



JESSYCA ADRIANA GOMES FLORÊNCIO DA SILVA

**GLOMALINA E CARBONO ORGÂNICO DO SOLO:
ATRIBUTOS EFICIENTES NA AVALIAÇÃO DA
REABILITAÇÃO DE ÁREAS IMPACTADAS PELA
DEPOSIÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO.**

**LAVRAS – MG
2023.**

JESSYCA ADRIANA GOMES FLORENCIO DA SILVA

**GLOMALINA E CARBONO ORGÂNICO DO SOLO: ATRIBUTOS
EFICIENTES NA AVALIAÇÃO DA REABILITAÇÃO DE ÁREAS
IMPACTADAS PELA DEPOSIÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE
FERRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do Solo, para obtenção do título de Doutora.

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro

Orientador

**LAVRAS – MG
2023.**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com dados informados pelo (a) próprio (a) autor (a).

Silva, Jessyca Gomes.

Glomalina e CarbonoOrgânico do Solo: Atributos Eficientes na Avaliação da Reabilitação de Áreas Impactadas pela Deposição de Rejeito de Mineração de Ferro. / Jessyca Gomes Silva. - 2023.

72 p. : il.

Orientador: Marco Carbone Carneiro.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Rejeitos de Mineração. 2. Glomalina e Carbono do Solo. 3. Mariana Brasil.
I. Carneiro, Marco Carbone. II.

Título.

JESSYCA ADRIANA GOMES FLORENCIO DA SILVA

**GLOMALINA E CARBONO ORGÂNICO DO SOLO: ATRIBUTOS
EFICIENTES NA AVALIAÇÃO DA REABILITAÇÃO DE ÁREAS
IMPACTADAS PELA DEPOSIÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE
FERRO**

**GLOMALIN AND SOIL ORGANIC CARBON: EFFICIENT
ATTRIBUTES IN THE EVALUATION OF REHABILITATION OF AREAS
IMPACTED BY IRON MINING WASTE DEPOSITION**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do Solo, para obtenção do título de Doutora.

Aprovada em 16 de agosto de 2023.

Dr. Flavio Henrique Silveira Rabelo
Dra. Aline Oliveira Silva
Dr. Orivaldo Jose Saggin Junior
Dra. Anita Fernanda dos Santos Teixeira

UFLA
UFLA
EMBRAPA
UFLA

Prof. Dr. Marco Aurélio Carbone Carneiro

Orientador

**LAVRAS – MG
2023**

Ao meu pai Alexandre que se despediu da vida antes que eu
pudesse concretizar meus sonhos pessoais,
mas que sempre me ensinou
a persistir e acreditar.
Com imenso amor,
Ofereço.

*A minha mãe Shirley e minhas irmãs Sheysiane e Lyziane, que sempre são minha
rede de apoio e o motivo de eu nunca desistir.*

Com todo meu amor e gratidão

Dedicação

AGRADECIMENTOS

Agradeço a toda equipe administrativa e técnica do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, que sempre estar disposta a ajudar nos tramites burocráticos e no andamento das pesquisas (muito obrigada Dirce, Pezão e Paulo); aos (às) professores (as) pela partilha de conhecimento e a todos ensinamentos; aos (às) colegas da pós-graduação, pela convivência, pelos momentos de descontração e aprendizados em conjunto.

A toda equipe de pós-doutorandos Aline Silva, Marisângela e Jessé pelo auxílio mais próximo na tese, pela amiza, conselhos e correções. Aperriei demias vocês! Ao meu orientador Prof. Marco Aurélio Carbone Carneiro pela orientação, pelos conselhos e pela confiança; A família do laboratório de Biologia, Microbiologia e Processos Biológicos do Solo, que sempre me ajudaram, pelos momentos de descontração e por deixar os dias mais leves, com risadas e conversas intermináveis na hora do almoço.

A toda minha família pela torcida e apoio; a Grazielle que é doçura e complacência; à minha mãe Shirley, á Sheyse e Lyka, por estarem sempre presentes, mesmo com a distância física, por compreenderem minhas escolhas e por serem exemplo de responsabilidade, dedicação e força. Amo essas mulheres! A minha avó, que nunca deixou de lutar e sempre foi aconchego. Vocês fazem parte dessa conquista.

Um agradecimento especial a minha rede de apoio em Lavras, meus amigos e companheiros de vários momentos: Aline Franco, Ana Paula, Bruna, Davi, Leticia Vaz, Rayssa, Larissa, Bea, Tamires, Paulo.... Foram 4 anos, vários ciclos, mas cada um de vocês tem um papel importante durante essa jornada, sintam-se abraçadas (os) e parte desta conquista.

Ao meu companheiro James, que chegou na fase final da tese, mas que tem sido um grande apoio. Agradeço sua dedicação, sua coragem e vontade de fazer dar certo.

Aos órgãos de fomento CAPES, CNPq, FAPEMIG e Instituto Tecnológico Vale S/A pelo apoio financeiro, á UFLA e ao Departamento de Ciência do Solo – DCS - UFLA pelo apoio institucional. Agradeço o apoio das instituições que financiam e apoiam a pesquisa brasileira.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil provocou impactos ambientais severos, poluindo solos e corpos d'água, afetou negativamente a biodiversidade e a população local. A revegetação, como forma de reabilitação das áreas afetadas pelos rejeitos, proporciona bons resultados, incluindo o favorecimento de alguns microrganismos do solo, como os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), que além da ampla distribuição espacial, estão envolvidos no processo de agregação do solo, absorção de água e nutrientes e síntese de glomalina. A glomalina, também denominada como proteína do solo relacionada à glomalina (GRSP), é uma glicoproteína que está relacionada com a retenção de carbono no solo. Neste sentido, foram realizados dois estudos visando esclarecer o papel da GRSP no armazenamento de carbono no solo (SOC). No primeiro artigo, foi amostrado solos originais adjacentes (Und) e tecnossolos, nos anos de 2017, 2019 e 2021, ao longo dos Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo. Os resultados mostraram que o S_{SOC} foi 58% menor no tecnossolo em relação ao solo original. Os conteúdos de EE-GRSP, SOC se correlacionaram positivamente com características básicas da fertilidade do solo. Foi verificado também agrupamento dos tecnossolos nos anos de 2017 e 2019 e nítida separação espacial com os solos originais. Em 2021, as condições (Tecnossolos e Und) se agrupam. Esses achados revelam que após seis anos do processo de revegetação possa ter ocorrido acúmulo de carbono e outras formas como a própria EE-GRSP, nos tecnossolos. Um segundo artigo, foi desenvolvido com o objetivo de investigar as concentrações de EE-GRSP em áreas às margens do Rio Gualaxo do Norte, com diferentes processos de revegetação, e avaliar a contribuição da EE-GRSP no armazenamento de carbono e nutrientes, em tecnossolos com níveis diferentes de espessura de rejeito inicialmente depositado: camada de deposição superior a 1 m (Di), área com camada de deposição menor que 0,4 m (Pi); e uma área de solo original em que não houve deposição de rejeito (Und), em duas diferentes profundidades (0-3 e 10-13 cm). Avaliou-se também, três tipos de vegetação (Euc- área de plantio de eucalipto com revegetação antrópica; RF -área de mata com revegetação antrópica a partir da semeadura de plantas herbáceas; NF - área de mata com revegetação natural. O tecnossolo formado tem textura mais siltosa com menos argila que o solo original adjacente. Os baixos teores de EE-GRSP em Di e Pi em relação a Und pode indicar que o tempo de reabilitação não foi suficiente para acúmulo de EE-GRSP nas áreas afetadas. A EE-GRSP contribui para o SOC e ambos se correlacionam com propriedades químicas e de textura do solo e isso sugere que o aumento do conteúdo de EE-GRSP e SOC resulta em melhoria nos atributos do solo. As contribuições da GRSP para a reabilitação de áreas impactadas pela mineração de ferro e a análise detalhada do caso de Mariana fornecem *insights* valiosos para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de reabilitação ambiental, visando à preservação dos ecossistemas e serviços ecossistêmicos essenciais para a sustentabilidade do meio ambiente.

Palavras chaves: Mineração de Ferro. Barragem de Fundão. Glomalina. Carbono Orgânico do Solo.

ABSTRACT

The breach of the Fundão dam in Mariana, Minas Gerais, Brazil, caused severe environmental impacts, polluting soils and water bodies, and negatively affected local biodiversity and the population. Revegetation, as a means of rehabilitating areas affected by mining residues, has yielded positive results, including the promotion of some soil microorganisms, such as arbuscular mycorrhizal fungi (AMFs), which, in addition to their widespread spatial distribution, are involved in soil aggregation, water and nutrient absorption, and the synthesis of glomalin. Glomalin, also known as Glomalin-Related Soil Protein (GRSP), is a glycoprotein associated with soil carbon retention. In this context, two studies were conducted to clarify the role of GRSP in soil carbon storage (SOC). In the first article, original soils adjacent to technosols were sampled in 2017, 2019, and 2021, along the Gualaxo do Norte and Rio do Carmo rivers. The results showed that SSOC was 58% lower in the technosols compared to the original soil. The contents of EE-GRSP and SOC were positively correlated with basic soil fertility characteristics. There was also clustering of the technosols in 2017 and 2019 and a clear spatial separation from the original soils. In 2021, the conditions (Technosols and Undisturbed) grouped together. These findings suggest that after six years of the revegetation process, there may have been an accumulation of carbon and other forms, such as EE-GRSP, in the technosols. A second article was developed with the aim of investigating the concentrations of EE-GRSP in areas along the Gualaxo do Norte River with different reforestation processes and assessing the contribution of EE-GRSP to carbon and nutrient storage in technosols with different levels of initially deposited waste thickness: a deposition layer exceeding 1 m (Di), an area with a deposition layer less than 0.4 m (Pi), and an original soil area where no waste was deposited (Und), at two different depths (0-3 and 10-13 cm). Three types of vegetation were also evaluated (Euc - eucalyptus planting area with anthropic reforestation; RF - forest area with anthropic reforestation through herbaceous plant seeding; NF - forest area with natural reforestation). The formed technosol had a more silty texture with less clay than the adjacent original soil. The low EE-GRSP levels in Di and Pi compared to Und can indicate that the rehabilitation time was insufficient for EE-GRSP accumulation in the affected areas. EE-GRSP contributes to SOC, and both are correlated with soil chemical and textural properties, suggesting that an increase in EE-GRSP and SOC content results in soil attribute improvement. The contributions of GRSP to the rehabilitation of areas impacted by iron mining and the detailed analysis of the Mariana case provide valuable insights for the development of more effective environmental rehabilitation strategies aimed at preserving ecosystems and essential ecosystem services for environmental sustainability. Thus, the deposition and accumulation of glomalin in the soil may be a promising strategy for the recovery of areas degraded by iron mining in Mariana, contributing to carbon storage and soil property improvement.

Keywords: Iron Mining. Fundão Dam. Glomalin. Carbon Organic Matter.

SUMÁRIO

Sumário

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Mineração no Brasil e em Minas Gerais	12
2.2 Mineração de ferro e armazenamento de rejeitos	12
2.3 Acidentes envolvendo barragens de mineração	15
2.4 Revegetação de áreas degradadas pela mineração.....	17
2.5 Microrganismos na reabilitação de áreas degradadas pela mineração de ferro	19
2.6 Proteína do solo relativa a glomalina (GRSP): Contribuições para a Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração de Ferro	21
2.7 Mariana: desafios e perspectivas futuras.....	22
REFERÊNCIAS	25
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	29
Artigo 1: Avaliando o potencial de armazenamento de carbono no solo e a glomalina em áreas nas margens do Rio Galaxo do Norte impactadas por rejeitos de mineração de ferro.....	29
1 INTRODUÇÃO.....	30
2 MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1 Área de estudo	32
2.2 Amostragem de solo	33
2.3 Determinação dos atributos texturais, químicos e microbiológicos do solo	35
2.4 Análises estatísticas	36
3 RESULTADOS	36
3.1 Atributos texturais, químicos e microbiológicos do solo.....	36
3.2 Carbono orgânico do solo (SOC) e Estoque de carbono orgânico do solo (S _{SOC})	

3.3	Proteína do Solo Relacionada a Glomalina Facilmente Extraível (EE-GRPS)	39
3.4	Análises de componentes principais (PCA)	40
4	DISCUSSÃO	41
5	CONCLUSÃO	44
	REFERÊNCIAS	45
Artigo 2: O papel da glomalina no acúmulo de carbono no solo e na disponibilidade de nutrientes em Tecossolos originados de rejeitos de minério de ferro..... 50		
1	INTRODUÇÃO	51
2	MATERIAL E MÉTODOS	53
2.1	Área de estudo	53
2.2	Determinação das variáveis físicas, químicas e microbiológicas do solo	54
2.3	Análises estatística	56
3	RESULTADOS	56
3.1	Atributos de fertilidade, textura e densidade do solo	56
3.2	Análises de Correlação	59
3.3	Relação entre EE-GRSP e o estoque de carbono do solo	61
3.4	EE-GRSP	62
3.5	Colonização micorrízicas	63
4	DISCUSSÃO	63
5	CONCLUSÃO	66
6	REFERÊNCIAS	67
	Apendice B	71

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

A mineração é um setor que emprega milhões de pessoas em todo o mundo. No Brasil, a atividade mineradora é uma das mais importantes para a economia e é responsável pela produção de minérios de ferro, ouro, bauxita, nióbio, entre outros. Inclusive, o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de minério de ferro, com grandes reservas localizadas principalmente nos estados de Minas Gerais e Pará (Ibram, 2023).

No entanto, a mineração também pode ter efeitos negativos sobretudo ao meio ambiente e impactar na saúde das pessoas, razão pela qual é importante que essa atividade seja realizada de forma responsável e sustentável. Um dos gargalos da atividade mineradora é a grande quantidade de rejeitos gerados. Normalmente, o armazenamento desses rejeitos ocorre em barragens de mineração, que são estruturas construídas de forma a armazenar tais rejeitos a longo prazo (Ibram, 2016). No entanto, estas estruturas quando não são adequadamente gerenciadas, podem causar danos catastróficos. Ao longo do tempo os rejeitos podem se acumular e aumentar o risco de deslizamentos ou rompimentos das barragens.

Os rompimentos de barragens de rejeitos, podem lançar grande quantidade de rejeitos no meio ambiente de forma abrupta, causando danos irreversíveis ao solo e à água, além de afetar a biodiversidade e a população local. No Brasil, ocorreram dois grandes acidentes envolvendo barragens de mineração, o rompimento da barragem de Fundão, ocorrido no município de Mariana, e o rompimento da barragem Córrego do Feijão, em Brumadinho, ambos em Minas Gerais. Esses acidentes provocaram diversos impactos ambientais negativos imediatamente após o rompimento.

O rompimento da barragem de Fundão, é considerado um dos maiores desastres mundiais relacionados à mineração e o maior desastre socioambiental já ocorrido no Brasil. Os danos ambientais são incalculáveis. A lama de rejeitos percorreu mais de 600 km através dos cursos d'água e percorrendo o Rio Gualaxo do Norte, o Rio do Carmo e o Rio Doce, seguindo até o mar.

Após transbordar as margens dos rios, os rejeitos ficaram depositados nessas áreas, formando com um passar do tempo, um tecnossolo. Este, de acordo com as substâncias utilizadas no processo do beneficiamento do minério de ferro e com suas propriedades

mineralógicas, apresenta pH elevado, altos teores de Na, Fe e Mn, alta densidade, teores de areia e silte elevados e praticamente baixos teores de matéria orgânica (MO). Essas condições conferem aos tecnossolos dessas áreas, baixa infiltração de água e aeração.

Diversas ações foram realizadas afim de reduzir e minimizar os prejuízos, nessas áreas. Assim como, muitos estudos foram e estão sendo realizados nesse sentido. Dessa forma, este estudo tem como objetivo monitorar o processo de recuperação das áreas afetadas em Mariana, através da deposição e acúmulo de glomalina no solo que contribui para o armazenamento de carbono no solo e melhoria das características químicas e texturais do solo.

Para apresentação das pesquisas realizadas para compor esta tese, foram organizados dois artigos diferentes. O primeiro avalia o potencial de armazenamento de carbono orgânico (COS) e glomalina nos tecnossolos as nas margens do Rio Galáxo do Norte e Rio Carmo. Previamente, houve a coleta e análise de dados nos anos de 2017, 2019 e 2021. As coletas foram independentes e não houve comparação dos anos avaliados. O estudo foi realizado afim de observar as diferenças desses atributos, nos Tecnossolos e no solo original adjacente (referencia), englobando áreas com diferentes cotas de relevo e composição mineralógica, sem comparar a evolução dos teores de glomalina e COS, ao longo dos anos.

O segundo artigo avaliou o papel da glomalina no armazenamento de carbono do solo e disponibilidade de nutrientes em Tecnossolos formados a partir de rejeitos de minério de ferro. Buscou-se avaliar nestes dois estudos, os possíveis efeitos da glomalina na melhoria das condições químicas e acúmulo de carbono nesses tecnossolos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mineração no Brasil e em Minas Gerais

A atividade mineradora tem papel de grande importância no desenvolvimento econômico, social e tecnológico em um país, sobretudo países em desenvolvimento (Gamou et al., 2015). Ela também fornece matérias-primas essenciais à vida cotidiana atual.

No Brasil, por exemplo, a atividade mineradora é considerada uma das mais importantes para a balança comercial e ocupa lugar de destaque na produção e exportações de minérios. O minério de ferro é o produto mais exportado do setor de mineração brasileira, e o Brasil concentra a segunda maior reserva de minérios de ferro e a segunda maior produção mundial. A sua produção é concentrada, principalmente, nos estados de Minas Gerais (74,4% das reservas), Pará (19,5%) e Mato Grosso do Sul (2,2%) (Jesus; 2013), sendo uma das principais atividades econômicas nessas regiões (Agência Brasil, 2020; Ministério de Minas e Energia - MME, 2019).

Minas Gerais é o estado que concentra grandes reservas minerais e com isso é considerado o mais importante estado minerador do Brasil. As grandes reservas de minérios de ferro do estado estão situadas no Quadrilátero Ferrífero (Azevedo et al., 2011). Com isso a economia de Minas Gerais é fortemente influenciada pela Indústria Extrativa Mineral (Ibram, 2015a).

2.2 Mineração de ferro e armazenamento de rejeitos

Os principais minérios de ferro comercializados são a hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4), goethita (FeO/OH) e siderita (FeCO_3) (MME, 2011). Devido às suas propriedades químicas e físicas, praticamente todo o minério de ferro é utilizado na indústria siderúrgica (99%) para a produção de aço e ferro fundido (Jesus, 2013).

Os minérios de ferro após serem extraídos passam pelo processo de beneficiamento que tem por objetivo fazer a separação das impurezas contidas no mineral. Esta etapa é importante, pois ela visa tornar o mineral adequado à sua utilização industrial (Ibram, 2017).

O beneficiamento envolve processos de britagem, peneiramento, lavagem, classificação, concentração e pelletização. No processo de britagem vai ocorrer a fragmentação do mineral e, em seguida, o mineral é separado, por tamanho, espécie e/ ou fases. Nessa etapa, o minério passa por operações de peneiramento e classificação, onde o minério de ferro é classificado em granulados e finos (Jesus, 2013).

A concentração é considerada a fase mais importante do beneficiamento, pois tem como objetivo fazer a separação do minério em duas frações: o concentrado, e o descartável, também conhecido como rejeito. No mecanismo de concentração, a técnica mais comumente empregada na indústria mineral é a flotação, que consiste na separação de minérios de ferro na presença de gás e água para produção de material superfino, com alto teor de ferro, denominado *pellet feed* (Ibram, 2017).

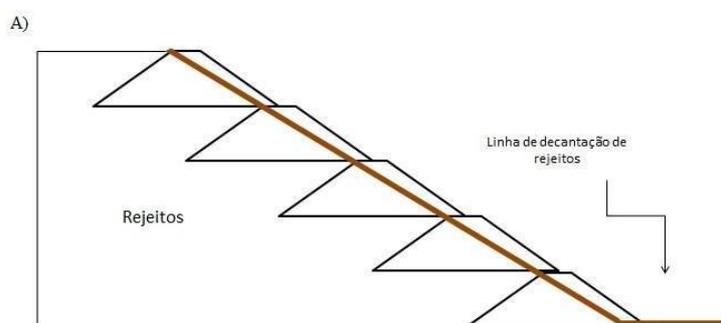
Por fim, os minérios são submetidos aos processos de aglomeração denominados de sinterização e pelletização. A sinterização é a adição de cal que resulta num produto aglomerado denominado *sinter*. Enquanto a pelletização gera como produto final a pelota, em decorrência da adição de calcário, moagem, sedimentação e homogeneização. Esse processo transforma em pelotas os minérios finos ou ultrafinos (Mourão, 2022).

