

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos

Paôla da Conceição Campos Malta

EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO NOS SOLOS
AFETADOS DA REGIÃO DE MARIANA-MG: Revisão bibliográfica.

Belo Horizonte
2025

Paôla da Conceição Campos Malta

**EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO NOS SOLOS
AFETADOS DA REGIÃO DE MARIANA-MG: Revisão bibliográfica.**

Monografia de especialização apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, Levantamento e Intepretação de Solos.

Orientadora: Profa. Dra. Cristiane Valéria de Oliveira

Belo Horizonte
2025

M261e
2025

Malta, Paôla da Conceição Campos.

Efeitos do rompimento da Barragem de Fundão nos solos afetados da região de Mariana-MG [recurso eletrônico] : revisão bibliográfica. / Paôla da Conceição Campos Malta. – 2025.

1 recurso online (28 f.: il., color.) : pdf.

Orientadora: Cristiane Valéria de Oliveira.

Monografia (especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2025.

Bibliografia: f. 24-28.

1. Solos – Classificação – Teses. 2. Solos – Poluição – Teses. 3. Impacto ambiental – Teses. 4. Barragens de rejeitos – Mariana (MG) – Teses. 5. Falhas em barragens – Teses. I. Oliveira, Cristiane Valeria de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 631.44:627.82(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

NOME: PAÛLA DA CONCEIÇÃO CAMPOS MALTA, Nº. DE REGISTRO: 2024650818

TRABALHO FINAL: EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO NOS SOLOS AFETADOS DA REGIÃO DE MARIANA-MG: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Trabalho de Conclusão da Especialização apresentado ao Curso de Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos, do Programa de Pós-graduação em Geografia, da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos.

APROVADO em 08 de julho de 2025, pela Orientação e Banca Examinadora constituída pelos Membros:

CRISTIANE VALÉRIA DE OLIVEIRA - Orientadora

MEMBROS DA BANCA:

Cristiane Valéria de Oliveira(UFMG);

Max Paulo Rocha Pereira(UFMG);

Flávia Mazzer Rodrigues da Silva(UFMG).



Documento assinado eletronicamente por Max Paulo Rocha Pereira, Usuário Externo, em 17/07/2025, às 16:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Flavia Mazzer Rodrigues da Silva, Professora do Magistério Superior, em 28/07/2025, às 15:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Cristiane Valeria de Oliveira, Professora do Magistério Superior, em 04/08/2025, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Fabio Soares de Oliveira, Professor(a), em 12/08/2025, às 11:32, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador 4379115 e o código CRC C62EA0B6.

Dedico este trabalho aos atingidos e atingidas pelo rompimento da Barragem de Fundão em Mariana.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela saúde e pela força de vontade necessárias para superar os desafios de conciliar trabalho, estudos e vida pessoal. Sou igualmente grata aos meus colegas de turma, pelo apoio mútuo durante as dificuldades do curso e pela inspiração profissional.

À minha família, em especial à minha mãe Geralda, às minhas irmãs Luana e Vanuze, e ao meu companheiro João Gabriel, agradeço por todo o amor, incentivo e compreensão nos períodos de dedicação ao curso.

Um agradecimento especial à Cáritas Brasileira, pela oportunidade de trabalhar junto às pessoas atingidas no processo de reparação do rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG). Foi nessa experiência que pude testemunhar de perto os impactos do maior crime socioambiental do Brasil e um dos maiores do mundo envolvendo barragens de mineração. Todo o meu respeito e admiração a todas as pessoas atingidas, que lutam incansavelmente pela reparação integral.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Dra. Cristiane Valéria de Oliveira, pelo apoio na escolha do tema e por todas as orientações prestadas durante a elaboração deste trabalho.

Dirijo meus agradecimentos também ao consórcio UNISOLOS, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e, em especial, à Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pela oportunidade concedida.

Ao corpo docente do curso de Especialização em Geoprocessamento, Levantamento e Interpretação de Solos, manifesto meu respeito e admiração. Um agradecimento especial ao Coordenador do curso pela UFMG, Professor Dr. Fábio Soares de Oliveira, pela excelente gestão, dedicação e didática, que proporcionaram uma experiência de ensino e aprendizagem de alta qualidade.

Por fim, agradeço a todos e todas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta conquista.

RESUMO

O presente trabalho consiste em uma revisão bibliográfica sobre os efeitos do rompimento da Barragem de Fundão (Mariana-MG, 2015) nos solos afetados pelos rejeitos, com ênfase na formação de Tecnosolos e suas implicações ambientais e socioeconômicas. O objetivo central foi analisar as alterações pedológicas causadas pelos rejeitos de mineração, identificando lacunas na classificação desses solos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). A metodologia consistiu em uma revisão sistemática de artigos indexados nas bases SciELO, ScienceDirect e Scopus, utilizando descritores como "classificação dos solos", "rompimento da Barragem de Fundão" e "Tecnossolos". Os resultados evidenciaram que os rejeitos alteraram drasticamente as propriedades físico-químicas dos solos, causando compactação, elevação do pH e presença de metais pesados, dificultando a recuperação ambiental. Conclui-se que há necessidade de critérios específicos no SiBCS para classificar Tecnosolos, pois a análise demonstrou que os solos afetados por rejeitos de mineração apresentam características únicas, como alta densidade, baixa porosidade e composição química atípica, que não são contempladas pelo sistema atual. A ausência de diretrizes específicas para esses solos limita as estratégias para a mitigação dos impactos.

Palavras-chave: classificação dos solos; barragem de fundão; tecnossolos; rejeitos de mineração; impacto ambiental.

