

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

DISSERTAÇÃO

Caracterização Física, Química e Geofísica de
Tecnossolos de Rejeitos de Mineração de Ferro
Depositados em Terraços Fluviais

Marcos Vinícius de Carvalho Martins

2022



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

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, QUÍMICA E GEOFÍSICA DE
TECNOSSOLOS DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DE FERRO
DEPOSITADOS EM TERRAÇOS FLUVIAIS**

MARCOS VINÍCIUS DE CARVALHO MARTINS

Sob a Orientação do Professor

Marcio Rocha Francelino

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

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2022

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M375c Martins, Marcos Vinicius de Carvalho, 1990-
Caracterização física, química e geofísica de
tecnossolos de rejeitos de mineração de ferro
depositados em terraços fluviais / Marcos Vinicius de
Carvalho Martins. - Seropédica, 2022.
110 f.

Orientador: Marcios Rocha Francelino.
Dissertação (Mestrado). -- Universidade Federal Rural
do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais e Florestais (PPGCAF), 2022.

1. Desastre socioambiental. 2. Tecnossolos. 3.
Diagnóstico químico. 4. Textura do solo. 5. Georradar.
I. Francelino, Marcios Rocha, 1966-, orient. II
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e
Florestais (PPGCAF) III. Título.

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

MARCOS VINÍCIUS DE CARVALHO MARTINS

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

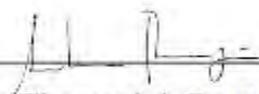
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 28 / 02 / 2022



Marcio Rocha Francelino. Doutor. UFV.



Bruno Araujo Furtado de Mendonça. Doutor. UFRRJ.



Andre Thomazini. Doutor. UFSJ.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

A meu Deus, sempre e em primeiro lugar.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), por ter sido a instituição base de minha formação desde a graduação em Engenharia Florestal e, agora, no Mestrado, ofertando-me ensino de qualidade e as bases técnico-científicas necessárias para o meu desenvolvimento enquanto pesquisador.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por ter disponibilizado a estrutura e demais condições para que esta pesquisa pudesse ser realizada.

Ao meu orientador, professor Marcio Rocha Francelino, por ter aceitado me orientar e contribuído com ponderações, recomendações e correções para a realização deste trabalho.

À minha mãe, Ana Maria de Carvalho Martins – amor da minha vida – pela vida, por tudo; pedagoga e educadora, uma mulher batalhadora e de grande sabedoria, o meu maior tesouro e referencial de superação e força de vontade nos estudos, visto que concluiu sua graduação após os 30 anos e, mesmo enfrentando inúmeras adversidades que a vida lhe impôs, nunca deixou de lado o desejo de realizar os seus sonhos, concluindo mais duas especializações e sendo aprovada em concurso público posteriormente.

Ao meu pai – o “meu herói, meu bandido”, com quem tive muitos problemas no início da vida por causa de minha sexualidade, mas que hoje é o meu melhor amigo e maior incentivador, porquanto, por não ter tido oportunidade de estudar para além do Ensino Fundamental I, sabe dar o devido valor à educação e, por isso, fez e faz tudo para que eu possa atingir os mais altos níveis educacionais possíveis neste País; ele é o meu exemplo de humildade, responsabilidade e resistência.

À Amanda de Carvalho Martins, minha querida e amada irmã, com quem tenho laços não só consanguíneos, mas de amizade verdadeira, além de grande admiração por toda a coragem e autenticidade que já demonstrou e demonstra no enfrentamento das barreiras da vida.

Ao meu namorado, Maicon Silva dos Santos, minha “bilinha”, não só por ter estado presente desde o início deste trabalho e acompanhado todo o árduo processo por que passei, mas principalmente por ser o meu grande amor, amigo, paixão e por sustentar comigo todas as dificuldades que encontrei ao longo desses quatro anos de namoro e dois de Mestrado, sem largar a minha mão em nenhum instante, levantando-me sempre que pensei em desistir.

Aos meus professores, desde a educação básica pública até o Ensino Superior federal. Todos foram fundamentais para tudo o que aprendi em minha jornada de vida, tanto os que serviram como espelho quanto os “antiespelho”. Também aos amigos e colegas do Laboratório Terrantar da UFV, que foram essenciais, tanto nas atividades de campo, laboratoriais ou mesmo nas conversas para relaxar em momentos de dificuldades: Carol, Dani, Prímula, Jéssica, Heitor, Felipe e Jean – agradecimento especial a este por toda a contribuição com conhecimentos imprescindíveis sobre Geoprocessamento.

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

BIOGRAFIA

MARCOS VINÍCIUS DE CARVALHO MARTINS, nascido a 9 de janeiro de 1990 em Caldas-MG, filho de José Roberto Borges Martins, agricultor e motorista, e Ana Maria de Carvalho Martins, pedagoga e professora primária.

Estudou a Educação Básica toda em escola pública. Iniciou a graduação em Letras-Português na Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG) em 2009, mas não a finalizou, tendo realizado novo vestibular para Engenharia Florestal na UFRRJ em 2012, onde se graduou em 2018. Posteriormente, fez Licenciatura em Formação Pedagógica em Ciências Biológicas, pela UNIASSELVI, em 2021, e concluiu o curso de Letras-Português/Inglês na UNISANTA, em 2022. Está também se graduando em Pedagogia pela UNIASSELVI (2022). Fez três especializações: Educação Inclusiva; Docência e Prática de Ensino em Português; e Docência e Prática de Ensino em Ciências. Ingressou no Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais na UFRRJ em 2019, concluindo-o em 2022. Atualmente, trabalhou como Fiscal Sanitário e Ambiental no município de Ouro Preto-MG e é professor de educação básica dos cursos técnicos em Logística e em Segurança do Trabalho no estado de Minas Gerais, no mesmo município.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL	10
GENERAL ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Histórico dos Desastres Ambientais.....	14
2.2 Rompimento de Barragens	15
2.2.1 Rompimento de barragens de mineração.....	16
2.2.2 Métodos de barramento de rejeitos minerários.....	18
2.2.3 O desastre socioambiental da barragem de Fundão	19
2.3 Tecno solos Provenientes de Rejeitos Tecnogênicos	20
2.4 Radar De Penetração Do Solo (GPR)	20
REFERÊNCIAS	21
CAPÍTULO I – DIAGNÓSTICO DE PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DE TECNO SOLOS PROVENIENTES DE REJEITOS DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM TERRAÇOS FLUVIAIS.....	27
RESUMO	27
ABSTRACT	28
1 INTRODUÇÃO.....	29
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
2.1. Área de Estudo.....	30
2.2. Amostragem de Solo.....	31
2.3. Análise Granulométrica.....	31
2.4. Análises Químicas.....	32
2.5. Análises Estatísticas.....	32
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
3.1 Análises das frações granulométricas dos rejeitos tecnogênicos	33
3.2 Análises estatísticas sobre atributos químicos dos rejeitos tecnogênicos	39
4 CONCLUSÕES	61
5 REFERÊNCIAS	62

CAPÍTULO II – IDENTIFICAÇÃO DA ESPESSURA DE TECNOSSOLOS PROVENIENTES DE REJEITOS MINERÁRIOS DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM TERRAÇOS FLUVIAIS UTILIZANDO RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO	65
RESUMO	65
ABSTRACT	66
1 INTRODUÇÃO	67
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	68
2.1 Área de Estudo.....	68
2.2 Descrição das áreas.....	69
2.3 Uso de GPR para Inspeção dos Tecnosolos	76
2.4 Processamento de dados do GPR.....	76
2.5 Identificação de Áreas de Reflexão	76
2.6 Processamento de Imagens para Produção de Mapas Hipsométricos.....	77
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	78
3.1 Análise dos Radargramas e das Espessuras da Camada de Rejeitos	78
4 CONCLUSÕES	93
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	94
6 REFERÊNCIAS	94

RESUMO GERAL

MARTINS, Marcos Vinícius de Carvalho. **Caracterização Física, Química e Geofísica de Tecnosolos de Rejeitos de Mineração de Ferro Depositados em Terraços Fluviais**. 2021. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

Com o rompimento da barragem do Fundão em 2015, lançaram-se cerca de 44 milhões de m³ de rejeitos minerários por 663 km no rio Doce e seus afluentes. Estudos constantes para diagnosticar a situação química, física e geofísica dos Tecnosolos desenvolvidos vêm sendo realizados. Este trabalho foi dividido em dois capítulos e uma revisão de literatura. O primeiro objetivou avaliar a composição química e a textura dos sedimentos tecnogênicos nas planícies fluviais dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce por meio de análises químicas, físicas e estatísticas exploratórias. A granulometria apresentou tendência de aumento nos teores de silte e argila e diminuição de areia total, conforme se distanciava da barragem de Fundão. A análise química evidenciou solos fracamente ácidos, com baixos teores de macronutrientes em superfície, MO baixa e maiores teores de fósforo disponível em profundidade, bem como teores de metais pesados dentro dos limites de referência. O segundo capítulo objetivou avaliar espessura da camada desses Tecnosolos, utilizando Georradar (GPR). Geraram-se radargramas, relacionando as diferentes espessuras a mapas hipsométricos dos locais. A variação textural sugere processo de elutriação das camadas superficiais próximas às margens em decorrência da maior facilidade de transporte dos materiais mais finos; ademais, os sedimentos são quimicamente pobres. Por fim, o uso de GPR na identificação da espessura de rejeitos mostrou-se promissor, e a variação desse atributo ocorreu em função da disposição do local pela distância e altitude em relação ao leito do rio.

Palavras-chave: Diagnóstico químico, Textura do solo, Geotecnologia.

GENERAL ABSTRACT

MARTINS, Marcos Vinícius de Carvalho. **Physical, Chemical and Geophysical Characterization of Iron Mining Tailings Technosols Deposited on River Terraces**. 2021. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Departamento de Ciências Ambientais. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2021.

With the failure of the Fundão dam in 2015, around 44 million m³ of mining tailings were released over 663 km into the Doce River and its tributaries. Constant studies to diagnose the chemical, physical and geophysical situation of the Technosols developed have been carried out. This work was divided into two chapters and a literature review. The first aimed to evaluate the chemical composition and texture of technogenic sediments in the fluvial plains of the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers through exploratory statistical analyses. The granulometry shows a tendency towards an increase in the silt and clay contents and a decrease in total sand, with a predominance of medium-silty to medium-sandy classes; the pH is weakly acidic; macronutrients have low contents, being higher on the surface; the MO is low; higher levels of available phosphorus are found at depth, increasing along the study area, as well as micronutrients; the levels of available heavy metals are within legal limits. The second aimed to evaluate the thickness of the layer of these Technosols, using Georadar (GPR). Radargrams were generated, relating the different thicknesses to hypsometric maps of the locations. The textural variation suggests a process of elutriation of the surface layers close to the margins due to the greater ease of transport of the thinner materials; moreover, the sediments are chemically poor. The use of GPR for the identification of tailings thickness showed to be promising, and the variation of this attribute occurs as a function of the layout of the site by the distance and height of the river bed.

Keywords: Chemical diagnosis, Soil texture, Geotechnology.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Era do Antropoceno pode ser entendida enquanto produto da relação do ser humano com a natureza ao modificá-la intensamente, em especial com o advento da Revolução Industrial em meados do século XVIII (LEWIS; MASLIN, 2015). A necessidade cada vez maior de matéria-prima para suprir a demanda das indústrias em decorrência do consumismo desenfreado fez com que a exploração de recursos naturais se intensificasse, como no caso da mineração, a qual, no último século, se expandiu por todas as regiões do planeta (ELLIS et al., 2010). Dessa forma, as ocorrências de desastres ambientais tornaram-se marcantes nesse espectro geológico-temporal (VIOLA; BASSO, 2016).

No estado de Minas Gerais, a atividade de exploração mineral desenvolve-se desde o século XVII, intensificando-se com o passar do tempo, e ainda na atualidade, somente na região do Quadrilátero Ferrífero, há centenas de barragens construídas para a deposição dos rejeitos de mineração (SCHAEFER et al., 2015). As minas de ferro dessa região operam à base de elevado grau de mecanização e equipamentos pesados, pertencentes a empresas multinacionais, sendo as duas principais mineradoras que atuam na bacia do Rio Doce a Vale S.A. e a BHP Billiton, proprietárias da Samarco Mineração, as maiores produtoras de minério de ferro do país (IBAMA, 2015).

No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu um dos mais significativos desastres ambientais da história recente do Brasil: o rompimento da barragem de Fundão, localizada no município de Mariana/MG, por meio do qual foi lançada uma onda de lama com volume aproximado de 43,7 milhões de m³ de resíduos (IBAMA, 2015). Desse volume, estima-se que cerca de 32 milhões m³ foram extravasados, sendo retidos 80% desse material ao longo dos primeiros 100 km, até a barragem de Risoleta Neves (Candonga); com isso, todo o sistema hidrográfico dos rios Gualaxo do Norte, Carmo, Piranga e Doce foi drasticamente afetado (CPRM, 2015).

Os rejeitos despejados sobre esses locais originaram-se do itabirito, rocha metamórfica abundante na região, utilizada para a exploração de minério de ferro (RODRIGUES *et al.*, 2016). Tais rejeitos foram inicialmente classificados, segundo a NBR 10.004, como sólidos, não perigosos e não inertes, de composição química conhecida, como ferro e manganês, um material em suma formado por areia e metais (SCHAEFER *et al.*, 2015). Como consequências, além de causar a morte de 19 pessoas, impactou fortemente a ictiofauna e destruiu áreas de preservação permanente e as agrícolas nas planícies e terraços fluviais (ESPÍNDOLA *et al.*, 2019). Nesses terraços, foi acumulado material tecnogênico sem estrutura, com grande quantidade de silte, e, assim, gerou-se novo ambiente, com superfície endurecida, pobre em nutrientes e com problemas de drenagem (SCHAEFER *et al.*, 2015). A qualidade da água dos rios foi fortemente afetada, com problemas até os dias atuais (SANTANA *et al.*, 2021).

Esse fato ocasionou consideráveis problemáticas, como a dificuldade no estabelecimento de culturas agrícolas nessas áreas, trazendo incontáveis prejuízos socioeconômicos à região, em especial porque, para fins de recuperação, os problemas físicos dos Tecossolos desenvolvidos sobre os solos originais são maiores que os químicos (SCHAEFER *et al.*, 2015; 2016). Quimicamente, são solos com baixa fertilidade, mas fisicamente, a compactação ocasionada pelo selamento das camadas superficiais é preocupação ainda mais acentuada (MILANEZ e LOSEKANN, 2016).

Consequências socioculturais também fizeram-se presentes com o desastre: as populações ribeirinas, grande parte formada por pescadores e agricultores familiares, que dependiam diretamente dos rios para suas atividades de subsistência, além de turismo e até seu lazer, foram fortemente afetadas pelos prejuízos materiais, já que perderam suas principais atividades de renda, bem como seus pertences e moradias (SILVA et al., 2019). Ademais, as perdas imateriais, irreparáveis financeiramente, como cultura, memórias e histórias, foram intensas nessas comunidades (ESPINDOLA et al, 2019).

Tendo isso em vista, o presente estudo foi dividido em dois capítulos. O primeiro capítulo teve como objetivo avaliar, por meio de análises físicas e químicas, a atual situação do material advindo do depósito de sedimentos tecnogênicos nas planícies fluviais de trechos atingidos pelo desastre socioambiental, cinco anos após o ocorrido, procedendo a análises estatísticas tanto descritivas quanto multivariada (Análise de Agrupamento e PCA). O segundo capítulo teve como objetivo avaliar a espessura atual da camada de rejeitos tecnogênicos por meio do Radar de Penetração do Solo – ou Georradar (GPR) e possíveis explicações das variações desse atributo ao longo da área de estudo com base em mapas hipsométricos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Histórico dos Desastres Ambientais

Os desastres ambientais podem ser inseridos na Era do Antropoceno, cujo conceito – estipulado em 2000 pelo químico holandês Paul Crutzen – vem sendo cada vez mais admitido no âmbito das pesquisas científicas, no intuito de se compreenderem os fenômenos ambientais atuais pela relação do ser humano com a natureza ao modificá-la intensamente desde a Revolução Industrial (ELLIS *et al.*, 2010; LEWIS; MASLIN, 2015). No entanto, ainda que o século XIX tenha acelerado as transformações para o surgimento do Antropoceno, os impactos sobre a Terra ainda não tinham alcançado a escala que tornou a espécie humana a principal força-motriz das modificações da natureza (VIOLA; BASSO, 2016). Por isso, entende-se que a compreensão do Antropoceno adquire relevância no início do século XXI, quando os requisitos de escala, cumulatividade e limite foram de fato atingidos (VIOLA; BASSO, 2016).

A análise de Löwy e Harribey (2003) afirma que essa Era geológica está intrinsecamente relacionada ao surgimento de desastres ambientais, pois contribuíram para a intensificação da crise ecológica hodierna, produzindo as transformações pelas quais o meio ambiente natural passa, sendo também uma crise de civilização (LÖWI, M.; HARRIBEY, 2003). Partindo dessa concepção, constata-se que, com o passar do tempo, os mecanismos de produção tornaram-se mais dinâmicos, automatizados e, para acompanhá-los, a evolução científica incrementou novos modelos de desenvolvimento exploratório nos mais diversos setores produtivistas, desde a geração de energia, indústria química, fertilizantes agrícolas, metalurgia, até a mineração (BERWIG; ENGELMANN, 2017).

Neste viés, os desastres ambientais entram em foco nas discussões não só acadêmicas, como também de interesse da gestão governamental, visto que são uma realidade iminente ao redor do mundo, sendo imprescindível a realização de estudos que abranjam desde as causas, a prevenção e mitigação, até a análise das consequências desses eventos (KOBİYAMA, M., MENDONÇA, 2006).

Com a intenção cada vez maior de aumentar a produtividade e, conseqüentemente, obter o lucro, sem a devida importância para com o equilíbrio do meio ambiente, assim como o aumento demográfico, a ocupação desordenada das paisagens, bem como a intensificação dos processos de urbanização e industrialização, houve crescimento considerável no número de desastres ambientais, aumentando a intensidade, frequência e magnitude dos impactos negativos gerados por esses eventos (KOBİYAMA, M., MENDONÇA, 2006).

Ainda que haja divergências acerca de um conceito unânime e invariável sobre o que são desastres ambientais (BERWIG; ENGELMANN, 2017), as consequências prejudiciais geradas por eles propiciam a obtenção de uma definição técnica amplamente aceitável a seu respeito. Nesse sentido, os desastres ambientais podem ser entendidos como todo evento sistêmico que atinge, parcial ou totalmente, uma comunidade, seus subsistemas e meio ambiente natural, ocasionando-lhes prejuízos de caráter material e imaterial (SLUIJS; TURKENBURG, 2006).

São inúmeras as tentativas ao redor do mundo de se estabelecer uma agenda de políticas vinculadas ao monitoramento de eventos na busca de previsão, assim como práticas relacionadas à prevenção de desastres ambientais (BERWIG; ENGELMANN, 2017). Corroborando esse entendimento, no Brasil, em termos legais, o Decreto nº 7.275, de 4 de

agosto de 2010, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil, no qual se encontra a definição legal sobre desastres ambientais. Este dispositivo estabelece, portanto, que desastre ambiental é o resultado de eventos adversos, naturais ou antrópicos, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos materiais ou ambientais e, conseqüentemente, prejuízos sociais e econômicos (BERWIG; ENGELMANN, 2017).

Da Revolução Industrial até os dias atuais, foram basicamente três séculos buscando, no aperfeiçoamento tecnológico, maneiras de aumentar a produtividade das indústrias, modificando, assim, o modo de vida do planeta, o que, aliado aos avanços da Medicina no tratamento de doenças antes tidas como fatais, trouxe aumento na expectativa de vida da população, bem como maior mão de obra disponível (POTT; ESTRELA, 2017). Em contrapartida, o início da preocupação com as conseqüências dessas ações para com o meio ambiente completa pouco mais de meio século, datando das décadas de 60-70 (POTT; ESTRELA, 2017).

Na literatura de desastres ambientais, há relatos de poluição atmosférica por conta da fumaça das indústrias que causou inúmeras mortes, como o caso da Bélgica, em 1930, no Vale do Meuse, onde 60 pessoas vieram a óbito em decorrência de complicações respiratórias; depois, em 1952, a “Névoa Matadora”, em Londres, provocou mais de 4 mil mortes; em 1956, no Japão, a contaminação da água na Baía de Minamata registrou em 20 anos mais de 100 mortes e três mil casos em verificação (HOGAN, 2007).

Em 1986, na Ucrânia, o maior desastre nuclear mundial, de Chernobyl, causou danos incalculáveis à população e à natureza, os quais são sentidos até os dias de hoje, e, em 2011, houve o segundo maior, em Fukushima, no Japão (INES, 2013). Na Guerra do Golfo, em 1991, houve o derramamento de 1.360.000 toneladas de petróleo, sendo o maior acidente petrolífero da história mundial (SOS MATA ATLÂNTICA, 2013). Em todos eles, sempre há danos incomensuráveis e, por isso, urge a necessidade de implementar ações para se evitar a ocorrência dos desastres (BERWIG; ENGELMANN, 2017).

A Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, classifica os desastres ambientais em três tipos, sendo eles naturais, antrópicos ou mistos. Os desastres ambientais naturais são aqueles em que os fenômenos e desequilíbrios da natureza são produtos de fatores de origem externa, independentes da ação humana sobre eles, podendo ser de origem sideral, geodinâmica interna ou externa (GONÇALVES PATRÃO; SANTOS ANDRADE, 2018).

Os desastres ambientais antrópicos ou antropogênicos são decorrentes de ações ou omissões humanas, sendo de natureza social, biológica ou tecnológica. Já os desastres ambientais mistos são aqueles nos quais a ação ou omissão antrópica exercem influência na intensificação, complicação ou agravamento dos desastres ambientais naturais (GONÇALVES PATRÃO; SANTOS ANDRADE, 2018).

2.2 Rompimento de Barragens

O rompimento de barragens pode ser classificado como um desastre ambiental antropogênico, já que o fator ser humano sempre está relacionado ao processo de barramento e, por conseguinte, as ações e omissões concernentes a sua condução geram tal conseqüência adversa ao meio ambiente e à sociedade de modo geral (ALVES, 2016; ESPINDOLA *et al.*, 2016). Assim sendo, encontra-se na literatura mais recente que as barragens são consideradas “objetos técnicos”, que podem gerar riscos seguidos de “desastres tecnológicos” com inúmeros passivos ambientais (COELHO *et al.*, 2017).

O evento conhecido como “Tristeza da China”, ou “Enchente do rio Huang He (Rio Amarelo), em 1887, é o relato mais antigo sobre desastres ambientais envolvendo rompimento de barragens, quando ocorreu a ruptura de diques, levando à morte mais de três milhões de pessoas, afogadas ou em decorrência de doenças causadas pela enchente (BOTTECHIA, J. A.; SOUZA, 2017).

Outros eventos são descritos ao longo do século XX, tanto de barragens de água para abastecimento ou geração de energia quanto de mineração, como em Los Angeles (EUA), em 1928, com o rompimento da barragem de St. Francis; em 1959, a barragem de Malpasset, na França; a barragem de Vajont, na Itália, em 1963; a barragem de mineração de Mogpop, nas Filipinas, em 1996; a barragem do Sistema Federal de Diques, em New Orleans (EUA); sendo todas elas com consequências socioambientais devastadoras (BOTTECHIA, J. A.; SOUZA, 2017).

Quanto aos tipos de barragem, há seis, sendo eles: barragens para represamento; barragens de rejeitos (com água); barragens de rejeito (sem água); barragens para medidas de segurança; barragens-reservatório para controle de inundação; barragens-reservatório de armazenamento (com bomba) (DUARTE, 2008).

No Brasil, o rompimento de barragens, sejam elas de rejeitos ou de outras fontes, não é um evento tão recente, mas sim que se configura enquanto desastre reiterado no histórico ambiental de exploração dos recursos naturais deste País (BROWN, 2012). Tal evento agride direitos fundamentais de todo cidadão brasileiro, como à vida, à saúde, à moradia, bem como ao ambiente ecologicamente equilibrado e, por isso, deve ser interpretado e tratado como crime ambiental cometido pela pessoa civil ou jurídica responsável por ele (ALVES, 2016; SARAIVA; FERREIRA, 2018; DE FREITAS *et al.*, 2019).

Ao longo das últimas três décadas, houve 13 rompimentos de barragens no Brasil (ALVES, 2016). Foram sete em Minas Gerais (em ordem cronológica: Itabirito, 1986; Nova Lima, 2001; Cataguases, 2003; Mirai, 2007; Itabirito, 2014; Mariana, 2015 – Fundão e depois Santarém; Brumadinho, 2019), além de Alagoa Nova (PB), em 2004; Vilhena (RO), em 2008; Cocal (PI), em 2009; Laranjal (AP), em 2014; e São José do Rio Claro (MT), em 2018, todos eles totalizando centenas de óbitos, milhares de desabrigados e desalojados, dezenas de desaparecidos, além de contaminação de água, impactos na flora e fauna e outros grandes prejuízos socioambientais (ALVES, 2016).

2.2.1 Rompimento de barragens de mineração

A importância econômica do setor minerário para o Brasil é um fato, já que representa uma parcela importante para a balança comercial, sendo o minério de ferro uma das principais *commodities* que o País exporta, além de este setor movimentar outros, suprindo-os com a matéria-prima extraída, como as indústrias da construção civil, automobilística, aeroespacial (MOREIRA, S. J.; HEINECK, 2018). No entanto, são inúmeros os prejuízos socioambientais decorrentes dessa atividade, tanto da lavra em si quanto dos rejeitos por ela gerados (COELHO *et al.*, 2017).

Barragens de mineração são definidas no Brasil por meio da Lei 12.334/2012, sendo o conceito mais restrito encontrado na NBR 13208 (2017), sendo barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos que, por suas atividades, se submetem ao direito minerário, sendo utilizados para contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou destarte de sedimentos advindos dessas atividades (MOREIRA, S. J.; HEINECK, 2018). Assim, entende-se que os rejeitos produzidos não têm utilidade lucrativa para as empresas, sendo, por isso, considerados materiais inúteis, e que

outrora eram lançados diretamente nos cursos d'água e outros ambientes (COELHO *et al.*, 2017).

A existência de barragens de mineração em Minas Gerais vem a partir da formação histórica deste Estado, já que, desde o final do século XVII, ainda no Brasil Colônia, sua economia centrou-se na exploração minerária (inicialmente com o ouro), e ainda na atualidade, somente na região do Quadrilátero Ferrífero, há centenas de barragens construídas (SCHAEFER *et al.*, 2015). O Rio do Carmo, em suas nascentes em Mariana, foi o primeiro grande garimpo de ouro do Brasil e, ironicamente, pouco mais de três séculos depois, foi o mais afetado pelo desastre ambiental da Samarco ocorrido em 2015 (SCHAEFER *et al.*, 2015).

Ainda no final do século XX, o problema dos rejeitos da mineração ocasionou desastres ambientais em diversas regiões do País, os quais foram amplamente divulgados, como o primeiro caso de desastre ambiental causado por mineração, o caso do assoreamento do lago Batata, no Pará, na década de 80, correspondente ao complexo bauxita-alumínio, bem como o rompimento das barragens do grupo Itaminas, em Itabirito (MG), que ocasionou a morte de sete pessoas e um grande passivo ambiental (COELHO *et al.*, 2017). Já no século XXI, contando com 839 barragens de mineração no País, conquanto os números de rompimento de barragens tenham diminuído, acentuaram-se os eventos graves e muito graves (SANTOS; WANDERLEY, 2016; MOREIRA; HEINECK, 2018). É notável nesses eventos a recorrência de desastres ambientais envolvendo a empresa Vale S.A, como os dois maiores de todos os tempos no Brasil, respectivamente, o rompimento das barragens de Fundão, em Mariana, e da Mina do Feijão, em Brumadinho, estando também entre os maiores de todo o mundo (DE FREITAS *et al.*, 2019).

O grande empecilho para a exploração minerária refere-se à própria matéria-prima a ser explorada: os minerais, enquanto recursos naturais não-renováveis, esgotam-se e, com isso, as minas acabam sendo inutilizadas e abandonadas (MILANEZ, 2017). No entanto, as estruturas criadas para atender à produção, como as barragens de rejeito, não deixam de existir, fazendo com que as comunidades do entorno sofram com o perigo iminente, e os potenciais danos trazidos por um eventual rompimento dessas barragens vão desde mortes de pessoas e devastação de ecossistemas até a contaminação de águas, bem como rios e lagos assoreados (COELHO *et al.*, 2017).

Esses rompimentos e, até mesmo, vazamentos de rejeito ocorrem em consequência, na maioria das vezes, de falhas humanas de planejamento, de construção e de operação, ou então da ausência de monitoramentos eficazes, além dos atributos naturais do próprio local que ressaltam o surgimento de riscos (SCHAEFER *et al.*, 2015). Outros autores afirmam que os rompimentos de barragens cada vez mais frequentes associam-se às condições geológicas dos depósitos atuais, além das tecnologias de baixo custo utilizadas nos processos de extração e beneficiamento primário, fragilizando a segurança das construções (SANTOS; WANDERLEY, 2016).

Em decorrência desses eventos e seus potenciais prejuízos socioambientais, no Brasil, foram criadas legislações reguladoras de resíduos e de barragens de mineração, como a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que instituiu “a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PRS)”, e os dispositivos da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabeleceram “a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB)” e criaram “o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB)” (COURA *et al.*, 2016).

Ainda assim, alguns autores verificam a incapacidade de o Estado brasileiro definir orientações públicas e democráticas voltadas à política de acesso aos bens minerais, o que

legítima padrões de comportamento incompatíveis com o respeito aos direitos dos trabalhadores minerários, as comunidades locais e as populações afetadas por suas operações (SANTOS; WANDERLEY, 2016).

2.2.2 Métodos de barramento de rejeitos minerários

Sobre os métodos de barragens de rejeitos de mineração, sabe-se que o mais utilizado pelas mineradoras é o da disposição de rejeitos em reservatórios criados por diques de contenção ou barragens, que podem ser de solo natural (barragens convencionais) ou construídos com os próprios rejeitos (barragens de contenção alteradas com rejeitos) (COURA et al., 2016).

Quanto aos rejeitos gerados, variam de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) a solos de granulometria fina e elevada plasticidade (lamas), e a composição granulométrica das areias é de finas a médias não plásticas, enquanto da lama, de silte e argilas com alta plasticidade, difícil sedimentação e alta compressibilidade (MOREIRA; HEINECK, 2018).

O barramento de rejeitos é feito a partir de estruturas construídas através do tempo que visam à diminuição dos custos da extração minerária, ocorrendo a partir de um dique de partida e de alteamentos sucessivos, podendo ser feito com material compactado originado de áreas de empréstimo ou com o próprio rejeito (COURA et al., 2016). Convencionalmente, encontram-se as descrições sobre os três diferentes métodos utilizados na construção de barragens de rejeitos, sendo eles: a Montante, a Jusante e de Linha de Centro (MOREIRA; HEINECK, 2018).

O primeiro é o mais antigo e simples, há a vantagem de maior velocidade no alteamento e o menor custo de implantação, o que se relaciona à principal desvantagem, pois é o mais instável de todos, devido à água existente nos poros do rejeito e do reservatório (RICO et al., 2008). Nesse método, inicialmente se constrói um dique de partida, em geral de material argiloso, para que então o rejeito seja lançado por canhões em direção a montante da linha de simetria do dique, formando a “praia de deposição”, a qual servirá de fundação e fornecerá material de construção para o próximo alteamento, em um processo contínuo até que a cota final prevista em projeto seja atingida (COURA et al., 2016).

No Método a Jusante, a vantagem se dá por ser o mais seguro, havendo controle de lançamento e de compactação, além de gerar maior estabilidade e resistência, inclusive, a abalos sísmicos; porém, despense maior custo de construção, devido ao volume de aterro do dique e do deslocamento do aterro de jusante, bem como necessita de maior área de construção (MOREIRA; HEINECK, 2018). Nesse método, inicialmente se constrói um dique de partida, de solo ou enrocamento compactado, sobre o qual os alteamentos sucessivos são realizados para jusante do dique, continuando até que a cota final prevista em projeto seja atingida (COURA et al., 2016).

No de Linha de Centro, há a vantagem da variação do volume de partículas mais grossas e densas, e a desvantagem de necessitar de mais tempo drenagem e quantidade de rejeitos para compactação (MOREIRA; HEINECK, 2018). Neste método, que é um aperfeiçoamento do Método a Jusante, o alteamento da crista é realizado verticalmente, sendo o eixo vertical dos alteamentos sucessivos coincidente com o eixo do dique de partida, sendo possível a utilização de zonas de drenagem internas em todas as fases de alteamento, o que este método ainda mais resistente a abalos sísmicos (COURA et al., 2016).

