

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

**Tecnossolos do trecho afetado por rejeitos de mineração na bacia do Rio
Doce: modelagem, evolução e monitoramento**

Pedro Henrique Araújo Almeida
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

PEDRO HENRIQUE ARAÚJO ALMEIDA

**Tecnossolos do trecho afetado por rejeitos de mineração na bacia do Rio
Doce: modelagem, evolução e monitoramento**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Marcio Rocha Francelino

Coorientador: Carlos E. G. R. Schaefer

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A447t
2024 Almeida, Pedro Henrique Araújo, 1989-
Tecnossolos do trecho afetado por rejeitos de mineração na
Bacia do Rio Doce: modelagem, evolução e monitoramento /
Pedro Henrique Araújo Almeida. – Viçosa, MG, 2024.
1 tese eletrônica (140 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Márcio Rocha Francelino.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Solos, 2024.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2024.814>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Análise - Doce, Rio, Bacia (MG e ES).
2. Rejeitos (Metalurgia) - Fundão, Barragem de (MG).
3. Mapeamento digital. 4. Solos - Processamento de dados.
5. Sistemas de informação geográfica. 6. Aprendizado do computador. I. Francelino, Márcio Rocha, 1966-.
- II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
- III. Título.

CDD 22. ed. 631.4098151

PEDRO HENRIQUE ARAÚJO ALMEIDA

Tecnossolos do trecho afetado por rejeitos de mineração na bacia do Rio Doce: modelagem, evolução e monitoramento

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de fevereiro de 2024.

Assentimento:

Pedro Henrique Araújo Almeida
Autor

Marcio Rocha Francelino
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pelo autor em 11/12/2024 às 18:27:39 e pelo orientador em 26/12/2024 às 12:07:05. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **3GFE.UIQH.9AYN** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha profunda gratidão à minha família, cujo apoio incondicional e compreensão foram pilares essenciais ao longo desta trajetória. Suas palavras de estímulo e amor foram a força motriz que impulsionou cada passo deste percurso.

Quero também estender meus agradecimentos aos professores do departamento, em especial os professores Márcio Francelino, Elpídio e Carlos Schaefer, cuja dedicação ao ensino e à pesquisa inspiraram meu desenvolvimento acadêmico. Seus conselhos foram fundamentais para a construção do conhecimento e aprimoramento das habilidades necessárias para a conclusão da minha formação acadêmica.

Às amigades que se formaram ao longo desta caminhada, em especial amigos de Labgeo e repúblicas de Viçosa por onde passei, meu sincero agradecimento. O apoio mútuo e as trocas de experiências enriqueceram não apenas minha vida acadêmica, mas também meu crescimento pessoal.

À comunidade de funcionários da Universidade Federal de Viçosa, minha gratidão pelos serviços essenciais que tornaram possível meu percurso acadêmico.

Aos amigos de WSP/Golder, agradeço por compartilharem não apenas seus conhecimentos técnicos, mas também por proporcionarem um ambiente de trabalho colaborativo e motivador. As trocas de conhecimento enriqueceram minha experiência profissional e contribuíram para a qualidade dos resultados alcançados.

À Fundação Renova, expresso minha gratidão pela disponibilização dos dados utilizados nesse estudo.

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

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. Seu apoio e colaboração foram fundamentais para a concretização desta jornada, e por isso, cada um de vocês tem um lugar especial em meu coração. Muito obrigado.

RESUMO

ALMEIDA, Pedro Henrique Araújo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2024. **Tecnossolos do trecho afetado por rejeitos de mineração na bacia do Rio Doce: modelagem, evolução e monitoramento.** Orientador: Marcio Rocha Francelino. Coorientador: Carlos Ernesto Goncalves Reynaud Schaefer.

O rompimento da barragem de Fundão, em novembro de 2015, representa um marco trágico na história ambiental e social do Brasil. Localizada em Mariana, Minas Gerais, a barragem liberou 43 milhões de m³ de rejeitos de mineração de ferro, afetando vastas áreas ao longo do rio Doce. Este evento desencadeou uma das maiores catástrofes ambientais do país e levantou questões cruciais sobre a gestão de resíduos industriais, os impactos socioeconômicos nas comunidades locais e a sustentabilidade das práticas de mineração. Compreender a magnitude desse desastre evidencia a necessidade de análises aprofundadas sobre suas causas, consequências e lições aprendidas. Esta pesquisa visa explorar a evolução do ambiente, examinar as repercussões imediatas e de longo prazo nos ecossistemas e comunidades afetadas, a partir da análise dos solos presentes nesses locais. Para isso, o estudo foi dividido em três capítulos. O primeiro capítulo teve o objetivo de realizar uma caracterização físico-química dos tecnossolos assentados sobre áreas ao longo do rio Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, a partir de uma ampla base de dados de perfis de solos. O segundo capítulo teve o objetivo de espacializar a textura do solo através de técnicas de mapeamento digital de solos, propondo modelos para as condições de pré e pós-rompimento, e situação atual. Foi desenvolvido o primeiro mapeamento digital de solo na área afetada pelo rompimento, gerando mapas texturais com alta resolução espacial. Modelos mais precisos foram obtidos na modelagem pós-rompimento, destacando a importância da homogeneidade do material e da delimitação da mancha de lama. Na modelagem pré-rompimento, as variáveis topográficas foram cruciais, e na situação atual, a distância euclidiana à drenagem ressurgiu como fundamental, indicando o reestabelecimento dos diques aluvionares. O terceiro capítulo investigou as relações entre a textura e concentração de metais em solos na região do alto e médio rio Doce. A distribuição dos elementos químicos analisados em solos de planícies aluviais do rio Doce foi influenciada pela granulometria, evidenciando uma forte correlação entre silte e argila e as concentrações desses elementos.

Palavras-chave: modelagem ambiental, aprendizado de máquina, tecnossolos

ABSTRACT

ALMEIDA, Pedro Henrique Araújo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2024. **Tecnosols from the section affected by mining waste in the Doce River basin: modeling, evolution and monitoring.** Adviser: Marcio Rocha Francelino. Co-adviser: Carlos Ernesto Goncalves Reynaud Schaefer.

The collapse of the Fundão dam in November 2015 marks a tragic milestone in Brazil's environmental and social history. Located in Mariana, Minas Gerais, the dam released 43 million m³ of iron mining waste, affecting vast areas along the Doce River. This event triggered one of the country's largest environmental disasters and raised crucial questions about industrial waste management, the socioeconomic impacts on local communities, and the sustainability of mining practices. Understanding the magnitude of this disaster highlights the need for in-depth analyses of its causes, consequences, and lessons learned. This research aims to explore environmental evolution, examine the immediate and long-term repercussions on ecosystems and affected communities, based on soil analysis in these areas. For this, the study was divided into three chapters. The first chapter aimed to perform a physicochemical characterization of technosols settled over areas along the Gualaxo do Norte, Carmo, and Doce rivers, based on a comprehensive soil profile database. The second chapter aimed to spatialize soil texture through digital soil mapping techniques, proposing models for pre- and post-collapse conditions, and the current situation. The first digital soil mapping in the area affected by the collapse was developed, generating high-resolution spatial texture maps. More accurate models were obtained in post-collapse modeling, highlighting the importance of material homogeneity and the delineation of the mud stain. In pre-collapse modeling, topographic variables were crucial, and in the current situation, the Euclidean distance to drainage re-emerged as fundamental, indicating the re-establishment of alluvial dikes. The third chapter investigated the relationships between texture and metal concentration in soils in the upper and middle Doce River region. The distribution of chemical elements analyzed in floodplain soils of the Doce River was influenced by granulometry, showing a strong correlation between silt and clay and the concentrations of these elements.

Keywords: environmental modeling, machine learning, technosols

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	8
REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS	9
CAPÍTULO 1.....	10
Resumo.....	10
Abstract	12
1. Introdução	14
2. Materiais e métodos	16
2.1 Área de estudo.....	16
2.2 Características gerais dos solos avaliados.....	18
2.3 Preparação dos dados	19
2.4 Avaliação estatística.....	20
3. Resultados	21
3.1. Descrição de acordo com AQP	21
3.2.2 Tecnossolos e solos de áreas não afetadas	38
3.3 Análise multivariada dos dados.....	41
3.3 Análise de similaridade de Perfis	46
4. Discussão	49
5. Conclusão.....	51
6. Referências bibliográficas.....	51
CAPÍTULO 2.....	55
Resumo.....	55
Abstract	56
1. Introdução	57
2. Materiais e métodos	59
2.1 Área de estudo.....	59
2.2 Base de dados de solos	61
2.3 Covariáveis ambientais do ‘ <i>Scorpan</i> ’	62
2.4 Preparação de dados	65
2.5 Seleção de preditores.....	67
2.6 Algoritmo de <i>machine learning</i>	68
2.7 Teste do modelo	68
2.8 Previsão e incerteza.....	69
3. Resultados	70

3.1	Caracterização dos conjuntos de dados	70
3.2	Seleção e importância de preditores	73
3.3	Desempenho dos modelos	76
3.4	Previsão e mapeamento	79
3.4.1	Textura do solo	79
3.4.2	Densidade do solo em distintos cenários.....	89
4.	Discussão	96
4.2	Distribuição textural ao longo da área de estudo	98
4.2.1	Silte.....	99
4.2.2	Argila.....	100
4.2.3	Areia Fina.....	100
4.3	Densidade do solo	102
4.4	Modelo de evolução dos ambientes estudados.....	104
5	Conclusões	108
6	Referências bibliográficas.....	108
CAPÍTULO 3		113
Resumo.....		113
Abstract		114
1	Introdução	115
2	Materiais e Métodos.....	116
2.1	Área de estudo	116
2.3	Base de solos utilizada	118
2.3	Avaliação estatística	120
3	Resultados	121
3.1	Análise descritiva da granulometria dos solos	121
3.2	Análise descritiva dos teores de metais no solo	122
3.3	Avaliação dos testes de Correlação	124
3.4	Classificação dos perfis em grupos – Análise de clusters.....	125
3.5	Análise de Componentes Principais.....	132
4	Discussão	134
5	Conclusão.....	137
6	Referências Bibliográficas	138

INTRODUÇÃO GERAL

O desenvolvimento sustentável e a conservação dos recursos naturais têm sido temas centrais no debate científico e político nas últimas décadas. No Brasil, um país de dimensão continental com uma diversidade ecológica e geológica, esses desafios ganham contornos ainda mais complexos, especialmente em áreas de intensa exploração mineral, como a bacia do Rio Doce. A região é caracterizada pela presença de inúmeras empresas de mineração, o que potencializa os riscos de acidentes ambientais. O solo por muitas vezes é a matriz mais impactada, conforme evidenciado com o rompimento da barragem de Fundão no ano de 2015.

Esse trágico acidente introduziu na bacia do alto rio doce um novo contexto ambiental, introduzindo os chamados Tecnossolos (Schaefer et al., 2015). Esses solos são solos fortemente modificados pela ação humana, em particular pela mineração, que alteram não apenas a paisagem, mas também os ciclos hidrológicos e biogeoquímicos, a biodiversidade e o uso do solo, uma vez que foram introduzidos no sistema por fonte externa (Echevarria & Morrel, 2015).

A modelagem, o monitoramento e a análise da evolução dos Tecnossolos são etapas cruciais para identificar padrões de degradação e recuperação (Leguédouis, 2016), bem como para prever suas implicações futuras. A integração de técnicas de sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas (SIG), e metodologias de monitoramento em campo permitem uma abordagem holística e detalhada da dinâmica desses solos, além de fornecer informações cruciais para tomadas de decisão.

Este trabalho teve como objetivo principal estudar os Tecnossolos da bacia do Alto Rio Doce, utilizando ferramentas de modelagem e monitoramento para analisar suas características, distribuição e evolução ao longo do tempo. No capítulo 1 é explorada a diversidade dos Tecnossolos do Alto Rio Doce, formados em diferentes contextos hidrogeomorfológicos, levando em consideração a variabilidade espacial em relação à distância do local do rompimento da barragem, além de serem realizadas avaliações de solos não afetados pelo rejeito da mineração. As análises incluíram testes de correlações de Spearman, avaliações de componentes principais (PCA) e análises de cluster com base em dados físico químicos que pudessem ser usadas para categorizar os dados.

No capítulo 2 foi realizado um mapeamento digital de solos, a partir de ferramentas de sensoriamento remoto e sistemas geográficos (SIG), o objetivo foi caracterizar os solos na região afetada pelo rompimento da barragem de Fundão. Ferramentas de MDS foram aplicadas para avaliar as relações entre solos e componentes naturais, contribuindo para a compreensão

das características essenciais desses ambientes. Variáveis ambientais SCORPAN foram empregadas na construção de modelos de machine learning com o algoritmo Random Forest, processados no software R. A seleção de conjuntos de dados considerou diferentes períodos, incluindo amostras pré e pós-rompimento. A análise de desempenho dos modelos, utilizando índices estatísticos como MAE, RMSE, R^2 e LCCC.

O capítulo 3 foi desenvolvido a partir da base de dados de perfis de solos sob influência das cheias do rio Doce (Neossolos Flúvicos e Cambissolos Flúvicos) coletados ao longo dos trechos médio e baixo rio Doce. Esses solos são formados a partir da deposição dos sedimentos transportados pelo rio Doce, possuindo uma heterogeneidade entre as camadas, sobretudo da composição física. Dessa forma, foi realizada uma avaliação para verificar as relações existentes entre a composição física e a concentração de metais desses solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ECHEVARRIA, Guillaume; MOREL, Jean Louis. Technosols of mining areas. *Tópicos Ci. Solo*, v. 9, p. 92-111, 2015.

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

SCHAEFER, C.E.G.R., Santos, E.E., Souza, C.M. de, Neto, J.D., Filho, E.I.F., Delpupo, C. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. *Arq. do Mus. História Nat. e Jard. Botânico* 24. 2015.

CAPÍTULO 1

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DE TECNOSSOLOS EM DIFERENTES CONTEXTOS GEOMORFOLÓGICOS

Resumo

A produção de minério de ferro no Brasil é uma atividade crucial para a economia de Minas Gerais. No entanto, um dos efeitos negativos dessa atividade é a geração de resíduos durante o processo, que precisam ser dispostos em barragens de rejeito. O rompimento dessas barragens pode causar danos ambientais irreparáveis, como ocorreu no maior desastre ambiental do país, quando a barragem de Fundão se rompeu em novembro de 2015, em Mariana-MG. Esse evento resultou em modificações nas características edáficas dos ambientes afetados ao longo dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce. Os solos desenvolvidos a partir de atividades antrópicas são chamados de Tecnossolos e são altamente heterogêneos em termos de propriedades biológicas, químicas e físicas. Na região afetada pela barragem de Fundão, o Tecnossolo é constituído por uma mistura de rejeitos de mineração de ferro, sedimentos, solos e detritos, apresentando alta concentração de silte e areia fina. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi ampliar o conhecimento sobre os Tecnossolos localizados nas áreas inundáveis e margens dos trechos afetados dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, a montante da UHE Risoleta Neves, visando entender melhor os processos pedogenéticos envolvidos, através da caracterização de suas propriedades físicas e químicas. Foram avaliados Tecnossolos formados em diferentes contextos hidrogeomorfológicos, levando em consideração principalmente a variabilidade espacial em relação à distância do local do rompimento da barragem. As análises incluíram testes de correlações de Spearman, avaliações de componentes principais (PCA) e análises de cluster com base em dados físico-químicos para categorizar os dados. Além disso, foram realizadas comparações entre amostras de camadas de solo afetadas e não afetadas por rejeito, por meio de análise de variância e testes de Tukey. O algoritmo slice-wise foi utilizado para renderizar perfis de solo como esboços padrão para comparação visual. No total, foram analisados 70 perfis de solo, incluindo 50 perfis de Tecnossolos e 20 perfis de solos não afetados. Os dados mostraram que as camadas com rejeito possuem características químicas distintas dos solos naturais, com valores mais altos de pH, fósforo, saturação por bases e silte. A presença de fósforo em quantidade duas vezes maior nos horizontes com rejeito contribuiu para elevar a fertilidade do solo nos Tecnossolos, mesmo em baixas quantidades, apresentando-se como um potencial atributo diagnóstico de solos afetados por rejeito de mineração. No geral, os horizontes contendo rejeito apresentaram valores baixos de Capacidade de Troca de Cátions (CTC) e soma de bases (SB), demonstrando que esses solos apresentam fertilidade reduzida, assim como os solos naturais da região. A matéria orgânica apresentou-se relacionada positivamente com a CTC do solo, demonstrando ser um importante componente para a melhoria das condições químicas desses solos. Dois grandes grupos de Tecnossolos foram estabelecidos na análise de cluster, com 39 perfis no grupo 1 e 11 perfis no grupo 2. Os solos do grupo 1 apresentaram maior teor de silte, maior pH e maior saturação por bases, enquanto os solos do grupo 2 apresentaram maior teor de areia e argila, além de concentração de K⁺ ligeiramente superior. Ao separar esses dois grupos, observou-se que o grupo 2 foi composto prioritariamente por solos do setor hidrogeomorfológico 3-Baixo, constatando nesse grupo valores mais variáveis de argila e silte nas camadas superficiais, enquanto os solos dos setores hidrogeomorfológicos 1 e 2 (Alto e Médio) apresentaram maior homogeneidade textural, sendo agrupados no cluster do grupo 1. O uso do algoritmo slice-wise permitiu identificar as principais características de solos afetados e não afetados por rejeito de mineração, bem como determinar

atributos-chave na identificação desses solos. A utilização de horizontes/camadas de perfis não afetados pode ser usada para estabelecer valores de background, já que dados representativos das condições pretéritas desses ambientes são escassos.