Toda essa fase de processamento de minérios, desde a extração até a fase de beneficiamento, gera grande quantidade de resíduos e impurezas e pode provocar impactos ambientais. A fase de extração em minas de céu aberto, por exemplo, leva a degradação da vegetação local e retirada de grandes volumes de solo, que pode

desencadear processos erosivos (Portela, 2013). O solo removido é denominado estéril, que é, então, acumulado em grandes pilhas.

Na fase de beneficiamento, por sua vez, são gerados resíduos e efluentes (líquidos e sólidos) que são classificados como estéreis e rejeitos (Luz et al., 2010). Os estéreis são materiais descartados que foram retirados durante a extração do minério e são comumente dispostos em pilhas (Ibram, 2017). Enquanto os rejeitos são os subprodutos resultantes dos processos de beneficiamento de várias indústrias extrativas (Kossoff et al., 2014).

A destinação mais comum dada aos resíduos gerados durante o processo de beneficiamento é o armazenamento em barragens de resíduos, conforme estabelecido pela legislação. As barragens de mineração são utilizadas mundialmente e, normalmente, ocupam grandes áreas, causando modificações visuais no ambiente. As barragens podem ser construídas com material residual da mineração, estéreis ou o próprio rejeito, a partir de três métodos de levantamento: a montante, na linha de centro e a jusante (Figura 1). Os dois primeiros métodos são métodos mais econômicos, enquanto o último requer um volume maior de material a ser movimentado e compactado e tem custo mais elevado, por outro lado é mais segura (Ibram, 2017).



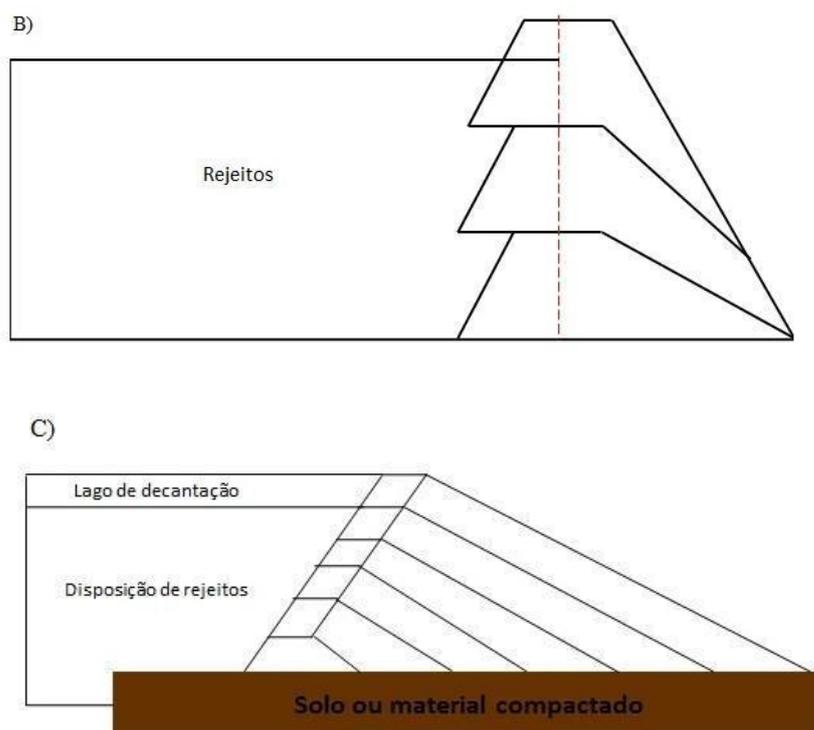


Figura 1: Ilustrações esquemáticas de barragens de rejeitos levantadas (a) a montante, (b) na linha central e (c) a jusante. Adaptada de Kossoff et al. (2014) e Ibram (2016).

No Brasil, as barragens de mineração são gerenciadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Quanto a segurança das barragens de rejeitos de mineração ocorre ainda negligências, tanto pela carência de políticas públicas mais efetivas, quanto pela baixa fiscalização por parte de órgão públicos. As causas desses acidentes são variadas, mas podem estar ligados a falta de manutenção, aumento na produção de minérios, erros de gerenciamento e causas naturais (Armstrong et al., 2019; Macklin et al., 2003; Rico et al., 2008). No entanto é importante lembrar que falhas nas estruturas de barragens de rejeitos podem culminar em consequências danosas ao meio ambiente e a vida das pessoas (de Oliveira Gomes et al., 2017; Pereira et al., 2019).

2.3 Acidentes envolvendo barragens de mineração

Aproximadamente 63 grandes acidentes envolvendo barragens de rejeitos ocorreram nos últimos 50 anos (Owen et al., 2020), e a partir dos anos 2000 a frequência

de acidentes graves no mundo são de cinco a seis por ano. No Brasil, dois grandes acidentes envolvendo rompimentos de barragens de rejeitos, ocorreram dentro de um intervalo de menos de 4 anos, ambos aconteceram no estado de Minas Gerais. A partir do colapso das barragens, grandes quantidades de lama foram lançadas no meio ambiente e causou muita destruição, contaminou cursos d'água, vitimou pessoas e animais (Faria, 2019; Lacaz et al., 2017). Os impactos ambientais são incalculáveis e os impactos se propagam por vários anos, estima-se que um longo período de tempo seja necessário para que ecossistemas terrestres e aquáticos alcancem um novo equilíbrio ecológico (Freitas et al., 2019; Freitas et al., 2016; Lopes, 2016).

Em novembro de 2015, a barragem de Fundão, que fazia parte do complexo minerário de Germano, localizado no município de Mariana/MG, desmoronou. A empresa responsável pela barragem, na época do acidente, era a Samarco. Esse acidente é considerado como um dos maiores desastres ambientais do Brasil envolvendo barragens de rejeitos em relação à quantidade de material despejado no meio ambiente e de área territorial de abrangência dos danos (Freitas et al., 2016; Ibama, 2015). Cerca de 43,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram lançados no meio ambiente, provocando a morte de 19 pessoas, impactos sobre a vegetação, contaminação de importantes rios como: o Gualaxo do Norte, o Carmo e o Doce, percorrendo mais de 600 km e arrastando parte dos rejeitos até o Oceano Atlântico, atingindo diversas praias próximas à região da foz do Rio Doce (do Carmo et al., 2017; Galvão et al., 2020).

A lama de rejeitos cobriu o solo nas áreas afetadas e causou danos quase irreversíveis. Os processos erosivos foram intensificados, e embora os rejeitos vindos das barragens não sejam tóxicos - resíduos classificados como não perigosos e não inertes para ferro e manganês conforme NBR 10.004 - depois de sedimentados comprometem a infiltração de água no solo, diminuem drasticamente os níveis de matéria orgânica e toda

a biodiversidade presente no solo e água foi afetada, diretamente ou indiretamente (Batista et al., 2020; Espindola et al., 2016; Ibama, 2015).

As perdas econômicas também são incalculáveis, afetando inclusive pessoas que não tenham ligação direta com as atividades mineradoras. Como por exemplo, a população da Bacia do Rio Doce até o litoral do Espírito Santo que foi impedida de exercer a pesca no rio (Oliveira; Oliveira, 2019).

2.4 Revegetação de áreas degradadas pela mineração

A revegetação é uma técnica de reabilitação muito importante para lidar com os impactos ambientais causados pela atividade de mineração. De forma geral, os principais impactos decorrentes da atividade mineradora são a degradação de solos e ambientes aquáticos. Isso ocorre devido a remoção da vegetação natural e de camadas do solo para extração mineral, expondo o solo aos processos erosivos, além de provocar o assoreamento de rios e córregos, impactando a fauna aquática e a qualidade da água. (Sha-Sha et al., 2011; Mechi; Sanches, 2010). Por si só, o início da atividade mineradora já envolve a remoção da cobertura vegetal e a perturbação do solo.

Mas a situação pode piorar com um evento trágico como o rompimento da barragem de Fundão em Mariana, estendendo os impactos negativos da mineração sobre áreas de preservação ambiental e à sociedade.

A remoção da cobertura vegetal e a perturbação do solo causada pelo acidente resultaram em uma considerável perda de carbono orgânico do solo, o que comprometeu a saúde do solo e sua capacidade de retenção de água (Couto et al., 2020; Omachi et al., 2018). Diante desse cenário, a reabilitação dessas áreas degradadas pelo acidente tornou-se uma prioridade. Dessa forma, a revegetação é uma ferramenta essencial nesse processo de recuperação das áreas impactadas. O plantio de espécies adaptadas, nativas da região,

desempenha um papel fundamental na recuperação do solo, na restauração da biodiversidade e no acúmulo de C no solo (Li et al., 2022; Yang et al., 2019). Nas áreas atingidas de Mariana, a revegetação antrópica foi realizada a partir de mix de sementes de plantas herbáceas nativas (Renova 2017), com uma abordagem que busca promover o rápido retorno de espécies e características do solo e auxiliando na fixação de carbono no solo.

No processo de revegetação, um aspecto importante a ser considerado é a relação simbiótica entre as plantas e os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs). Em um estudo sobre a revegetação das áreas afetadas em Mariana verificou-se que a diversidade da comunidade fúngica, incluindo FMAs, foi alterada pelos rejeitos oriundos da ruptura da barragem de Fundão (Prado et al., 2019). Os FMAs desempenham um papel essencial na recuperação do solo, promovendo a captura de nutrientes em especial a disponibilização de fósforo e outros elementos essenciais para o crescimento das plantas. A presença de FMAs na rizosfera das plantas ajuda a melhorar a absorção de nutrientes e impulsiona a comunidade vegetal (Vieira et al., 2018), aumentando a resiliência das plantas ao estresse ambiental.

A reabilitação de áreas degradadas pela mineração e a revegetação são processos complexos, que demandam planejamento, monitoramento e avaliação contínua das medidas implementadas. É fundamental que as empresas de mineração cumpram suas responsabilidades legais após a exploração dos recursos minerais ou de acidentes, minimizando os impactos negativos gerados por suas atividades.

A revegetação é uma ferramenta poderosa para a reabilitação de áreas impactadas pela mineração de ferro. Ela desempenha um papel fundamental na recuperação do solo, na restauração da biodiversidade e na preservação dos serviços ecossistêmicos. Através da adoção de práticas sustentáveis, técnicas de revegetação adequadas e o entendimento

da importância da simbiose entre plantas e FMAs, podemos alcançar uma reabilitação eficaz dessas áreas degradadas.

2.5 Microrganismos na reabilitação de áreas degradadas pela mineração de ferro

A microbiota do solo, representada sobretudo por fungos e bactérias, é altamente benéfica e desempenha diversos papéis vitais para a manutenção e funcionalidade desse ecossistema, além de representar a maior totalidade da sua biomassa (Heijden, 2008; Moreira e Siqueira, 2006). A ciclagem de nutrientes, assim como outros processos biogeoquímicos, é mediada por microrganismos presentes nos solos. Além disso, bactérias e fungos desempenham um papel essencial na captura e aumento dos estoques de carbono no solo, contribuindo significativamente para mitigar os efeitos do aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera (Buragohain, 2019; Liang et al., 2019).

Diferentes processos envolvendo bactérias e fungos no solo contribuem para aumentar o carbono orgânico do solo. Isso porque os microrganismos do solo são afetados pela disponibilidade de material orgânico (Van Der Heijden et al., 2008.) e utilizam resíduos orgânicos como fonte de carbono, gerando energia para seu desenvolvimento. Ou seja, estes microrganismos agem na decomposição desses resíduos e na conversão do carbono orgânico em formas mais estáveis, conhecidas como compostos húmicos (Mason et al., 2023). Esses compostos são mais resistentes à degradação microbiana, o que significa que permanecem no solo por longos períodos, contribuindo para a formação de estoques de carbono estáveis.

Além disso, a plasticidade das comunidades microbiológicas permite que elas se adaptem rapidamente a diferentes condições ambientais, tornando-os indicadores valiosos da qualidade e recuperação do solo após a mineração (Gastauer et al., 2019). Sua

abundância e diversidade podem ser asseguradas pela revegetação de áreas mineradas, que melhoram o aporte nutricional do solo e promovem o acúmulo de carbono total e nutrientes.

No entanto, a degradação resultante da mineração de ferro pode afetar a saúde da comunidade microbiana do solo, especialmente nos rejeitos de mineração, onde o pH elevado e a presença de metais pesados podem reduzir as comunidades microbianas e limitar os recursos disponíveis para os microrganismos (Batista et al., 2020). A baixa matéria orgânica também pode diminuir a diversidade microbiana e afetar o estabelecimento de espécies vegetais, dificultando a reabilitação do solo (Gastauer et al., 2020).

Em suma, os microrganismos rizosféricos têm um papel fundamental na resiliência e recuperação de solos degradados pela mineração de ferro. Sua atuação na ciclagem do carbono, através da decomposição da matéria orgânica e formação de compostos húmicos, é crucial para a sustentabilidade ambiental e para combater os impactos das mudanças climáticas. Portanto, a compreensão e o manejo adequado desses microrganismos são essenciais para promover a preservação eficaz das áreas degradadas e a preservação do meio ambiente. A diversidade e estrutura da comunidade microbiana do solo podem ser diretamente afetadas por múltiplos fatores no processo de reabilitação de áreas mineradas, mas a revegetação pode aumentar a abundância relativa de bactérias e fungos e melhorar o aporte nutricional do solo, promovendo a diminuição do pH e o acúmulo de carbono total e alguns nutrientes (Deng et al., 2020).

2.6 Proteína do solo relativa a glomalina (GRSP): Contribuições para a Reabilitação de Áreas Degradadas pela Mineração de Ferro

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são microsimbiontes obrigatórios capazes de formar associações com cerca de 90% das plantas, sendo esta uma das simbioses mais comuns na natureza. Esses fungos desempenham papéis importantes em diversos processos do ecossistema, sobretudo nos ciclos de C, N e P. (Fitter, 2005; Parniske, 2008). Com certeza, a mais notável contribuição das micorrizas é a absorção do fósforo.

Porém esse não é o único benefício das micorrizas no sistema solo-plantas. Pois, os FMAs influenciam a decomposição da matéria orgânica modificando a comunidade microbiana decompositora (XU et al., 2018), e favorece a nutrição das plantas melhoram a estrutura do solo (Barbosa et al., 2019), além de também modificar a comunidade microbiana na rizosfera (Fitter, 2005; Nuccio et al., 2013).

Simultaneamente ao colonizar as raízes das plantas, os FMAs formam micélios que se estendem no solo. Todas as estruturas dos FMAs produzem uma glicoproteína denominada de glomalina, a qual pode ser a maior contribuidora para a fração chamada de proteína do solo relacionada à glomalina (GRSP), que se acumula nos agregados do solo (Rilling et al., 2004). A presença da GRSP nesses agregados pode ajudar a aumentar o teor de carbono orgânico no solo de várias maneiras (Ahirwal et al., 2017), descritas a seguir.

Como a GRSP atua como um agente cimentante, ligando partículas de solo em agregados maiores e mais estáveis, esses agregados formam uma proteção ao carbono orgânico do solo (COS) (Barbosa et al., 2019; Bi et al., 2020; Nautiyal et al., 2019; Wang et al., 2018). Igualmente, as plantas quando têm acesso adequado a nutrientes, tendem a aumentar a produção de matéria orgânica por meio da fotossíntese. Isso resulta em um

maior aporte de carbono para o solo na forma de raízes mortas, exsudatos radiculares e resíduos vegetais, contribuindo também para o acúmulo de carbono no solo.

Estudos sobre a ocorrência e a composição dos FMAs, em áreas degradadas pela mineração mostram que esses fungos são favorecidos pelo processo de reabilitação (Prado et al., 2019; Spruyt et al., 2014; Straker et al., 2007), o que pode levar a um aumento da GRPS. O acúmulo de GRSP tem importante papel na reabilitação de ambientes degradados, sobretudo em áreas mineradas (Kumar et al., 2018; Šarapatka et al., 2019; Singh et al., 2016).

Portanto, compreender a importância e os benefícios de aumentar a GRSP para áreas degradadas é importante para a construção da matéria orgânica do solo e acúmulo de carbono. O estudo dessa glicoproteína pode ser um indicador da recuperação de áreas degradadas com rejeitos de Ferro e do aumento de estoques de carbono orgânico nesses ambientes.

2.7 Mariana: desafios e perspectivas futuras

Embora o Brasil já tenha anteriormente registrado desastres envolvendo barragens de rejeitos de mineração, nenhum deles teve impactos tão danosos ao meio ambiente quanto o que ocorreu na barragem do Fundão, em Mariana (Lacaz et al., 2017; Pereira et al., 2019). Com a ruptura de Fundão, a lama de rejeitos de minério de Fe foi depositada em espessas camadas sobre o solo ao longo da bacia do Rio Doce, entre Minas Gerais e Espírito Santo. Após secarem, os rejeitos de minério de Fe formaram uma camada densa e espessa com efeito selante na camada superficial dos solos (Silva et al., 2016; Zago et al., 2019), com a formação de Tecnossolos. Os Tecnossolos são solos formados a partir da ação humana, ou seja, são modificados na paisagem natural pelas atividades antrópicas (FAO, 2015).

Estes Tecnoossolos, formados a partir do rejeito de mineração de ferro da barragem de Fundão, apresentam condições físicas, químicas, mineralógicas e biológicas bem definidas (de Sá et al., 2023; Couto et al., 2020; Silva et al., 2021) que podem ser limitantes ao desenvolvimento vegetal e microbiano do solo. (Prado et al., 2019; Silva et al., 2021). Além disso, já foi verificado que estes Tecnoossolos apresentam um baixo potencial para a produção agrícola, devido ao baixo aporte nutricional e por suas propriedades físicas (Andrade et al., 2018).

Por isso, alguns estudos têm sido realizados visando reduzir os impactos nas áreas afetadas pela deposição de resíduos, particularmente próximo a Mariana, buscando o retorno dessas áreas a um estado biológico propício ao crescimento de plantas, animais e microrganismos (Prado et al., 2019b; Santos et al., 2019; Scotti et al., 2020).

Contudo, a reabilitação das áreas impactadas pelos rejeitos de mineração ainda é um desafio, visto que a deposição de rejeitos sobre os solos criou-se um novo ambiente inóspito para os microrganismos e vegetais, afetando negativamente a microbiota original e o funcionamento do ecossistema (Batista et al., 2020) e restringindo a restauração da vegetação nativa e o desenvolvimento agrícola (Silva et al., 2016).

Diversos estudos já foram realizados com o intuito de compreender os Tecnoossolos formados a partir da deposição de rejeitos de ferro em Mariana (Couto et al., 2021; Ferreira et al., 2021; Omachi et al., 2018; Silva et al., 2021). E determinar bioindicadores confiáveis do processo de restauração dessas áreas impactadas, seja através de organismos presentes nos solos, como os nematóides (Ribeiro et al., 2023) ou microrganismos capazes de colonizar esses Tecnoossolos, como os fungos micorrízicos arbusculares (Jordão et al., 2021; Prado et al., 2019).

Vale ressaltar que apesar dos esforços de estudos realizados para mitigar os impactos e buscar a restauração dessas áreas afetadas, a reabilitação das áreas impactadas

pela deposição de rejeitos de mineração ainda é um desafio complexo. E, portanto, é essencial continuar pesquisando e implementando estratégias para reduzir os impactos ambientais e avançar na reabilitação dessas áreas degradadas. Somente por meio de estudos contínuos poderemos buscar e confirmar o retorno dessas áreas a um estado biológico equilibrado e aceitável.