O aprimoramento dos métodos de disposição de rejeitos continua tanto na direção da redução do potencial dos danos dos reservatórios de rejeitos como do aumento da segurança de suas estruturas de contenção (COURA et al., 2016). Nesse sentido, cabe mencionar outros métodos alternativos, que visam a diminuir as desvantagens dos convencionais, como o Método de Linha de Centro Modificada, que mescla os Métodos a Montante e a Jusante, tendo como exemplo a barragem de Santo Antônio, em Paracatu (MG) (MOREIRA, S. J.; HEINECK, 2018).

2.2.3 O desastre socioambiental da barragem de Fundão

As lavras de minérios na região de Mariana (MG) se concentram, de modo geral, nas cabeceiras do rio Piracicaba, um dos principais afluentes do Doce, bem como em parte das cabeceiras dos rios Gualaxo e do Carmo (IBAMA, 2015). As minas de ferro dessa região operam à base de elevado grau de mecanização e equipamentos pesados, sendo empreendimentos pertencentes a grandes empresas. As duas principais mineradoras que atuam na bacia do Rio Doce são a Vale S.A. e a Samarco Mineração, as duas maiores produtoras de minério de ferro do país (IBAMA, 2015).

Na ocasião do rompimento da barragem de Fundão, de propriedade da empresa Samarco Mineração, uma *joint-venture* das duas maiores mineradoras mundiais, a Vale S.A. (nome alterado em 2009 da multinacional Vale do Rio Doce) e a BHP Billiton (multinacional anglo-australiana), cabe destacar que esse desastre consumou o risco já apontado pelo Ministério Público, conforme laudo em 2013 (ESPINDOLA; GUIMARÃES, 2019), com o lançamento de cerca de 44 milhões de m³ de lama ao meio ambiente, chegando a atingir uma altura de 5,5 m acima das planícies aluviais, e o distrito de Bento Rodrigues, o mais atingido, onde o lamaçal chegou a 15 m de altura, teve 19 mortos e 1.200 desabrigados, ficando inabitável (SARAIVA; FERREIRA, 2018).

No EIA-RIMA produzido para a implantação do empreendimento, constava que um possível rompimento somente afetaria as áreas imediatas à jusante do barramento; no entanto, a realidade dos efeitos negativos estendeu-se ao longo de 663 km lineares pelos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce até chegar às águas da costa do Espírito Santo, devastando povoações, causando mortes, destruindo ecossistemas e suas Áreas de Preservação Permanente (APP) (ESPINDOLA et al., 2016). Além da existência de laudos que demonstravam a possibilidade de rompimento da barragem, os próprios habitantes do local já a alertavam, mas estes não foram ouvidos, ao passo que congressistas financiados pelas grandes empresas de mineração estavam à época trabalhando na produção de um código de mineração que privilegiaria a ampliação de liberdade a essas empresas, o que evoca a noção de “capitalismo parlamentar” (ACSELRAD, 2015; LOSEKANN, 2017).

Com todo o ocorrido, as autoridades, juntamente com o Ministério Público, acusaram a empresa responsável por uma diversidade de crimes, sendo eles: crime de poluição qualificada; crimes contra fauna e flora; crimes contra o ordenamento urbano e patrimônio cultural; além de crimes previstos no Código Penal Brasileiro, como os de inundação, homicídios, desabamento/desmoroamento e de lesão corporal (SARAIVA, C. M.; FERREIRA, 2018).

O desastre ilustra a problemática das práticas corporativistas e das opções técnicas de mineradores em operação no Brasil, pois expõem a fragilidade de políticas públicas reguladoras ao setor minerário, as quais deveriam se voltar à adequação de métodos de disposição de rejeitos, e não apenas à segurança das barragens (SANTOS; WANDERLEY, 2016). Por isso, é também necessário que haja maior rigidez nos critérios e fiscalização das instituições de licenciamento e monitoramento ambiental das mineradoras, com o

fortalecimento dos órgãos e da legislação vigente, a fim de garantir limites, avaliação e controle mais rigorosos, além da participação efetiva das comunidades locais envolvidas (MILANEZ, 2017).

2.3 Tecossolos Provenientes de Rejeitos Tecnogênicos

Segundo a classificação estabelecida pela WRB - *World Reference Base for Soil Resources* (IUSS, 2014), os Tecossolos são solos com intensamente modificados pela ação antrópica, contendo significativo montante de artefatos tecnogênicos (acima de 20%) nos primeiros 100 cm da superfície, comuns em aterros, rodovias, áreas urbanas e áreas mineradas. Os Tecossolos são solos que se desenvolvem de substratos decorrentes da atividade antrópica, inclusive da mineração, e que podem sofrer intervenções visando a recuperação da qualidade (SBCS, 2016).

Devido à complexidade das atividades humanas, torna-se difícil o estabelecimento padrão de identificação e classificação desses solos (PUTRINO, 2017). O Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2018) ainda não estabelece a definição e classificação de Tecossolo, contando apenas com o conceito de horizonte A antrópico, por meio do qual não se pretende abranger a definição desses solos.

No caso do rompimento da barragem de Fundão, o aporte repentino da onda de lama com rejeitos tecnogênicos de mineração ocasionou o assoreamento dos rios, bem como o desaparecimento total das várzeas mais baixas, além de profundas alterações nos terraços, gerando grande degradação socioambiental (SCHAEFER et. al, 2016).

Como o próprio conceito de Tecossolos ainda carece de sistematização consistente, sendo utilizados sistemas de classificação estrangeiros para classificá-los, não reflete a realidade específica dos solos brasileiros, além da escassez de estudos que demonstrem com exatidão a partir de quais características materiais tecnogênicos como os rejeitos de mineração podem ser reconhecidos como Tecossolos, torna-se difícil a padronização de termos para referir a esses materiais. Para Schaefer et al. (2015), a atual situação dos solos atingidos pelos rejeitos tecnogênicos da área devem ser considerados como Tecossolos.

Essa nova realidade de Tecossolos apresenta grande contraste com os antigos solos da região, como Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Cambissolos, os quais eram majoritariamente eutróficos e sustentavam a paisagem ribeirinha. Esses Tecossolos são desprovidos de estrutura e com teores muito baixos de matéria orgânica (SCHAEFER et al., 2015). Além disso, ocorrem nesses solos superfície com forte selamento (*hard-setting*), muita areia fina e silte, com argila dispersa cimentante (SCHAEFER, 2016).

2.4 Radar De Penetração Do Solo (GPR)

Os métodos geofísicos vêm sendo cada vez mais utilizados por causa da eficácia no tempo reduzido de aquisição de dados e dos resultados, além do baixo custo em relação a outros métodos, bem como da capacidade de serem repetidos nos mesmos locais, pois são não destrutíveis para a superfície do solo (ZAJÍCOVÁ; CHUMAN, 2019). O GPR (*Ground-penetrating Radar*) – Radar de Penetração do Solo ou Georradar – é uma geotecnologia utilizada para identificar estruturas de subsuperfície, sendo caracterizado como método geofísico não-invasivo, pois permite extrair informações ao longo do perfil de solo, sem perfurar, sondar ou escavar (CEZAR et al., 2010).

O georradar tem sido utilizado por cientistas de solo para diversos fins, como determinar a presença, profundidade, extensão e variação lateral dos horizontes de solos,

assim como suas propriedades (CEZAR et al., 2010; MENDONÇA et al., 2014). O GPR tem a capacidade de mensurar a permissividade dielétrica do solo, utilizando um curto pulso de alta frequência, entre 10 e 2500 MHz, que é repetidamente radiado para dentro do terreno por uma antena transmissora, e sua resposta é registrada em intervalos de tempo muito pequenos (nanossegundos) por uma outra antena receptora (ZAJÍCOVÁ; CHUMAN, 2019).

Ele funciona a partir da emissão e recepção de ondas eletromagnéticas pelas antenas transmissoras e receptoras (UCHA et al., 2002). Os dados obtidos são armazenados na forma de traços, originando os perfis de reflexão, chamados comumente de “radargramas” (CEZAR et al., 2010). A energia refletida é registrada em função do tempo de percurso, sendo amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido do computador, deixando os dados prontos para posterior processamento (SOUZA, 2005).

Em geral, existem dois tipos principais de unidades GPR e antenas: “*ground-coupled shielded antennas*”, que estão em contato direto com a superfície estudada ou até alguns centímetros acima dela durante a aquisição de dados, e “*air-coupled horn antennas*”, que são projetadas para adquirir dados à distância de algumas dezenas de centímetros até mais de 1 m acima da superfície (ZAJÍCOVÁ; CHUMAN, 2019). Como a propagação do sinal do GPR no solo está em função das propriedades elétricas dos materiais que o integram, sendo controladas principalmente pelo teor de umidade presente em sua estrutura, quanto menores forem a condutividade elétrica e a constante dielétrica do solo, maior será a penetração do sinal (DAVIS & ANNAN, 1989).

O processamento dos dados para a obtenção dos radargramas é um procedimento muito interativo e subjetivo (SOUZA, 2005). Ele se inicia pela edição, por meio da qual é possível manipular tais dados no intuito de melhorar a apresentação, reverter a direção do perfil, incluir informações da topografia, editar os traços e corrigir o tempo zero da chegada da onda (UCHA et al., 2002). Para análise dos perfis de reflexão (radargramas), é necessário identificar a origem das reflexões, e se de fato as interfaces geradas pelas reflexões são de mudanças na subsuperfície ou apenas interferências. Existem três classes de importância na análise: refletores horizontais contínuos; refletores de objetos 2D e 3D, bem como de descontinuidades laterais; e hipérbolos de difrações (NAVARRO & NEFF, 2020).

As interferências podem ser causadas por objetos na superfície (árvores de grande porte, casas e edifícios, carros, estradas de ferro e cercas metálicas), que geram características hiperbólicas abertas no perfil, e os objetos enterrados (dutos, tanques, galerias ou raízes) resultam em feições hiperbólicas apertadas, além dos transmissores de sinais eletromagnéticos de alta frequência (estações de rádio, antena de micro-ondas etc.) (DAVIS & ANNAN, 1989).

REFERÊNCIAS

- ACSELRAD, H. the Political Genealogy of a Disaster a Genealogia Política De Um Desastre the Political Genealogy of a Disaster. **Vibrant** [Online], v14n2, p. 1–10, 2015. Disponível em: <http://journals.openedition.org/vibrant/4536>. Acesso em: 15 de janeiro de 2022.
- ALVES, H. R. O Estado de Coisas Inconstitucional e a incoerência do STF. **Canal Ciências Criminais**, p. 1–13, 2016.
- ANA. Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce Rompimento da Barragem em Mariana/MG. **Cunjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, v. 1, p. 1–50, 2016.
- BERWIG, J. A.; ENGELMANN, W. a Matriz Teórica Jurídica Dos Desastres Ambientais No Ciclo De Geração De Energia Na Sociedade Sistemica. **Revista Quaestio Iuris**, v. 10, n. 2, p. 615–634, 2017.

BOTTECHIA, J. A.; SOUZA, A. L. M. LICÇÕES DE MARIANA E A CONTAMINAÇÃO DO RIO DOCE. In: PÚBLICA, R. DE D. DA A. (Ed.). **Revista de Direito da Administração Pública**. 1ª ed. Rio de Janeiro: [s.n.]. v. 1p. 2017.

CALACHIBETE, C. et al. Análise da Eficiência do GPR na Determinação da Espessura de Ocorrências de Manganês nos Municípios de Guiratinga e Tesouro , Mato Grosso – Brasil Analysis of the Efficiency of GPR in Determining the Thickness of Manganese Occurrences in the Municipality. **Anuário IGEO - UFRJ**, v. 42, p. 154–163, 2019.

CEZAR, E. et al. Uso de sistema GPR (Ground Penetrating Radar) na avaliação de atributos de um solo sob plantio de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 291–298, 2010.

COELHO, M. C. N; WANDERLEY L. J; GARCIA, T. C. B. Regiões econômicas minero-metalúrgicas e os riscos de desastres ambientais das barragens de rejeitos no Brasil. **Revista da Associação Nacional de Pós-graduação e Pesquisa em Geografia (Anpege)**, v. V.13, p. 83–108, 2017.

COURA, D. J. F. et al. **Rejeitos da Mineração**. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2016.

CPRM. **Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana - Folha SF.23-XB-1** Estado de Minas Gerais Escala 1:100.000, , 1993.

CPRM. **MONITORAMENTO ESPECIAL DA BACIA DO RIO DOCE**. n. Belo Horizonte, p. 33, 2015.

DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geoph. Prosp.**, 37:531-551, 1989.

DE FREITAS, C. M. et al. From samarco in mariana to vale in Brumadinho: Mining dam disasters and public health. **Cadernos de Saude Publica**, v. 35, n. 5, 2019.

DE MENDONÇA, B.A.F., FILHO, E.I.F., SCHAEFER, C.E.G.R. *et al.* Use of geophysical methods for the study of sandy soils under Campinarana at the National Park of Viruá, Roraima state, Brazilian Amazonia. **J Soils Sediments** 14, 525–537 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0811-2>

DUARTE, A. P. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco**. Dissertação (2008) [s.l.]. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

ELLIS, E. C. et al. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. **Global Ecology and Biogeography**, v. 19, n. 5, p. 589–606, 2010.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. [s.l: s.n.].

ESPINDOLA, H. S. et al. Desastre da Samarco no Brasil: Desafios para a conservação da biodiversidade. **Fronteiras**, v. 5, n. 3, p. 72–100, 2016.

ESPINDOLA, Haruf Salmen, Nodari, EUNICE Sueli e SANTOS, Mauro Augusto dos. Rio Doce: riscos e incertezas a partir do desastre de Mariana (MG). **Revista Brasileira de História** [online]. 2019, v. 39, n. 81 [Acessado 9 Março 2022] , pp. 141-162. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-93472019v39n81-07>>. Epub 29 Jul 2019. ISSN 1806-9347. <https://doi.org/10.1590/1806-93472019v39n81-07>.

ESPINDOLA, H. S.; GUIMARÃES, D. J. M. História Ambiental dos Desastres: Uma agenda necessária. **Tempo e Argumento**, v. 11, n. 26, p. 560–573, 2019.

GONÇALVES PATRÃO, B.; SANTOS ANDRADE, E. Revista de direito urbanístico, cidade e alteridade. **Revista de Direito Urbanístico, Cidade e Alteridade**, v. 4, n. 1, p. 19–38,

2018.

GSSI. **Manual 135 do usuário** - Radan 7. 2003.

GUEVARA, Y. Z. C. et al. Reference Values of Soil Quality for the Rio Doce Basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1–16, 2018.

HOGAN, D. J. **População e Meio Ambiente: a emergência de um novo campo de estudos**. Campinas: Núcleo de Estudos de População-Nepo, 2007: [s.n.].

IBAMA. Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Laudo Técnico Preliminar. **IBAMA**, v. 1, p. 74, 2015.

INES. **The International Nuclear and Radiological Event Scale**. 2008. ed. Vienna: International Atomic Energy Agency: [s.n.].

IUSS. **World Reference Base for Soil Resources 2014: International soil classification systems for naming soils and creating legends for soil maps (Update 2015)**. [s.l: s.n.].

JONES, J. S. **Implementing the Precautionary Principle : Perspectives and Prospects Implementing the Precautionary Principle**. n. September 2014, 2006.

KOBIYAMA, M. , MENDONÇA, M. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. [s.l: s.n.].

LEWIS, S. L.; MASLIN, M. A. Defining the Anthropocene. **Nature**, v. 519, n. 7542, p. 171–180, 2015.

LOSEKANN, C. “It Was No Accident!” the Place of Emotions in the Mobilization of People Affected By the Collapse of Samarco’S Tailings Dam in Brazil. **Vibrant: Virtual Brazilian Anthropology**, v. 14, n. 2, p. 1–25, 2017.

LÖWI, M.; HARRIBEY, J. . Progrès destructif : Marx , Engels et l ’ écologie. **Capital contre Nature**, v. Paris-PUF, 2003.

MARTINI, R. **Aplicação do Ground Penetration Radar em estudos para disposição de rejeitos de minério de ferro**. n. March 2014, 2015.

MILANEZ, B. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. **Boletim regional, urbano e ambiental**, 2017.

MOREIRA, S. J.; HEINECK, K. S. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no brasil. **Holos**, v. 05, p. 1–39, 2018.

NAVARRO CASTILLO, Marx; NEFF, Hector. Identificando áreas de actividad a través del uso de GPR en la costa del Soconusco. **Estud. cult. maya**, Ciudad de México , v. 55, p. 41-63, 2020 . Disponível em <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-25742020000100041&lng=es&nrm=iso>. Acesso em 12 feb. 2022. Epub 09-Dic-2020. <https://doi.org/10.19130/iifl.ecm.55.2020.0002>.

NOVAES, H. T. Colapso do meio ambiente e potencialidades anticapitalistas da luta ambiental. **Lutas Sociais**, v. 22, n. 41, p. 294–305, 2018.

PEDRAS, K. C. et al. **Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais**. v. 14, 2017.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. **Updated World Map of the Koppen-Geiger Climate Classification Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification**. n. June 2014, 2007.

- PORSANI, J. L.; SAUCK, W. A. Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks : Artifact removal through effective data processing. **Geophysics**, v. 72, n. November, p. 8, 2007.
- POTT, C. M.; ESTRELA, C. C. Histórico ambiental: Desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. **Estudos Avancados**, v. 31, n. 89, p. 271–283, 2017.
- PUTRINO, S. M. **Tecnossolos úrbicos do parque linear ribeirão das Pedras, Campinas-SP**. [s.l.] UNICAMP, 2017.
- QUERIDO, F. M. “Alarme de incêndio”: Michael Löwy e a crítica ecossocialista da civilização capitalista moderna. **Trabalho, Educação e Saúde**, v. 11, n. 1, p. 11–26, 2013.
- RODRIGUES, B. 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. v. 5, n. 2, p. 44–53, 2016.
- SANTANA, Felipe Carvalho. Qualidade e comportamento espectral da água de rio afetado por rejeito de mineração. 2021. 96 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - **Universidade Federal de Viçosa**, Viçosa. 2021.
- SANTOS, R. S. P.; WANDERLEY, L. J. Dependência de Barragem , Alternativas Tecnológicas e a Inação do Estado : repercussões sobre o monitoramento de ... In: ZONTA, M.; TROCATE, C. (ORG. . (Ed.). **Antes fosse mais leve a carga: reflexões sobre o desastre da Samarco/Vale/BHP Billiton**. Marabá: Editorial iGuana, 2016. p. 87–137.
- SANTOS, E. E. DOS. DIAGNÓSTICO E MONITORAMENTO DOS TECNOSSOLOS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO POR MEIO DE TÉCNICAS REMOTAS E PROXIMAIS DE INSPEÇÃO DO SOLO. **Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, UFV**, p. 138–155, 2019.
- SARAIVA, C. M.; FERREIRA, P. T. M. A Lama da Samarco e o Crime Corporativo : uma reflexão necessária. **Administração Pública e Gestão Social**, v. 9, n. 2, p. 75–83, 2018.
- SBCS, B. INFORMATIVO. **A Ciência do solo e o desastre de Mariana**. Campinas: SBCS, 2016. v. 42
- SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E. FILHO, E. I. F.; ASSIS, I. . Paisagens de Lama: Os Tecnossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana-MG. **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, v. 24, n. March, 2016.
- SCHAEFER, C. E. G. R. et al. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, v. 24, n. 1–2, p. 105–135, 2015.
- SILVA, Fernanda Faria; DA SILVA, Jordana F.; TUPY, Igor S. Reflexões sobre resiliência Econômica Regional: o cenário pós-desastre de Mariana-MG. *Revista do Desenvolvimento Regional*, vol. 24, núm. 2, pp. 29-55, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17058/redes.v24i2.12974>
- SOS MATA ATLÂNTICA. **Os 10 maiores acidentes petrolíferos da história**. Disponível em: <<http://www.sosma.org.br/16659/plano-nacional-contravazamentos-de-petroleo-nao-garante-seguranca-da-costa/#.dpuf>>. Acesso em: 16 maio. 2020.
- SOUZA, M. M. Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais. Dissertação de Mestrado. **PUC-Rio**, p. 120, 2005.

UCHA, J. M.; BOTELHO, M.; VILAS BOAS, G. S.; RIBEIRO, L. P.; SANTANA, P. S. Uso do Radar de Penetrante no Solo (GPR) na investigação dos solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 26:373-380, 2002.

VIOLA, E.; BASSO, L. O sistema internacional no antropoceno. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 31, n. 92, 2016.

ZAJÍCOVÁ, K.; CHUMAN, T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. **Geoderma**, v. 343, n. March 2018, p. 116–129, 2019.

CAPÍTULO I – DIAGNÓSTICO DE PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DE TECNOSSOLOS PROVENIENTES DE REJEITOS DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM TERRAÇOS FLUVIAIS

RESUMO

O desastre socioambiental ocasionado com o rompimento da barragem de Fundão, em 2015, gerou nova situação pedológica nas áreas afetadas, sendo assim dominada por Tecnossolos de pobreza química e limitações físicas intensas devidas ao selamento superficial. De tal modo, pesquisas que visem ao diagnóstico químico e físico das áreas afetadas são de suma importância. O presente trabalho objetivou avaliar a composição química e a textura dos sedimentos tecnogênicos nas planícies fluviais dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce por meio de análises químicas, físicas e estatísticas exploratórias. Comparada a trabalhos anteriores em áreas adjacentes também afetadas pelos rejeitos tecnogênicos, verificou-se que a granulometria apresenta aumento nos teores de silte e argila à medida que se afasta da área de Fundão. A expressão dos elementos químicos confirma ambientes pobres, e os teores de metais pesados disponíveis encontram-se dentro dos limites de referência. A variação textural sugere processo de elutriação das camadas superficiais próximas às margens em decorrência da maior facilidade de transporte dos materiais mais finos; ademais, os teores dos elementos químicos permanecem baixos, tanto para nutrientes quanto para metais pesados. Conclui-se a existência de três grupos distintos de Tecnossolos relacionados ao tipo de ambiente fluvial das áreas analisadas, com forte influência da diferenciação do tipo de rejeito depositado e da distância da fonte de ocorrência do desastre em Fundão.

Palavras-chave: Desastre socioambiental, Sedimentos tecnogênicos, Planícies fluviais.

CAPTER I – DIAGNOSIS OF CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF TECHNOSOLS FROM TAILINGS FROM THE FUNDÃO DAM ON RIVER TERRACES

ABSTRACT

The socio-environmental disaster caused by the failure of the Fundão dam in 2015 generated a new pedological situation in the affected areas, wich was dominated by Technosols of chemical poverty and intense physical limitations due to surface sealing. Thus, research aimed at the chemical and physical diagnosis of the affected areas is of paramount importance. The present study aimed to evaluate the chemical composition and texture of technogenic sediments in the fluvial plains of Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers through chemical, physical and exploratory statistical analyses. The granulometry has a tendency to increase in the silt and clay contents as one moves away from the Fundão area. The expression of chemical elements confirms poor environments, and the levels of available heavy metals are within the reference limits. The textural variation suggests a process of elutriation of the surface layers close to the margins due to the greater ease of transport of the finest materials; in addition, the levels of chemical elements remain low, both for nutrients and for heavy metals. It can be concluded that there are three distinct groups of Technosols related to the type of fluvial environment in the areas analyzed, with a strong influence of the differentiation of the type of tailings deposited and the distance from the source of the disaster in Fundão.

Keywords: Socio-environmental disaster, Fundão dam, Soil chemistry, Soil physics.

1 INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) foi constantemente afetada por ações antrópicas desde a colonização do País em função da exploração de recursos minerais (GUEVARA et al., 2018). Um grande problema para a exploração minerária de ferro, a mais comum naquela região, refere-se à disposição dos rejeitos gerados, a qual geralmente é feita em barragens a montante. Esse tipo de estrutura apresenta perigo iminente de rompimento, e os potenciais danos trazidos por um desastre como esse vão desde mortes de pessoas a forte impacto nos ecossistemas locais, até a contaminação de águas, bem como rios e lagos assoreados, dentre outros (COELHO et al., 2017).

Na ocasião, extravasaram por volta de 44 milhões de m³ de rejeitos ao longo de vários rios afluentes do rio Doce (GOLDER, 2017), até sua foz no oceano Atlântico, em Linhares (ES), ocasionando dezenove mortes de trabalhadores e moradores, além de afetar drasticamente os ecossistemas fluviais e das margens dos rios afetados, alterando sua estrutura e funcionalidade (SANTANA et al., 2021). O rio Gualaxo do Norte foi o mais afetado, onde, segundo Santos et al. (2022), foram depositados cerca de 16 Mm³ de rejeitos nos seus terraços fluviais. Com isso, criou-se um novo ambiente dominado pela presença de Tecossolos (SCHAEFER et al., 2015). Para Rossiter (2007), Tecossolos são solos artificiais desenvolvidos a partir de substratos oriundos de atividade antrópica. Para a WRB (2014), Tecossolos são solos artificiais cuja composição deve conter mais de 20% de material tecnogênico ao longo dos primeiros 100 cm da superfície do solo ou da rocha contínua ou de uma camada cimentada.

Os materiais que constituem os Tecossolos formados na região após o desastre são basicamente formados por rejeitos de mineração de ferro misturados com solos e sedimentos locais, pobres em relação à composição química (SANTOS et al., 2022). As características físicas, no entanto, são os principais entraves à recuperação das áreas, já que geram selamento superficial ocasionado pela erosão de materiais finos e dispersáveis, resultando em substrato residual altamente compactado (SCHAEFER et al., 2015).

A recuperação de áreas afetadas por rejeitos de mineração com desenvolvimento de Tecossolos é fundamental no intuito de melhorar 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); uso de banco de sementes do solo para potencializar a regeneração (SILVA et al., 2021); utilização de espécies nativas primárias de rápido crescimento, recriando gradientes ambientais de solos preexistentes (AMARAL et al., 2020; CAMPANHARO et al., 2020; MARTINS et al., 2020); associação entre a reintrodução de espécies vegetais melipônicas e a atração de abelhas para potencialização da polinização (VIEIRA et al., 2019); uso de extrato pirolenhoso para melhoria de atributos físicos, químicos e de aumento da microbiota do solo (MYASACA, 2001); uso de moinha de carvão em substrato para melhoria de enraizamento e crescimento de mudas (GOMES et al., 1991); uso de escórias siderúrgicas para correção de acidez dos solos com potencial maior que o de calcários (CAMARGO, 1972).

Mais pesquisas sobre a real situação das áreas afetadas, seja sobre suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, são imprescindíveis para a compreensão de sua atual dinâmica, visto que já se passaram cinco anos desde a ocorrência do desastre. Nesse sentido, o

presente trabalho objetivou avaliar, por meio de análises químicas e físicas, os Tecnosolos advindos do depósito de sedimentos tecnogênicos nos terraços fluviais de trechos atingidos pelo desastre ambiental cinco anos após o ocorrido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

Este trabalho foi realizado ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), cuja área total é de 83.400 km², dentre os quais 86% fazem parte do território de Minas Gerais (ANA, 2016), e a área de estudo específica apresenta extensão aproximada de 75 km, sendo este o trecho mais afetado pela deposição dos rejeitos, visto que a maioria do volume desse material foi contido pela estrutura física da hidrelétrica Risoleta Neves, conhecida por “barragem de Candonga”, em Rio Doce (SANTOS, 2019).

Foram escolhidos locais com trechos o mais equidistantes possível de terraços fluviais que apresentassem diferentes tipos de cobertura do solo (Figura 1), que se estenderam ao longo dos rios Gualaxo do Norte, no município de Mariana e Barra Longa, onde também há conexão com o rio do Carmo, e posteriormente do rio Doce, passando pelos municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, cujas altitudes variam de 750 m a 300 (ANA, 2016).

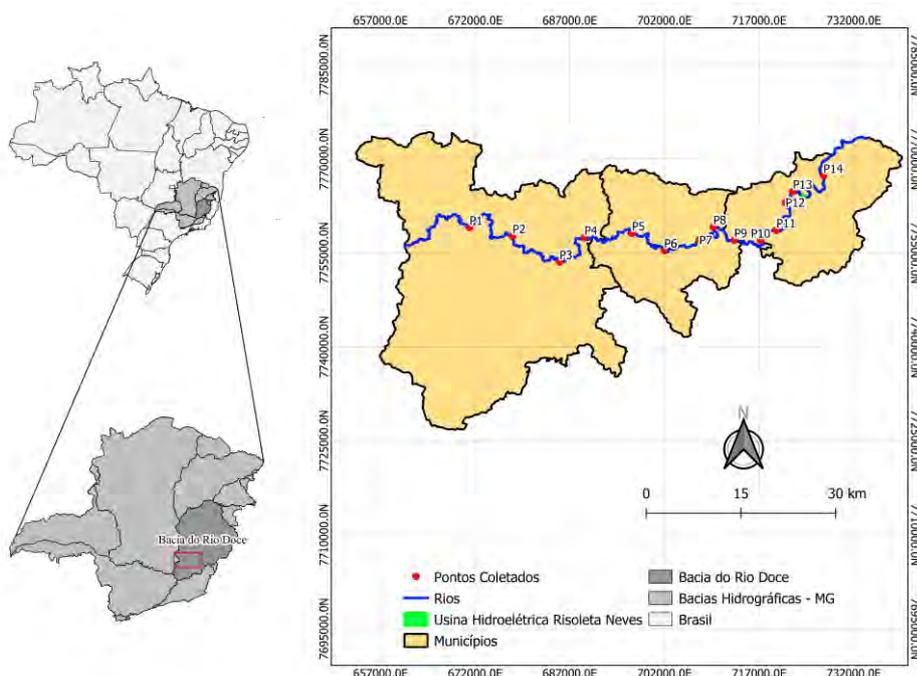


Figura 1: Localização da área de estudo.

Por toda a extensão da BHRD, o domínio ecológico mais representativo é o bioma Mata Atlântica, correspondendo a 98% da área total da bacia. Esse bioma, embora apresente ecossistemas naturais com considerável biodiversidade e endemismo, encontra-se em situação crítica, tendo em vista as intensas alterações decorrentes de ações antrópicas ao longo do tempo (IBAMA, 2015). A vegetação da área consiste em remanescentes de floresta semidecidual ao longo dos terços superiores e topos de morros, bem como nas matas ciliares de rios (CPRM, 1993).

O material geológico, em suma, constitui-se de depósitos aluviais do Quaternário, e a litologia é basicamente representada por três diferentes formações, sendo, na região do rio

Carmo, a Dom Silvério, composta por quartzitos, xistos e paragnaisses; na porção leste das partes inferiores do rio Gualaxo do Norte, o Complexo Mantiqueira, composto por ortognaisses; e o Complexo Acaiaca, constituído por gnaisses granulíticos (CPRM, 1993).

Os solos predominantes na região são basicamente Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos, bem como os Argissolos Vermelho-Amarelos eutróficos, sendo estes mais frequentes próximos aos rios, além de, nas áreas mais elevadas, em menor expressão, os Neossolos Litólicos e os Cambissolos Háplicos tb distróficos (PEDRAS et al., 2017). Ocorrem ainda intrusões, principalmente nos antigos terraços fluviais, de Cambissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos.

Nos locais onde houve deposição de rejeitos, realizaram-se posteriormente ações de recuperação, como a deposição de *topsoil* de outros locais não afetados, especialmente para haver incremento de matéria orgânica sobre os Tecossolos, o que contribui para a variação de espessura desses solos ao longo da área (SANTOS, 2019; SCHAEFER et al., 2016; SCHAEFER et al., 2015).

O clima da região da BHRD é classificado em três diferentes tipos, consoante a classificação de Köppen, sendo Aw – clima quente com chuvas de verão; Cwb – clima tropical de altitude com verões frescos; e Cwa – clima tropical de altitude com verões quentes, sendo este o clima predominante da área de estudo (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007).

Quando houve o desastre, os rejeitos ocasionaram intenso selamento superficial com presença de areia fina e silte altamente compactados, em especial pela retirada do material argiloso, encobrendo toda a vegetação do local (SHAEFER et al., 2015). No entanto, passados cinco anos, já foi possível observar presença de vegetação na maior parte das áreas, ainda que em processo inicial de regeneração, com maior incidência de gramíneas cobrindo os rejeitos, arbustos em touceiras e leguminosas pioneiras. A principal cobertura é a de gramíneas, destinada à formação de pastagem, o principal tipo de uso do solo nessa região.

2.2. Amostragem de Solo

As amostras foram coletadas em 14 pontos nos terraços fluviais formados por rejeitos tecnogênicos presentes na área de estudo em duas campanhas, uma em dezembro de 2020, e outra, em janeiro de 2021. A espacialização desses pontos foi feita de forma a estarem em trechos o mais equidistantes possível (cerca de 5,5 km), considerando-se o fator “acessibilidade à área” como determinante, além do fato de cobrir o máximo de diferenças entre o tipo de cobertura do solo, tais como áreas de pastagem, reglorestamento, regeneração natural e solo exposto. Para a coleta das amostras nos terraços, utilizaram-se transectos, sendo cada um destes dividido em três subpontos, assim estipulados: beira do rio (A); beira da estrada (C); e o intermediário entre os dois (B). Em cada um desses subpontos, as amostras foram retiradas em três diferentes profundidades: 0-20 cm (1); 20-40 cm (2); e 40-60 cm (3), explicando a nomenclatura utilizada, como em “P1A1” (ponto da área 1, beira do rio, profundidade 0-20 cm), semelhante à metodologia de amostragem publicada por Santos (2019).

