paisagismo. No restante da área, somente presença de gramíneas. Não utilizada para pastejo de animais de grande porte. Anterior ao evento havia ali presença de árvores e arbustos.

**Área 3:** próximo ao distrito de Paracatu de Baixo, terraço de pequena extensão, as margens de estrada, com presença de gramíneas. Em terreno vizinho havia presença de área cercada com aparente intervenção para recomposição florestal. Existência de enrocamento com pedras na margem do rio, o que indica que já houve obras de contenção de processos erosivos nas redondezas. Anterior ao rompimento há indícios de que já houve cobertura vegetal nessa área.

**Área 4:** área de curva do rio Gualaxo do Norte, apresentando várias obras de intervenção de recuperação aparente, como enrocamento na margem do rio, utilização de biomanta, canal de drenagem feito com pedras perpendicular ao rio. Vegetação composta por diversas gramíneas e poucos arbustos. Bem próximo à montante, é possível visualizar um córrego desaguando no rio Gualaxo. Não há registros de que já houve uma vegetação desenvolvida ou mata ciliar desde 2008.

**Área 5:** propriedade particular, próximo ao distrito de Gesteira. Área usada para pastejo, com presença de esterco de vaca na superfície. Foi feita cobertura de cerca de 30 cm com solo de outro local (*topsoil*). É possível visualizar na imagem trechos de terreno encharcado, formando pequenas áreas de acúmulo superficial de água, ao final da área do terraço. O proprietário também utiliza área para plantio de monocultura, revezando com a utilização para pasto. Predomínio de braquiária (*urochloa spp*).

**Área 6:** área de curva do rio Gualaxo do Norte, um pouco antes do encontro com o rio Carmo, na cidade de Barra Longa/MG. Predominância de gramíneas, constituindo um pasto bastante denso e desenvolvido, área usada como pastagem. Presença de algumas mudas e muitas covas vazias, aparentemente uma tentativa de recomposição ocorreu, porém com dificuldades de desenvolvimento devido a presença de muita gramínea. Animais presentes. Essa área sofreu alterações na sua cobertura ao longo do tempo, variando entre pasto e vegetação em estágio inicial no período anterior ao evento de rompimento.

**Área 7:** propriedade particular, onde foi incorporado solo de outro local próximo da parte alta da bacia que não foi influenciada diretamente pelo rompimento da barragem (*topsoil*), no terraço em cerca de 20 cm de profundidade. Essa área é utilizada para pastejo por muitos anos, e, portanto, conta com a presença de animais. Vegetação predominante de gramínea, com alguns arbustos esparsos, mamonas (*Ricinus communis L.*) e lobeira (*Solanum lycocarpum*).

**Área 8:** área de meandro do rio do Carmo, terraço extenso de uma propriedade particular aparentemente usada como pasto, com a presença somente de gramíneas. Historicamente a área sempre se manteve com esse tipo de cobertura e não apresenta área de vegetação arbustiva por pelo menos, o ano de 2002.

**Área 9:** localizada após a fazenda Rancho Alegre, as margens do rio do Carmo área com relevo declivoso, e vegetação heterogênea, onde mais próximo do rio, a cobertura vegetal era formada por poucos arbustos e cerca de 10 metros acima, sentido interior do terraço, presença de espécies arbóreas como palmeiras, bambu, lobeira (*Solanum lycocarpum*) e gramíneas. O restante da área era composta somente por gramíneas. Os anos anteriores ao evento de rompimento (a partir de 2002), esta área não apresentou significativa mudança na paisagem e mante-se aparentemente estável do ponto de vista visual da estrutura da vegetação.

**Área 10:** primeiro ponto de coleta localizado no rio Doce, onde a vegetação era composta por gramíneas e regeneração natural em estágio sucessional inicial, representada

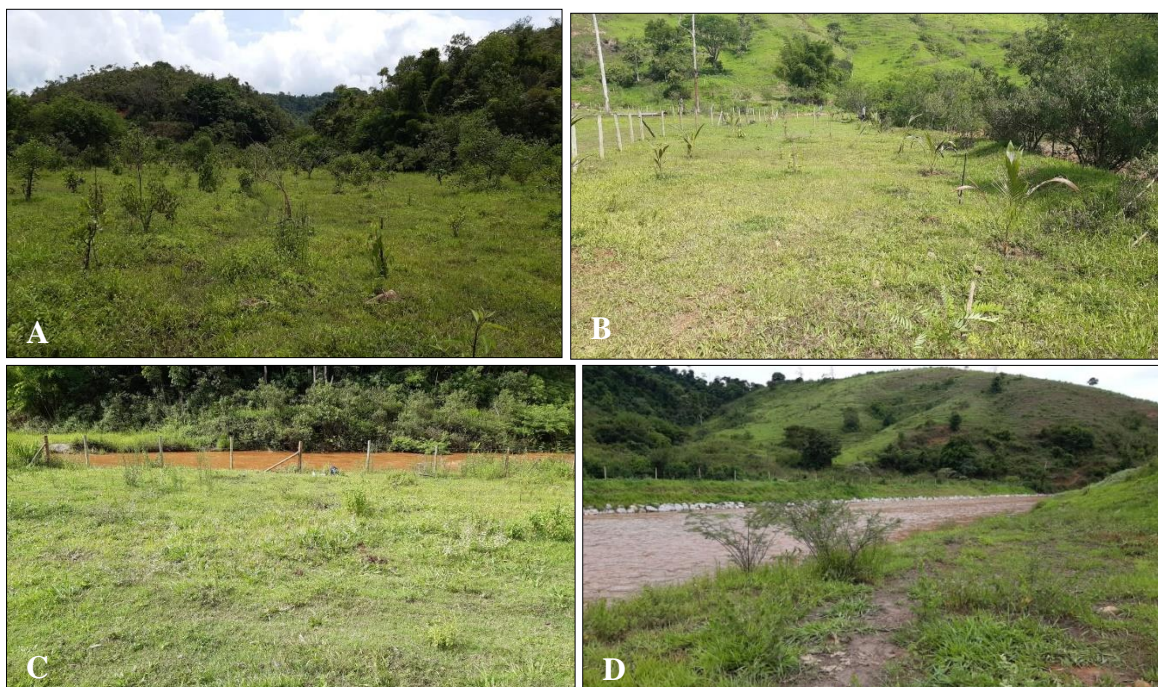
por espécies como lobeira (*Solanum lycocarpum*), sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*) e muitos cipós. Aparentemente a área não pertence a nenhum proprietário, e anterior ao rompimento da barragem, sofreu muitas variações com relação á vegetação, variando em solo exposto, gramíneas e regeneração natural inicial.

**Área 11:** propriedade particular antiga na região rural da cidade de Rio Doce, sem nenhuma intervenção onde foram realizados os estudos. Havia predomínio de regeneração natural, com a presença de mamona próximo a margem do rio. Anterior ao rompimento da barragem, o proprietário não utilizava essa área para nenhuma finalidade, mas não havia ali uma mata ciliar desenvolvida.

**Área 12:** local de difícil acesso, onde aparentemente houve intervenção para recomposição, com utilização de biomanta em alguns pontos. Vegetação densa composta por arbustos e gramíneas. Anterior ao rompimento da barragem, essa área era uma reentrância do rio e, portanto, preenchida pela água. Tecno solos estão em desenvolvimento neste local a partir do material proveniente do evento.

**Área 13:** local isolado, de difícil acesso e obras de intervenção e existência de pedregulhos. Lagoas presente logo no início do terraço e, portanto, as amostras foram coletadas após essa região. A vegetação era composta por gramíneas esparsas e áreas de solo exposto. Acima da região do terraço era possível visualizar uma extensa área declivosa onde foi incluído pedras de tamanho grande, aparentemente com a intenção de direcionar o escoamento de água de chuva. Anterior ao evento de rompimento, essa região era uma reentrância do rio, portanto preenchida por água e não havia solo. Um novo cenário foi criado e surgiu um Tecno solo formado a partir da lama do evento e possível rejeito que estava na calha do rio que pode ter sido depositado nesse espaço.

**Área 14:** terraço extenso, localizado no município de Santa Cruz do Escalvado, após a barragem da Usina de Risoleta Neves. Presença de pessoas pescando no local e extração de areia da calha do rio na outra margem. Vegetação com gramíneas. Anterior ao desastre, essa área já não apresentava vegetação nativa ou mata ciliar.





**Figura 2.** A) Área 1, evidenciando trecho de recomposição. B) Plantio de palmeiras em trecho da área 2. C) Terraço da área 3. D) Trecho de coleta da área 4, podendo ser visualizado enroncamento ao fundo. E) Área de coleta 5. F) Terraço extenso com presença de gramínea,

área 6. G) Terraço com predomínio de gramíneas, área 7. H) Área de coleta 8. I) Ponto de coleta 9, terreno declivoso. J) Ponto de coleta 10, presença de vegetação inicial. K) Área 11, evidenciando mamonas. L) Área 12, surgida após evento de rompimento. M) Área 13, surgida após evento de rompimento. N) Área de coleta 14, após Usina de Risoleta Neves.

Fonte: a autora.

### **2.3 Amostragem**

As amostras de solo foram coletadas no mês dezembro de 2020 e janeiro de 2021, metade das áreas por período. Para a realização de análises químicas e da MOS fracionada, em 14 áreas de terraços fluviais nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. As áreas foram distribuídas de forma que seis estão localizadas as margens do Rio Gualaxo do Norte, três no Rio do Carmo e cinco no Rio Doce.

Em cada área foi marcado um transecto perpendicular ao rio contendo três pontos de coleta, variando de 10 a 40 m de distância considerando a extensão do terraço, gerando amostras compostas de três pontos do transecto por área, para cada profundidade. Foi utilizado um trado do tipo holandês para coleta de amostras deformadas.

### **2.4 Análises química de solo**

As amostras coletadas foram secas ao ar, posteriormente destorroadas e peneiradas em peneira de 2 mm de abertura de malha para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), este material foi submetido a análises de acordo com os métodos descritos no manual de métodos e análises de solo (EMBRAPA, 2017). As análises foram realizadas no laboratório de Fertilidade do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

O pH foi determinado em água deionizada e solução de KCl 1 mol.L<sup>-1</sup> em suspensão solo/solução na proporção 1:2,5. Os cátions trocáveis foram extraídos por KCl 1 mol.L<sup>-1</sup> e quantificados por espectrometria de absorção atômica (Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>) e por titulometria com NaOH (Al<sup>3+</sup>). A acidez potencial foi extraída com 0,5 mol.L<sup>-1</sup> de Ca (OAc)<sub>2</sub>, tamponado a pH 7,0 e quantificado por titulação com 0,0606 mol.L<sup>-1</sup> de NaOH. K e P foram extraídos com Mehlich<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 2017). Os micronutrientes Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup> disponíveis foram extraídos pelo extrator Mehlich<sup>-1</sup> e determinados por absorção atômica. O teor de matéria orgânica (MO) foi estimado após a determinação do C orgânico pelo método Walkley Black (1934), sem aquecimento e, o nitrogênio total (NT) estimado através do método Kjeldahl. O Fósforo remanescente (P-rem) em cloreto de cálcio 0,01 mol L<sup>-1</sup> com concentração inicial de 60 mg L<sup>-1</sup> de P foi determinado segundo De filippo; Ribeiro (1997). Os teores de metais pesados foram determinados a partir do uso do extrator Mehlich<sup>-1</sup>.

### **2.5 Fracionamento físico da MOS**

Para o fracionamento físico da MOS, as amostras de solo foram secas para obtenção da TFSA e peneiradas (<2 mm), e posteriormente as frações foram obtidas conforme os procedimentos descritos por Cambardella & Elliott (1992). Para isto, foram utilizados 10 g de solo com 30 ml de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L<sup>-1</sup>), por 15 h em um agitador horizontal. Realizou-se em seguida o peneiramento úmido com uma peneira de 53 µm de malha, sendo que o material retido corresponde a matéria orgânica particulada (MOP), e a fração que passou pela peneira, é a matéria orgânica associada a minerais (MOAM). Essas frações foram secas em estufa a uma temperatura de 60° C, até evaporação completa da água em suspensão e em seguida, foram trituradas com um almofariz e pilão para serem passadas através de peneira de 60 mesh a fim de determinar os teores de C e N.

### 2.5.1 Determinação de C, N e C-lábil

O carbono das frações MOP e MOAM foi determinado conforme o método de Yeomans & Bremner (1988) com a oxidação do C com solução de dicromato de potássio ( $0,167 \text{ mol L}^{-1}$ ), e aquecimento em bloco digestor a  $170^\circ \text{ C}$ . A determinação do C orgânico ocorre indiretamente em função da reação do carbono presente nos compostos orgânicos com o dicromato de potássio. O cálculo do teor de C orgânico é efetuado pelo volume de dicromato de potássio utilizado na oxidação da matéria orgânica, o qual é obtido pela diferença entre o volume de uma prova em branco e da amostra pela titulação com a solução de sulfato ferroso amoniacal (EMBRAPA, 2017).

O nitrogênio das frações foi determinado conforme o método Kjeldahl (BREMNER e MULVANY, 1982; TEDESCO et al., 1995). O N da matéria orgânica do solo é mineralizado até amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) pela oxidação com ácido sulfúrico, processo conhecido como digestão Kjeldahl. Após a digestão, o N amoniacal é submetido a destilação a vapor após forte alcalinização com adição de NaOH, o que faz com que o  $\text{NH}_4^+$  se converta à amônia ( $\text{NH}_3$ ), a qual é arrastada pelo vapor d'água e condensada até alcançar a solução de ácido bórico. Em contato com o meio ácido, a  $\text{NH}_3$  é protonada, formando  $\text{NH}_4^+$ , fazendo com que o pH da solução se eleve. A solução de ácido bórico contém indicadores que permitem visualizar o processo pela alteração de cor vermelha/violeta para verde azulado (EMBRAPA, 2017).

A quantificação do N existente na solução de ácido bórico ocorre pela titulação da solução com o ácido sulfúrico, até que se observe o retorno da cor vermelha, que corresponde ao ponto de viragem para condição mais ácida. A quantidade de N existente é proporcional à quantidade de ácido gasta na titulação (EMBRAPA, 2017).

Para determinação do teor de C-lábil nas frações, foi utilizado o método via oxidação com permanganato de potássio. Para tal, foram identificados dois tubos falcon encapados de 50 mL para cada amostra. Em um dos tubos adiciona-se 0,8 gramas de TFSA (100 mesh), 18 mL de água deionizada e 2,0 mL da solução estoque  $0,33 \text{ mol L}^{-1}$  de  $\text{KMnO}_4$ . Os tubos foram tampados imediatamente e agitados manualmente de forma vigorosa por 2 segundos para assegurar a dispersão de partículas dentro da solução. Os tubos controles, chamados “brancos” são preparados da mesma forma, porém sem o solo.