Palavras chave: impacto ambiental, rejeitos de mineração, tecnossolos

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF TECHNOSOLS IN DIFFERENT GEOMORPHOLOGICAL CONTEXTS

Abstract

Iron ore production in Brazil is a crucial activity for the economy of Minas Gerais. However, one of the negative effects of this activity is the generation of waste during the process, which needs to be disposed of in tailings dams. The rupture of these dams can cause irreparable environmental damage, as occurred in the country's largest environmental disaster, when the Fundão dam ruptured in November 2015, in Mariana, Minas Gerais. This event resulted in changes in the soil characteristics of the affected environments along the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers. Soils developed from human activities are called Technosols and are highly heterogeneous in terms of biological, chemical and physical properties. In the region affected by the Fundão dam, the Technosol consists of a mixture of iron mining tailings, sediments, soils and debris, with a high concentration of silt and fine sand. In this context, the objective of this work was to expand the knowledge about the Technosols located in the floodplains and banks of the affected stretches of the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers, upstream of the Risoleta Neves HPP, aiming to better understand the pedogenetic processes involved, through the characterization of their physical and chemical properties. Technosols formed in different hydrogeomorphological contexts were evaluated, taking into account mainly the spatial variability in relation to the distance from the dam rupture site. The analyses included Spearman correlation tests, principal component analysis (PCA) and cluster analysis based on physicochemical data to categorize the data. In addition, comparisons were made between samples of soil layers affected and unaffected by tailings, through analysis of variance and Tukey tests. The slice-wise algorithm was used to render soil profiles as standard sketches for visual comparison. In total, 70 soil profiles were analyzed, including 50 profiles of Technosols and 20 profiles of unaffected soils. The data showed that the layers with tailings have chemical characteristics that are distinct from those of natural soils, with higher values of pH, phosphorus, base saturation and silt. The presence of phosphorus in quantities twice as high in the horizons with tailings contributes to increasing soil fertility in the Technosols, even in low quantities, presenting itself as a potential diagnostic attribute of soils affected by mining tailings. In general, the horizons containing tailings presented low values of Cation Exchange Capacity (CEC) and sum of bases (SB), demonstrating that these soils have reduced fertility, as do the natural soils of the region. Organic matter was positively related to soil CEC, demonstrating to be an important component for improving the chemical conditions of these soils. Two large groups of Technosols were established in the cluster analysis, with 39 profiles in group 1 and 11 profiles in group 2. The soils in group 1 presented higher silt content, higher pH and higher base saturation, while the soils in group 2 presented higher sand and clay content, in addition to slightly higher K⁺ concentration. When separating these two groups, it was observed that group 2 was composed primarily of soils from hydrogeomorphological sector 3-Low, finding in this group more variable values of clay and silt in the surface layers, while the soils from hydrogeomorphological sectors 1 and 2 (High and Medium) presented greater textural homogeneity, being grouped in the group 1 cluster. The use of the slice-wise algorithm allowed the identification of the main characteristics of soils affected and unaffected by mining waste, as well as determining key attributes in the identification of these soils. The use of

unaffected profile horizons/layers can be used to establish background values, since representative data on past conditions in these environments are scarce.

Keywords: environmental impact, mining tailings, technosols

1. Introdução

A mineração no Brasil constitui uma parte significativa das atividades produtivas do país, destacando-se tanto no cenário nacional quanto internacional na produção de substâncias metálicas. Nesse contexto, o minério de ferro, localizado principalmente no Quadrilátero Ferrífero (MG) e no estado do Pará, representou quase 60% do faturamento do setor mineral em 2023 (ANM, 2023).

Geologicamente, os depósitos de minério de ferro podem ser agrupados em cinco categorias principais, sendo os sedimentares acamadados os mais importantes, por constituírem os grandes depósitos das formações ferríferas bandadas (FFB) (Carvalho et al., 2014). As FFB são formadas por rochas finamente bandadas ou laminadas e constituem-se, principalmente, de minerais de sílica e de ferro (hematita, magnetita e algumas variedades de carbonatos e silicatos) originados provavelmente por precipitação química, que posteriormente foram modificadas por diagênese e metamorfismo (Lindenmayer et al., 2008).

Os diferentes minérios de ferro explorados no Brasil (itabirito, hematita e canga) têm teores elevados de ferro e quantidades pequenas de elementos indesejados nos processos siderúrgicos, como o enxofre, o alumínio, o fósforo e os carbonatos (Carvalho et al., 2014). Devido à alta demanda por minério de ferro, influenciada principalmente pela China na última década, mesmo rochas com baixa quantidade estão sendo exploradas, o que exige a disposição do material não aproveitado na maioria das vezes em barragens de rejeito.

Os rejeitos da mineração de ferro podem ser secos ou líquidos, dependendo do tipo de beneficiamento, e geralmente são compostos por quartzo com granulometria de areia fina (Lara et al., 2017). Segundo Andrade (2010) barragens de rejeitos de mineração de ferro na região do Quadrilátero ferrífero têm maioria de partículas finas (silte-argila) devido a operações de moagem e separação física/magnética e a presença de rejeitos de hematita com granulometria fina. Os minerais associados aos rejeitos incluem caulinita, gibbsita, goethita, hematita, magnetita e quartzo (Silva et al., 2006; Wolf, 2009; Penna et al., 2010).

No Brasil, 3 grandes rompimentos de barragens de rejeitos ocorreram nos últimos 20 anos, somente em Minas Gerais. Em 2003, a barragem da Indústria Cataguases afetou os rios Pomba e Paraíba do Sul, deixando 600 mil pessoas sem água. Em 2015, o maior acidente ambiental do Brasil aconteceu com o rompimento da barragem de Fundão em Mariana-MG (Vitoria et al., 2019). Em 2018 na cidade de Brumadinho uma barragem de rejeitos se rompeu impactando a bacia do córrego do Feijão.

O evento de ruptura da barragem de Fundão promoveu além das perdas humanas irreparáveis, danos ambientais às planícies fluviais dos Rios Gualaxo do Norte e Carmo (Marta-Almeida et al. 2016 ; Segura et al., 2016; Carmo et al., 2017). Sendo os rejeitos de mineração de ferro compostos por material de textura silto-arenosa, sua presença no ambiente causou alterações químicas e físicas dos solos (Schaefer et al., 2015; 2016; Santos, 2019). Esses autores reportaram valores mais elevados no rejeito de pH do solo, devido principalmente a adição de NaOH no processo produtivo. Isso resultou na modificação de áreas anteriormente ocupadas por vegetação ou usadas para cultivo de lavouras e pastagens, mudando as características edáficas de cada ambiente impactado (Duarte, 2021; Silva, 2021, Villa, 2022).

Os solos desenvolvidos a partir de material introduzido no meio por atividades antrópicas são classificados como “Technosols” (FAO/WRB, 2015). No Brasil, apesar de não terem sido incluídos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Embrapa, 2018), diversos estudos têm se referido a esses solos como ‘Tecnossolos’ (Ruiz, 2005; Schaefer et al., 2015; Asensio, 2019; Santos, 2019; Borges et al., 2021, Queiroz et al., 2022).

Em estudos realizados em áreas urbanas, os Tecnossolos foram considerados extremamente heterogêneos em termos de material de origem, propriedades biológicas, químicas e físicas, mas com uma grande capacidade de armazenamento de carbono (Lal e Augustin, 2011). Embora existam muitos relatos sobre os efeitos da vegetação na quantidade de carbono orgânico total do solo, bem como algumas atividades biológicas em Tecnossolos, são raros os estudos que os comparam com solos naturais desenvolvidos nos mesmos materiais de origem (Yang e Zhang, 2015).

Isso se dá ao fato de estudos de background de solos ainda serem escassos no Brasil, situação essa que vem sendo alterada a partir da criação de legislações que tratam do tema, como a Política Estadual de Segurança de Barragens que instituiu o Plano de Ação de Emergência de barragens, contemplando procedimentos relativos à qualidade do solo de áreas potencialmente afetadas por barragens de mineração (Minas Gerais, 2019).

Na região afetada pela barragem de Fundão, o Tecnossolo é constituído por uma mistura de rejeito da mineração de ferro e sedimentos, solos e detritos das áreas afetadas (Schaefer et al. (2015; 2016). Segundo esses autores, esse material apresenta alta concentração de óxidos de ferro, silte e areia fina, e, quando depositado nas margens, têm alterado as camadas superficiais do solo, causando compactação e selamento superficial do solo, revelando pouca variabilidade física e morfológica Guerra et al. (2017).

Porém por se tratar de uma área afetada extensa territorialmente, é de se esperar

encontrar distintos ambientes ao longo da paisagem fluvial, sendo os fatores geomorfologia, presença de cobertura vegetal no entorno, ações de manejo e mitigação de impactos vistos como aspectos chave na restauração da qualidade desses Tecossolos. Com base nesse contexto, torna-se essencial a realização de estudos que consigam avaliar e caracterizar os tecnossolos, a fim de se estabelecer critérios para o acompanhamento e recuperação dessas áreas. Nesse sentido a compilação de dados de múltiplas pesquisas e avaliações de forma integrada podem suprir lacunas no conhecimento sobre as propriedades químicas e físicas desses solos em diferentes ambientes. No entanto, Pinheiro et al. (2016) afirma que a análise de uma coleção de perfis de solo é complicada devido à variabilidade dos horizontes e profundidades, bem como diferenças entre classes de solos e a falta de harmonização entre conjuntos de dados e procedimentos laboratoriais.

Nesse sentido, o presente trabalho visa aprofundar o conhecimento sobre os tecnossolos assentados sobre as planícies de inundação e áreas marginais aos cursos d'água afetados pela barragem de Fundão, a fim de ampliar o entendimento dos processos pedogenéticos incidentes, a partir da caracterização dos seus atributos físicos e químicos.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

Esse estudo foi conduzido em áreas localizadas na bacia do rio Doce afetadas pelo rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão. Esse evento resultou em uma mistura de rejeitos e água que fluiu pelos cursos d'água locais, incluindo o córrego Santarém, rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce. Neste trabalho a área de estudo foi limitada nos setores do rio a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves, sendo este o setor mais impactado fisicamente pelo evento do colapso da barragem de rejeito. Nessa região o clima é tropical chuvoso com inverno seco, classificado como Aw (Köppen, 1948).

As bacias dos rios Gualaxo do Norte e Carmo estão localizadas na região Leste-sudeste do Quadrilátero Ferrífero e tem uma predominância de rochas com depósitos de Fe e Au. O posicionamento tectônico do QF permitiu a formação de vários depósitos minerais devido às diversas fases de deformação. As unidades geológicas do alto curso incluem rochas do Supergrupo Minas e suas subdivisões, que correspondem a uma sucessão de rochas sedimentares paleoproterozóicas de interesse para a mineração. As unidades geológicas do médio e baixo curso incluem o Complexo Metamórfico Santa Bárbara, Complexo Metamórfico

Acaiaca, Complexo Metamórfico Mantiqueira e Supergrupo Rio das Velhas (Dorr II, 1969; Dorr II et al., 1957; Gair, 1958; Renger et al., 1994).

Na região mais elevada da bacia, encontra-se a região das serras e encostas do Quadrilátero Ferrífero, onde predominam terrenos em maior altitude e declividade, predominando Cambissolos e Neossolos litólicos, com vegetação de porte baixo, como campos rupestres e matas de candeias. Mais abaixo na paisagem, encontram-se os platôs elevados, predominando campos ferruginosos formados sob Plintossolos Pétricos, sendo este o setor de interesse direto da mineração. Na região de transição para as terras baixas da bacia, encontra-se a região das cristas alinhadas, Florestas de Transição, com domínio de Cambissolos distróficos com material de origem prioritariamente composto por Filitos.

Já nas cotas mais baixas da bacia, sob domínio de rochas do embasamento cristalino, localiza-se a região de mares de morros, com o domínio de Latossolos e Argissolos, composta originalmente por vegetação arbórea do tipo Floresta Estacional Semi Decidual, que hoje encontra-se em sua grande maioria substituída por pastagens e áreas agrícolas.

Ao longo do curso principal ocorrem ainda solos relacionados a dinâmica de transporte de sedimento, sendo estes os Neossolos e Cambissolos Flúvicos, além de Gleissolos em áreas de drenagem insuficiente. Estes solos foram soterrados pelos rejeitos, formando os Tecnosolos objeto deste estudo. Os Tecnosolos apresentam uma área de ocorrência de aproximadamente 2.200 ha, ocorrendo por toda a área impactada (Da Cruz e Domingues, 2017).

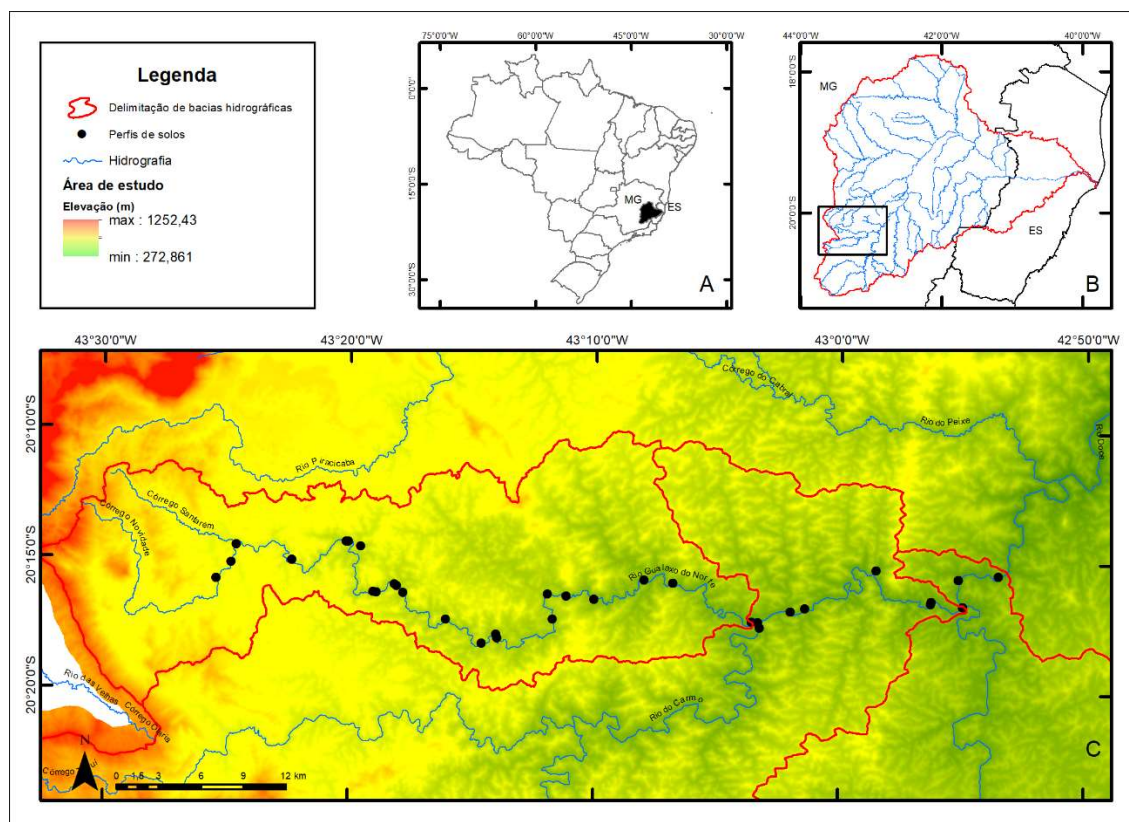


Figura 1 - Localização dos perfis de solos utilizados nesse estudo

2.2 Características gerais dos solos avaliados

A realização do presente trabalho contou com a utilização de uma base de dados de propriedades químicas, físicas e morfológicas de 50 perfis de solos coletados em áreas afetadas por rejeitos, além de 20 perfis, localizados fora da área impactada. Esses perfis de solos foram descritos in situ por Schaefer et al. (2016), Souza (2019) e Fundação Renova (2021), com a abordagem clássica (Santos, 2015). Além disso foram avaliadas 5 amostras de rejeito coletadas em planícies afetadas e na barragem de Fundão logo após o colapso dessa estrutura.

O banco de dados compilado foi avaliado obtido a partir de análises realizadas no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, seguindo rotinas de determinações químicas e físicas analíticas usando procedimentos padronizados pela Embrapa (Embrapa, 2017). Os parâmetros físicos analisados nesse estudo foram: profundidade do solo, distribuição granulométrica (% areia grossa, % areia fina, % silte, % argila); e parâmetros químicos: pH em água, pH em KCl, P (mg/dm^3), K (mg/dm^3), Soma de bases (SB) (cmolc/dm^3), Saturação por bases (%) e Matéria Orgânica (%).

2.3 Preparação dos dados

Utilizando-se software de Sistema de Informação Geográfica, relacionou-se os perfis de solo com informações a respeito do relevo e distância em relação à barragem de Fundão. Utilizando dessa informação, agrupou-se 3 grupos de acordo com os setores geomorfológicos fluviais descritos por Fellippe e Mendes (2022) apud Saadi e Campos (2015) e Oliveira et al. (2017).

Segundo esses autores, os canais fluviais na região serrana têm leitos rochosos e semi-confinados com transição gradual para leitos aluviais em vales não-confinados. As planícies são estreitas, com alguns segmentos apresentando corredeiras devido ao substrato rochoso exposto. Há vales estreitos e encaixados com inclinação elevada, explicando trechos de alta energia até na região próxima a cachoeira de Pedras. Desse trecho até o terço inferior do rio Carmo as condições dos canais mudam e o fundo do vale se torna mais largo. Ao longo da área estudada existem diversos tipos de vales fluviais, como desfiladeiros, vales confinados, estreitos, largos com pequenas planícies e vales largos com planícies extensas com perfil suave a plano (GEMG,2016).

O setor hidrogeomorfológico 1 foi delimitado a partir do ponto mais a montante da bacia impactada pela lama. O primeiro perfil descrito nessa área está localizado próximo ao ponto final da área impactada pelo rejeito, caracterizado pelo “rebote” da lama. Este evento provocou a alteração do fluxo do rio e foi provocado pelo confinamento do rio Gualaxo do Norte próximo a confluência com o córrego Santarém. Desse ponto o trecho segue o leito do curso fluvial principal até a cachoeira de Pedras, localizada no distrito de mesmo homônimo.

O setor hidrogeomorfológico 2 inicia-se nessa cachoeira e segue até a confluência com o rio do Carmo, em Barra Longa-MG. Já o setor hidrogeomorfológico 3 inicia-se desse ponto até a confluência com rio Piranga, no local de formação do rio Doce.

Para avaliar distinguir de forma mais clara o efeito das geofomas na distinção dos trechos, aplicou-se a classificação das formas do relevo proposta por Weiss (2001), com o intuito de avaliar as o predomínio das principais feições.

Segundo Jenny (1941) a formação do solo está intimamente relacionada com vários fatores, e o relevo/topografia é um deles. O relevo influencia a formação do solo de várias maneiras, incluindo erosão em áreas com topografia inclinada, acúmulo de Sedimentos em áreas mais planas, drenagem do solo, exposição a elementos climáticos e outros.

Como evidenciado na Figura 2, nota-se um incremento na contribuição das áreas de planície à medida que a lama percorreu as seções afetadas. Em contrapartida, observa-se uma

redução nas áreas em que o rio se desloca de maneira mais encaixada, caracterizada pelas classes de drenagem de encosta e riachos profundamente incisos.



Figura 2 – Distribuição de classes de formas do relevo para os três setores avaliados

Além do efeito espacial, foi avaliada a influência dos materiais tecnogênicos em relação ao material natural, sendo realizada uma análise comparativa com perfis de solo descritos fora da área impactada, localizados na mesma região de estudo. Foram realizadas ainda comparações entre camadas de solo com e sem influência do rejeito. Nesse trabalho refere-se aos horizontes do perfil do solo como camadas, por se tratar de um material que não sofreu pedogênese *in situ*.