2.3. Análise Granulométrica

As análises de granulometria foram realizadas com base nos procedimentos de rotina do Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal de Viçosa, conforme descrito em Teixeira et al. (2017). Foi utilizado o método da pipeta-peneira, obtendo-se a fração areia, bem como, por sedimentação, a argila. Para tanto, foi feita a dispersão das partículas das

amostras, utilizando solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 0,05 mol/L, conforme Vettori (1969). A fração silte foi obtida por diferença entre duas pipetagens, respectivamente, silte + argila na primeira, e apenas argila na segunda, de acordo com o tempo de sedimentação advindo pela Lei de Stokes, a qual considera a densidade do material em análise (EMBRAPA, 1997). As frações granulométricas foram calculadas segundo equações propostas por Ruiz (2005). Quanto às classes texturais dos rejeitos tecnogênicos, utilizou-se o triângulo textural proposto pela USDA (SOIL SURVEY STAFF, 2011).

2.4. Análises Químicas

A obtenção de pH em solução aquosa ocorreu por meio da relação 1:2,5 solo – solução com eletrodo combinado imerso em suspensão, consoante Donagemma et al. (2011). A acidez potencial (H + Al) foi obtida por meio de extrator acetato de cálcio a pH 7, sendo quantificada por titulometria. Já a quantificação do carbono orgânico do solo ocorreu por intermédio do método de Walkley-Black, conforme realizado por Santos (2019).

Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} trocáveis foram determinados por meio de solução de KCl a 1 mol/L, sendo os dois primeiros quantificados por meio de espectrofotometria de absorção atômica, e o Al^{3+} , por titulação em solução NaOH 0,025 mol/L. O K^{+} e Na^{+} trocáveis foram extraídos em solução HCl 0,05 mol/L, e sua quantificação realizada por fotometria de chama. Utilizou-se o extrator Mehlich 1 para a obtenção de P, Fe, Mn, Zn, Cu e Pb, sendo o primeiro determinado por colorimetria, e os demais, por absorção atômica.

Tendo os resultados das referidas análises, calcularam-se os parâmetros *S* (soma de bases), *CTC* (capacidade de troca de cátions – tanto t efetiva quanto T a pH 7); *V%* (saturação por bases); e *m* (saturação por alumínio). Em seguida, realizou-se a correção da CTC pela argila (CTCr), segundo a seguinte expressão:

$$T(\text{cmolc/kg}) \times 1000 / \text{argila (g/kg)} \quad (1)$$

Os resultados obtidos foram também utilizados para cálculo de médias, necessários para se discutirem os resultados.

2.5. Análises Estatísticas

Foram utilizadas análises de Estatística Descritiva tanto para atributos físicos quanto químicos, obtendo-se as médias aritméticas amostrais por distância em cada profundidade dos 14 pontos de coleta para a produção de gráficos (RONDINELLI et al., 2020).

Além disso, para os resultados químicos, procedeu-se à Análise de Agrupamentos. Para tanto, os pontos coletados foram utilizados como repetições, e antes de obter a matriz de dissimilaridades, os dados foram normalizados para variarem de 0 a 1; então, a matriz de distância de dissimilaridades foi calculada pelo método de Mahalanobis; o dendrograma foi construído utilizando o método de ligação média entre grupos (UPGMA), e o ponto de corte foi determinado pelo método de Mojena, com $k = 1,25$, conforme descrito por Oliveira et al. (2010). Em seguida, procedeu-se a Análises de Componentes Principais (PCA), que é uma técnica de estatística multivariada que objetiva modelar a estrutura da matriz de covariâncias das variáveis de estudo (GOMES et al., 2004). Foram utilizadas 16 variáveis referentes aos resultados obtidos nas análises químicas de rotina em relação aos 14 pontos da área de estudo, no intuito de observar inter-relações entre elas e explicar tais variáveis em termos de suas dimensões inerentes. Os dados foram autoescalados, visto que as variáveis diferem em ordem de grandeza, conforme explicado por Gomes et al. (2004).

Foram escolhidas duas PCA representativas para cada uma das três profundidades (0-

20 cm; 20-40 cm; e 40-60 cm). Todos os procedimentos estatísticos foram realizados por meio do software livre R, em sua ferramenta amigável, Rstudio, bem como do software Excel 2013.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análises das frações granulométricas dos rejeitos tecnogênicos

Os teores médios de areia, silte e argila podem ser observados na Tabela 2. Em geral, nota-se granulometria mais grosseira nas camadas mais superficiais dos primeiros pontos de coleta, diminuindo à medida que se afasta da área de rompimento da barragem.

Os maiores valores de areia grossa foram encontrados em P8 (C1), P9 (A2) e P10 (C3); de areia fina, em P11 (C2 e C3) e P12 (A2); de silte, em P12 (A3) e P13 (B1); e de argila, em P5 (B1), P10 (C3) e P14 (A2).

No P1, o rejeito apresenta textura predominantemente franca a franco-arenosa, com presença de cascalho em A a 40 cm, e em B e C, a 60 cm. No P2, varia de franca, em A, a franco-argilo-arenosa, em B e C. Em A, B e C, houve presença de cascalho a 40 cm. Já no P3, varia de franca a franco-arenosa. Cascalhos foram presentes apenas em C, a partir de 40 cm.

No P4, a textura predominante foi franco-arenosa, mas argilosa nos primeiros 20 cm de B. O P5 apresentou textura ao longo das profundidades de franco-arenosa, franca e franco-argilo-arenosa. Em P6, foi predominantemente franco-arenosa. No P7, majoritariamente franca, com exceção de A3 e B1, cuja classe foi franco-arenosa. O P8 variou de franca, em A1, A2 e B2; franco-arenosa em A3 e B1; e franco-argilo-arenosa em B3, C1, C2 e C3.

A textura no P9 variou de franca, em B1, B2, C1 e C2; a franco-arenosa, em A1, A2, B3 e C3. No P10, de franco-arenosa, em A1, A3, B1, B2; franca, em A2; e franco-argilo-arenosa, em B3, C1, C2 e C3. No P11, variou de areia franca nas partes mais próximas do rio a franco-argilo-arenosa na mais afastada.

Essa propriedade variou, no P12, de franco-arenosa, em A1, B2, B3 e C3; areia-franca, em A2, C1 e C2; franca em B1; e franco-siltosa em A3. No P13, variou de franca, em A1 e A2; franco-argilo-arenosa em A3; franco-argilo-siltosa em B1; e franco-argilosa em C1. No P14, de franco-argilo-arenosa, em A1 e C3; franco-argilosa, em A2, A3 e C2; e franco-argilo-siltosa, em B1, B2, B3 e C1.

Tabela 2: Resultados das análises granulométricas de rotina, sendo PX (área de coleta); A, B e C (transecto, respectivamente, beira de rio, mediano, beira de estrada); 1, 2 e 3 (profundidade de coletas, respectivamente, 0-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm).

<i>Ponto</i>	<i>Distância</i>	<i>Profundidade</i>	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Fina</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>
			(g/kg)			
<i>P1</i>	A	1	75	564	260	101
		2	280	363	265	92
	B	1	41	404	445	110
		2	39	397	449	114
	C	1	273	159	127	441
	<i>P2</i>	A	1	104	366	364
2			117	357	378	148
B		1	225	368	206	200
		2	159	318	333	189
C		1	217	360	212	212
		2	146	357	324	173

... Continua.

<i>Ponto</i>	<i>Distância</i>	<i>Profundidade</i>	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Fina</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>
<i>P3</i>	A	1	131	585	204	80
		2	49	727	146	78
		3	50	580	261	109
	B	1	105	547	245	102
		2	134	537	232	97
		3	75	571	247	106
	C	1	115	415	322	148
		2	159	354	319	168
		3	117	347	410	126
<i>P4</i>	A	1	730	472	295	160
		2	66	364	451	120
		3	49	678	177	96
	B	1	114	312	375	199
		2	207	254	197	342
	C	1	271	235	145	348
<i>P5</i>	A	1	51	406	424	119
		2	38	415	447	100
		3	347	252	237	163
	B	1	282	165	51	<u>502</u>
		2	84	352	363	201
		3	54	373	413	160
	C	1	200	261	265	274
		2	77	406	381	137
		3	45	406	432	118

...Continua.

<i>Ponto</i>	<i>Distância</i>	<i>Profundidade</i>	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Fina</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>
<i>P6</i>	A	1	32	576	262	130
		2	24	583	302	91
		3	43	687	198	72
	B	1	44	377	452	127
		2	46	382	445	127
		3	4	415	416	129
	C	1	39	418	442	101
		2	4	416	419	125
		3	52	400	406	142
<i>P7</i>	A	1	179	249	324	249
		2	48	423	402	128
		3	69	457	363	111
	B	1	110	437	257	196
		2	79	439	331	151
		3	39	415	438	108
	C	1	78	409	358	154
		2	50	395	431	124
		3	107	363	379	150
<i>P8</i>	A	1	39	431	408	122
		2	42	401	447	111
		3	55	509	329	107
	B	1	47	488	348	117
		2	084	330	411	174
		3	237	324	239	201
	C	1	<u>422</u>	167	164	247
		2	307	231	212	250
		3	230	260	263	246

...Continua.

<i>Ponto</i>	<i>Distância</i>	<i>Profundidade</i>	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Fina</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>
<i>P9</i>	A	1	327	452	126	095
		2	<u>429</u>	310	112	148
	B	1	45	400	436	119
		2	67	420	357	155
		3	128	598	113	162
	C	1	38	409	446	108
		2	51	413	393	143
		3	46	576	232	145
	<i>P10</i>	A	1	67	459	360
2			23	488	369	120
3			13	520	349	118
B		1	69	591	176	164
		2	199	273	146	382
		3	125	470	142	263
C		1	167	410	151	273
		2	344	221	79	356
		3	<u>403</u>	133	55	<u>408</u>
<i>P11</i>	A	1	81	792	57	70
		2	64	776	87	73
	B	1	139	710	72	79
		2	71	<u>638</u>	180	111
		3	192	<u>640</u>	91	77
	C	1	213	330	163	293
		2	231	324	151	295

...Continua.

<i>Ponto</i>	<i>Distância</i>	<i>Profundidade</i>	<i>Areia Grossa</i>	<i>Areia Fina</i>	<i>Silte</i>	<i>Argila</i>
<i>P12</i>	A	1	22	565	272	141
		2	21	<u>764</u>	144	71
		3	28	205	<u>625</u>	142
	B	1	108	320	446	126
		2	202	407	218	173
		3	313	489	83	114
	C	1	361	498	62	78
		2	341	521	64	73
		3	193	613	81	113
<i>P13</i>	A	1	15	458	277	250
		2	6	341	345	308
		3	7	246	425	323
	B	1	7	174	<u>458</u>	361
	C	3	3	152	460	385
	<i>P14</i>	A	1	6	156	471
2			4	130	474	<u>392</u>
3			231	165	291	313
B		1	153	308	269	269
		2	176	181	387	255
		3	138	181	424	256
C		1	353	222	200	224
		2	26	120	510	344
		3	257	159	305	279

Conforme ocorre tal afastamento da área fonte (Fundão), nota-se aumento nos teores de partículas finas como a argila em alguns pontos, como de P1 para P2, P3 para P4, P6 para P7, P9 para P10 e P12 para P13 (Figura 2), o que pode sugerir processo específico de transporte de frações mais finas nessas áreas em decorrência da maior facilidade de transporte desses materiais. Já em P14, embora haja diminuição quanto ao anterior, nota-se grande quantidade de argila, o que pode ter ocorrido em decorrência de terem extravasado materiais mais finos da barragem de Risoleta Neves na data do evento (SCHAEFER et. al., 2016). Porém, não foi possível perceber tendência entre todos os pontos, havendo bastantes flutuações ao longo da extensão.

Assim sendo, nota-se que a textura varia ao longo dos pontos, mas predominam as classes média-siltosa a média arenosa em todas as profundidades, havendo alguns pontos bastante distoantes, o que ocorre devido a uma confluência de fatores, tais como a declividade de cada área, os meandros dos cursos dos rios, bem como maior propensão de enchentes sazonais dos rios nos locais de menor altitude, como abordado no capítulo anterior. Zanchi (2019) obteve resultados semelhantes quanto à predominância de textura média-siltosa dos sedimentos tecnogênicos, ao também avaliar Tecnoossolos de áreas adjacentes em terraços fluviais do rio Doce.

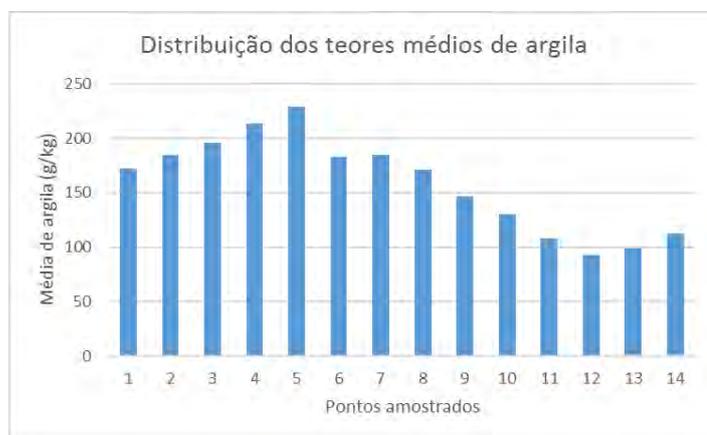


Figura 2: distribuição dos teores médios de argila, em g/kg, ao longo dos pontos de coleta da área de estudo.

3.2 Análises estatísticas sobre atributos químicos dos rejeitos tecnogênicos

Na Tabela 3, são apresentados os resultados obtidos por meio das análises químicas de rotina. As referentes médias de cada variável são ilustradas nos gráficos de colunas (Figuras 3 a 18). Os mesmos dados foram utilizados para a produção das Análises de Agrupamentos (Figura 19) e das Análises de Componentes Principais (PCA) (Figuras 20 a 22).

Tabela 3: Resultados das análises químicas de rotina dos rejeitos tecnogênicos da área de estudo.

<i>Ponto</i>	<i>Dist.</i>	<i>Prof.</i>	<i>pH</i> <i>H2O</i>	<i>Ca2+</i>	<i>Mg2+</i>	<i>K</i>	<i>H + Al</i>	<i>MO</i>	<i>P</i>	<i>P-Rem</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Cd</i>	<i>Pb</i>
				Cmol/dm ³	mg/dm ³	Cmol/dm ³	dag/Kg	mg/dm ³	mg/L	mg/dm ³								
<i>P1</i>	A	1	6,76	0,76	0,19	50	0,8	0,4	2,2	29,6	304,6	3,08	1,63	1,11	675,2	0	0	0
		2	7,01	0,72	0,18	48	0,8	0,13	2,1	32	177	2,13	1,07	0,36	407	0	0	0
	B	1	6,87	1,06	0,06	12	0,6	0,4	3,5	35,5	174,7	0,92	1,05	0,03	107,8	0	0,1	0
		2	7,24	0,95	0	4	0,2	0,27	4,5	33	140,2	0,63	1,26	0	76,1	0	0,2	0,07
	C	1	5,14	0,43	0,1	58	5,5	2,69	0,6	16,6	407,9	1,02	0,88	0	17,6	0	0,11	1,22
	<i>P2</i>	A	1	7,37	1,74	0,53	20	0	0,27	3,7	29	170,3	1,11	1,04	0,34	146,2	0	0
2			7,49	1,77	0,43	12	0	0,4	4,3	31,1	171,7	1,19	1,35	0,13	116,7	0	0,1	0,31
B		1	5,72	0,79	0,13	38	1,9	0,94	0,6	21,6	214,4	1,45	1,02	0,18	86,2	0	0	1,23
		2	5,95	1,15	0,23	36	1,6	0,94	2	27,5	233,2	1,07	0,8	0,08	96,8	0	0,02	1,57
C		1	5,82	0,94	0,16	10	1,4	0,67	0,4	25,7	156,1	1,07	0,79	0	59	0	0,03	1,26
		2	6,93	1,43	0,13	34	1,4	0,54	2,9	33,2	232,7	1,26	2,1	0,22	132,1	0,07	0,19	0
<i>P3</i>	A	1	6,36	1,49	0,23	18	1	0,81	2,1	39,9	65,2	0,89	1,91	0,78	168,6	0,07	0,51	0,02
		2	6,54	0,55	0,14	10	0,5	0,27	0,4	40,5	66,4	0,66	1,11	0,61	91,4	0	0,52	0,19
		3	5,52	0,48	0,1	12	1,8	0,54	0,5	33,3	116,1	1,07	1	1,02	141,5	0	0,35	0,17
	B	1	6,55	1,33	0,24	26	0,8	0,4	1	28,4	166,4	1,17	1,55	1,25	221	0,07	0,5	0,16
		2	6,16	0,66	0,2	20	0,8	0,4	0,8	27,2	109,6	0,98	1,31	0,86	142,1	0	0,53	0
		3	5,6	0,48	0,13	14	1,1	0,13	0,3	28,9	89,4	0,94	1,31	1,1	124,9	0	0,5	0
	C	1	6,12	1,86	0,33	28	1,3	1,07	2,8	28,2	155,3	1,1	1,69	1,11	254,5	0,18	0,47	0,43
		2	5,81	1,3	0,25	34	1,3	0,81	2	30,6	95,2	0,85	2,01	1,07	145,9	0,19	0,33	1,7
		3	6,03	0,7	0,06	6	0,6	0,27	3,4	30,7	92,1	0,73	1,17	0,8	94,5	0,24	0,28	1,75

...Continua.

Ponto	Dist.	Prof.	pH H2O	Ca2+	Mg2+	K	H + Al	MO	P	P-Rem	Fe	Cu	Zn	Ni	Mn	Cr	Cd	Pb	
				Cmol./dm ³	Cmol./dm ³	mg/dm ³	Cmol./dm ³	dag/Kg	mg/dm ³	mg/L	mg/dm ³								
P4	A	1	6,24	1,35	0,11	28	1	0,67	4,1	31,1	124,1	0,85	1,16	0,22	98,4	0,02	0,36	0	
		2	6,33	0,74	0,1	32	1	0,27	3,1	33,3	131,8	0,84	1,38	0,25	98,7	0,06	0,4	0,18	
		3	6,22	0,75	0,09	40	1	0,54	0,6	41,6	107,4	0,78	1,38	0,24	118,6	0	0,31	0	
	B	1	6,02	1,58	0,15	22	1,3	1,07	5,1	33,2	112,8	0,85	1,62	0,23	112,9	0,05	0,31	0,67	
		2	5,15	1,09	0,08	32	2,1	0,94	1	23,9	55,2	0,49	1,69	0,01	47	0	0,41	1,35	
	C	1	5,07	1,53	0,04	6	2,1	0,94	1,5	24,7	32	0,31	0,93	0,9	26,1	0,15	0,45	1,93	
	P5	A	1	7,6	1,29	0,06	8	0	0,13	8,5	34,8	92,7	0,62	0,77	0,31	91,9	0,08	0,13	0
			2	7,6	1,3	0,03	6	0	0,13	7,9	35,1	97,4	0,65	1,32	1,06	84,7	0,17	0,1	0
			3	6,61	1,58	0,32	4	1	0,67	2	36	221,3	1,65	2,22	0,3	76,3	0,11	0,13	1,05
B		1	4,94	0,86	0,2	4	3,5	1,34	0,6	16,2	56,1	0,76	0,42	0,07	8,3	0,04	0,18	0	
		2	6,3	1,16	0,06	0	0,6	0,27	5,3	28,1	82,8	0,65	0,97	0,17	86,7	0,21	0,12	0,07	
		3	6,97	1,24	0,01	0	0	0,27	6,8	31,1	73,5	0,62	0,93	0,31	92	0,16	0,26	0,01	
C		1	6,65	2,02	0,56	273	0,6	1,34	1,1	22,8	128,2	1,85	0,96	0,23	63,8	0,06	0,23	2,2	
		2	6,22	0,83	0,19	84	0,6	0,13	2,4	31,1	126,2	1,34	1,13	0,17	81	0	0,29	0,59	
		3	6,81	0,93	0,06	40	0	0,13	5,9	31,8	103	0,81	2,26	0,36	100	0,07	0,32	0,55	
P6	A	1	6,45	1,49	0,51	88	1,1	0,81	3	35,6	476,5	1,67	1,57	0,31	230,5	0,06	0,21	0	
		2	6,53	1,4	0,44	30	0,5	0,4	3,5	36,3	323,7	1,29	1,4	0,31	230,3	0,06	0,2	0	
		3	6,41	1,09	0,32	22	0,6	0,54	3,5	45,3	161,3	0,92	0,79	0,12	157,3	0	0,1	0	
	B	1	5,96	0,56	0,13	64	1,4	0,4	11	45,2	69,5	0,65	1,12	0,69	104,2	0	0,25	0,29	
		2	6,66	0,74	0,08	30	0,5	0,13	6,3	40,4	88,5	0,61	0,75	0,26	84,3	0,03	0,23	0	
		3	7,08	1,18	0,01	18	0	0,13	5,5	36,7	111,1	0,62	2,29	0	97,3	0,02	0,19	0	
	C	1	7	0,59	0,1	112	0,3	0,27	5,8	40,1	113	0,62	0,74	0	102	0,03	0,05	0,31	
		2	7,1	0,84	0,03	66	0	0,13	6,4	33,1	96,3	0,63	0,82	0	98,2	0,04	0,26	0	
		3	7,01	1,68	0,07	32	0,3	0,27	5,2	33,6	278,3	0,91	1,02	0,38	133,2	0,02	0,24	0,06	

...Continua.

Ponto	Dist.	Prof.	pH H2O	Ca2+	Mg2+	K	H + Al	MO	P	P-Rem	Fe	Cu	Zn	Ni	Mn	Cr	Cd	Pb
				Cmol./dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	dag/Kg	mg/dm ³	mg/L	mg/dm ³								
P7	A	1	6,1	1,22	0,59	16	1	0,81	2,5	29,3	106,6	1,41	1,3	0,69	58,7	0,01	0,27	1,42
		2	7	1	0,03	0	0	0,27	7	35,9	80	0,59	1,49	1,1	76,9	0,36	0,36	1,13
		3	7,23	1,62	0,01	8	0	0,13	7,9	36	114,6	0,86	1,81	0,92	87,2	0,45	0,55	0,88
	B	1	6,38	1,04	0,47	293	1,6	1,21	2,3	28,7	426,2	2,35	1,84	1,45	115,6	0,47	0,64	1,45
		2	6,38	0,8	0,21	118	1	0,27	3,6	34,2	177	1,56	1,6	1,28	99,2	0,45	0,62	1,76
		3	6,66	0,84	0,13	22	0,2	0,27	7,1	36,2	174,4	0,98	1,39	1,13	91,7	0,48	0,5	0,5
	C	1	6,65	0,95	0,36	158	0,3	0,67	4,9	38,3	154	1,47	0,92	1	79	0,4	0,33	2,03
		2	7,26	1,21	0,09	106	0,8	0,4	10	29,9	125,5	1,01	2,08	1,67	88,7	0,56	0,55	1,41
		3	7,26	3,08	0,97	452	0,2	0,94	92,1	33,6	392,9	2,93	7,77	1,58	143,2	0,51	0,62	1,71
P8	A	1	6,75	0,88	0,15	4	0,3	0,27	6,4	33,4	136,9	0,97	1,01	1,03	100,7	0,34	0,39	1,54
		2	7,01	0,88	0,02	0	0	0,27	7,2	27,6	87,8	0,68	0,62	0,98	82,9	0,36	0,4	1,58
		3	7,03	1,84	0,05	12	0,2	0,27	6,3	31,1	313,9	1,42	2,41	1,38	104,1	0,53	0,6	0,77
	B	1	6,88	0,76	0,04	2	0,2	0,13	6,9	31,8	88	0,66	1,01	0,95	75,3	0,37	0,56	1,82
		2	6,22	2,03	0,33	6	1,9	1,21	4,9	29,6	521,8	2,71	3,32	2,18	102,1	0,53	0,58	0,45
		3	5,71	1,3	0,27	4	2,9	1,34	2,6	28,6	516	3,3	3,64	2,14	91,5	0,5	0,61	1,35
	C	1	5,15	0,99	0,4	12	2,7	1,75	1	31,4	169,3	2,37	3,38	1,31	62,2	0,17	0,57	2,21
		2	5,13	1,02	0,21	10	2,9	1,34	0,7	22,3	160,9	2,65	2,74	1,6	58,4	0,23	0,61	2,44
		3	5,25	1,51	0,25	8	2,3	1,07	0,8	24,5	158,2	2,89	3,17	2,05	77,9	0,32	0,55	1,36
P9	A	1	7,49	1,34	0,26	37	0,6	0,13	3,8	45,3	315	1,48	1,52	0,77	113,3	0,66	0	0,68
		2	6,9	0,93	0,29	29	0,8	0,27	0,7	31,7	139	1,77	1	0,74	61,3	0,58	0,07	1,76
	B	1	7,07	0,49	0,1	11	0,8	0,13	3,3	41,5	64,8	0,7	0,52	0,56	70,6	0,51	0,18	0,62
		2	7,51	3,25	0,44	22	1,4	0,4	3	37,8	273,2	2,71	2,07	1,76	153,4	0,89	0,17	1,45
		3	6,95	1,94	0,57	21	1,1	0,13	3,3	41,8	198,7	2,64	1,27	1,68	94,9	0,71	0,06	1,03
	C	1	7,48	0,79	0,06	7	0,6	0,13	5,8	39,3	86,8	0,76	0,25	0,41	70,3	0,63	0,02	0,56
		2	7,19	1,66	0,08	9	0,5	0,13	4,8	38,8	173,5	1,28	0,92	0,72	95,5	0,73	0,19	0,61
		3	6,84	1,84	0,5	19	0,5	0,4	2,5	39,2	226	2,88	1,83	1,68	81,2	0,73	0,12	0,78

...Continua.

<i>Ponto</i>	<i>Dist.</i>	<i>Prof.</i>	<i>pH H2O</i>	<i>Ca2+</i> Cmol./dm ³	<i>Mg2+</i> Cmol./dm ³	<i>K</i> mg/dm ³	<i>H + Al</i> Cmol./dm ³	<i>MO</i> dag/Kg	<i>P</i> mg/dm ³	<i>P-Rem</i> mg/L	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i> mg/dm ³	<i>Cr</i>	<i>Cd</i>	<i>Pb</i>	
P10	A	1	6,18	0,76	0,19	27	1,1	0,67	2,8	44,3	123,2	1,05	0,78	0,66	88,3	0,69	0,19	0,67	
		2	6,43	0,64	0,02	9	0,5	0,13	4	39,3	165	0,84	0,53	0,51	65,9	0,75	0,16	0,84	
		3	6,74	0,66	0	5	0,5	0	4,9	43,6	171,2	0,71	2,55	0,5	58,3	0,73	0,15	0,61	
	B	1	6,23	1,77	0,95	23	2,6	1,73	5,3	38,4	430,9	3,69	4,41	2,35	100,7	0,79	0,22	0,91	
		2	6,02	2,99	0,82	15	4,5	2,13	1,2	27,5	157	4,15	2,31	2,73	104,6	0,75	0,18	0,93	
		3	5,8	1,81	0,55	13	3,5	1,33	1,1	32,4	130	4,1	2,24	2,82	90,8	0,69	0,16	1,07	
	C	1	6,17	2,52	1,17	23	2,6	1,86	2,7	34,1	220,2	4,06	3,15	2,05	89,9	0,76	0,2	0,93	
		2	5,95	1,31	0,57	19	2,9	1,2	1,1	31,3	61,3	3,09	0,99	1,13	53,3	0,59	0,17	1,11	
		3	6,68	0,84	0,34	13	3,4	1,46	0,9	25,7	32,3	2,89	0,97	0,86	41,6	0,49	0,25	1,51	
P11	A	1	6,07	0,7	0,19	23	0,8	0,13	12	46,4	325,2	1,57	1,88	0,87	68,4	0,73	0,24	0,86	
		2	6,09	0,78	0,14	25	0,8	0,13	9,5	45,8	335,5	1,6	2,11	0,75	80,6	0,75	0,16	0,78	
	B	1	6,12	0,96	0,22	73	1,1	0,53	8,1	46,9	363,4	2,15	2	1,28	107	0,74	0,21	1,17	
		2	5,72	1,25	0,28	41	1,8	1,06	8,5	44,7	524,8	2,54	3,07	1,52	130,3	0,8	0,21	0,54	
		3	5,72	0,91	0,14	31	1,1	0,53	11,5	43,6	352,2	2,09	1,88	1,73	83,5	0,96	0,18	1	
	C	1	7,08	3,41	2,29	835	1,3	2,53	33,2	43,3	139,2	3,98	9	1,57	178,7	0,84	0,27	1,29	
		2	6,9	2,22	1,82	805	0,6	1,2	14,5	34,7	206,5	4,67	6,6	2,06	186,6	1,02	0,26	1,04	
	P12	A	1	6,37	3,49	1,16	21	1,8	2	8,2	19,5	1074,8	8,09	6,66	3,03	394,8	1,81	0,29	1,25
			2	6,25	3,29	1,13	25	2,3	2,39	9,3	15,1	1761,3	9,24	9,37	3,11	669,3	1,75	0,35	0,5
3			6,26	2,72	1,09	49	2,3	2,66	9,4	17,3	2180,1	10,08	11,61	3,6	872,4	2,26	0,32	0,93	
B		1	6,17	3,86	1,28	39	2,3	3,19	8,2	14,1	1406,7	9,49	7,59	2,86	312,1	1,61	0,34	1,34	
		2	6,37	3,99	1,1	69	2,3	2,79	8,5	11,7	1700,1	9,68	10,94	2,77	566,1	1,9	0,35	0,88	
		3	6,4	4,05	1,19	47	2,3	2,53	9,5	10,9	1431,9	9,74	10,18	3,05	545,4	1,91	0,33	1,4	
C		1	6,25	4,57	1,39	43	1,8	3,06	9,1	14,6	2104,2	9,97	10,22	4,55	590,4	2,66	0,33	1,01	
		2	6,41	2,63	1,02	57	1,3	1,46	8,5	16,8	1062,9	5,34	3,96	1,88	253,6	1,3	0,32	0,88	
		3	6,71	2,56	1,38	63	1	0,4	7,5	19,9	346,3	2,5	1,61	0,88	133,1	0,92	0,25	1	

...Continua.

Ponto	Dist.	Prof.	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K	H + Al	MO	P	P-Rem	Fe	Cu	Zn	Ni	Mn	Cr	Cd	Pb
				Cmol/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	Cmol/dm ³	dag/Kg	mg/dm ³	mg/L	mg/dm ³							
P13	A	1	6,54	3,36	1,16	83	2,3	1,73	9,9	19,3	1453,8	8,41	6,78	2,98	684,9	2,04	0,25	0,91
		2	6,35	2,35	0,93	67	2,3	1,46	10	21,1	2717,4	8,49	9,33	2,8	753,6	2,43	0,34	1,19
		3	6,51	2	0,69	69	1,4	0,93	9,9	24,8	1485,9	5,77	5,18	2,22	730,5	1,47	0,37	1,01
	B	1	6,19	3,63	1	57	1,6	2,13	7,2	24,4	958,3	5,67	4,86	1,81	228	1,48	0,3	1,45
	C	3	6,45	3,48	1,07	250	1,3	0,67	20,8	36,3	458,9	3,76	2,75	1,54	239,9	1,11	0,26	0,74
	P14	A	1	6,23	1,75	0,55	45	0,3	0,93	10,1	33,8	994,4	4,28	4,01	1,78	210,4	1,19	0,28
2			6,49	0,57	0,14	17	0,3	0,13	9,1	53,1	309,7	1,49	1,08	0,74	52,9	0,69	0,28	1,26
3			6,52	1,05	0,2	15	0,5	0,13	7,4	29,5	243	1,52	0,89	0,81	74,8	0,84	0,23	1,2
B		1	5,8	1,27	0,16	19	1,6	0,67	7,1	41,2	316,4	2,42	1,97	1,29	80,9	0,84	0,23	1,26
		2	6,02	2,4	0,43	15	1,6	0,67	8	35,1	351,8	4,11	2,97	1,62	77,3	1,02	0,34	1,19
		3	5,74	1,53	0,19	11	1	0,4	16,1	39,2	244,4	3,04	2,32	1,74	47	0,78	0,28	0,9
C		1	6,1	1,41	0,63	35	1,4	0,53	21	54,4	188,2	1,77	3,86	1,11	82,3	0,72	0,25	0,36
		2	6,51	1,2	0,37	47	1,1	0,27	31,9	49,4	136,1	2,36	1,56	1,22	53,8	0,86	0,28	0,82
		3	6,48	1,33	0,39	43	1	0,27	16,6	45,2	250,7	2,19	2,3	1,46	71	0,9	0,28	0,7

Sobre o pH em água, os valores variaram bastante ao longo de todos os pontos da área de estudo (Figura 22). De modo geral, observa-se que os rejeitos mais superficiais apresentam-se fracamente ácidos, ao passo que, na de 40-60 cm, ocorre ligeiro aumento da acidez, o que pode ser explicado pelos manejos de recuperação, como aplicação de calagem nas camadas mais superficiais, enquanto a mais profunda apresenta maior influência do solo original. Notam-se valores com pequenas variações em todos os pontos e profundidades, sendo em média acidez fraca (6,42). Em alguns pontos, a acidez diminui em profundidade, como em P6, P7 e P8, o que pode ter ocorrido devido à lixiviação de bases das camadas mais superficiais. Logo após o desastre, o pH desses rejeitos já se encontrava mais elevado devido ao uso de NaOH como dispersante de partículas no processo de flotação do minério (SCHAEFER et al., 2015); porém, com o passar do tempo, a elevação do pH passou a ser determinada pelos mencionados manejos de recuperação (SANTOS, 2019).