Em seguida os tubos foram colocados em mesa agitadora (140 rpm) durante 30 minutos, e na sequência deixados em repouso por 10 min para decantação. Posteriormente adicionou-se 49,5 mL de água deionizada no segundo conjunto de tubos, e transferidos 0,5 mL do tubo que estava em decantação. O mesmo procedimento foi realizado com o “branco” e com os quatro pontos da curva de calibração.

A leitura foi realizada em espectrofotômetro de absorção atômica com um comprimento de onda de 565 nm no Laboratório de Matéria Orgânica e Resíduos do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa.

Foram realizadas três repetições em laboratório para cada uma das amostras analisadas de C, N e C-lábil fracionado.

Pelos teores encontrados de C-lábil serem muito baixos, optou-se por calcular os valores dos limites de detecção (LD) e limite de quantificação (LQ) da metodologia utilizada para quantificação do C-lábil. Os limites foram avaliados segundo os critérios preconizados pela *International Conference on Harmonisation* - ICH (ICH, 1996).

Se define limite de detecção como a menor concentração do analito que pode ser detectada em uma amostra, mas não, necessariamente, quantificada sob as condições estabelecidas do teste. Já o limite de quantificação é como a concentração mais baixa de um analito que pode ser determinada com precisão aceitável e exatidão, nas condições declaradas do teste (NATIONAL ASSOCIATION OF TESTING AUTHORITIES - NATA, 1997).

Os limites de detecção (a) e quantificação (b) foram determinados matematicamente a partir da curva analítica do permanganato de potássio. O cálculo para determinar os valores correspondentes ao LD e LQ, baseia-se no desvio padrão do residual da linha de regressão e sua relação com a inclinação da reta (coeficiente angular) na curva analítica, seguindo as relações:

$$(a) LD = (D.P./I) \times 3,3$$

$$(b) LQ = (D.P./I) \times 10,0$$

D.P.: desvio padrão do intercepto com relação ao eixo dos Y;

I: valor da inclinação da curva analítica.

## **2.6 Análise estatística**

As Análises de Componentes Principais (PCA) foram produzidas usando o software R (R CORE TEAM, 2019) através do pacote stats (R CORE TEAM, 2013). A correlação foi aplicada com valores de probabilidade de 5% ( $p \leq 0,05$ ). Foram utilizadas as variáveis de atributos químicos e da matéria orgânica do solo para as 14 áreas de estudo, sendo uma PCA para cada profundidade, utilizando-se de dois eixos (PCA1 e PCA2), visto que foram suficientes para analisar os dados de forma satisfatória.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1 Análise química do solo**

A análise química do solo é apresentada na Tabela 2, para as 14 amostras de estudo e diferentes profundidades (1, 2 e 3).

**Tabela 2.** Análise química do solo para as três profundidades (1, 2 e 3).

Área	pH H <sub>2</sub> O	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	t	T	V	m	MO	P-Rem	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	P	Cd	Pb
	-----cmolc/dm <sup>3</sup> -----						-- % --		dag/kg	mg/L	-----mg/dm <sup>3</sup> -----										
<b>P1-1</b>	6,26	0,75	0,12	0,2	2,3	0,97	1,17	3,27	44,7	15,5	1,16	27,23	1,67	266,87	190,47	1,19	0,00	0,38	2,10	0,07	0,41
<b>P1-2</b>	7,13	0,84	0,09	0	0,5	0,99	0,99	1,49	69,4	0	0,20	32,50	1,38	241,55	158,60	1,17	0,00	0,18	3,30	0,10	0,04
<b>P2-1</b>	6,3	1,16	0,27	0	1,1	1,49	1,49	2,59	59,87	0	0,63	25,43	1,21	97,13	180,27	0,95	0,00	0,17	1,57	0,01	1,04
<b>P2-2</b>	6,79	1,45	0,26	0	1	1,78	1,78	2,78	67,33	0	0,63	30,60	1,17	115,20	212,53	1,42	0,02	0,14	3,07	0,10	0,63
<b>P3-1</b>	6,34	1,56	0,27	0	1,03	1,89	1,89	2,92	64,87	0	0,76	32,17	1,05	214,70	128,97	1,72	0,11	1,05	1,97	0,49	0,82
<b>P3-2</b>	6,17	0,84	0,2	0	0,87	1,09	1,09	1,96	56	0	0,49	32,77	0,83	126,47	90,40	1,48	0,06	0,85	1,07	0,46	1,06
<b>P3-3</b>	5,72	0,55	0,1	0	1,17	0,68	0,68	1,85	39,63	0	0,31	30,97	0,91	120,30	99,20	1,16	0,08	0,97	1,40	0,38	1,29
<b>P4-1</b>	5,9	1,3	0,1	0	1,23	1,44	1,44	2,67	56,18	0	0,74	33,55	0,67	87,90	93,78	1,19	0,06	0,44	3,15	0,38	0,80
<b>P4-2</b>	5,74	0,92	0,09	0	1,55	1,09	1,09	2,64	42,6	0	0,61	28,60	0,67	72,85	93,50	1,54	0,03	0,13	2,05	0,41	0,77
<b>P4-3</b>	6,22	0,75	0,09	0	1	0,94	0,94	1,94	48,5	0	0,54	41,60	0,78	118,60	107,40	1,38	0,00	0,24	0,60	0,31	0,00
<b>P5-1</b>	6,4	1,39	0,27	0,16	1,37	1,91	2,07	3,27	69,3	10,47	0,94	24,60	1,08	54,67	92,33	0,72	0,06	0,20	3,40	0,18	0,73
<b>P5-2</b>	6,71	1,1	0,09	0	0,4	1,27	1,27	1,67	78,13	0	0,18	31,43	0,88	84,13	102,13	1,14	0,13	0,47	5,20	0,17	0,22
<b>P5-3</b>	6,8	1,25	0,13	0	0,33	1,42	1,42	1,75	88,53	0	0,36	32,97	1,03	89,43	132,60	1,80	0,11	0,32	4,90	0,24	0,54
<b>P6-1</b>	6,47	0,88	0,25	0	0,93	1,35	1,35	2,29	60,47	0	0,49	40,30	0,98	145,57	219,67	1,14	0,03	0,33	6,60	0,17	0,20
<b>P6-2</b>	6,76	0,99	0,18	0	0,33	1,29	1,29	1,62	81,2	0	0,22	36,60	0,84	137,60	169,50	0,99	0,04	0,19	5,40	0,23	0,00
<b>P6-3</b>	6,83	1,32	0,13	0	0,3	1,51	1,51	1,81	85,63	0	0,31	38,53	0,82	129,27	183,57	1,37	0,01	0,17	4,73	0,18	0,02
<b>P7-1</b>	6,38	1,07	0,47	0	0,97	1,94	1,94	2,91	69,5	0	0,90	32,10	1,74	84,43	228,93	1,35	0,29	1,05	3,23	0,41	1,63
<b>P7-2</b>	6,88	1	0,11	0	0,6	1,3	1,3	1,9	74,3	0	0,31	33,33	1,05	88,27	127,50	1,72	0,46	1,35	6,87	0,51	1,43
<b>P7-3</b>	7,05	1,85	0,37	0	0,13	2,63	2,63	2,76	93,33	0	0,45	35,27	1,59	107,37	227,30	3,66	0,48	1,21	35,70	0,56	1,03

**Tabela 2.** Análise química do solo para as três profundidades (1, 2 e 3) (continuação).

Área	pH H <sub>2</sub> O	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H+Al	SB	t	T	V	m	MO	P-Rem	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	P	Cd	Pb
	-----cmolc/dm <sup>3</sup> -----						-- % --		dag/kg	mg/L	----- mg/dm <sup>3</sup> -----										
<b>P8-1</b>	6,26	0,88	0,2	0,03	1,07	1,09	1,12	2,16	64,1	2,2	0,72	32,20	1,33	79,40	131,40	1,80	0,29	1,10	4,77	0,51	1,86
<b>P8-2</b>	6,12	1,31	0,19	0,13	1,6	1,51	1,64	3,11	61,97	7,87	0,94	26,50	2,01	81,13	256,83	2,23	0,37	1,59	4,27	0,53	1,49
<b>P8-3</b>	6	1,55	0,19	0,03	1,8	1,76	1,79	3,56	56,5	2	0,89	28,07	2,54	91,17	329,37	3,07	0,45	1,86	3,23	0,59	1,16
<b>P9-1</b>	7,35	0,87	0,14	0	0,67	1,06	1,06	1,73	58,9	0	0,13	42,03	0,98	84,73	155,53	0,76	0,60	0,58	4,30	0,07	0,62
<b>P9-2</b>	7,2	1,95	0,27	0	0,9	2,27	2,27	3,17	70,8	0	0,27	36,10	1,92	103,40	195,23	1,33	0,73	1,07	2,83	0,14	1,27
<b>P9-3?</b>	6,9	1,89	0,54	0	0,8	2,48	2,48	3,28	76,3	0	0,27	40,50	2,76	88,05	212,35	1,55	0,72	1,68	2,90	0,09	0,91
<b>P10-1</b>	6,19	1,68	0,77	0	2,1	2,52	2,52	4,62	52,97	0	1,42	38,93	2,93	92,97	258,10	2,78	0,75	1,69	3,60	0,20	0,92
<b>P10-2</b>	6,13	1,65	0,47	0	2,63	2,15	2,15	4,79	47,9	0	1,15	32,70	2,69	74,60	127,77	1,28	0,70	1,46	2,10	0,17	1,02
<b>P10-3</b>	6,41	1,1	0,3	0,03	2,47	1,42	1,46	3,89	41,37	2,53	0,93	33,90	2,57	63,57	111,17	1,92	0,64	1,39	2,30	0,19	1,29
<b>P11-1</b>	6,42	1,69	0,9	0	1,07	3,39	3,39	4,45	65,2	0	1,06	45,53	2,57	118,03	275,93	4,29	0,77	1,24	17,77	0,24	1,11
<b>P11-2</b>	6,24	1,42	0,75	0	1,07	2,91	2,91	3,97	64,6	0	0,80	41,73	2,94	132,50	355,60	3,93	0,86	1,44	10,83	0,21	0,79
<b>P11-3</b>	5,72	0,91	0,14	0	1,1	1,13	1,13	2,23	50,7	0	0,53	43,60	2,09	83,50	352,20	1,88	0,96	1,73	11,50	0,22	1,00
<b>P12-1</b>	6,26	3,97	1,28	0	1,97	5,34	5,34	7,3	72,97	0	2,75	16,07	9,18	432,43	1528,57	8,16	2,03	3,48	8,50	0,32	1,20
<b>P12-2</b>	6,34	3,3	1,08	0	1,97	4,52	4,52	6,48	70,07	0	2,21	14,53	8,09	496,33	1508,10	8,09	1,65	2,59	8,77	0,34	0,75
<b>P12-3</b>	6,46	3,11	1,22	0	1,87	4,47	4,47	6,33	71,17	0	1,86	16,03	7,44	516,97	1319,43	7,80	1,70	2,51	8,80	0,30	1,11
<b>P13-1</b>	6,39	3,49	1,08	0	1,73	4,9	4,9	6,63	74,07	0	1,51	26,67	5,95	384,27	957,00	4,80	1,54	2,11	12,63	0,27	1,03
<b>P13-2</b>	6,35	2,35	0,93	0	2,3	3,45	4,32	5,75	60	0	1,46	21,10	8,49	753,60	2717,40	9,33	2,43	2,80	10,00	0,34	1,19
<b>P13-3</b>	6,51	2	0,69	0	1,4	2,87	2,87	4,27	67,2	0	0,93	24,80	5,77	730,50	1485,90	5,18	1,47	2,22	9,90	0,37	1,01
<b>P14-1</b>	6,04	1,48	0,45	0	1,1	2,01	2,01	3,11	65,8	0	0,71	43,13	2,82	124,53	499,67	3,28	0,92	1,39	12,73	0,25	0,69
<b>P14-2</b>	6,34	1,39	0,31	0	1	1,77	1,77	2,77	65,4	0	0,36	45,87	2,65	61,33	265,87	1,87	0,86	1,19	16,33	0,30	1,09
<b>P14-3</b>	6,25	1,3	0,26	0	0,83	1,62	1,62	2,46	66,8	0	0,27	37,97	2,25	64,27	246,03	1,84	0,84	1,34	13,37	0,26	0,93



P: teor de fósforo; Na<sup>+</sup>: teor de sódio; Ca<sup>+2</sup>: teor de cálcio; Mg<sup>+2</sup>: teor de magnésio; Al<sup>+3</sup>: teor de alumínio trocável; H + Al: acidez potencial; SB: soma de bases; t: CTC efetiva; T: CTC a pH 7,0; V: saturação por bases; m: saturação por Al<sup>+3</sup>; MO: matéria orgânica; P-Rem: fósforo remanescente; Cu: cobre; Mn: manganês; Fe: Ferro; Zn: zinco; Cr: cromo; Ni: níquel; Cd: cádmio; Pb: chumbo.

Pela classificação da Embrapa (LUZ; FERREIRA; BEZERRA, 2002), os valores de pH da grande maioria dos pontos coletados são considerados como fracamente ácidos. Quatro pontos de coleta são classificados como muito ácidos: P3-3, P11-3, P4-2 e P4-1, nessa ordem decrescente de acidez. Nenhum ponto foi classificado como fortemente ácido.

Em se tratando de acidez potencial (H+Al), nenhum ponto foi classificado como alto pela mesma classificação. Para os teores de Al<sup>+3</sup> todas as áreas são classificadas como baixo. Referente a saturação por alumínio (m), todas as áreas foram consideradas com teor baixo, sendo a P1-1 com teores de m um pouco maiores, assim como a área 8.

A saturação por bases (V) foi considerada muito alta somente em P7-3, sendo a grande maioria das áreas classificadas com teor médio, seguido de teor alto. Para a soma de bases (SB), somente o ponto P12-1 é alto pela classificação, sendo maioria das áreas com teor baixo. Uma única área, P10, com predominância de vegetação primária em estágio inicial, foi classificada como distrófica (V < 50%) nas três profundidades. A natureza pobre quimicamente do rejeito pode explicar o baixo teor de SB apresentado pelas áreas afetadas (SCHAEFER et al, 2016).

Para teores de P, a maioria das áreas foi classificada como baixo para esse elemento, apenas o ponto P7-3 o teor foi considerado alto, onde a cobertura do solo é composta por pastagem, e houve como tratamento de recuperação a inclusão de *topsoil* nos primeiros 20 cm de profundidade.