2.4 Avaliação estatística

Os procedimentos estatísticos foram realizados através de scripts e pacotes desenvolvidos no software (R Core Team, 2020). Para a avaliação das propriedades químicas e físicas dos perfis de solos em profundidade, recorreu-se às ferramentas do pacote AQP, desenvolvido por Beaudette et al. (2013). O AQP é um pacote específico para analisar a variabilidade do solo com base em perfis de solo. A análise foi baseada em um algoritmo que constrói funções de profundidade do solo, permitindo prever tendências centrais, calcular estatísticas e reconstruir dados em uma função de profundidade representativa (Pinheiro et al., 2016; 2018). O algoritmo utiliza a premissa de que uma função representativa para a variação de propriedades do solo em profundidade pode ser gerada a partir de uma coleção de dados de perfis, sumarizados em intervalos de profundidade.

As análises dos atributos do solo incluíram o uso do algoritmo slice-wise (Beaudette et al., 2013), que divide o solo em camadas de 1 cm e calcula valores ponderados para cada camada com base em uma base de dados. Esse procedimento reconstrói os dados do perfil com base em profundidades predefinidas, criando uma função de profundidade do solo (Pinheiro et

al., 2016). Posteriormente a função *spline* foi aplicada para calcular a média e a mediana para cada camada. A função *spline* é uma técnica não-paramétrica apropriada para modelagem de atributos do solo, ajustando os dados para cada camada e mantendo a média da propriedade do solo (Pinheiro et al., 2016).

O algoritmo *slice-wise* (Beaudette et al., 2013) foi executado para renderizar perfis de solo como esboços padrão para facilitar a comparação visual entre eles. A análise se concentrou em um conjunto de 70 perfis de solo, sendo 50 perfis de Tecnoossolos e 20 perfis de solos não afetados (Latosolos, Cambissolos e Argissolos).

Para avaliar propriedades do solo que pudessem ser utilizados para categorizar os dados, submeteu-se as variáveis a testes de correlações de Spearman ($p = 0,05$) utilizando o pacote “corrplot” (Wei & Simko, 2021), e posteriormente, avaliações de componentes principais (PCA), além de análises de cluster, usando o pacote “sharpshootR” (Beaudette et al., 2023) e “FactoMineR” (Husson et al. 2017). A análise de componentes principais (PCA) é uma técnica estatística utilizada para explorar e resumir a variação presente em um conjunto de dados multivariado. Ela é frequentemente usada para analisar dados ambientais, pois permite a identificação de padrões e relações não óbvias entre variáveis, bem como para reduzir a dimensionalidade dos dados e facilitar a visualização. (Hongyu et al., 2016).

As diferenças entre amostras de camadas afetadas e não afetadas por rejeito foram avaliadas a partir da comparação entre os grupos por meio de análise de variância (*one-way ANOVA*), com a técnica de amostragem de dados *bootstrap*, considerando um nível de significância de 5% ($p = 0,05$) Para realizar a comparação pareada dos grupos após a ANOVA foram realizados testes de Tukey.

A similaridade dos perfis de solo foi avaliada comparando as principais propriedades do solo a cada centímetro de camada, considerando a variabilidade das propriedades do solo e a espessura do horizonte diagnóstico. Considerou-se a profundidade máxima de avaliação a camada que representasse no mínimo 70% de representatividade de dados.

3. Resultados

3.1. Descrição de acordo com AQP

Conforme ilustrado no perfil topográfico da Figura 3, observa-se um gradiente topográfico na área estudada, resultando em condições distintas na geomorfologia fluvial do rio Gualaxo do Norte (Fellippe e Mendes, 2022); Saadi e Campos, (2015); Oliveira et al., 2017).

Essas condições distintas da topografia e distância em relação ao rompimento, podem refletir sobretudo na mistura de materiais carregados junto da lama e na forma que esses rejeitos se assentaram nas áreas afetadas. De acordo com Schaefer et al. (2016), predominam nas áreas afetadas Cambissolos Flúvicos, Argissolos, Gleissolos e Neossolos Flúvicos, dependendo de sua posição na paisagem.

Nesse cenário, as camadas de solos sob o rejeito apresentam diferentes comportamentos físicos e químicos, além de terem sofrido impactos pela onda de forma distintas, como o decapeamento por completo das camadas superficiais e posterior deposição de rejeito, ou apenas a deposição de material em superfície. A maioria dos estudos relacionados a impactos do rejeito no solo indicam os impactos de ordem física como os mais significativos nos tecnossolos (Schaefer et al., 2016; Silva, 2021), a partir da alta concentração de areia fina e silte em superfície, formando crostas superficiais de difícil penetrabilidade (*hardsetting*), provocando efeitos maléficos ao desenvolvimento de raízes (Schaefer et al., 2016; Dias 2020).

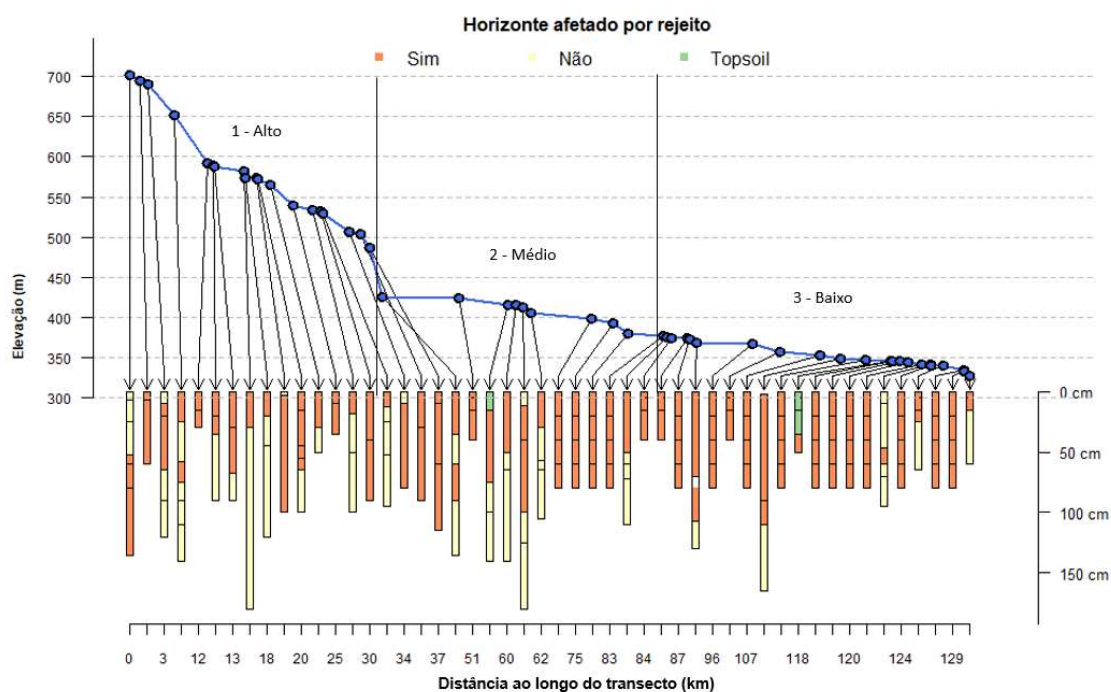


Figura 3 - Disposição dos perfis de solos estudados ao longo do perfil transversal da área de estudo

Ao avaliar os grupos de acordo com a posição na bacia, verifica-se que o grupo 1 (Alto) e o grupo 2 (Médio), apresentam maior heterogeneidade na formação de horizontes afetados pelo rejeito, no que se refere à espessura e profundidade. No grupo 1 foram descritos 3 perfis com camadas de rejeito em subsuperfície, que podem estar relacionadas ao aporte sedimentar ou de *topsoil* proveniente de encostas. Dois desses são apresentados na Figura 4 (14 e 15). Esses

perfis estão localizados próximo a confluência do córrego Santarém com rio Gualaxo do Norte, em região de pouca aptidão para produção agrícola, devido a sua topografia movimentada.

Por esse aspecto, as áreas afetadas nesse setor foram destinadas em sua grande maioria para conservação ambiental, posteriormente às ações de contenção de margens e restauração ambiental. Durante esses trabalhos algumas áreas foram cobertas com solo de empréstimo, podendo ser este o fator da presença de camadas contendo rejeito em subsuperfície. Outro fator de formação dessas camadas arenosas está relacionado a dinâmica de formação de solos aluviais a partir do transporte e deposição de sedimentos de regiões a montante.

Nesse trecho de avaliação, o rio Gualaxo do Norte apresenta alta competência, podendo transportar sedimentos de maior granulometria e com maior intensidade. Nesses dois perfis essas camadas apresentaram textura arenosa, apresentando uma descontinuidade em relação ao horizonte abaixo contendo rejeito, cujo aspecto da amostra lembrou o aspecto lamoso do rejeito in natura, com alta umidade e alto teor de silte no horizonte afetado.

Nos setores hidrogeomorfológicos Médio e Baixo foram descritos 2 perfis contendo camadas superficiais descritas como *topsoil*. Essas camadas encontradas na superfície do solo diferenciam-se daquelas descritas nos perfis do setor 1, principalmente por apresentarem teores de argila mais elevados.

Schaefer et al. (2016) sugeriram que para a retirada de materiais de empréstimo gerasse o mínimo impacto ambiental possível, deveria-se priorizar aqueles locais com solos mais desenvolvidos, como os Latossolos e Argissolos. Dessa forma os teores mais elevados de Argila encontrados em camadas de *topsoil* descritos nos setores hidrogeomorfológicos Médio e Baixo apresentam uma relação direta com os materiais retirados de áreas mais elevadas da paisagem não afetadas pela deposição de lama. Já os perfis descritos no setor hidrogeomorfológico 1 (Alto), a presença de camadas em superfície se dá principalmente pela contribuição sedimentar, na formação principalmente de novos diques aluvionares. Dessa forma as camadas em superfície tendem a ser mais arenosas.

A recuperação da áreas afetadas com a adição de *topsoil* aparenta ter sido mais recorrente nos setores 2 e 3, influenciada principalmente pela presença de planícies aluvionares e terraços mais amplos, que antes do evento eram utilizadas de forma intensiva para a produção agrícola.

Outro fato que chama atenção nos setores 2 e 3 é a presença de um baixo gradiente topográfico e declividade do leito fluvial, o que reduziu a energia da onda de lama, favorecendo

o processo de soterramento do solo. Este fato contribuiu para preservação da estrutura original do solo abaixo da camada de rejeito (Figura 4- 26, 63, 20, 22, 19).

Já no setor 1 com a ocorrência de terrenos mais declivosos, a energia da lama foi tamanha que provocou uma erosão quase que por completo das camadas superficiais do solo. Posteriormente, esse material saprolítico ou composto por materiais grosseiros do antigo terraço fluvial foi o soterramento por rejeito (Figura 4- 15 e 17).

A maioria dos 50 perfis de Tecnessolos apresentou textura de Franco-Arenosa, Franca e Areia Franca, com altos teores de areia fina e silte nos horizontes com rejeito. Embora isso possa sugerir altas taxas de percolação e infiltração, os altos teores de silte e areia fina causam uma compactação do material, dificultando o desenvolvimento de raízes. Esse comportamento é refletido nos altos valores de densidade do solo descritos por Schaefer et al. (2015;2016).



Figura 4 – Exemplos de perfis de tecnossolos utilizados nesse estudo. Marcações em vermelho demonstram as camadas afetadas por rejeito e em amarelo as camadas de solo sem influência de rejeito.

A análise harmonizada dos perfis (Figura 5, Figura 6, Figura 7 e Figura 8) permitiu destacar padrões nos dados e fazer comparações entre as camadas/horizontes estudadas. A análise em profundidade revela alguns padrões de assinaturas químicas e físicas relacionados diretamente ao rejeito, como valores mais elevados de silte e areia fina, resultando em valores baixos de argila e areia grossa.

Em geral, observa-se valores semelhantes em profundidade nos três grupos estudados, não sendo encontrada influência espacial na distribuição granulométrica dos solos estudados. Entretanto, observa-se valores máximos e mínimos de silte e areia fina ocorrendo nos perfis localizados nos grupos 1 e 3. Os perfis do grupo 2 apresentaram a menor variação em profundidade, enquanto os perfis do grupo 3 apresentaram a maior variação em profundidade, especialmente nas frações de silte e argila. Para todos os grupos identificou-se uma tendência para o aumento da concentração de argila e areia grossa em profundidade à medida que se encontram camadas de solo natural.