O ponto P9 apresenta maior alcalinidade em relação aos demais, tanto na camada superficial quanto na mediana, enquanto há diminuição na mais profunda, o que sugere maior influência do material de origem anterior neste, e, naqueles, maior influência dos rejeitos tecnogênicos, consoante Schaefer (2015) que, ao analisar o pH de solos adjacentes não afetados pelos rejeitos (Cambissolos háplicos e Neossolos flúvicos), obteve resultados de maior acidez.

O P4 apresentou, na camada superficial e mediana, pH ligeiramente ácido, com ligeiro aumento na camada mais profunda, ao passo que o P3 teve o menor pH na profundidade de 40-60 cm, de 5,71, muito provavelmente por influência do solo pré-existente, enquanto na camada mais superficial desse ponto, o pH é maior, dado que se trata da maior influência dos rejeitos tecnogênicos.

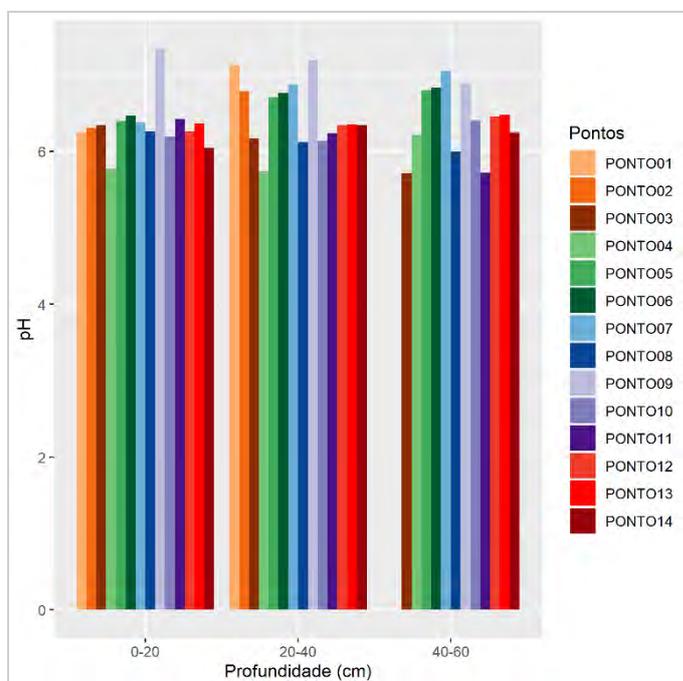


Figura 22: Gráfico de colunas da média de pH em água (H₂O) por profundidade (cm) na área de estudos.

A influência do cálcio (Ca²⁺) adsorvido à superfície dos coloides do rejeito (Figura 23) é maior na camada mais superficial do ponto P12, embora constata-se que ocorra uma

diminuição proporcional à medida que se passa para as maiores profundidades. Tendência semelhante foi encontrada com o magnésio (Figura 24), conquanto com leve aumento na última profundidade. Isso pode ser explicado pelas intervenções antrópicas nesses locais para recuperação das áreas, como pela aplicação de corretivos (calagem) após o desastre, que foi implementado pela empresa em todas as áreas a jusante da barragem de Risoleta Neves e, em algumas, reforçado pelos proprietários.

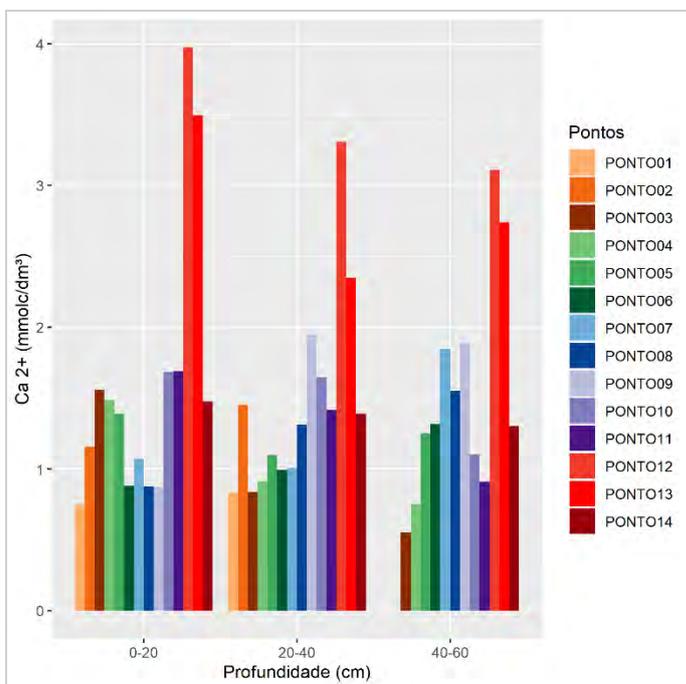


Figura 23: Gráfico de colunas da concentração média de cálcio (mmolc/dm³) por profundidade (cm) na área de estudos.

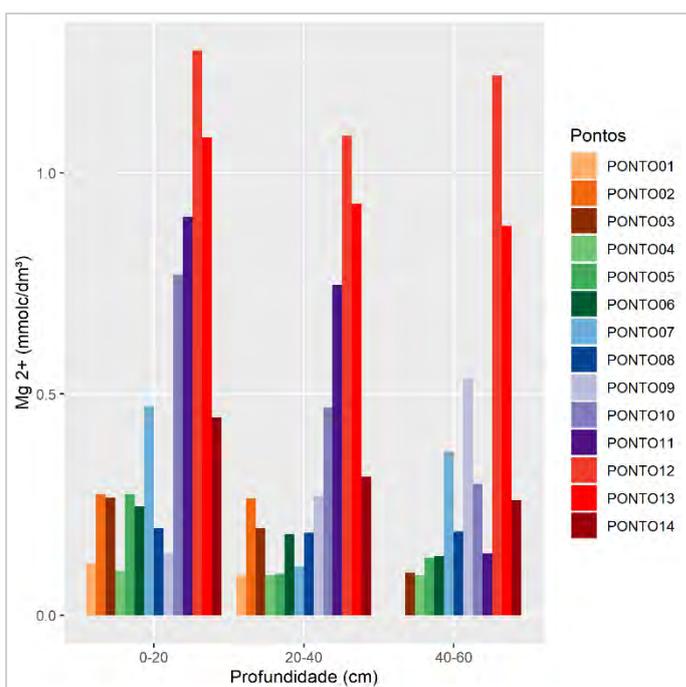


Figura 24: Gráfico de colunas da concentração média de magnésio (mmolc/dm³) por profundidade (cm) na área de estudos.

O potássio (K^+) adsorvido apresentou, por outro lado, maiores valores no P11, especificamente nas camadas superficial e mediana, não sendo expressiva na maior profundidade, inferindo que possivelmente a camada de rejeito tecnogênico esteja mais presente até os primeiros 40 cm (Figura 25). Tais valores podem ser justificados pelos fertilizantes potássicos e calagem empregados pela empresa e pelo proprietário do local para a recuperação da área, bem como pela alta incidência de esterco bovino. Nota-se que, dentre todas as profundidades, com relação à soma de bases, o ponto 11 também apresentou maiores valores, o que pode ser explicado pela maior influência do potássio, presente em grandes quantidades nesse local.

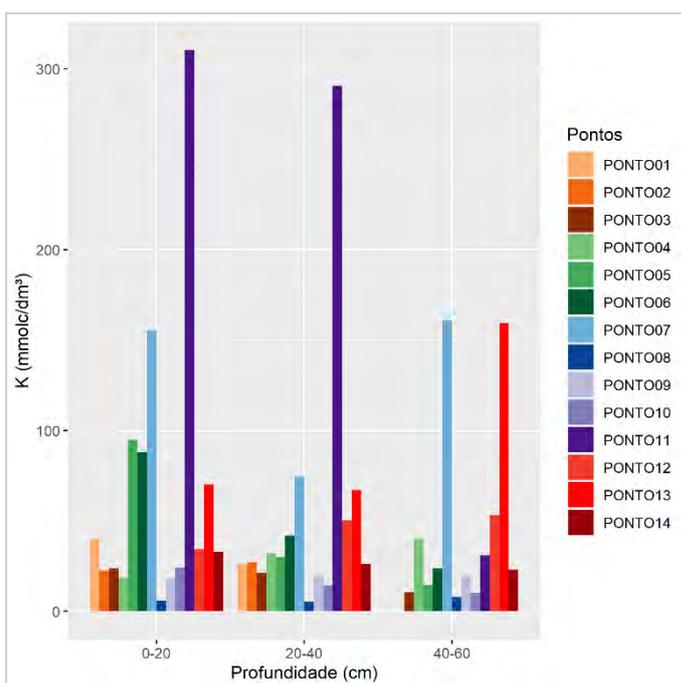


Figura 25: Gráfico de colunas da concentração média de potássio (mmolc/dm^3) por profundidade (cm) na área de estudos.

A acidez potencial ($H + Al$) (Figura 26) apresentou valores mais elevados no ponto 10. Embora na profundidade de 20-40 cm, neste ponto, o valor dessa variável possa ser considerado médio ($2,51 - 5,0 \text{ cmolc/dm}^3$), nas demais profundidades, bem como em todos os outros dos demais pontos, pode-se reconhecer como baixa tal concentração ($1,01 - 2,5 \text{ cmolc/dm}^3$), conforme interpretação estipulada por Ribeiro (1999).

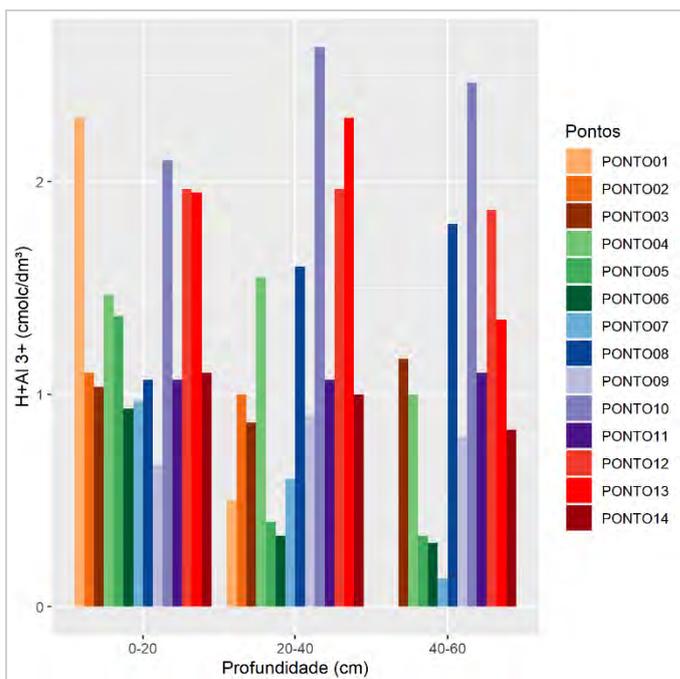


Figura 26: Gráfico de colunas da concentração média de acidez potencial (mmolc/dm³) por profundidade (cm) na área de estudos.

Quanto à matéria orgânica do solo (Figura 27), em praticamente todos os pontos, as maiores concentrações encontram-se na primeira profundidade (0-20 cm), o que se relaciona à camada mais afetada pelas intervenções antrópicas implementadas para a recuperação das áreas, como uso de *topsoil*, desenvolvimento da vegetação para reflorestamento, uso de adubos orgânicos, tais como esterco bovino, dentre outras.

As maiores concentrações desse atributo foram observadas nos pontos 10, 11, 12 e 13, o que pode ser explicado, além das práticas já mencionadas, pela vegetação mais desenvolvida em tais áreas, passando por processo de regeneração natural e, com o passar do tempo, aportando mais materiais orgânicos sobre os Tecossolos. Estudos realizados por Villa et al. (2021), ao analisarem a fertilidade de Tecossolos em áreas adjacentes em função da composição da comunidade de plantas, observando maior aporte de serrapilheira com a maior idade do povoamento, corroboram tais resultados. Similarmente, Campanharo et al. (2021), ao pesquisarem a composição funcional de espécies arbóreas em estágio de regeneração em áreas adjacentes, observaram relação direta com o aumento do aporte de matéria orgânica e fertilidade dos Tecossolos.

No P14, houve diminuição desse atributo, o que pode ser explicado por se localizar em área posterior à barragem de Risoleta Neves, onde houve poucas intervenções de recuperação. Entretanto, os valores encontrados podem ser interpretados como muito baixos (0,1-0,4 dag/Kg) para todos os pontos em todas as profundidades (RIBEIRO,1999).

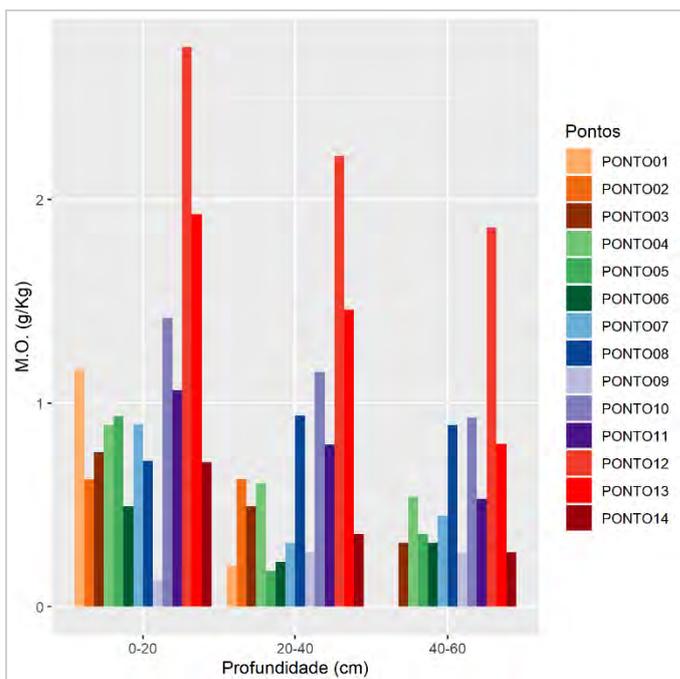


Figura 27: Gráfico de colunas da concentração média de Matéria Orgânica (g/Kg) por profundidade (cm) na área de estudos.

Em relação ao fósforo disponível (P), é possível reconhecer o maior valor no P7, à profundidade de 40-60 cm, ao passo que, nas camadas mediana e superficial deste ponto, os valores são bem menores (Figura 28). O P1, por outro lado, é aquele que apresenta os menores valores dessa variável, sendo, inclusive, inexpressiva na maior profundidade. Isso pode ser explicado pelo teor de argilas oxídicas existente nesses locais, visto que há relação direta entre o teor dessas argilas e a retenção do fósforo, processo esse denominado adsorção permanente. Esses resultados são corroborados pelo estudo de Souza et al. (2015).

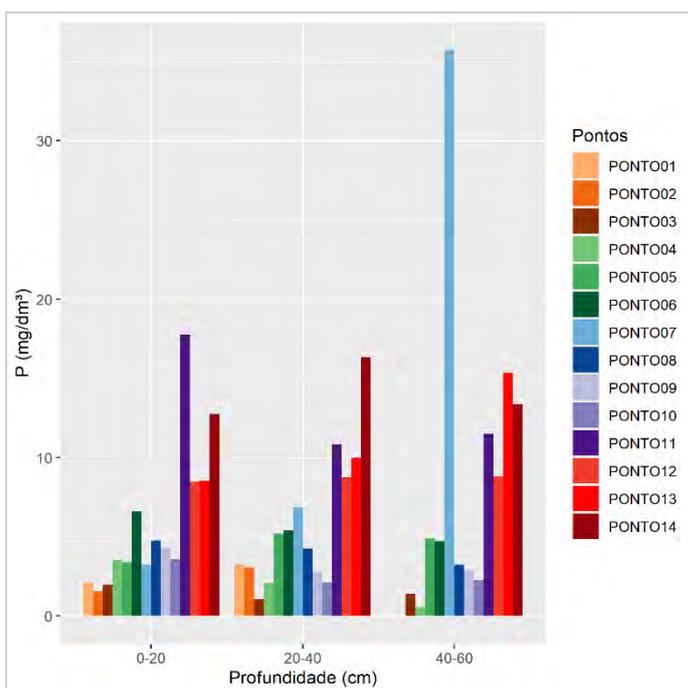


Figura 28: Gráfico de colunas da concentração média de fósforo (mg/dm³) por profundidade

(cm) na área de estudos.

O fósforo remanescente (P_Rem) (Figura 29), segundo Silva et al. (2006), diz respeito à capacidade tampão para manter certa quantidade desse elemento que, após ser adicionado ao solo, permanecerá na solução de equilíbrio. Como há relação direta entre a maior adsorção do fósforo com o maior teor de argilas oxídicas, nota-se que a maior disponibilidade desse elemento essencial para as plantas encontra-se, respectivamente, no P11, P14 e P9, dado que têm menor capacidade de retenção, ao passo que a menor disponibilidade e, conseqüentemente, maior retenção desse macronutriente encontra-se nos pontos 12 e 13.

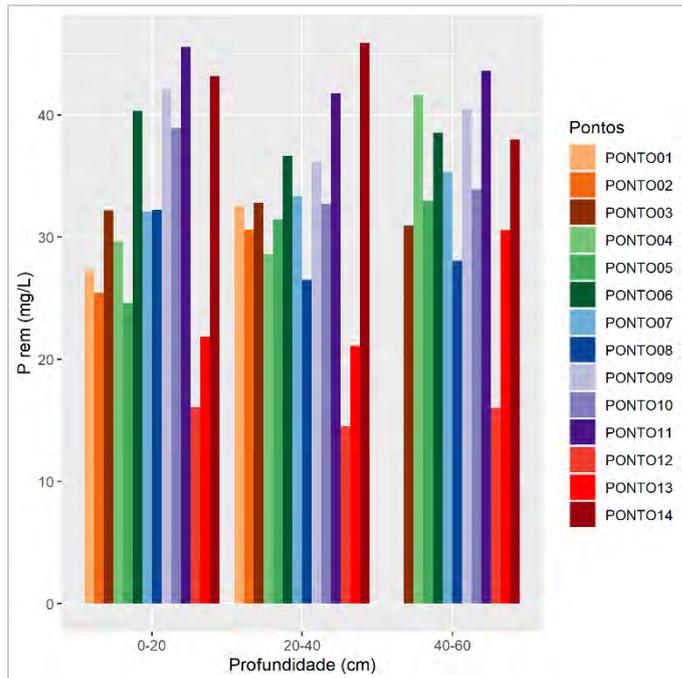


Figura 29: Gráfico de colunas da concentração média de fósforo remanescente (mg/L) por profundidade (cm) na área de estudos.

Quanto ao teor de ferro disponível (Figura 30), notam-se valores baixos na maioria dos pontos, com exceção dos mais distantes da área do rompimento da barragem, que têm os maiores valores na camada mais superficial (P10, P11, P12 e P13), provavelmente em função de tratar-se de locais onde ocorrem alagamentos sazonais. No entanto, o valor médio de 356 mg/dm^3 está próximo da média encontrada por Santos (2019) em rejeitos na mesma região, que foi de 308 mg/dm^3 . Segundo Schafer et al. (2015), em solos de referência da região (Neossolos Flúvicos e Cambissolos Háplicos), os teores médios de ferro disponível chegam a ser superiores a 600 mg/dm^3 , o qual explicou tal valor pela natureza do material de origem ser de rochas hematítico-itabiríticas do Quadrilátero Ferrífero ricas em ferro. Embora haja registros da proporção entre a maior concentração de ferro com a maior dificuldade de recuperação das áreas atingidas (SOUZA et al., 2015), foi verificado o oposto nas áreas de estudo, sendo as que apresentam maiores teores de ferro as mais vegetadas, talvez pela regeneração natural ocorrer com maior eficiência nesses pontos.

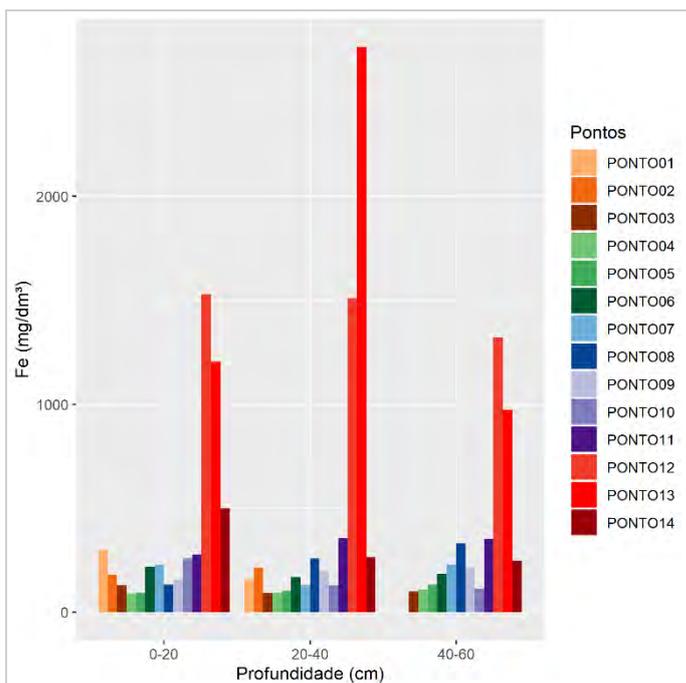


Figura 30: Gráfico de colunas da concentração média de ferro (mg/dm^3) por profundidade (cm) na área de estudos.

Os micronutrientes cobre, zinco e níquel apresentaram tendências semelhantes nos valores dos pontos da área de estudo, havendo aumento à medida que o local de coleta se afasta de onde ocorreu o rompimento da barragem, sendo maiores em P12 e P13, ao passo que as áreas iniciais tiveram os menores valores (Figuras X, Y e Z). O diagnóstico a respeito desses elementos é primordial pelo fato de serem muito móveis no perfil do solo, podendo ser facilmente lixiviados, contaminando, assim, o lençol freático (SOUZA et al., 2015). Quanto ao manganês, as baixas concentrações na maior parte dos pontos de estudo podem ser explicadas pelo pH pouco ácido encontrado na área de estudo (Figura 34), o que aumenta o potencial eletroquímico dos Tecnoossolos e, somado ao maior aporte de matéria orgânica com o passar do tempo, proporciona melhoria na drenagem, facilitando a lixiviação desse micronutriente (MOREIRA et al., 2006). Os valores médios encontrados (158 mg/dm^3) para esses metais foram pouco maiores que os obtidos em 2018 em áreas próximas também afetadas pelos rejeitos tecnogênicos (101 mg/dm^3), estando dentro da faixa permitida pelos instrumentos legais de referência já citados (SANTOS, 2019).

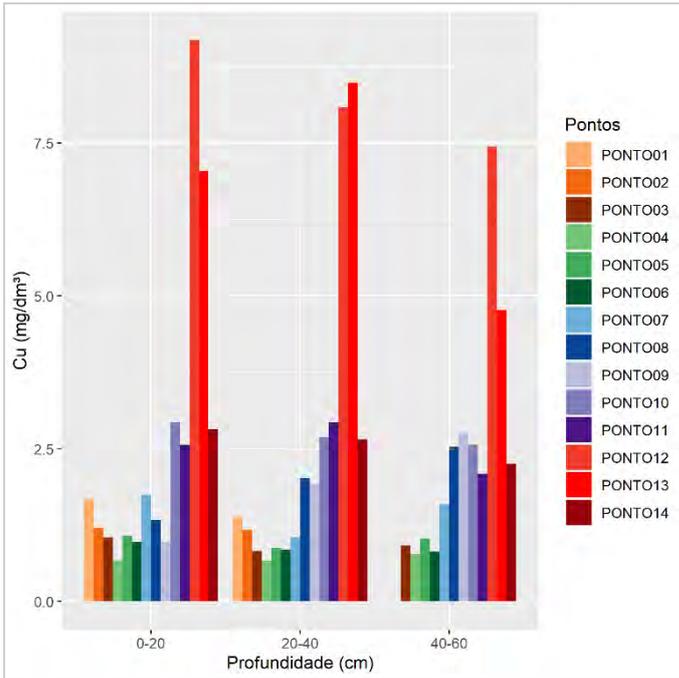


Figura 31: Gráfico de colunas da concentração média de cobre (mg/dm^3) por profundidade (cm) na área de estudos.

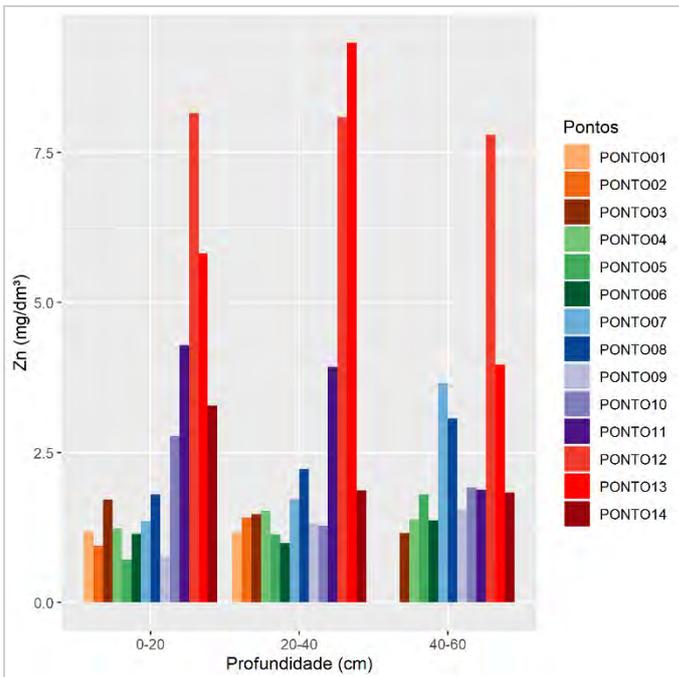


Figura 32: Gráfico de colunas da concentração média de zinco (mg/dm^3) por profundidade (cm) na área de estudos.

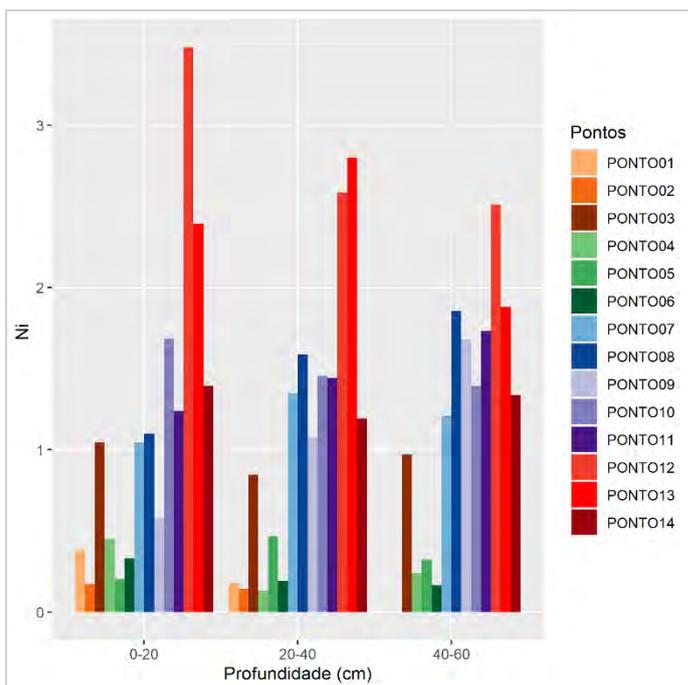


Figura 33: Gráfico de colunas da concentração média de níquel (mg/dm^3) por profundidade (cm) na área de estudos.

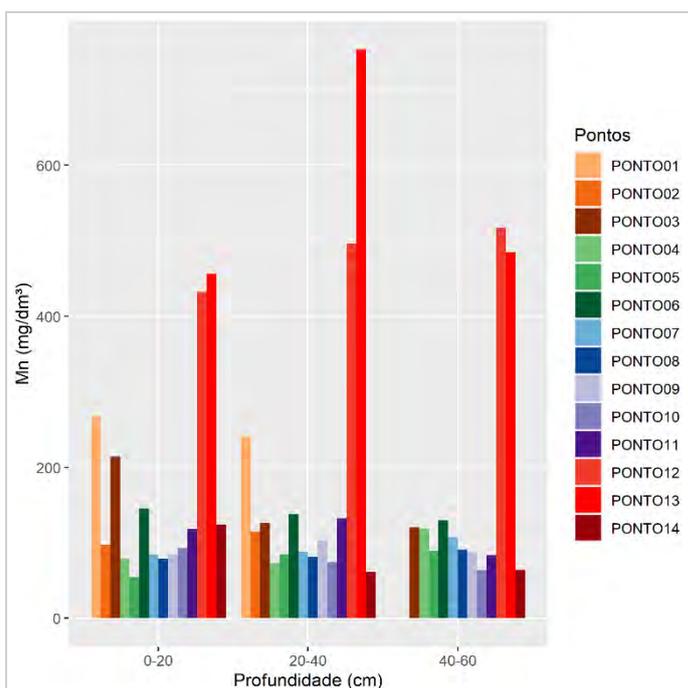


Figura 34: Gráfico de colunas da concentração média de manganês (mg/dm^3) por profundidade (cm) na área de estudos.

Sobre os metais pesados disponíveis, o cromo apresenta mesmo padrão dos anteriores (Figura 35); além disso, foi basicamente inexpressivo nos pontos iniciais, ao passo que teve maiores valores nos pontos 12 e 13.

Em relação ao teor de cádmio, apresentou valores ligeiramente acima das concentrações indicadas pelos Valores de Referência de Qualidade - VRQs (MINAS

GERAIS, 2011) em quatro diferentes pontos, em cuja maioria dos subpontos e suas profundidades evidenciaram-se indícios de contaminação: P3 (A1, A2, B1, B2 e C1); P4 (B2 e C1); P7 (A3, B1, B2 B3, C2 e C3); e P8 (A3, B1, B2, B3, C1, C2, C3) (Tabela 3). Porém, como o método utilizado pelo VRQ para obtenção das concentrações dos elementos é de quantificação total, e a empregada pela análise de rotina é apenas elementos adsorvidos, pode-se considerar que todos os teores de Cd encontram-se abaixo do valor de prevenção estabelecido pela mesma normativa, que é de 1,3 mg/dm³. Esse valor normalmente fica como o de referência em solos naturais.

O cádmio pode estar associado à deposição de sedimentos em pulso de precipitação da estação chuvosa, como foi no verão de 2015/2016, quando houve inundação de quase todos os terraços fluviais (SCHAEFER et al., 2016). Em março de 2017, foi registrada uma concentração de cádmio de 1,199 mg/dm³ em Tecnosolos da região por Silva et al. (2019). Em períodos chuvosos, com o aumento do fluxo e velocidade das águas, quando o sedimento é revolvido nos terraços fluviais, o cádmio adsorvido a superfícies coloidais, como argila ou materiais orgânicos, é liberado com mais facilidade no estado dissolvido. Outra fonte provável de cádmio é a aplicação excessiva de fertilizantes fosfatados, os quais podem carregar em sua composição esse metal como elemento traço (CHAN et al., 1998). Estudos realizados por Silva et al. (2019) demonstram haver possível correlação entre metais pesados contaminantes da água provenientes do desastre de Fundão com o aumento do número de neoplasias, especialmente leucemia, câncer de estômago e de pâncreas.

O resultado da análise de chumbo nos sedimentos (Figura 37), embora com teores dentro dos parâmetros de valores permitidos pelas normas vigentes, demonstra maiores concentrações em P7 e P8, nas profundidades de 0-20 cm e de 20-40 cm, quando em comparação com a maior, de 40-60 cm. Já nos P1, P2 e P4, os teores desse metal pesado foram inexpressivos na camada mais profunda, enquanto na superficial e mediana, maiores.