REFERÊNCIAS

- Agência Brasil. <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2020-02/ibram-producao-de-minerio-em-2019-caiu-mas-faturamento-cresceu>. Acessado em fevereiro de 2020.
- Alves, W., Ferreira, P., & Araújo, M. (2021). Challenges and pathways for Brazilian mining sustainability. *Resources Policy*, 74, 101648.
- Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas / Agência Nacional de Mineração; coordenação técnica de Marina Dalla Costa. – Brasília: ANM, 2021.
- Andrade, G. F., Paniz, F. P., Martins Jr, A. C., Rocha, B. A., da Silva Lobato, A. K., Rodrigues, J. L., ... & Batista, B. L. (2018). Agricultural use of Samarco's spilled mud assessed by rice cultivation: A promising residue use? *Chemosphere*, 193, 892-902.
- Andréa Mechi; Sanches, L. D. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. v. 24, n. 68, p. 209–220, 2010.
- Armstrong, M., Petter, R., & Petter, C. (2019). Why have so many tailings dams failed in recent years? *Resources Policy*, 63, 101412.
- Aronson, J., Goodwin, N., Orlando, L., Eisenberg, C., & Cross, A. T. (2020). A world of possibilities: six restoration strategies to support the United Nation's Decade on Ecosystem Restoration. *Restoration Ecology*, 28(4), 730-736.
- Asmelash, F., Bekele, T., & Birhane, E. (2016). The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in the restoration of degraded lands. *Frontiers in microbiology*, 7, 1095.
- Azevedo, Ú. R. et al. 2011. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. Geoparques do Brasil /Propostas - vol. 1, p. 183–219.
- Batista, E. R., Carneiro, J. J., Pinto, F. A., Dos Santos, J. V., & Carneiro, M. A. C. (2020). Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. *Science of the Total Environment*, 738, 139453.
- Buragohain, P. (2019). Role of microbes on carbon sequestration. *Int J Microbiol Res.* ISSN, 0975-5276.
- Couto, F. R.; Ferreira, A. M.; Pontes, P. P.; Marques, A. R. Physical, chemical and microbiological characterization of the soils contaminated by iron ore tailing mud after Fundão Dam disaster in Brazil. *Applied Soil Ecology*, v. 158, 2021.
- da Silva Junior, C. A., Coutinho, A. D., de Oliveira-Júnior, J. F., Teodoro, P. E., Lima, M., Shakir, M., ... & Johann, J. A. (2018). Analysis of the impact on vegetation caused by abrupt deforestation via orbital sensor in the environmental disaster of Mariana, Brazil. *Land Use Policy*, 76, 10-20.
- de Oliveira Gomes, L. E., Correa, L. B., Sá, F., Neto, R. R., & Bernardino, A. F. (2017). The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 120(1-2), 28-36.
- de Sá, R. T. S., Prianti, M. T. A., Andrade, R., Silva, A. O., Batista, É. R., Dos Santos, J. V., ... & Ribeiro, B. T. (2023). Detailed characterization of iron-rich tailings after the Fundão dam failure, Brazil, with inclusion of proximal sensors data, as a secure basis for environmental and agricultural restoration. *Environmental Research*, 228, 115858.
- Deng, J., Bai, X., Zhou, Y., Zhu, W., & Yin, Y. (2020). Variations of soil microbial communities accompanied by different vegetation restoration in an open-cut iron mining area. *Science of the Total Environment*, 704, 135243.

- do Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., de Campos, I. C., do Carmo, F. F., Silvino, G., ... & Pinto, C. E. F. (2017). Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in ecology and conservation*, 15(3), 145-151.
- Espindola, H. S., Campos, R. B. F., Lamounier, K. C. C., & Silva, R. S. (2016). Desastre da Samarco no Brasil: desafios para a conservação da biodiversidade. *Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, 5(3), 72-100.
- Faria, M. P. DE. Mariana e Brumadinho: a repercussão dos desastres do setor de mineração na saúde ambiental. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, v. 17, n. s1, p. 16–17, 2019.
- Ferreira, G.W.D., Ribeiro, B.T., Weindorf, D.C., Teixeira, B.I., Chakraborty, S., LI, B., Guilherme, L.R.G., & Scolforo, J.R.S. (2021). Assessment of iron-rich tailings via portable X-ray fluorescence spectrometry: the Mariana dam disaster, southeast Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 193. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08982-7>.
- Fitter, A. H. (2005). Darkness visible: reflections on underground ecology. *Journal of Ecology*, 93(2), 231-243.
- Freitas, C. M. DE et al. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, n. 5, 2019.
- Freitas, C. M. de; Silva, M. A. da; Menezes, F. C. DE. (2016). O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres. *Ciência e Cultura*, v. 68, n. 3, p. 25–30.
- Galvão, E. S., Sant, A., Cavichini, A., Rangel, C. V. G. T., Orlando, C. G. P., Grilo, C. F., ... & da Silva Quaresma, V. (2020). Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure. *Chemosphere*, 257, 127184.
- Gamu, J.; Le, P.; Spiegel, S. (2015). The Extractive Industries and Society Extractive industries and poverty: A review of recent findings and linkage mechanisms. *Biochemical Pharmacology*, v. 2, n. 1, p. 162–176.
- Gastauer, M., Vera, M. P. O., De Souza, K. P., Pires, E. S., Alves, R., Caldeira, C. F., ... & Oliveira, G. (2019). A metagenomic survey of soil microbial communities along a rehabilitation chronosequence after iron ore mining. *Scientific data*, 6(1), 1-10.
- IBRAM. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. [s.l: s.n.]. Instituto Brasileiro de Mineração. Panorama da mineração em Minas Gerais. [s.l: s.n.].
- Jesus, C. A. G. 2013. Ferro / Aço. *Dnpm*, n. 31, p. 99–116.
- Kossoff, D., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., Edwards, S. J., Macklin, M. G., & Hudson-Edwards, K. A. (2014). Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. *Applied Geochemistry*, 51, 229-245.
- Lacaz, F. A. D. C., Porto, M. F. D. S., & Pinheiro, T. M. M. (2017). Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. *Revista brasileira de saúde ocupacional*, 42, e9.
- Liang, C., Amelung, W., Lehmann, J., & Kästner, M. (2019). Quantitative assessment of microbial necromass contribution to soil organic matter. *Global change biology*, 25(11), 3578-3590.

- Li, Y., Xie, T., Yang, H., & Li, X. (2022). Revegetation enhances soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in the Tengger Desert, North China. *Catena*, 218, 106541.
- Lopes, L. M. N. (2016). O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. *Sinapse Múltipla*, 5(1), 1-1.
- Luz, A. B. da; Sampaio, J. A.; França, S. C. A. Tratamento de Minérios. CETEM, p. 465–512, 2010.
- Macklin, M. G., Brewer, P. A., Balteanu, D., Coulthard, T. J., Driga, B., Howard, A. J., & Zaharia, S. (2003). The long-term fate and environmental significance of contaminant metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramureş County, upper Tisa Basin, Romania. *Applied Geochemistry*, 18(2), 241-257.
- Mason, A. R. G., Salomon, M. J., Lowe, A. J., & Cavagnaro, T. R. (2023). Microbial solutions to soil carbon sequestration. *Journal of Cleaner Production*, 137993.
- Mourão, J. M. (2022). Aspectos conceituais relativos à pelotização de minérios de ferro. ABM Proceedings, ISBN: 5I125SALL, 250.
- NRM. Normas Reguladoras de Mineração – NRMDecreto-Lei nº227, de 28 de fevereiro de 1967, 2001.
- Nuccio, E. E., Hodge, A., Pett-Ridge, J., Herman, D. J., Weber, P. K., & Firestone, M. K. (2013). An arbuscular mycorrhizal fungus significantly modifies the soil bacterial community and nitrogen cycling during litter decomposition. *Environmental Microbiology*, 15(6), 1870-1881.
- Oliveira, V. D. C., & Oliveira, D. D. C. (2019). A semântica do eufemismo: mineração e tragédia em Brumadinho.
- Omachì, C. Y.; Siani, S. M.O.; CHAgas, F. M.; Mascagni, M. L.; Cordeiro, M. Garcia, G. D.; Thompson, C. C.; Siegle, E.; Thompson, F. L. Atlantic Forest loss caused by the world’s largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil), Remote Sensing Applications: *Society and Environment*, vol 12, p. 30-34, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.08.003>.
- Owen, J. R., Kemp, D., Lébre, É. Svobodova, K., & Murillo, G. P. (2020). Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure. *International journal of disaster risk reduction*, 42, 101361.
- Parniske, M. (2008). Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6(10), 763-775.
- Pereira, L. F., de Barros Cruz, G., & Guimarães, R. M. F. (2019). Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 122-129.
- Prado, I de O. G., da Silva, M. D. C. S., de Oliveira Prado, D. G., Kimmelmeier, K., Pedrosa, B. G., da Silva, C. C., & Kasuya, M. C. M. (2019). Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. *Applied soil ecology*, 141, 84-95. Reservas Demanda por minério de Ferro. 2015.
- Ribeiro, L. G., Puerari, H. H., Silva, A. O., Vaz, K. A., dos Santos, J. V., Nunes, C. A., ... & Carneiro, M. A. C. (2023). Structure and composition of the nematode community in a restoration area affected by iron tailings. *Pedobiologia*, 97, 150864.

- Rico, M., Benito, G., & Diez-Herrero, A. (2008). Floods from tailings dam failures. *Journal of hazardous materials*, 154(1-3), 79-87.
- Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, 84(4), 355-363
- Sha-Sha, F. U., Pei-Jun, L. I., Qian, F. E. N. G., Xiao-Jun, L. I., Peng, L. I., Yue-Bing, S. U. N., & Yang, C. H. E. N. (2011). Soil quality degradation in a magnesite mining area. *Pedosphere*, 21(1), 98-106.
- Silva, A. O., da Costa, A. M., dos Santos Teixeira, A. F., Guimaraes, A. A., dos Santos, J. V., & de Souza Moreira, F. M. (2018). Soil microbiological attributes indicate recovery of an iron mining area and of the biological quality of adjacent phytophysionomies. *Ecological Indicators*, 93, 142-151.
- Silva, AO, Guimarães, A A., Lopez, BDO, Zanchi, CS, Vega, CFP, Batista, ÉR, Moreira, FMS, Souza, FRC, Pinto, FA, Santos, JV, Carneiro, JJ, Siqueira, JO, Kemmelmeier, K, Guilherme, LRG, Rufini, M, Junior, MSD, Aragão, OOS, Borges, PHC, Oliveira-Longatti, SM, Carneiro, MAC, 2021. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. *Environ Monit Assess* 193, 462. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09234-4>
- Spruyt, A., Buck, M. T., Mia, A., & Straker, C. J. (2014). Arbuscular mycorrhiza (AM) status of rehabilitation plants of mine wastes in South Africa and determination of AM fungal diversity by analysis of the small subunit rRNA gene sequences. *South African Journal of Botany*, 94, 231-237.
- Straker, C. J., Weiersbye, I. M., & Witkowski, E. T. F. (2007). Arbuscular mycorrhiza status of gold and uranium tailings and surrounding soils of South Africa's deep level gold mines: I. Root colonization and spore levels. *South African Journal of Botany*, 73(2), 218-225.
- Van Der Heijden, M. G., Bardgett, R. D., & Van Straalen, N. M. (2008). The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology letters*, 11(3), 296-310.
- Vieira, C. K., dos Anjos Borges, L. G., Marconatto, L., Giongo, A., & Stürmer, S. L. (2018). Microbiome of a revegetated iron-mining site and pristine ecosystems from the Brazilian Cerrado. *Applied Soil Ecology*, 131, 55-65.
- Wu, Q.; XIA, R.; ZOU, Y. Improved soil structure and citrus growth after inoculation with three arbuscular mycorrhizal fungi under drought stress. v. 44, p. 122–128, 2008.
- Xu, J., Liu, S., Song, S., Guo, H., Tang, J., Yong, J. W., ... & Chen, X. (2018). Arbuscular mycorrhizal fungi influence decomposition and the associated soil microbial community under different soil phosphorus availability. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 181-190.
- Yang, Y., Tilman, D., Furey, G., & Lehman, C. (2019). Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature communications*, 10(1), 718.
- Zago, V. C. P., das Dores, N. C., & Watts, B. A. (2019). Strategy for phytomanagement in an area affected by iron ore dam rupture: A study case in Minas Gerais State, Brazil. *Environmental Pollution*, 249, 1029-1037.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

Artigo 1: Avaliando o potencial de armazenamento de carbono no solo e a glomalina em áreas nas margens do Rio Galaxo do Norte impactadas por rejeitos de mineração de ferro.

Jessyca Adriana Gomes Florêncio da Silva¹, Aline Oliveira Silva¹, Éder Rodrigues Batista¹, Jessé Valentim dos Santos¹, Letícia Gonçalves Ribeiro, Marisangela Viana Barbosa¹, Beatriz Macedo¹, Marco Aurélio Carbone Carneiro^{1*}

¹Department of Soil Science, Federal University of Lavras (UFLA), Lavras - MG, Brazil.

RESUMO

O armazenamento de carbono orgânico do solo (SOC) e de proteína do solo relacionada a glomalina fração facilmente extraível (EE-GRSP) podem ser chave no monitoramento de áreas degradadas por rejeitos de mineração. Na busca de avaliar tecnossolos formados a partir da deposição de rejeitos de ferro (Fe) às margens do rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo – Mariana- Brasil, foi investigado o armazenamento de EE-GRSP, os teores de SOC, o estoque de carbono orgânico do solo (S_{SOC}) e suas relações com outras variáveis químicas, texturais e microbiológicas do solo. O solo foi amostrado em solos originais adjacentes (Und) e em tecnossolos, com diferentes vegetações e cotas de relevo nos anos de 2017, 2019 e 2021. O S_{SOC} foi 58% menor no tecnossolo em relação ao solo original. Os conteúdos de EE-GRSP, SOC se correlacionaram positivamente com características básicas da fertilidade do solo. Foi verificado também agrupamento dos tecnossolos nos anos de 2017 e 2019 e nítida separação espacial com os solos originais. Em 2021, as condições (Tecnossolos e Und) se agrupam. De acordo com o presente estudo é possível que após seis anos do processo de revegetação tenham ocorrido acúmulo de carbono e outras formas como a própria EE-GRSP, nos tecnossolos.

Palavras chaves: Glomalina. Barragem de Fundão. Serviços Ecossistêmicos. Fungos Micorrízicos.

1 INTRODUÇÃO

Com o rompimento da barragem de Fundão foram lançados no meio ambiente cerca de 34 milhões de m³ de rejeito de minério de ferro (Ibama, 2015). A onda de rejeitos seguiu os fluxos dos cursos d'água dos rios que compõem a bacia do Rio Doce. Ela foi transportada pelo Rio Gualaxo do Norte, desaguou no Rio do Carmo e chegou no Rio Doce, cobrindo extensivamente os solos de várzea. O rio Gualaxo do Norte, um dos principais afluentes do Rio Doce, foi o curso d'água mais afetado pela deposição de rejeito da mineração de ferro, com cerca de 78 km de suas margens com camadas de deposição com mais de um metro de profundidade (Cunha Richard et al., 2020; Macedo et al., 2021; Segura et al., 2016; Silva et al., 2021). Essa deposição massiva de rejeitos resultou na supressão da vegetação e no soterramento dos solos causando modificações significativas nos parâmetros químicos, físicos e biológicos e conseqüentemente é provável que os serviços ecossistêmicos nessas áreas tenham sido afetados (Batista et al., 2022; Couto et al., 2021; Santos et al., 2019; Silva et al., 2021).

Para mitigar todos esses efeitos negativos da deposição do rejeito, esforços de revegetação foram empregados com a aplicação de mix de sementes de plantas de crescimento rápido, cuja função seria a rápida cobertura do solo e diminuição do processo erosivo (Renova, 2017). Após 7 anos do rompimento da barragem se faz necessário um monitoramento constante com foco na avaliação do processo de reabilitação e nesse sentido as plantas têm papel importante como a contribuição na entrada de carbono (C) ao solo (Hu et al., 2021).

O teor de carbono orgânico do solo (SOC) é utilizado com frequência na avaliação da qualidade do solo, pois tem relações importantes com as variáveis químicas, físicas e biológicas do solo (Batista et al., 2020; Lopes et al., 2013; Silva et al., 2018). Além disso, o aumento dos estoques de carbono orgânico do solo (S_{SOC}) tem grande potencial na mitigação das mudanças climáticas (Lal et al., 2018; Lal et al., 2021) e por isso estudos

buscam quantificá-lo em áreas em processo de reabilitação (Batista et al., 2022; Zhang et al., 2019). Em recente estudo em área de reabilitação após mineração na Amazônia brasileira, Ribeiro et al. (2022) aplicaram índices espectrais para prever o S_{SOC} e observaram que as áreas reabilitadas, assim como as áreas de mata nativa (referência), apresentaram valores similares de S_{SOC} , e cerca de 10 vezes maiores do que áreas não reabilitadas. Esses resultados podem estar relacionados a entrada de matéria orgânica nos solos em reabilitação.

Dentre as frações do carbono orgânico do solo, o carbono da biomassa microbiana e a proteína do solo relacionada a glomalina (GRSP) são bons indicadores e podem ser utilizados no monitoramento de áreas em processo de reabilitação (Zhang et al., 2018; Zhang et al., 2023). A biomassa microbiana refere-se a parte viva da matéria orgânica e atua em diversos processos-chaves para a manutenção do próprio carbono no solo, como a decomposição, mineralização e ciclagem de nutrientes. Além disso, em solos florestais da Índia (Das et al., 2023), o carbono da biomassa microbiana (CBM) correlacionou-se positivamente com o estoque SOC e a respiração basal do solo (RBS), indicando que esses fatores impulsionaram os estoques de CBM e SOC.

A GRSP tem parte de sua origem da glicoproteína glomalina produzida por fungos micorrízicos (Driver et al., 2005), pode auxiliar na indicação do processo de reabilitação das áreas impactadas pela deposição de rejeito. De acordo com Jordão et al. (2021), após dois anos do rompimento da barragem de Fundão ainda não foi possível verificar acúmulo de glomalina no Tecnosolo das áreas afetadas pelo rejeito. Em outro estudo, realizado na Índia, em áreas com diferentes estágios cronológicos de reabilitação da mineração de carvão, os autores relataram que o acúmulo de SOC e GRSP aumentou significativamente com o aumento do tempo de reabilitação (Kumar et al. 2018).

Após sete anos do rompimento da barragem de Fundão poucos são os estudos que avaliam o carbono orgânico no solo e as frações imobilizadas na biomassa microbiana e

na GRSP nas áreas afetadas pela deposição de rejeito da mineração de ferro. Portanto, neste trabalho foi proposto como hipótese que o carbono orgânico do solo e a biomassa microbiana e a GRSP, indicam o estágio de reabilitação das áreas afetadas pela deposição de rejeito da mineração de ferro. Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar os teores de carbono orgânico do solo (SOC) e a proteína do solo relacionada à glomalina facilmente extraível (EE-GRSP) em áreas afetadas pela deposição de rejeito da mineração de ferro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado nos anos de 2017, 2019 e 2021 em trechos ao longo das margens dos rios Gualaxo do Norte e Rio do Carmo, localizado em Mariana, MG, Brasil. Esse trecho abrangeu áreas que foram afetadas pelos rejeitos e posteriormente formaram-se Tecnosolos e áreas de solo original adjacente, utilizados como referencia (Fig. 1 e Tabela 1). As áreas de solo original adjacente (Und) não apresentaram depósitos de rejeitos. Nas coletas de 2017 e 2019 as amostragens de solo foram realizadas em áreas Und com declividade elevada, e os Tecnosolos foram coletados em áreas, adjacentes, mas com relevo plano. No ano de 2021, afim de eliminar um possível efeito do relevo nos resultados encontrados, realizou-se amostragens de solo em áreas de Tecnosolos e Und com a mesma cota de relevo. Por isso, as amostragens foram realizadas ao longo do Rio do Carmo. Vale ressaltar, que o estudo foi realizado de forma independente e não houve efeito de comparação dos anos avaliados. Ou seja, o presente estudo destaca as diferenças dos atributos avaliados entre os Tecnosolos e o solo original adjacente, sem comparar a evolução destes ao longo dos anos.

2.2 Amostragem de solo

Os locais de coleta estão representados na Figura 1. Para cada área foram amostrados solo Und e Tecnosolo da área com deposição de rejeitos.

Em cada área foi realizado um transecto de 25 m a cada cinco metros perpendicularmente ao leito do rio, demarcando cinco pontos. Em cada ponto foram coletadas cinco subamostras de solo na camada superficial (0-10 cm). As amostras de solo coletadas foram armazenadas em sacos hermeticamente fechados e armazenadas sob refrigeração (4 °C) para posteriores análises. As amostras úmidas de campo foram secas ao ar e peneiradas em malha de 4 mm para análise das variáveis físicas e químicas.

Foram coletadas amostras indeformadas com cilindros de aço com amostrador Uhland.