ABSTRACT

This work is a bibliographic review on the effects of the Fundão Dam failure (Mariana-MG, 2015) on the soils affected by the tailings, with an emphasis on the formation of Technosols and their environmental and socioeconomic implications. The main objective was to analyze the pedological changes caused by mining tailings, identifying gaps in the classification of these soils within the Brazilian Soil Classification System (SiBCS). The methodology consisted of a systematic review of articles indexed in the SciELO, ScienceDirect, and Scopus databases, using descriptors such as "soil classification", "Fundão Dam rupture", and "Technosols". The results showed that the tailings drastically altered the physical-chemical properties of the soils, causing compaction, increased pH, and the presence of heavy metals, which hinders environmental recovery. It is concluded that there is a need for specific criteria in the SiBCS to classify Technosols, as the analysis demonstrated that soils affected by mining tailings have unique characteristics, such as high density, low porosity, and atypical chemical composition, which are not covered by the current system. The absence of specific guidelines for these soils limits the strategies for mitigating the impacts.

Keywords: soil classification; fundão dam; technosols; mining tailings; environmental impact.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Bento Rodrigues após o rompimento da Barragem de Fundão em 2015.....17
- Figura 2 – Rota da lama em Mariana, passando pelas comunidades atingidas (Bento Rodrigues, Camargos, Bicas, Ponte do Gama, Águas Claras, Paracatu de Cima, Monsenhor Horta, Paracatu de Baixo) 26.....21

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	Anthropogenic Soils
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
EMATER-MG	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICOMANTH	International Committee on Anthropogenic Soils
IUSS	International Union of Soil Sciences
ONU	Organização das Nações Unidas
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UICN	União Internacional para a Conservação da Natureza
WRB	World Reference Base for Soil Resources

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 DESENVOLVIMENTO	13
3 cons DISCUSSÃO	14
3.1 Características físico-químicas dos solos afetados por rejeitos de mineração	14
3.2 Tecnosolo derivado de rejeitos de mineração	15
3.3 Panorama das pesquisas sobre Tecnosolos	18
3.4 Impactos socioeconômicos e ambientais	20
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu em Mariana-MG, o rompimento da Barragem de Fundão da Samarco, Vale e BHP, liberando aproximadamente 62 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro (SÁNCHEZ et al., 2018). A onda de rejeitos percorreu os cursos d'água do córrego Santarém e dos rios Gualaxo Norte e do Carmo, até alcançar o Rio Doce, seguindo até sua foz em Linhares, litoral do Espírito Santo (FIRMIANO; IRFFI, 2020). Ao se deslocar rio abaixo, a lama destruiu dois distritos do município de Mariana, estado de Minas Gerais, a saber, Bento Rodrigues e Paracatu de Baixo, impactou milhares de hectares de áreas agrícolas e deixou várias cidades nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo praticamente devastadas. Os rejeitos minerais foram depositados tanto no fundo quanto no terraço ribeirinho dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, causando assoreamento e profundas alterações na qualidade da água e cobrindo as principais áreas agrícolas dos vales, provocando impactos ambientais irreversíveis (SILVA et al., 2016).

Os processos antropogênicos tendem a modificar os sistemas naturais da superfície terrestre, formando a chamada "antroposfera" (BACCINI; BRUNNER, 2012), caracterizada como um ambiente físico construído e reorganizado pela ação humana. A formação de solos naturais resulta de fatores como material de origem, clima, relevo, organismos e tempo, propiciando a pedogênese. Solos antropogênicos, no entanto, surgem de alterações físicas, químicas ou morfológicas causadas por ações humanas, diferenciando-se dos processos naturais. Cada tipo de solo antropogênico como os arqueossolos, antropossolos e solos urbanos, possui propriedades únicas, influenciadas pela localização e uso pelo homem (TEIXEIRA et al., 2022).

Os tecnossolos, por exemplo, contêm uma quantidade expressiva de artefatos humanos ou camadas duras, como concreto e geomembranas. Esses solos resultam de atividades humanas, como a mineração, e apresentam desafios para classificação no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), devido à compactação e composição química alterada, que afetam a fertilidade e dificultam a recuperação para usos agrícolas (MELLO, 2017). SANTOS et al. (2022) destacam que o rompimento da barragem formou tecnossolos, o que gerou camadas compactadas no solo e impactou negativamente a recuperação ambiental. A lama de rejeitos que avançou sobre as planícies fluviais desencadeou um processo erosivo intenso, arrastando as camadas

mais férteis do solo. Em seguida, esse material foi gradativamente depositado, recobrando essas áreas afetadas com características totalmente atípicas (EMBRAPA, 2015). Conforme o IUSS Working Group (2006), para serem considerados tecnossolos, o solo deve conter mais de 20% de material tecnogênico nos primeiros 100 cm, incluindo ladrilhos, cerâmicas, vidros e resíduos industriais. São genericamente definidos como solos com indícios de desenvolvimento pedogenético, cujas propriedades e funções foram alteradas pela ação humana. A deposição permanente de rejeitos de profundidade variável sobre os solos em ecossistemas nativos e produção agrícola produziu danos ambientais, bem como danos econômicos e sociais associados. A deposição de rejeitos ao longo das bordas da bacia do rio Doce, a espessura desses rejeitos e a impossibilidade de removê-los são indicadores suficientes para classificar os solos em estudo como Tecnossolos (PÁEZ et al., 2024).