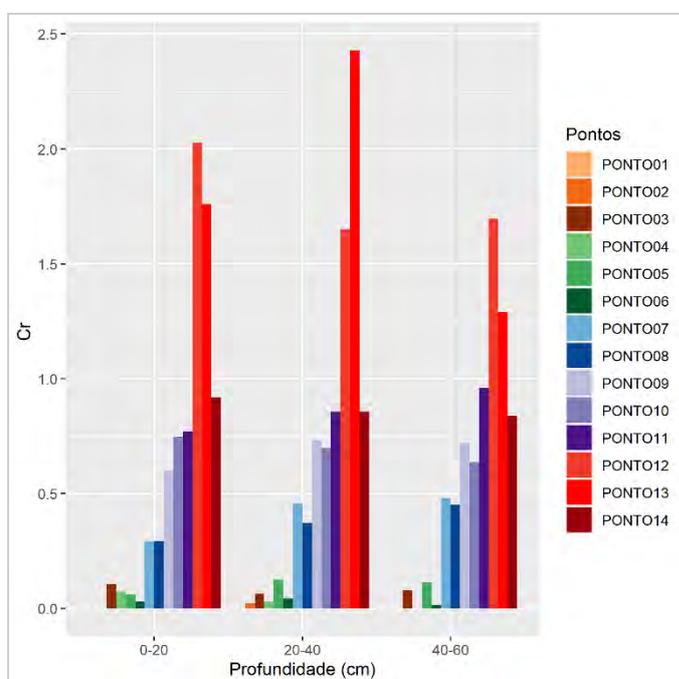


Figura 35: Gráfico de colunas da concentração média de cromo (mmolc/dm³) por profundidade (cm) na área de estudos.

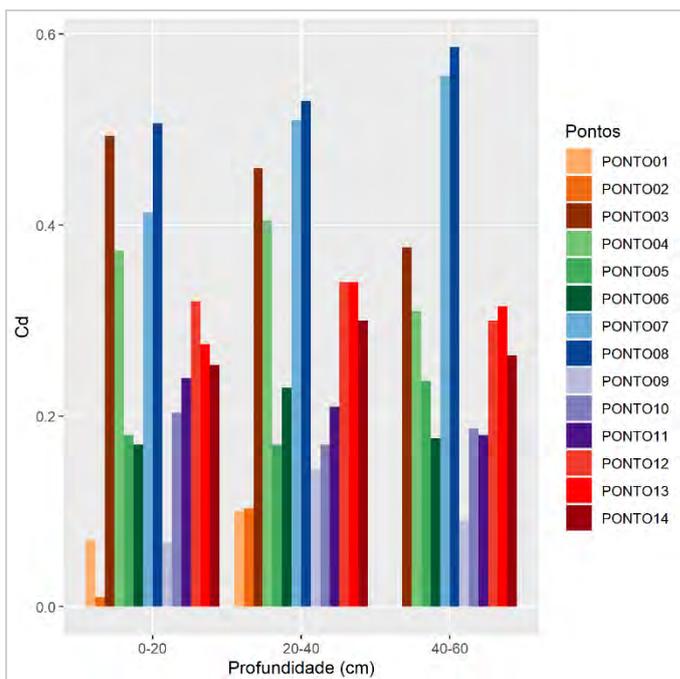


Figura 36: Gráfico de colunas da concentração média de cádmio (mmolc/dm^3) por profundidade (cm) na área de estudos.

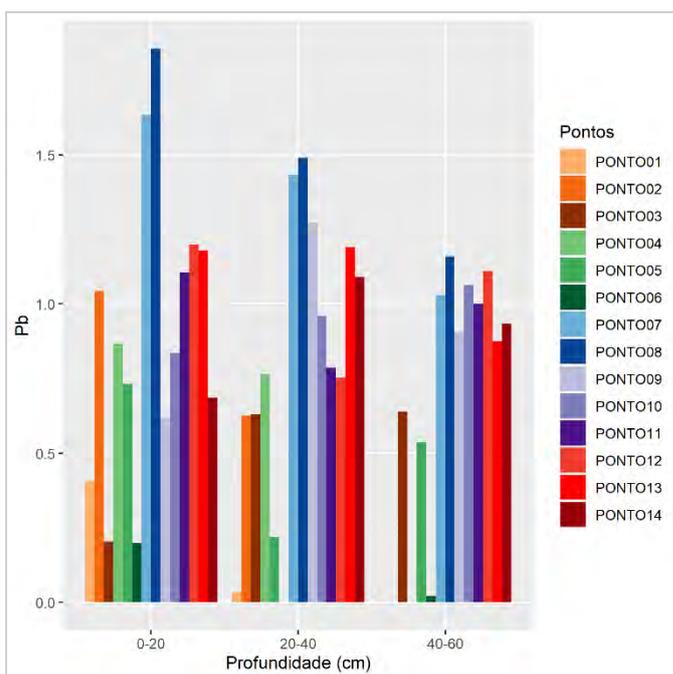


Figura 37: Gráfico de colunas da concentração média de chumbo (mg/Kg) por profundidade (cm) na área de estudos.

A Análise de Agrupamentos por meio do método de Mahalanobies aponta três diferentes tipologias de padrões quanto às variáveis químicas analisadas (Figura 38). Nota-se que os primeiros oito pontos são mais semelhantes entre si, enquanto essas similaridades vão diminuindo à medida em que se distancia do local de rompimento da barragem, sendo agrupados os pontos 9, 10, 11 e 14 na segunda tipologia, bem como 12 e 13 na terceira.

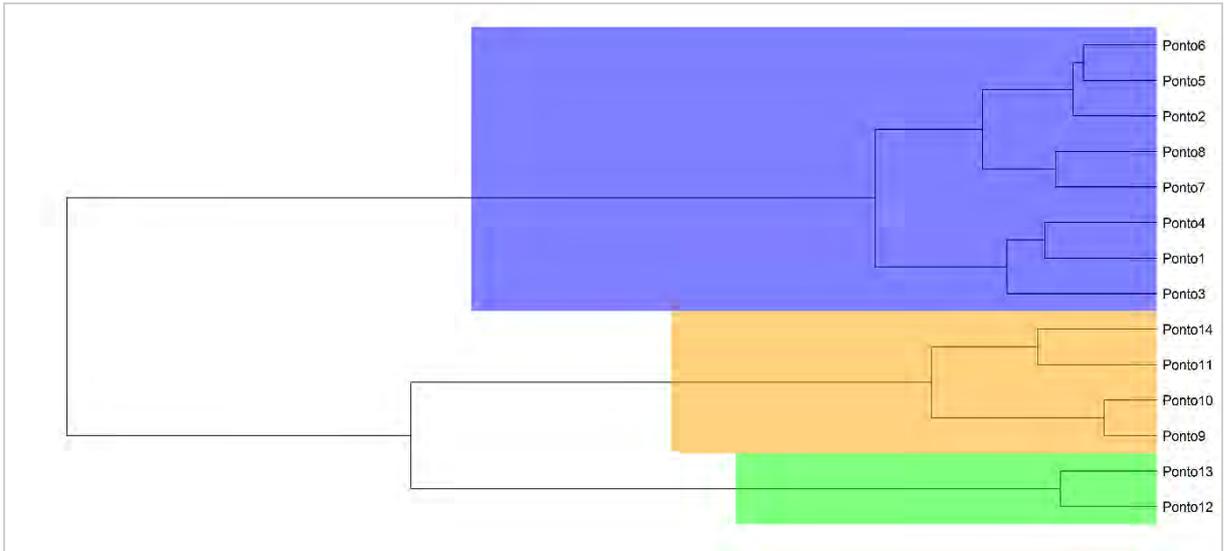


Figura 38: Gráfico de Análise de Agrupamentos utilizando o método de Mahalanobis.

Esse comportamento demonstra a diferenciação entre os ambientes estudados, que é influenciada tanto pelas particularidades do ambiente pré-acidente como pela deposição diferenciada dos rejeitos ao longo dos trechos afetados, bem como pela mobilidade dos atributos avaliados no perfil do solo. Algumas variáveis possuem papéis mais importantes e promovem esses agrupamento e, ao mesmo tempo as diferenciações entre os grupos. Todos os teores das variáveis avaliadas são particularmente elevados no G3 (Tabela 4). Trata-se da área com maior teor de argila, que pode ter contribuído para esse comportamento entre o G1 e o G2, o segundo grupo apresenta teores médios mais elevados, com exceção do manganês. E o primeiro grupo refere-se a um ambiente mais pobre, com maiores teores de areia nos rejeitos.

Tabela 4: Resultados das médias dos atributos obtidos por análises químicas de rotina dos rejeitos tecnogênicos para os três grupos gerados a partir da Análise de Agrupamentos.

	<i>pH</i> <i>H2O</i>	<i>Ca2+</i>	<i>Mg2+</i>	<i>K</i>	<i>H + Al</i>	<i>MO</i>	<i>P</i>	<i>P-rem</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Ni</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Cd</i>	<i>Pb</i>
		Cmol/dm ³	mg/dm ³	Cmol/dm ³	dag/Kg	mg/dm ³	mg/L					mg/dm ³				
G 1	6,42	1,15	0,20	44,55	0,99	0,60	5,17	31,71	169,44	1,21	1,57	0,68	118,13	0,15	0,32	0,74
G 2	6,46	1,46	0,46	72,18	1,34	0,68	8,36	39,95	249,99	2,44	2,27	1,32	91,50	0,77	0,20	0,94
G 3	6,37	3,28	1,11	67,07	1,88	1,96	9,71	18,99	1438,76	7,59	7,22	2,65	498,15	1,76	0,31	1,04

As Análises de Componentes Principais confirmam tais grupos em relação à primeira profundidade (0 cm a 20 cm), como se observa no mapa bidimensional (Figura 39). A primeira PCA produzida para análise das variáveis dos 14 pontos explicou 55,64% da variância total dos dados, enquanto a segunda explicou 15,04%. De tal forma, o gráfico dos *scores* da componente principal 1 *versus* o da 2 explica 70,68% da variação total dos dados, sendo, portanto, adequada para avaliar as relações entre as variáveis, pois, conforme Sena et al. (2000), scores acima de 60% evidenciam eficiência da PCA..

Ainda na PC1, nota-se a maior influência de cobre, cálcio e ferro, ao passo que potássio e fósforo tiveram a menor influência na explicação da variação. Cádmiio, chumbo e pH foram as variáveis com menor contribuição, o que significa uma homogeneidade ao longo das áreas nessa profundidade. Além disso, variáveis altamente correlacionadas tendem a ficar próximas no gráfico, o que significa relação diretamente proporcional entre elas; isso ocorreu com os metais, ao passo que, devido à posição ortogonal entre os vetores, verifica-se correlação nula entre acidez potencial e magnésio, ou seja, não apresentam variação entre si, assim como entre pH e cádmio; fósforo remanescente e cromo; bem como potássio e cobre.

Nota-se, também, a correlação inversamente proporcional entre fósforo remanescente e acidez potencial, ou seja, quanto maior a acidez potencial, menor a influência do fósforo remanescente, dado que há maior retenção desse elemento na presença de argilas oxídicas, como as de alumínio. Na segunda PC para a camada superficial, pode-se verificar que as variáveis fósforo remanescente (P_Rem) e pH são correlacionadas positivamente entre si (Figura 39), embora o pH tenha baixa contribuição nessa componente.

Quando relacionadas aos pontos, as componentes principais nessa profundidade demonstram haver maior influência dos metais nos P12 e P13, bem como de potássio e fósforo no P11 e de potássio no P14.

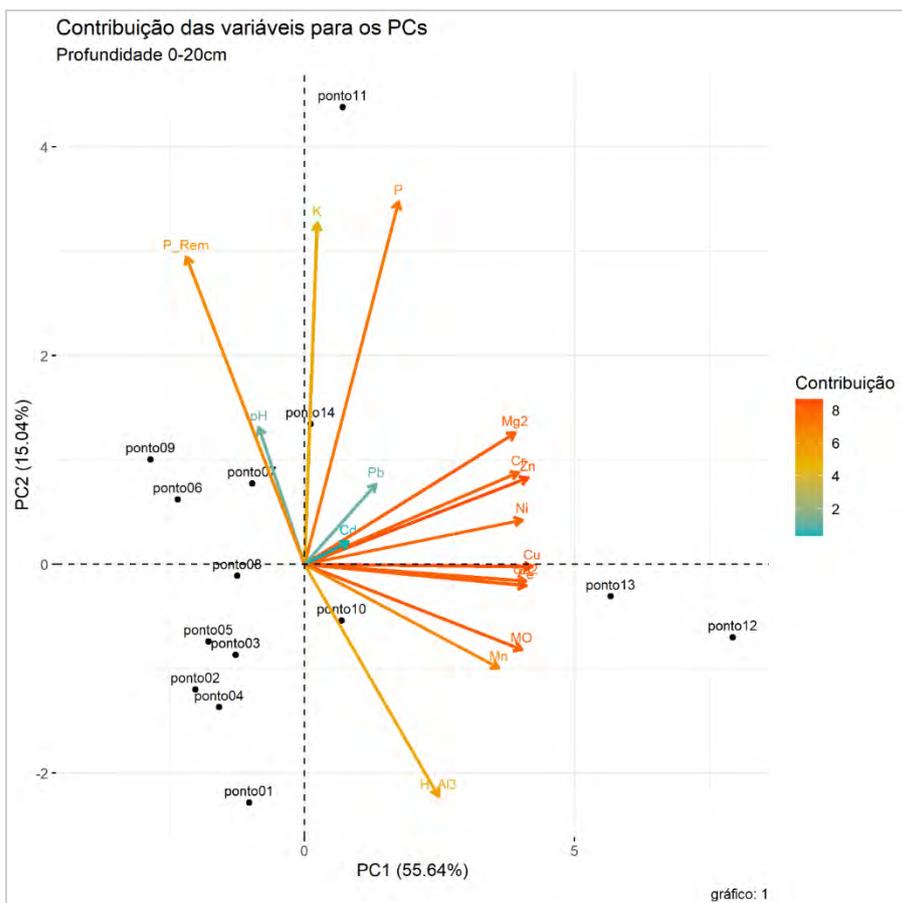


Figura 39: Análise de Componentes Principais (PCA) de variáveis a 0-20 cm nos pontos da área de estudos.

Por meio das PCA realizadas para análise dos metais presentes ao longo dos 14 pontos, de 20 cm a 40 cm (Figura 40), foi possível notar que a primeira PC produzida explicou 56,89% da variância total dos dados, enquanto a segunda explicou 12,77%. De tal forma, o gráfico dos *scores* da componente principal 1 *versus* o da 2 explica 69,66% da variação total dos dados. Apesar de pouco menor que a anterior, considera-se adequada para avaliar as relações entre as variáveis.

Na PC1, nota-se maior contribuição dos metais, especialmente com relação aos pontos P12 e P13. O potássio pode ser interpretado como homogêneo em todas as áreas, dado que apresentou a menor contribuição nessa componente principal. Na PC2, há maior influência do pH e do fósforo remanescente nos pontos P1, P2, P5, P6, P9 e P14 nessa profundidade, enquanto o cádmio teve mais influência no ponto P10.

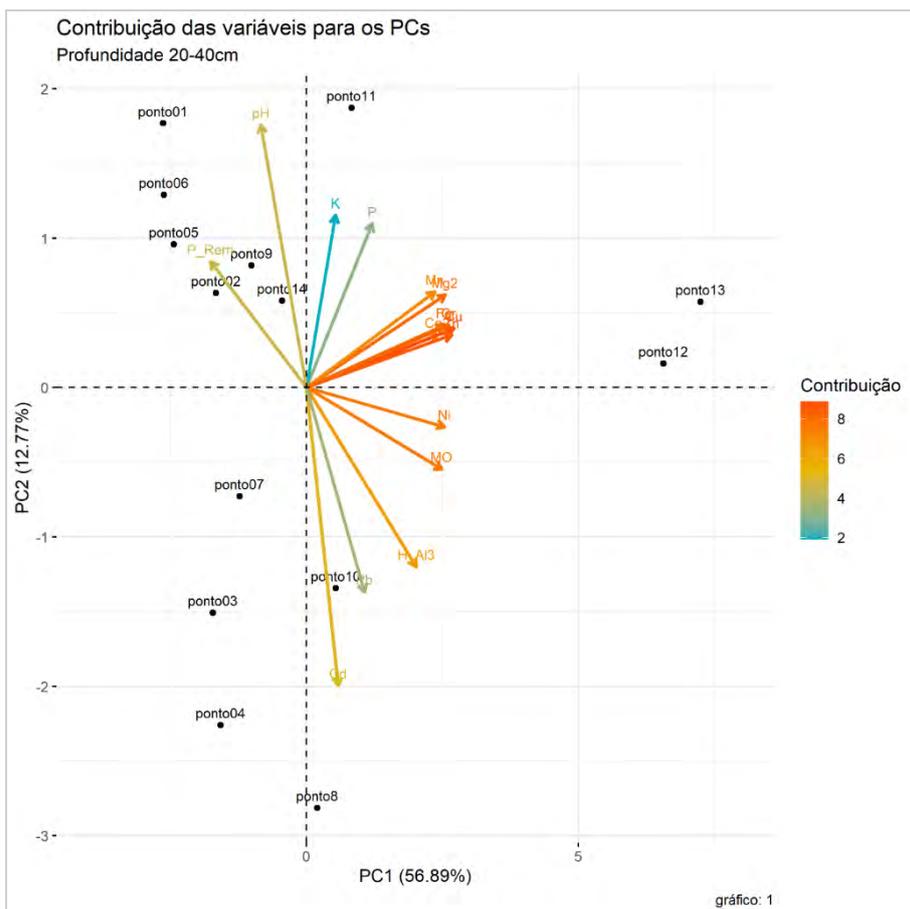


Figura 40: Análise de Componentes Principais (PCA) de variáveis a 20-40 cm nos pontos da área de estudos.

Na terceira PCA realizada, de 40 cm a 60 cm (Figura 41), a primeira PCA produzida para análise das variáveis explicou 55,73% da variância total dos dados, enquanto a segunda, 16,89%. Assim sendo, o gráfico dos *scores* da componente principal 1 *versus* o da 2 explica 72,62% da variação total dos dados, sendo o maior dos três e, assim, adequado para avaliar as relações entre as variáveis.

A PC1 apresenta maior contribuição dos metais nas variações, embora o cádmio represente a menor contribuição dentre todos, o que evidencia sua homogeneidade ao longo de todas as áreas nessa profundidade. Ressalta-se que, de 40 cm a 60 cm, encontra-se, predominantemente, o material de solo preexistente sobre o qual se depositaram os rejeitos tecnogênciso. Na PC2, Fósforo, potássio e pH apresentam correlação direta. Nota-se menor padronização nessa profundidade com relação aos pontos, visto estarem mais dispersos no gráfico, com exceção de P1, P4, P5, P6 e P9, que são mais influenciados pelo fósforo remanescente, e menos pelos metais pesados e MO.

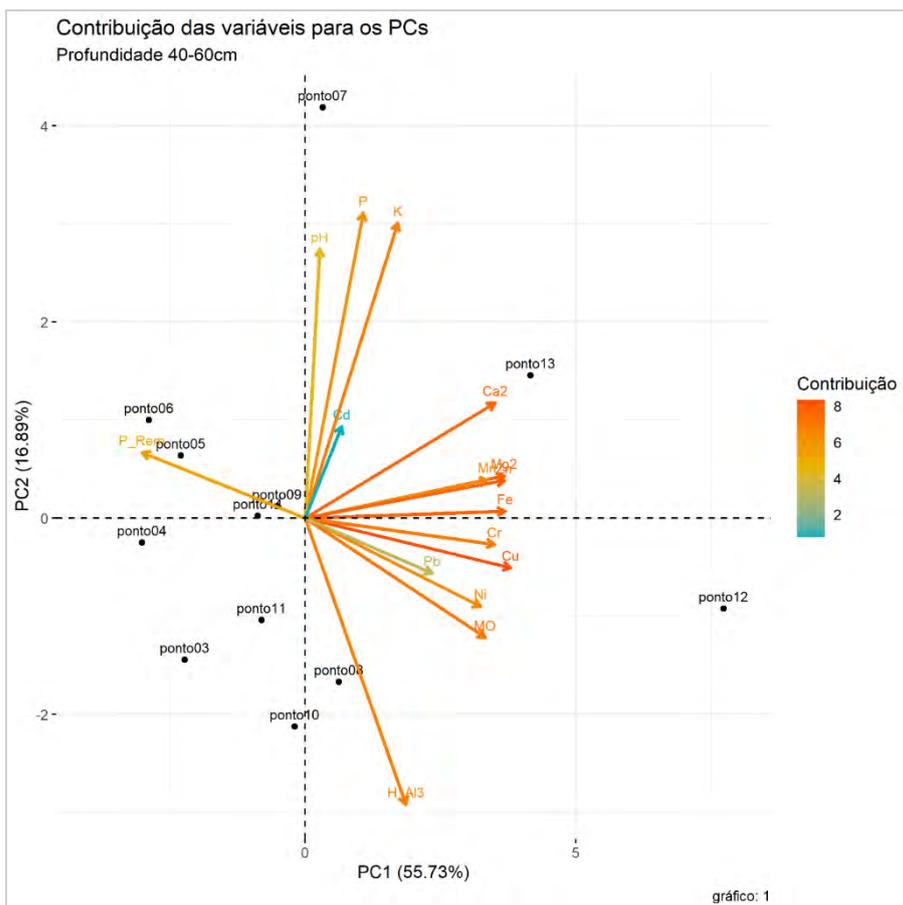


Figura 41: Análise de Componentes Principais (PCA) de variáveis a 40-60 cm nos pontos da área de estudos.

4 CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados das propriedades químicas e físicas dos rejeitos Tecnossolos das planícies fluviais de áreas da Bacia Hidrográfica do Rio Doce cinco anos após o desastre socioambiental da Vale/Samarco, compreende-se que:

- A granulometria apresenta tendência de aumento nos teores de silte e argila, ao passo que os de areia grossa e fina diminuem, o que pode sugerir processo de elutriação das camadas superficiais próximas das margens em decorrência da maior facilidade de transporte dos materiais mais finos. A textura varia bastante ao longo dos pontos, mas predominam as classes média-siltosa a média arenosa em todas as profundidades.
- Os Tecnossolos são quimicamente pobres, porém, em função do tipo de manejo, algumas camadas superficiais apresentam melhores condições de fertilidade.
- Foram identificados três grupos distintos de Tecnossolos em função dos atributos químicos, relacionados ao tipo de ambiente fluvial, com forte influência da diferenciação do tipo de rejeito depositado e da distância da fonte de ocorrência do desastre em Fundão.
- As Análises de Componentes Principais e de Agrupamentos foram adequadas para explicar as variações entre os dados.

5 REFERÊNCIAS

- AMARAL, W. G., PEREIRA, I. M., MUCIDA, D. P., MACHADO, E. L. M., & SILVA, M. A. P. da. (2020). Dinâmica da vegetação colonizadora em três áreas degradadas pelo garimpo na serra do espinhaço meridional. *Nativa*, 8(2), 231-238. <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8187>.
- ANA. Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce Rompimento da Barragem em Mariana/MG. **Cunjustura dos Recursos Hídricos no Brasil**, v. 1, p. 1–50, 2016.
- AVILA-CAMPOS, Mário Júlio; **Metais Pesados e Seus Efeitos**. 2008. Disponível em: www.mundodoquimico.hpg.com.br. Acesso em: 5 de junho de 2021.
- CAMARGO, A.P. Influência da granulometria de três materiais corretivos na neutralização da acidez do solo. Piracicaba, SP. ESALQ/USP. 1972. 59p. **Dissertação de Mestrado**.
- CAMPANHARO, Í. F., MARTINS, S. V., VILLA, P. M., KRUSCHEWSKY, G. C., APARECIDA DIAS, A., & NABETA, F. H. (2021). Functional composition enhances aboveground biomass stock undergoing active forest restoration on mining tailings in Mariana, Brazil. *Restoration Ecology*.
- CAMPANHARO, Í. F., MARTINS, S. V., VILLA, P. M., KRUSCHEWSKY, G. C., DIAS, A. A., & NABETA, F. H. (2020). Effects of forest restoration techniques on community diversity and aboveground biomass on area affected by mining tailings in Mariana, Southeastern Brazil. *Research in Ecology*, 2(4), 1-9
- CHAN, W.H. et al. Concentration and deposition of trace metals in Ontario - 1982. **Water Air Soil Pollut**, v. 29, p. 373-389, 1986.
- DONAGEMMA, G.K.; RUIZ, H.A.; FONTES, M.P.F.; KER, J.C. & SCHAEFER, C.E.G.R. Dispersão de Latossolos em resposta à utilização de pré-tratamentos na análise textural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 27:765-772, 2003.
- DONAGEMA, G.K., CAMPOS, D.V.B., CALDERANO, S.B., TEIXEIRA, W.G., VIANA, J.H.M., 2011. Manual de métodos de análises de solos, **Embrapa Solos**. <https://doi.org/1517-2627>
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, **Centro Nacional de Pesquisa de Solos**, 1997. 212 p.
- GOMES, J.M.; COUTO, L.; BORGES, R.C.G.; FONSECA, E.P. Efeitos de diferentes substratos na produção de mudas de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v.15, n.1, p.35-42, 1991.
- GUEVARA, Y. Z. C. et al. Reference Values of Soil Quality for the Rio Doce Basin. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 1–16, 2018.
- MARTINS, S. V., VILLA, P. M., NABETA, F. H., DA SILVA, L. F., KRUSCHEWSKY, G. C., & DIAS, A. A. (2020). Study on site preparation and restoration techniques for forest restoration in mining tailings of Mariana, Brazil. *Research in Ecology*, 2(4), 1-11.
- MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental. **Deliberação Normativa Nº 166, de 29 jun. 2011**. Altera o Anexo I da Deliberação Normativa Conjunta COPAM CERH Nº 2, de 6 set. 2010, estabelecendo os Valores de Referência de Qualidade dos Solos.

Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>. Acesso em: 3 de junho de 2021.

MIYASAKA, S.; OHKAWARA, T.; NAGAI, K.; YAZAKI, H.; SAKITA, M.N. Técnicas de produção e uso do Fino de Carvão e Licor Pirolenhoso. In: **Encontro de processos de proteção de plantas**, 1., 2001, Botucatu. Controle ecológico de pragas e doenças: resumo... Botucatu: APAN, 2001. p.161-176.

RIBEIRO, 1999. **Calagem, Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. <https://doi.org/631.42>.

RONDINELLI, Duilio; BARBOSA, Alexandre Muselli; MONDELLI, Giiulliana. Análise geoquímica de solos superficiais de uma área contaminada com hexaclorociclohexano (HCH). **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v.10, n.1, p.8-26, 2020.

RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **R. Bras. Ci. Solo**, 29:297-300, 2005.

SANTOS, E. E. dos. Diagnóstico e monitoramento dos Tecnessolos de rejeito de mineração de ferro da barragem de Fundão por meio de técnicas remotas e proximais de inspeção do solo. **Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, UFV**, p. 138–155, 2019.

SENA, Marcelo M. de et al. Avaliação do uso de métodos quimiométricos em análise de solos. **Química Nova** [online]. 2000, v. 23, n. 4 [Acessado 6 Março 2022] , pp. 547-556. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-4042200000400019>>. Epub 12 Dez 2006. ISSN 1678-7064. <https://doi.org/10.1590/S0100-4042200000400019>.

SILVA, A. P. D. S. *et al.* Estudo de avaliação de risco à saúde humana em localidades atingidas pelo rompimento da barragem do Fundão - MG. **Ambios Engenharia e Processo**: São Paulo, p. 369, 2019.

SILVA, Gabriel Rodrigues Rocha et al. Análise dos possíveis efeitos na incidência de neoplasias referentes a intoxicação por metais pesados após o desastre ambiental da Samarco em Mariana-MG. In: **Simpósio Nacional de Geografia da Saúde**, 9, 2019, Blumenau - SC.

SILVA, P. et al., 2006. Caracterização Química, Física e Mineralógica de Estéreis e Rejeito da Mineração de Ferro da Mina de Alegria, Mariana-MG. **Pesqui. Agropecuária Trop.** 1, 45–52.

SILVA, C. V., MARTINS, S. V., VILLA, P. M., KRUSCHEWSKY, G. C, DIAS, A. A., & NABETA, F. H. (2021). Banco de semillas de relaves mineros como indicador de recuperación de vegetación en Mariana, Brasil. **Revista de Biología Tropical**, 69(2), 700-716.

SOIL SURVEY STAFF. Department of Agriculture. **USDA.gov - United States Department of Agriculture**. Disponível em: <http://www.usda.gov>. Acesso em: 19 nov. 2021.

VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, **Ministério da Agricultura**, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 9).

VIEIRA, K. I. C. et al. Levantamento florístico e estudo palinológico de áreas sob influência do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, MG, Brasil, visando ao desenvolvimento da Meliponicultura como estratégia para a recuperação ambiental. Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro Autor . **Hoehnea** [online]. 2020, v. 47 [Acessado 13 Fevereiro 2022], e 292019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2236-8906-29/2019>>.

VILLA, P. M., MARTINS, S. V., PILOCELLI, A., KRUSCHEWSKY, G. C., DIAS, A. A.,

& NABETA, F. H. (2021). Attributes of stand-age-dependent forest determine technosol fertility of Atlantic forest re-growing on mining tailings in Mariana, Brazil. *Journal of Forestry Research*, 1-14.

ZANCHI, Carin Sgobi. **Atributos físicos, químicos e biológicos de rejeito de mineração oriundo da barragem de Fundão modificados por sistema de consórcio e plantio de *Enterolobium contortisiliquum***. 2019. Dissertação-Mestrado, Universidade Federal de Lavras – Lavras-MG.

CAPÍTULO II – IDENTIFICAÇÃO DA ESPESSURA DE TECNOSSOLOS PROVENIENTES DE REJEITOS MINERÁRIOS DA BARRAGEM DE FUNDÃO EM TERRAÇOS FLUVIAIS UTILIZANDO RADAR DE PENETRAÇÃO DO SOLO

RESUMO

As ferramentas geotecnológicas utilizadas para inspeção de solos baseadas em métodos não destrutivos vêm sendo cada vez mais requeridas nos estudos pedológicos. O objetivo deste trabalho foi identificar a espessura da camada de rejeitos tecnogênicos provenientes do rompimento da barragem de Função cinco anos após o desastre socioambiental, em terraços fluviais ao longo de trechos dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (MG), utilizando como métodos a geotecnologia GPR – Radar de Penetração do Solo e mapas hipsométricos de cada local. Como resultados, foram gerados 14 radargramas, por meio dos quais se identificaram as diferentes espessuras das camadas tecnogênicas. Por fim, conclui-se que o uso de GPR para identificação da espessura de rejeitos mostrou-se promissor, e a variação desse atributo ocorreu em função da disposição do local pela distância e altitude em relação ao leito do rio.

Palavras-chave: Desastre socioambiental, Tecnoossosolos, Georradar, Espessura do solo.

CAPTER II – IDENTIFICATION OF THE THICKNESS OF TECHNOSOLS FROM MINING TAILINGS FROM THE FUNDÃO DAM ON RIVER TERRACES USING GROUND PENETRATION RADAR

ABSTRACT

The geotechnological tools used for soil inspection based on non-destructive methods have been increasingly required in pedological studies. The objective of this work was to identify the thickness of the layer of technogenic tailings from the failure of the Function dam five years after the socio-environmental disaster, in river terraces along stretches of the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers (MG), using as a method geotechnology GPR – Ground Penetration Radar or Georadar. As a result, 14 radargrams were generated, through which the different thicknesses of the technogenic layers were identified, which were related to hypsometric maps of each location. Finally, it is concluded that the use of GPR to identify the thickness of tailings proved to be promising, and the variation of this attribute occurred as a function of the location of the site by the distance and height of the river bed.

Keywords: Socio-environmental disaster, Technosols, Georadar, Soil thickness.

1 INTRODUÇÃO

Estudos sobre desastres ambientais vêm sendo aprimorados, utilizando técnicas cada vez mais sofisticadas (SULAIMAN & ALEDO, 2016). As inúmeras e contínuas tentativas humanas de controlar a natureza com relação a seus fenômenos naturais, em suma, são as grandes responsáveis pela geração desses desastres ao longo da história. No dia 5 de novembro de 2015, ocorreu um dos maiores desastres ambientais brasileiros já noticiado: o rompimento da barragem de Fundão, de propriedade da empresa Samarco Mineração, uma *joint-venture* das duas maiores mineradoras mundiais, a Vale S.A. e a BHP Billiton, no município de Mariana-MG. Esse desastre consumou o risco de rompimento iminente já apontado pelo Ministério Público, conforme laudo em 2013 (ESPINDOLA; GUIMARÃES, 2019).