Para a CTC efetiva (t), a maioria das áreas de estudo é baixa pela classificação da Embrapa, sendo média nas áreas 12, 13 e 11, nessa ordem. Já a CTC potencial (T), está na classificação baixa na maioria das áreas. Alguns pontos foram classificados como médio, porém nenhum apresentou alta CTC.

Para os metais pesados Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, os parâmetros encontrados nas áreas de estudo são menores do que os estabelecidos nos Valores de Referência de Qualidade dos Solos - VQRs pela Deliberação Normativa Conselho Estadual De Política Ambiental - COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011 (COPAM, 2011), no que concerne a concentração no solo que pode gerar riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana e ao meio ambiente. Entretanto, o elemento Cádmio apresentou valores acima do valor de referência para o limite máximo indicado pela mesma deliberação normativa.

A Tabela 3 mostra o valor máximo encontrado para esses elementos nas áreas de estudo e a respectiva área e profundidade (1, 2 e 3), assim como as maiores áreas de concentração e compara com os valores de limite máximo de referência indicados pela COPAM.

**Tabela 3.** Comparativo de valores de referência COPAM e amostras de solo das áreas de estudo.

Metais	COPAM (2011)	Área de estudo	Ponto	Maior concentração
	-----mg.kg <sup>-1</sup> -----			
Cu	49	9,18	12-1	12 e 13
Zn	46,5	9,33	13-2	12 e 13
Cr	75	2,43	13-2	13 e 12
Ni	21,5	3,48	12-1	12 e 13
Pb	19,5	1,86	8-1	8 e 7
Cd	<0,4	0,59	8-3	8 e 7

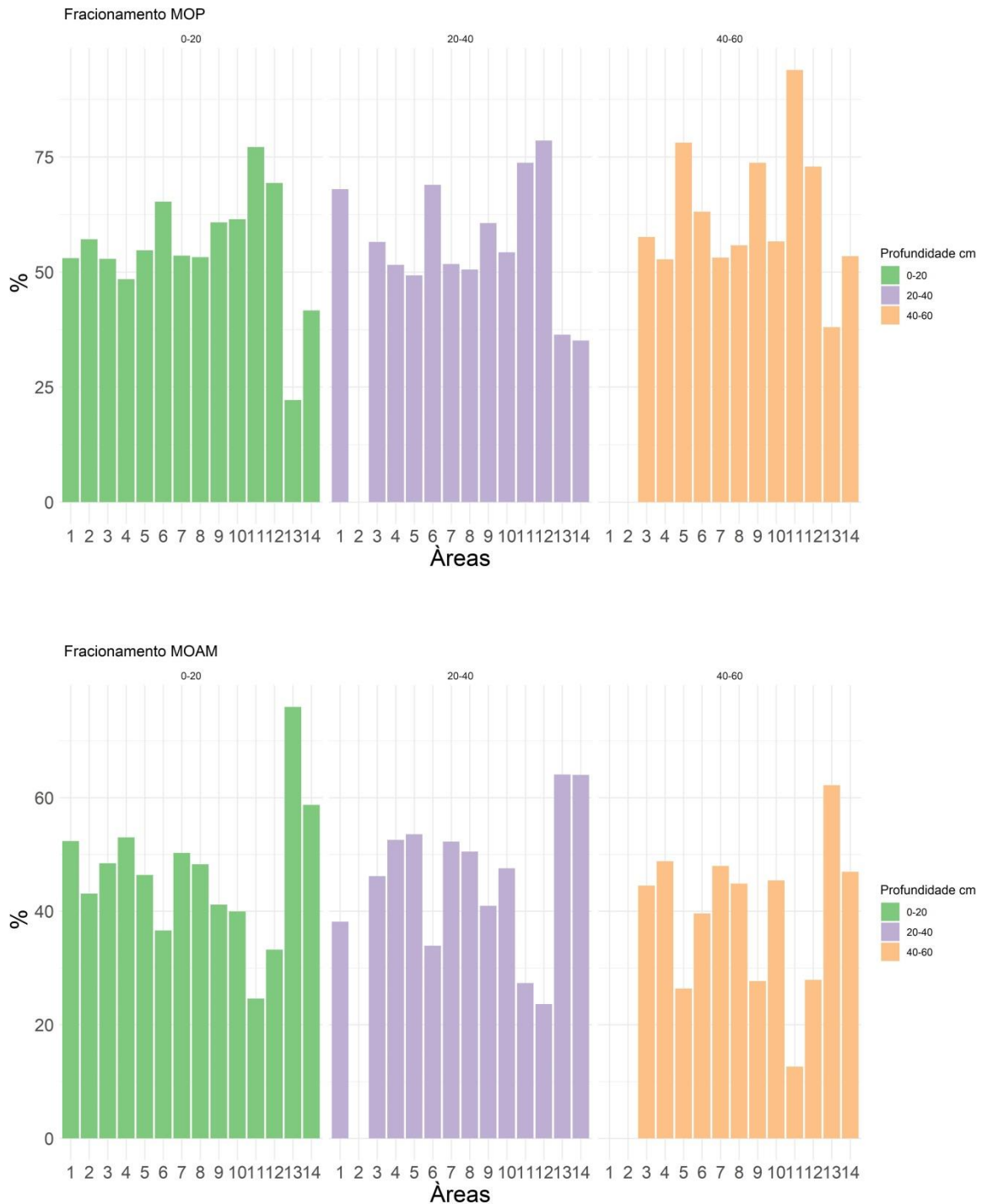
Os maiores teores de Cu são encontrados nas áreas 12 e 13, respectivamente, os mais próximos de Candonga, onde ocorreu o maior acúmulo de rejeitos e apresentam problemas de drenagem. Os elementos Zn, Cr e Ni, também seguem o mesmo padrão e são observados em maiores concentrações nessas mesmas áreas. Já para Pb e Cd as áreas 8 e 7 são as que contêm maiores concentrações, nessa ordem. Ambas as áreas estão nos terraços do rio do Carmo, com predominância de gramíneas e usadas como pastagem, porém na área 7 houve a inclusão de *topsoil* proveniente de outro local não afetado pelo rompimento. Já o ponto 8 trata-se de área onde a deposição do rejeito não foi tão intensa.

Referente aos valores de MOS total, onde há maiores teores são na área 12, 10 e 13 de forma decrescente de profundidade. Vale destacar que na área 12 havia presença de uma vegetação densa composta por arbustos e gramíneas enquanto que a área 10 ocorria regeneração natural, o que explica o maior incremento de MOS nessas áreas.

Porém, nenhuma área encontra-se com teor alto de MO pela classificação da Embrapa. Todos os pontos de coleta obtiveram teor baixo de MO, com exceção da área 12, com teor médio, em ordem decrescente de profundidade.

### 3. 2 Fracionamento da MOS

Apresenta-se na Figura 3, os teores em percentual de massa de MOAM e MOP, onde somatória das frações é igual a 100% da MOS, por profundidade (0-20, 20-40 e 40-60 cm) nas 14 áreas de estudo. Algumas áreas, como a 2, não foi possível realizar a coleta em todas as profundidades, o que gerou lacunas nos gráficos apresentados.



**Figura 3.** Percentual MOAM e MOP

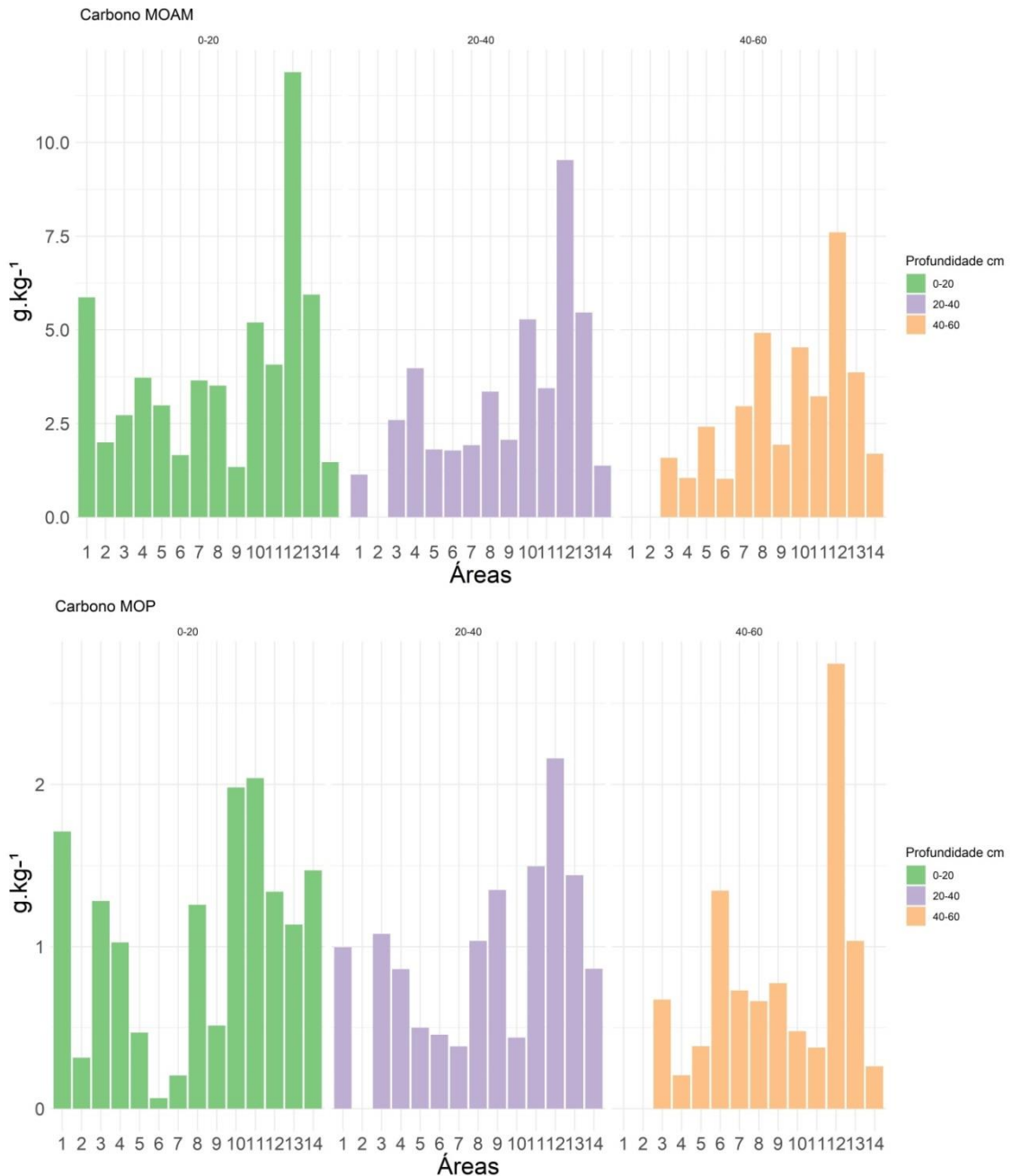
Observa-se que de maneira geral os teores de MOP foram superiores nas áreas em relação a MOAM, onde os pontos 11(40-60 cm), 12 (20-40 cm), 5 (40-60 cm), e 11 (0-20 cm) obtiveram destaque, portanto as áreas com maior teor de MOP foi a 11, seguida da 12.

Para a MOAM observa-se um decréscimo do teor da superfície para a profundidade, onde maiores valores foram encontrados nas áreas 13 e 14, apresentando valores de até 76% e 64%, respectivamente. Para essas áreas, a primeira profundidade é a mais significativa no teor de MOAM, havendo decréscimo da superfície para a subsuperfície, exceto a terceira profundidade da 14, com MOP em evidência. Observa-se a inversão de granulometria nas áreas 13 e 14, onde teores de MOAM foram superiores a MOP, se diferenciando das demais

áreas, o que evidencia que nesses locais ocorreu um acúmulo de material mais fino, tanto pela maior distância da barragem, como pelo maior acúmulo de rejeitos nessas áreas. Apesar de estarem próximas geograficamente, a área 13 é anterior e bem próxima à usina Risoleta Neves (Candonga), e a 14 localizada após a usina. Área 13 sofre com problemas de drenagem, evidenciada pelo acúmulo de água na superfície do terraço o que possivelmente explica maiores teores de MOS e o maior teor de ferro entre todas as áreas.

### 3.3 Carbono das frações da MOS: C-MOP e C-MOAM

Os teores de carbono em C-MOP e C-MOAM encontrados na MOS são apresentados na Figura 4 para as três profundidades



**Figura 4.** Teores de Carbono na matéria orgânica do solo.

Em sua maioria, os teores de carbono orgânico tiveram tendência geral de diminuição com o aumento da profundidade, visto que a camada superficial do solo é a zona onde a deposição de materiais orgânicos ocorre com maior intensidade (DON et al., 2011).