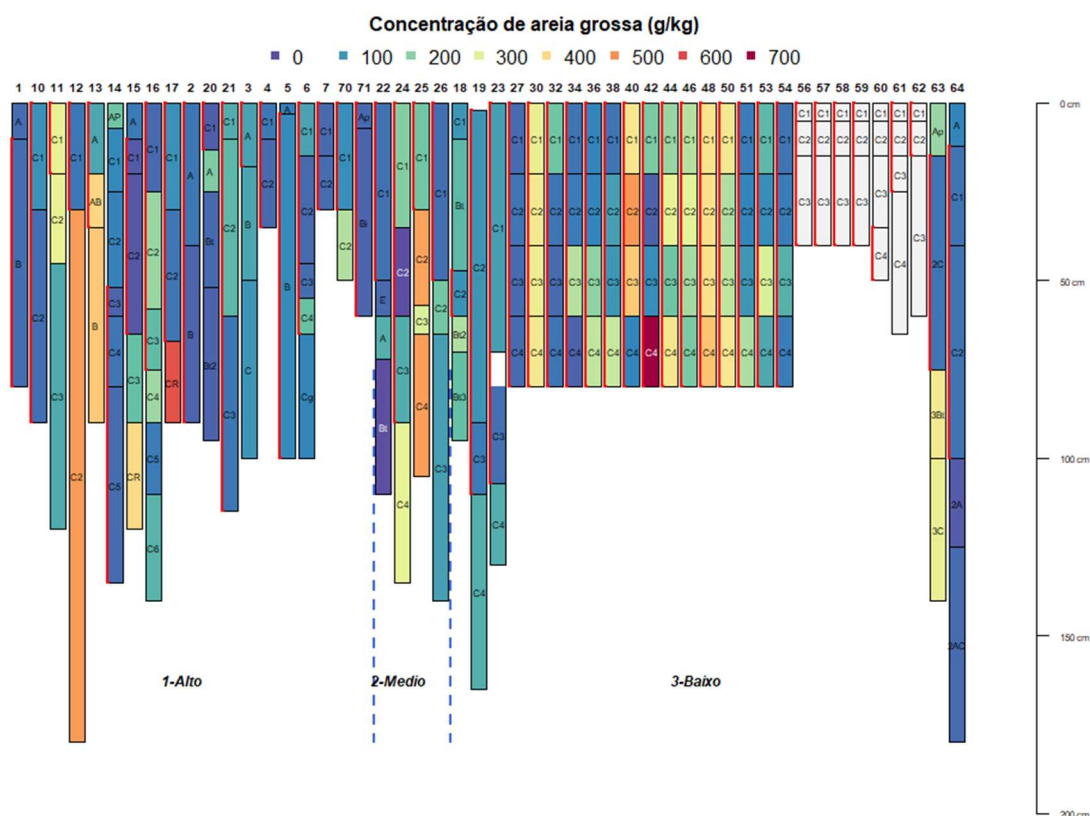


Figura 5 - Concentração de areia grossa nos Tecossolos estudados

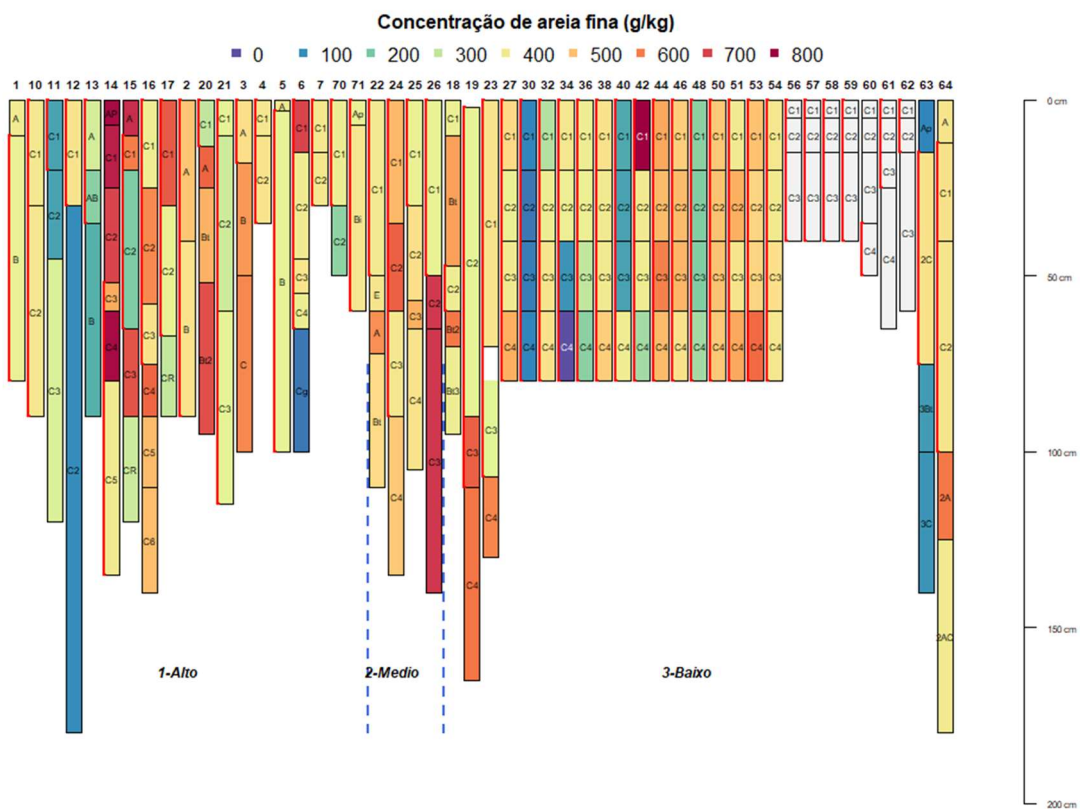


Figura 6 - Concentração de areia fina nos tecnossolos avaliados

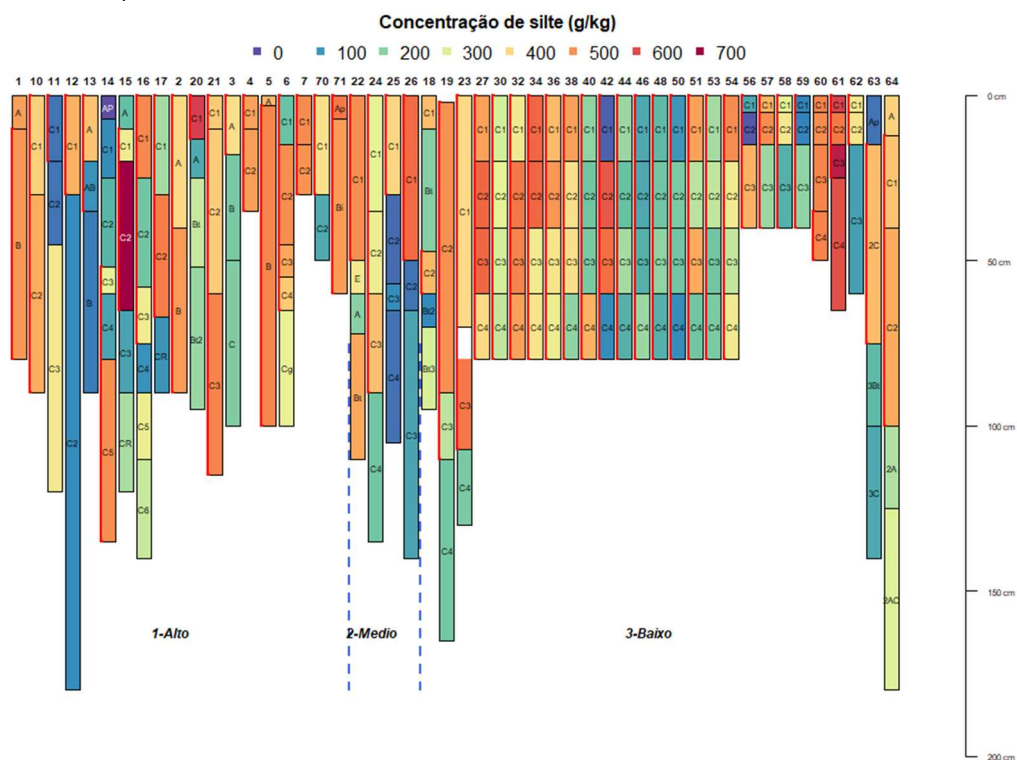


Figura 7 - Concentração de silte nos tecnossolos avaliados

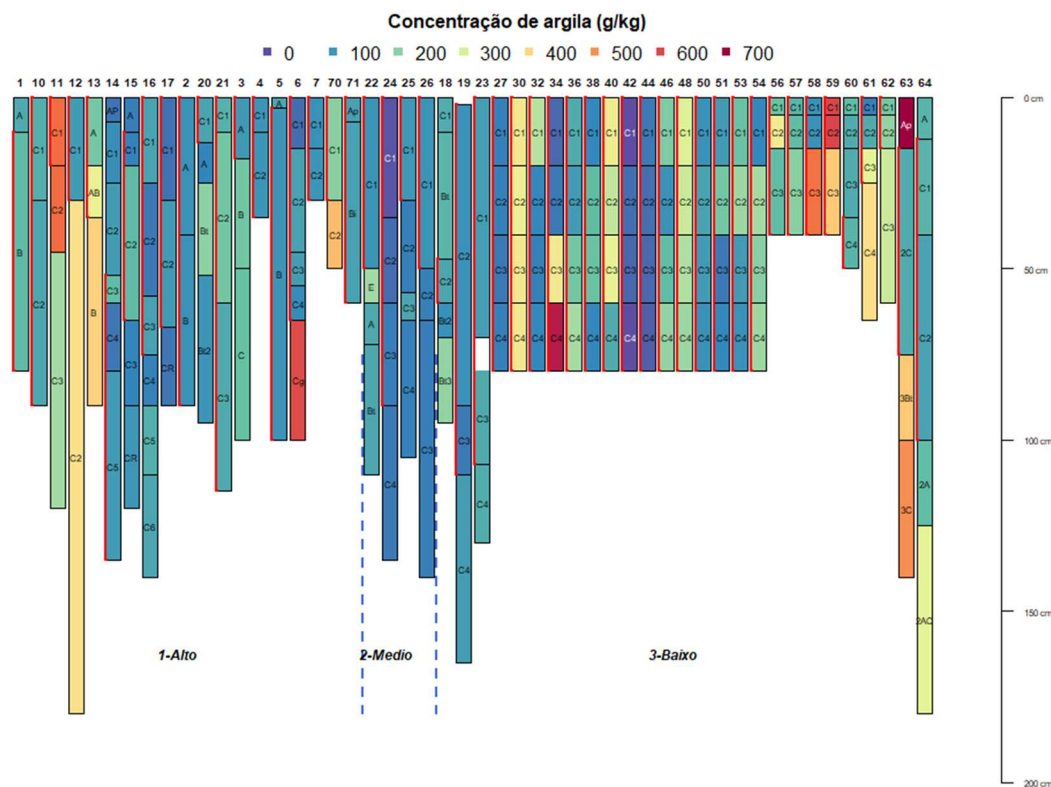


Figura 8 - Concentração de argila nos tecnossolos avaliados

Dentre as características químicas analisadas, as camadas contendo rejeito se destacam dos horizontes sem rejeito pelos seus valores mais elevados de pH em água, Fósforo e Saturação por bases (V%). O pH médio, mínimo e máximo nos horizontes com rejeito foram de 6,7, 4,40 e 8,35, respectivamente. De acordo com a classificação de Ribeiro et al. (1999), esses solos estão classificados como de Acidez fraca a Alcalinidade fraca. Do ponto de vista agrônomo, os valores são considerados como sendo bons, altos e muito altos. Os valores de pH podem ser prejudiciais se estiverem muito elevados, o que pode levar a uma redução na disponibilidade de alguns nutrientes. Segundo Toutou et al. (2011) o elevado pH nos tecnossolos é causado pelo uso de NaOH como dispersante nas partículas durante o processo de separação do minério de ferro por meio da flotação.

Durante os processos de beneficiamento do minério são realizadas etapas para retirada de elementos considerados como contaminantes na metalurgia, utilizando-se de processos químicos, como a flotação de ar, ou processos mecânicos, como a separação magnética. O fósforo enquadra-se como um contaminante comum presente no minério de ferro, reduzindo a qualidade do aço produzido quando presente em quantidades acima de 0,05%. O destino desse fósforo geralmente são as barragens de rejeito.

A análise dos dados revelou que os horizontes com rejeito apresentam médias de teor duas vezes maiores (2,59) do que os horizontes sem qualquer influência, apresentando-se diferentes estatisticamente. Já o rejeito de fundão apresentou uma média três vezes maior dos teores de fósforo quando comparado aos horizontes sem rejeito. Quando avaliado horizontes contendo rejeito e as amostras do rejeito de fundão, constatou-se um valor médio menor para as amostras coletadas em horizontes de perfis, porém não foram constatadas diferenças estatísticas entre as médias desses dois grupos.

Dentro do conjunto de dados avaliado destaca-se 2 valores classificados como *outliers* no conjunto de horizontes com rejeito, com valor máximo de 18,5 mg/dm³. Esse valor máximo foi 2 vezes superior ao valor máximo encontrado no rejeito. Tal resultado demonstra um enriquecimento geoquímico dos horizontes de tecnossolos, a partir da contribuição de outros materiais carreados na passagem de lama (Schaefer et al., 2016). Esse comportamento se repete para todos os outros parâmetros, com destaque para os parâmetros do grupamento textural (areia grossa, areia fina, silte e argila).

Ao avaliar a capacidade de troca de cátions (CTC), que representa a quantidade total de cátions retidos à superfície dos materiais como solo, argila ou húmus, podemos determinar a fertilidade do solo. Se a CTC está majoritariamente ocupada por cátions benéficos como Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺, o solo é considerado propício para nutrição das plantas. Contudo, se a maioria da CTC estiver ocupada por cátions tóxicos como H⁺ e Al³⁺, a fertilidade do solo será prejudicada. Em geral, os horizontes contendo rejeito apresentam valores baixos de CTC, com uma média de 1,7 cmolc/dm³, o que os classifica como solos de "baixa" fertilidade, de acordo com Ribeiro et al. (1999). Esse resultado é semelhante às camadas sem rejeito, cuja uma média foi de 1,6 cmolc/dm³. Esses resultados são consequência da baixa presença de Ca²⁺ e Mg²⁺ no rejeito (1,2 cmolc/dm³) e das concentrações naturais limitadas dos solos da região.

A saturação por bases elevada em solos contendo rejeito (64,8 %) ocorre devido à presença de cátions como Na⁺ e K⁺. Esses cátions são liberados durante o processo de descarte e se incorporam ao solo, aumentando o teor de cátions na camada. Além disso, o pH elevado dos tecnossolos também contribui para o aumento da saturação por bases, pois a presença de íons hidrônios é reduzida em solos alcalinos, permitindo que mais cátions estejam disponíveis para a troca.

Os resultados da estatística descritiva dos parâmetros químicos e físicos podem ser vistos na Tabela 1, onde são apresentados os resultados das camadas agrupadas pela presença

ou ausência de rejeito. Na Figura 9 são apresentados os gráficos boxplot com a distribuição dos parâmetros avaliados.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos parâmetros físicos e químicos avaliados

Parâmetros	Horizontes com rejeito					Horizontes sem rejeito					Rejeito da barragem de Fundão					Topsoil				
	n	Mean	SD	Min	Max	n	Mean	SD	Min	Max	n	Mean	SD	Min	Max	n	Mean	SD	Min	Max
pH água	126	6,7a	0,7	4,4	8,4	47	5,9a	0,6	4,4	7,2	5	7,5a	0,2	7,3	7,7	4	5,7	0,5	5	6,2
K (mg/dm ³)	126	33,6a	45,6	0	320	47	22,4a	19	0	92	5	20,4a	23,8	0	60	4	41	41,3	11	100
P (mg/dm ³)	126	5,7b	2,8	0,7	18,5	47	2,2b	1,8	0,4	7,8	5	7,3a	1,1	6	8,5	4	4	1,9	2	6,1
Ca	126	1,4a	0,7	0,2	3,4	47	1,2a	0,8	0,1	3,7	5	1,1a	0,4	0,7	1,6	4	1,6	0,9	0,3	2,1
Mg	126	0,2a	0,3	0	1,4	47	0,3a	0,2	0	1	5	0,1a	0,1	0	0,1	4	0,3	0,3	0	0,7
Al	126	0a	0,1	0	1,4	47	0,1a	0,3	0	1,2	5	0a	0	0	0	4	0,2	0,3	0	0,7
H+Al	126	1,2a	1,1	0	5	47	1,7a	1,9	0	11,5	5	0,3a	0,2	0,2	0,5	4	1,7	1,9	0	11,5
SB	126	1,4a	1	0	4,4	47	1,5a	1	0	4,9	5	1,2a	0,5	0,7	2	4	1,8	1,1	1,2	3,5
CTC efetiva	126	1,7a	0,9	0,3	5,1	47	1,6a	1	0,2	4,9	5	1,2a	0,5	0,7	2	4	2,2	0,8	1,1	3
V (%)	126	64,8a	22	5,7	100	47	52,6b	21,9	6,1	100	5	77,5a	7,1	65,5	83,5	4	53,8	28,2	11,6	71,2
MO (%)	126	0,7a	0,6	0	2,7	47	1a	2,5	0	15,7	5	1,2a	2,8	0	6,3	4	0,5	0,4	0	1
m (%)	126	0,7a	0,6	0	2,7	47	5,1a	14,9	0	84,2	5	0a	0	0	0	4	14,9	29,8	0	59,6
Areia fina	126	133,4	114,9	16	610	47	202,7	139,86	0	680	5	50,4	22,1	16	67	4	190	-	-	-
Areia grossa	126	416,2	130,67	50	790	47	285,4	242,6	0	940	5	478,4	62,13	440	588	4	130	-	-	-
Silte	126	314,8a	134	30	602	47	191,9b	116	19	510	5	388,8a	50	318	449	4	350	193	60	450
Argila	126	146,4a	108	10	590	47	166,1a	126	46	531	5	82,4a	16	62	103	4	250	247	120	620

Letras diferentes indicam diferenças estatísticas ($p \leq 0,05$).

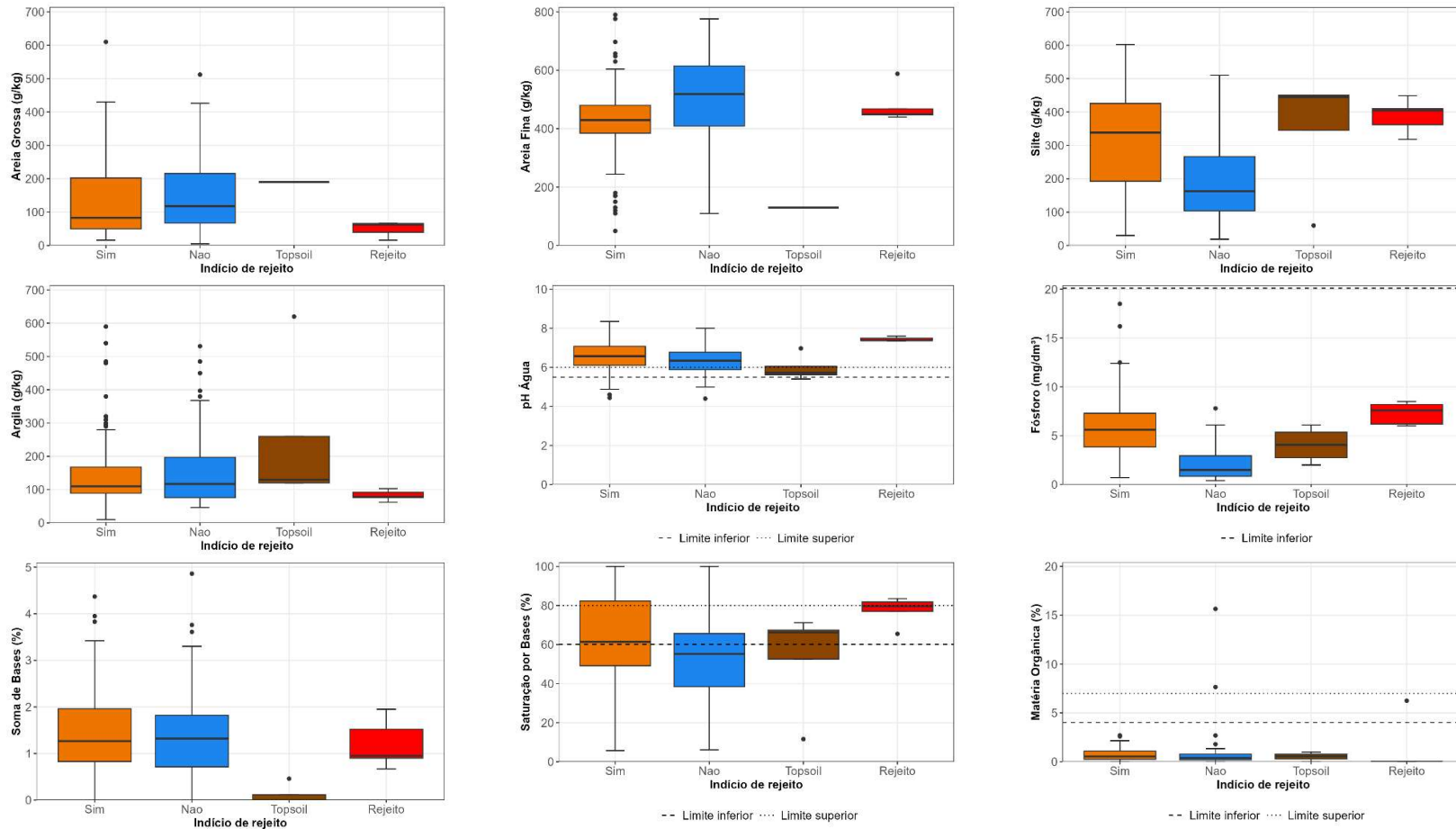


Figura 9 - Gráficos boxplot dos parâmetros físicos e químicos das camadas de solo avaliadas

O uso do algoritmo “slice-wice” (Beaudette et al., 2013) permitiu visualizar a distribuição dos parâmetros químicos e físicos ao longo do perfil do solo. Foi possível estabelecer relações em relação às camadas dos Tecossolos, permitindo identificar alterações nas concentrações em profundidade. Foram gerados gráficos (Figura 10 e Figura 11) com a distribuição de dados compreendida entre os percentis 25 e 75, utilizando-se a mediana como forma de identificar a tendência central dos dados.

A mediana de areia grossa para esses grupos foi de aproximadamente 100 g/Kg. No entanto, ao comparar os grupos 2 e 3, nota-se uma maior variação dos dados em relação ao grupo 1. O grupo 3 apresentou uma variação ainda mais expressiva quando se analisa o teor de areia grossa em diferentes profundidades do solo. É possível perceber que a variação é maior na superfície do solo, se comparada às camadas mais profundas.

A distribuição de areia fina demonstrou ser mais uniforme ao longo dos perfis do grupo 1. Nesse grupo o valor mediano foi próximo a 400 g/kg, até a profundidade aproximada de 150 cm. No grupo 2 observa-se um incremento de 50% de areia fina em profundidade (100 e 150 cm), o que fez reduzir os valores de silte em profundidade, influenciando na transição abrupta identificada entre as camadas.

No grupo 3 o teor de silte chega a reduzir em 4 vezes se comparado camadas entre 0-50 cm e 100 a 150 cm. Essa diferença está relacionada a presença de camadas de solo arenoso sem influência de rejeito, típicas de Neossolos Flúvicos, apresentados anteriormente na Figura 3-26.

Conforme observado na Figura 10, para a camada de 0-50 cm observa-se uma maior variação nos teores de silte nos solos do grupo 3, sendo um reflexo de valores um pouco mais elevados de Argila e Areia Grossa. Uma vez que estas frações apresentam-se em maior abundância em solos não afetados, a variabilidade nos teores de silte é reduzida quando alcança profundidades maiores que 100 cm, quando a presença de horizontes não afetados se torna mais expressiva.