Com o rompimento, foram lançados mais de 43 milhões de m³ de lama ao meio ambiente, chegando a atingir uma altura de 5,5 m acima das planícies aluviais, e o distrito de Bento Rodrigues, o mais atingido, onde o lamaçal chegou a 15 m de altura, teve 19 mortos e 1.200 desabrigados, ficando inabitável (SARAIVA; FERREIRA, 2018). Com o aporte repentino da onda de lama com rejeitos tecnogênicos de mineração, houve assoreamento dos rios, desaparecimento total das várzeas mais baixas, além de profundas alterações nos terraços aráveis, gerando grande degradação socioambiental, com destruição de ecossistemas, impactos na agricultura e subsistência da população ribeirinha local e, por conseguinte, os atuais Tecossolos da região (SCHAEFER et. al, 2016).

Saber a espessura da camada de rejeitos tecnogênicos possibilita reconhecer problemas de diversas dimensões, tais como hidrodinâmicos: o grau de infiltração da água e a erosividade do solo, além da adequada utilização de técnicas de recuperação do ambiente degradado (OLIVEIRA, 1994). Assim, estudos que possibilitem a identificação dessa espessura podem servir como base para a avaliação das técnicas de recuperação já empregadas, considerando a transição entre os rejeitos e os antigos solos, bem como a dinâmica edáfica estabelecida ao longo desse período, como perdas erosivas e aporte de matéria orgânica. Para tanto, os métodos geofísicos apresentam eficácia no tempo reduzido de aquisição de dados e dos resultados, podendo ser repetidos nos mesmos locais, pois são não destrutíveis para a superfície do solo, e permitem compreender a paisagem e suas dinâmicas (ZAJÍCOVÁ; CHUMAN, 2019).

Outros métodos utilizados para avaliar a espessura e volume dos rejeitos tecnogênicos foram implementados por Santos (2019), como Lases Scanner Aéreo (LSA) e Laser Scanner Terrestre (LST), constatando em sua pesquisa a eficácia de tais tecnologias para este fim. No entanto, novas técnicas também se mostram bastante promissoras, como o Radar de Penetração do Solo (GPR) para o mesmo objetivo (ZAJÍCOVÁ, 2019).

O GPR (*Ground-penetrating Radar*) – Radar de Penetração do Solo ou Georradar – é um método eletromagnético utilizado para identificar estruturas de subsuperfície, sendo caracterizado como método geofísico não invasivo, pois permite extrair informações ao longo do perfil de solo, sem perfurar, sondar ou escavar (CEZAR et al., 2010). Na Pedologia, tal ferramenta tem sido utilizada para diversos fins, como determinar a presença, profundidade, extensão e variação lateral dos horizontes de solos, os limites entre classes de solo, assim como suas propriedades texturais, estruturais e morfológicas (MENDONÇA et al., 2014).

Essa geotecnologia tem a capacidade de mensurar a permissividade dielétrica do solo, utilizando um curto pulso de alta frequência, entre 10 e 2500 MHz, que é repetidamente radiado para dentro do terreno por uma antena transmissora, e sua resposta é registrada em intervalos de tempo muito pequenos (nanossegundos) (CHUMAN, 2019). Seu funcionamento ocorre a partir da emissão e recepção de ondas eletromagnéticas pelas antenas transmissoras e receptoras, sendo os dados obtidos armazenados na forma de traços, originando os perfis de reflexão, chamados comumente de “radargramas” (CEZAR et al., 2010).

A energia refletida é registrada em função do tempo de percurso, sendo amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido do computador, deixando os dados prontos para posterior processamento (SOUZA, 2005). O processamento dos dados para a obtenção dos radargramas é um procedimento muito interativo, pela facilidade de operacionalização, e subjetivo, dependendo bastante da experiência do pesquisador, iniciando pela edição, pela qual é possível manipulá-los no intuito de melhorar a apresentação, reverter a direção do perfil, incluir informações da topografia, editar os traços e corrigir o tempo zero da chegada da onda (CEZAR et al., 2010).

Para Martini (2015), cuja pesquisa objetivou empregar o GPR para a definição de sedimentação na subsuperfície da barragem do Diogo e da Pilha do Monjolo (MG), verificaram-se diferentes texturas nos solos submersos do reservatório, possibilitando indicar pontos de concentração e tendências críticas de movimentação de rejeitos. Para Calachibete et al. (2019), que objetivaram mapear as potenciais ocorrências minerais de manganês na região de Guiratinga (MT), o GPR confirmou-se como importante ferramenta na pesquisa mineral da região, visto que a aplicabilidade da metodologia utilizada na determinação da espessura da camada de manganês foi bastante eficaz (CALACHIBETE et al., 2019).

Obtiveram-se 14 radargramas, cada qual referente a um ponto de coleta da área de estudos. A eficiência no uso do GPR para a identificação da espessura da camada tecnogênica já foi confirmado por outros trabalhos como os de Martini (2014), Schaefer *et al.* (2016), Santos (2019) e Zajícová e Chuman (2019).

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi identificar a espessura da camada de rejeitos tecnogênicos em função da distância de deposição ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (MG), por meio da utilização da ferramenta geotecnológica GPR – Radar de Penetração do Solo ou Georradar, relacionando os resultados com mapas hipsométricos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A área de estudos está localizada na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), cuja área total é de 83.400 km², dentre os quais 86% fazem parte do território de Minas Gerais (ANA, 2016). Foram escolhidos trechos de terraços fluviais (Figura 1), considerando-se o fator de melhor acessibilidade às áreas, as quais se estenderam ao longo dos rios Gualaxo do Norte, no município de Mariana e Barra Longa, onde também há conexão com o rio do Carmo, e posteriormente do rio Doce, passando pelos municípios de Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado.

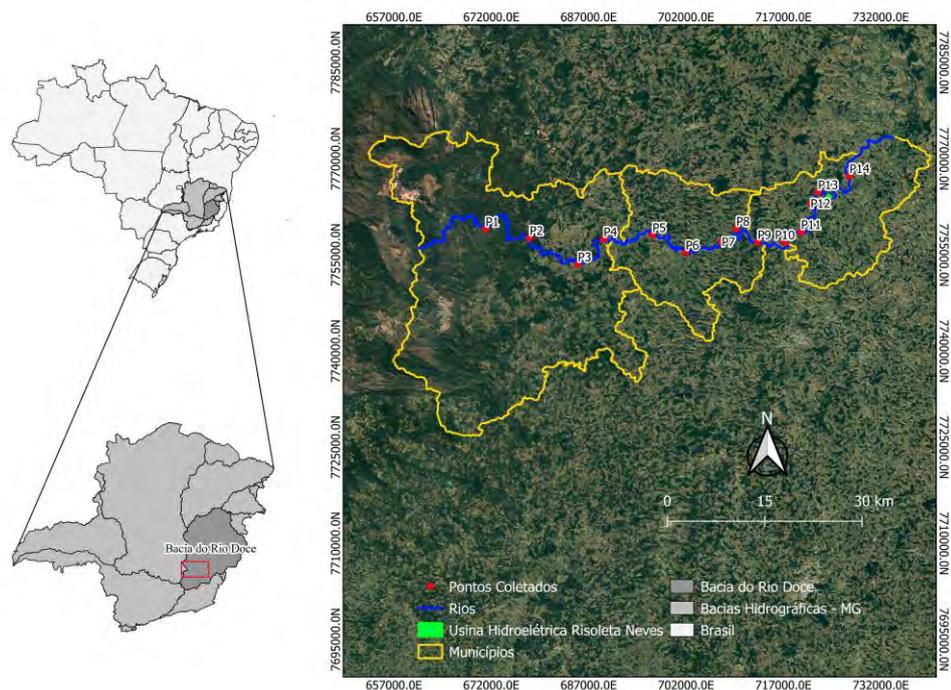


Figura 1: Localização da área de estudo.

2.2 Descrição das áreas

Foram escolhidos 14 trechos de terraços fluviais ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, considerando-se a melhor acessibilidade ao local, mantendo média de distância entre os pontos de 5,5 km. Cada trecho foi descrito conforme o rio, o município, a cobertura vegetal encontrada e características importantes para a identificação das camadas de rejeitos tecnogênicos, bem como foram ilustrados por meio de fotos (Tabela 1).

Tabela 1: descrição das áreas de coleta.

P	R	M	COORD. GEO. (X, Y)		ALT. MÉD. (m)	C. VEG	CARAC.	FOTOS
1	Gualaxo do Norte	Mariana	671143,48	7759052,81	631	Gramíneas e pequenos arbustos	Plantio de mudas para reflorestamento; adição de <i>topsoil</i> ; presença de equinos. Realização de calagem.	 <p>Foto: o autor.</p>
2	Gualaxo do Norte	Mariana	677940,07	7757671,59	643	Gramíneas, arbustos e poucas espécies florestais.	Plantio de palmeiras; adição de <i>topsoil</i> . Realização de calagem.	 <p>Foto: o autor.</p>
3	Gualaxo do Norte	Mariana	701968,26	7755394,75	520	Gramíneas esparsas com solo exposto	Enroncamento e geomanta para contenção de erosão. Realização de calagem.	 <p>Foto: o autor.</p>

...Continua.

P	R	M	COORD. GEO. (X, Y)		ALT. MÉD. (m)	C. VEG	CARAC.	FOTOS
4	Gualaxo do Norte	Mariana	696856,28	7758133,74	477	Gramíneas esparsas com solo exposto e pequenos arbustos	Enroncamento e geomanta para contenção de erosão. Realização de calagem.	
5	Gualaxo do Norte	Barra Longa	689321,31	7757455,74	385	Gramíneas	Adição de <i>topsoil</i> (30 cm); plantio de braquiária; calagem; presença de bovinos; enroncamento. Realização de calagem	
6	Gualaxo do Norte	Barra Longa	685362,00	7753559,00	476	Gramíneas	Plantio de mudas para reflorestamento em APP; pastagem; calagem.	

...Continua.

P	R	M	COORD. GEO.		ALT. MÉD. (m)	C. VEG	CARAC.	FOTOS
7	Carmo	Barra Longa	707509,24	7757040,74	342	Gramíneas; presença de mamoneira (“ <i>Ricinus communis</i> ”), lobeira (“ <i>Solanum lycopersicum</i> ”) e sabiá (“ <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> ”).	Adição de <i>topsoil</i> (20 cm). Realização de calagem.	 <p>Foto: o autor.</p>
8	Carmo	Barra Longa	709747,24	7759115,73	497	Gramínea densa; pequeno fragmento florestal.	Presença de bovinos; pastagem; aplicação de <i>topsoil</i> ; formigueiros e cupinzeiros, calagem.	 <p>Foto: o autor.</p>
9	Carmo	Barra Longa / Rio Doce	713052,83	7757024,56	333	Gramíneas densas; leguminosas.	Reflorestamento; formigueiros, calagem.	 <p>Foto: o autor.</p>

...Continua.

P	R	M	COORD. GEO. (X, Y)		ALT. MÉD. (m)	C. VEG	CARAC.	FOTOS
10	Doce	Barra Longa / Rio Doce	717241,44	7756989,43	329	Gramíneas; lobeira (“ <i>Solanum lycocarpum</i> ”), sabiá (“ <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>) e outras leguminosas.	Regeneração natural em estágio inicial; formigueiros. Realização de calagem. Área de alagamento sazonal.	 Foto: o autor.
11	Doce	Rio Doce / Santa Cruz do Escalvado	719735,60	7758607,03	331	Gramíneas; presença de mamoneira (“ <i>Ricinus comunis</i> ”), lobeira (“ <i>Solanum lycocarpum</i> ”) e sabiá (“ <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> ”).	Regeneração natural em estágio inicial; formigueiros; criação de bovinos. Realização de calagem. Uso de adubação NPK pelo proprietário. Área de alagamento sazonal.	 Foto: o autor.

...Continua.

P	R	M	COORD. GEO. (X, Y)		ALT. MÉD. (m)	C. VEG	CARAC.	FOTOS
12	Doce	Rio Doce / Santa Cruzdo Escalvado	727196,64	7767325,40	276	Gramíneas esparsas e pequenos arbusros.	Área mais íngreme; plântio de mudas para reflorestamento; pequenos fragmentos florestais nas partes mais altas; geomanta. Realização de calagem. Área de alagamento sazonal.	 Foto: o autor.
13	Doce	Rio Doce / Santa Cruzdo Escalvado	721182,44	7763038,37	292	Gramíneas e espécies arbustivas pioneiras.	Regeneração natural em estágio inicial; geomanta para contenção de erosão.	 Foto: o autor.

...Continua.

P	R	M	COORD. GEO. (X, Y)		ALT. MÉD. (m)	C. VEG	CARAC.	FOTOS
14	Doce	Rio Doce / Santa Cruzdo Escalvado	722350,76	7764809,33	263	Gramíneas e arbustos em touceiras.	Locais com solo exposto. Realização de calagem. Área de alagamento sazonal.	 <p>Foto: o autor.</p>

Legenda: P – Pontos de coleta; R – Rios; M – Municípios; COORD. GEO – Coordenadas Geográficas; ALT. MÉD. – Altitude Média; C. VEG. – Cobertura Vegetal; CARAC. – Características das áreas.

2.3 Uso de GPR para Inspeção dos Tecnoossosolos

Neste trabalho, utilizou-se o método GPR em função de sua eficiência na identificação da espessura de rejeitos tecnogênicos, evidenciando a transição entre os rejeitos depositados com o rompimento da barragem de Fundão, e os solos pré-existentes nos locais analisados.

Ele foi utilizado em trechos dos terraços fluviais dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce. Foram escolhidos locais onde se delimitou um transecto padrão para todas as áreas cuja extensão iniciou-se da margem do rio até o início de estradas ou, caso esta estivesse muito distante, até a parte mais elevada da paisagem, considerando que a esses locais o rejeito não chegou, conforme Zajicová (2019).

O modelo GPR utilizado foi o SIR 3000, da GSSI, com antena blindada de 400 MHz. Utilizou-se a constante dielétrica (k) 10, tendo em vista a textura predominante do rejeito de minério de ferro ser argilosa/siltosa (PORSANI; SAUCK, 2007; SANTOS, 2019).

2.4 Processamento de dados do GPR

O software utilizado para o processamento dos dados foi o Radan 7, sendo realizados os seguintes comandos, baseado em Zajicová (2019):

a) Correção de tempo zero: por meio deste comando, corrige-se a faixa aérea dos dados adquiridos antes da onda direta em contato com a superfície;

b) Remoção de ruído de fundo: utilizado para remover a interferência no intuito de melhorar os padrões do radargrama, visto que o ruído de fundo horizontal deforma a resolução dos dados GPR, estando associado à interferência de ondas eletromagnéticas nas antenas;

c) Deconvolução: serve para extinguir o ruído de baixa frequência, melhorando a resolução de dados GPR. É um filtro horizontal para remoção de ruídos e / ou reflexos múltiplos (fantasmas);

d) Filtros de Resposta a Impulso Finito (FIR): Filtro digital linear para a duração finita do sinal de entrada ou pulso. É caracterizado como filtro vertical para redução de baixa e alta frequência. O método do vagão é baseado em uma função de média simples determinada por meio da frequência de corte desejada (passa-banda) e aplicado a janelas retangulares de amostragem;

e) Ganho: usado para neutralizar a atenuação das ondas eletromagnéticas no intuito de ampliar a resolução da imagem, o que permite a identificação mais acurada dos refletores de baixa intensidade.

2.5 Identificação de Áreas de Reflexão

Quanto à análise dos perfis de reflexão (radargramas), foi necessário identificar a origem das reflexões. Existem três classes de importância na análise: refletores horizontais contínuos; refletores de objetos 2D e 3D, bem como de descontinuidades laterais; e hipérbolos de difrações (SOUZA, 2005). Essa etapa baseou-se, então, na separação visual das camadas de reflexão eletromagnética, observando contrastes de refletância e atenuações de sinal entre as seções, bem como indicando homogeneidade ou heterogeneidade do material segundo suas propriedades dielétricas (SANTOS, 2019; SOUZA, 2005; ZAJÍCOVÁ; CHUMAN, 2019).

A mudança de fase das ondas escolhida foi ALS (*Airbone Laser Scanner*), que ocorre por meio da análise de traços de amplitude dos radargramas, no intuito de separar com mais

facilidade as zonas de reflexão (SANTOS, 2019). Com isso, foi possível separar os diferentes materiais pedológicos em subsuperfície, permitindo a identificação da espessura dos rejeitos tecnogênicos, bem como a transição entre essa camada e a superfície do solo soterrado. Ainda segundo Santos (2019), materiais de diferentes origens podem ocasionar diferentes reflexões e, para se identificar os tipos desses materiais, faz-se necessário retorno ao campo.

2.6 Processamento de Imagens para Produção de Mapas Hipsométricos

A altitude de toda a área de estudo pode ser observada por meio do mapa hipsométrico regional (Figura 3), em que se verificam os pontos iniciais em locais mais elevados, estando o P1 a cerca 750 m do nível do mar, e, conforme se avança pelas demais áreas, nota-se a diminuição da altitude, chegando aos 300 m no ponto P14, conformação esta corroborada por Martinelli (2017).

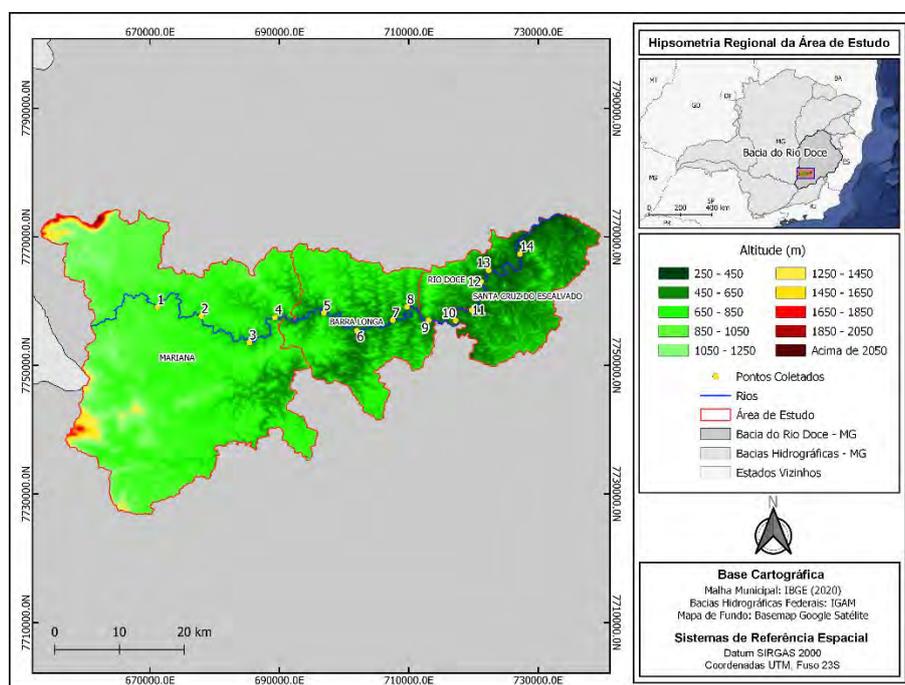


Figura 3. Mapa hipsométrico regional da área de estudos em metros (m), com a localização na bacia do Rio Doce e no estado de Minas Gerais.

As imagens para a produção dos mapas hipsométricos e de declividade foram obtidas por meio do uso de aeronave remotamente pilotada, também conhecido como drone, modelo Phantom 4 Pro, com exceção dos pontos P2, P4 e P6 para os quais, por problemas técnicos com os levantamentos, não foram obtidas as imagens, sendo estas substituídas pelas do satélite Alos Palsar (*Advanced Land Observing Satellite Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*). As imagens do drone foram processadas no programa Agisoft Metashape, versão 10.3, disponível no Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Para o processamento das imagens no programa, utilizou-se qualidade alta e realizou-se o alinhamento de fotos quanto à sobreposição das imagens, produzindo uma nuvem de pontos simples. Em seguida, foi produzida a “dense cloud”, ou seja, a nuvem de pontos densa, utilizando os pontos gerados no alinhamento de fotos para multiplicá-los e, assim, produzir um modelo do local. Com isso, geraram-se os Modelos Digitais de Elevação (MDE) (CANDIDO et al., 2014; PEDREIRA, 2017).

No entanto, inicialmente, o programa gera Modelos Digitais de Superfície (MDS), nos quais se consideram apenas o terreno e os objetos acima do terreno. Como o intuito era o de produzir Modelos Digitais do Terreno (MDT), foi necessário proceder à classificação supervisionada da “*dense cloud*” de acordo com as classes presentes nas nuvens de pontos, separando os elementos presentes em terreno, vegetação e demais, indicando a consideração apenas do solo, gerando os MDT, com resolução espacial de 4 m. Assim, os MDT produzidos foram exportados para serem inseridos no QGIS, versão 3.16, e, com isso, gerarem-se os mapas hipsométricos dos 14 locais da área de estudo.

Para a produção dos mapas de declividade das áreas, foram utilizados os MDT no QGIS por meio da ferramenta “declive”, que trabalha com imagens do tipo *raster*. Na janela dessa ferramenta, inseriram-se as altitudes de metro a metro, para haver maior precisão na interpretação, e, após isso, foram gerados os mapas. Para a produção de todos eles, padronizou-se também a escala de 1:5000.

Optou-se pela produção de mapas hipsométricos no intuito de observar variações de altitude do local, identificando a presença de trechos hídricos mais lineares ou meandrados, pois, conforme estudo realizado por De Lima *et al.* (2020), os principais movimentos de massa gravitacionais do fluxo de uma avalanche de rejeitos se iniciam com maior intensidade no local de rompimento, diminuindo ao longo do percurso, e com mais deposição em áreas de maior sinuosidade, ou seja, meandros, pois as curvas contribuem para a diminuição da velocidade do fluido, sendo mais facilmente depositado nos terraços fluviais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos Radargramas e das Espessuras da Camada de Rejeitos

A linha de varredura 1 apresentou dois fortes refletores, sendo um mais superficial, e outro, abaixo da faixa de rejeito. Na superfície, é possível observar a presença de material que foi depositado sob a camada de rejeito (*topsoil*), com espessura variando entre 20 a 30 cm (Figura 4). Logo abaixo observa-se uma camada de abaixo de 60 cm correspondente ao material do rejeito. Em função da sua composição rica em ferro, esse material torna-se um bom condutor da energia emitida pelo radar, gerando um padrão no radargrama mais claro, como também confirmam Zajícová e Chuman (2019). Logo abaixo, a cerca de 65 cm, encontra-se o material original do terreno, provavelmente o horizonte C do solo pré-existente.

Ao se associar tal resultado com a altitude local (Figura 5), pode-se explicar o padrão homogêneo de espessura da camada tecnogênica, visto que, ao longo do transecto, observa-se trecho do rio com poucos meandros.

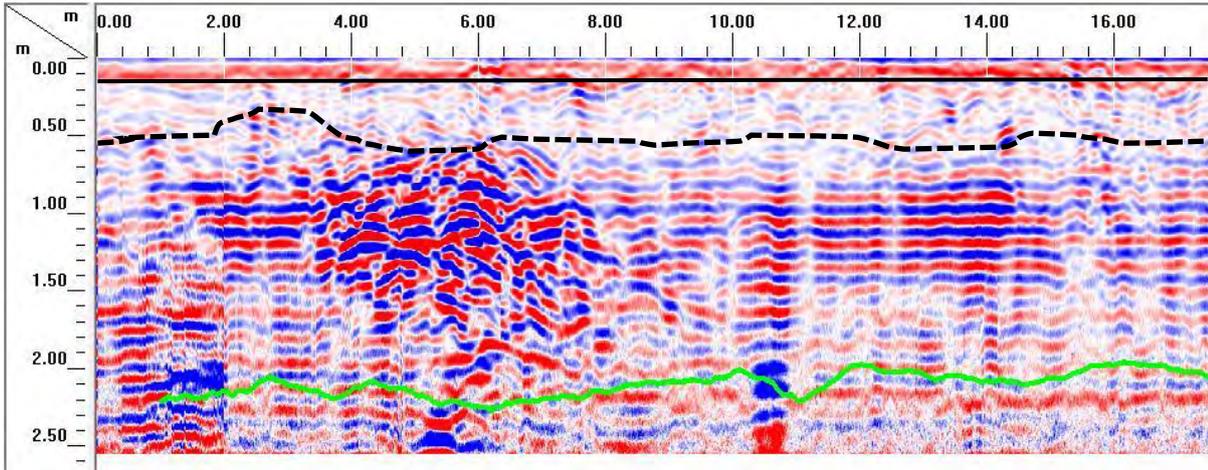


Figura 4. Radargrama da primeira área (P1), com extensão entre os subpontos A e B. A linha preta contínua indica camada de topsoil; a tracejada, o limite entre a camada de rejeito e a do solo pré-existente; a verde, a profundidade de alcance do sinal.

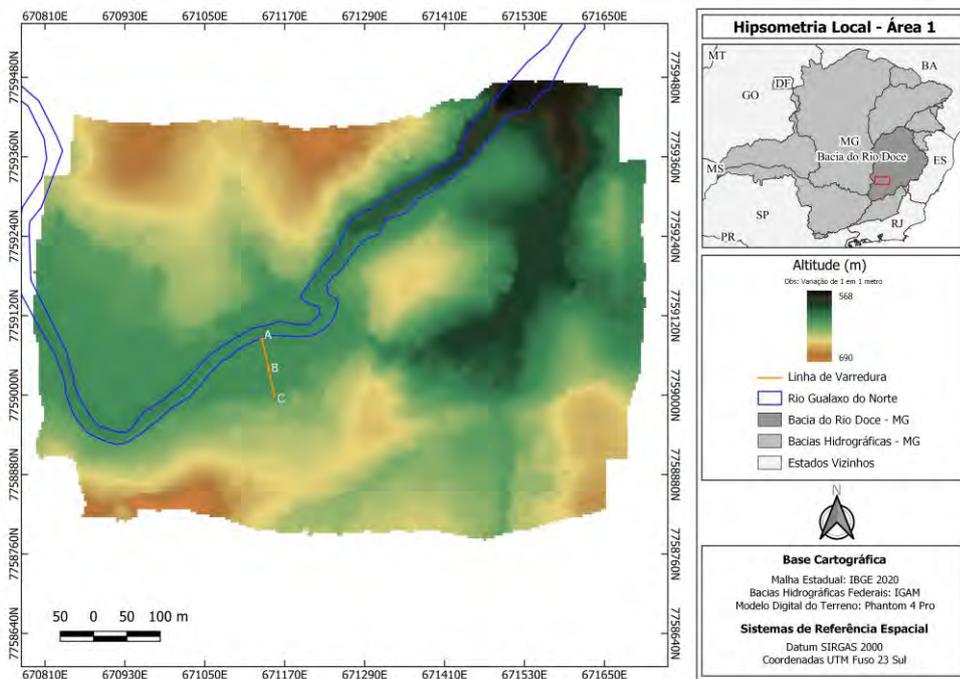


Figura 5. Mapa de hipsometria local (P1) em metros (m).

As linhas de varredura 1 e 2 apresentaram resultados semelhantes entre si, até mesmo na profundidade de alcance do sinal, em torno de 2,3 m. A diferença na 2 ficou por conta de um forte refletor próximo da superfície, entre 8 e 12 m de distância do início da varredura (Figura 6). Trata-se de material não identificável e distinto da massa de rejeito. Estudo realizado por Santos (2019) evidenciam a importância de observações *in loco* para a classificação exata de materiais com forte reflectância. Ademais, o transecto apresentou espessura de 0,8 m, com presença identificável de *topsoil*. O mapa hipsométrico da área (Figura7) assemelha-se ao anterior no sentido de haver baixa variação de altitude.

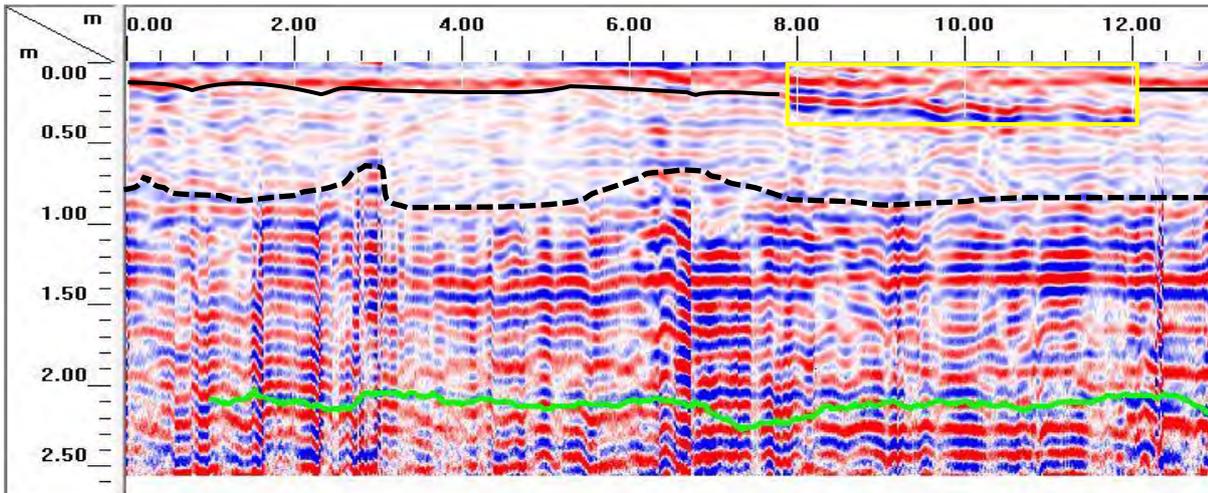


Figura 6. Radargrama da segunda área (P2), com extensão entre os subpontos A e B. A linha preta contínua indica camada de topsoil; a tracejada, o limite entre a camada de rejeito e a do solo pré-existente; a verde, a profundidade de alcance do sinal; o retângulo amarelo, objeto não identificado.

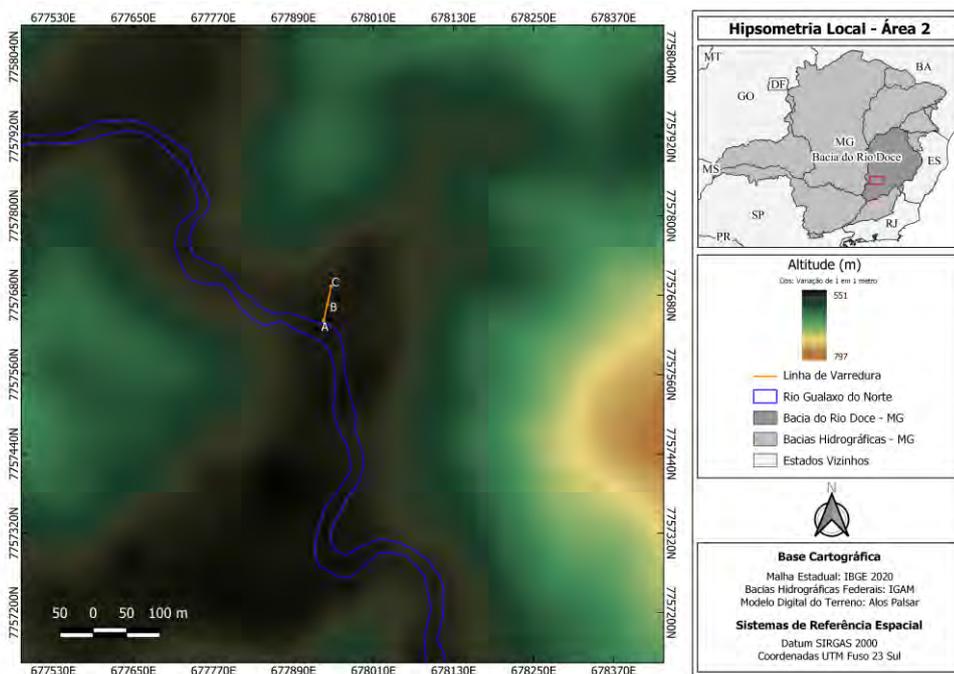


Figura 7. Mapa de hipsometria local (P2) em metros (m).

A terceira linha de varredura apresenta uma mistura de material na parte mais próxima da calha do rio, até dois metros do início da linha. Depois aparece um bolsão de rejeito com espessura próxima de 1 m. O material parece estar bem misturado ente 6 e 10 m do início da linha, apresentando refletor medianos (Figura 8). A partir desse local, não é possível afirmar se existe rejeito ou não. Na superfície, há presença de *topsoil* até 30 cm de espessura.

Ao se associar tal resultado com a hipsometria local (Figura 9), pode-se compreender a maior espessura do rejeito e a mistura ocorrida com o material, dado que a sinuosidade do rio, associada às maiores altitudes adjacentes, propiciou meios para maior acúmulo de sedimentos.