A utilização da terra, por sua vez, reflete a ocupação e aproveitamento de uma área, e a atualização espacial do uso da terra é essencial para o manejo adequado dos recursos agrícolas e florestais (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2014). O Sistema de Aptidão Agrícola das Terras considera fatores limitantes, como dinâmica da água, fertilidade e suscetibilidade à erosão, categorizando o manejo em níveis A (primitivo), B (semi-desenvolvido) e C (desenvolvido). A posição dos rejeitos modifica essa classificação, elevando a concentração de elementos tóxicos que, como observados em solos sedimentares, se redistribuem em camadas superficiais, afetando a pedogênese e a qualidade ambiental (FERREIRA, 2017).

Nas margens dos rios afetados, ocorreram muitas mudanças, como a impermeabilização do solo, prejudicando a infiltração de água da chuva e aumentando o risco de inundações, situação que eleva a velocidade da água, provocando desbarrancamentos e assoreamento dos rios, alterando a topografia e a qualidade das águas (CÁRITAS BRASILEIRA, 2020). Os rejeitos de mineração possuem baixa concentração de nutrientes essenciais às plantas e teor reduzido de matéria orgânica, com argila inferior a 10%, impactando as características físicas e químicas do solo (OLIVEIRA et al., 2021). Nesse sentido, este estudo busca investigar as lacunas existentes na classificação sistemática dos solos impactados pelos rejeitos da mineração, analisando as alterações pedológicas e socioambientais provocadas pelo rompimento da barragem de Fundão.

2 DESENVOLVIMENTO

Este estudo adotou uma abordagem qualitativa de natureza bibliográfica e interpretativa, combinando elementos de revisão sistemática para analisar os impactos pedológicos do rompimento da Barragem de Fundão. A investigação foi conduzida por meio de um protocolo estruturado que integrou a consulta a bases de dados científicos especializadas (SciELO, ScienceDirect, Scopus e Google Scholar) e recursos de bibliotecas físicas e digitais, abrangendo principalmente publicações entre 2015 e 2025.

Na fase inicial, foi realizada uma triagem criteriosa dos materiais, com a avaliação de títulos, resumos e introduções para verificar a pertinência ao tema de pesquisa. Foram selecionados prioritariamente artigos originais, revisões sistemáticas e trabalhos acadêmicos (teses e dissertações) que apresentassem abordagens experimentais ou teórico-empíricas sobre solos impactados por rejeitos de mineração, com ênfase em análises físico-químicas e classificações pedológicas.

Na etapa analítica, procedeu-se à extração sistemática de metadados (autores, ano, local de estudo e objetivos), seguida de uma análise temática do conteúdo, categorizada em: (i) tipologia de alterações pedológicas, (ii) métodos de caracterização do solo e (iii) estratégias de mitigação. Além disso, identificaram-se convergências e divergências na literatura, com ênfase nas limitações metodológicas relacionadas à classificação dos solos e nas propostas para sua recuperação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características físico-químicas dos solos afetados por rejeitos de mineração

Poucas áreas do planeta permanecem intocadas pela ação humana, que frequentemente altera, transporta ou reconstrói solos e materiais geológicos. Em muitos casos, essas intervenções são tão intensas que desencadeiam a antropização – um processo antrópico que modifica os mecanismos naturais de formação de solos, gerando antropossolos (CAPRA, 2015). Um dos aspectos mais relevantes desse processo de artificialização é a formação de novas superfícies e paisagens pedológicas que, atualmente, não possuem caracterização, classificação ou mapeamento detalhados suficientes para permitir interpretações adequadas visando seu uso subsequente. Nessas áreas antropizadas, os solos apresentam propriedades e características peculiares, além de demandarem práticas de manejo específicas (CURCIO et.al., 2004).

O rejeito de mineração de ferro é resultante de um processo de beneficiamento que envolve as etapas sucessivas de peneiramento, britagem, moagem, deslamagem e flotação em colunas, de modo a se obter o ferro na concentração desejada, eliminando-se as impurezas, principalmente, a sílica (ARAÚJO, 2006). No entanto, na etapa de concentração, não se obtém uma eficiência completa, apresentando, como um material residual, de forma geral, os minerais hematita (Fe_2O_3), a goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), o quartzo (SiO_2), a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e a gibsitita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) em diferentes proporções (BATISTA et al., 2016; ARAÚJO, 2006; FRANCO et al., 2004).

Estudos experimentais preliminares em amostras coletadas de rejeitos das barragens de Germano, Fundão e Santarém pelo INSTITUTO LACTEC (2018), corroboram seus resultados com os dados da literatura com relação à presença de hematita, de goethita e do quartzo. Após a ruptura da barragem, SANTOS et al. (2019) comprovaram a presença de níveis elevados de sódio - Na (média de 70 mg/kg) e de éter amina (10-20 mg/kg), além de um pH elevado (~8,0). Resíduos armazenados na barragem de rejeitos, provenientes do processo de flotação catiônica reversa que utilizava éter amina (amina graxa primária) como coletor do quartzo e amido como depressor dos óxidos de ferro (ARAÚJO et al., 2005; SAMARCO, 2013), e que foram depositados ao longo dos rios podem criar condições

estressantes para a vegetação quando combinados com alcalinidade e déficit nutricional (NOURI et al., 2017).

De acordo com GOMES (2023), a éter amina no solo é degradada em íons amônia/amônio em condições de baixo pH. Esses íons, em altas concentrações, são tóxicos para plantas nativas e agrônômicas sensíveis, causando diversos sintomas de toxicidade, supressão do crescimento, declínio de culturas sensíveis, e morte das plantas. Já a tolerância ao excesso de N-amoniaco derivado da dissociação da éter amina, causa, principalmente, sintomas de toxicidade, como hiper crescimento. O excesso de sódio no solo impacta propriedades como a troca catiônica, permeabilidade e agregação, além de causar estresse hídrico.