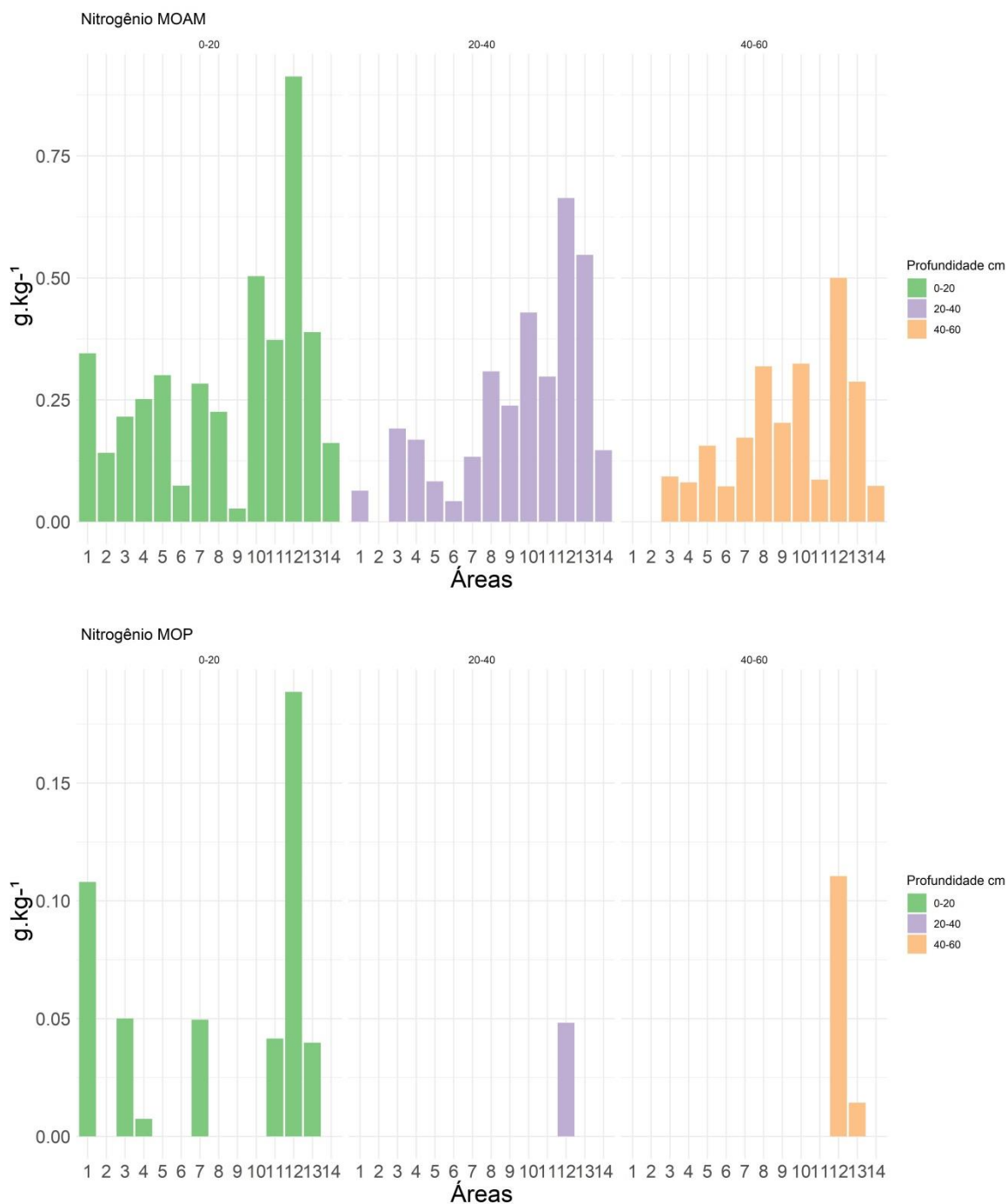
Para todas as áreas há maiores teores de C na MOAM do que na MOP. O maior valor de C-MOP foi encontrado no ponto 12 (40-60 cm), seguido de 12 (20-40 cm) e 11 (0-20 cm), apresentando os valores de 2,75; 2,16 e 2,03 g.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. As áreas com maiores valores na MOP foram 12, 11 e 10 respectivamente.

Já para os valores de C-MOAM, os pontos com maior incidência foram 12 (0-20 cm), 12 (20-40 cm), 12 (40-60 cm), com 11,88; 9,53 e 7,60 g.kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Nessa área a cobertura vegetal era composta por muitos arbustos originários de processo de recomposição (Tabela 1), o que provavelmente explica o maior aporte de matéria orgânica e consequente teor de carbono no sistema do solo.

As áreas 12 e 13 foram as que apresentaram maior teor de carbono orgânico, o que era esperado visto que também obtiveram maiores teores de matéria orgânica. Ao contrário da área 12, onde a cobertura vegetal favorecia o aporte de MOS e consequentemente maior teor de carbono, a área 13 apresentava trechos de solos expostos e sinais de má drenagem do terraço.

### **3. 4 Nitrogênio da fração da MOS**

Na Figura 5, se apresenta os valores de N da MOS nas frações de MOAM e MOP por profundidade para as 14 áreas de estudo.



**Figura 5.** Teores de Nitrogênio na matéria orgânica do solo.

Com relação ao N, há maiores teores na MOAM em relação a MOP. Na MOP em muitos pontos não foi possível detectar N nas amostras pela metodologia utilizada, principalmente em profundidade, onde apenas a área 12 se constatou sua presença em níveis muito baixos.

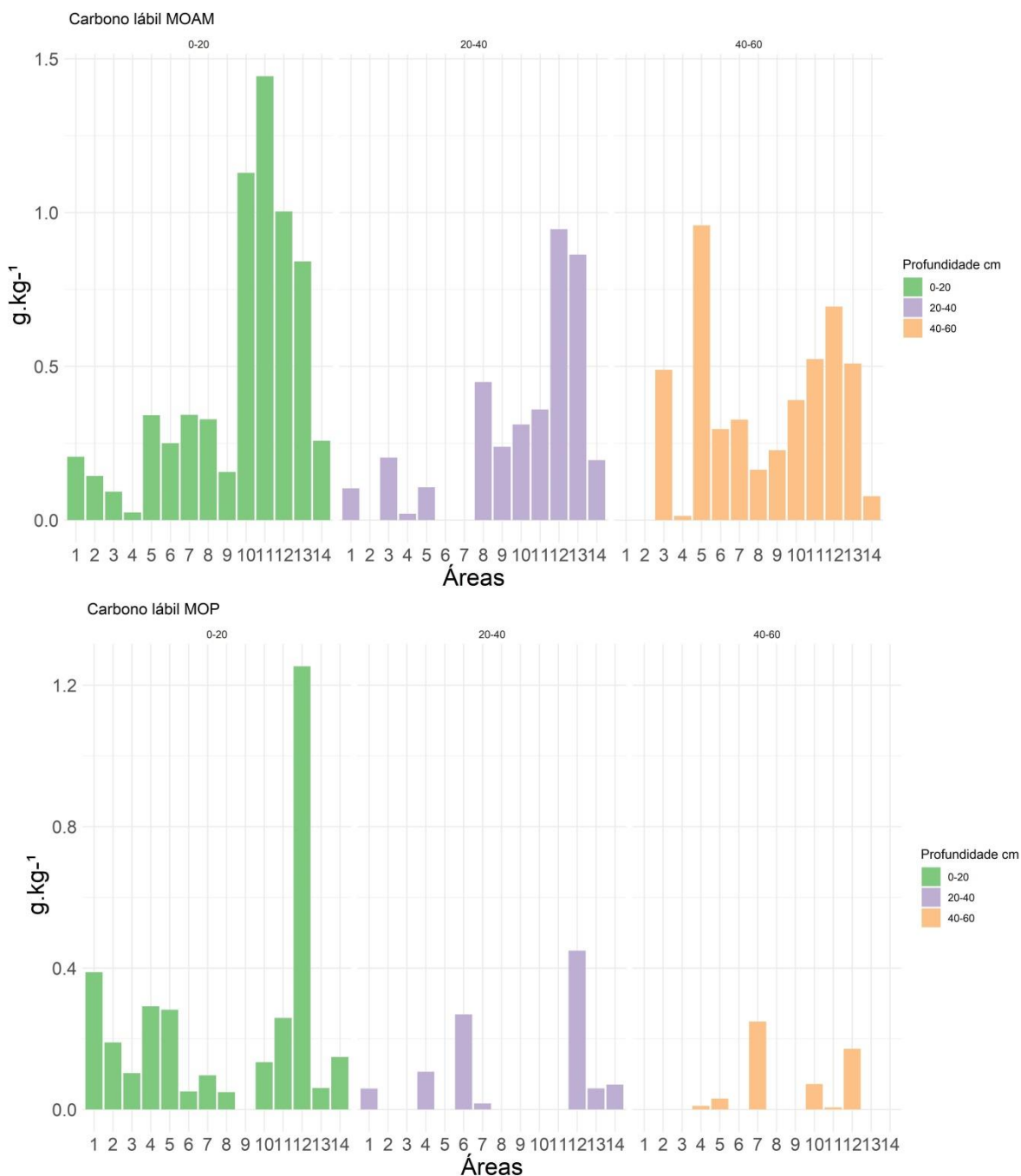
Os pontos de maiores valores de N-MOP foram 12 (0-20 cm), 12 (40-60 cm), e 1 (0-20 cm). Já as áreas mais representativas foram 12, 1 e 3.

Para N-MOAM, os pontos de maiores valores foram 12 (0-20 cm), 12 (20-40 cm), e 13 (20-40 cm). Áreas com maior incidência de N foram 12, 13 e 10.

Pela metodologia utilizada, o menor valor detectável de N foi de  $0,0074 g \cdot kg^{-1}$  na fração MOP da área 4 na profundidade de 0-20 cm.

### 3. 5 Carbono Lábil da fração da MOS

Os teores carbono lábil do solo (C-lábil) das frações MOP e MOAM encontrados na MOS são apresentados na Figura 6.



**Figura 6.** Teores de C-lábil na matéria orgânica do solo.

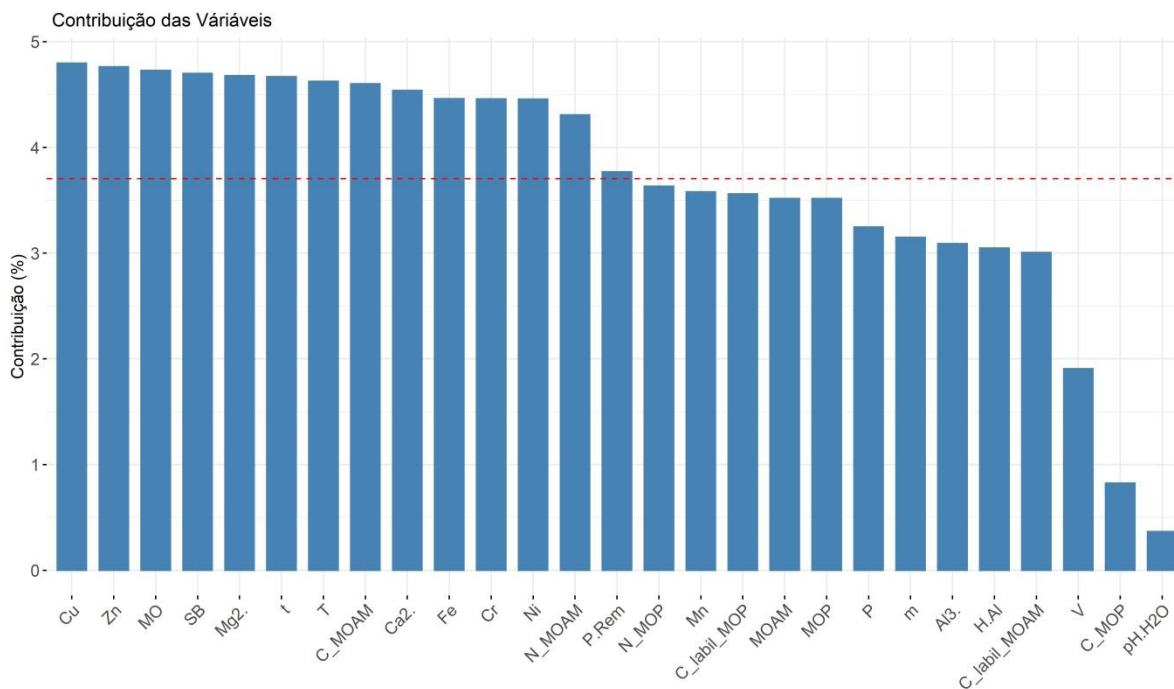
Assim como se observou para os teores de C e N, se apresentou mais C-lábil na fração MOAM do que em relação a MOP. Para a MOP, as áreas mais representativas foram, nessa ordem, 12, 1, 4 e 5. O menor valor detectado para essa fração foi de 0.0058 g kg<sup>-1</sup>.

Referente a fração MOAM, as áreas com maior incidência foram: 12, 11, 13, e 10. Já o menor valor detectado foi de 0.0135 g kg<sup>-1</sup>.

Tanto na MOP quanto na MAM, o teor de C-lábil decresceu por profundidade. Pela metodologia do *International Conference on Harmonisation* (ICH, 1996), os valores dos limites encontrados para as amostras foram: limites de detecção (LD): 0,002557 mg.ml<sup>-1</sup> e limite de quantificação (LQ): 0,007749 mg.ml<sup>-1</sup>. Ou seja, onde não foi possível quantificar o C-lábil, não necessariamente o teor é nulo, mas sim inferior ao LQ e, portanto não possível de ser quantificado pelo método utilizado.

### 3.6 Análise PCA

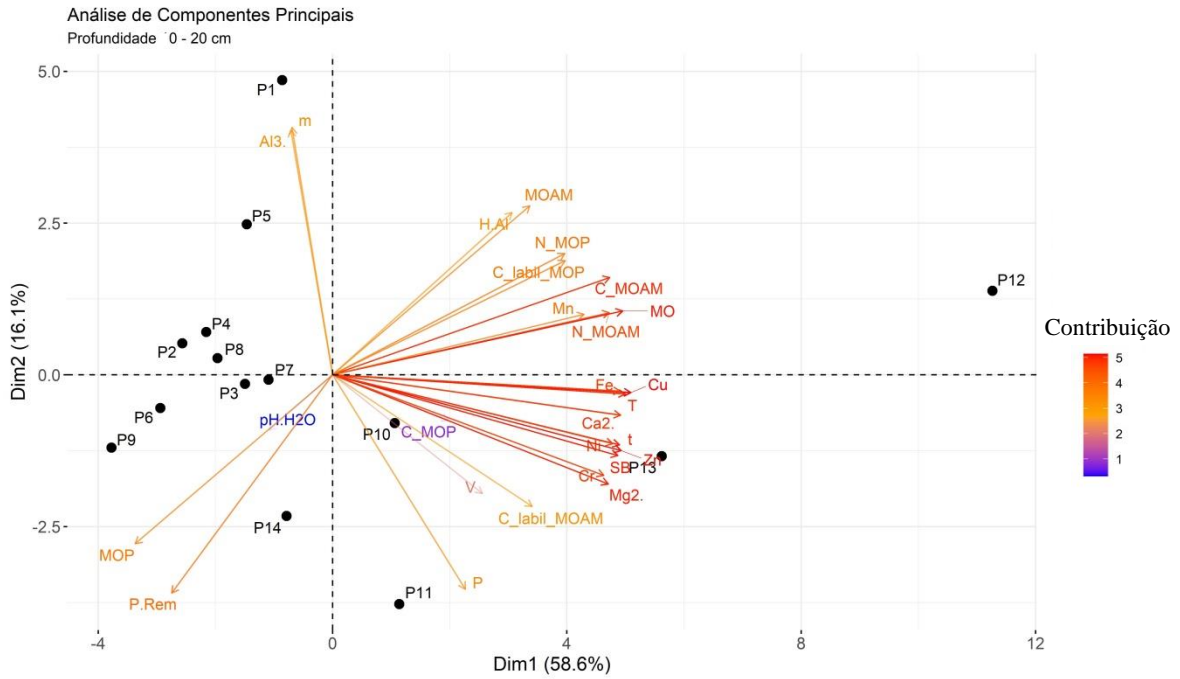
Pela Análise de Componentes Principais – PCA identificou-se que não foi possível agrupar as áreas por profundidade do solo em relação às variáveis analisadas, porém a profundidade 0-20 cm os dois primeiros eixos dos componentes (PC1 e PC2) foram capaz de explicar 74,7% da variação dos dados. Para essa profundidade pode-se observar a contribuição das variáveis onde se destaca principalmente cobre, zinco, MO, SB, Mg<sup>+2</sup> e t, respectivamente (Figura 7).