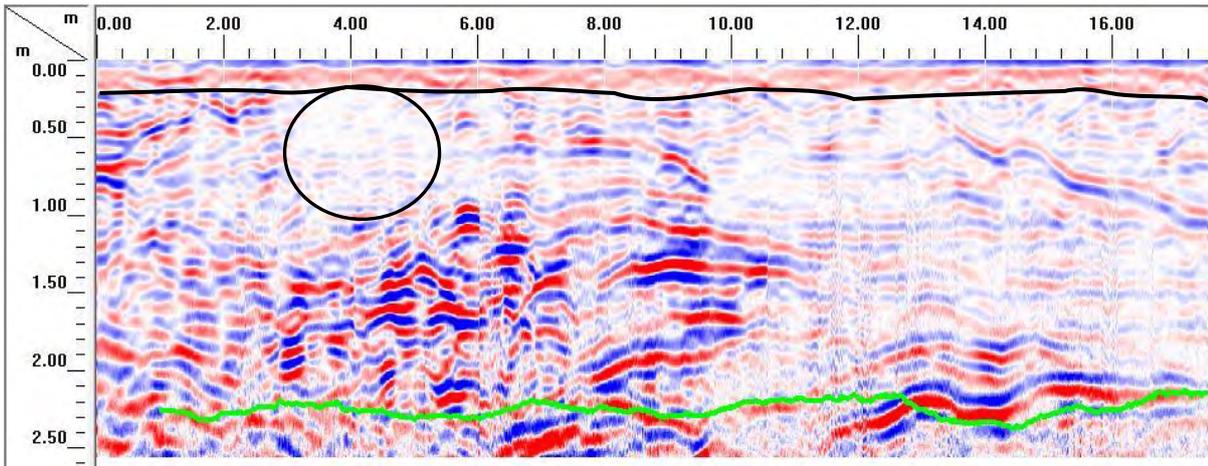


Figura 8. Radargrama da terceira área (P3), com extensão entre os subpontos A e B até 13 m, e B e C no restante. A linha preta contínua indica camada de topsoil; a circunferência, a camada de rejeito identificada; a verde, a profundidade de alcance do sinal.

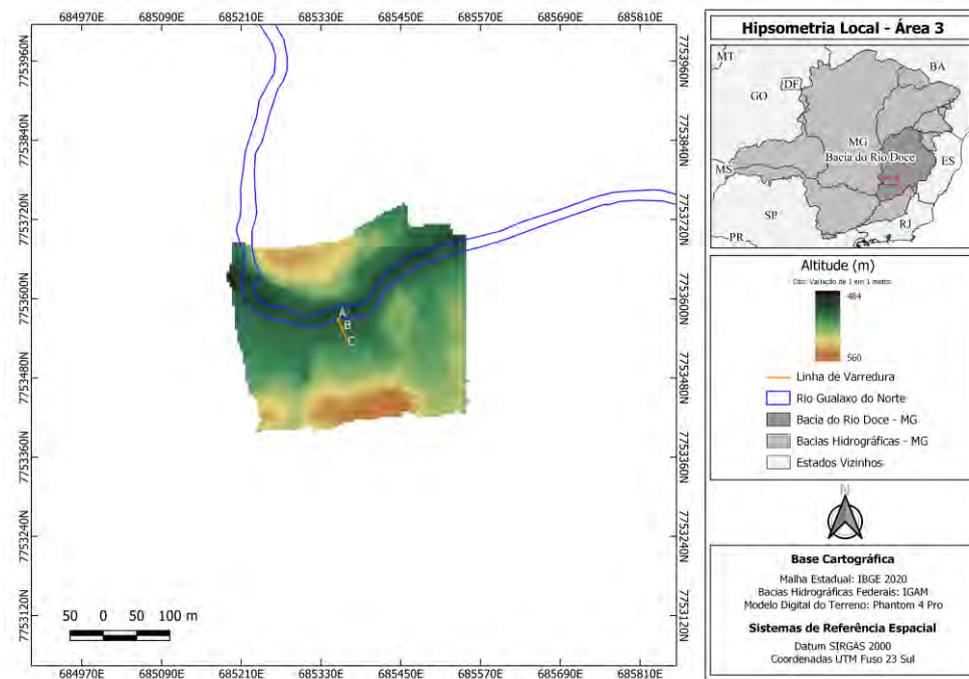


Figura 9. Mapa de hipsometria local (P3) em metros (m).

Na quarta linha (Figura 10), a presença do rejeito parece estar associada à mistura com sedimentos fluviais com um alcance que vai até 7 m ou à própria característica deposicional do material à medida que a distância sofre variação. A partir desse ponto, o material parece estar ainda mais misturado, mas ainda com padrão de presença fraca de rejeito, em uma profundidade variando entre 0,5 m e 1,0 m, identificável até os primeiros 6 m. Padrão semelhante de reflexão de mistura de rejeitos tecnogênicos com sedimentos de rio captados por GPR foram encontrados por Zajícová e Chuman (2019). É possível observar um outro refletor na superfície, distinguível até os primeiros 6 m, com uma espessura média de 20 cm, referente ao *topsoil*.

Ao se associar tal resultado com a altitude do local (Figura 11), nota-se baixa variação, além de decurso menos sinuoso do rio, o que pode explicar o padrão mais homogêneo da

espessura da camada de rejeitos tecnogênicos ao longo do transecto.

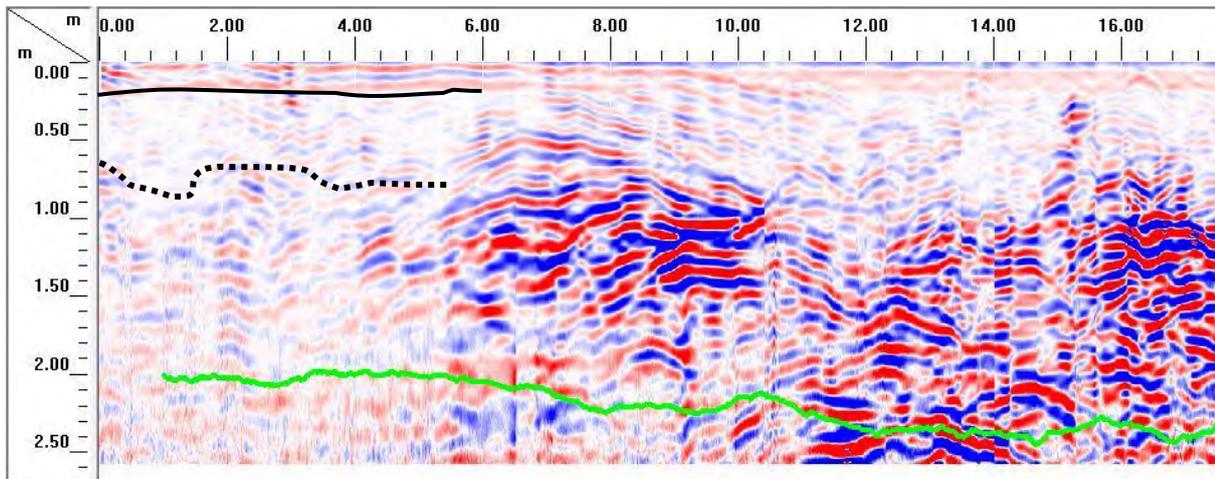


Figura 10. Radargrama da quarta área (P4) , com extensão entre os subpontos A e B. A linha preta contínua indica camada de topsoil; a tracejada, o limite entre a camada de rejeito e a do solo pré-existente; a verde, a profundidade de alcance do sinal.

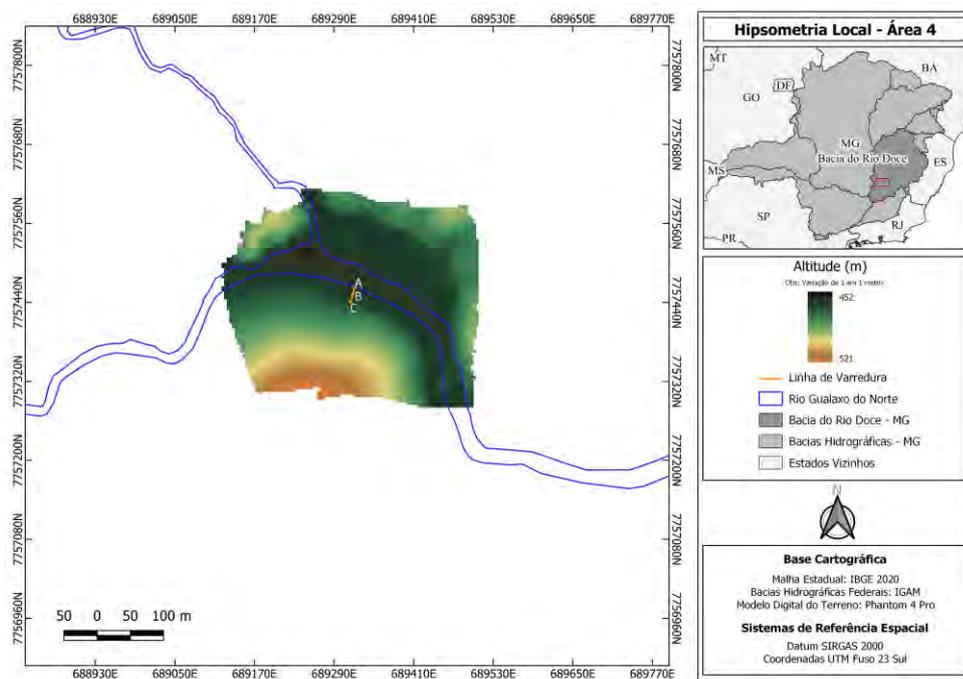


Figura 11. Mapa de hipsometria local (P4) em metros (m).

A quinta linha de varredura apresentou um padrão contínuo, de baixa reflexão do sinal, indicando uma espessura de deposição do rejeito com mais de um metro até os primeiros 14 m de distância da calha do rio e de 1 m até o final do transecto. Além disso, é possível notar a presença de reflexão nos primeiros 10 cm, decorrente do manejo com *topsoil* (Figura 12). A nítida identificação da camada de topsoil é corroborada por Zajicová (2019). A altitude do local (Figura 13), por ser menor que a das áreas adjacentes, pode explicar a maior espessura pela deposição dos rejeitos.

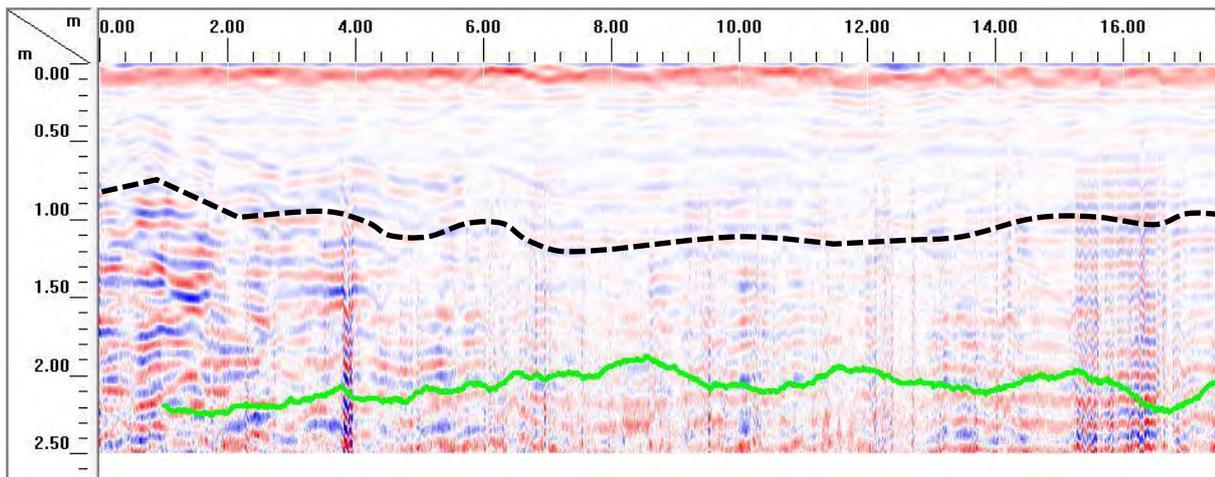


Figura 12. Radargrama da quinta área (P5), com extensão entre os subpontos A e B. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

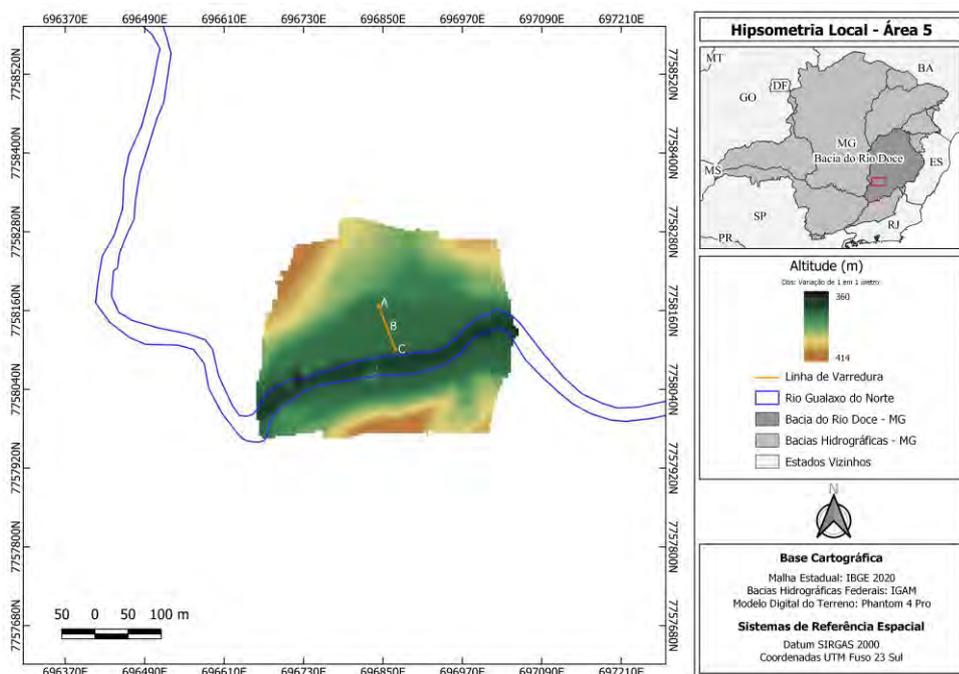


Figura 13. Mapa de hipsometria local (P5) em metros (m).

A varredura da sexta linha apresentou resposta semelhante à linha anterior. O material indica baixa reflexão e talvez fosse necessário aumentar o ganho para ampliar o contraste do sinal. Problemas como esse também foram notados em radargramas por Santos (2019). A deposição apresenta padrão plano, alcançando uma espessura próxima de 1 m (Figura 14). Parece ter um rejeito mais puro do que a linha anterior, graças à menor mistura com outros materiais. A condição hipsométrica do local (Figura 15) assemelha-se à do anterior, porém com meandro mais acentuado no decurso do rio, o que pode explicar a maior deposição quanto mais próximo da calha.

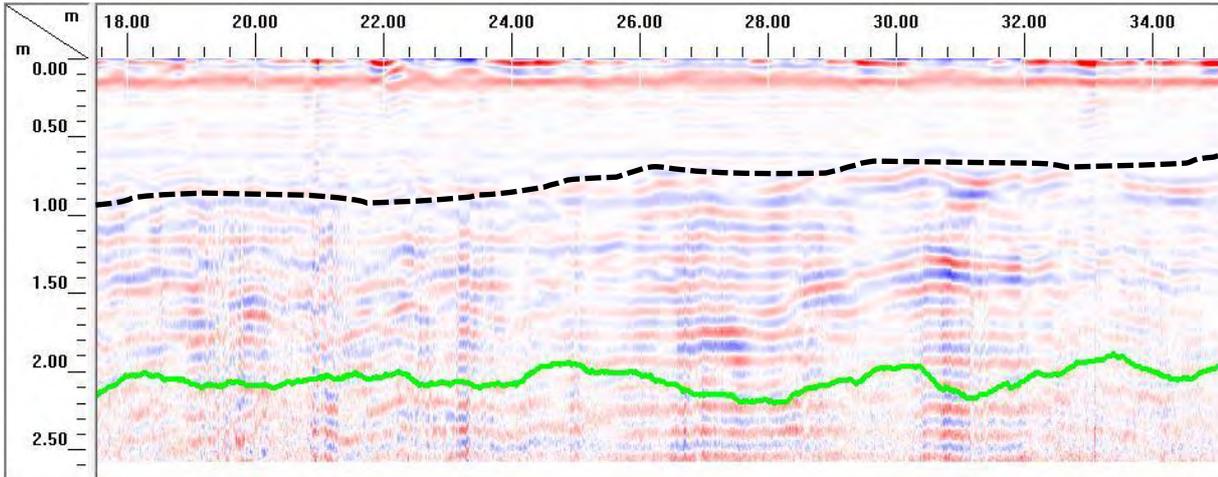


Figura 14. Radargrama da sexta área (P6), com extensão entre os subpontos A e B até 24 m, e B e C no restante. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

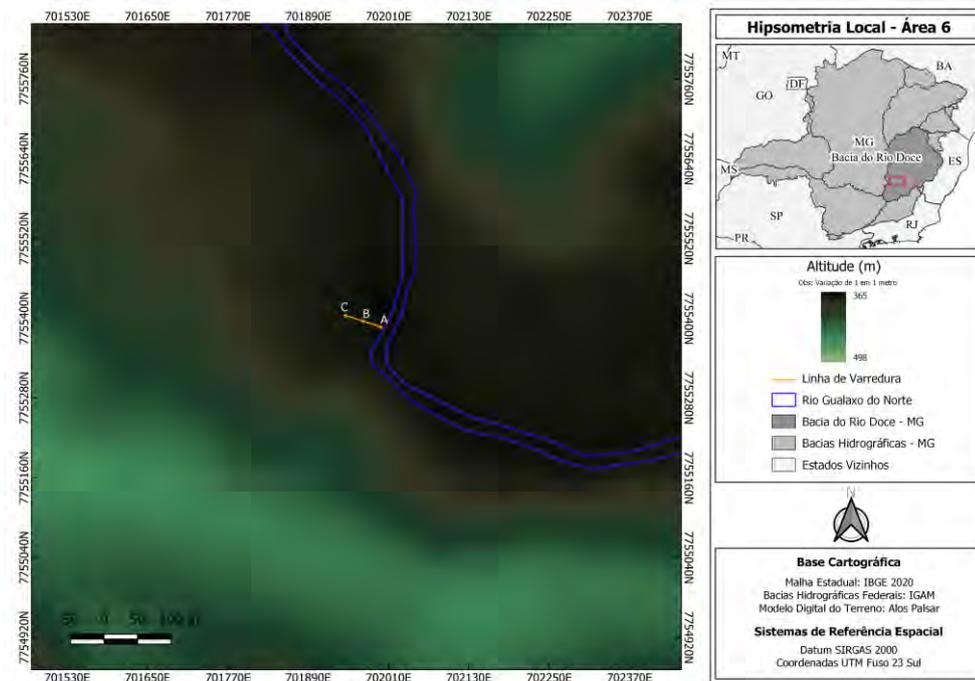


Figura 15. Mapa de hipsometria local (P6) em metros (m).

O próximo radargrama apresenta padrão do que seria típico para a deposição do rejeito na área (Figura 16). Esse exibiu uma espessura mais estreita que os locais anteriores, pois variou em torno de 0,7 m. O material original apresenta forte refletor, provavelmente encontra-se com teor de umidade elevado, além de sedimentação em modo ondulado. Schaefer et al. (2016) também observaram forte distinção entre a camada tecnogênica e o solo original devido à elevada presença de ferro. O mapa hipsométrico (Figura 17) contribui para entender tal condição, já que o decurso do rio é menos sinuoso.

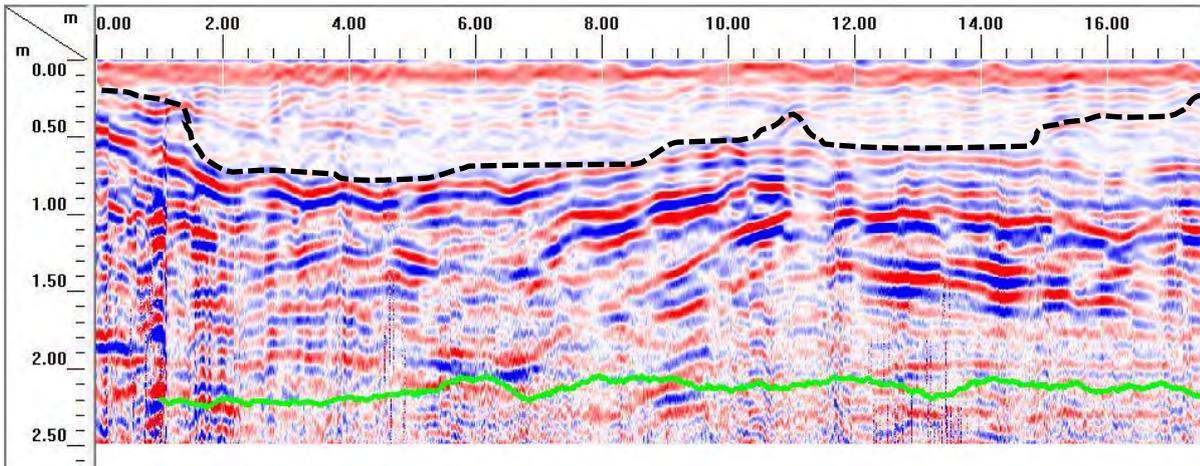


Figura 16. Radargrama da sétima área (P7), com extensão entre os subpontos A e B. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

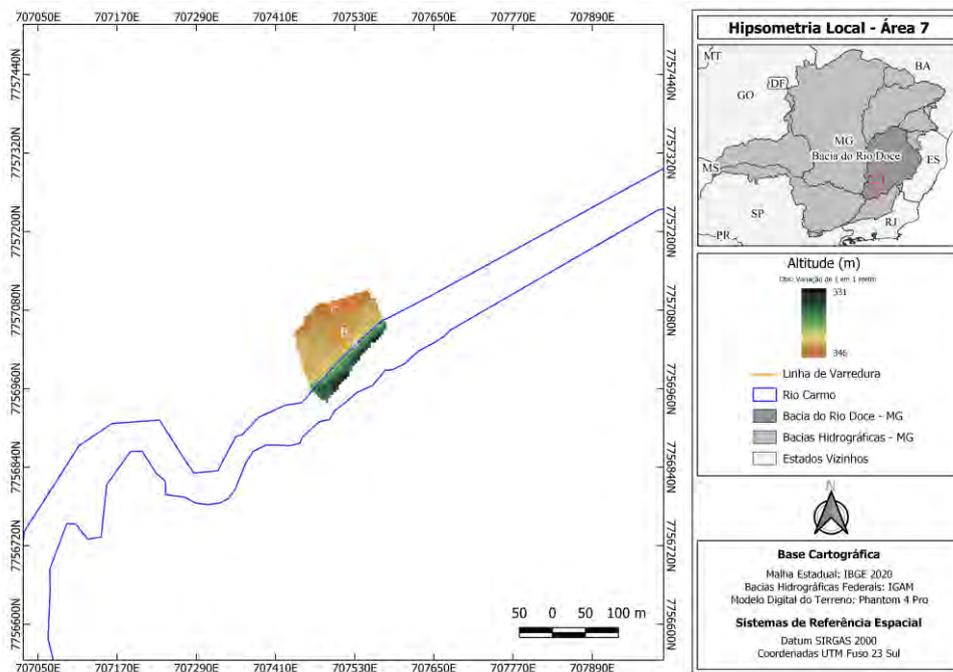


Figura 17. Mapa de hipsometria local (P7) em metros (m).

A oitava linha de varredura apresenta uma estreita camada de rejeito, variando entre 0,4 m a 0,8 m, com padrão de deposição de sedimentos sob regime suave (Figura 18). Esse solo possui um incremento de argila e de matéria orgânica até 30 cm, como apresentado no capítulo anterior, o que é registrado também no radargrama, devido a serem bons refletoras. O mapa hipsométrico do local (Figura 19) contribui para compreender a fina camada de rejeito, já que, no local da coleta, notam-se áreas com menor altitude e menos meandradas.

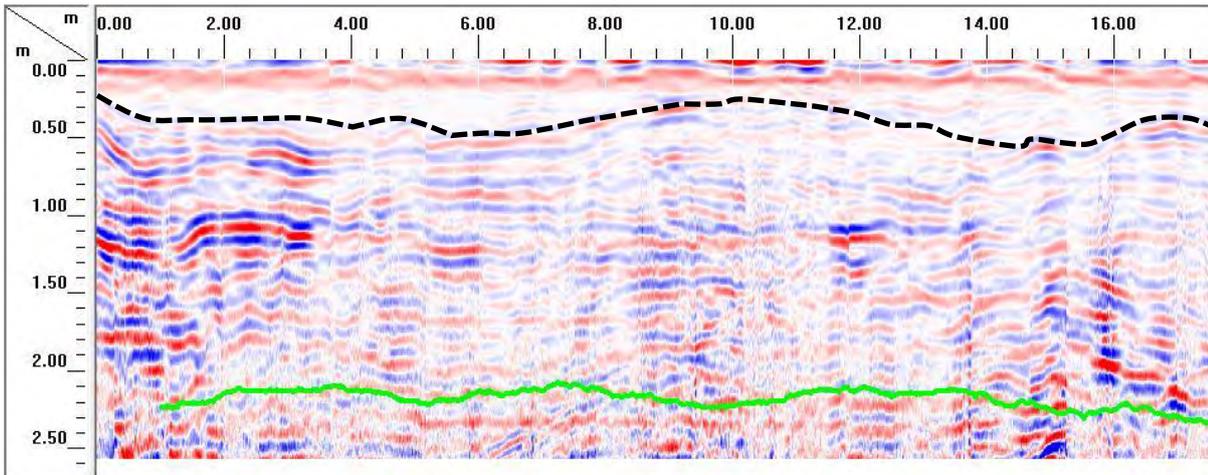


Figura 18. Radargrama da oitava área (P8), com extensão entre os subpontos A e B. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

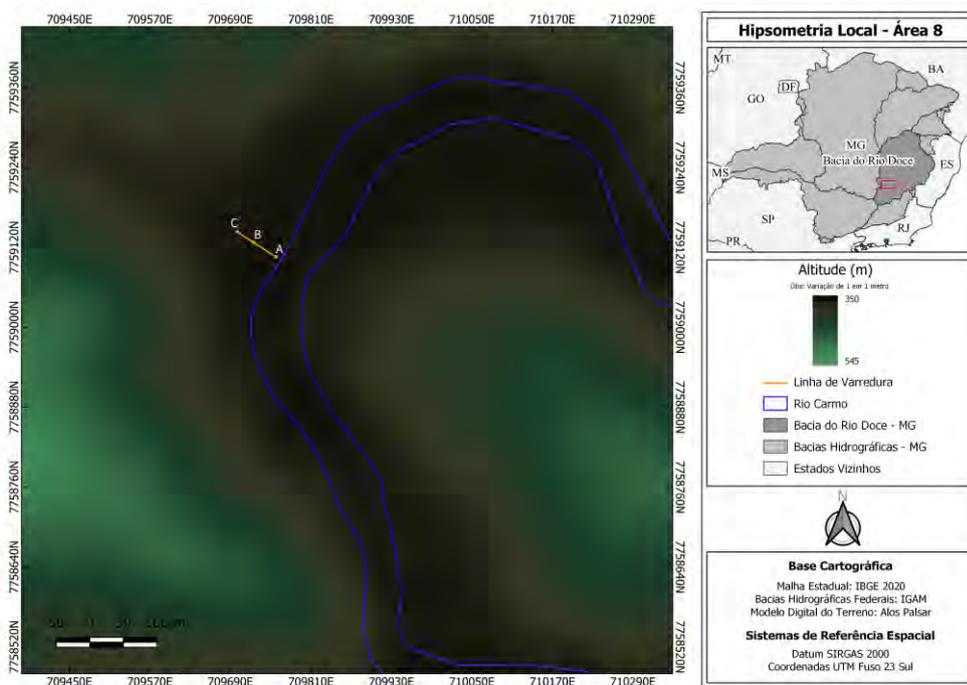


Figura 19. Mapa de hipsometria local (P8) em metros (m).

A nona linha de varredura (Figura 20) apresentou padrão de difícil interpretação. Como mencionado na metodologia, faz-se necessária uma sondagem local para avaliar quais tipos de materiais estão sobrepostos e geraram tal comportamento. Aparentemente, a camada superficial apresenta padrões de solos sem rejeito ou com mistura. Observando imagem de satélite de um mês após o rompimento da barragem, essa área aparentemente não apresenta deposição de rejeito, pois encontra-se em um setor onde o trecho do rio é mais encaixado (Figura 21).



Figura 20. Localização do local de coleta, aparentemente livre da deposição de rejeitos no ponto 9 (esquerda), e um exemplo de área afetada, no ponto 8 (direita), ambas imagens de dezembro de 2015.

Aproximadamente aos 9 m do início da linha de varredura, apresenta um forte refletor que alcança mais de 2 m de profundidade, que provavelmente foi gerado pela presença de formigueiro ou cupinzeiro. O mapa hipsométrico (Figura 22) mostra que a área de menor elevação, juntamente ao decurso pouco sinuoso, facilitou a passagem dos rejeitos, não havendo deposição do rejeito.

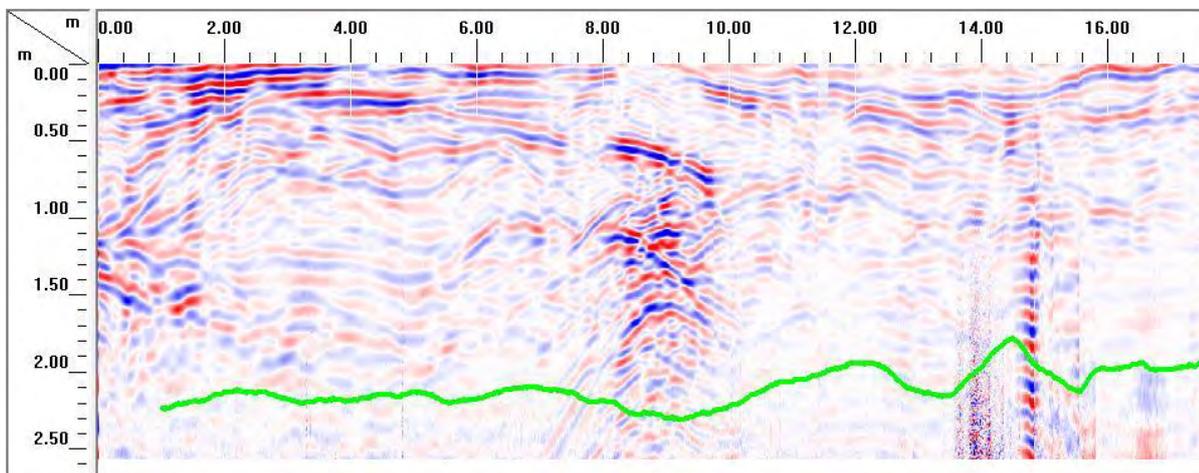


Figura 21. Radargrama da nona área (P9), com extensão entre os subpontos A e B até 10 m, e B e C no restante. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

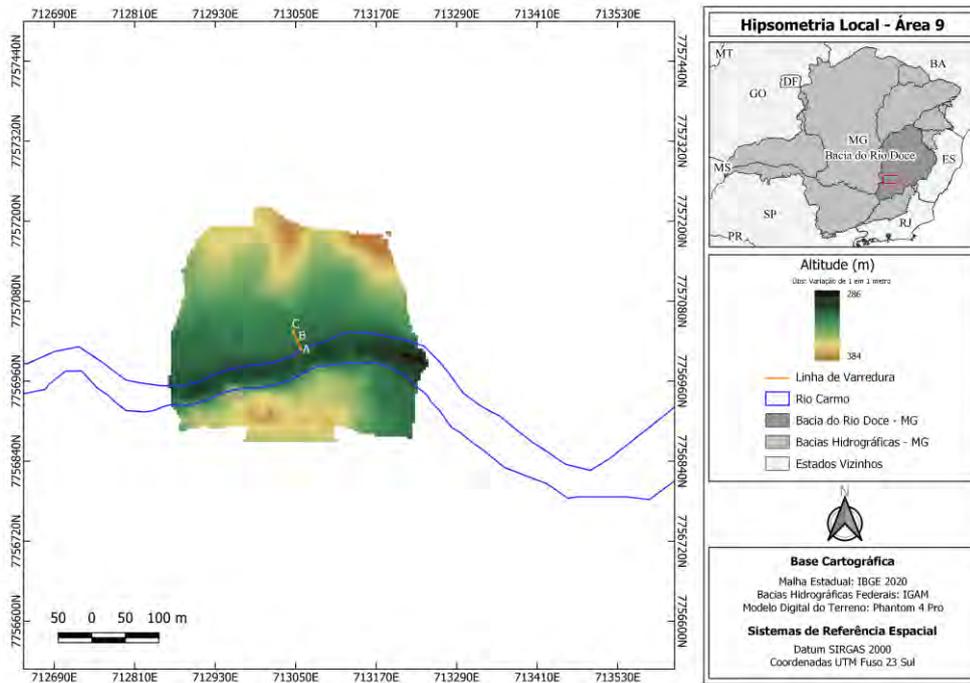


Figura 22. Mapa de hipsometria local (P9) em metros (m).