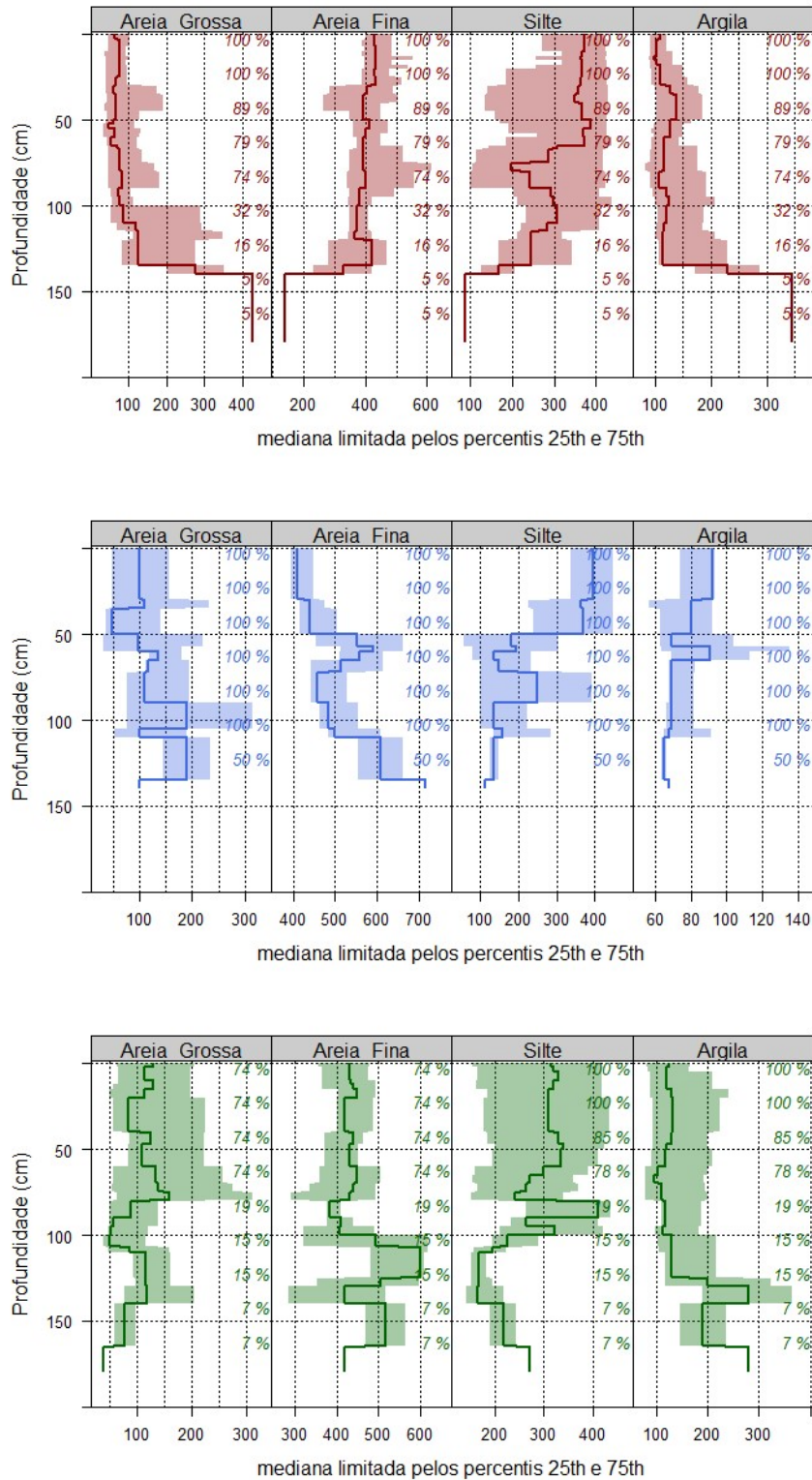


Figura 10 - Distribuição granulométrica em profundidade dos 3 grupos de tecnossolos avaliados. Grupo 1-Alto (Vermelho), Grupo 2-Médio (Azul), Grupo 3-Baixo (Verde)

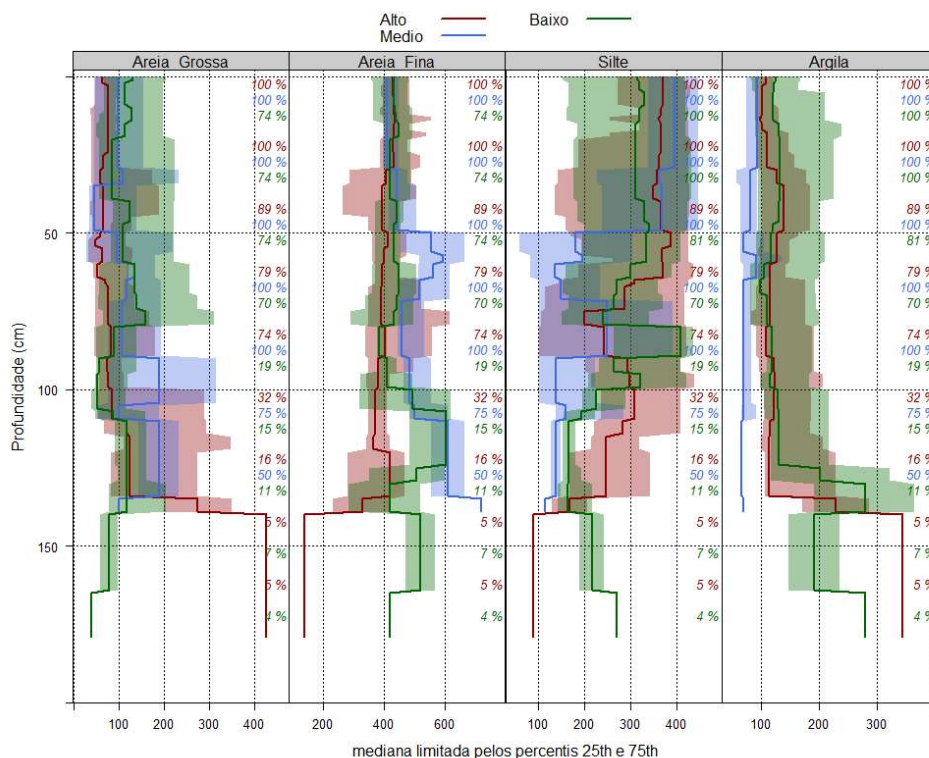


Figura 11 – Mediana dos atributos físicos dos três grupos de tecnossolos investigados

Ao realizar a avaliação dos parâmetros químicos, foi observada a presença de diferenças ao longo das diferentes profundidades. Os valores de pH na superfície foram semelhantes entre os três grupos, mas as diferenças tornam-se mais evidentes em profundidade, onde foi observada uma diminuição dos valores de pH entre 50 e 100 cm nos grupos 1 e 2. Para para solos do grupo 3, esse efeito não é observado com expressão, uma vez que a camada de rejeito apresenta-se profunda nos perfis do grupo 3. Quando avaliada a camada mais profunda (entre 100 e 150 cm), os valores foram semelhantes para os três grupos.

Apesar do grupo 1 apresentar variações mais significativas nos teores de fósforo se comparado aos grupos 2 e 3, os teores de fósforo foram iguais para os três grupos. Já a soma de bases foi baixa para todos os três grupos, tanto na superfície quanto na subsuperfície. A saturação por bases apresentou-se acima de 50% em quase todo o perfil de solo, com valores próximos a 100% nas camadas superiores dos solos do grupo 1.

Apesar dos baixos valores de matéria orgânica encontrados nos três grupos avaliados, foram identificados valores mais elevados na superfície, sendo que o grupo 3 apresentou os valores mais elevados, refletindo também em valores mais elevados de CTC (capacidade de troca de cátions).

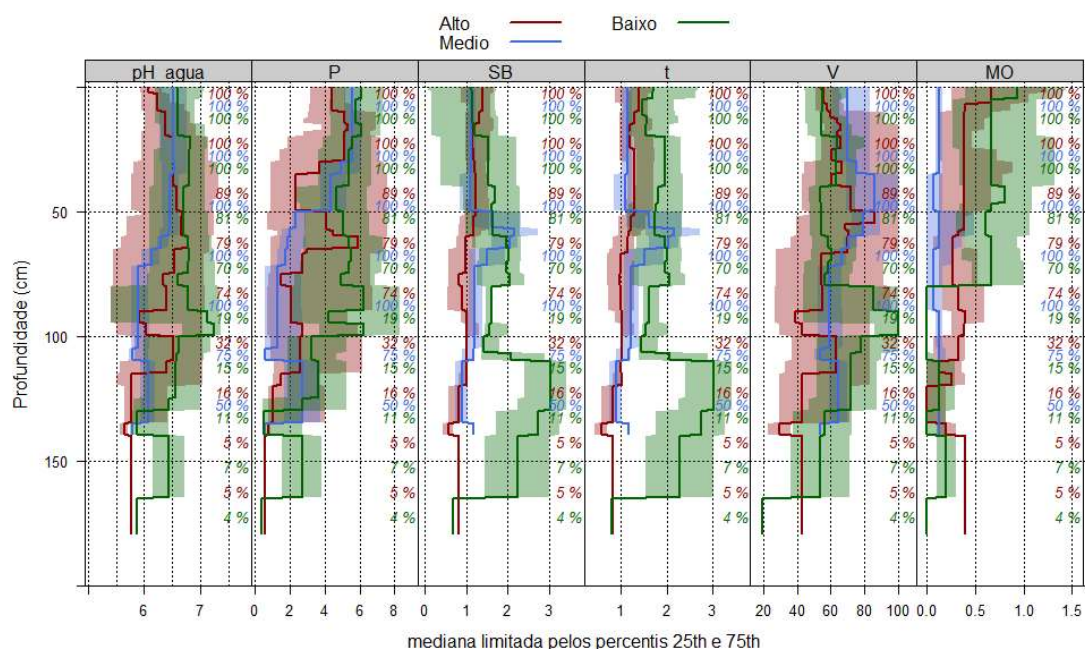


Figura 12 - Mediana dos atributos químicos dos três grupos de tecnossolos investigados

Ao avaliar os testes estatísticos apresentados na

Tabela 2, não foram constatadas diferenças estatísticas para os parâmetros avaliados entre os perfis descritos no setor 1-Alto e 2-Médio, demonstrando haver uma homogeneidade do substrato que formam esses solos. A exceção ocorre para os parâmetros Potássio, Cálcio, Magnésio e Argila.

As diferenças são constatadas quando avaliados os solos do setor 1-Alto e setor 3-Baixo. Foram constatadas diferenças estatísticas significativas para os parâmetros Potássio, Cálcio, Magnésio e CTC efetiva, com médias mais elevadas desses parâmetros nos solos do setor 3. Nesse setor foi constatados teores mais elevados de argila e areia grossa nas amostras avaliadas se comparado aos demais setores além do rejeito de fundão. Essa diferença também é constatada quando compara-se a distribuição de argila em profundidade (Figura 11).

Os solos do grupo 1 e 3 apresentam uma tendência no incremento de argila profundidade, fato não constatado nos solos do setor 2. Esses resultados estão relacionados a presença camadas mais profundas do solo não impactadas.

Tabela 2 - Resultados dos testes de comparações de médias dos grupos hidrogeomorfológicos avaliados

Parametro	p.valor	1-Alto x 2-Medio	1-Alto x 3-Baixo	2-Medio x 3-Baixo
PH Água	0.0509	0.8793	0.2691	0.991
Fósforo (mg.dm-3)	0.0049	0.7179	0.0989	0.0683
Potássio (cmolc.dm-3)	0.0321	0.9998	0.0362	0.3335
Cálcio (cmolc.dm-3)	0.0001	0.7141	0.0001	0.3978
Magnésio (cmolc.dm-3)	0.0004	0.9442	0.0007	0.3095
Alumínio (cmolc.dm-3)	0.0761	0.2771	0.085	0.964
Soma de Bases (cmolc.dm-3)	0.5124	0.8307	0.4913	0.9999
CTC Efetiva (cmolc.dm-3)	<0.0001	0.9333	<0.0001	0.1491
Saturação por Bases (%)	0.0994	0.3451	0.9857	0.2123
Saturação por Alumínio (%)	0.1701	0.3725	0.207	0.9511
Matéria Orgânica (%)	0.3549	0.3505	0.9585	0.479
Areia Grossa (g/kg)	0.0264	0.5647	0.0642	0.9976
Areia Fina (g/kg)	0.0507	0.5329	0.2815	0.0671
Silte (g/kg)	0.261	0.6783	0.9892	0.7582
Argila (g/kg)	0.0237	0.3292	0.4633	0.0446

Valores destacados em negrito indicam diferenças estatísticas ($p \leq 0,05$).

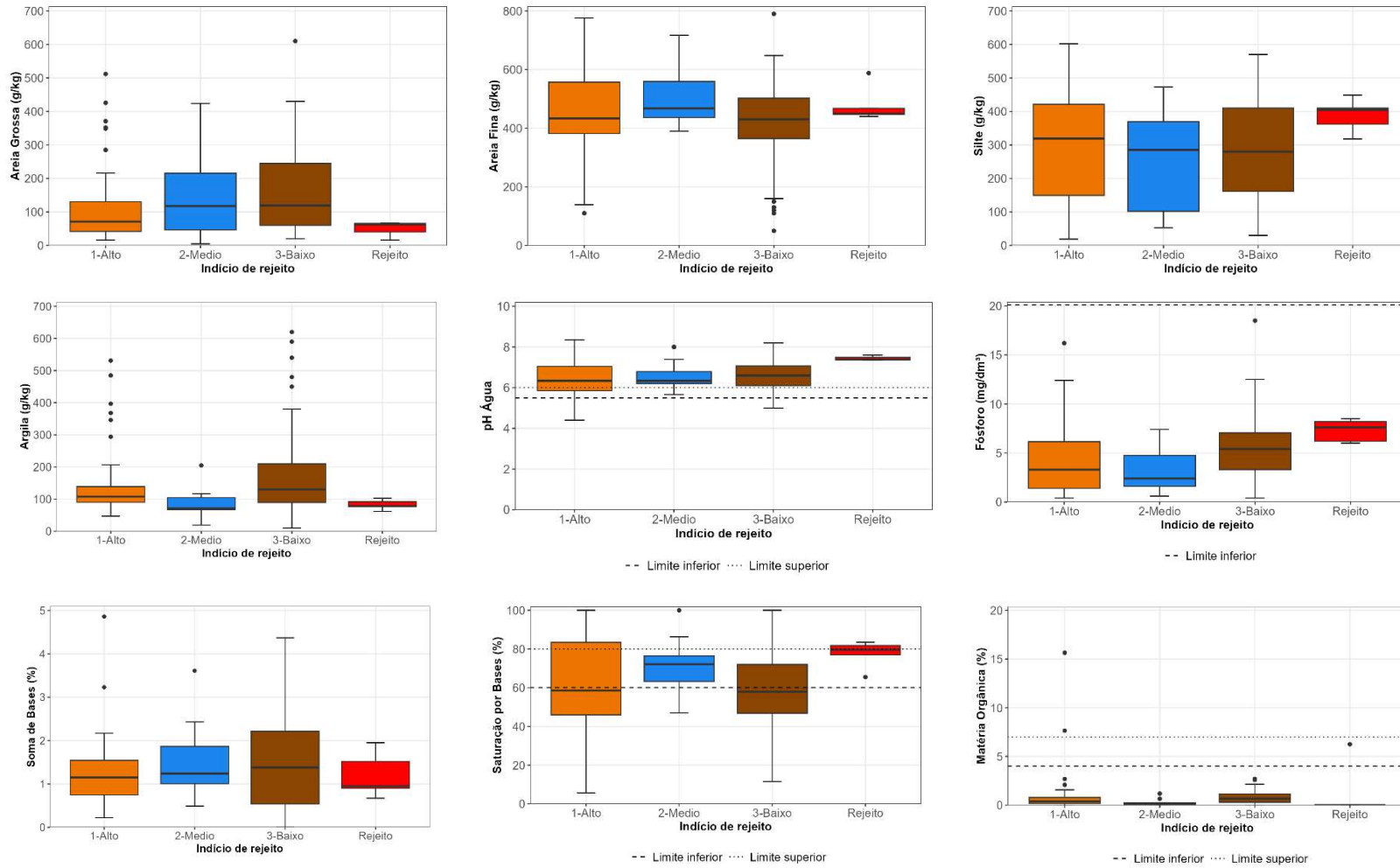


Figura 13 - Gráficos *boxplot* dos parâmetros físicos e químicos dos grupos de solos avaliados

3.2.2 Tecnosolos e solos de áreas não afetadas

Considerando que a ocorrência dos Tecnosolos se deu de forma definitiva após o rompimento da barragem de Fundão, torna-se relevante a sua caracterização de forma mais detalhada, visto que as atividades agrícolas foram retomadas nessas áreas, além de se tratar da maior ocorrência no país de mancha de Tecnosolos formados a partir de rejeitos de mineração. Para caracterizar as propriedades físicas e químicas dos tecnosolos foram desenvolvidos esboços padronizados dos solos estudados, de acordo com a metodologia desenvolvida por Beaudette et al. (2013), de forma a destacar variabilidade de tipos de solo (Tecnosolos x Solos da áreas não afetadas).

O conjunto de amostras de solos não afetados é composto em sua grande maioria por perfis de Latossolos, Cambissolos e Argissolo descritos na região próxima às áreas afetadas. Apesar de essas classes de solos se encontrarem em uma posição diferente da grande maioria dos tecnosolos, elas podem ocorrer na área afetada, como evidenciado pela presença de áreas de encostas (ver seção 2.3). Dessa forma, essas classes servem como referência para os solos de encostas e outros tipos de solo que não estão localizados em planícies, ou seja, outros solos além de Neossolos e Cambissolos Flúvicos.

Na Tabela 3 é apresentado os valores mínimos, médios e máximos dos 50 perfis de Tecnosolos, obtidos a partir da harmonização das camadas para profundidades recomendadas pelo GlobalSoilMap Project.

Ao avaliar as características físicas dos Tecnosolos, foi constatado que a maioria dos 50 perfis apresentava uma textura que variava de Franco-Arenosa, Franca e Areia Franca, com altos teores de areia fina e silte nos horizontes com rejeito. Esses teores elevados de silte e areia fina causam um adensamento do solo, formando camadas compactadas que dificultam o crescimento de raízes. Isso é refletido nos altos valores de densidade do solo encontrados nesses horizontes, conforme relatado por Schaefer et al. (2016).