**Figura 7.** Contribuição das variáveis para a profundidade de 0-20 cm.

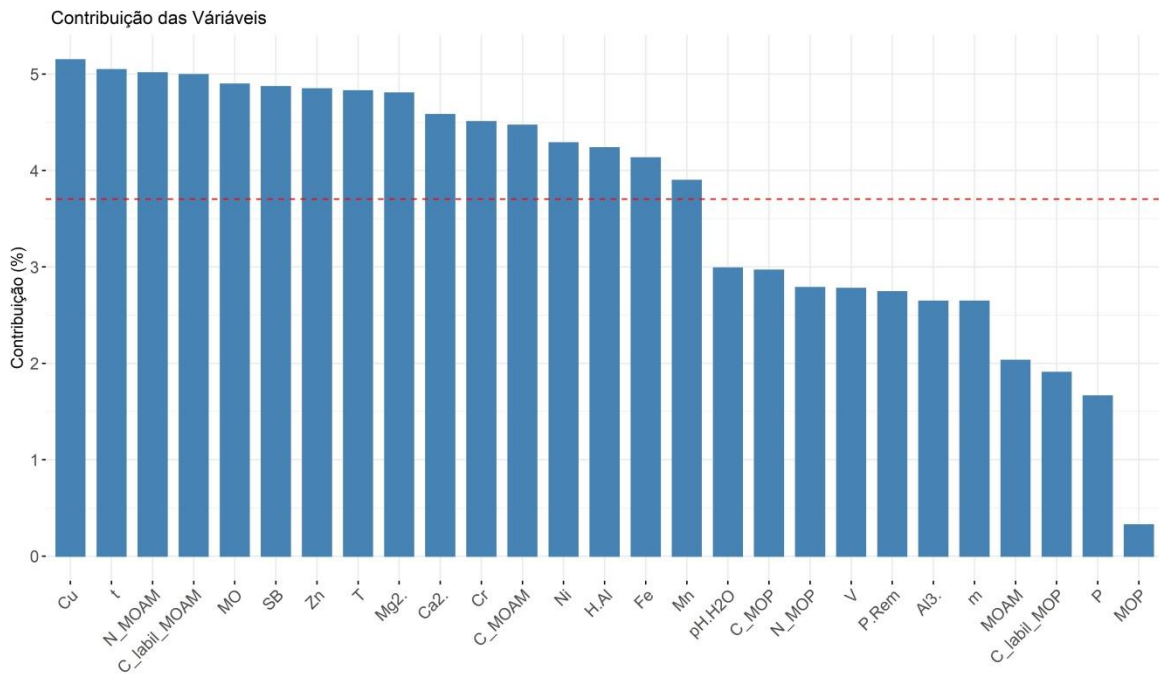
A maior parte das áreas próximas ao local de rompimento da barragem foram mais influenciadas pela saturação por alumínio (m) e alumínio (Al<sup>3+</sup>). As áreas P6, P9 e P14 foram mais fortemente influenciadas pelo percentual de MOP e P-rem, enquanto a P12 teve um efeito contrário, estando mais relacionada com MOS, N-MOAM, C-MOAM (Figura 8).





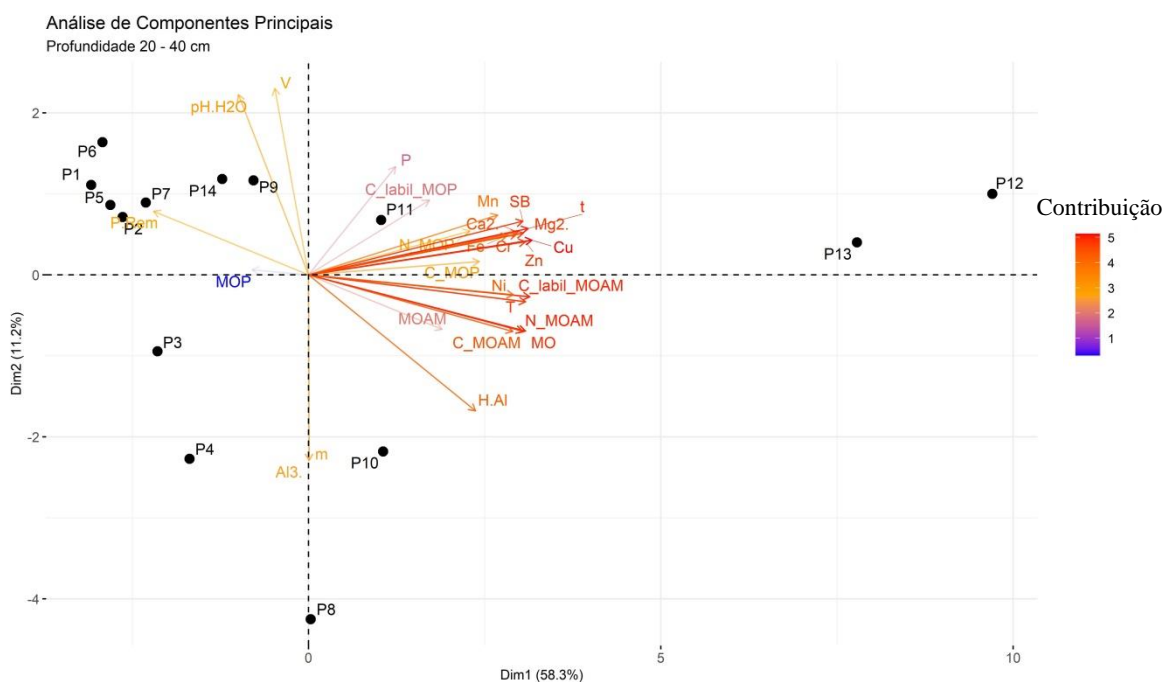
**Figura 8.** PCA para a profundidade de 0-20 cm.

Para a profundidade de 20-40 cm, a maior relevância por ordem de prioridade são o cobre, t, N\_MOAM, C\_labil\_MOAM, MO e SB (Figura 9).



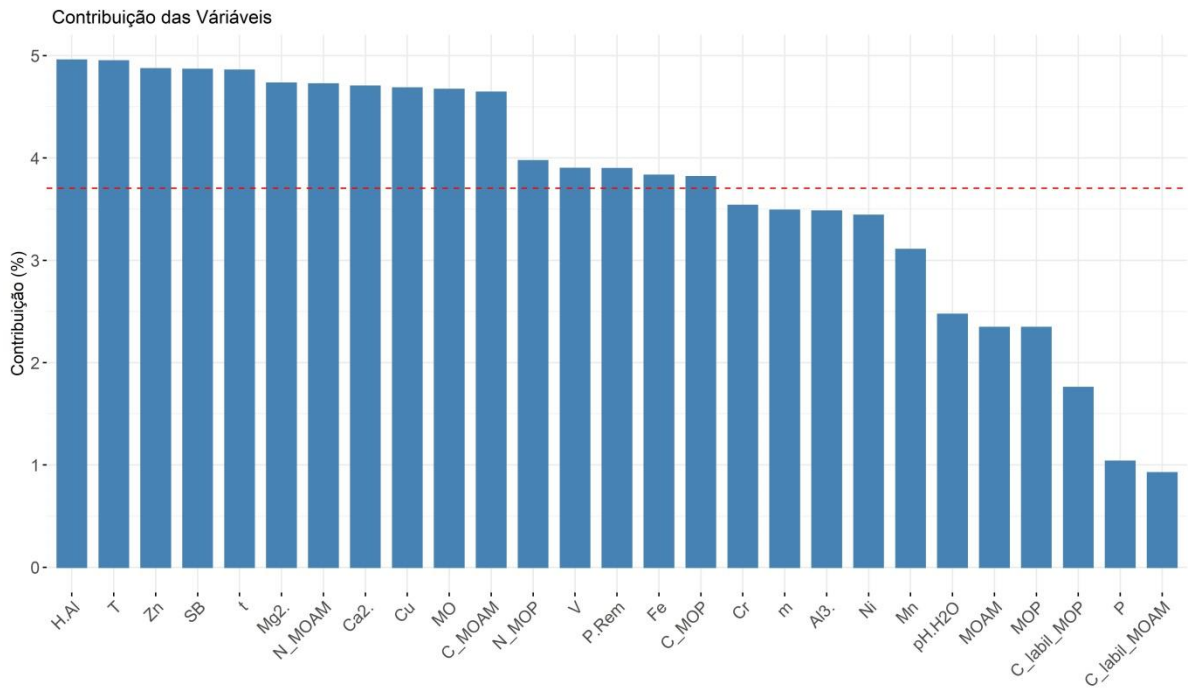
**Figura 9.** Contribuição das variáveis para a profundidade de 20-40 cm.

As áreas P11, P12 e P13 apresentaram-se mais semelhantes quanto a variação dos dados, sendo as regiões mais próximas a usina Risoleta Neves, onde houve represamento de grande volume de rejeitos, porém apresentam cobertura vegetal distintas. As amostras em P8 e P10 foram mais influenciadas pela atividade de alumínio e sua saturação, enquanto P3 e P4 foram mais fracamente influenciadas pelas variáveis estudadas. As demais parcelas foram fortemente relacionadas com o pH, a saturação de bases (V) e o P-rem.



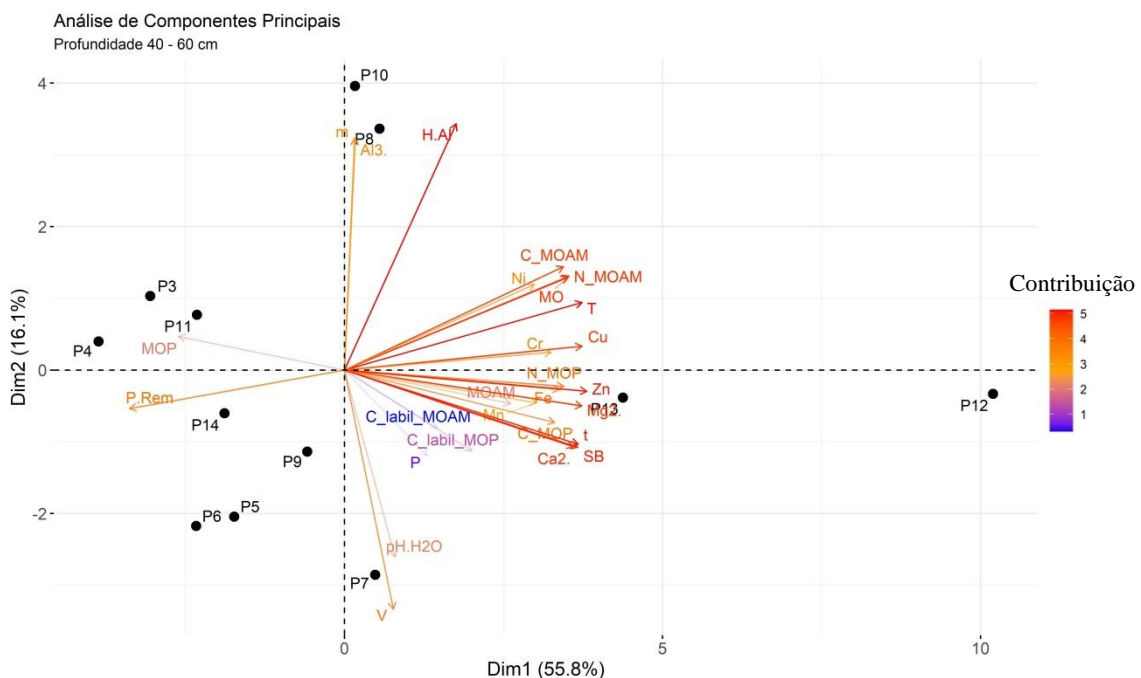
**Figura 10.** PCA para a profundidade de 20-40 cm.

Novamente observa-se para a profundidade de 40-60 cm a semelhança entre as áreas P12 e P13. Também mantém a semelhança P8 e P10 para alumínio e sua saturação. Os elemento de maior relevância por ordem de prioridade são H+Al, T, zinco, SB, t,  $Mg^{+2}$  (Figura 11).



**Figura 11.** Contribuição das variáveis para a profundidade de 40-60 cm.

Ao contrário do observado na segunda profundidade, a área P11 é oposta ao P12 e P13, se aproximando mais fortemente aos teores de MOP. P3 e P4 também se juntam ao agrupamento desse elemento. P9, P5 e P6 formam um grupo onde não há nenhum elemento em destaque. P8 é oposto de P7 apesar de serem geograficamente mais próximos.



**Figura 12.** PCA para a profundidade de 40-60 cm.



rejeito oriundo da barragem de Fundão se apresentou maiores bases totais trocáveis e índice de saturação por bases, indicando maior fertilidade ( $V > 50\%$ ), pois o tecnossolo possui uma fase mineral mais avançada, devido à serapilheira estar em processo inicial de decomposição, confirmado pelo baixo teor de matéria orgânica.

Para a área de estudo foi constatado baixos teores de CTC. Santos et al. (2022), encontrou teores variando de baixo para médio no ano de 2018, de acordo com a classificação agrônômica proposta por Ribeiro et al (1999). De acordo com Schaefer et al. (2016), o material de lama possui CTC muito baixa, sendo praticamente destituído de carga elétrica negativa, o que indica um substrato com carga líquida positiva, típico de materiais oxídicos muito intemperizados e semelhantes à solos e materiais de canga ferrífera do Quadrilátero. Visto que a lama do rejeito é constituída, basicamente, de Goethita (63%), Hematita (24%), Quartzo (11%) e Caulinita (7%), o que corrobora a baixíssima CTC e condição eletropositiva (SCHAEFER et al. ,2016).

Em contrapartida, os solos enterrados pelo rejeito (Neossolos Flúvicos e/ou Cambissolos) apresentam CTC e carga líquida negativa. A CTC média da lama é muito baixa (2,96) e os solos do entorno possuem valores maiores, com destaque para os Cambissolos (SCHAEFER et al., 2016).

As concentrações de metais pesados no solo, Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, estavam de acordo com os limites aceitáveis da COPAM, com exceção do elemento Cádmiu apresentou valores acima do valor de referência. Segundo Santana et al. (2021) e Foesch et al. (2020), as águas do rio Carmo, mesmo após o desastre, apresentou valores desses metais dentro dos limites do COPAM. Provavelmente, esses valores maiores estão relacionados com background do solo local, conforme observado por Carvalho Filho (2008).