A linha de varredura 10 aparentemente apresenta padrão típico da presença de sedimentação fluvial, sendo mistura de rejeitos com sedimentos de enchentes pós-rompimento da barragem (Figura 23). A área encontrava-se com material umedecido, pois são observados fortes refletores ao longo de todo o radargrama. O mapa hipsométrico (Figura 24) demonstra local com decurso do rio menos sinuoso, além de maior largura entre os leitos.

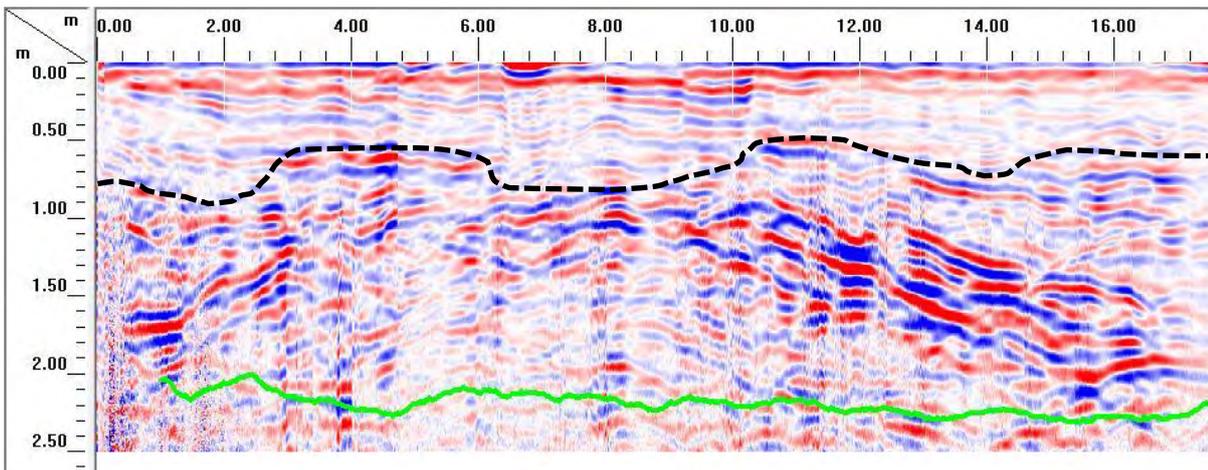


Figura 23. Radargrama da décima área (P10), com extensão entre os subpontos A e B até 10 m, e B e C no restante. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

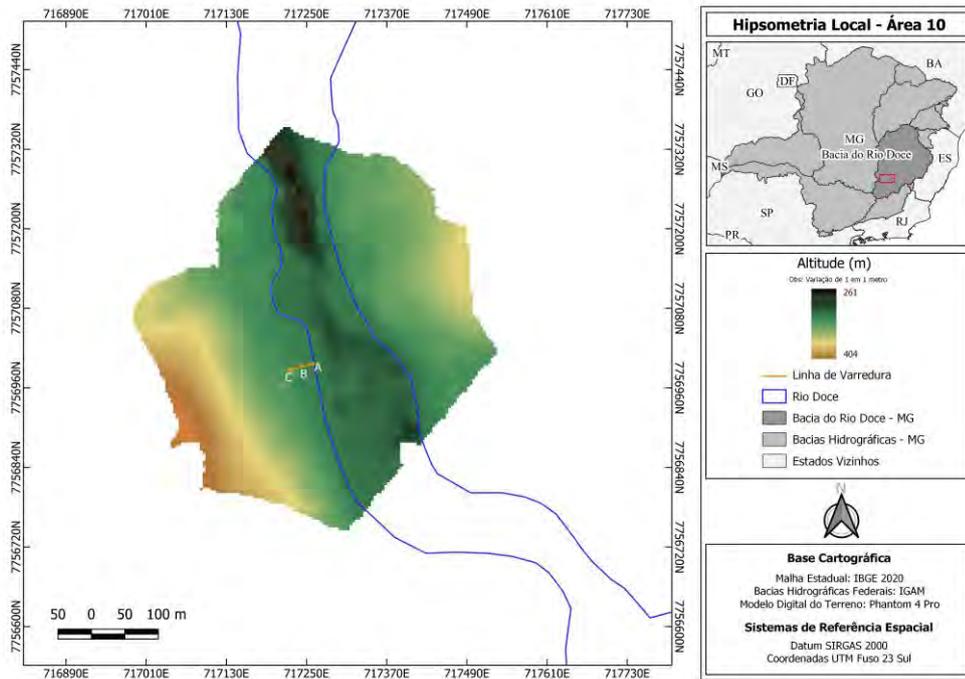


Figura 24. Mapa de hipsometria local (P10) em metros (m).

A 11ª área apresentou comportamento muito semelhante ao da linha de varredura anterior. É uma área muito sujeita a deposições fluviais e aluviais. Apresenta padrão de material enterrado no final da linha. O rejeito encontra-se bem misturado com sedimentos do rio, e essa área também encontrava-se umedecida em todo o perfil no momento da varredura, o que justifica a presença de refletores ao longo de todo o transecto. Presença maior de rejeito parece estar presente do meio para o final da linha, a partir dos 6,1 m, e com espessura de, aproximadamente, 0,8 m, onde surge um padrão de baixa reflexão do sinal (Figura 25). O mapa hipsométrico (Figura 26) demonstra que se trata de uma área de menor elevação, o que, associado ao decurso linear do rio, pode explicar a espessura da camada de rejeitos e maior facilidade com mistura com materiais aluviais.

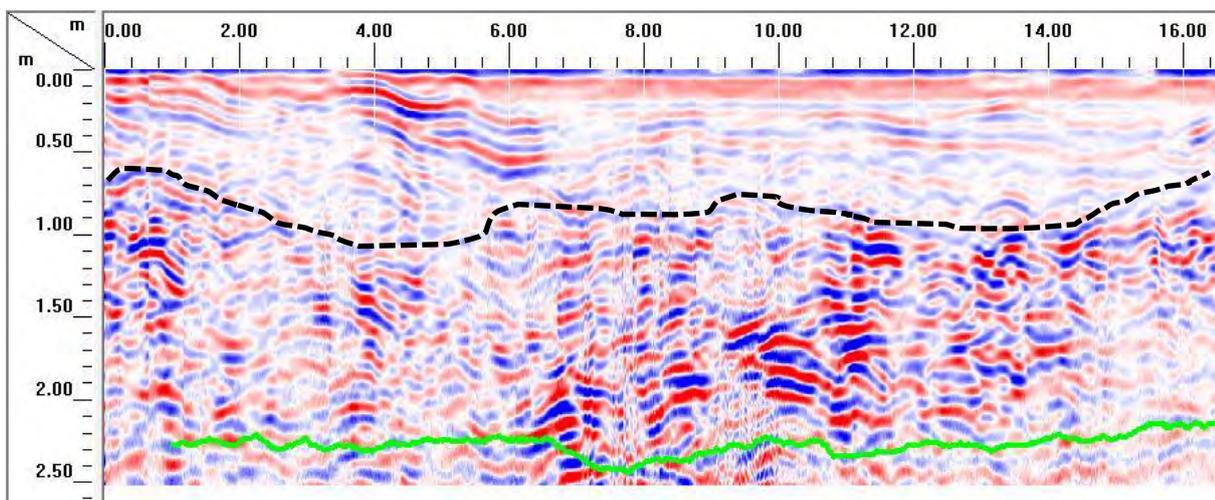


Figura 25. Radargrama da décima primeira área (P11), com extensão entre os subpontos A e B até 13 m, e B e C no restante. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

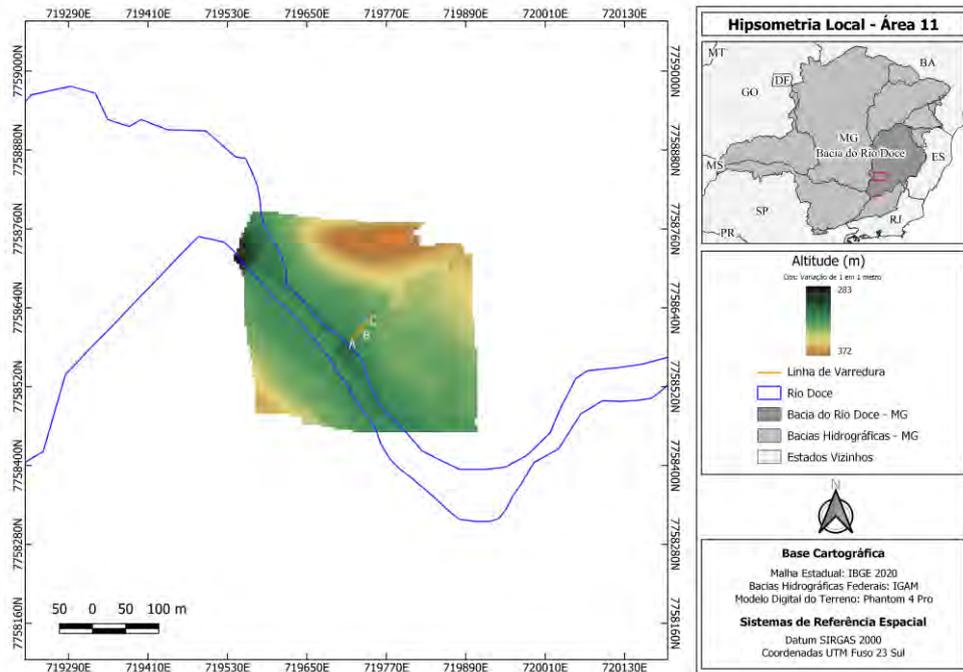


Figura 26. Mapa de hipsometria local (P11) em metros (m).

Já o radargrama da 12ª área (Figura 27) apresentou o padrão que seria mais típico para a situação de deposição de rejeito em terraço fluvial, característico de área de inundação sazonal, com uma camada que inicia à profundidade de 1 m e vai se estreitando à medida que se distancia da margem, alcançando 0,6 m no final da linha. Abaixo dessa camada de rejeito, observa-se um forte refletor correspondente ao material original, com elevada umidade. O mapa hipsométrico (Figura 28) repete padrão já mencionado quanto à situação de menor elevação, o que promove facilidade para a mistura com materiais aluviais, além da deposição do rejeito graças à linearidade do decurso do rio.

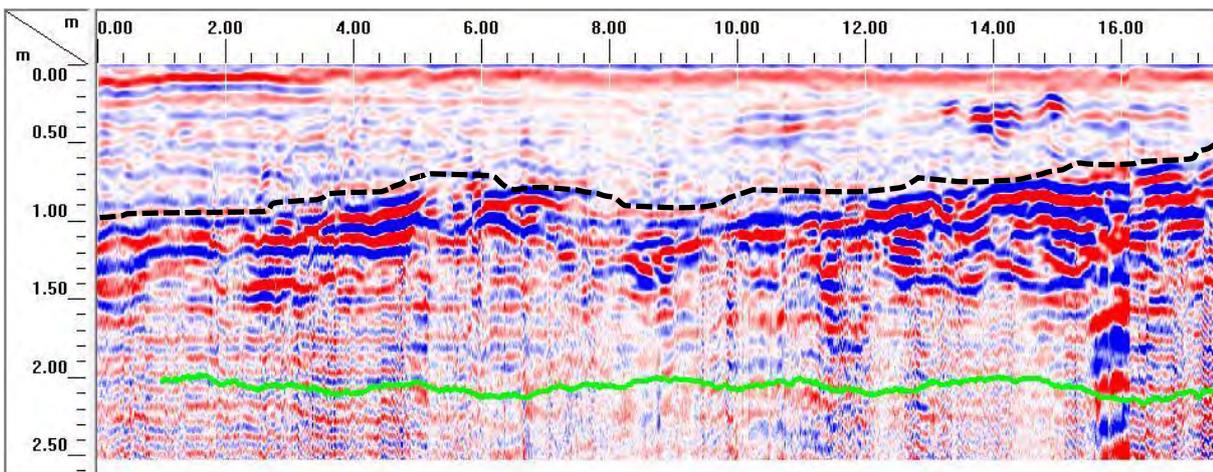


Figura 27. Radargrama da décima segunda área (P12), com extensão entre os subpontos A e B até 6 m, e B e C no restante. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

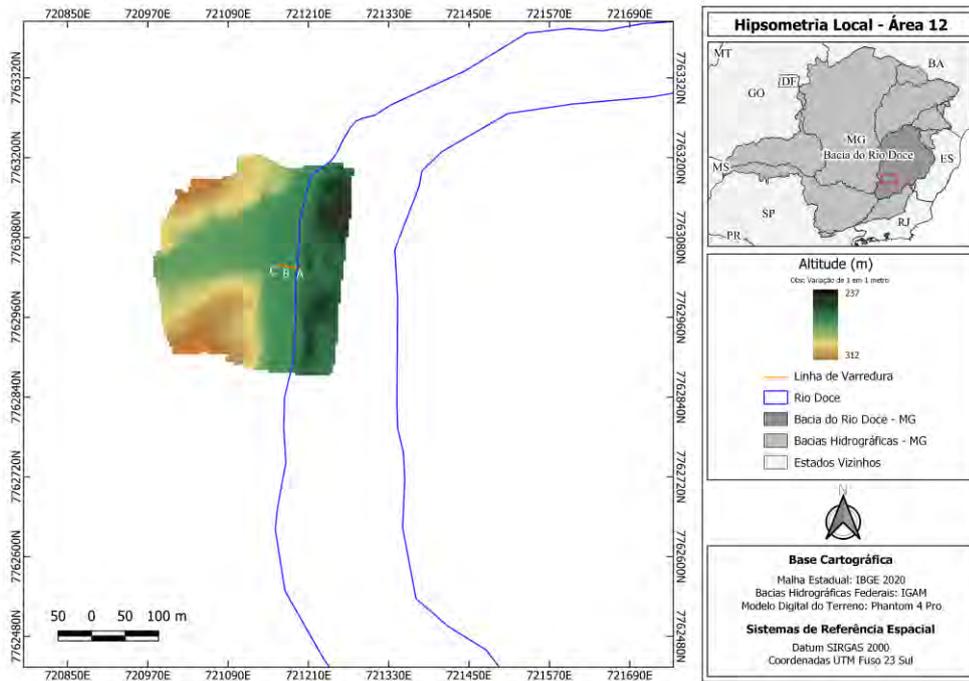


Figura 28. Mapa de hipsometria local (P12) em metros (m).

A 13ª apresenta, aparentemente, uma estreita faixa (até 6 m do início da linha) com forte presença de rejeito, com uma espessura de aproximadamente 0,8 m. Nota-se um forte refletor na superfície dessa faixa. A partir desse ponto, observa-se um material com o mesmo padrão daquele que estava abaixo do rejeito nessa faixa inicial, compreendendo o material original do terreno (Figura 29). Também apresenta padrão de material fluvial (no início da linha) e aluvial enterrado do meio para o final da linha. Como visto no capítulo anterior, esse local concentra os maiores teores de Fe, com média superior a 1.400 mg/dm³. As intervenções antropogênicas nas adjacências mais elevadas do terreno podem explicar a incidência de sedimentos aluviais nas partes mais íngremes do terreno, como se pode notar pelo mapa hipsométrico do local (Figura 30).

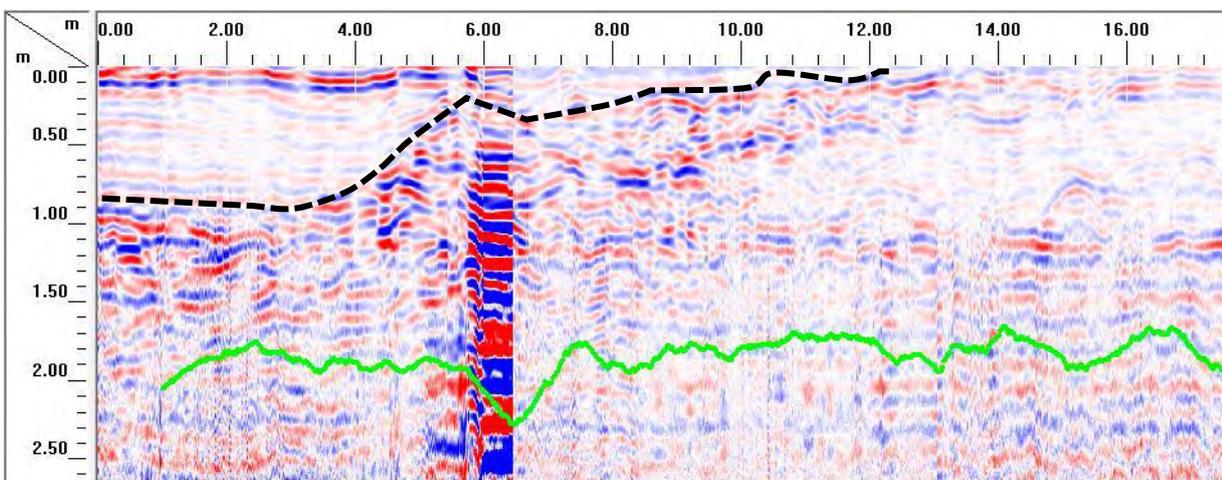


Figura 29. Radargrama da décima terceira área (P13), com extensão entre os subpontos A e B até 10 m, e B e C no restante. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

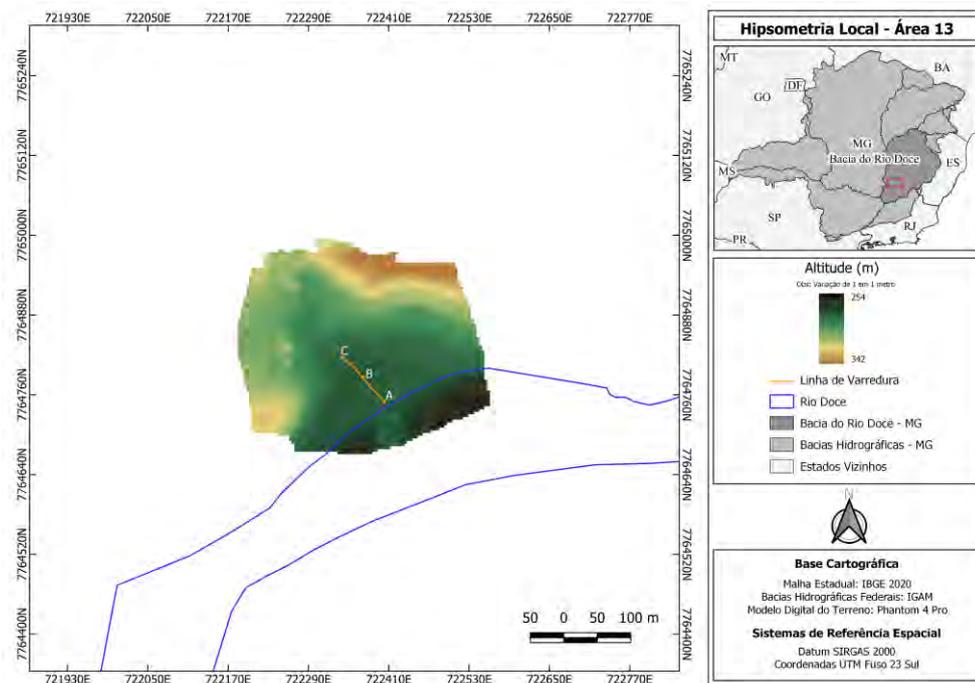


Figura 30. Mapa de hipsometria local (P13) em metros (m).

Na última área, observam-se forte refletores, comuns em quase todo o radargrama, com padrão de deposição fluvial (padrão ondulado) (Figura 31), com ausência de rejeito puro, perceptível pela maior reflexão apresentada no radargrama. O mesmo deve estar misturado com sedimentos do rio Doce já oriundo de enchentes pós-rompimento. Ao se associar tal resultado com a hipsometria local (Figura 32), nota-se relevante sinuosidade do rio, além de variação altimétrica da margem em relação às partes mais afastadas, o que pode explicar a mistura de sedimentos fluviais com os rejeitos tecnogênicos na maior parte do transecto.

Este local apresentou os maiores teores de argila entre os estudados, conforme capítulo anterior. Além do fato de a argila reter maior umidade, o que influencia no radargrama, ela deve ser considerada devido a servir como barreira ao deslocamento das ondas eletromagnéticas, havendo maior dispersão energética, o que implica a atenuação do sinal, ou seja, quanto maior a quantidade de argila, menor será a profundidade de penetração do sinal emitido (CEZAR et al., 2010).

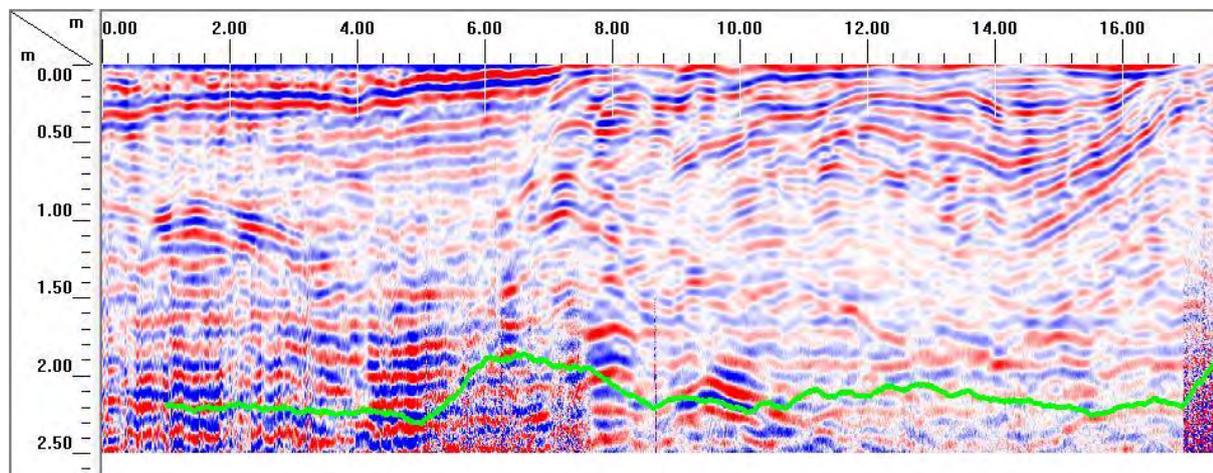


Figura 31. Radargrama da décima quarta área (P14), com extensão entre os subpontos A e B

até 10 m, e B e C no restante. A linha verde indica a profundidade de alcance do sinal.

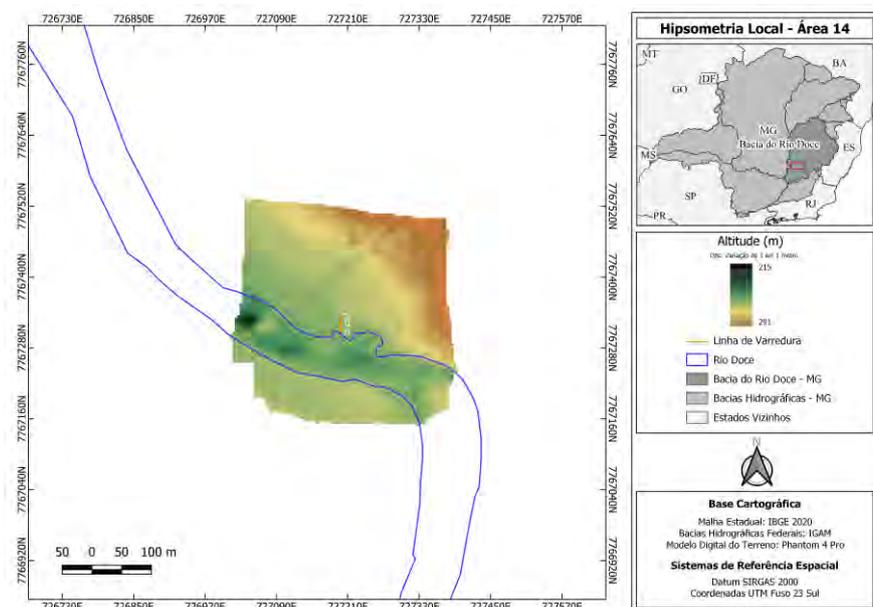


Figura 32. Mapa de hipsometria local (P14) em metros (m).

Isso se confirma ao se observarem as variações de profundidade estimadas por meio do uso do GPR, depreendendo-se tais diferenças como resultados dos trechos com curvas mais acentuadas nas planícies aluviais, dado que são mais profundas as camadas à medida que há maior sinuosidade no decurso dos rios, ou seja, os pontos P3, P6 e P13 são áreas mais meandradas.

Tabela 2: Espessuras estimadas da camada de rejeito com uso do GPR em metros (m).

<i>Linha</i>	<i>Profundidade estimada (m)</i>	<i>Tipo de Feição do rio</i>	<i>Linha</i>	<i>Profundidade estimada (m)</i>	<i>Tipo de Feição do Rio</i>
1	0,6	Reta	8	0,4 a 0,8	Reta
2	0,8	Reta	9	0	Reta
3	1,0	Meandro	10	0,5	Reta
4	0,7 a 1,0	Reta	11	0,6	Reta
5	1,1	Reta	12	0,6 a 1,0	Reta
6	1,0	Meandro	13	0,8	Meandro
7	0,7	Reta	14	Variável	Reta

4 CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados da espessura da camada dos rejeitos Tecnossolos das planícies fluviais dos rios afetados pela deposição de rejeitos de mineração de ferro, verificou-se que as espessuras da camada de rejeito tecnogênico variaram ao longo de toda a área de estudo e, considerando-se os transectos, a camada de rejeito é verificada mais em A e B que

em C. Compreende-se a variabilidade em distância da área-fonte como resultado da disposição do local em relação à distância e altitude dos terraços em relação ao leito do rio, tendo os locais mais meandrados a maior expressão de sedimentos misturados ao rejeito, bem como os mais profundos, visto que sinuosidades mais acentuadas contribuíram para a diminuição da velocidade do fluxo da avalanche de rejeitos na data do evento. A variação dentro do transecto pode ser entendida como decorrente da deposição dos rejeitos pela altitude local, sendo A e B áreas mais baixas que C e, por conseguinte, com maior presença de rejeitos. Em muitos locais foram observados superficialmente materiais de misturas de rejeitos com sedimentos fluviais oriundos de períodos de enchentes, ação favorecida pela menor altitude dos terraços. A deposição do rejeito não ocorreu de forma plana, mas acompanhou as variações da superfície remanescente, ou seja, no momento da passagem da “onda de lama”, a retirada do material superficial original foi irregular ao longo da área de estudo.

Por fim, é possível reconhecer a eficiência do GPR na identificação da espessura da camada tecnogênica enquanto método não destrutivo, podendo ser replicado para o monitoramento dessa característica, especialmente para acompanhamento da evolução dos Tecnossolos ao longo da bacia hidrográfica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Antropoceno, entende-se que as tentativas humanas de controlar a natureza com relação a seus recursos naturais, explorando-os sem limites determinados e respeitados, em suma, estão estreitamente relacionadas à geração de desastres ambientais, especificamente os antrópicos. A atividade minerária ilustra tal relação, ao se observarem os inúmeros casos de rompimento de barragens de rejeitos minerários ao longo da história moderna, sendo bastante intensificados no último século.

Com o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana-MG, geraram-se prejuízos ambientais, sociais, econômicos e culturais, muitos dos quais sendo financeiramente irreparáveis, dadas as inúmeras perdas materiais, mas também imateriais. Este trabalho apresentou um diagnóstico químico, físico e geofísico da situação atual dos novos solos formados pelos rejeitos tecnogênicos da barragem nos terraços fluviais, denominados Tecnossolos, cinco anos após o desastre socioambiental. Trabalhos com essa finalidade são fundamentais para o monitoramento dessas áreas ao longo do tempo e para a compreensão da evolução de tais solos, sobre cujas características e classificação ainda não há sistematização consolidada no sistema referencial brasileiro de solos.

Espera-se, portanto, que este estudo sirva como arcabouço não só para futuras pesquisas nas referidas áreas, como também subsidie a adoção e implementação de políticas públicas e, principalmente, privadas para a mitigação das consequências negativas que ainda possam ser revertidas, retornando minimamente a dignidade à população atingida e, é claro, o equilíbrio dos ecossistemas afetados.

6 REFERÊNCIAS

ANA. Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce Rompimento da Barragem em Mariana/MG. **Cunjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, v. 1, p. 1–50, 2016.

CALACHIBETE, C. et al. Análise da Eficiência do GPR na Determinação da Espessura de Ocorrências de Manganês nos Municípios de Guiratinga e Tesouro, Mato Grosso – Brasil
Analysis of the Efficiency of GPR in Determining the Thickness of Manganese Occurrences

in the Municipality. **Anuário IGEO - UFRJ**, v. 42, p. 154–163, 2019.

CANDIDO, A. K. A. A.; ENCINA, C. C. C.; SCHLICHTING, A. F.; HAUPENTAL, M. R.; FILHO, A. C. P.; JÚNIOR, J. M.; DA SILVA, N. M. Modelo Digital de Superfície gerado a partir de imagens de VANT. **Anais 5º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Campo Grande, p. 203-303, 2014.

CEZAR, E. et al. Uso de sistema GPR (Ground Penetrating Radar) na avaliação de atributos de um solo sob plantio de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 291–298, 2010.

CPRM. **Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana - Folha SF.23-XB-1** Estado de Minas Gerais Escala 1:100.000, , 1993.

ESPINDOLA, H. S. et al. Desastre da Samarco no Brasil: Desafios para a conservação da biodiversidade. **Fronteiras**, v. 5, n. 3, p. 72–100, 2016.

GSSI. **Manual 135 do usuário - Radan 7**. 2003.

DE LIMA et al., 2020. R.E. de Lima, J. de Lima Picanço, A.F. da Silva, F.A. Acordes. **An anthropogenic flow type gravitational mass movement: the Córrego do Feijão tailings dam disaster, Brumadinho, Brazil**. *Landslides* (2020), pp. 1-12, 10.1007/s10346-020-01450-2

MARTINELLI, Nayara. Caracterização física e hidrológica da bacia do rio Gualaxo do Norte. 2017. 84 f. **Monografia** (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/1194>. Acesso em março de 2020.

MARTINI, R.J., 2014. Aplicação do Ground Penetrating Radar em estudos para disposição de rejeitos de minério de ferro. **CEFET**. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4735.7281>

OLIVEIRA, A. M. S. **Depósitos tecnogênicos e assoreamento de reservatórios: exemplo do reservatório de Capivara, Rio Paranapanema, SP/PR**. 1994. 2 v. São Paulo. Tese (Doutorado em Geografia) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, 1994.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. **Updated World Map of the Koppen-Geiger Climate Classification Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification**. n. June 2014, 2007.

PEDRAS, K. C. et al. **Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais**. v. 14, 2017.

PEDREIRA, Wallace John Pereira. Avaliação da acurácia altimétrica de mapeamento topográfico usando VANT. 2017. UFRB, p. 58. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Disponível em:

https://www2.ufrb.edu.br/bcet/components/com_chronoforms5/chronoforms/uploads/tcc/20190423153959_2017.1_-_TCC_Wllace_John_Pereira_Pedreira_-_Avaliao_da_Acurcia_Altimtrica_de_Mapeamento_Topografico_Usando_Vant.pdf. Aceso em 20 de abril de 2021.

PORSANI, J. L.; SAUCK, W. A. Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks : Artifact removal through effective data processing. **Geophysics**, v. 72, n. November, p. 8, 2007.

SANTOS, E. E. DOS. Diagnóstico e monitoramento dos Tecnosolos de rejeito de mineração de ferro da barragem de Fundão por meio de técnicas remotas e proximais de inspeção do solo. **Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, UFV**, p. 138–155,

2019.

SARAIVA, C. M.; FERREIRA, P. T. M. A Lama da Samarco e o Crime Corporativo : uma reflexão necessária. **Administração Pública e Gestão Social**, v. 9, n. 2, p. 75–83, 2018

MARTINI, R. **Aplicação do Ground Penetration Radar em estudos para disposição de rejeitos de minério de ferro**. n. March 2014, 2015.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E. FILHO, E. I. F.; ASSIS, I. . Paisagens de Lama: Os Tecnossolos 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, n. March, 2016.

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

SOUZA, M. M. Uso do Georadar (GPR) em investigações ambientais. Dissertação de Mestrado. **PUC-Rio**, p. 120, 2005.

ZAJÍCOVÁ, K.; CHUMAN, T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. **Geoderma**, v. 343, n. March 2018, p. 116–129, 2019.