Os rejeitos liberados no rompimento da barragem também apresentaram metais pesados, sendo encontrados traços de chumbo, arsênio, cobre, níquel, alumínio e manganês (CARVALHO et al., 2017). A presença destes metais e a movimentação de massas afetou o solo; influenciou nas movimentações de bancos de sementes, o que coloca em risco o processo de sucessão natural da vegetação; destruiu completamente a vegetação rasteira e arbustiva (VAZ, 2020).

Outros estudos revelaram que os rejeitos de mineração apresentam características físicas marcantes, com textura predominantemente franco-arenosa e baixos teores de argila (menos de 20%), conforme observado por SCHAEFER et al. (2016). De acordo com os autores, essa composição granulométrica específica, caracterizada pela predominância de areia fina (aproximadamente 729 g kg⁻¹) e silte (cerca de 122 g kg⁻¹), resulta em propriedades físicas particulares que incluem elevada densidade aparente (variando entre 0,94 e 2,38 g cm⁻³) e densidade de partículas (na faixa de 2,75 a 2,80 g cm⁻³). Estas características explicam a porosidade significativamente reduzida desses materiais, que se apresentam compactados e com ausência de estrutura pedológica definida.

3.2 Tecno solo derivado de rejeitos de mineração

De acordo com SAADI e CAMPOS (2015), a geomorfologia de Mariana é composta predominantemente por geofomas de colinas e morros com altura inferior a 200 metros e vales encaixados. As litologias predominantes incluem quartzitos, xistos e filitos, enquanto os solos são majoritariamente Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, com ocorrência secundária de Cambissolos Háplicos Tb

Distróficos.

A deposição de rejeitos ao longo das margens da bacia do Rio Doce, associada à espessura desses materiais e à impossibilidade de remoção, configura os solos afetados como Tecnossolos (HUOT et al., 2013; ASENSIO et al., 2013). Esse conceito foi introduzido em 2006 pela World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO), definindo como solos com pelo menos 20% (em volume) de material antropogênico nos primeiros 100 cm, cujas propriedades são dominadas por sua origem técnica (IUSS WORKING GROUP, 2006). O Tecnossolo é encontrado onde atividades humanas levaram à formação artificial de solos, à impermeabilização de solos originais ou à extração de materiais. São genericamente definidos como solos com indícios de desenvolvimento pedogenético, cujas propriedades e funções foram definidas pela ação humana (SÉREÉ et al., 2010).

Apesar da escassez e recenticidade de estudos sobre Tecnossolos, observa-se crescente interesse científico em seu monitoramento e avaliação. O rompimento da Barragem de Fundão em 2015, desencadeou uma série de alterações nas características do solo, especialmente em áreas rurais onde predominam atividades agrícolas e pastagens (Figura 1). A deposição de rejeitos sobre os solos originais resultou na perda de fertilidade e cobertura vegetal, deixando o solo exposto à erosão e lixiviação de nutrientes (TOLEDO, 2014). A onda de rejeitos atingiu 2.000 hectares ao longo do Rio Doce, afetando mais de 200 propriedades rurais e devastando 1.469 hectares de vegetação natural (CARMO et al., 2017; FERNANDES et al., 2016). Estudos da EMBRAPA e EMATER-MG indicam que 1.430 hectares perderam completamente a capacidade produtiva devido à espessa camada de lama, exigindo décadas de investimento para recuperação (MINAS GERAIS, 2016).

Figura 1 - Bento Rodrigues após o rompimento da Barragem de Fundão em 2015.



Fonte: Rogério Alves / TV Senado (2015).

Estudos conduzidos por SCHAEFER et al. (2015, 2016) demonstram que a deposição de sedimentos tecnogênicos de origem minerária nos terraços fluviais alterou profundamente as características ambientais da região. A pesquisa revela que os aspectos físicos desses sedimentos representam desafios mais críticos para a recuperação do que suas propriedades químicas. Um dos fenômenos mais marcantes é o desenvolvimento de uma camada superficial compactada que exibe comportamento distinto conforme as condições de umidade, apresentando extrema resistência à penetração quando seco, mas tornando-se altamente instável e suscetível ao transporte hídrico quando umedecido.

Os mecanismos erosivos atuam de forma seletiva nessas áreas, removendo preferencialmente as frações mais finas e dispersivas do material. Esse processo deixa como resíduo um substrato composto principalmente por areia fina e silte, notavelmente compactado, que se transforma em uma barreira para a regeneração natural da vegetação. Essa condição pedológica particular exige, portanto, a implementação de medidas específicas de intervenção para permitir qualquer forma de recuperação ambiental. Além disso, os sedimentos carregados aumentaram as concentrações de metais pesados, incluindo mercúrio, nos corpos hídricos. Cerca de 24,3 milhões de m³ de partículas foram depositados em um trecho de 100 km do Rio Doce, entre as barragens de Fundão e Candonga (SÁNCHEZ et al., 2018).