Tabela 3 - Resultados dos valores mínimos, médios e máximos dos atributos do solo nos Tecnosolos

Profundidades (cm)		Areia grossa (g/kg)			Areia fina (g/kg)			Silte (g/kg)			Argila (g/kg)		
Superior	Inferior	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Máx.
0	5	30,7	115,5	200,2	290,9	435,5	580,2	172,7	313,5	454,2	20,7	141,8	263,0
5	15	29,6	114,4	199,2	294,2	435,9	577,6	172,8	312,1	451,4	24,4	146,8	269,2
15	30	18,3	115,2	212,1	309,0	432,1	555,2	181,5	317,9	454,3	48,2	149,5	250,7
30	60	17,9	136,7	255,5	277,2	411,6	546,0	162,9	306,5	450,1	54,9	156,7	258,6
60	100	14,5	159,1	303,7	260,8	424,3	587,8	127,7	265,8	404,0	29,7	152,9	276,2
100	200	31,2	175,0	318,8	241,8	427,8	613,8	99,6	210,4	321,1	63,7	188,0	312,3
Profundidades		pH água			P (mg/dm ³)			SB (cmoc/dm ³)			CTC efetiva (cmoc/dm ³)		
Superior	Inferior	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Máx.
0	5	5,7	6,4	7,1	2,7	5,9	9,1	172,7	313,5	454,2	0,7	1,7	2,8
5	15	5,8	6,5	7,2	2,9	5,6	8,3	172,8	312,1	451,4	0,8	1,5	2,3
15	30	5,8	6,6	7,3	2,5	5,4	8,3	181,5	317,9	454,3	0,8	1,6	2,3
30	60	5,7	6,6	7,4	1,7	4,7	7,6	162,9	306,5	450,1	0,9	1,6	2,4
60	100	5,5	6,4	7,2	1,1	4,1	7,1	127,7	265,8	404,0	0,7	1,5	2,2
100	200	5,6	6,2	6,8	0,2	2,7	5,1	99,6	210,4	321,1	0,4	1,5	2,6
Profundidades		V (%)			MO (%)								
Superior	Inferior	Min.	Média	Máx.	Min.	Média	Máx.						
0	5	39,7	59,2	78,7	-0,1	0,9	1,9						
5	15	39,8	60,7	81,7	0,0	0,7	1,3						
15	30	43,3	66,2	89,1	0,0	0,6	1,2						
30	60	40,1	65,8	91,4	0,0	0,6	1,2						
60	100	33,4	60,9	88,4	-1,7	0,9	3,5						
100	200	30,4	57,6	84,9	0,0	0,2	0,4						

A distribuição granulométrica dos Tecnosolos ao longo do perfil é geralmente homogênea até uma profundidade de 100 cm, com exceção para o Silte, que apresenta maior variabilidade até essa profundidade, sendo reduzida em profundidades entre 100 e 200 cm. Além disso, os teores de areia fina são duas vezes mais elevados nos Tecnosolos do que nos solos não afetados. O silte apresenta-se em níveis três vezes mais elevados na superfície, mas tende a diminuir para valores semelhantes aos solos naturais à medida que a profundidade aumenta.

Os teores de argila e areia grossa nos solos não afetados foram superiores aos Tecnosolos, corroborando com os resultados encontrados em horizontes não afetados de Tecnosolos. Tais resultados indicam que é preciso tomar precauções ao utilizar solos como referência para estudos de background, uma vez que essas diferenças estão relacionadas principalmente a fatores de formação do solo.

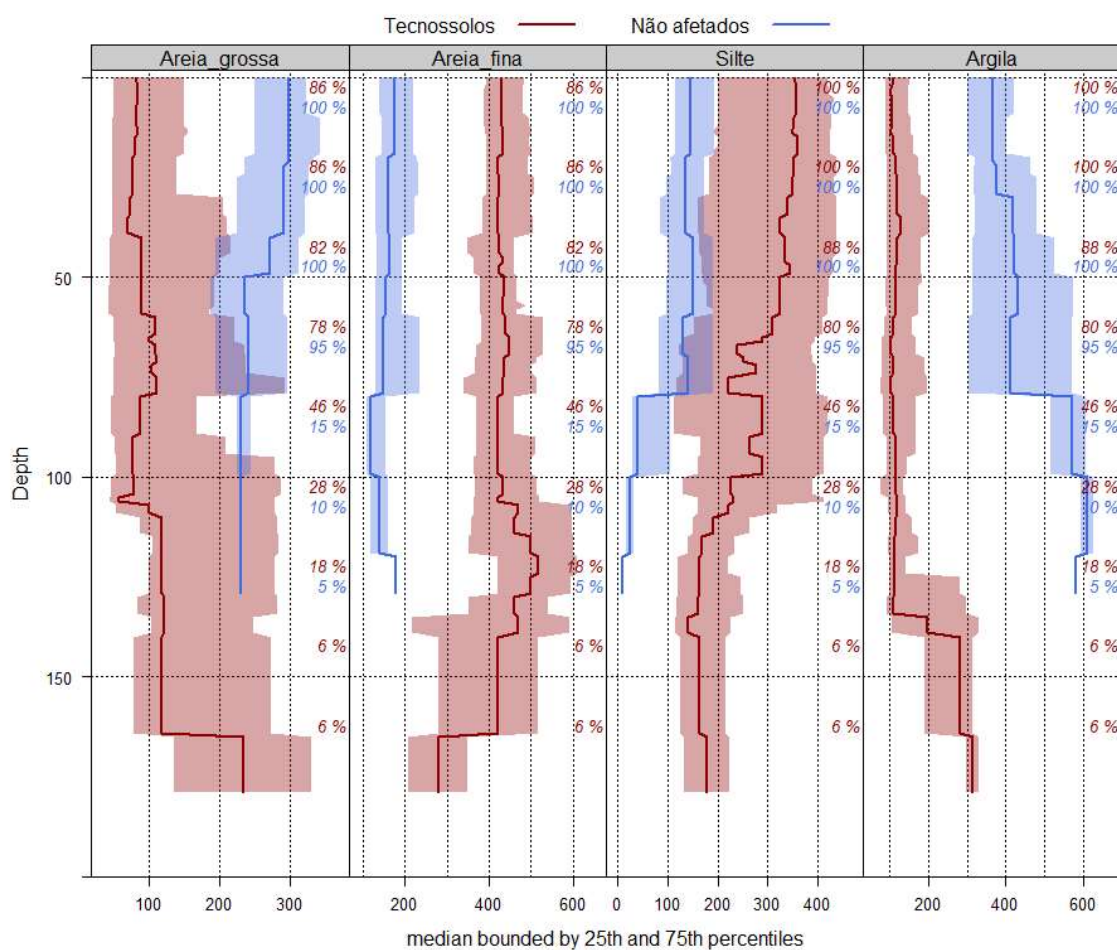


Figura 14 - Distribuição de Areia grossa (g/kg), Areia fina (g/kg), Silte (g/kg), Argila (g/kg). Os valores de porcentagem representam o número relativo de perfis que contribuíram para estimar essa variável

O pH em água dos Tecnosolos apresenta valores mais elevados, variando entre 6 e 7, enquanto os solos não afetados apresentaram valores entre 5 e 5,5. Além disso os valores de fósforo nos Tecnosolos são mais elevados nas camadas superficiais em comparação com os solos não afetados, com reduções significativas à medida que se alcançam camadas não afetadas pelo rejeito. Nessas profundidades as concentrações médias de fósforo são equivalentes dos perfis descritos em áreas não afetadas.

A soma de bases dos perfis não afetados foi maior na superfície, mas reduz-se a medida que se aprofunda o perfil, se assemelhando aos Tecnosolos. Além disso, os valores de saturação por bases nos Tecnosolos foram superiores aos dos solos não afetados, apresentando-se acima de 50% entre 0 e 150 cm.

A análise da matéria orgânica revelou que os valores foram quase nulos nos Tecnosolos quando comparados aos solos não afetados, mesmo que baixos, estes foram maiores na superfície. Já os valores dos solos não afetados foram três vezes maiores do que os Tecnosolos.

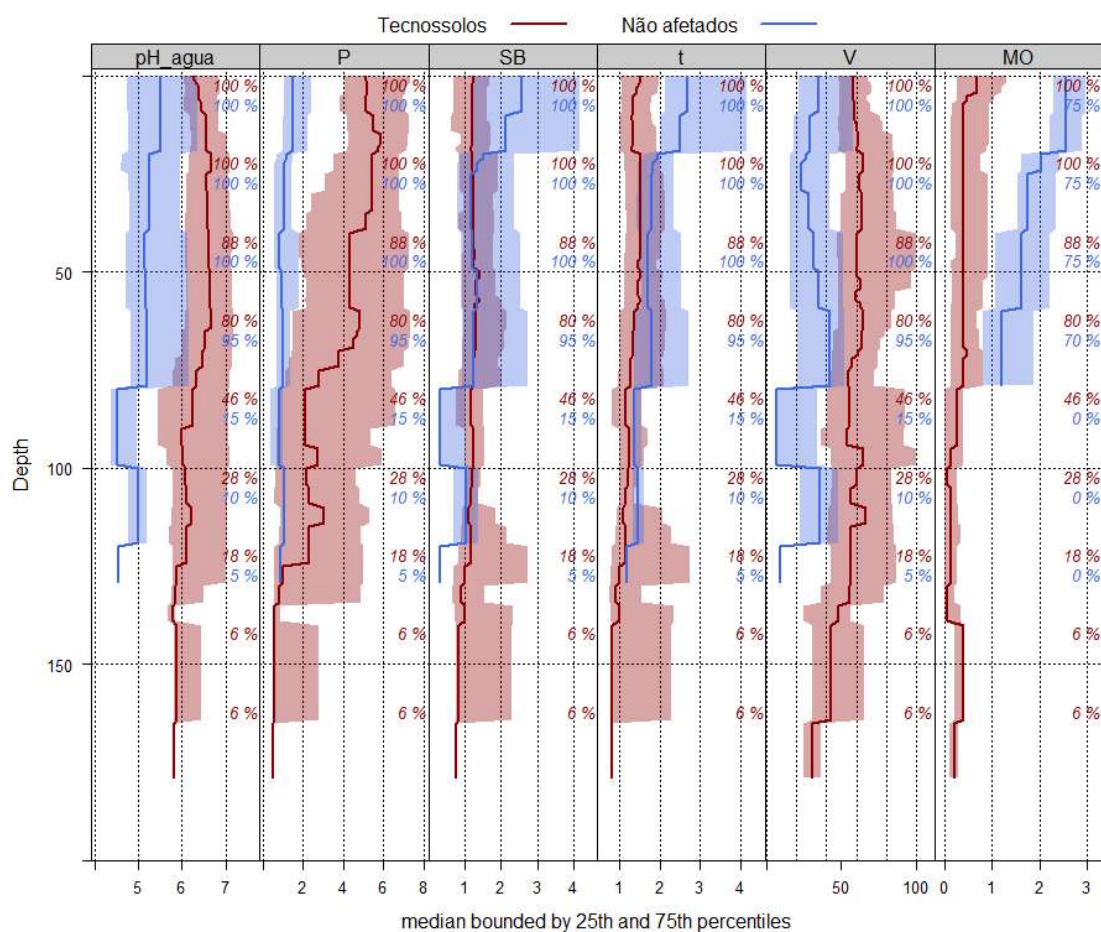


Figura 15 - Distribuição de pH, Fósforo (mg/dm^3), SB (cmolc/dm^3), t (cmolc/dm^3), V (%) e MO (%). Os valores de porcentagem representam o número relativo de perfis que contribuíram para estimar essa variável

3.3 Análise multivariada dos dados

A correlação de Spearman (Figura 16) é uma técnica usada para avaliar a relação entre duas variáveis. Quando a correlação é positiva significa que existe uma ligação direta entre as duas variáveis, ou seja, conforme uma variável aumenta, a outra também aumenta.

A análise da correlação de Spearman entre o silte e outros parâmetros do solo revela que existe uma relação fraca, mas presente, entre a disponibilidade de fósforo (P) (0,33), pH em água (0,42) e saturação por bases (0,39). A argila, por sua vez, apresentou uma correlação moderada com o alumínio (0,43), e uma relação fraca com o Mg^{2+} e CTC efetiva (t), com valores de 0,3 e 0,29, respectivamente.

Entre os atributos químicos do solo identifica-se uma correlação positiva (0,53) entre fósforo e o pH em água. A matéria orgânica apresentou uma correlação alta com o H_{Al} e CTC (T). Já a CTC (T) apresentou uma correlação alta tanto com Mg^{2+} .

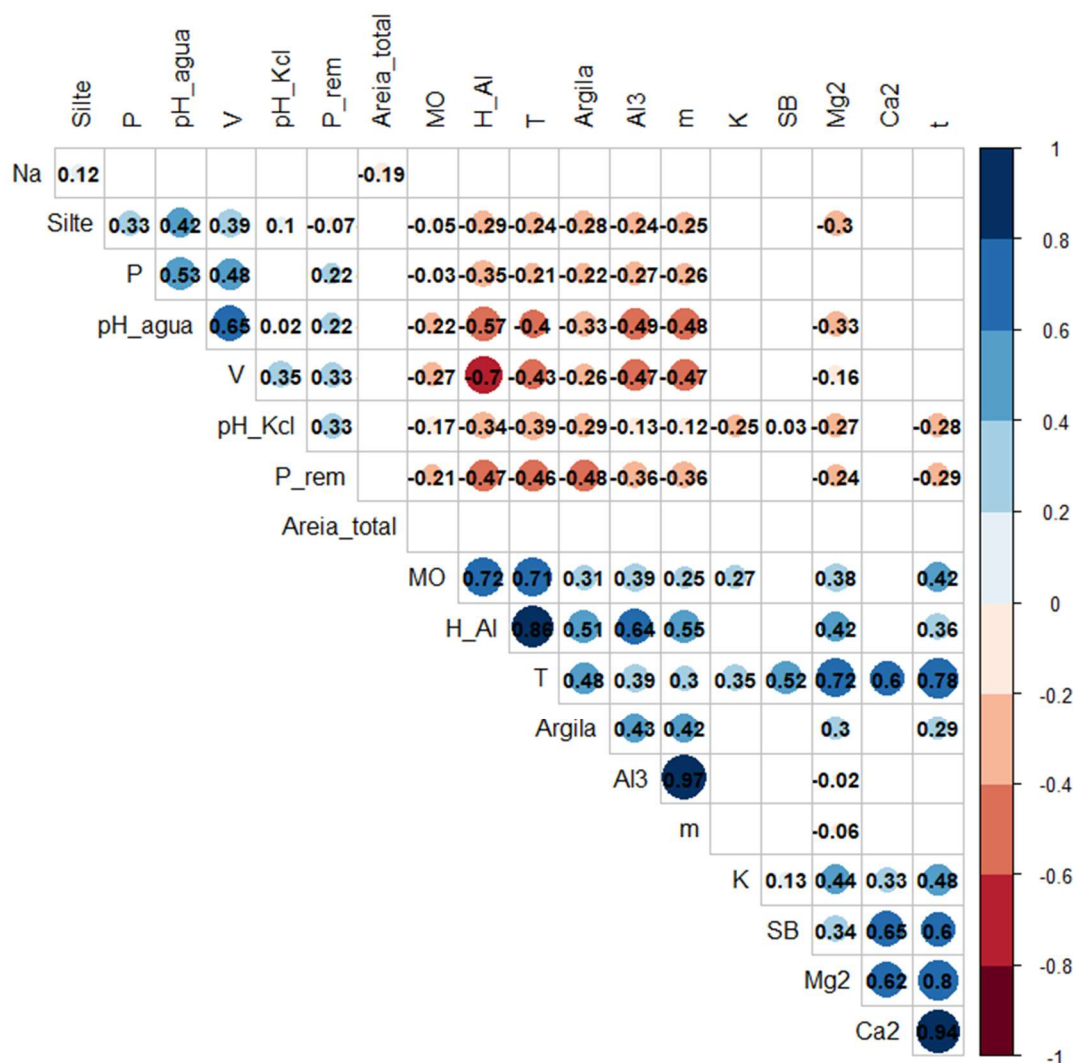


Figura 16 - Correlação de Spearman entre os parâmetros avaliados

A Análise de Componentes Principais foi utilizada usada para identificar a estrutura das relações entre variáveis avaliadas nesse estudo. A PCA é uma técnica estatística utilizada para simplificar a estrutura dos dados, condensando informações complexas em poucas dimensões interpretáveis.

Conforme exibido na Tabela 4, cinco dimensões foram obtidas a partir das variáveis originalmente utilizadas. A dimensão 1 explicou 30,6% da variabilidade dos dados, a partir da maior contribuição dos componentes pH da água (-0,58), Mg²⁺ (0,65), Al³⁺ (0,60), H+Al (0,91), t e T (0,64 e 0,94), V% (-0,58), MO (0,66), P rem (-0,56) e Argila (0,64). Isso indica que esta dimensão está relacionada com a presença de material orgânico, acidez do solo e presença de argila. Tais variáveis apresentam-se mais correlacionadas a solos sem presença de rejeito, sendo constatados valores mais elevados de Alumínio, Matéria Orgânica e Argila em solos sem presença de rejeito.

A dimensão 2 apresenta correlações positivas com o pH da água (0,51), teor de P, Ca²⁺, CTC efetiva e saturação por bases, indicando que esta dimensão pode estar relacionada com a disponibilidade de fósforo e com a acidez do solo.

A dimensão 3 apresenta uma correlação positiva moderada com a variável Na (0,33) e Silte (0,69), sugerindo que esta dimensão pode estar relacionada com a presença de silte e com a presença de sódio no solo e com valores reduzidos de areia total (-0,88). Esta dimensão apresentou-se um pouco mais relacionada às características chaves descritas para os Tecnosolos.

Já a dimensão 4 apresenta correlações positivas com teor de Fósforo (0,48), Potássio (0,59), e negativas com e pH_KCl (-0,36), Na (-0,58). Por fim, a dimensão 5 apresenta correlações fracas com as variáveis, sugerindo que esta dimensão não está fortemente relacionada com nenhum dos parâmetros avaliados.

Tabela 4 - Resultados da PCA - Dimensões e contribuição das variáveis

Variáveis	Dim1	Dim2	Dim3	Dim4	Dim5
pH_agua	-0,58	0,51	0,27	-0,04	-0,03
pH_Kcl	-0,42	-0,11	-0,15	-0,36	0,65
P	-0,34	0,46	0,25	0,48	0,04
K	0,30	0,43	-0,08	0,59	0,06
Na	0,02	0,20	0,33	-0,58	-0,16
Ca2	0,40	0,84	-0,10	-0,14	0,04
Mg2	0,65	0,46	-0,35	0,12	-0,15
Al3	0,60	-0,56	0,25	0,10	0,32
H_Al	0,91	-0,21	0,04	-0,03	0,09
SB	0,36	0,53	-0,22	-0,49	0,23
t	0,64	0,71	-0,12	-0,01	0,04
T	0,94	0,27	-0,06	-0,04	0,06
V	-0,58	0,57	0,15	0,01	0,25
m	0,54	-0,60	0,24	0,09	0,26
MO	0,66	0,13	0,09	0,19	0,40
P_rem	-0,56	0,05	-0,47	0,21	0,31
Silte	-0,35	0,32	0,69	0,06	0,19
Argila	0,64	-0,10	0,35	-0,06	-0,19
Areia total	-0,16	-0,22	-0,88	-0,01	-0,03

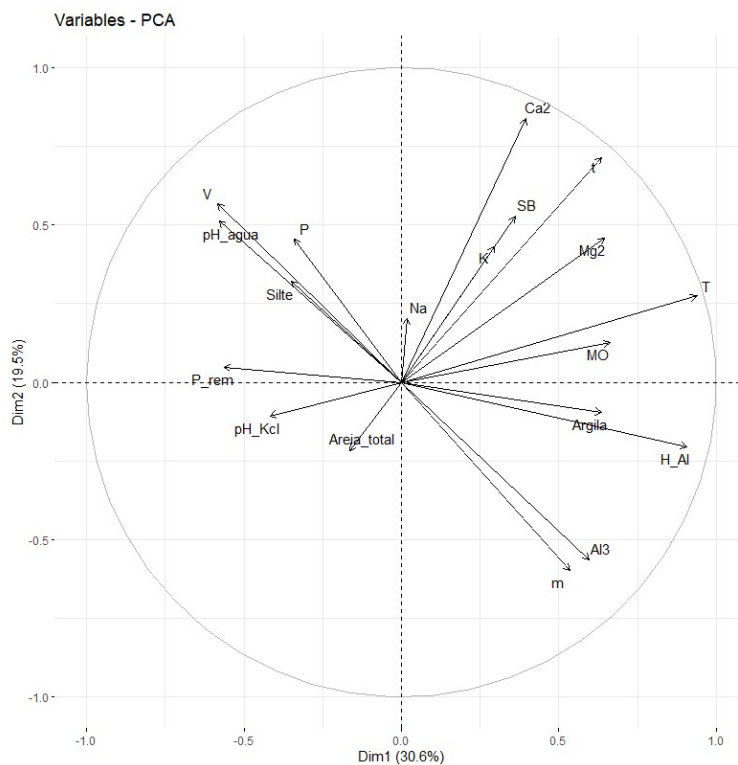


Figura 17 - PCA representada nas dimensões 1 e 2, representando 50,1% da variabilidade dos dados

Na avaliação gráfica de PCA (Figura 18) fica claro que a combinação de dimensões é fundamental para a visualização clara das diferenças entre amostras com e sem rejeito. Quando se consideram apenas as dimensões 1 e 2, não são identificadas diferenças significativas entre os grupos amostrais. Porém, ao considerar as dimensões 1 e 3 ou 2 e 3, as diferenças entre os grupos são apresentadas de forma mais clara.