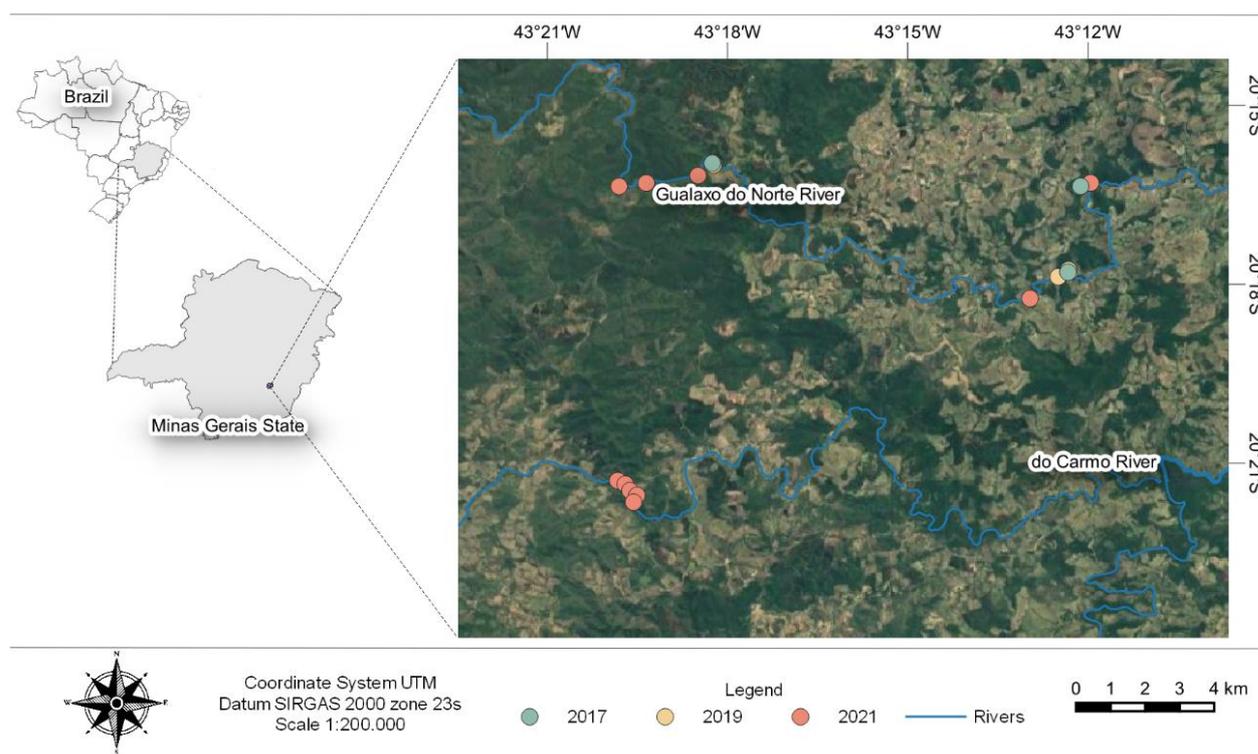


Figura 1: Áreas de coleta de Tecnosolo e solo original adjacente ao longo dos Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo, nos anos 2017, 2019 e 2021, em Mariana-Brasil.

Tabela 1 - Descrição dos locais de amostragens de solo, no momento da coleta, em áreas ao longo do Rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo, abordando as diferentes características das áreas avaliadas, nos anos de 2017, 2019 e 2021.

Anos	Condição	Descrição
2017	Tecnossolos	Vegetação em crescimento voluntário de espécies gramíneas e arbustivas. Processo de regeneração natural e revegetação com mistura de sementes de plantas de crescimento rápido que incluiu a gramínea (<i>Cynodon dactylan</i>) e diferentes leguminosas (<i>Cajanus cajan</i> , <i>Neonotomia wightii</i> , e <i>Mimosa sp.</i>).
	Und	Áreas não afetadas – solos adjacentes ao local de deposição de rejeitos. Vegetação formada de plantas arbóreas, nativas.
2019	Tecnossolos	Área afetada pela deposição de rejeitos. O processo de revegetação dessas áreas consistiu na semeadura de um mix de sementes.
	Und	Áreas não afetadas – solos adjacentes ao local de deposição de rejeitos. Vegetação formada de plantas arbóreas, nativas.
2021	Tecnossolos	O processo de revegetação dessas áreas consistiu na semeadura de um mix de sementes. Revegetada com plantas herbáceas e arbustivas, principalmente Assa-peixe (<i>Vernonia polysphaera</i>) e Maricá (<i>Mimosa bimucronata</i>).
	Und	Áreas não afetadas – Área de zona riparia com a influência do Rio Carmo, onde o depósito de rejeitos não atingiu os solos.

2.3 Determinação dos atributos texturais, químicos e microbiológicos do solo

A densidade do solo foi determinada dividindo a massa de solo seco a 105°C pelo volume da amostra (Teixeira et al., 2017). Quimicamente as amostras foram quantificadas quanto ao pH em água (1:2.5) e teores de Fe, Zn, Mn e Cu extraídos a partir da solução Mehlich-1 (Mehlich, 1953) e o teor de matéria orgânica do solo a partir da oxidação com dicromato de potássio em ácido médio (Walkley and Black, 1934). O estoque de SOC (S_{SOC}) foi calculado em toneladas de carbono por hectare: $(tC/ha-1) = (\text{carbono orgânico do solo } \%) \times (\text{massa de solo em um determinado volume [densidade do solo]})$ (Griffin et al., 2013).

O conteúdo de matéria orgânica foi convertido em carbono orgânico do solo com base na suposição de que a matéria orgânica contém 58% de C orgânico (Nelson e Sommers 1996).

O carbono da biomassa microbiana (MBC) foi determinado a partir de 10 g de solo pelo método de fumigação-extração (FE), proposto por Vance et al. (1987). A respiração basal do solo (SBR) foi quantificada pela metodologia proposta por Anderson e Domsch (1993). O quociente metabólico (qCO_2) foi calculado pela relação SBR/MBC (Anderson e Domsch, 1993), e o quociente microbiano ($qMic$) pela expressão MBC/Corg (Sparling, 1992). A proteína do solo relacionada à glomalina - fração facilmente extraível (EE-GRSP) foi extraída conforme a metodologia de Wright e Updahl, (1998). Inicialmente, pesou-se 1g de solo e foi adicionado a 8 ml de solução de citrato de sódio (20 μM a pH 7,0), seguido de autoclavagem por 30 minutos a 121 bar. Em seguida os frascos foram centrifugados a 5000 rpm por 15 minutos. Para determinar a concentração de glomalina, pipetou-se 100 μL do extrato em tubo de ensaio, adicionando 2 ml do reagente de Bradford aos tubos. Após esse procedimento os tubos foram levados para agitação em vórtex, aguardando-se 10 minutos para iniciar leitura de absorbância em espectrofotômetro a 595 nm, com a utilização de uma curva de calibração estabelecida com albumina de soro bovino (BSA) como proteína padrão purificada.

2.4 Análises estatísticas

Os dados foram submetidos a análise de normalidade e homoscedasticidade, em seguida à análise de variância. As médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey ($p \leq 0.05$) pelo software R (R Development Core Team, 2011) (Version 4,0). As características dos solos afetados pela deposição de rejeitos, em Mariana foram analisadas e comparadas com solos de mata nativa não afetados pelos rejeitos (referência) usando ANOVA. Os dados foram transformados em raiz ou log quando necessário. A análise de componentes principais (PCA) foi realizada no software R (R Development Core Team, 2011) (Version 4.0), para demonstrar a ordenação dos tratamentos e sua relação com as variáveis químicas e físicas do solo.

3 RESULTADOS

3.1 Atributos texturais, químicos e microbiológicos do solo

Os dados básicos das propriedades do solo de todos os locais são mostrados na Tabela 2. Os teores de silte e a densidade do solo foram maiores ($p < 0.05$) nos Tecnosolos, nos três anos avaliados.

Os resultados indicam que o pH nos Tecnosolos é quase neutro, variando de 6,9 a 7,4. Em Und o pH moderadamente ácido durante as avaliações de 2017 e 2019. Nos anos de 2017 e 2019, os teores de MOS foram mais baixos nos Tecnosolos em comparação com áreas não afetadas. No entanto, não houve diferenças significativas nos teores de matéria orgânica do solo (MOS) entre as áreas afetadas e não afetadas em 2021. Os teores de cobre (Cu) se mantiveram estáveis tanto nos Tecnosolos quanto em Und. Nos anos de 2017 e 2019, os teores de ferro (Fe) e manganês (Mn) foram significativamente maiores nos Tecnosolos em comparação com Und. Essas diferenças não foram observadas em 2021, onde não houve diferenças significativas nos teores de Fe e Mn entre Tecnosolos e Und.

Também não foram encontradas diferenças significativas na respiração do solo (MR) em relação aos Tecnosolos e Und.

Tabela 2 - Atributos texturais, químicos e microbiológicos de Tecnosolos formados pela deposição de rejeitos após o rompimento da barragem de Fundão e de solos originais adjacentes (Und) ao longo dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, em 2017, 2019 e 2021. Médias com desvio padrão. As letras indicam diferenças nas condições das áreas, por Tukey ($p < 0,05$). Não houve comparação entre os anos.

Atributos dos solos	2017		2019		2021	
	tecnossolo	Und	tecnossolo	Und	tecnossolo	Und
Argila (%)	6 ±2.4 b	24 ±3.9 a	7±1.45 b	29 ±3.93 a	11 ±3.9 a	15 ±8.5 a
Silte (%)	34±6.2a	18 ±5.6 b	46 ±1.92 a	22 ±4.83 b	44 ±12.9 ^a	34 ±17.0b
Areia (%)	60 ±7.7a	58 ±5.9 a	47 ±3.31 a	49 ±3.25 a	45 ±10.5 a	51 ±22.6a
Densidade do solo	1.82 ±0.4 a	1.43 ±0.3 b	1.75 ±0.1 a	1.19 ±0.1 b	1.46 ±0.2 a	0.92 ±0.1 b
pH	7.4 ±0.8 a	4.64 ±0.7 b	6.9 ±0.8 a	4.9 ±0.5 b	6.17 ±0.6 a	6.0 ±0.8 a
MO (g kg ⁻¹)	0.45±0.2 b	2.6 ±1.0 a	1.9 ±1.1 b	3.4 ±1.1 a	2.38 ±1.2 a	2.9 ±1.5 a
Cu (mg kg ⁻¹)	1.26 ±1.6 a	1.43 ±0.3a	1.18 ±1.4a	2.29 ±3.9 ^a	0.10 ±0.1 a	0.22 ± 0.0a
Fe (mg kg ⁻¹)	154±24 a	112±49.1b	182±90a	79.6 ±14b	146 ±7 a	140 ±3 a
Mn (mg kg ⁻¹)	102 ±50 a	77.41 ±56 b	146±47 a	65.6 ±20 b	191 ±8 a	257 ±11 a
Zn (mg kg ⁻¹)	0.56 ±0.3 b	1.32 ±0.3 a	0.81 ±0.5 b	2.38 ±1.0 a	0.18 ±0.2 a	0.32 ±0.1 a
CBM (µg C g ⁻¹ solo seco)	59 ± 21a	248 ± 121a	162± 112 a	330 ± 162 a	484 ± 404 b	918 ± 363 a
RB (mg C-CO ₂ g ⁻¹ h ⁻¹)	2.58 ± 1.7a	3.03 ± 1.7 a	9.24 ± 4.7 a	15.29±11 a	1.58 ± 0.6 a	1.91 ± 0.5 a

Cu- cobre; Fe- ferro; Mn- manganês; Zn – zinco; CBM– Carbono da Biomassa Microbiana; RB – Respiração basal do solo

3.2 Carbono orgânico do solo (SOC) e Estoque de carbono orgânico do solo (Ssoc)

Nas avaliações realizadas no ano de 2017 e 2019 o SOC em Und era três vezes maior que nos tecnossolos. No ano de 2021 não houve diferença nos teores de SOC entre tecnossolos e Und, provavelmente devido a escolha da não afetada no ano de 2021 (Figura 2). Comportamento semelhante ao SOC foi observado nas porcentagens de Ssoc que foram maiores em Und, em amostragens de 2017 e 2019. Enquanto em 2021 não ocorreram diferenças ($p > 0.05$) entre áreas (Tecnossolos e Und) (Figura 3).

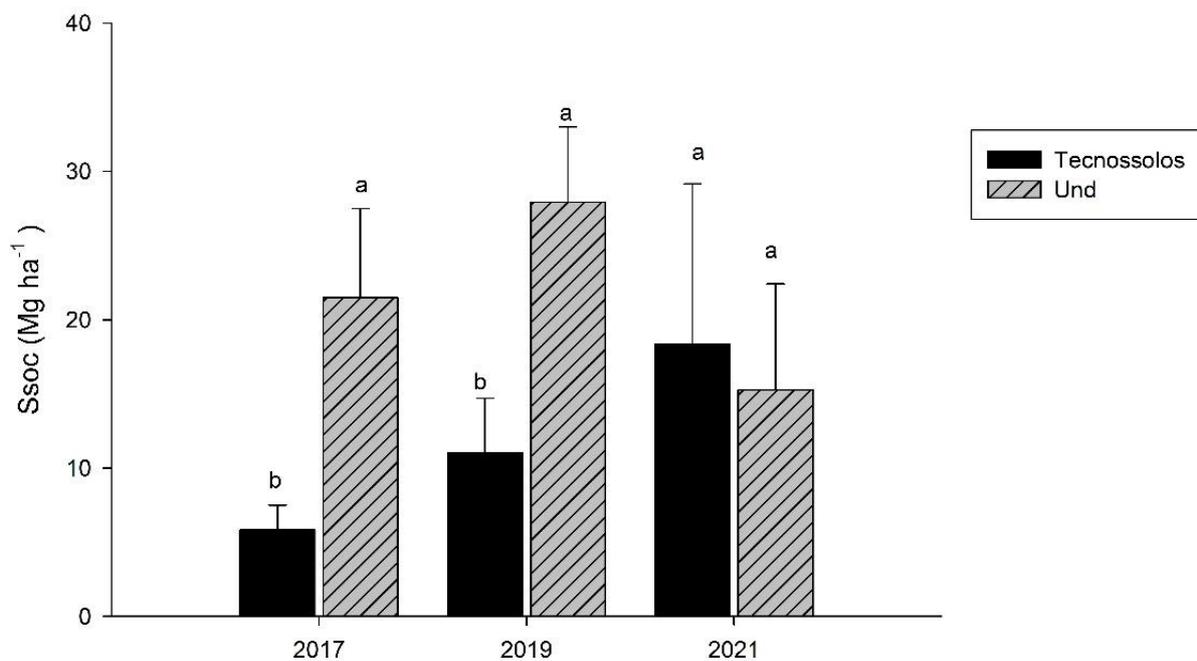


Figura 2: Carbono orgânico do solo (SOC) em Tecnossolos e Und após a deposição de rejeitos de Fe, em Mariana, em 2017, 2019 e 2021. As barras representam a média e as barras de erro representam o erro padrão da média. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p > 0.05$) nas condições das áreas.

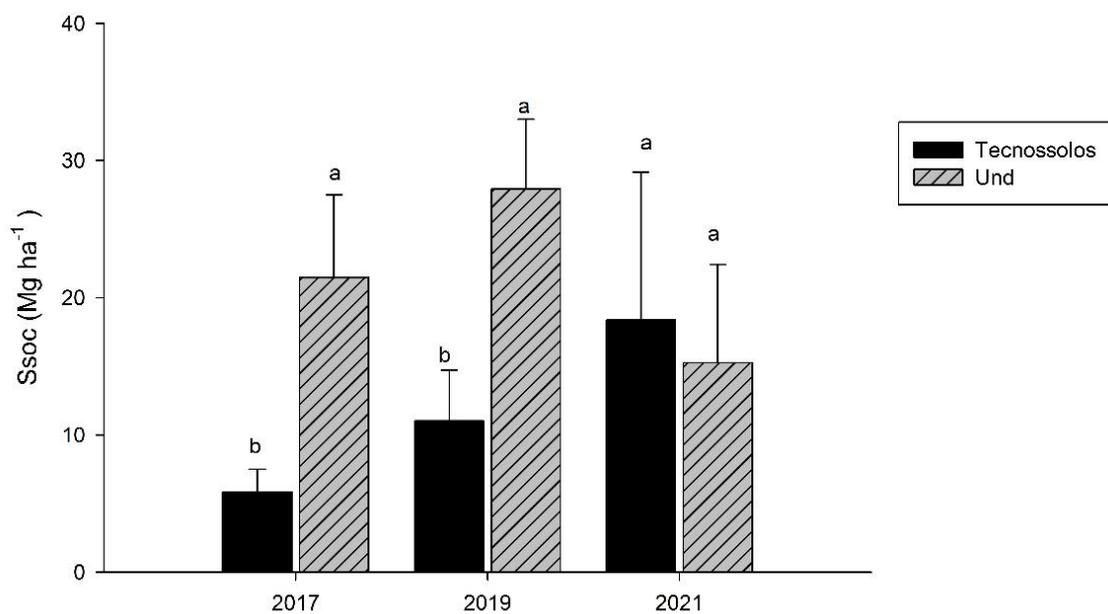


Figura 3: Estoque de carbono orgânico do solo (S_{SOC}) em Tecnossolos e Und após a deposição de rejeitos de Fe, em Mariana, em 2017, 2019 e 2021. As barras representam a média e as barras de erro representam o erro padrão da média. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p > 0.05$) nas condições das áreas.

3.3 Proteína do Solo Relacionada a Glomalina Facilmente Extraível (EE-GRPS)

O conteúdo de proteína relacionada à glomalina do solo, fração facilmente extraível (EE-GRSP) foi maior em Und, em relação aos Tecnosolos, nos anos três anos avaliados (2017, 2019 e 2021) (Figura 4).

A relação de EE-GRSP-C e SOC (EE-GRSP/SOC) foi maior nos Tecnosolos em relação a Und (Tabela 3). Em 2021, não houve diferenças significativas entre ambas as áreas (Tecnossolos e Und). Observamos ainda que houve uma tendência de redução da relação EE-GRSP/SOC de 2017 até 2021, embora não haja comparação dessa relação ao longo dos anos. A tabela mostra também a relação do CBM pelo SOC, denominada de quociente microbiano (qMIC) e a relação RB pelo CBM, denominada de quociente metabólico (qCO₂). Foi observado baixos valores de qMIC, indicando baixa reserva de compostos orgânicos nessas áreas.

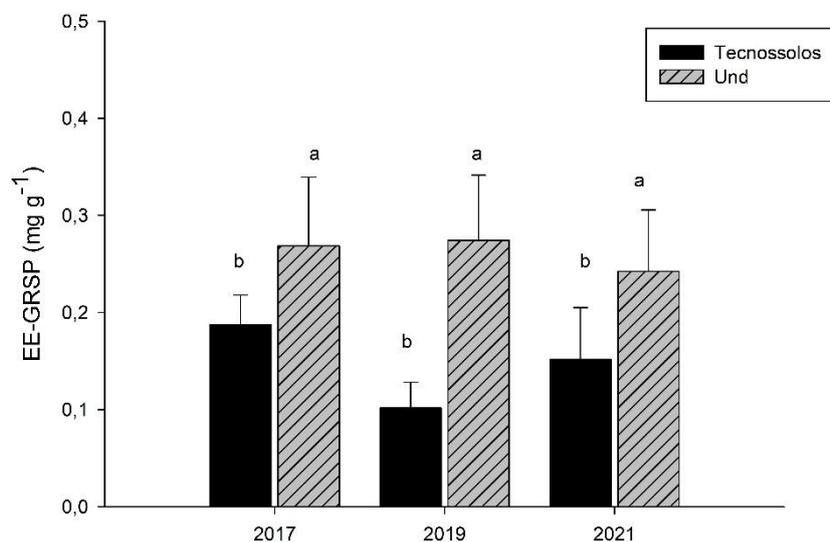


Figura 4: Proteína do solo relacionada à glomalina facilmente extraível (EE-GRSP) em Tecnosolos e Und após a deposição de rejeitos de Fe, em Mariana, em 2017, 2019 e 2021. As barras representam a média e as barras de erro representam o erro padrão da média. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p > 0.05$) nas condições das áreas.