Considerando-se que historicamente essa região do estudo é cenário de exploração de minérios, destaca-se o ferro por considerar sua importância para caracterização do ambiente. As maiores quantidades encontradas desse elemento entre as 14 áreas foram nos pontos 13 (2717,40 mg.dm<sup>-3</sup>) e 12 (1508,10 mg.dm<sup>-3</sup>), justamente as áreas com maior acúmulo de rejeito.

Em dezembro de 2018, Santos et al. (2022) constatou níveis de ferro de 308 mg.dm<sup>-3</sup> classificados como alto, valor esse também encontrados nos Tecnossolos nas margens dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e início do Doce. A grande disponibilidade de Fe encontrado no rejeito é devido à natureza do material hematítico-itabirítico do Quadrilátero Ferrífero (CHEMALE JR; ROSIÉRE; ENDO, 1991). Como nem todo minério fica retido no processo de beneficiamento, grande parte que é lavado compõe o rejeito (LUZ et al., 2010). O valor máximo de teor de Fe encontrado por Santos et al. (2022), em dezembro de 2018, foi de 1.215,3 mg.dm<sup>-3</sup>, próximo ao município de Barra Longa, as margens do rio Carmo, entre as áreas de estudo 6 e 7. A média entre essas duas áreas foi de 192,7 mg.dm<sup>-3</sup>, muito abaixo do valor encontrado por Santos (2019), já o maior valor foi de 2717,4 mg.dm<sup>-3</sup> no ponto 13, o mais próximo de Candonga.

O trabalho de Foesch et al. (2020) encontrou alto teor de ferro (9 mgL<sup>-1</sup>) nas águas do rio Gualaxo do Norte em áreas contaminadas pelos rejeitos e ausência total nos pontos controles que não foram afetados pelo evento. Rodrigues et al. (2015) já tinham encontrado grande quantidade de Fe no leito principal do Rio Gualaxo do Norte em 2015, muito maior que em seus afluentes, o que pode indicar que este elemento não provém da geologia local e sim de escapes de depósitos de rejeitos de minérios de ferro, à cabeceira do rio.

Logo após o evento de rompimento, Schaefer et al. (2016) relataram valores médios de Fe para os solos do entorno, Neossolo Flúvico e Cambissolos de 610,3 e 604,72 mg.dm<sup>-3</sup> respectivamente, já o Tecnossolos apresentou teor de Fe de 499,2 mg.dm<sup>-3</sup>.

Referente aos valores de MOS, nenhuma área encontra-se com teor de classificação alta pela Embrapa (EMBRAPA, 2017). Todos os pontos de coleta obtiveram teor baixo, com

exceção da área 12, com teor médio, em ordem decrescente de profundidade. Assim como Villa et al. (2022), que também encontraram teor classificado como baixo ( $0,13-1,39 \text{ dag.kg}^{-1}$ ) em áreas com rejeito do Fundão em Mariana/MG. O baixo teor de matéria orgânica pode ser devido à erosão causada pelos rejeitos, que causa a perda do horizonte superficial, que é rico em matéria orgânica (SCHAEFER et al. 2017).

Os valores de MOS encontrados são maiores do que a média encontrada por Schaefer et al. (2016) para os Neossolos Flúvicos do entorno (de  $0,85 \text{ dag.kg}^{-1}$ ) e menor que os Cambissolos ( $1,42 \text{ dag.kg}^{-1}$ ). Cinco dias após o desastre, Santos et al. (2022) relacionou a MOS encontrada na região afetada em muito baixo ( $0,64 \text{ dag.kg}^{-1}$ ) e em dezembro de 2018 alterou-se para classificação baixa ( $1,29 \text{ dag.kg}^{-1}$ ). A mesma autora relatou que em quase todos os pontos de estudo houve um acréscimo de MO de 2015 para 2018. De modo geral pode-se constatar que está havendo uma tendência de incremento de MOS na área afetada como um todo, visto que o presente trabalho encontrou maiores teores do que Santos et al. (2022).

Estudo de Guerra et al. (2017) informou que não houve uma grande variabilidade química dos Tecossolos gerados pelo desastre, sendo os altos níveis de As e Mn encontrados em alguns resíduos de minas e amostras afetadas podem não ser considerados uma preocupação ambiental devido aos níveis de fundo anômalos naturais desses elementos nos solos da região do Quadrilátero Ferrífero.

A partir de uso de dados de laser scanner, Santos et al. (2022), estimaram que nos terraços fluviais do rio Gualaxo do Norte foram depositados entre  $14,3$  a  $16,0 \text{ Mm}^3$  de material da barragem. Segundo Schaefer et al. (2015), os terraços que foram enterrados por volume de sedimentos tecnogênicos de origem minerária, gerou uma situação, onde os problemas físicos são maiores que os químicos para a recuperação ambiental. Na superfície ocorreu selamento do solo formando uma crosta duríssima à penetração quando seco, mas altamente susceptível ao transporte quando umedecido. Os autores ainda indicam que quando ocorre a erosão, preferencialmente do material fino, mais dispersável, deixa um substrato residual rico em areia fina e silte, altamente compactado, constituindo um entrave à recuperação natural sem alguma intervenção.

Observa-se que de maneira geral no fracionamento da MOS os teores de MOP foram superiores nas áreas em relação a MOAM, onde os pontos 11(40-60 cm), 12 (20-40 cm), 5 (40-60 cm), e 11 (0-20 cm) obtiveram destaque, portanto as áreas com maior teor de MOP foi a 11, seguida da 12. A MOP é caracterizada por partículas de granulometria maiores, entre 2 mm e 0,053 mm, o que condiz com as características físicas da região encontradas por Silva et al (2016) e Cruz (2018) nos terraços fluviais do rio Carmo, onde a textura predominante encontrada foi arenosa e siltosa do rejeito.

De acordo com Lavallee et al. (2020) a fração de MOP é caracterizada pela sua composição bioquímica predominantemente de origem vegetal, tempo de ciclagem rápido, proteção bioquímica com possibilidade em formas recalcitrantes (materiais vegetais mais lignificados) e proteção à decomposição quando fragmentos de materiais orgânicos são ocluídos em agregados. Dessa forma, a maior proporção de MOP nas áreas estudadas pode estar associada ao processo de recomposição e reestruturação da vegetação nas áreas afetadas pelo rejeito.

Somente nas áreas 13 e 14 ocorreu a inversão da granulometria, apresentando valores de MOAM superiores em relação a MOP, indicando que ocorreu uma deposição de material mais fino nessas regiões. A área 14, localizada logo após a usina de Risoleta Neves não houve nenhum tipo de intervenção para o manejo do rejeito, o que pode indicar que solo presente possui características que se assemelham ao rejeito depositado inicialmente.

Este estudo mostrou que os teores de carbono da fração MOAM foram superiores em relação a MOP. Na primeira profundidade (0-20cm) onde a MOS é mais presente, as áreas

(12, 11, 1 e 10) que apresentaram cobertura vegetal composta por fragmento florestal, obtiveram maiores teores de carbono para as duas frações.

Mesmo onde havia fragmento florestal, as gramíneas estavam presentes em todas as áreas, o que corrobora com maior teor C-MOAM, visto que apresentam uma maior relação C/N e lignina/N, o que acarretaria uma decomposição mais lenta do resíduo favorecendo o aumento dos teores de carbono ligados a argila e silte, formando complexos organominerais (SILVA & MENDONÇA 2007). Segundo Gazolla et al. (2015) para uma área de cerrado nativo, o maior conteúdo de carbono na fração MOAM ocorreu pelo maior aporte de resíduos vegetais oriundos de gramíneas.

Além disso, as gramíneas por serem plantas C4 contribuem para elevar e manter o aporte de carbono no solo e seu sistema radicular também inclui grande quantidade de carbono, contribuindo para sua estabilização por aumentar o seu teor na fração mais recalcitrante do solo (BARRETO et al. 2008).

O trabalho de Nanzer et al. (2019) também encontrou teores superiores na fração MOAM em relação a MOP em área de vegetação nativa de cerrado, com ausência de ação antrópica no Mato Grosso do Sul, onde na camada de 0-10 cm apresentou maior teor de carbono com  $8,5 \text{ g.kg}^{-1}$  que representou da C-MOAM 66,97% e C-MOP 33,04% do COT. ROSSI et al. (2012) encontraram valores de C-MOAM variando entre 35 a 50% do COT. SOUZA et al. (2008) verificaram que o C-MOAM apresentou porcentagens de 67 a 73% do COT na camada de 0-5 cm e de 84 a 88% na camada de 5-10 cm. Os teores mais altos de C-MOAM estão relacionados à maior recalcitrância desta fração, o que dificulta a decomposição pelos microrganismos do solo. VER QUAL È A % da minha área

As áreas de estudo 11, 10 e 1 apresentaram maiores teores de C-MOP na primeira profundidade (0-20 cm), onde a cobertura do solo era caracterizada por fragmento florestal. Segundo Loss et al. (2011) e Rossi et al. (2011), sistemas de manejo e culturas que proporcionam maior aporte de carbono e resíduos na superfície do solo aumentam os teores de C-MOP, visto que grande parte deste compartimento é formado por partículas derivadas de resíduos de plantas e está diretamente relacionado ao material vegetal recentemente adicionado ao solo. Os aumentos dos teores de C-MOP antecedem a formação de C-MOAM, portanto, a estabilização da MOS em longo prazo se dá pelo aumento dos teores de C-MOAM, sendo importante para a manutenção de maiores teores de carbono orgânico total no solo (NANZER et al., 2019).

Em área de pastagem degradada situada no município de Visconde do Rio Branco/MG, Saldarriaga (2016) encontrou valores de C-MOP ( $9,41 \text{ g.kg}^{-1}$ ) maiores se comparados com o maior teor de C-MOP das áreas de estudo afetadas pelo rejeito, de  $2,74 \text{ g.kg}^{-1}$  no ponto 12 (40-60 cm). Já para C-MOAM, o maior teor da pastagem degradada do mesmo autor, se assemelha aos valores da área 12, onde se obteve os maiores teores de C-MOAM. Ou seja, os teores de carbono de toda a área afetada pelo rejeito é semelhante ou menor, a área de pastagem degradada sem rejeitos de mineração.

A área 9 de estudo, apesar de ser fragmento florestal em estágio inicial de recuperação, apresentou baixo teor de carbono nas duas frações, comparado com as outras áreas de cobertura semelhante, inclusive manifestou menor teor de C-MOAM entre todas as áreas. Também se constatou baixos teores de N-MOAM e N-MOP, sendo nulo nesta última fração. O C-lábil da fração MOP na profundidade de 0-20 cm foi o menor teor encontrado entre todas as áreas do estudo. Esse terreno as margens do rio do Carmo, era de declividade média o que pode ter impulsionado processos de erosão e lixiviação mais intensa e consequente perda de MO do solo. Nesse caso a cobertura florestal não foi suficiente para melhor aporte de C e N no sistema do solo. Pela análise de PCA, apesar de ser uma área de fragmento, se assemelha em maior grau com áreas de pastagens (6, 5, 14) nas três profundidades.

Assim como ocorreu com os teores de C, observa-se o padrão de maiores teores de N em superfície, o que é esperado visto que as camadas superficiais do solo geralmente recebem mais aporte de matéria orgânica. Áreas de cobertura florestal apresentaram maiores teores de nitrogênio para ambas as frações MOAM e MOP. Em contrapartida, as áreas com predomínio de gramíneas apresentaram pouco ou nenhum teor de N, principalmente na fração MOP.

Considerando que a maior parte do N do solo está em sua forma orgânica (MYROLD, 2005), a incorporação de MOS oriunda do fragmento florestal presente nessas áreas podem explicar o maior aporte de N nessas áreas. Também é importante reconhecer as mudanças de N e C no solo, uma vez que existe uma relação entre MOS, C e N. Os aumentos nos estoques de C orgânico são diretamente relacionados ao aumento do N do solo, que é fundamental para a estabilização do C por meio da formação de substâncias humificadas, mais ricas em N do que outros compartimentos orgânicos menos recalcitrantes (LOVATO et al., 2004; RIBEIRO et al., 2011; GAUDER et al., 2016).

Para as áreas de estudo, os teores de N na fração MOAM foram superiores em relação a fração MOP, resultado também encontrado por PEREIRA et al. (2018) onde maiores teores de N-MOAM foram encontrados em solo cultivado com cafeeiro (*Coffea arabica* L.) por após adição de N ao solo na forma de mineral e adubação orgânica, sugerindo que a maior parte de N que foi aportado ao solo teve como destino frações estáveis da MOS, indicando rápida estabilização desse nutriente nos compartimentos orgânicos mais recalcitrantes.

Os maiores teores de N-MOAM foram semelhantes ao encontrado por Saldarriaga (2016) em áreas de pastagem degradada, já para teores de N-MOP, a pastagem constou maiores teores do que qualquer uma das áreas afetadas pelo rompimento.

Tanto na MOP quanto na MAM, o teor de C-lábil decresceu por profundidade para a maioria das áreas de estudo, e a fração MOAM obteve maiores teores com relação a MOP, destacando-se nas áreas de fragmento florestal. A pesquisa de Saldarriaga (2016) também encontrou teores maiores de C-lábil na fração MOAM para áreas de pastagem produtiva e pastagem degradada.

Os teores de carbono lábil são afetados de modo significativo pelos sistemas de uso do solo (SALDARRIAGA, 2016), e apesar da análise do carbono orgânico total ser sensível na detecção de diferenças entre os sistemas de manejo, a magnitude dos efeitos é maior nas frações lábeis da matéria orgânica do solo (DA SILVA et al., 2011). As áreas de fragmento florestal (11, 10, 12), obtiveram teores de C-lábil na fração MOAM superiores em relação as áreas de gramíneas (4 e 3), indicando que a cobertura do solo influenciou no aporte de C-lábil nessa fração, principalmente na primeira profundidade (0-20 cm).

Da Silva et al. (2011) indica que sistemas conservacionistas, como o plantio direto, onde as práticas de intervenção são reduzidas, proporcionando decomposição lenta do material vegetal depositado, favorecem o acúmulo de C-lábil. Na área 4 do estudo, observou-se que as várias intervenções realizadas (biomanta, canal de drenagem com pedras, enrocamento nas margens do rio) não foi eficiente para aporte de C-lábil no solo e constatou-se o menor teor na fração MOAM entre todas as áreas.