Estudos na região de Mariana-MG demonstraram que os Tecnosolos formados por rejeitos possuem maior concentração de silte e areia muito fina, o que eleva sua densidade e reduz a porosidade. Esses solos apresentam ainda alta pressão de pré-consolidação e baixos teores de matéria orgânica, características que lhes conferem resistência mecânica, mas comprometem seu potencial agrícola (PÁEZ et al., 2024). A matéria orgânica nos solos impactados mostra teores consideravelmente inferiores quando comparados aos solos naturais da região, apresentando uma clara correlação com o baixo conteúdo de argila. Esta redução na matéria orgânica decorre de três fatores principais: 1) deposição aleatória e heterogênea do material orgânico durante o evento de rompimento; 2) expressiva diminuição da atividade microbiana do solo, como demonstrado por BATISTA et al. (2020) e 3) comprometimento dos processos naturais de ciclagem biogeoquímica de nutrientes. As consequências desta alteração nas propriedades físicas são particularmente evidentes na dinâmica do solo. A predominância de partículas de silte e areia fina desencadeia uma série de problemas: formação de crostas superficiais duras (RABOT et al., 2018), aumento da susceptibilidade à erosão (CRUZ et al., 2019), redução acentuada da permeabilidade (SILVA et al., 2021), e predominância de microporos no solo, conforme descrito por RIBEIRO et al. (2007). Esta última característica, resulta do arranjo compacto das partículas mais finas, que ocupam os espaços entre os grãos maiores, reduzindo assim a porosidade efetiva (SCHAEFER, 2016).

3.3 Panorama das pesquisas sobre Tecnosolos

Uma pesquisa bibliométrica recente, abrangendo artigos publicados entre 1984 e 2023 em inglês, identificou 111 estudos científicos focados em tecnossolos, analisados através do software VOSviewer (ECK e WALTMAN, 2010). Embora o interesse pelo tema venha crescendo progressivamente, o número total de publicações ainda é relativamente baixo. As primeiras discussões sobre as limitações do Sistema de Classificação para solos antropizados surgiram em 2001, culminando em sua revisão em 2014 (SOIL SURVEY STAFF, 2014) para incorporar critérios específicos para solos alterados ou transportados por ação humana. Contudo, os estudos sobre a evolução dos Tecnosolos ainda constituem um campo científico recente, marcado pela escassez de bancos de dados abrangentes sobre suas

propriedades e dinâmica pedogenética.

Atualmente, o termo "solos antropogênicos" (AS) designa solos formados a partir de materiais criados ou modificados pelo homem, ou cujas propriedades e comportamentos foram significativamente alterados por atividades antrópicas. Essa definição abrange solos derivados de materiais transportados ou manufaturados pelo homem, aqueles com horizontes diagnósticos profundamente modificados por intervenção humana, e aqueles cuja formação contínua é dominada por influência antrópica persistente (ICOMANTH, 2005). Nas últimas décadas, observa-se crescente interesse científico nesses solos, com pesquisas voltadas para aspectos biológicos e biogeoquímicos, características da matéria orgânica, problemas de contaminação, e estratégias de gestão e reabilitação. Além dessas linhas de investigação, duas áreas emergentes - pedologia forense e arte do solo - permanecem pouco exploradas, representando novas fronteiras de pesquisa (CAPRA, 2015).

A classificação dos solos antropogênicos tem sido objeto de debate entre pedólogos há décadas, com numerosas propostas para criação de novos táxons em diferentes níveis hierárquicos dos sistemas de classificação. Estudos revelam a existência de pelo menos 15 sistemas de classificação em todo o mundo que reconhecem esses solos em algum nível taxonômico. Dentre 925 publicações analisadas, 204 (22%) abordaram direta ou parcialmente a classificação dos solos antropogênicos, sendo que 47,2% focaram em melhorias para a Taxonomia de Solos dos EUA e 33% na base de referência mundial para solos (CAPRA et al., 2013).

A classe dos Tecnosolos ainda não é prevista no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS, 2025). No caso dos Antropossolos, observa-se que este termo não é utilizado "oficialmente" no Brasil em razão da não regulamentação do mesmo pelo SiBCS, isso se deve em razão do tempo que um solo leva para se estruturar devido à natureza impeditiva dos materiais constituintes (Dias e Paula, 2018). No SiBCS, o termo "Horizonte A antrópico", é o que mais se aproxima deles. Esse horizonte é caracterizado como um horizonte formado ou modificado pelo homem devido ao uso prolongado, seja como lugar de residência, de descarte ou de cultivo, no qual haja sinais de adições de material orgânico e/ou mineral, ambos de variada natureza, com presença de artefatos cerâmicos e/ou conchas, em mistura ou não com artefatos líticos, ossos ou vestígios de ação do fogo (carvão e cinzas). O horizonte A antrópico, incluindo seus horizontes intermediários (AB, AE e AC), além da presença obrigatória de uma ou mais das evidências de atividade humana, deve

atender aos seguintes requisitos: a) Espessura maior ou igual a 20 cm, contínua ou cumulativamente, nos primeiros 80 cm da superfície do solo; b) apresentar um teor de fósforo disponível (extraído com solução Mehlich-1) igual ou superior a 30 mg kg⁻¹.

De acordo com LEGUÉDOIS et al. (2016), a caracterização da pedogênese dos Tecnosolos permitiu identificar os elementos essenciais para sua modelagem, revelando que esses solos artificiais se desenvolvem sob condições climáticas quentes e úmidas que favorecem sua evolução, apresentando paradoxalmente uma significativa atividade biológica. Esses solos, tipicamente jovens e formados em superfícies planas, exibem alta heterogeneidade vertical e têm como material de origem artefatos antropogênicos reativos. Embora os processos pedogenéticos observados nos Tecnosolos sejam fundamentalmente similares aos de solos naturais, eles se destacam por ocorrerem em combinações atípicas e com dinâmicas aceleradas, resultando em uma evolução pedológica mais rápida que a convencional.