Tabela 3 - Razão entre EE-GRSP-C e SOC, qMIC e qCO₂ em Tecnosolos e Und após a deposição de rejeitos de Fe, em Mariana, em 2017, 2019 e 2021, usando teste Tukey ($p < 0,05$). (Médias com SD entre parênteses). As letras indicam diferenças significativas ($p > 0.05$) nas condições das áreas. Não houve a comparação entre os anos.

Anos	EE-GRSP/ SOC (%)		CBM/ SOC (qMIC)		qCO ₂	
	Tecnossolos	Und	Tecnossolos	Und	Tecnossolos	Und
2017	5,84 ±1,75 a	1,92 ±0,70 b	0,50 ±0,08 b	1,21 ± 0,61 a	0,20 ± 0,03 a	0,11 ± 0,0 a
2019	11,61 ±0,43 a	7,06 ±0,03 b	1,18 ± 0,52 a	0,85 ± 0,0 b	6,73 ± 3,1 a	4,50 ± 2,2 b
2021	1,28 ±0,23 b	1,49 ±0,47 a	0,06 ± 0,0 a	0,08 ± 0,0 a	2,19 ± 1,3 a	1,47 ± 0,8 a

3.4 Análises de componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) mostrou a associação entre os atributos químicos, texturais e microbiológicos do solo e os anos de avaliação, em tecnossolos e Und (Figura 5). A PCA mostrou uma variância total de 54,47% (PC1: 32.90% e PC2: 21.57%). Foi observada nítida separação entre condições (Tecnossolos e Und) e os anos de avaliação (2017, 2019 e 2021). É possível observar um agrupamento dos tecnossolos nos anos de 2017 e 2019 e separação espacial com Und. Em Und houve um agrupamento da EE-GRSP, SOC e Ssoc. Enquanto os tecnossolos se agruparam com Fe, Mn e qCO₂. A densidade do solo, pH e o teor de silte foram as variáveis que mais influenciaram negativamente a EE-GRSP e Ssoc. Em 2021, as condições (Tecnossolos e Und) se agrupam.

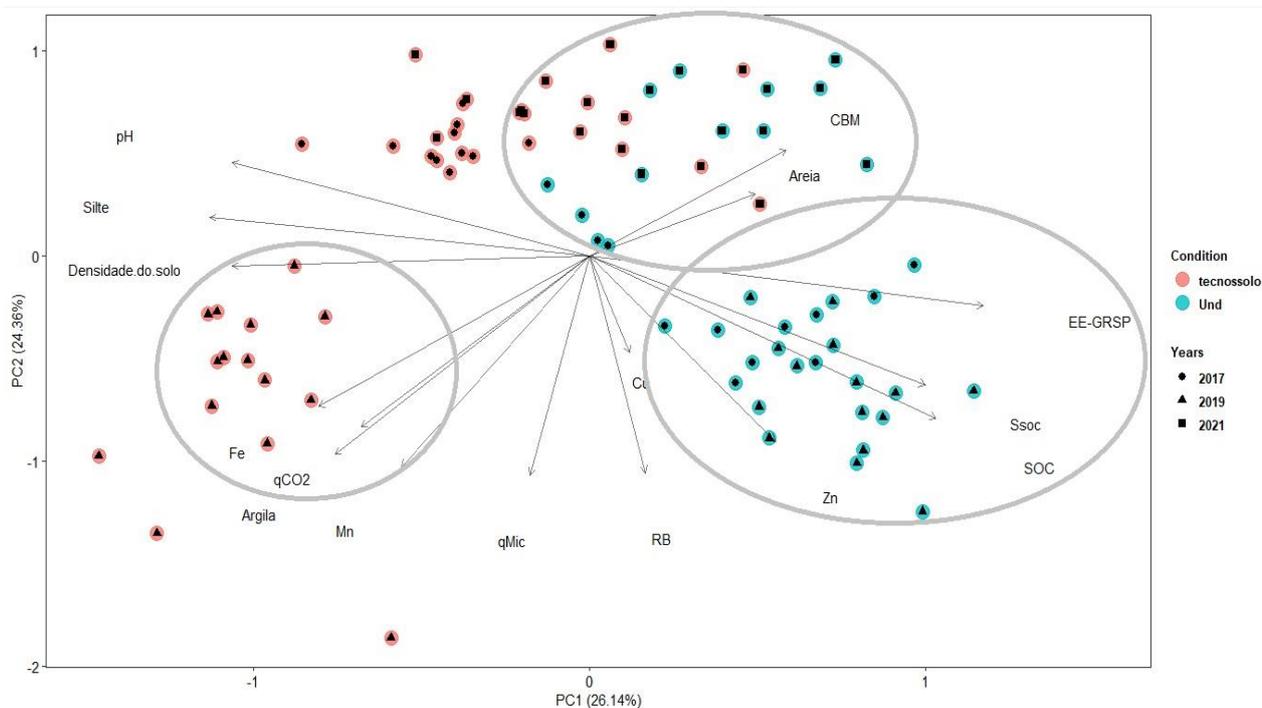


Figura 5. Análise de Componentes Principais - PCA (PC1 vs PC2) em Tecnosolos e Und após a deposição de rejeitos de Fe, em Mariana, em 2017, 2019 e 2021. As setas representam os fatores de carregamento das variáveis. Nota: SOC = carbono orgânico total, CBM= carbono da biomassa microbiana, BR= respiração basal, S_{soc} = estoque de carbono, EE-GRSP = proteína do solo relacionada à glomalina fração facilmente extraível, Cu= cobre, Fe= ferro, Mn = manganês, Zn= zinco.

4 DISCUSSÃO

O carbono orgânico do solo, a biomassa microbiana e a EE-GRSP, são indicadores pontenciais do estágio de reabilitação de tecnossolos oriundos de rejeitos de Fe. A biomassa microbiana representa a fração viva da MO do solo, que contém C submetido a uma ciclagem rápida (). Já a glomalina tem um importante papel na formação de agregados do solo e na retenção de carbono do solo (Barbosa et al., 2019), por isso é frequentemente utilizada como indicadora da qualidade do solo, especialmente em termos de sua estrutura física.

A deposição de rejeitos de minério de ferro às margens do Rio Gualaxo do Norte, resultou na formação de uma camada de rejeito maior que um metro de profundidade, formando um Tecnosolo com baixa infiltração. Isso ocorre devido à alta concentração de silte e densidade do solo elevada (Tabela 1) como já relatado em outros estudos na mesma localidade (Ferreira et al.,

2021; Silva et al., 2021). Como descrito por Batista et al. (2020), Couto et al. (2021) e Silva et al. (2021) essas características químicas e físicas dos tecnossolos, formados a partir de rejeitos de minério de ferro, criam um ambiente desfavorável para os microrganismos do solo executarem suas funções como a decomposição e mineralização dos resíduos orgânicos, ciclagem de nutrientes, formação de agregados no solo e simbioses radiculares. Por exemplo, a densidade do solo acima de $1,82 \text{ g cm}^{-3}$ afeta negativamente o desenvolvimento das raízes e toda a microbiota associada a rizosfera (Bengough et al., 2011), limitando a absorção de água, nutrientes e oxigênio pelas raízes, comprometendo o crescimento e o desenvolvimento das plantas.

O processo emergencial de revegetação das áreas afetadas utilizando plantas de crescimento rápido contribuiu para a adição de resíduos orgânicos e para o acúmulo de matéria orgânica, já observado a partir de 2019. As diferenças da concentração de carbono orgânico entre os tecnossolos e solo original adjacente foram mais evidentes em 2017 e 2019, corroborando com resultados de outros estudos realizados no mesmo período (Jordão et al., 2021; Prado et al., 2019; Santos et al., 2019), no entanto, a contribuição da glomalina não é relatada nesses estudos, mas fica evidente sua participação no sequestro de carbono e sua participação nos processos de reabilitação do solo. Já que a glomalina é um componente das hifas e da parede dos esporos dos FMA's e se acumula no solo mesmo após a renovação do FMA (Wright e Upadhyaya, 1996). Embora no presente estudo não tenha sido avaliada a densidade de esporos, a literatura disponível sugere aumento dos esporos de FMA a partir de revegetação e isso pode ser razão para aumentar o conteúdo de glomalina ao longo do tempo (Kumar et al., 2018; Jordão et al., 2021; Prado et al., 2019).

No presente estudo, observou-se que a fração EE-GRSP contribuiu significativamente para o armazenamento de carbono orgânico no solo, principalmente nas áreas afetadas em 2017 e 2019 (Tabela 3). A contribuição de EE-GRSP para carbono orgânico foi de 3,5 a 1,5 vezes maior em as áreas afetadas comparadas às áreas não afetadas nos respectivos anos. Os nossos resultados indicam que a variação nos teores de MO do solo pode ser atribuída a fatores como a regeneração

natural do solo e as condições de revegetação. Segundo, Wang et al. (2014), o pH do solo é um dos principais responsável pelas diferenças na concentração de EE-GRSP. Solos neutros a levemente ácido aumentam a glomalina, provavelmente devido ao melhor desenvolvimento das raízes das plantas e dos FMA's do solo nessas condições (Wang et al., 2020). No entanto, é importante ressaltar que são necessárias mais análises e acompanhamento a longo prazo para uma compreensão completa dos efeitos da deposição de rejeitos nessas áreas.

Os resultados do presente estudo mostram que as comunidades microbianas estavam em estresse principalmente devido a baixa disponibilidade de recursos como resíduos orgânicos e a própria matéria orgânica. Os valores baixos de qMIC indicam baixa atividade microbiana, indicando menor reserva de compostos orgânicos (Tabela 3). Isso sugere um maior consumo de carbono para manutenção da comunidade microbiana em solos afetados por rejeitos de mineração, em Mariana (Batista et al., 2020). A glomalina teve uma correlação positiva e significativa com o SOC nas áreas Und e associação negativa com qCO₂, nos tecnossolos (Fig. 5). O quociente metabólico está relacionado à atividade microbiana no solo, logo pode-se inferir que a atividade microbiana está reduzida nos tecnossolos, sobretudo nos anos 2017 e 2019.

Neste estudo nós consideramos os S_{SOC} superficial (0-10 cm). O estoque de carbono foi de 5,8 Mg ha⁻¹ e esse valor foi 58% menor no tecnossolo em relação ao solo original (Fig. 4). Esses valores estão próximos aos encontrados por Zhang et al. (2020) (~ 5,2 Mg ha⁻¹) e Ahirwal and Maiti (2018) (~ 7,9 Mg ha⁻¹) na camada superior, em locais revegetados após atividade de mineração. No ano de 2021, não houve diferença significativa entre as áreas de mata nativa (referência) e as áreas afetadas, assim como os níveis de SOC não diferiram entre as áreas (Fig. 3). De acordo com Leal et al. (2016), o tempo médio necessário para que as propriedades do solo, incluindo SOC, em locais revegetados após a mineração de carvão, atinja os mesmos níveis de um local não perturbado é de 23 a 25 anos. No entanto, o tempo necessário para a reabilitação de solos é incerto e depende de vários fatores como o tipo de degradação e o método de reabilitação adotado. Sendo assim, a eficácia da reabilitação de áreas degradadas pela mineração depende das

abordagens adotadas, como a revegetação e as práticas de manejo aplicadas para restaurar os teores de SOC (Ussiri; Lal, 2005; Zhang et al., 2020). De acordo com o presente estudo é possível que após seis anos do processo de revegetação tenham ocorrido acúmulo de carbono e outras formas como a própria EE-GRSP, nos tecnossolos. Os similares teores do estoque de carbono nos tecnossolos e Und encontrados nas amostragens realizadas em 2021 podem ser indicativos que a cobertura do solo contribuiu para a entrada e armazenamento do carbono nessas áreas (Qin et al., 2020; Sutfin et al., 2015). É crucial destacar que o carbono presente na biomassa microbiana, incluindo a glomalina, representa uma fração pequena, porém altamente dinâmica, do estoque total de carbono do solo. Embora a biomassa microbiana seja fortemente influenciada por fatores ambientais e práticas de manejo do solo, ela desempenha um papel fundamental na ciclagem de nutrientes e na dinâmica do carbono, afetando a quantidade e disponibilidade de carbono orgânico para as plantas e outros organismos do ecossistema. Além disso, a avaliação de CBM, EE-GRSP e SOC pode fornecer informações valiosas sobre o estado de recuperação de áreas degradadas pela mineração, visto que a partir destes influenciam direta ou indiretamente a estrutura e a fertilidade do solo.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a presença de proteína do solo relacionada a glomalina fração facilmente extraível EE-GRSP, desempenhou um papel crucial no armazenamento de carbono orgânico, influenciando a recuperação do solo. No entanto, o processo de reabilitação do solo ainda requer mais tempo e estudos para avaliar plenamente sua eficácia. A EE-GRSP assim como o CBM mostraram ser variáveis eficientes para avaliar o acúmulo de carbono orgânico do solo em tecnossolos formados a partir de deposição de rejeitos de mineração de Fe. Assim como, seis após anos o processo de revegetação nos tecnossolos é provável que está ocorrendo acúmulo de carbono e outras formas como a própria EE-GRSP que podem ser usadas como indicadores da reabilitação da qualidade de tecnossolos.

REFERÊNCIAS

- Ahirwal, J., & Maiti, S. K. (2017). Assessment of carbon sequestration potential of revegetated coal mine overburden dumps: A chronosequence study from dry tropical climate. *Journal of environmental management*, 201, 369-377.
- Anderson, J. D., Ingram, L. J., & Stahl, P. D. (2008). Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid-mined lands of Wyoming. *Applied Soil Ecology*, 40(2), 387-397.
- Anderson, T. H., & Domsch, A. K. (1993). The metabolic quotient for CO₂ (qCO₂) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions, such as pH, on the microbial biomass of forest soils. *Soil biology and biochemistry*, 25(3), 393-395.
- Barbosa, M. V., Pedroso, D. D. F., Curi, N., & Carneiro, M. A. C. (2019). Do different arbuscular mycorrhizal fungi affect the formation and stability of soil aggregates? *Ciência e Agrotecnologia*, 43.
- Batista, E. R., Carneiro, J. J., Pinto, F. A., Dos Santos, J. V., Carneiro, M. A. C. (2020). Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. *Science of the Total Environment*, 738, 139453.
- Batista, É. R., de Jesus Franco, A., da Silva, A. P. V., da Silva, J. A. G. F., Tavares, D. S., de Souza, J. K., ... & Carneiro, M. A. C. (2022). Organic substrate availability and enzyme activity affect microbial-controlled carbon dynamics in areas disturbed by a mining dam failure. *Applied Soil Ecology*, 169, 104169.
- Bengough, A. G., McKenzie, B. M., Hallett, P. D., Valentine, T. A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of Experimental Botany*, 62(1), 59-68.
- Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical biochemistry*, 72(1-2), 248-254.
- Bouyoucos, G. J. (1951). A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils 1. *Agronomy journal*, 43(9), 434-438.
- Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., de Campos, I. C., do Carmo, F. F., Silvino, G., Pinto, C. E. F. (2017). Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in ecology and conservation*, 15(3), 145-151.

Couto, F. R., Ferreira, A. M., Pontes, P. P., & Marques, A. R. (2021). Physical, chemical and microbiological characterization of the soils contaminated by iron ore tailing mud after Fundao Dam disaster in Brazil. *Applied Soil Ecology*. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103811>.

Cunha Richard, E., de Aguiar Duarte Jr, H., Calderucio Duque Estrada, G., Bechtold, J. P., Gusso Maioli, B., Araujo de Freitas, A. H., ... & Melges Figueiredo, L. H. (2020). Influence of Fundão tailings dam breach on water quality in the Doce River watershed. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16(5), 583-595.

Das, S., Deb, S., Sahoo, S. S., & Sahoo, U. K. (2023). Soil microbial biomass carbon stock and its relation with climatic and other environmental factors in forest ecosystems: A review. *Acta Ecologica Sinica*.

Driver, J. D., Holben, W. E., & Rillig, M. C. (2005). Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(1), 101-106.

Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, 35, 1039-1042.

Ferreira, G. W., Ribeiro, B. T., Weindorf, D. C., Teixeira, B. I., Chakraborty, S., Li, B., ... & Scolforo, J. R. S. (2021). Assessment of iron-rich tailings via portable X-ray fluorescence spectrometry: the Mariana dam disaster, southeast Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-19.

Gao, Y., Dang, P., Zhao, Q., Liu, J., & Liu, J. (2018). Effects of vegetation rehabilitation on soil organic and inorganic carbon stocks in the Mu Us Desert, northwest China. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1031-1040.

Hu, P., Zhang, W., Chen, H., Li, D., Zhao, Y., Zhao, J., Wang, K. (2021). Soil carbon accumulation with increasing temperature under both managed and natural vegetation restoration in calcareous soils. *Science of the Total Environment*, 767, 145298.

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Ministério do Meio Ambiente. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, p. 38, 2015. Available in:

http://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf

- Jordão, T. C., de Oliveira Prado, I. G., da Silva, M. D. C. S., Diogo, N. V., Júnior, P. P., Veloso, T. G. R., ... & Kasuya, M. C. M. (2021). Shifts in Arbuscular Mycorrhizal fungal properties due to vegetative remediation of mine spoil contamination from a dam rupture in Mariana, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 162, 103885.
- Kumar, S., Singh, A. K., & Ghosh, P. (2018). Distribution of soil organic carbon and glomalin related soil protein in reclaimed coal mine-land chronosequence under tropical condition. *Science of the Total Environment*, 625, 1341-1350.
- Lal, R., Smith, P., Jungkunst, H. F., Mitsch, W. J., Lehmann, J., Nair, P. R., ... & Ravindranath, N. H. (2018). The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems. *Journal of soil and water conservation*, 73(6), 145A-152A.
- Lal, R., Monger, C., Nave, L., & Smith, P. (2021). The role of soil in regulation of climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1834), 20210084.
- Leal, OA, Castilhos, RMV, Pinto, LFS, Pauletto, EA, Lemes, ES, Kunde, RJ. (2016). Initial Recovery of Organic Matter of a Grass-Covered Constructed Soil after Coal Mining. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, vol. 40. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20150384>.
- Lopes, A.A.C., Gomes de Sousa, D. M., Chaer, G. M., Bueno dos Reis Junior, F., Goedert, W. J., & de Carvalho Mendes, I. (2013). Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 461-472.
- Mehlich, A. J. N. C. S. T. D. (1953). Determination of P, Ca, mg, K, Na, and NH₄. *North Carolina Soil Test Division* (Mimeo 1953), 2, 23-89.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total carbon, organic carbon, and organic matter.
- Prado, I. G. O., da Silva, M. D. C. S., de Oliveira Prado, D. G., Kemmelmeier, K., Pedrosa, B. G., da Silva, C. C., & Kasuya, M. C. M. (2019). Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 141, 84-95.
- Qin, Y., Chen, Z, Ding, B., Li, Z. (2020). Impact of sand mining on the carbon sequestration and nitrogen removal ability of soil in the riparian area of Lijiang River, China, *Environmental Pollution*, vol. 261, 114220, ISSN 0269-7491. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114220>
- R Core Team. (2020). R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. (No Title).
- Renova, F. Monitoramento das intervenções prioritárias: Relatório de resultado do primeiro ano de monitoramento. Belo Horizonte, MG. (2018). <https://www.fundacaorenova.org>

- Ribeiro, P. G., Martins, G. C., Gastauer, M., da Silva Junior, E. C., Santos, D. C., Frois Caldeira Júnior, C., ... & Ramos, S. J. (2022). Spectral and soil quality index for monitoring environmental rehabilitation and soil carbon stock in an Amazonian sandstone mine. *Sustainability*, 14(2), 597.
- Santos, O. S. H., Avellar, F. C., Alves, M., Trindade, R. C., Menezes, M. B., Ferreira, M. C., França, G. S., Cordeiro, J., Sobreira, F. G., Yoshida, I. M., Moura, P. M., Baptista, M. B., Scott, M. R., 2019. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. *Bioremediation and Biodegradation*, vol. 48, pp. 439 - 449. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2018.04.0168>.
- Segura, F. R., Nunes, E. A., Paniz, F. P., Paulelli, A. C. C., Rodrigues, G. B., Braga, G. Ú. L., ... & Batista, B. L. (2016). Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental Pollution*, 218, 813-825.
- Silva, A. O., da Costa, A. M., dos Santos Teixeira, A. F., Guimaraes, A. A., dos Santos, J. V., & de Souza Moreira, F. M. (2018). Soil microbiological attributes indicate recovery of an iron mining area and of the biological quality of adjacent phytophysionomies. *Ecological Indicators*, 93, 142-151.
- Silva, A. O., Guimarães, A. A., Lopez, BDO., Zanchi, CS, Vega, CFP, Batista, ÉR, Moreira, FMS, Souza, FRC, Pinto, FA, Santos, JV, Carneiro, JJ, Siqueira, JO, Kemmelmeier, K, Guilherme, LRG, Rufini, M, Junior, MSD, Aragão, OOS, Borges, PHC, Oliveira-Longatti, SM, Carneiro, MAC., 2021. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. *Environ Monit Assess* 193, 462. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09234-4>
- Sutfin, NA, Wohl, EE, Dwire, KA. (2015). Banking carbon: a review of organic carbon storage and physical factors influencing retention in floodplains and riparian ecosystems. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 43, pp 38-60. <https://doi.org/10.1002/esp.3857>
- Teixeira, P. A., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo. 3rd (Ed.) EMBRAPA. Brasília, DF-Brazil.
- Ussiri, D. A., & Lal, R. (2005). Carbon sequestration in reclaimed minesoils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(3), 151-165.
- Vance, E. D., Brookes, P. C., & Jenkinson, D. S. (1987). Microbial biomass measurements in forest soils: determination of kc values and tests of hypotheses to explain the failure of the

chloroform fumigation-incubation method in acid soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6), 689-696.

Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science*, 37(1), 29-38.

Wang, Q., Wu, Y., Wang, W., Zhong, Z., Pei, Z., Ren, J., ... & Zu, Y. (2014). Spatial variations in concentration, compositions of glomalin related soil protein in poplar plantations in northeastern China, and possible relations with soil physicochemical properties. *The Scientific World Journal*, 2014.

Wang, Q., Zhang, D., Zhou, W., He, X., & Wang, W. (2020). Urbanization led to a decline in glomalin-soil-carbon sequestration and responsible factors examination in Changchun, Northeastern China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 48, 126506.

Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1998). A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and soil*, 198, 97-107.

Zhang, X., Wu, X., Zhang, S., Xing, Y., Wang, R., & Liang, W. (2014). Organic amendment effects on aggregate-associated organic C, microbial biomass C and glomalin in agricultural soils. *Catena*, 123, 188-194.

Zhang, Z., Wang, J., & Li, B. (2019). Determining the influence factors of soil organic carbon stock in opencast coal-mine dumps based on complex network theory. *Catena*, 173, 433-444.

Zhang, P. P., Zhang, Y. L., Jia, J. C., Cui, Y. X., Wang, X., Zhang, X. C., & Wang, Y. Q. (2020). Revegetation pattern affecting accumulation of organic carbon and total nitrogen in reclaimed mine soils. *PeerJ*, vol. 8. <https://doi.org/10.7717/peerj.8563>.

Zhang, M., Che, R., Cheng, Z., Zhao, H., Wu, C., Hu, J., ... & Wu, Y. (2023). Decades of reforestation significantly change microbial necromass, glomalin, and their contributions to soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 346, 108362.

Artigo 2: O papel da glomalina no acúmulo de carbono no solo e na disponibilidade de nutrientes em Tecossolos originados de rejeitos de minério de ferro.

Jessyca Adriana Gomes Florêncio da Silva¹, Aline Oliveira Silva¹, Jessé Valentim dos Santos¹,
Josemara Karina de Souza¹, Betsy Carolina Muñoz de Páez¹, Éder Rodrigues Batista¹,
Marisangela Viana Barbosa¹, Rafaella Tatiane Silva Sá¹, Marco Aurélio Carbone Carneiro^{1*}

¹Departamento de ciência do solo, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras - MG,
Brasil.

RESUMO: Este artigo destaca a importância da glomalina na absorção de carbono orgânico e na disponibilidade de nutrientes no solo. A hipótese do artigo é que a proteína do solo, fração facilmente extraível (EE-GRSP) desempenha um papel significativo no armazenamento inicial de carbono nos tecnossolos formados pela deposição de rejeitos de ferro. Dessa forma, o trabalho teve como objetivo investigar as concentrações de EE-GRSP em áreas às margens do Rio Gualaxo do Norte, com diferentes processos de revegetação, e avaliar a contribuição da EE-GRSP no armazenamento de carbono e nutrientes, em tecnossolos com níveis diferentes de espessura de rejeito inicialmente depositado: camada de deposição superior a 1 m (Di), área com camada de deposição menor que 0,4 m (Pi); e uma área de solo original em que não houve deposição de rejeito (Und), em duas diferentes profundidades (0-3 e 10-13 cm). Avaliou-se também, três tipos de vegetação (Euc- área de plantio de eucalipto com revegetação antrópica; RF -área de mata com revegetação antrópica a partir da semeadura de plantas herbáceas; NF - área de mata com revegetação natural. O tecnossolo formado tem textura mais siltosa com menos argila que o solo original adjacente. Os baixos teores de EE-GRSP em Di e Pi em relação a Und (Fig 5), pode indicar que o tempo de reabilitação não foi suficiente para acúmulo de EE-GRSP nas áreas afetadas. A EE-GRSP contribui para o SOC e ambos se correlacionam com propriedades químicas e de textura do solo e isso sugere que o aumento do conteúdo de EE-GRSP e SOC resulta em melhoria nos atributos do solo.

Palavras chaves: Barragem de Fundão. Estoque de Carbono. Fungo Micorrízicos.

Revegetação.

1 INTRODUÇÃO

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são microrganismos simbiotes que colonizam as raízes das plantas e estabelecem uma relação mutualista, formando uma rede de micélios que se estende no solo. O corpo desses fungos é responsável pela produção de Glomalina, uma glicoproteína presente nas suas paredes. Durante a decomposição do micélio fúngico, parte desta Glomalina vai ajudar a formar um composto complexo, termotolerante e recalcitrante no solo, chamado de proteína do solo relacionada a glomalina (GRSP), a qual, com meia vida estimada maior que 40 anos, se acumula no solo (Holátko et al., 2021). A presença da GRSP nos agregados de solo, indicam seu papel de aumentar a estabilidade desses e de ajudar a aumentar o teor de carbono orgânico no solo.

A presença da GRSP promove a estabilização de agregados do solo (Barbosa, et al., 2021), pois atua como agente cimentante colando partículas de solo em agregados maiores e mais estáveis (Holátko et al., 2021). Ao mesmo tempo, dentro dos agregados, o carbono orgânico do GRSP e de outras fontes fica protegido da aeração e oxidação microbiana, ajudando a mantê-lo no solo, ajudando no acúmulo de carbono no solo ao longo do tempo.

Além de contribuir para a formação de GRSP, os FMAs desempenham um papel crucial no fornecimento de nutrientes para as plantas. Quando as plantas têm acesso adequado a nutrientes, elas tendem a aumentar sua produção de matéria orgânica por meio da fotossíntese. Isso leva a um maior aporte de carbono para o solo na forma de raízes mortas, exsudatos radiculares e serapilheira, contribuindo ainda mais para o acúmulo de carbono no solo.

A GRSP é dividida em duas frações (Wright, Upadhyaya, 1996), a proteína do solo relacionada à glomalina facilmente extraível (EE-GRSP) e a proteína do solo relacionada à glomalina total (T-GRSP). A EE-GRSP é comumente considerada como a fração mais recém-produzida e mais ativa das frações da GRSP, compreendendo grupos funcionais altamente ativo (Janos et al., 2008). Ela também contribui com os teores de carbono orgânico do solo (SOC) e

consequentemente para o aporte de estoques de C orgânico do solo (S_{loc}) (Braghirolli et al., 2012; Souza, et al.; 2010). Alguns estudos mostram que a GRSP representa cerca de 4-5% do C em solos florestais (Rillig et al., 2001). A contribuição da GRSP para o estoque de carbono no solo pode ser de até 20 vezes maior que o próprio carbono da biomassa microbiana (Rillig et al., 2001).

O solo é um dos principais reservatórios de carbono (C) do planeta e desempenha papel fundamental no balanço global de CO₂ atmosférico (FAO, 2005). A maior parte do C do solo está presente nos ecossistemas florestais (FAO, 2005). A revegetação em áreas degradadas por atividade de mineração, de forma direta ou indireta, tem sido amplamente utilizada como uma abordagem prática para melhorar a estrutura e a agregação do solo e por consequência armazenar SOC (Rong et al., 2020).

Os tecnossolos formados pela deposição de rejeitos da mineração de ferro, como relatado nos estudos de Batista et al. (2020 e 2021), apresentam baixa concentração de carbono orgânico e de GRSP (Jordão et al., 2021), além do fato que as comunidades microbianas estabelecidas nessas áreas apresentaram reduzida capacidade de armazenamento de C, em relação aos solos não afetados em áreas adjacentes (batista et al., 2020).

Com base nesses aspectos, foi hipotetizado que a GRSP fração facilmente extraível (EE-GRSP) desempenha um papel significativo no armazenamento inicial de carbono nos tecnossolos formados pelo derrame de rejeitos e indicam a qualidade da reabilitação desses solos. Assim, o objetivo do trabalho foi investigar as concentrações de EE-GRSP em áreas às margens do Rio Gualaxo do Norte, com diferentes processos de revegetação, e avaliar a contribuição da EE-GRSP no estoque de carbono e nutrientes em tecnossolos com diferentes camadas de deposição de rejeitos de Fe. Essa pesquisa busca fornecer informações importantes para compreender o papel da glomalina no armazenamento do carbono no solo e na disponibilidade de nutrientes, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de manejo sustentável do solo em Tecnossolos formados pela deposição de rejeitos de minério de ferro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Os tecnossolos selecionados para coleta de rejeitos ao longo do rio Gualaxo do Norte (Mariana – MG) em setembro de 2019 encontram-se na tabela 1. Esses tecnossolos foram escolhidas devido as grandes quantidades de rejeito de mineração de ferro que foram depositadas após o rompimento da barragem de Fundão sobre o solo original. As áreas com maior deposição de rejeito compreenderam os primeiros 70 km a jusante da barragem (Carmo et al., 2017). Foram selecionadas 3 áreas com Tecnossolos com diferentes tipos de revegetação: Euc - área de plantio de eucalipto como revegetação, ação essa realizada devido ao cultivo do eucalipto no solo original nesta área; MR - área originalmente de mata com revegetação por semeadura de mix de sementes de plantas herbáceas; MN - área originalmente de mata regenerada naturalmente, sem intervenção revegetativa antrópica. As características dos Tecnossolos são mostradas na Figura. 1 e está disponível também em Batista et al. (2020).

Dentro de cada Tecnossolo, foram coletadas amostras em três áreas com diferentes camadas de deposição: camada de deposição superior a 1 m (Di), área com camada de deposição menor que 0,4 m (Pi); e uma área de solo original em que não houve deposição de rejeito (Und). Em cada área, foram estabelecidos cinco pontos de amostragem igualmente espaçados ao longo de um transecto de 25 m (com uma distância de 5 m entre cada ponto), e em cada ponto foram coletadas cinco subamostras de solo, formando uma amostra de solo composta. As coletas foram realizadas em duas profundidades (0-3 cm e 10-13 cm). Além das amostras de solo, também foram coletadas raízes de plantas para determinação da taxa de colonização micorrízica.

Tabela 1: Descrição das principais áreas de coleta de tecnossolo formado pela deposição de rejeitos e solo original em área adjacente, em Mariana – Brasil.

Sigla	Área	Pontos de coleta	Descrição	Localização	
				X	Y
Área P1	Eucalipito	Di	Área de eucalipto em processo de recuperação- EUC	-43,3037	-20,2665
		Pi		-43,3038	-20,2666
		Und		-43,3039	-20,2667
Área P2	Mata plantada	Di	Área de Mata em processo de recuperação implantado – MR.	-43,2082	-20,2979
		Pi		-43,2021	-20,2728
		Und		-43,2022	-20,2727
Área P3	Mata Nativa	Di	Área de Mata nativa em processo de recuperação natural – MN	-43,2051	-20,2965
		Pi		-43,2053	-20,2961
		Und		-43,2054	-20,2662

2.2 Determinação das variáveis físicas, químicas e microbiológicas do solo

Para as análises químicas do solo e tecnossolos, as amostras foram secas ao ar e peneiradas em malha de 2 mm, e armazenadas em sacos plásticos estéreis e hermeticamente fechados. Nessas amostras de solo foram quantificados os teores total e disponíveis de Al, Ca, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, P, Rb, Se, Si, Sr, Ti, Y, Zn e Zr. O conteúdo total foi avaliado com o dispositivo portátil de fluorescência de raios-X (Bruker S1 TITAN LE) (USEPA, 2007). O aparelho utiliza tubo de raios X Rh, com operação na faixa de tensão de 50 kV; um detector de desvio de silício (SDD) no dispositivo tem uma resolução de 147 eV. O equipamento operou na configuração do software Soil Mode. A varredura sequencial foi conduzida por 30 s por fase, e cada amostra foi avaliada três vezes. Eles foram colocados em sacos de polietileno de alta densidade (HDPE) para exposição ao feixe de raios-X. Juntamente com as amostras de solo, uma amostra de referência de qualidade foi avaliada, amostra de solo 2710a - “Solo Montana I”, do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST).

Foram realizados os seguintes procedimentos: pH em água (1:2.5); K, P, Fe, Zn, Mn, and Cu extraído pela solução de Mehlich-1 (Mehlich, 1953); Ca²⁺, Mg²⁺, e Al³⁺ extraído por 1 mol L⁻¹ KCl (McLean et al., 1958); H+Al (acidez potencial) por extrator SMP (Shoemaker, McLean and Pratt, 1961); SB (soma de bases); CTC (capacidade de troca de cátions); CECpH7.00 (capacidade de troca de cátions a pH 7.00); V (saturação por bases); MOS (matéria orgânica do solo) por oxidação com dicromato de potássio em ácido médio (Walkley and Black, 1934); P-Rem (P remanescente) (Alvarez and Fonseca, 1990).

Para a caracterização textural foi utilizada a metodologia de Bouyoucos (Bouyoucos, 1951) e seus valores estão disponíveis Tabela 2. A densidade do solo foi determinada em amostras coletadas com estrutura preservada em um cilindro extrator de amostras indeformadas, forçado verticalmente no solo com amostrador UhLand, onde a estratificação foi realizada diretamente no monolito extraído. A densidade do solo foi determinada pela relação entre a massa de solo seco a 105°C pelo volume da amostra (Teixeira et al., 2017).

O carbono orgânico foi determinado pelo método via úmida através da oxidação matéria orgânica do solo com o dicromato de potássio. Para tal, pesou-se 0,5 g de solo e adicionou solução de dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) 0,0667 mol L⁻¹. Após aquecimento da mistura, foi realizada a titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,1 mol L⁻¹ (Walkley; Black, 1934). O estoque de SOC (S_{SOC}) foi calculado em toneladas de carbono por hectare (tC/ha) = (carbono orgânico do solo %) x (massa de solo em um determinado volume) (Griffin et al., 2013).

A proteína do solo relacionada à glomalina - fração facilmente extraível (EE-GRSP) foi extraída de acordo a metodologia de Wright e Updahlvava, (1998). Para isso pesou-se 1g de solo e foi adicionado 8 ml de solução de citrato de sódio (20 µM a pH 7,0), seguido de autoclavagem por 30 minutos a 121 bar. Em seguida os tubos de falcon foram centrifugados a 5000 rpm por 15 minutos. A concentração da EE-GRSP foi determinada com 100 µL do extrato de solo em tubo de ensaio, adicionando-se 5 ml do reagente de Bradford aos tubos. Após esse procedimento os tubos foram levados para agitação em vórtex, aguardando-se 10 minutos para iniciar leitura de

absorbância em espectrofotômetro a 595 nm, com a utilização de uma curva de calibração estabelecida com albumina de soro bovino (BSA) como proteína padrão purificada.

2.3 Análises estatística

Os dados foram submetidos a análise de normalidade e homoscedasticidade, em seguida à análise de variância. As médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey ($p \leq 0.05$) e as análises foram realizadas utilizando o software Sisvar (Versão 5.2) (Ferreira, 2011). Para investigar as relações entre as propriedades químicas, físicas e bioquímica uma matriz de correlação nas variáveis escalonadas foi construída usando o coeficiente de correlação de ordem de classificação de Spearman (ρ) no pacote corrplot (Wei; Simko, 2017). A análise de componentes principais (PCA) foi realizada no software R (R Development Core Team, 2011), para demonstrar a ordenação dos tratamentos e sua relação com os parâmetros químicos e físicos do solo.

3 RESULTADOS

3.1 Atributos de fertilidade, textura e densidade do solo

Os resultados indicaram que a fertilidade do solo foi influenciada pela camada de deposição de rejeito (Di, Pi, Und) e a profundidade de coleta do solo (0-3 e 10-13 cm). Os resultados das análises da fertilidade do solo e textura e densidade, com estatísticas descritivas, são apresentados na Tabela 2, 3 e 4. Nos tecnossolos (Di e Pi) o pH foi significativamente mais elevado ($p \leq 0.05$) em relação Und, independente da profundidade (0-3 cm e 10-13 cm). Os teores de Fe e Mn também foram maiores nos tecnossolos. Elevadas concentrações de P nos tecnossolos podem estar relacionadas a uma possível adubação realizada pela Fundação renova, de acordo com relatório do ano 2018.

As áreas Di e Pi tinham teores mais elevados de silte e densidade do solo. Os resultados mostraram que as áreas Und apresentam maiores teores de argila em relação aos tecnossolos (Tabela 4).

Tabela 2: Caracterização químicas dos tecnossolos (Di e Pi) e solos sem deposição de rejeitos (Und), na profundidade de 0-3 cm, coletado as margens do rio Gualaxo do Norte, Mariana-Brasil. As letras indicam diferenças significativas, usando teste Tukey ($p > 0.05$) nas condições das áreas.

Atributos	Di	Pi	Und
	0-3 cm		
pH	7.00 ± 0.91 a	6.18 ± 0.31 a	5.06 ± 0.56 b
K	131.48 ± 108.90 a	35.53 ± 15.67 b	106.66 ± 52.25 a
P	11.7 ± 10.2 a ⁶	4.93 ± 3.76 b	1.43 ± 0.78 b
Ca	1.61 ± 0.58 b	1.73 ± 1.10 b	3.46 ± 1.69 a
Mg	0.3 ± 0.26 b	0.44 ± 0.29 b	1.54 ± 0.57 a
Al	0.03 ± 0.04 b	0.04 ± 0.06 b	0.33 ± 0.21 a
H+Al	0.91 ± 0.29 b	1.25 ± 0.20 b	4.62 ± 1.74 a
SB	2.25 ± 1.06 b	2.32 ± 1.37 b	5.28 ± 2.18 a
CTC	2.28 ± 1.08 b	2.36 ± 1.37 b	5.6 ± 2.08 a
CTC pH 7	3.16 ± 1.12 b	3.56 ± 1.46 b	9.9 ± 1.68 a
V	68.87 ± 10.75 a	61.28 ± 10.85 a	64.65 ± 16.85 a
M	1.47 ± 2.44 b	1.94 ± 3.33 b	7.2 ± 5.77 a
MOS	1.42 ± 0.76 b	1.62 ± 1.19 b	4.3 ± 0.79 a
P-Rem	46.26 ± 6.08 a	45.4 ± 2.40 a	31.21 ± 4.03 a
Zn	1 ± 0.80 b	0.91 ± 0.39 b	3.03 ± 1.51 a
Fe	136.04 ± 54.64 a	98.11 ± 23.49 b	75.81 ± 34.69 c
Mn	142.79 ± 41.36 a	163.03 ± 51.44 a	85.42 ± 42.09 b
Cu	0.74 ± 0.30 a	0.68 ± 0.23 a	0.75 ± 0.47 a

Os valores acima expressam a média (n = 5). Di, 1 m de camada de rejeito, Pi, cerca de 0,4 m de camada de rejeito, Und, solo sem deposição de rejeito. Letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os níveis de perturbação na mesma área.

Tabela 3: Caracterização químicas dos tecnossolos (Di e Pi) e solos sem deposição de rejeitos (Und), na profundidade de 10-13 cm, coletado as margens do rio Gualaxo do Norte, Mariana-Brasil. As letras indicam diferenças significativas, usando teste Tukey ($p > 0.05$) nas condições das áreas.