Ressalta-se que os baixos teores de argila e elevado conteúdo de areia e silte presentes no rejeito não contribuem para a retenção e consequente acúmulo de conteúdo orgânico no solo, além disso horizontes arenosos dificultam a proteção física da matéria orgânica pelo fato de formarem agregados menos estáveis (SILVA et al., 2014).

Os teores mais baixos de carbono e nitrogênio na área afetada pelo rejeito já eram esperados. A incorporação, o acúmulo e a elevação dos teores desses elementos no solo demandam tempo (COSTA et al., 2008). Ademais, as áreas possuíam cerca de 5 anos de vegetação estabelecida desde o rompimento da barragem, além do rejeito ser um material inerte e pobre em conteúdo orgânico (SCHAEFER et al., 2015).



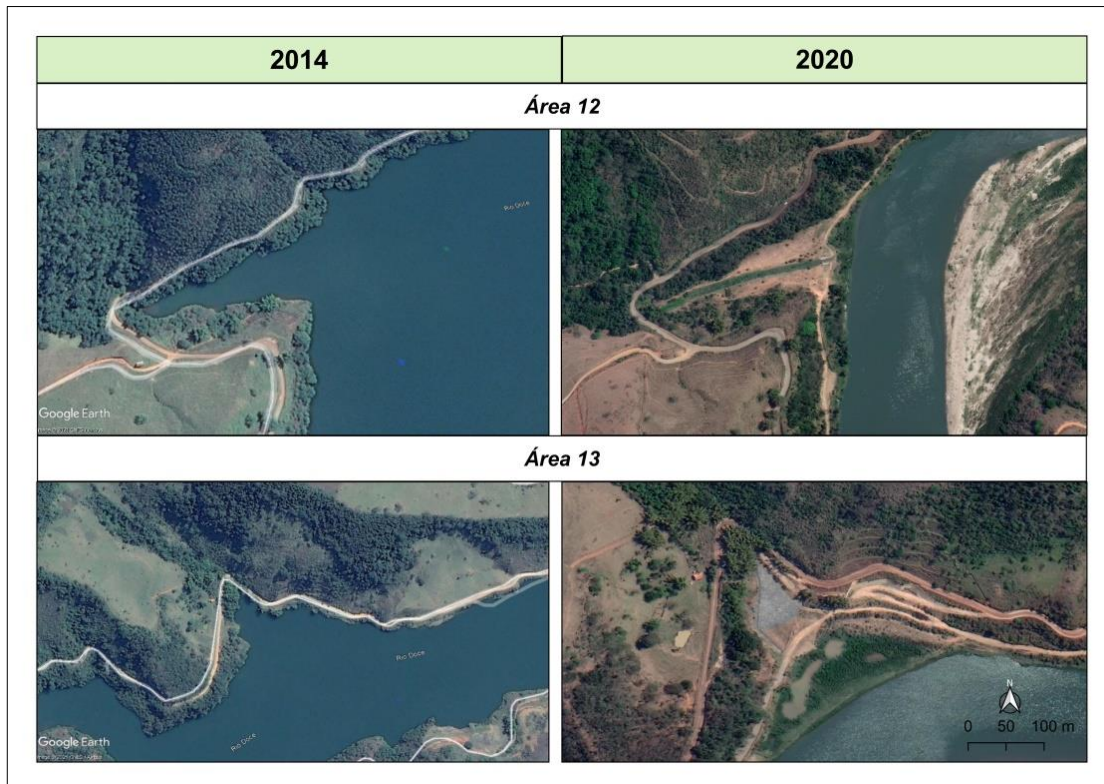
Além disso, anterior ao rompimento da barragem, Silva et al. (2006) indicaram que áreas com rejeito de minério de ferro coletado em Mariana (MG) já era um material pobre em macro e micronutrientes, apresentava baixo teor de carbono orgânico e características físicas que dificultavam o desenvolvimento do sistema radicular de plantas.

Analisando os dados obtidos pela PCA, destaca-se que a cobertura vegetal não foi um fator para o agrupamento de áreas, como por exemplo, na primeira profundidade, P10 e P11, que são fragmentos florestais, e P13, com gramíneas e solo exposto. Assim, como P1 e P5, fragmentos inicial e pastagem, respectivamente, o que pode indicar q esses elementos tem outra fonte de origem. Outro fator que não agrupou as áreas foi a profundidade.

A área 1, apesar de ser fragmento florestal oriundo de projeto de recomposição, forma grupos de semelhança com áreas de pastagem (5, 6, 7) nas duas primeiras profundidades. O oposto ocorre com a área 13, predominante de gramíneas e solo exposto que se aproxima mais a áreas de fragmento florestal (12, 11, 10) nas duas primeiras profundidades. Observa-se então que as quatro últimas áreas antes da Usina Risoleta Neves se assemelham no que concerne aos atributos químicos e da matéria orgânica do solo, onde houve represamento de grande volume de rejeitos.

As áreas 12 e 13 se diferenciaram das demais quando se analisa os atributos químicos e a MOS fracionada de todas as áreas. Ambas são as que estão localizadas mais próximas da Usina Risoleta Neves, a montante do rio Doce. Anterior ao evento de rompimento eram regiões de reentrância do rio (Figura 14). Porém, o novo cenário gerou um Tecnossolos com material oriundo da lama. Posteriormente foram aterradas e receberam obras de contenção, provavelmente para ser depositados os rejeitos que estavam na calha do rio, impossibilitando o funcionamento da usina.

Considerando toda a região de estudo, essas duas áreas foram as que apresentaram maiores teores de Fe e outros metais pesados (Cu, Zn, Cr, Ni). Em contrapartida, apresentaram alto teor de matéria orgânica total, comparado com o restante das áreas, além de valores superiores de C, N e C-lábil na fração MOAM da MOS. A área 12 era composta por arbustos densos o que pode ter influenciado no aporte de MOS, já a área 13, não ocorria uma cobertura vegetal que justificasse esse incremento, mas havia lagoas as margens do terraço indicando que a área sofre com problemas de drenagem, o que provavelmente explica os teores de MOS e consequentemente de C e N orgânico.



**Figura 14.** Áreas que foram aterradas, onde 2014 é anterior ao evento de rompimento e 2020, após.

Fonte: Google.

## 5. CONCLUSÃO

A distribuição espacial dos terraços é um fator representativo de alteração no meio, pois indica a forma como o rejeito foi depositado e acumulado, onde as regiões mais próximas da usina Risoleta Neves se assemelham no que se refere aos atributos químicos e da matéria orgânica do solo.

As áreas 12 e 13 se diferenciaram das demais em diversos atributos químicos do solo: maiores teores de matéria orgânica, maior concentração de Fe e dos metais Cu, Zn, Cr, Ni, a CTC efetiva foi classificada como média, quando o restante da área é baixa. Entretanto a cobertura vegetal se distingue, na área 12 há predomínio de vegetação densa com arbustos e gramíneas, oriundas de processo de recomposição. Já a área 13 era composta por gramíneas esparsas, áreas de solo exposto e lagoas no início do terraço, indicativo de drenagem ineficiente. Essas alterações podem ser justificadas por serem áreas de aterramento, onde o solo gerado contém características mais próximas do rejeito.

A única área distrófica para as três profundidades foi a 10, localizada as margens do Rio Doce, onde não ocorreu nenhuma técnica de intervenção e a cobertura vegetal era composta por regeneração natural em estágio inicial. Os teores de MOS apesar de classificados como baixo, ainda sim são maiores que as demais áreas.

Áreas com cobertura florestal apresentaram maiores teores de C e N nas frações MOP E MOAM, indicando que o aporte de MOS é mais eficiente nesse tipo de cobertura do solo.

De modo geral pode-se verificar que está havendo uma tendência de incremento de MOS na área afetada como um todo, mesmo assim esse atributo permanece deficiente na região, inclusive em áreas com cobertura florestal em estágio inicial.

Os teores de MOP foram superiores nas áreas em relação a MOAM, o que condiz com as características físicas da região, onde a textura predominante foi arenosa e siltosa do rejeito. Constatou-se a inversão de granulometria nas áreas 13 e 14, onde teores de MOAM foram superiores a MOP, se diferenciando das demais áreas, o que evidencia que nesses locais ocorreu um acúmulo de material mais fino, tanto pela maior distância da barragem, como pelo maior acúmulo de rejeitos.

O C, N e C-lábil da fração MOAM foram mais representativos em relação a MOP da MOS, os teores observados para todas as áreas são baixos e se assemelham a áreas degradadas de locais não afetados pelo rompimento. Essa situação pode ser justificada pelo fato da área apresentar pouco aporte de matéria orgânica, mesmo em áreas com cobertura florestal em estágio inicial.

## REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), 1987c. Resíduos Sólidos – Classificação – NBR 10.004. Rio de Janeiro: ABNT.

ALVAREZ, V. V. H.; Ribeiro, A. C. Calagem. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**, v. 5, p. 43-60, 1999.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Encarte especial sobre a Bacia do Rio Doce. Rompimento da barragem em Mariana/MG. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. v.01, p 50, 2016.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Monitoramento especial da bacia do Rio Paraopeba - Relatório IV - Monitoramento hidrológico e sedimentológico**. p 97, 2019. Disponível em: <[http://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/paraopeba/RT\\_04\\_2019\\_PARAOPEBA.pdf](http://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/paraopeba/RT_04_2019_PARAOPEBA.pdf)>. Acesso: jan. 2021.

Anexo, I. (2012). Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE).

BARRETO AC et al. 2008. Fracionamento químico e físico do carbono orgânico total em um solo de mata submetido a diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32: 1471-1478.

BARRAL MP, Benayas JMR, Meli P, Maceira NO (2015) Quantifying the impacts of ecological restoration on biodiversity and ecosystem services in agroecosystems: a global metaanalysis. **Agriculture Ecosystem & Environment** 202:223–231.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, v. 65, n. 1, p. 10–21, jan. 2014.

BATISTA, Marcelo Augusto et al. Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral. **BRANDÃO-FILHO, JUT; FREITAS, PSL; BERIAN, LOS; GOTO, R. Hortaliças-fruto. Maringá: EDUEM**, p. 113-161, 2018.

Basin, Ethiopia. *Advances in Meteorology* [online] 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/8263246>. Acesso em: 19 jul. 2020.

BIONDI, C. M. et al. Teores de Fe, Mn, Zn, Cu, Ni E Co em solos de referência de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 3, p. 1057–1066, 2011.  
BREVIK EC, CERDÀ A, MATAIX-SOLERA J, PEREG L, QUINTON JN, SIX J & VAN OOST K. 2015. The interdisciplinary nature of soil. *Soil* 1: 117-129.

CAMPANHARO, Í. F., Martins, S. V., Villa, P. M., Kruschewsky, G. C., Dias, A. A., & Nabeta, F. H. (2020). Effects of forest restoration techniques on community diversity and aboveground biomass on area affected by mining tailings in Mariana, Southeastern Brazil. **Research in Ecology**, 2(4), 1-9.

CAMPANHARO, Í. F., Martins, S. V., Villa, P. M., Kruschewsky, G. C., Dias, A. A., & Nabeta, F. H. (2021a). Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence aboveground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 93(1): e20201209.

CAMPANHARO, Í. F., Martins, S. V., Villa, P. M., Kruschewsky, G. C., Aparecida Dias, A., & Nabeta, F. H. (2021b). Functional composition enhances aboveground biomass stock undergoing active forest restoration on mining tailings in Mariana, Brazil. **Restoration Ecology**.

CARVALHO F. A.; Inda, A. V. ; FINK, J. R. ; CURI, N. Iron oxides in soils of different lithological origins in Ferriferous Quadrilateral (Minas Gerais, Brazil). **Applied Clay Science** (Print) , v. 118, p. 1-7, 2015.

CETEM. Rompimento de barragem da Mineração Rio Verde, em Nova Lima (MG) deixa mortos e destruição ambiental. **Verbetes**, p. 3, 2016.

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). Universidade Federal de Ouro Preto, 2001.

COSTA, F. DE S. et al. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323–332, 2008.

CPRM. Monitoramento Especial da bacia do Rio Doce. p. 37, 2015. Deliberação Normativa do COPAM nº 166, de 29 de junho de 2011. Acesso em: jul.2021.

CHEMALE JR, F.; Rosière, C. A.; Endo, I. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um Modelo. **Pesquisas em Geociências**, v. 18, n. 2, p. 104, 1991.

CHENU, C.; Rumpel, C.; Lehmann, J. **Methods for Studying Soil Organic Matter**. 4. ed. Elsevier Inc., 2015.

CROUZEILLES R, Ferreira MS, Chazdon RL, Lindenmayer DB, Sansevero JBB, Monteiro L et al (2017). Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advance* 3:1–8.

CRUZ, F. V. DA S. D-Desempenho de sementes e plântulas de espécies arbóreas no rejeito oriundo do rompimento da Barragem de Fundão (Mariana, MG). 2018.

DA SILVA, C. V. et al. Seed bank of mining tailings as indicator of vegetation regeneration in mariana, brazil. **Revista de Biologia Tropical**, v. 69, n. 2, p. 700–716, 2021.

DA SILVA, E. F. et al. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1321–1331, 2011.

DALLING, J.W., Swaine, M.D., & Garwood, N.C. (1998). Dispersal patterns and seed bank dynamics of pioneer trees in moist tropical forest. **Ecology**, 79(2), 564-578.

DE SOUZA, E. D. et al. Soil organic carbon and nitrogen stocks in an untilled crop-livestock integration system under different grazing intensities. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1829–1836, 2009.

DINIZ, N. C. et al. Casos históricos de ruptura de presas de relaves em Brasil: Propuesta de geoindicadores para el monitoreo. **Boletín Geológico y Minero**, v. 117, n. 2, p. 265–275, 2006.

DUARTE, A. P. Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. **Rahis**, n. 2, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. p 233, v. 3, 2017.

EUROPEAN MEDICINES AGENCY. **ICH Topic Q 2 (R1) Validation of Analytical Procedures: Text and Methodology Encyclopedia of Toxicology: Third Edition**. 1995. Disponível em: <[https://www.ema.europa.eu/en/documents/scientific-guideline/ich-q-2-r1-validation-analytical-procedures-text-methodology-step-5\\_en.pdf](https://www.ema.europa.eu/en/documents/scientific-guideline/ich-q-2-r1-validation-analytical-procedures-text-methodology-step-5_en.pdf)>. Acesso em: jul.2021.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Reference Base for Soil Resources 2014: International soil classification systems for naming soils and creating legends for soil maps**. 2015.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Intergovernmental Technical Panel on Soils. Status of the World's Soil Resources**. p123-126, 2015.