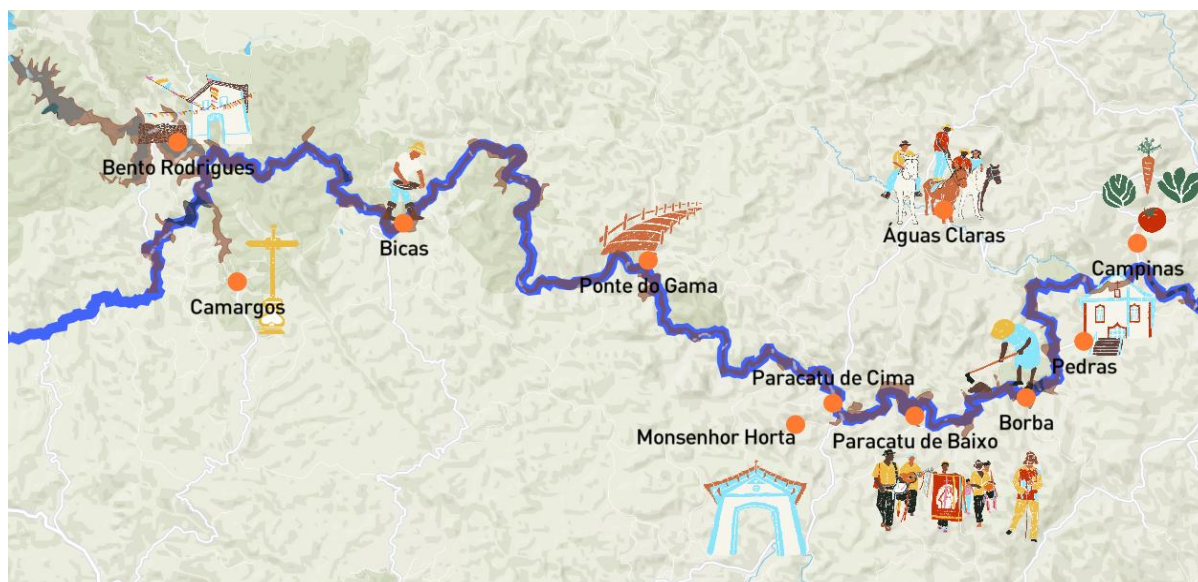
3.4 Impactos socioeconômicos e ambientais

O rompimento da barragem de contenção de rejeitos em Mariana provocou uma expressiva mudança na paisagem, com grandes impactos sobre a vegetação presente, principalmente, nas proximidades da barragem, incluindo a vegetação localizada nas margens dos cursos d'água (CONCEIÇÃO, 2019). A captação de água para consumo humano, a dessedentação animal e a agricultura também ficaram prejudicados, sendo que, essas mudanças geram impactos socioeconômicos, pois os produtores locais enfrentam restrições ao uso agrícola de suas terras devido às novas condições do solo. Tais dificuldades comprometem a subsistência e a economia das famílias, exigindo soluções para reabilitação ambiental e retomada das atividades agrícolas (CÁRITAS BRASILEIRA, 2022).

Em Paracatu de Baixo, assim como em Bento Rodrigues, praticamente todo o subdistrito foi destruído e, conseqüentemente, diversas famílias foram deslocadas compulsoriamente para o distrito sede ou outras localidades de Mariana, muitas famílias foram reassentadas e outras aguardam as moradias ficarem prontas. O curso d'água era determinante nos modos de vida da comunidade, e até o momento nenhum plano de manejo dos rejeitos de minério foi apresentado ou executado pela empresa. Conforme ilustrado na Figura 2, em outras localidades rurais, como Borba, Pedras e Campinas, parte dos terrenos foi tomada por rejeitos, resultando na perda de

produções agrícolas (CÁRITAS BRASILEIRA, 2022).

Figura 2 - Rota da lama em Mariana, passando pelas comunidades atingidas (Bento Rodrigues, Camargos, Bicas, Ponte do Gama, Águas Claras, Paracatu de Cima, Monsenhor Horta, Paracatu de Baixo).



Fonte: Adaptado de Mariana: Território Atingido (s.d.). Disponível em: www.territorioatingido.com.br. Acesso em: 02/06/2025

O desastre causou a devastação de matas ciliares remanescentes (fragmentos/mosaicos), já o aporte de sedimentos (lama de rejeito da exploração de minério de ferro) imediatamente soterrou os indivíduos de menor porte do sub-bosque e suprimiu indivíduos arbóreos. Os rejeitos de mineração de ferro também têm potencial para afetar o solo ao longo do tempo por se tratar de material inerte sem matéria orgânica, causando desestruturação química e afetando o pH do solo. Tal alteração dificultará a recuperação e o desenvolvimento de espécies que ali viviam, podendo modificar, a médio e longo prazos, a vegetação local, com o estabelecimento de ecossistemas diferentes dos originais (IBAMA, 2015).

De acordo com ALMEIDA (2002), a finalidade mais importante na recuperação de áreas mineradas é garantir a estabilidade física do terreno e, em seguida, restaurar a vegetação local. A reintrodução de espécies florestais previne a erosão e contribui para a preservação e até mesmo para a melhoria da qualidade do solo. Segundo BARBOSA (2006), a restauração de uma cobertura vegetal arbórea diversificada favorece a dispersão e o surgimento de novas espécies de flora e fauna, auxiliando na recuperação do ecossistema. A vegetação, ao cobrir o solo, aumenta a infiltração

de água, reduz o escoamento superficial e, conseqüentemente, minimiza a erosão. Além disso, a matéria orgânica gerada pela vegetação melhora as propriedades do solo, criando condições ideais para o desenvolvimento da biota local. Conforme ALMEIDA (2002), essa matéria orgânica libera nutrientes para as plantas através da mineralização e beneficia características físicas do solo, como sua estrutura, capacidade de retenção hídrica, aeração e a estabilização de agregados.