Atributos	Di	Pi	Und
10-13 cm			
pH	6.79 ± 0.72 a	6.33 ± 0.52 a	4.67 ± 0.40 b
K	35.76 ± 69.26 a	7.8 ± 7.78 b	47.25 ± 30.3 a
P	6.44 ± 2.65 a	4.68 ± 2.35 ab	0.7 ± 0.66 b
Ca	1.08 ± 0.56 ab	0.91 ± 0.21 b	1.41 ± 0.89 a
Mg	0.06 ± 0.06 b	0.13 ± 0.08 ab	0.74 ± 0.37 a
Al	0.01 ± 0.02 b	0.03 ± 0.04 b	0.63 ± 0.51 a
H+Al	0.82 ± 0.19 b	0.97 ± 0.18 b	4.93 ± 1.67 a
SB	1.23 ± 0.70 b	1.06 ± 0.26 b	2.25 ± 1.18 a
CTC	1.04 ± 0.47 b	1.09 ± 0.35 b	2.9 ± 0.94 a
CTC pH7	2.05 ± 0.72 b	2.03 ± 0.36 b	7.21 ± 1.45 a
V	56.53 ± 13.92 a	51.96 ± 6.12 a	32.09 ± 16.61 a
m	0.43 ± 1.61 b	2.68 ± 4.62 b	25.15 ± 20.36 a
MOS	0.53 ± 0.44 b	0.63 ± 0.42 b	2.44 ± 0.54 a
P-Rem	40.47 ± 5.7 a	42.47 ± 2.80 a	26.63 ± 2.72 b
Zn	0.62 ± 0.30 b	0.52 ± 0.12 b	1.73 ± 0.93 a
Fe	228.87 ± 194.20 a	140.43 ± 47.98 b	83.41 ± 21.81 c
Mn	150.88 ± 118.87 a	92.81 ± 29.74 ab	45.73 ± 23.35 b
Cu	1.61 ± 2.75 a	0.91 ± 0.96 a	3.83 ± 7.36 a

Os valores acima expressam a média (n = 5). Di, 1 m de camada de rejeito, Pi, cerca de 0,4 m de camada de rejeito, Und, solo sem deposição de rejeito. Letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferenças significativas (p < 0,05) entre os níveis de perturbação na mesma área.

Tabela 4: Caracterização textural dos tecnossolos (Di e Pi) e solos sem deposição de rejeitos (Und), na profundidade de 0-3 cm e 10-13 cm, coletado as margens do rio Gualaxo do Norte, Mariana-Brasil. As letras indicam diferenças significativas, usando teste Tukey (p > 0.05) nas condições das áreas.

Áreas	Grau de impacto	Argila (%)		Areia (%)		Silte (%)		Densidade do solo	
		0-3	10-13	0-3	10-13	0-3	10-13	0-3	10-13
EUC	Di	4,68 c	6,35 c	50,65 a	51,69 a	44,67 a	41,96 a	1,66 a	1,78 a
	Pi	8,40 b	11,13 b	46,24 a	45,86 a	45,36 a	43,02 a	1,63 a	1,64 a
	Und	25,98 a	26,09 a	48,39 a	45,93 a	25,63 b	27,98 b	1,31 b	1,19 b
MR	Di	8,54 ba	7,71 ba	43,46 ba	48,41 aa	47,99 aa	43,88 ab	1,79 a	1,88 a
	Pi	10,40 b	7,87 b	46,74 ab	46,12 a	42,86 ba	46,01 a	1,73 a	1,83 a
	Und	27,09 a	29,41 a	54,46 a	51,89 a	18,45 ca	18,70 c	1,08 b	1,30 b

	Di	8,09 b	7,71 b	45,60 b	44,47 ab	46,31 a	47,81 a	1,71 a	1,69 a
MN	Pi	7,23 b	8,06 b	46,62 b	46,79 b	46,16 a	45,15 a	1,69 a	1,58 ab
	Und	33,07 a	34,27 a	50,37 a	45,71 aa	16,56 c	20,02 b	1,10 b	1,18 b

Os valores acima expressam a média (n = 5). Di, 1 m de camada de rejeito, Pi, cerca de 0,4 m de camada de rejeito, Und, solo sem deposição de rejeito. EUC – Área com vegetação de eucalipto, MR – área revegetada, MN – área com vegetação nativa. Letras minúsculas diferentes na mesma linha indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os níveis de perturbação na mesma área.

3.2 Análises de Correlação

Foi realizada uma matriz de correlação para investigar as relações entre EE-GRSP e os índices de fertilidade e textura do solo (Fig. 1). Observou-se uma forte correlação positiva entre EE-GRSP e o teor de SOC, enquanto ambas as variáveis apresentaram correlação negativa com a densidade do solo, pH, P-Rem e teor de Fe.

A análise de componentes principais (PCA) entre os atributos de fertilidade e textura do solo e EE-GRSP mostrou 60% da variância total (PC1: 40% e PC2: 20%) (Fig. 2). As áreas impactadas foram agrupadas principalmente com os teores de Fe, Mn, pH e densidade do solo. Em Und foram agrupadas com EE-GRSP, SOC, capacidade de troca de cátions total (CTC), CTC a pH 7,0, Ca, Mg e soma de bases (SB) (Fig. 3). Os teores de argila, cálcio (Ca), magnésio (Mg), zinco (Zn), CTC a pH 7,00, CTC efetiva e SOC foram as variáveis do solo mais influenciadas pelos teores de EE-GRSP.

Realizamos uma análise de Componentes Principais (PCA) utilizando os conteúdos totais dos elementos avaliados por meio do dispositivo portátil de fluorescência de raios-X (pXRF). A análise de PCA revelou que 64% da variância total (PC1: 43% e PC2: 21%), e os resultados completos estão disponíveis no arquivo suplementar 2 (S2). Foi observada uma clara separação espacial entre o tecnossolo (Di e Pi) e Und. Nas áreas impactadas, foi identificada a presença predominante de Cd, Fe, Mo, P, SiO₂, Sn e Ni, contrastando com a presença de Se, Ca, Zn, K₂O e Ti nas áreas não afetadas. Em Und houve uma maior dispersão dos dados, refletindo a heterogeneidade natural das áreas. Esses resultados reforçam a diferença nas propriedades químicas dos tecnossolos formados pela deposição de rejeitos em relação aos solos originais.

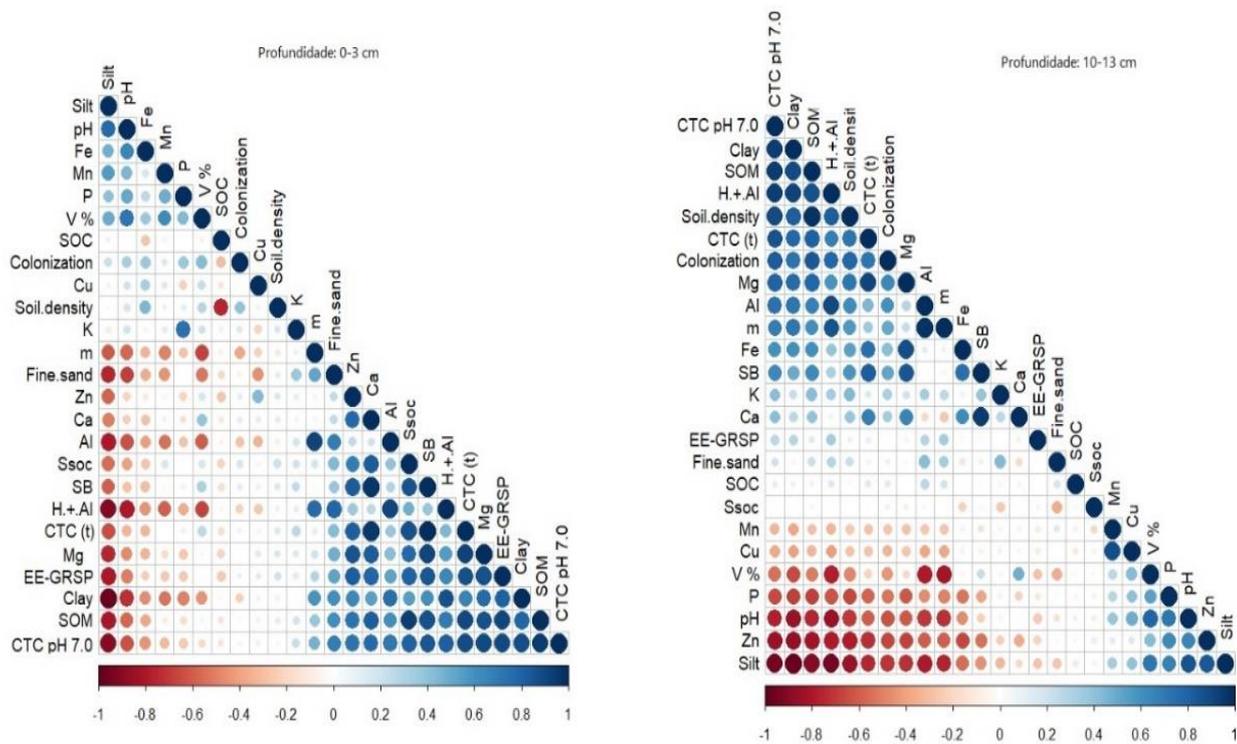


Figura 1: Matriz de correlação entre EE-GRSP e as características químicas e textura do solo, na profundidade de 0-3 cm e 10-13 cm. A intensidade da cor e os valores indicam a magnitude da correlação para um par específico de variáveis. As correlações positivas são mostradas em azul e as correlações negativas em vermelho. As cores brancas representam ausência de significância ($p > 0,05$). Saturação por bases (V%), matéria orgânica do solo (SOM).

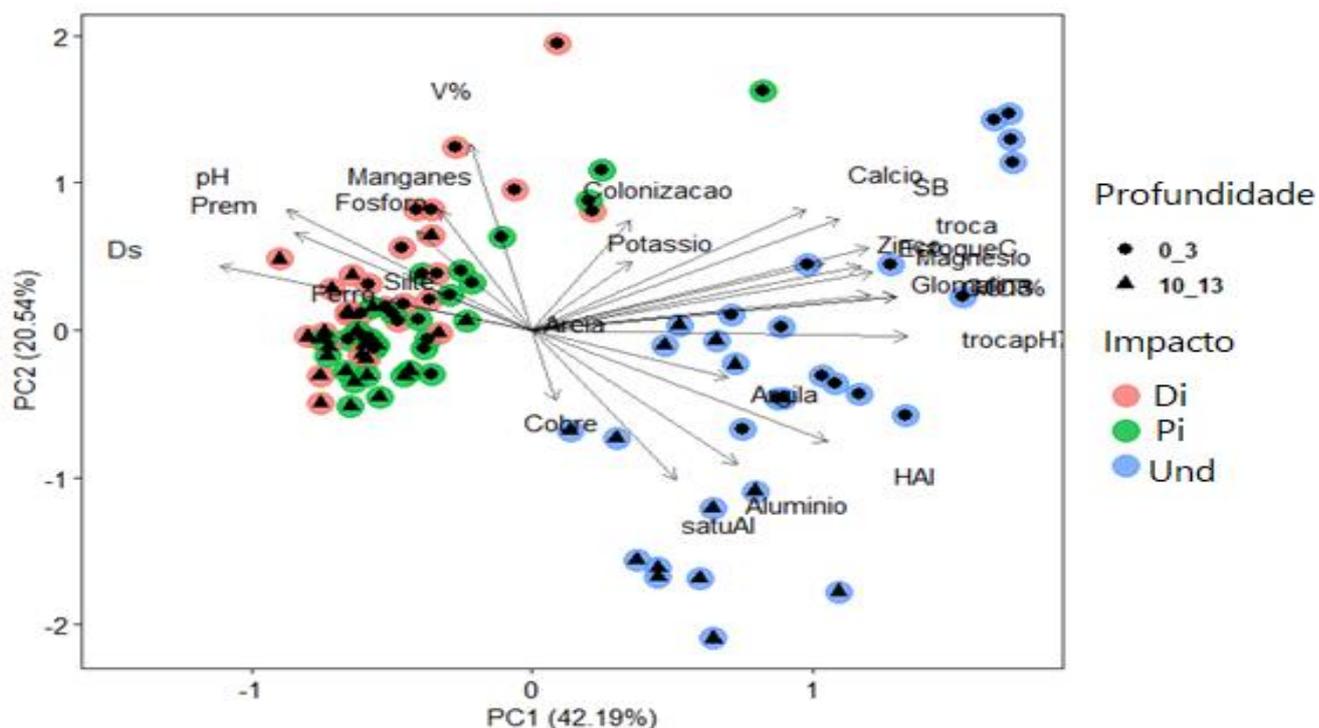


Figura 2: Análise de componentes principais (PCA) relacionando entre EE-GRSP e os atributos químicos e textural do solo, em tecnossolos com diferentes camadas de deposição (Di e Pi) e solos sem deposição de rejeitos (Und), na profundidade de 0-3 cm e 10-13 cm, coletado as margens do rio Gualaxo do Norte, Mariana-Brasil. Densidade do solo (Ds), fósforo remanescente (Prem), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (SatuAl), CTC a pH 7,00 (troca pH 7), soma de bases (SB), matéria orgânica do solo (MOS), carbono orgânico do solo (SOC).

3.3 Relação entre EE-GRSP e o estoque de carbono do solo

A relação entre EE-GRSP e Ssc₀ foi avaliada por meio de um ajuste de regressão linear ($R^2 = 0,81$, $p > 0,001$). Verificou-se que o Ssc₀ aumentou linearmente à medida que os teores de EE-GRSP aumentaram em todas as áreas avaliadas. Nas áreas impactadas, que apresentaram baixos teores de EE-GRSP, ocorreu um acúmulo limitado de carbono no solo, em ambas as profundidades. Em contraste, nas áreas não impactadas, observaram-se altos conteúdos de EE-GRSP e carbono no solo.

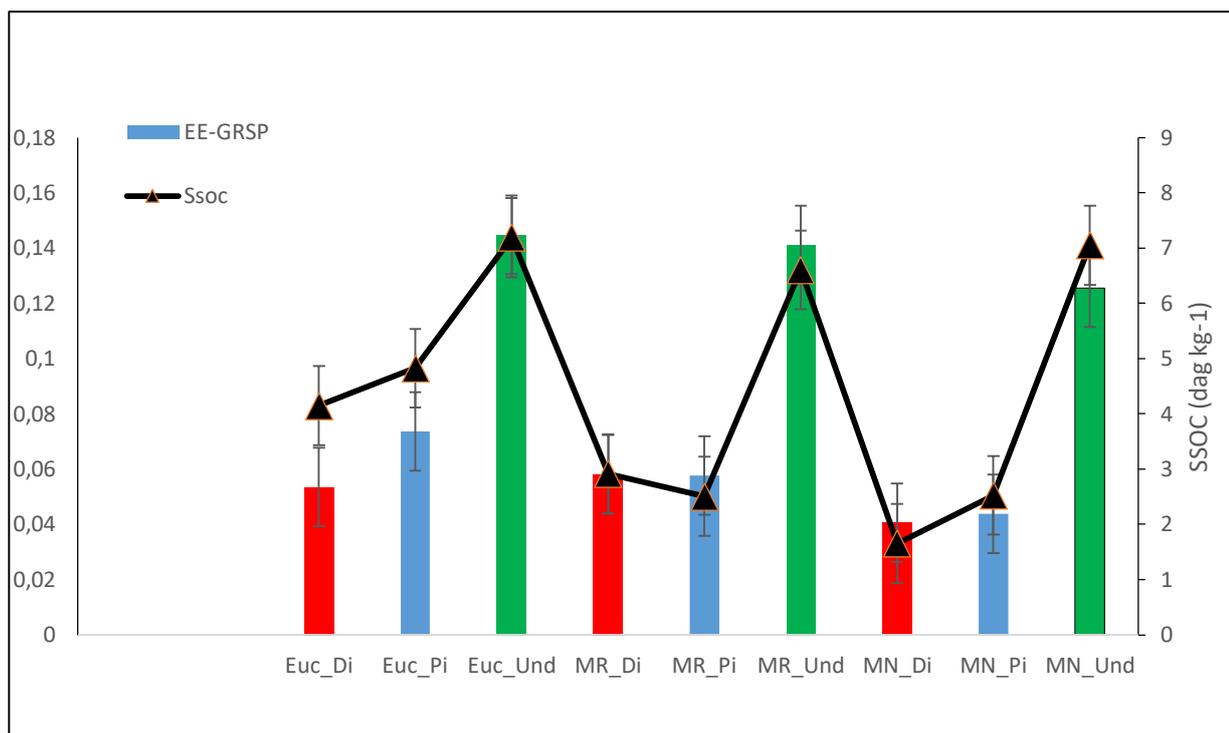


Figura 3: Comportamento da EE-GRSP e o Ssoc em diferentes níveis de perturbação para duas profundidades de horizonte superior. Di, 1 m de camada de rejeito, Pi, cerca de 0,4 m de camada de rejeito, Und, solo sem deposição de rejeito. EUC – Área com vegetação de eucalipto, MR – área revegetada, MN – área com vegetação nativa. As linhas de tendência sólidas e tracejadas representam os modelos de regressão ajustados para as profundidades de 0–3 cm e 10–13 cm, respectivamente. Os modelos de regressão de melhor ajuste foram 0–3 cm: $y = 22,37 + 9,69x$ e 10–13 cm: $y = 25,04 + 12,16x$.

3.4 EE-GRSP

O conteúdo de EE-GRSP foi significativamente mais elevado em Und, independentemente da vegetação local e da profundidade do solo, o que de fato já era esperado. No entanto, observou-se uma variação relativamente baixa nos teores de EE-GRSP nas áreas impactadas (Di: 0,05 mg g⁻¹; Pi: 0,06 mg g⁻¹) em comparação com Und (0,14 mg g⁻¹). O valor médio de EE-GRSP em Und foi de 0,10 mg g⁻¹ na profundidade de 0-3 cm e 0,06 mg g⁻¹ na profundidade de 10-13 cm.

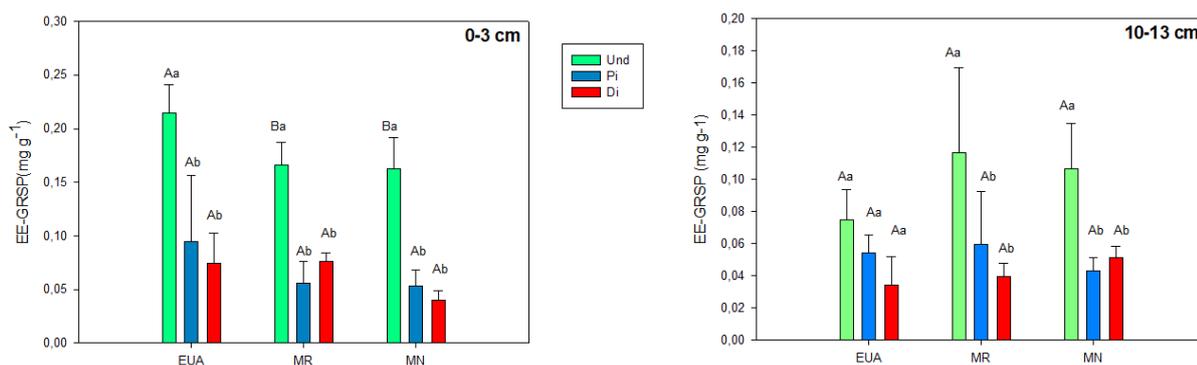


Figura 4. Proteína do solo relacionada à glomalina facilmente extraível (EE-GRSP) em tecnossolos com diferentes camadas de deposição (Di e Pi) e solos sem deposição de rejeitos (Und), na profundidade de 0-3 cm e 10-13 cm, coletado as margens do rio Gualaxo do Norte, Mariana-Brasil. As barras representam a média ($n = 5$) e as barras de erro representam o erro padrão da média. Di, 1 m de camada de rejeito, Pi, cerca de 0,4 m de camada de rejeito, Und, solo sem deposição de rejeito. Euc, área com eucalipto, RF, mata revegetada, NF mata nativa não revegetada. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) para o mesmo nível de perturbação entre as vegetações.

3.5 Colonização micorrízicas

A profundidade de coleta influenciou a porcentagem de colonização micorrízica (Fig. 6), que foi maior na profundidade de 0-3 cm. Os valores médios de porcentagem de colonização, na profundidade de 0-3 cm, foram de 67%, 57% e 48% no Euc, RF e NF, respectivamente e na profundidade 10-13 cm foram 15% 16% 22% no Euc, RF e NF, respectivamente.