FOESCH, M. D. S. **Características físico-químicas e comportamento espectral de águas contaminadas por rejeitos de mineração: o caso de Mariana, MG**. Dissertação (Mestrado). Unversidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2017.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Plano de Manejo de Rejeito**. 2017. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/manejo-de-rejeito/>. Acesso em: mar. 2020.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Atualização do Plano de Recuperação Ambiental Integrado - PRAI**. 2017. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2017/04/control-de-revisao-PRAI-marco-2017.pdf>. Acesso em: mar.2020.

GAUDER, M.; Billen, N.; Zikeli, S.; Laub, M.; Graeff-Hönninger, S.; Claupein, W. Soil carbon stocks in different bioenergy cropping systems including subsoil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 155, n. 1, p. 308-317, 2016

GAZOLLA PR et al. (2015). Frações da matéria orgânica do solo sob pastagem, sistema plantio direto e integração lavoura-pecuária. *Semina: Ciências Agrárias* 36: 693-704.

GIORIA M , Pyšek P. 2015. The Legacy of Plant Invasions: Changes in the Soil Seed Bank of Invaded Plant Communities. **BioScience** 66(1): 40-53.

GIORIA M, Pyšek P, Moravcová L (2012). Soil seed banks in plant invasions: Promoting species invasiveness and long-term impact on plant community dynamics. **Preslia** 84:327–350.

Gornish ES, Lennox MS, Lewis D, Tate KW, Jackson RD. Comparando comunidades de plantas herbáceas em restauração ciliar ativa e passiva. *PLoS ONE*, 2017, 12:e0176338.

GONÇALVES R. L. G.; Rezende, E. N. Mina do engenho: rompimento de barragem. Homicídio como crime ambiental: uma teratológica aceção do direito penal? - DOI: <http://dx.doi.org/10.5216/rfd.v39i2.35412>. **Revista da Faculdade de Direito da UFG**, v. 39, n. 2, p. 220, 2015.

GUERRA, M. B. B. et al. Post-catastrophe Analysis of the Fundão Tailings Dam Failure in the Doce River System, Southeast Brazil: Potentially Toxic Elements in Affected Soils. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 228, n. 7, 2017.

HOLL K.D. (2017). Research directions in tropical forest restoration. **Annual Missouri Botanical Garden** 102:237–250.

HOLL K.D., Aide TM (2011). When and where to actively restore ecosystems? **Forest Ecology & Management** 261:1558–1563.

HOLL K.D.. Tropical forest restoration (2012). Pages 103-114 In: Van Andel J, Aronson J (eds) *Restoration Ecology*, **Blackwell Publishing**, Malden, MA, USA.

IBAMA Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Laudo técnico preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre**. p. 1–38, 2015.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Políticas Públicas para a Indústria Mineral**. 2018.

ICOLD. **Tailing dams risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences**. Paris, ICOLD, 2001.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no estado de Minas Gerais**. 2012.

JAKOVAC CC, Junqueira AB, Crouzeilles R, Peña-Claros M, Mesquita RCG, Bongers F (2021). The role of land-use history in driving successional pathways and its implications for

the restoration of tropical forests. **Biological Review** <https://doi.org/10.1111/brv.12694>.

JANSSEN, T. A. J., Ametsitsi, G. K. D., Collins, M., Adu-Bredu, S., Oliveras, I., Mitchard, E. T. A., Veenendaal, E. M., 2018. Extending the baseline of tropical dry forest loss in Ghana (1984-2015) reveals drivers of major deforestation inside a protected area. *Biological Conservation* [online]. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.12.004>.

JORGE, L. D. C. , Inamasu, R. Y. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão. **Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico (ALICE)**, p. 2014, 2014.

KÖGEL-KNABNER, I.; Rumpel, C. **Advances in Molecular Approaches for Understanding Soil Organic Matter Composition, Origin, and Turnover: A Historical Overview**. 1. ed. Elsevier Inc., 2018. v. 149

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1–2, p. 1–22, 2004.

LAL, R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems. **Global Change Biology**, v. 24, n. 8, p. 3285–3301, ago. 2018.

LAURIANO, A. W. Estudo de ruptura da barragem de Funil: comparação entre os modelos Fldwav e Hec-Ras. p. 251, 2009.

LAVALLEE, J. M.; Soong, J. L.; Cotrufo, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. **Global Change Biology**, v. 26, n. 1, p. 261–273, 2020.

LIMA, S. R. DE S. **Caracterização e análise dos acidentes com barragens de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais**. Universidade Federal do Pará, 2016.

LOVATO, T.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Vezzani F. Adição de carbono nitrogênio e sua relação com estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, pág. 175-187, 2004.

LUZ, M. D. S., Ferreira, G. B., & Bezerra, J. R. (2002). Adubação e correção do solo: procedimentos a serem adotados em função dos resultados da análise do solo. Embrapa Algodão-Circular Técnica (INFOTECA-E).

MACHADO, W. G. DE F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.

MARTINS, A.M., & Engel, V.L. (2007). Soil seed banks in tropical forest fragments with different disturbance histories in southeastern Brazil. **Ecological Engineering**, 31(3), 165-174.

MARTINS S.V. (2018). Alternative Forest Restoration Techniques. Pages 131-148 In: Viana H(ed), *New Perspectives in Forest Science*, London, InTech.

MARTINS, S. V. et al. Study on Site Preparation and Restoration Techniques for Forest Restoration in Mining Tailings of Mariana, Brazil. **Research in Ecology**, v. 2, n. 4, 2021.

MALL, U., Singh, G.S. (2014). Soil seed bank dynamics: history and ecological significance in sustainability of different ecosystems. In M.H. Fulekar, B. Pathak, & R.K. Kale (Eds.), *Environment and sustainable development* (pp. 31-46). New Delhi, India: Springer.

MAIA, L. C.; PEREIRA, A. R. Impactos no abastecimento de água decorrentes do rompimento da barragem de fundão: estudo de caso de Governador Valadares. **Congresso ABES**, n. 1, p. 1-6, 2017.

MASOOM, H. et al. Soil Organic Matter in Its Native State: Unravelling the Most Complex Biomaterial on Earth. **Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 4, p. 1670-1680, 2016.

MELO, L. P. R. DE. **Análise comparativa de metodologias de previsão de inundação decorrente da ruptura de barragens de rejeitos: caso hipotético da barragem Tico-Tico**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

MONSERIE, M. F. et al. Technosol genesis: Identification of organo-mineral associations in a young technosol derived from coking plant waste materials. **Journal of Soils and Sediments**, v. 9, n. 6, p. 537-546, 2009.

MELI P, Holl KD, Benayas JMR, Jones HP, Jones PC, Montoya D, Mateos DM (2017) A global review of past land use, climate, and active vs. passive restoration effects on forest recovery. *PlosOne* 12:1-17

MYROLD, D. D. Transformations of nitrogen. In: SYLVIA, D. M.; FUHRMANN, J. J.; HARTEL, P. G.; ZUBERER, D. A. (Ed.). *Principles and applications of soil microbiology*. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2005. p. 333-372.

NANZER, M. C., Ensinas, S. C., Barbosa, G. F., Barreta, P. G. V., de Oliveira, T. P., da Silva, J. R. M., & Paulino, L. A. (2019). Estoque de carbono orgânico total e fracionamento granulométrico da matéria orgânica em sistemas de uso do solo no Cerrado. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 18(1), 136-145.

PARRA, P. C.; Lasmar, N. . **Ruptura da barragem de rejeito da Mina de Fernandinho**. Simpósio sobre barragens de rejeitos e disposição de resíduos industriais e de mineração, REGEO'87. **Anais**.Rio de Janeiro: 1987

PEEL, M. C. et al. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.

PENMAN, A. **The Need for Dam Safety—Case Studies on Tailings Management**. International Council on Metals and the Environment(ICME), United Nations Environment Programme (UNEP) 1998.

PEREIRA, W. D., Martins, F. L., Santos, R. H. S., de Oliveira, T. S., & Caballero, S. S. U. (2018). Changes in the stocks of C and N in organic matter fractions in soil cropped with coffee and fertilized with sunn hemp and ammonium sulfate. *Seminário: Ciências*



Agrárias, 39(3), 999-1014.

PEREIRA, E. L. **Estudo de potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, p. 210, 2005.

PINTO C., R. M. Existe governança das águas no Brasil? Estudo de caso: o rompimento da barragem de Fundão, Mariana (MG). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, v. 24, n. 1–2, 2015.

PILOCELLI A. (2020). Bioindicadores para monitoramento da restauração de áreas impactadas pelo rompimento da barragem de fundão, Mariana, Minas Gerais. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Viçosa, 2020.

PONTES, M. L. B. **Simulação de rompimento de bacia de rejeito de mineração no município de Barcarena/PA**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal Rural Da Amazônia, 2019.

RIBEIRO, PH; SANTOS, JVV; COER, SM; NOGUEIRA, NÃO; MARTINS, CAS Adubação verde, os estoques de carbono e nitrogênio e a qualidade da matéria orgânica do solo. **Revista Verde**, Pombal, v. 6, n. 1, pág. 43-50, 2011.

RUIZ F, Perlatti F, Oliveira DP, Ferreira TO. 2020. Revealing Tropical Technosols as an Alternative for Mine Reclamation and Waste Management. *Minerals* 10: 110.

SALDARRIAGA, F. V. Estoques de carbono orgânico total, carbono lábil e nitrogênio no solo em diferentes sistemas de uso da terra. Dissertação. **Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa**, p. 67, 2016.

SANTOS, E. E. DOS. Diagnóstico e monitoramento dos tecnossolos de rejeito de mineração de ferro da barragem de fundão por meio de técnicas remotas e proximais de inspeção do solo. Tese. **Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa**, 2019.

SCHAEFER, C. E. Santo S, C. Souza, J. Neto, E. Filho, C. D. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. **Arquivos do museu de história natural e jardim botânico da UFMG**, v. 24, n. 1–2, p. 104–135, 2015.

SILVA, C. V., Martins, S. V., Villa, P. M., Kruschewsky, G. C, Dias, A. A., & Nabeta, F. H. (2021). Banco de semillas de relaves mineros como indicador de recuperaci3n de vegetaci3n en Mariana, Brasil. **Revista de Biología Tropical**, 69(2), 700-716.

SILVA IR, Mendonça ES. 2007. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS RF et al. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS. p. 275-374.

SILVA, A. C. et al. Chemical, mineralogical and physical characteristics of a material accumulated on the river margin from mud flowing from the collapse of the iron ore tailings dam in Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil. **Revista Espinhaço**, v. 5, n. 2, p. 44–53, 2016.

SILVA, A. S. et al. Clay and organic matter and effects on aggregation in different soil uses | Argila e

matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. **Ciencia Rural**, v. 44, n. 10, p. 1783–1789, 2014.

SILVA, G. P. et al. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da mina de Alegria, Mariana-Mg. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p. 45–52, 2006.

SOUSA, T.R., Costa, F.R.C., Bentos, T.V., Leal Filho, N., Mesquita, R.C.G., & Ribeiro, I.O. (2017). The effect of forest fragmentation on the soil seed bank of Central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 393(1), 105-112.

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase I**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2016. Disponível em: [http://www.ief.mg.gov.br/images/stories/2016/RELAT%C3%93RIO\\_FINAL\\_WATU-FASE\\_I.pdf](http://www.ief.mg.gov.br/images/stories/2016/RELAT%C3%93RIO_FINAL_WATU-FASE_I.pdf).

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase II**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2017 Disponível em: [http://www.feam.br/images/stories/2017/DOCS\\_MATERIAS/RELATORIO\\_FINAL\\_WATU-FASE\\_2.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2017/DOCS_MATERIAS/RELATORIO_FINAL_WATU-FASE_2.pdf)

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase III e IV**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2017 Disponível em: [http://feam.br/images/stories/2017/DOCS\\_MATERIAS/relatorio%20final%20watu\\_fases%20iii%20e%20iv%20dezembro%20menor.pdf](http://feam.br/images/stories/2017/DOCS_MATERIAS/relatorio%20final%20watu_fases%20iii%20e%20iv%20dezembro%20menor.pdf)

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase V**. Belo Horizonte, Minas Gerais: 2018. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2018/FISCALIZA%C3%87%C3%83O/Watu/WATU\\_V\\_FINAL.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2018/FISCALIZA%C3%87%C3%83O/Watu/WATU_V_FINAL.pdf)

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase VI**. Belo Horizonte, Minas Gerais: 2018. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/FISCALIZACAO/Operacao\\_Watu\\_FASE\\_VI\\_Final.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/FISCALIZACAO/Operacao_Watu_FASE_VI_Final.pdf)

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase VII**. Belo Horizonte, Minas Gerais: 2019. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/GESTAO\\_AMBIENTAL/Relat%C3%B3rio\\_Operac%C3%A7%C3%A3o\\_Watu\\_FASE\\_VII\\_ver\\_final.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/GESTAO_AMBIENTAL/Relat%C3%B3rio_Operac%C3%A7%C3%A3o_Watu_FASE_VII_ver_final.pdf)

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase VIII**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2019. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/GESTAO\\_AMBIENTAL/Relatorio\\_Operacao\\_Watu\\_FASE\\_VIII\\_191219\\_v\\_final.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/GESTAO_AMBIENTAL/Relatorio_Operacao_Watu_FASE_VIII_191219_v_final.pdf).

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase IX**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2020. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2020/WATU/OPERA%C3%87%C3%83O\\_WATU\\_-\\_Fase\\_IX\\_290420.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2020/WATU/OPERA%C3%87%C3%83O_WATU_-_Fase_IX_290420.pdf)

SISEMA. **Relatório Operação Watu - Fase X**. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2021. Disponível em: [http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2021/WATU/Relat%C3%B3rio\\_da\\_Operac%C3%A7%C3%A3o\\_Watu\\_Fase\\_X.pdf](http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2021/WATU/Relat%C3%B3rio_da_Operac%C3%A7%C3%A3o_Watu_Fase_X.pdf)

UNISDR (2015) Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. In: UN world conference on disaster risk reduction, 2015 March 14–18, Sendai, Japan. Geneva: United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Disponível em: [http://www.unisdr.org/files/43291\\_sendaiframeworkfordrren.pdf](http://www.unisdr.org/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf).

UZAROWICZ, L.; Skiba, S. Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: Mineral transformations as an indicator of pedogenesis. **Geoderma**, v. 163, n. 1–2, p. 95–108, 2011.

VILLA, P. M. et al. Attributes of stand-age-dependent forest determine technosol fertility of Atlantic forest re-growing on mining tailings in Mariana, Brazil. **Journal of Forestry Research**, v. 33, n. 1, p. 103–116, 2022.

YEOMANS JC & BREMNER JM. 1988. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19: 1467-1476.