A recuperação de áreas afetadas por rejeitos de mineração com desenvolvimento de Tecnosolos é fundamental no intuito de melhorar as propriedades desses solos e permitir seu uso para fins produtivos, ou mesmo conservacionistas. Para isso, várias técnicas mostram-se promissoras para esse fim, tais como a utilização de topsoil argiloso e adição de matéria orgânica (SCHAEFER, 2015). A implementação de ações de restauração ecológica tem sido prioritária nessas áreas degradadas, utilizando abordagens que integram técnicas ativas e passivas de recuperação. Contudo, persistem lacunas no entendimento sobre como as condições ambientais e as estratégias de restauração (incluindo plantio de mudas, semeadura direta e regeneração natural) interagem com as características físicas dos rejeitos e como essa relação pode afetar o estoque de biomassa acima do solo em áreas afetadas (CAMPANHARO et al., 2021).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O rompimento da Barragem de Fundão em Mariana evidenciou a capacidade das atividades humanas de alterar drasticamente a pedosfera, gerando impactos físicos, químicos e biológicos complexos e de longo prazo. As pesquisas sobre Tecnosolos são essenciais para compreender esses efeitos nos solos e suas consequências socioeconômicas e ambientais. No entanto, a produção científica atual, embora aborde a complexidade desses solos, ainda carece de sistematização em sua classificação, especialmente no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). A ausência de critérios específicos para solos em situações de desastres ambientais limita a capacidade de manejo e recuperação eficaz dessas áreas.

Os impactos socioeconômicos decorrentes da lama de rejeitos de minério são profundos, afetando comunidades locais, atividades agrícolas e ecossistemas naturais. A recuperação dessas áreas exige estratégias integradas, combinando técnicas de restauração ecológica, monitoramento contínuo e políticas públicas direcionadas. A inclusão de Tecnosolos no SiBCS, com critérios claros e adaptados, é um passo importante para orientar ações de mitigação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R. O. P. O. **Revegetação de áreas mineradas: estudo dos procedimentos aplicados em minerações de areia**. São Paulo, 160 p, 2002.
- ALVES, Rogério. Bento Rodrigues após o rompimento da Barragem de Fundão em 2015. In: **TV Senado**. 6 nov. 2015. Disponível em: [https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bento_Rodrigues,_Mariana,_Minas_Gerais_\(2828956680\).jpg](https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bento_Rodrigues,_Mariana,_Minas_Gerais_(2828956680).jpg) . Acesso em: 2 jun. 2025.
- ARAÚJO, A. C.; VIANA, P. R. M.; PERES, A. E. C. Reagents in iron ores flotation. **Minerals Engineering**, v. 18, p. 219–224, 2005.
- ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- ASENSIO, V.; COVELO, E. F.; KANDELER, E. Soil management of copper mine tailing soils - Sludge amendment and tree vegetation could improve biological soil quality. **Science of the Total Environment**, v. 456-457, p. 82-90, 2013.
- BACCINI, P.; BRUNNER, P. H. **Metabolismo da Antroposfera: análise, avaliação, projeto**. 2. ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2012.
- BANDINI, B.; VITÓRIA, F. C.; SILVA, E. R.; ALMEIDA, J. R. Desastre ambiental da Barragem de Fundão, MG: análise de impactos socioambientais. **Revista Internacional de Ciências**, v. 2, n. 15, p. 1-15, set.-dez. 2019.
- BARBOSA, L. M. (Coord.). **Manual para recuperação de áreas degradadas do Estado de São Paulo: matas ciliares do interior paulista**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2006.
- BATISTA, J. O. et al. **Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro na construção civil**. Relatório Técnico. Ouro Preto: [s. n.], 2016.
- CAMPANHARO, I. F. et al. Forest restoration methods, seasonality, and penetration resistance does not influence aboveground biomass stock on mining tailings in Mariana, Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, n. 1, 2021.
- CÁRITAS BRASILEIRA. **Considerações para a continuidade da reparação em Mariana/MG**. Mariana: Cáritas Brasileira, mar. 2022.
- CÁRITAS BRASILEIRA. **Preservação dos territórios atingidos de Mariana pelo rompimento da Barragem de Fundão: relatório 01**. Mariana: Cáritas Brasileira, 2020.
- CARVALHO, M. S. de et al. Concentração de metais no rio Doce em Mariana, Minas Gerais, Brasil. **Acta Brasiliensis**, v. 1, n. 3, p. 37-41, 2017.
- CAPRA, G. F. et al. Through the decades: taxonomic proposals for human-altered and human-transported soil classification. **Soil Horizons**, v. 54, p. 1-9, 2013.

CAPRA, G. F. et al. A review on anthropogenic soils from a worldwide perspective. **Journal of Soils and Sediments**, v. 15, p. 1602–1618, 2015.

CONCEIÇÃO, Thiago Silva da. **Mapeamento das alterações da paisagem nos imóveis rurais após o rompimento da barragem de Fundão em Mariana - MG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

CRUZ, F. V. S. et al. Does Samarco's spilled mud impair the growth of native trees of the Atlantic Rainforest? **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 189, 2020.

CURCIO, G. R.; LIMA, V. C.; GIAROLA, N. F. B. **Antropossolos: Proposta de Ordem (1ª aproximação)**. Colombo: Embrapa Florestas, 49 p, 2004.