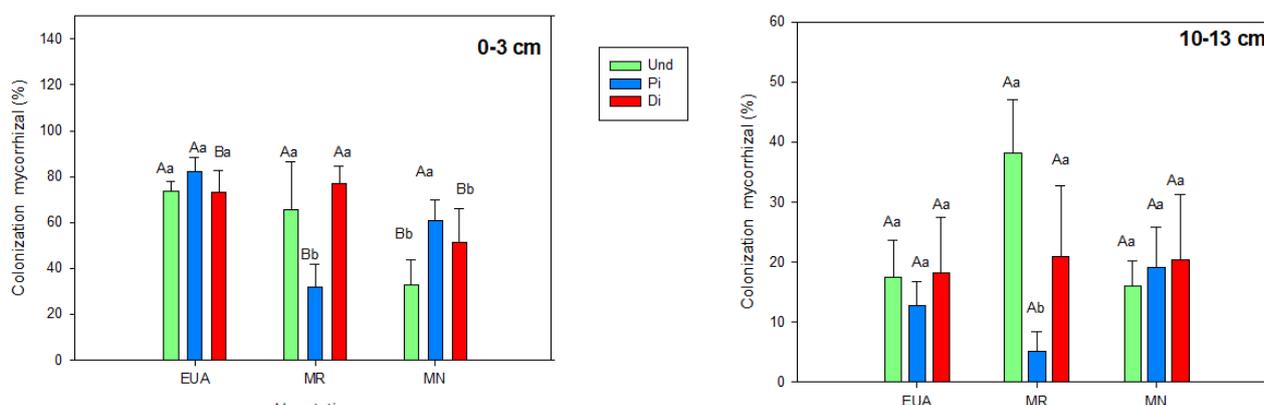


Figura 5. Colonização radicular micorrízica (%) em tecnossolos com diferentes camadas de deposição (Di e Pi) e solos sem deposição de rejeitos (Und), na profundidade de 0-3 cm e 10-13 cm, coletado as margens do rio Gualaxo do Norte, Mariana-Brasil. As barras representam a média ($n = 5$) e as barras de erro representam o erro padrão da média. Di, 1 m de camada de rejeito, Pi, cerca de 0,4 m de camada de rejeito, Und, solo sem deposição de rejeito. Euc, área com eucalipto, RF, mata revegetada, NF mata nativa não revegetada. Letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) para o mesmo nível de perturbação entre as vegetações.

4 DISCUSSÃO

Os nossos resultados evidenciam que a cobertura vegetal e a deposição de rejeitos determinam a fertilidade do solo, incluindo parâmetros como pH, teores de nutrientes e características texturais. O tecnossolo formado tem textura mais siltosa com menos argila que o solo original. De acordo com Silva et al. (2019), o novo solo formado tem atributos físicos e biológicos menos

ideais que os observados no solo original. Essas informações são relevantes para o manejo e recuperação de áreas afetadas, visando à melhoria da fertilidade e qualidade do solo.

O presente estudo constatou que a colonização micorrízica foi estatisticamente igual entre as áreas afetadas e as áreas não afetadas, independentemente do tipo de revegetação adotado. A taxa de colonização das raízes coletadas indica a presença da associação micorrízica arbuscular (FMAs) com as plantas nas áreas estudadas. Esses resultados podem estar relacionados à presença de plantas micotróficas nas áreas revegetadas. Estudos anteriores sugerem que a revegetação favorece a recuperação das comunidades nativas de FMAs em áreas de mineração de ferro, após 2-3 anos de reabilitação, como demonstrado por de Aguiar Santiago et al. (2022), em áreas no Mato Grosso do Sul, Brasil.

O aumento dos teores de glomalina no solo em áreas em reabilitação já foi amplamente relatado (Bi et al., 2021; Corpejo et al., 2008; Wang et al., 2016), e por isso pode ser um importante indicador da qualidade do solo e usado para monitoramento de reabilitação de áreas degradadas (Fokom et al., 2012), principalmente em áreas pós mineração (De Aguiar Santiago et al., 2022; Rodríguez-Rodríguez et al., 2021). Os baixos teores de EE-GRSP em Di e Pi em relação a Und (Fig 5), pode indicar que o tempo de reabilitação não foi suficiente para acúmulo de EE-GRSP nas áreas afetadas. O acúmulo de glomalina no solo está relacionado a presença de FMAs nas raízes das plantas (Rilling, 2004). A baixa disponibilidade de matéria orgânica e as diferenças no pH do solo podem estar relacionado as diferenças encontradas na concentração de EE-GRSP nos tecnossolos e Und. Isso porque baixos de MOS reduz a atividade microbiana, incluindo FMAs (Batista et al., 2020) em áreas afetadas com rejeito de mineração de ferro em Mariana, independente da presença da associação micorrízica. E como a glomalina precipita em condições ácidas (Singh et al., 2017), é provável que ocorra aumento da GRSP com a diminuição do pH do solo, assim como observado nas áreas Und (S1).

As correlações positivas entre a EE-GRSP e SOC indicam um alto grau de conectividade entre esses parâmetros (Figura 4). A presença da GRSP já foi relacionada ao acúmulo de SOC

anteriormente, já que esta é considerada como componente do SOC em ambientes terrestres (Bi et al., 2021, Kumar et al., 2018; Wang et al., 2018). Isso, por sua vez, explica a relação da EE-GRSP com o Ssoc. Dessa forma, o conteúdo de glomalina nos solos pode indicar a qualidade do solo e aumento no Ssoc (Agnihotri et al., 2022).

Além disso, EE-GRSP pode atuar como um condicionador do solo melhorando a fertilidade, aeração, a capacidade de retenção de água (Fokom et al., 2012). É possível que a GRSP forme um canal úmido no qual os nutrientes do solo se movam para as raízes e para as hifas de FMAs, em solos com baixa umidade (Agnihotri et al., 2022). Nossos resultados sugerem que o aumento no teor de EE-GRSP resulta em melhorias significativas nas características químicas e de textura do solo (Figura 5). Isso porque EE-GRSP se relacionou com índices da fertilidade do solo como: Ca, Mg, CTC, CTCpH7, corroborando com estudos anteriores em região tropical (Singh et al., 2016; Kumar 2018). Os nossos resultados também sugerem o potencial de GRSP e SOC, para serem usados como indicadores de qualidade do solo durante a recuperação de áreas degradadas pelo rompimento da barragem de Fundão. A maioria das propriedades do solo, incluindo densidade do solo, pH, Fe, Silte e CTCpH7 tem correlação semelhante e significativa com GRSP e SOC (Figura 4). Esses achados estão de acordo com trabalhos realizados anteriores a este (Rillig et al., 2003; Singh et al., 2016; Kumar et 2018). Tais resultados indicam interdependência entre GRSP, SOC e outras propriedades do solo avaliadas.

Os atributos essenciais ao funcionamento adequado do solo podem ser recuperados com auxílio da revegetação. As plantas estão diretamente relacionadas a produção de serrapilheira e matéria orgânica durante o processo de recuperação (Yan, Fan Wang, 2020). Por isso a revegetação das áreas impactadas pelo rejeito pode contribuir para impulsionar a reabilitação dos solos a partir do aumento do conteúdo de SOC, além de refletir em maior diversidade total de fungos, incluindo os AMFs (Prado et al. 2019).

No geral, nossos resultados destacam a visão de que a EE-GRSP e o SOC têm relação de dependência, confirmando que a EE-GRSP tem papel no acúmulo de SOC do solo. E que ambas

variáveis contribuem para a reabilitação de áreas afetadas pela deposição de rejeitos de Fe, por estarem correlacionadas com variáveis químicas e de textura do solo que interferem na qualidade do mesmo. Além disso, a revegetação das áreas afetadas pode ser uma grande aliada para aumento de MOS e do pleno funcionamento dos processos ecossistêmicos do solo de modo a estimular a atividade microbiana dos solos, incluindo fungos micorrízicos arbusculares (Prado et al., 2019; Batista et al., 2022).

5 CONCLUSÃO

No presente estudo observou-se que os tecnossolos formados a partir da deposição de rejeitos apresenta baixos teores de EE-GRSP que é dependente da MOS.

O conteúdo de EE-GRSP pode ser útil no monitoramento nos tecnossolos com deposição de rejeitos de ferro, as margens do Rio Gualaxo do Norte. Além disso, EE-GRSP contribui para o SOC e ambos se correlacionam com propriedades químicas e de textura do solo e isso sugere que o aumento do conteúdo de EE-GRSP e SOC resulta em melhoria nos atributos do solo.

6 REFERÊNCIAS

- Agnihotri, R., Bharti, A., Ramesh, A., Prakash, A., & Sharma, M. P. (2021). Glomalin related protein and C16: 1 ω 5 PLFA associated with AM fungi as potential signatures for assessing the soil C sequestration under contrasting soil management practices. *European Journal of Soil Biology*, 103, 103286.
- Alvarez, V. H., & Fonseca, D. D. (1990). Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 14(1), 49-55.
- Assessment, G. F. R. (2005). Progress towards sustainable forest management. *Forestry Paper*, 147.
- Barbosa, M. V., Fundora, A. B., Silva, A. O., Espinosa, R. R., Júnior, O. J. S., & Carneiro, M. A. C. (2021). Aggregation of a Ferruginous Nodular Gleysol in a pasture area in Cuba, under the influence of Arbuscular mycorrhizal fungi associated with hybrid Urochloa. *Soil and Tillage Research*, 208, 104905.
- Batista, E. R., Carneiro, J. J., Pinto, F. A., Dos Santos, J. V., & Carneiro, M. A. C. (2020). Environmental drivers of shifts on microbial traits in sites disturbed by a large-scale tailing dam collapse. *Science of the Total Environment*, 738, 139453.
- Bi, Y., Xiao, L., Guo, C., & Christie, P. (2020). Revegetation type drives rhizosphere arbuscular mycorrhizal fungi and soil organic carbon fractions in the mining subsidence area of northwest China. *Catena*, 195, 104791.
- Bradford, M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of micrograms and Soil quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding *Analytical*. v. 198 p. 11, 1998. *Biochemistry*, v. 72, p. 248-254.
- Braghirolli, F. L., Sgrott, A. F., Pescador, R., Uhlmann, A., & Stürmer, S. L. (2012). Fungos micorrízicos arbusculares na recuperação de florestas ciliares e fixação de carbono no solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 733-744.
- Bouyoucos, G. J. (1951). A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43, 434–437.
<https://doi.org/10.2134/agronj1951.00021962004300090005x>
- Carmo, F. F., Kamino, L. H. Y., Junior, R. T., de Campos, I. C., do Carmo, F. F., Silvino, G., de Castro, K. J. S. X.; Mauro, M. L.; Rodrigues, N. U. Al.; Miranda, M. P. S.; Pinto, C. E. F. (2017). Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(3), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>.

- de Aguiar Santiago, F. L., Silva, A. O., Carneiro, M. A. C., Gastauer, M., Ramos, S. J., Caldeira, C. F., & Siqueira, J. O. (2022). Revegetation of mined areas influences the physiological profile of bacterial communities and improves the biochemical functions of soil. *Pedobiologia*, 90, 150793.
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, n.6, p. 1039-1042.
- Fokom, R., Adamou, S., Teugwa, M. C., Boyogueno, A. B., Nana, W. L., Ngonkeu, M. E. L., ... & Zollo, P. A. (2012). Glomalin related soil protein, carbon, nitrogen and soil aggregate stability as affected by land use variation in the humid forest zone of south Cameroon. *Soil and Tillage Research*, 120, 69-75.
- Giovanetti, M. & Mosse, B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots (1980). *New Phytol*, 84:489-500.
- Holátko, J., Brtnický, M., Kučerík, J., Kotianová, M., Elbl, J., Kintl, A., ... & Jansa, J. (2021). Glomalin—Truths, myths, and the future of this elusive soil glycoprotein. *Soil Biology and Biochemistry*, 153, 108116.
- Koske, R. E., & Gemma, J. N. (1989). A modified procedure for staining roots to detect VA mycorrhizas. *Mycological research*, 92(4), 486.
- Janos, DP, Garamszegi, S., & Beltran, B. (2008). Extração e medição de glomalina. *Soil Biology and Biochemistry*, 40 (3), 728-739.
- Jordão, T. C.; Prado, I. G. O.; Silva, M. C. S.; Diogo, N.V.; Júnior, P. P.; Veloso, T. G. R.; Cardoso, E. B.; Neves, J. C. L.; Fernandes, R B. A.; Kasuya, M. C. M.(2021). Shifts in Arbuscular Mycorrhizal fungal properties due to vegetative remediation of mine spoil contamination from a dam rupture in Mariana, Brazil. *Applied Soil Ecology*, v. 162.
- Kumar, S.; Singh, A. K.; Ghosh, P. (2018). Distribution of soil organic carbon and glomalin related soil protein in reclaimed coal mine-land chronosequence under tropical condition. *Science of the Total Environment*. vol. 625, p. 1341-1350.
- Mehlich, A., 1953. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄. North Carolina Soil Testing Division, *Raleigh*, pp. 195.
- Prado, I. G. de O.; Silva, M. C. S.; Prado, D. G. O.; Kemmelmeier, K.; Pedrosa, K. B. G.; Silva, C. C.; Kasuya, M. C. M. (2019). Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. *Applied Soil Ecology*, v. 141, n. February, p. 84–95.
- R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing Retrieved. 2011. Available in: <from <http://www.r-project.org>>. Access in: January, 05, 2020.

- Renova, F. Monitoramento das intervenções prioritárias: Relatório de resultado do primeiro ano de monitoramento. Belo Horizonte, MG. (2018). <https://www.fundacaorenova.org>
- Rong, G., Li, W., Zhu, H., Zhou, J., Qiu, L., Ge, N., ... & Shao, M. (2020). Dynamics of new- and old-organic carbon and nitrogen in bulk soils and aggregates following afforestation on farmland. *Catena*, 195, 104838.
- Rillig, M. C., Wright, S. F., Nichols, K. A., Schmidt, W. F., & Torn, M. S. (2001). Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant and Soil*, 233(2), 167-177.
- Rillig, M. C. (2004). Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. *Canadian Journal of Soil Science*, 84(4), 355-363.
- Rodríguez-Rodríguez, R. M., Kemmelmeier, K., de Fátima Pedroso, D., Pinto, F. A., dos Santos, J. V., Gastauer, M., ... & Carneiro, M. A. C. (2021). Native arbuscular mycorrhizal fungi respond to rehabilitation in iron ore mining areas from the Eastern Brazilian Amazon. *Pedobiologia*, 89, 150768.
- Silva, C. A. J.; Coutinho, A. D.; Oliveira, J. F. J.; Teodoro, P. E.; Lima, M.; Shakir, M.; Gois, G.; Johanne, J. A. Analysis of the impact on vegetation caused by abrupt deforestation via orbital sensor in the environmental disaster of Mariana, Brazil. *Land Use Policy*, v. 76, p. 10-20, 2018.
- Silva, A. O., Guimarães, A. A., Lopez, B. D. O., Zanchi, C. S., Vega, C. F. P., Batista, É. R., ... & Carneiro, M. A. C. (2021). Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(8), 1-18.
- Singh, A. K., Rai, A., Pandey, V., & Singh, N. (2017). Contribution of glomalin to dissolve organic carbon under different land uses and seasonality in dry tropics. *Journal of environmental management*, 192, 142-149.
- Singh, A. K., Zhu, X., Chen, C., Wu, J., Yang, B., Zakari, S., ... & Liu, W. (2022). The role of glomalin in mitigation of multiple soil degradation problems. *Critical reviews in environmental science and technology*, 52(9), 1604-1638.
- Souza, F.A.et al. Classificação e taxonomia de fungos micorrízicos arbusculares e sua diversidade e ocorrência no Brasil. In: SIQUEIRA, J. O. et al. (Eds.) *Micorrizas: 30 anos de pesquisas no Brasil*. Lavras: Ed. UFLA, p. 15-73, 2010.
- Teixeira, A. F. dos S. et al. Arbuscular mycorrhizal fungal communities in an iron mining area and its surroundings: Inoculum potential, density, and diversity of spores related to soil properties. *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 41, n. 5, p. 511–525, 2017.

Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG (2017) Manual de métodos de análise de solo, 3rd ed. EMBRAPA, Brasília (in Portuguese).

USDA-NRCS - United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service Soils. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/main/soils/health/>

Walkley, A., Black, I.A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37, 29-38.

Wang, Z. G., Bi, Y. L., Jiang, B., Zhakypbek, Y., Peng, S. P., Liu, W. W., & Liu, H. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance soil carbon sequestration in the coalfields, northwest China. *Scientific reports*, 6(1), 1-11.

Wang, Q.; Lu, H.; Chen, J.; Hong, H.; Liu, J.; LI, J. Yan, C. (2018). Spatial distribution of glomalin-related soil protein and its relationship with sediment carbon sequestration across a mangrove forest, *Sci. Total Environ*, 613, pp. 548-556.

Wei, T. and Simko, V. (2017) R Package “Corrplot”: Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). <https://github.com/taiyun/corrplot>

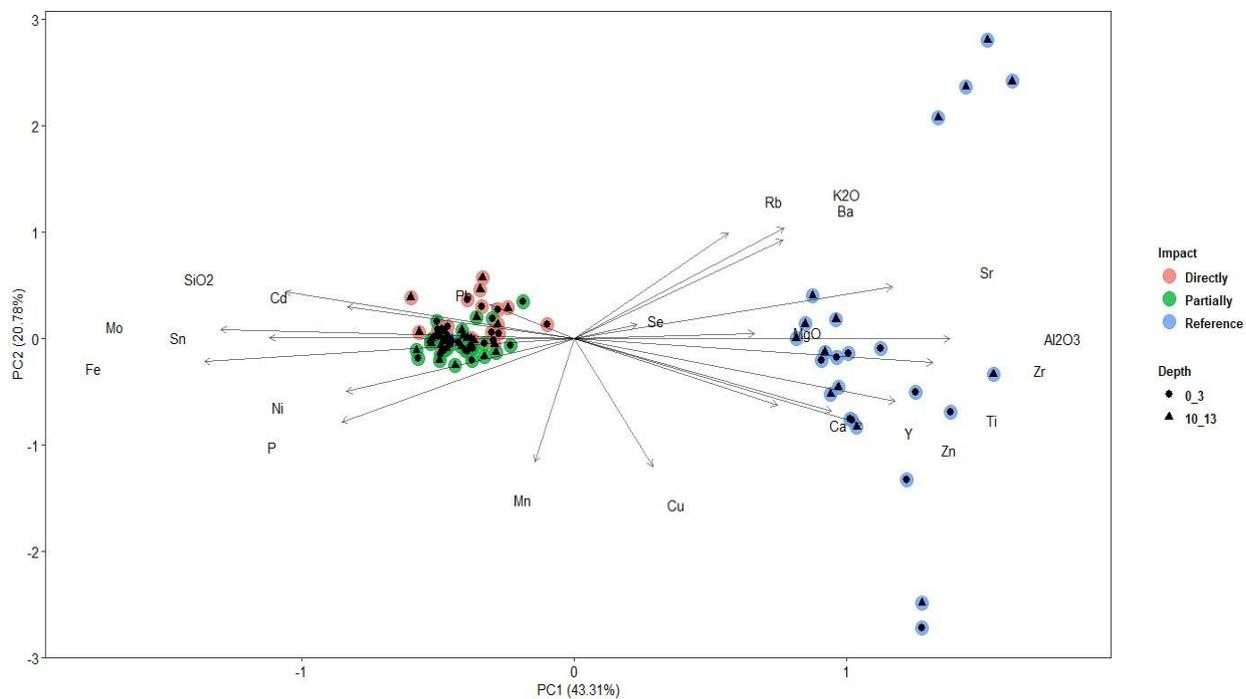
Wright, S. F., & Upadhyaya, A. (1996). Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil science*, 161(9), 575-586.

Wright, S F; Upadhyaya, A. (1998). A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant and Soil*, vol. 198, pp. 97–107.

Yan, M.; Fan, L.; Wang, L. Restoration of soil carbon with different tree species in a post-mining land in eastern Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, vol. 158, 2020.

DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020>.

APENDICE B



Suplementar 2: Análise de componentes principais (PCA) relacionando os conteúdos totais dos elementos químicos do solo avaliados com o dispositivo portátil de fluorescência de raios-X (pXRF) nas áreas afetadas (Di e Pi) e não afetadas (Und).