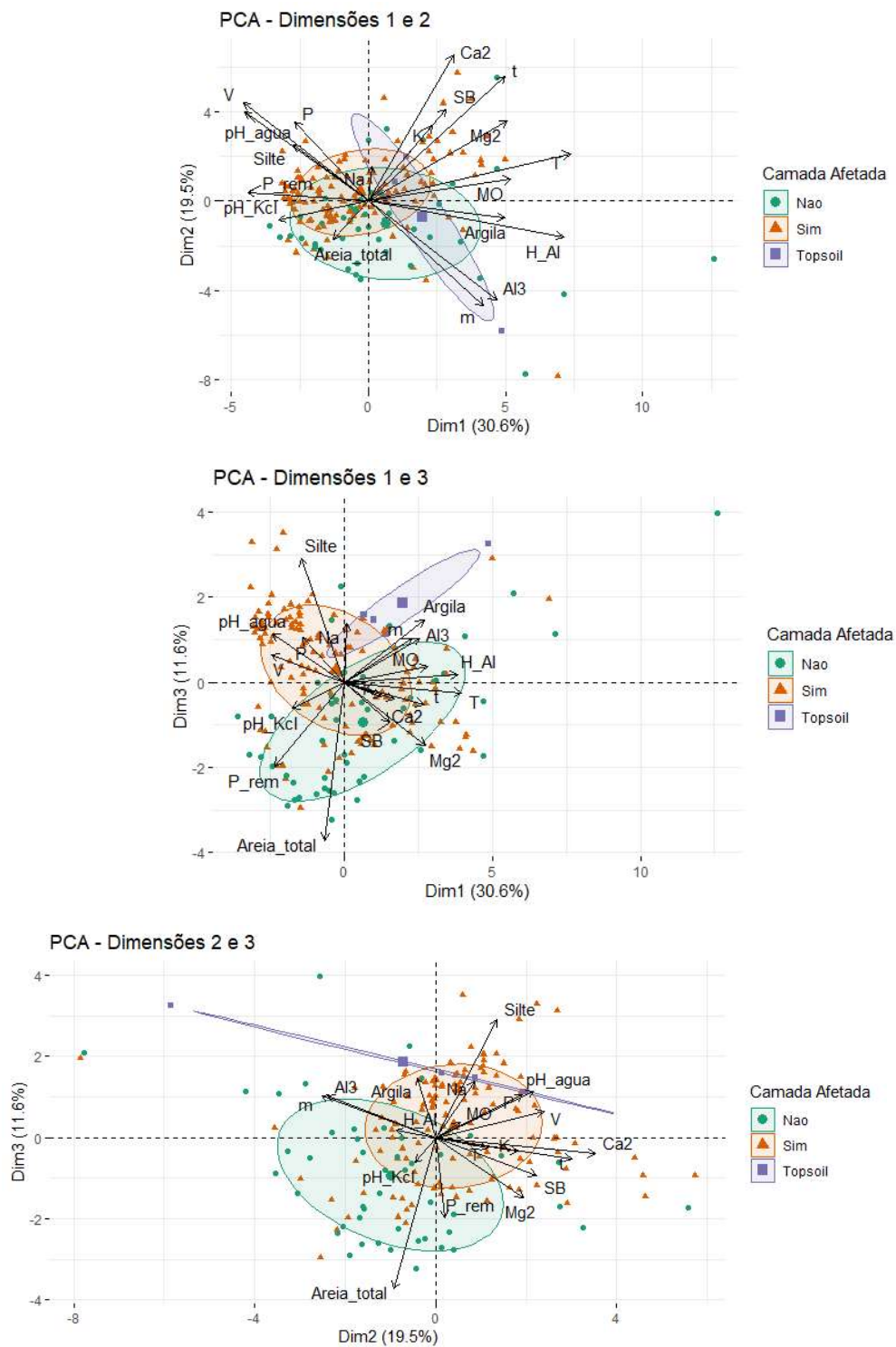


Figura 18 - Análise de Componentes Principais e o efeito das diferentes combinações de dimensões na separação das classes de horizontes/camadas

3.3 Análise de similaridade de Perfis

Os dados foram submetidos a análises de cluster, sendo analisados a partir de uma matriz de dissimilaridade. O objetivo dessa análise de agrupamento hierárquico foi a construção de um diagrama de árvore, onde perfis mais similares são colocados em ramos próximos uns dos outros. Os perfis que se juntam mais cedo (na escala de dissimilaridade representada no eixo Y, são mais semelhantes entre si do que aqueles que se juntam mais tarde. Utilizando as variáveis químicas e físicas, além da informação sobre as camadas contendo rejeito, foram estabelecidos 2 grandes grupos de perfis de Tecnosolos. 39 perfis de Tecnosolos foram agrupados no grupo 1 e 11 perfis no grupo 2. Dos perfis localizados no grupo 2, 9 perfis (81%) foram descritos na parte baixa da área impactada (3-Baixa).

Os Tecnosolos apresentam diferenças importantes entre si, especialmente no que se refere à granulometria das camadas, pH e saturação por bases. O grupo 1 de Tecnosolos é composto por perfis com maior concentração de Silte, enquanto o grupo 2 apresenta uma maior concentração de Areia grossa e Argila. Além disso, os solos do grupo 1 apresentam pH mais elevado do que os perfis do grupo 2. A saturação por bases também é mais elevada no grupo 1 em comparação ao grupo 2.

Os perfis 14, 18, 20, 3 e 60 foram identificados como tendo uma maior similaridade entre si, devido à presença de camadas de rejeito menores. A predominância de camadas sem rejeito contribuiu para essa similaridade, que os aproximou ainda mais dos perfis do grupo 2. NA presença de camadas de rejeito em menor quantidade pode influenciar positivamente nas características dos solos, como a permeabilidade, a capacidade de retenção de água e a disponibilidade de nutrientes para as culturas. Esses perfis, por apresentarem menores camadas de rejeito, podem ser mais propícios à produção agrícola e, por isso, são similares aos perfis do grupo 2.

A presença de camadas de rejeito é uma das características que influenciam na similaridade entre os perfis de solos. Aqueles que apresentam menores camadas de rejeito, como os perfis 14, 18, 20, 3 e 60, tendem a ser mais similares aos perfis do grupo 2. Em resumo, a composição granulométrica, pH, saturação por bases e concentração de nutrientes, como o K, variam entre os dois grupos de Tecnosolos e são importantes para o planejamento de atividades agrícolas e para a escolha de espécies a serem cultivadas.

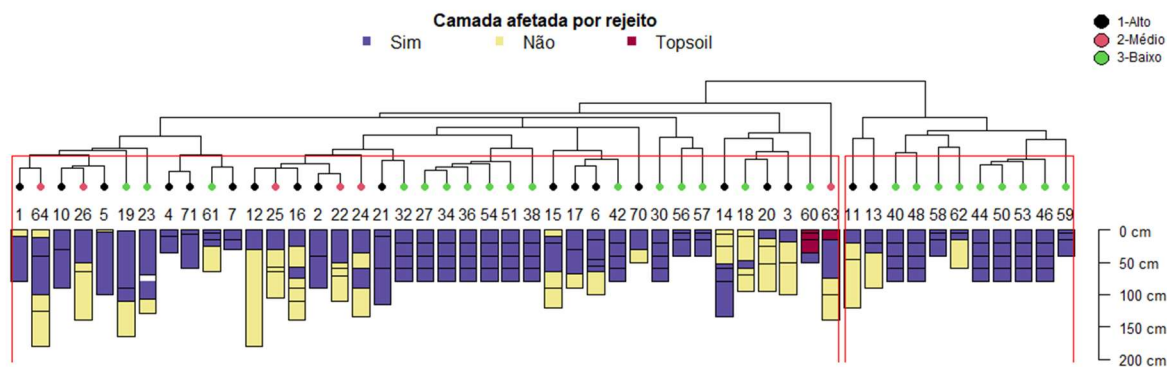


Figura 19 - Resultado da avaliação de dissimilaridade de perfis de Tecno solos. Cor representada pelas características do horizonte em relação a concentração de rejeito

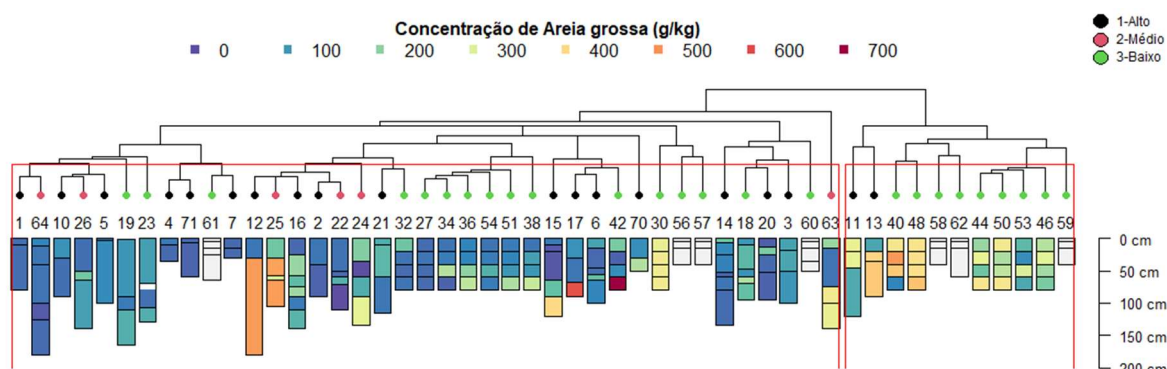


Figura 20 - Resultado da avaliação de dissimilaridade de perfis de Tecno solos. Cor representada pelo teor de areia grossa

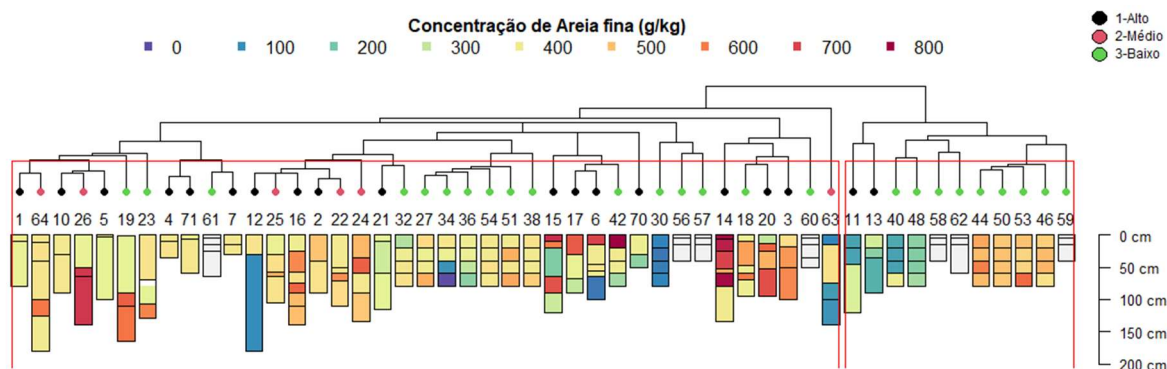


Figura 21 - Resultado da avaliação de dissimilaridade de perfis de Tecno solos. Cor representada pelo teor de areia fina

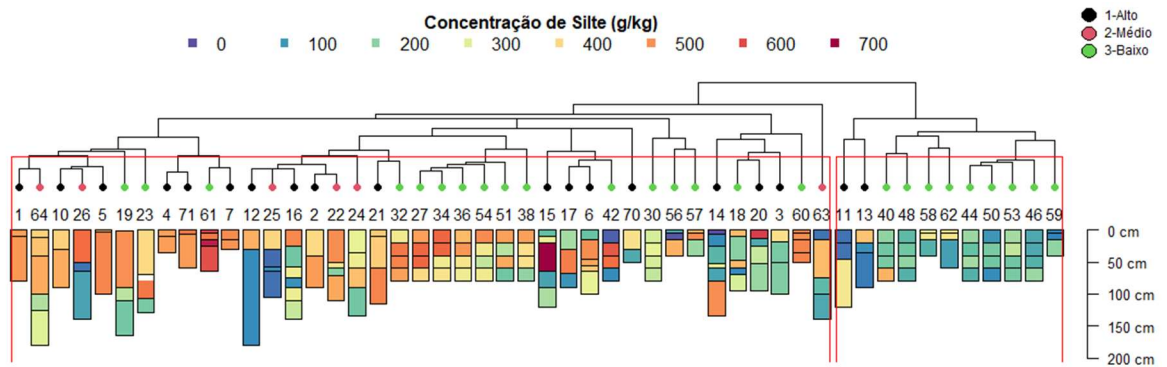


Figura 22 - Resultado da avaliação de dissimilaridade de perfis de Tecno solos. Cor representada pelo teor de silte

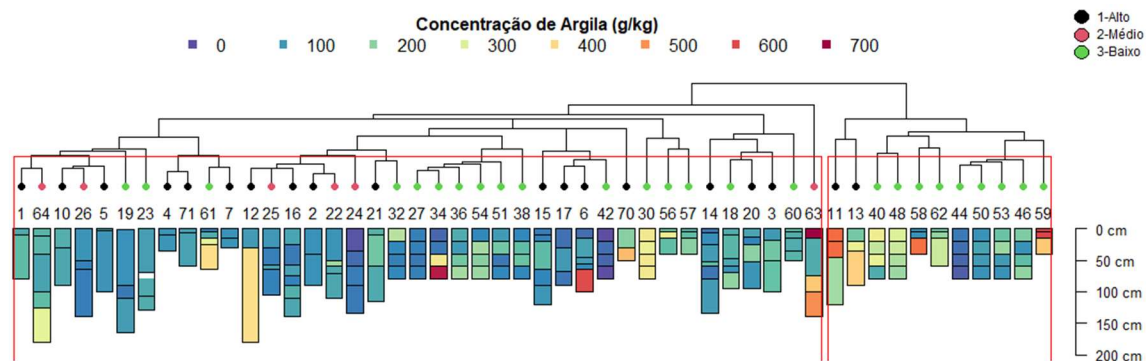


Figura 23 - Resultado da avaliação de dissimilaridade de perfis de Tecnoossolos. Cor representada pelo teor de argila

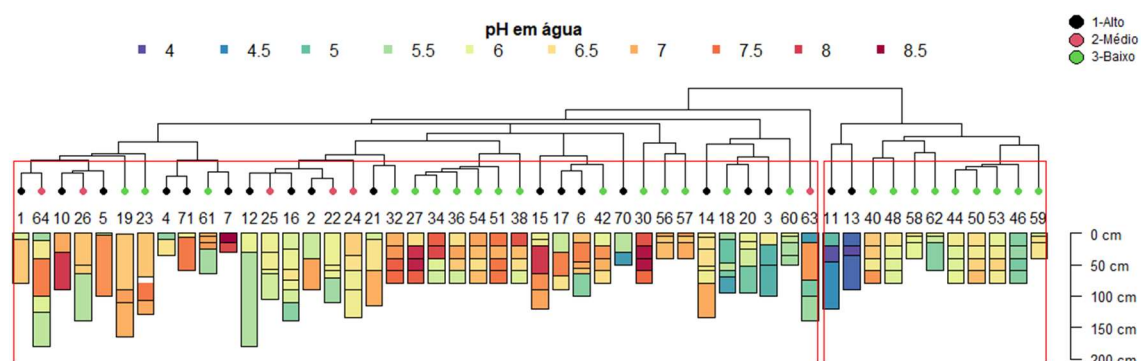


Figura 24 - Resultado da avaliação de dissimilaridade de perfis de Tecnoossolos. Cores representadas pelo pH em água

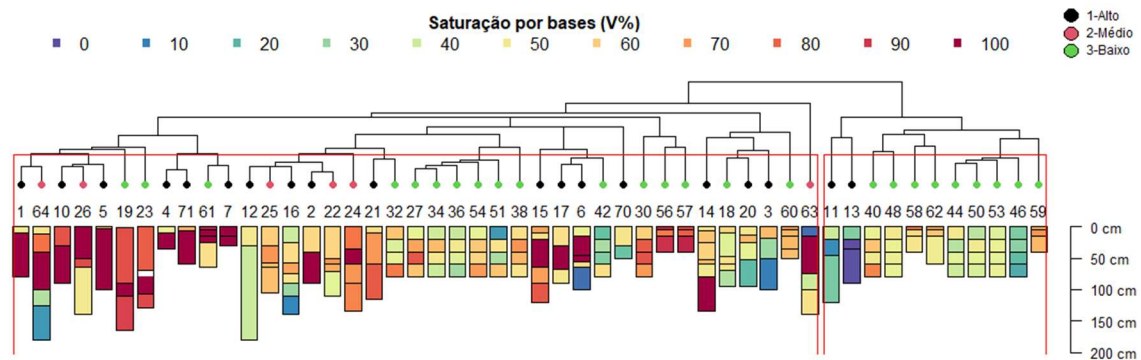


Figura 25 - Resultado da avaliação de dissimilaridade de perfis de Tecnoossolos. Cores representadas pelos valores de saturação por bases

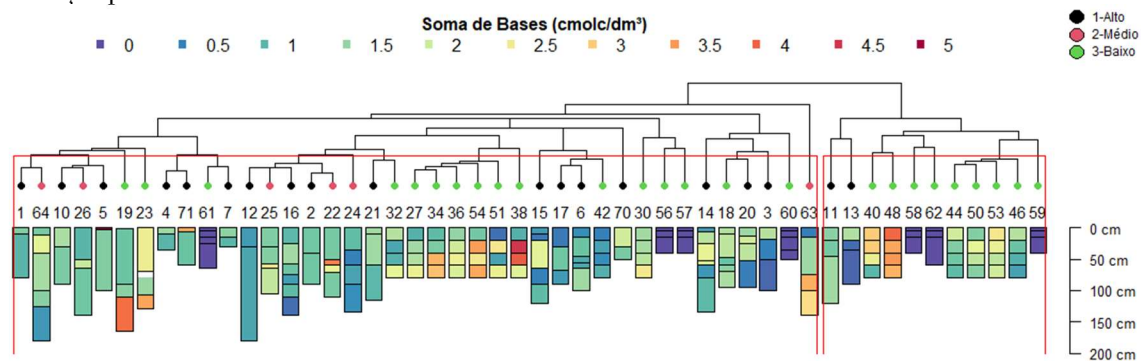


Figura 26 - Resultado da avaliação de dissimilaridade de perfis de Tecnoossolos. Cores representadas pelos valores de soma de bases

4. Discussão

A análise dos dados revelou padrões em camadas de solos afetados pelo rejeito, especialmente em relação à granulometria. As camadas contendo rejeito apresentaram composição majoritariamente de silte e areia fina. Tais resultados vão de encontro aos estudos realizados por Silva et al. (2016), Pimentel (2022), Martins (2022). A correlação de Spearman destacou algumas associações entre a presença de silte e a disponibilidade de fósforo, pH em água e saturação por bases, indicando que o material tecnogênico alterou também as condições químicas do solo de áreas afetadas.