DIAS, M. A.; PAULA, E. V. Mapeamento de Antropossolos: estudo de caso no bairro Santa Felicidade (Curitiba/Paraná). **Ra'e Ga: O Espaço Geográfico em Análise**, Curitiba, v. 44, p. 212-230, maio 2018.

ECK, N. J. van; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

EMBRAPA. **Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG: apoio ao plano de recuperação agropecuária**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2015.

FERREIRA, E. P. **Pedogênese e elementos tóxicos em solos de litologia sedimentar no Norte de Minas Gerais**. 2017. Tese (Doutorado em Agricultura Tropical e Subtropical), 2017.

FIRMIANO, M.; IRFFI, G. O desastre ambiental na Barragem de Fundão em Mariana–MG e seus efeitos econômicos e sociais em Minas Gerais e no Espírito Santo. **Revista Brasileira de Estudos Regionais e Urbanos**, p. 392-419, 2020.

FRANCO, L. C. et al. Aplicação de rejeito de mineração como agregado para a produção de concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014, Natal. **Anais [...]**. Natal, 2014.

GOMES, A. R. F. **Recuperação de mata ciliar da bacia Rio Doce atingida pelo rejeito de Fundão (Mariana, MG): remediação de éter amina e sódio**. 2023. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

GOMES, D. C. H.; COELHO, R. M.; ROSSI, M. **Solos antropogênicos da bacia do ribeirão das Anhumas: caracterização, legenda e implicações ambientais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2017.

HUOT, H. et al. Characteristics and potential pedogenetic processes of a Technosol developing on iron industry deposits. **Journal of Soils and Sediments**, v. 13, p. 1-12, 2013.

ICOMANTH. **International committee on anthropogenic soils**. Disponível em: http://clic.cses.vt.edu/icomanth/urban_soils.htm. Acesso em: 2 jun. 2025.

IUSS WORKING GROUP WRB. **World Reference Base for Soil Resources**. Rome: FAO, 2006.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Laudo Técnico Preliminar – Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais**. Brasília: IBAMA, 2015.

INSTITUTO LACTEC. **Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce: Relatório de Linha-Base – Resumo Executivo**. Curitiba: Instituto Lactec, 2017.

LAUREANO, F. V. et al. **Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão: o caminho para uma mitigação sustentável e resiliente**. Gland: UICN, 2018. (Relatório Temático n.º 1 do Painel do Rio Doce).

LEGUÉDOIS, S. et al. Modelling pedogenesis of Technosols. **Geoderma**, v. 262, p. 199-212, 2016.

MACHADO, D. F. T.; CASTRO, S. S.; LADEIRA, F. S. B. A Geopedologia como abordagem metodológica para o levantamento de solos: uma breve discussão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 4, 2022.

MELLO, D. C. de. **Caracterização e uso dos solos das propriedades rurais afetadas pelos resíduos de mineração (lama de Mariana) - MG**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional. **Relatório: avaliação dos efeitos do rompimento da Barragem de Fundão**. Belo Horizonte: Sedru, 2016.

NOURI, H. et al. Application of green remediation on soil salinity treatment: A review on halophytoremediation. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 107, p. 94-107, 2017.

OLIVEIRA, S. J. M.; ALMEIDA, F. S. Impactos socioambientais do rompimento de barragens de rejeitos de mineração no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, p. 49-60, abr./jun. 2021.

PÁEZ, B. C. M. et al. Limiting physical properties of Technosols formed by the Fundão dam failure, Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, e0230021, 2024.

RIBEIRO, K. D. et al. Soil physical properties, influenced by pores distribution, of six soil classes in the region of Lavras-MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 1677-1685, 2007.

SAADI, A.; CAMPOS, J. C. F. Geomorfologia do caminho da lama: contexto e consequências da ruptura da Barragem do Fundão (novembro 2015, Mariana–MG). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, v. 1/2, p. 64-71, 2015.

SAMARCO. **Relatório Anual de Sustentabilidade**. Belo Horizonte: Samarco, 2013.

SANTOS, O. S. H. et al. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. **Journal of Environmental Quality**, v. 48, n. 2, p. 439-449, 2019.

SANTOS, R. et al. **Comparação entre solos afetados e não afetados pelo rompimento da barragem de Fundão**. 2022. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnosolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, v. 24, n. 1–2, p. 105–135, 2015.

SCHAEFER, C. E. G. R. et al. **Paisagens de Lama: Os Tecnosolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana-MG**. Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG, v. 24, 2016.

SÉRÉ, G. et al. Early pedogenic evolution of constructed Technosols. **Journal of Soils and Sediments**, v. 10, p. 1246-1254, 2010.

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

SILVA, A. O. et al. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, 462, 2021.

SILVA, B. M. **Tecnosolos construídos: uma "Solução Baseada na Natureza" para mitigação das mudanças climáticas**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências: Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

SILVA, C. V. et al. Banco de semillas de relaves mineros como indicador de recuperación de vegetación en Mariana, Brasil. **Revista de Biología Tropical**, v. 69, n. 2, p. 700-716, 2021.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12th ed. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014.

TEIXEIRA, R. C. et al. Solos antropogênicos: solos decorrentes da ação humana em perspectiva ao Antropoceno. **Revista Brasileira de Geografia Física**, p. 107-122, 2022.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". **Métodos de avaliação do uso da terra**. Piracicaba, 2014.

VAZ, D. V. Análise das mudanças da cobertura da terra causadas pelo desastre de Mariana-MG utilizando séries temporais de índices de vegetação. 2020.
Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.