A alta correlação entre a matéria orgânica e H+Al e T, assim como a correlação destas com Mg²⁺ e CTC efetiva, sugere uma interdependência desses parâmetros, com a MO apresentando influência direta na capacidade de troca de cátions dos tecnossolos. Dessa forma o manejo mais adequado dos tecnossolos deve priorizar a adição de matéria orgânica no sistema, uma vez que a MO aumenta a carga negativa líquida superficial (Costa et al., 2013), aumentando assim a capacidade do solo em reter cátions (Raij, 1969), além de melhorar a estrutura do solo (Figueiredo et al., 2008). Segundo Schaefer et al. (2016), logo após o acidente já havia indícios que os problemas físicos representavam um desafio maior do que os aspectos químicos para a recuperação ambiental.

De fato, foi constatado em campo que em níveis baixos de umidade, principalmente nas épocas com chuvas escassas, a ocorrência de camadas extremamente compactadas, descritas por Schaefer et al. (2016) como *hardsetting*. Segundo Reinert et al., (2008) foram identificadas alterações morfológicas em raízes em maior frequência quando a densidade do solo variou entre 1,85 e 1,92 Mg m³ para solos com textura média. De acordo com esses autores ocorreram desvios da raiz principal, com crescimento em profundidade limitado, provocando um crescimento horizontalizado. Nesse sentido ações que promovam o reestabelecimento da qualidade física desses solos são fundamentais para as ações de restauração das áreas afetadas, uma vez que os terraços fluviais afetados representavam uma importante parcela produtiva da maioria das propriedades afetadas, sobretudo para a atividade de pecuária.

O uso de solos de empréstimo (*topsoil*), aparenta ter contribuído para a restauração de algumas áreas ao longo da área afetada, conforme já apontava Schaefer et al. (2016). Essa técnica foi implementada principalmente nos setores hidrogeomorfológicos 2 (Médio) e 3 (Baixo), fato que contribuiu elevar os teores de argila nas camadas superficiais desses solos. O aumento dos teores de argila tende a melhorar a macroporosidade do solo e conseqüentemente

a condutividade hidráulica e permeabilidade dos solos (Ferreira et al., 1999), reduzindo a densidade do solos em camadas mais superficiais, favorecendo o crescimento radicular (Reinert et al., 2008).

A camada de rejeito ao longo dos perfis do grupo 1 (Alto) e grupo 2 (Médio) apresentou uma heterogeneidade significativa em termos de espessura e profundidade de ocorrência. A dinâmica de formação de solos aluviais a partir do transporte e deposição de sedimentos do rio Gualaxo do Norte também é apontada como um fator relevante nas características dos tecnossolos, especialmente na região de alta competência do rio, onde sedimentos de maior granulometria podem ser transportados com maior intensidade. Esse processo originado nas margens dos canais fluviais durante as enchentes, favorecem a formação de depósitos de diques marginais, contribuindo para a redução da densidade do solo dos locais afetados pelo rejeito. A presença dessas camadas arenosas contribuem para a identificação de transições abruptas entre os horizontes sem e com rejeito, sendo essa uma característica pedológica típica dos tecnossolos da área de estudo.

Do ponto de vista da formação dos tecnossolos do alto rio Doce, a presença em maior expressão de planícies aluvionares nos setores hidrogeomorfológicos 2 e 3 contribuiu para a preservação da estrutura original do solo abaixo da camada de rejeito. A presença de áreas mais extensas com topografia menos declivosa (terraços fluviais) favoreceu a redução da energia da lama logo após o rompimento.

O uso da PCA teve o intuito de condensar as complexas interações entre as variáveis, destacando padrões na variabilidade dos dados. As dimensões 1, 2, 3 explicaram 61,7 da variabilidade dos dados. Destacam-se as relações entre o grupo formado por pH, V% e P rem e Silte, que apresentaram valores mais elevados nos solos com rejeito, e as relações entre Mg^{2+} , Al^{3+} , H+Al, t e T e MO, que naturalmente apresentam resultados mais elevados em solos sem rejeito.

Na análise de cluster foram formados dois grupos distintos, sendo 39 perfis agrupados no grupo 1 e 11 perfis no grupo 2, sugerindo existir diferenças significativas entre os perfis de tecnossolos avaliados. As características granulométricas foram um fator crucial na diferenciação dos grupos. O grupo 1 exibe uma predominância de silte, enquanto o grupo 2 apresenta concentrações mais elevadas de areia grossa e argila. A constatação de que no grupo 2, 81% dos perfis estão localizados no setor hidrogeomorfológico 3 (Baixo), sugere uma distribuição espacial específica dessas características. Isso pode estar associado a processos de transporte e deposição de materiais, resultando em variações nas propriedades do solo em

diferentes partes da área afetada, vindo a impactar positivamente no processo de restauração desses ambientes.

5. Conclusão

Constatou-se que os Tecossolos assentados em planícies aluvionares dos rios Gualaxo do Norte e Carmo apresentam algumas características químicas e físicas distintas dos solos não impactados.

Na ausência de dados de solos representativos das condições pretéritas ao rompimento da barragem de Fundão, a utilização de horizontes/camadas de perfis não afetados por rejeito podem ser orientadores para o estabelecimento de valores de background.

A aplicação das técnicas de fatiamento do perfil permitiu identificar as principais características físicas e químicas de solos afetados e não afetados por rejeito de mineração. Foi possível avaliar em profundidade o comportamento dos atributos físicos e químicos entre 3 conjuntos de Tecossolos, e entre solos afetados e não afetados.

A avaliação de diferentes bases de dados permitiu que fosse realizada uma avaliação ampla dos atributos físicos e químicos dos Tecossolos, permitindo determinar atributos chaves na identificação de Tecossolos originados de depósitos de rejeito da mineração de ferro. Os solos localizados no setor 3-Baixo apresentaram valores mais variáveis de argila e silte nas camadas superficiais, enquanto nos solos do setor 1 e 2 (Alto e Médio) apresentaram maior homogeneidade textural.

6. Referências bibliográficas

ALVAREZ V.H., NOVAIS R.F. DE, BARROS N.F. DE, ET AL. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro AC (ed) Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5a aproximação. Viçosa, p 359. 1999.

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de. Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil. 2014.

ASENSIO, V. et al. The potential of a Technosol and tropical native trees for reclamation of copper-polluted soils. *Chemosphere*, v. 220, p. 892-899, 2019.

BEAUDETTE, Dylan E.; ROUDIER, Pierre; O'GEEN, A. T. Algorithms for quantitative pedology: A toolkit for soil scientists. *Computers & Geosciences*, v. 52, p. 258-268, 2013.

BEISIEGEL V.R. Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás. In: Simpósio de Geologia da Amazônia, Anais, Belém, SBG Núcleo Norte, p 21-46. 1982.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Informe Mineral 04TRI2023. 18p. Brasília: ANM. 2023.

DA CRUZ, Guilherme Soares; DOMINGUES, André Luis. Áreas impactadas na sub-bacia do Rio Gualaxo do Norte: rompimento da Barragem de Fundão, MG. *Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas*, v. 18, n. 2, p. 277-286, 2017.

DA VITÓRIA, Flávia Constantino et al. Desastre Ambiental Da Barragem De Fundão, Mariana, Mg-Análise De Impactos Socioambientais. *Revista Internacional de Ciências*, v. 9, n. 3, p. 2-15, 2019.

DIAS, Andréia Aparecida. Avaliação de atributos do solo determinantes para a arquitetura de raízes de espécies florestais arbóreas em substratos contendo rejeito proveniente da barragem de Fundão, Mariana MG. 2020.

DUARTE, Eduardo Baudson et al. Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil. *Chemosphere*, v. 262, p. 127879, 2021.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solo. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro. 2018.

FELIPPE, Miguel Fernandes; MENDES, Laís Carneiro. Para onde foi a lama da barragem de Fundão (Mariana, Minas Gerais)? A distribuição dos rejeitos ao longo dos vales fluviais afetados pelo desastre da Samarco/Vale/BHP. *Revista Espinhaço*, 2022.

FONSECA, Luciano. Avaliação de métodos de perfilagem geofísica na pesquisa de minério de ferro—estudo de caso: definição de contatos litológicos na Mina de Capanema, MG. 2014.

FAO, Food and Agricultural Organization of the United Nations/World Reference Base for Soil Resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (Report no. 106). 2015.

GUERRA, Marcelo Braga Bueno et al. Post-catastrophe analysis of the Fundão Tailings dam failure in the Doce River system, Southeast Brazil: Potentially toxic elements in affected soils. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 228, p. 1-12, 2017.

HONGYU, Kuang; SANDANIELO, Vera Lúcia Martins; DE OLIVEIRA JUNIOR, Gilmar Jorge. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S Engineering and science*, v. 5, n. 1, p. 83-90, 2016.

LARA, Rodrigo; PEREIRA, Israel; SILVA, Michele. Caracterização química, física e elementar de substratos oriundos da mineração de ferro em Conceição do Mato Dentro—MG. *Agrarian Academy*, v. 4, n. 08, 2017.

LAL, Rattan; AUGUSTIN, Bruce (Ed.). Carbon sequestration in urban ecosystems. Springer Science & Business Media, 2011.

MARTA-ALMEIDA, Martinho et al. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. *Marine pollution bulletin*, v. 112, n. 1-2, p. 359-364, 2016.

MINAS GERAIS, Lei nº 23.291/2019. Estabelece a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB), são regulamentadas pela Resolução Conjunta Semad/Feam/IEF/Igam nº 3.181/2022.

PINHEIRO, Helena Saraiva Koenow et al. Ferramentas de pedometria para caracterização da composição granulométrica de perfis de solos hidromórficos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1326-1338, 2016.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>. 2021.

RONQUIM, Carlos César. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. 2010.

SANTOS, R. D. dos; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Viçosa: SBCS, 2015.

SANTOS, Eliana Elizabet 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. 2019.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E.E.; SOUZA, C.M.; NETO, J.D.; FILHO, E. I. F.; DELPUPO, C. 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*, v. 24, n 1/2, p. 105-135, 2015

SCHAEFER, C. E. G. R., Santos, E. E., Fernandes Filho, E. I., & Assis, I. R. (2016). Paisagens de lama: Os tecnossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da Barragem de Fundão, em Mariana, *Boletim informativo da SBCS*, (Jan-Abr), 18–23

SEGURA, F. R., Nunes, E. A., Paniz, F. P., Paulelli, A. C. C., Rodrigues, G. B., Braga, G. U. L., Pedreira Filho, W. R., Barbosa Jr., F., Cerchiaro, G., Silva, F. F., & Batista, B. L. (2016). Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental Pollution*, 218, 813–825.

SILVA, Aline Oliveira et al. Chemical, physical, and biological attributes in soils affected by deposition of iron ore tailings from the Fundão Dam failure. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 193, n. 8, p. 462, 2021.

SILVA, Mariano Andrade da et al. Sobreposição de riscos e impactos no desastre da Vale em Brumadinho. *Ciência e Cultura*, v. 72, n. 2, p. 21-28, 2020.

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

TAKEHARA, Lucy. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros. 2004.

TAIYUN, W. SIMKO, V. R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92). Available from <https://github.com/taiyun/corrplot>. 2021.

YANG, Jin-Ling; ZHANG, Gan-Lin. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils—A review. *Soil science and plant nutrition*, v. 61, n. sup1, p. 30-46, 2015

CAPÍTULO 2

MAPEAMENTO DIGITAL DA GRANULOMETRIA DOS SOLOS POR MODELOS RANDOM FOREST SOB O ASPECTO DA AVALIAÇÃO AMBIENTAL DE ÁREAS AFETADAS POR REJEITO DE MINERAÇÃO

Resumo

O rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em novembro de 2015, alterou as condições edáficas de parte da bacia dos rios Gualaxo do Norte e Carmo. Este trabalho teve como objetivo caracterizar os solos dessas áreas utilizando mapeamento digital de solo (MDS). Ferramentas de MDS foram aplicadas para avaliar as relações entre solos e componentes naturais, contribuindo para a compreensão das características desses ambientes em três cenários distintos. Variáveis ambientais SCORPAN foram empregadas na construção de modelos de machine learning através do algoritmo Random Forest, processados no software R. A seleção de conjuntos de dados considerou diferentes períodos, incluindo amostras pré e pós-rompimento. A análise de desempenho dos modelos, utilizando índices estatísticos como MAE, RMSE, R^2 e LCCC, revelou desafios, especialmente para o modelo pré-rompimento. Resultados mais robustos foram obtidos para as condições pós-rompimento, destacando a influência da homogeneidade do rejeito, com a delimitação da área afetada sendo a variável mais importante. Observou-se uma distribuição textural semelhante nos três modelos, com destaque para concentrações de argila em encostas superiores/mesas e areia fina em desfiladeiros, vales e planícies. Alterações significativas na textura do solo foram notadas apenas em áreas de planície, com redução de argila e areia grossa, e aumento de silte pós-rompimento. O cenário atual demonstra o reestabelecimento dos diques aluviais, através do incremento principalmente de areia fina nos trechos mais próximos ao curso d'água, transportada e depositada nos períodos de cheia dos rios Gualaxo, Carmo e Doce. A constatação da recuperação ao longo de oito anos a partir da construção de modelos ressalta a importância do monitoramento desses ambientes, fornecendo valiosas informações para a gestão e avaliação da resiliência de ambientes afetados.

Palavras chave: monitoramento ambiental, modelagem de tecnossolos; aprendizado de máquina

DIGITAL MAPPING OF SOIL GRANULOMETRY USING RANDOM FOREST MODELS UNDER THE ASPECT OF ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF AREAS AFFECTED BY MINING WASTE

Abstract

The Fundão dam rupture, which occurred in November 2015, altered the soil conditions of part of the Gualaxo do Norte and Carmo river basins. This study aimed to characterize the soils of these areas using digital soil mapping (DSM). DSM tools were applied to evaluate the relationships between soils and natural components, contributing to the understanding of the characteristics of these environments in three different scenarios. SCORPAN environmental variables were used to build machine learning models through the Random Forest algorithm, processed in the R software. The selection of data sets considered different periods, including pre- and post-rupture samples. The performance analysis of the models, using statistical indexes such as MAE, RMSE, R^2 and LCCC, revealed challenges, especially for the pre-rupture model. More robust results were obtained for the post-rupture conditions, highlighting the influence of the homogeneity of the tailings, with the delimitation of the affected area being the most important variable. A similar textural distribution was observed in the three models, with emphasis on clay concentrations on upper slopes/tables and fine sand in canyons, valleys and plains. Significant changes in soil texture were noted only in plain areas, with a reduction in clay and coarse sand, and an increase in silt after the failure. The current scenario demonstrates the reestablishment of alluvial dikes, mainly through the increase in fine sand in the sections closest to the watercourse, transported and deposited during the flood periods of the Gualaxo, Carmo and Doce rivers. The observation of recovery over eight years from the construction of models highlights the importance of monitoring these environments, providing valuable information for the management and assessment of the resilience of affected environments.

Keywords: environmental monitoring, technosol modeling; machine learning

1. Introdução

O desastre ocorrido em Mariana (MG), em novembro de 2015, com o rompimento da barragem de Fundão, gerou impactos profundos no ambiente, afetando diretamente os solos da região (Lopes, 2016). Este evento resultou na liberação de uma imensa quantidade de rejeitos de mineração, que se espalharam nos leitos e planícies fluviais dos rios Gualaxo do Norte, Carmos e Doce (Sánchez et al., 2016). À medida que os desdobramentos desse episódio são estudados, é imperativo compreender os efeitos específicos que a lama proveniente da barragem teve sobre o solo, suas propriedades e, por extensão, sobre a saúde dos ecossistemas terrestres na área afetada.

A deposição dos rejeitos de mineração gerou um novo ambiente dominado por Tecnosolos, que se refere aos solos dominados ou fortemente influenciados por processos antrópicos e que podem conter quantidades significativas de artefatos (IUSS, 2014). A investigação da evolução dos Tecnosolos é recente (Capra et al., 2015) e ainda carece de bases de dados representativas sobre suas propriedades e dinâmica evolutiva. Como alternativa, segundo Leguedois et al. (2016), a construção de modelos preditivos para investigar Tecnosolos podem fornecer dados sobre sua evolução para estabelecer modelos pedogenéticos confiáveis. O grande desafio é que estes solos modificados refletem as complexas interações entre a ação antrópica e o meio ambiente. O design de uma modelagem estrutura para a evolução do Tecnosolo deve, portanto, trazer desenvolvimentos interessantes para a modelagem pedogenética em geral (Leguédois et al., 2016).

Outra ferramenta que pode colaborar nos estudos direcionados aos Tecnosolos é o mapeamento digital de solos (MDS), que representa uma abordagem avançada e inovadora na caracterização e compreensão dos solos em diferentes regiões geográficas (Mcbratney et al., 2003). Essa técnica utiliza uma junção de tecnologias de sensoriamento remoto, sistemas de informações geográficas (SIG) e modelagem digital para criar representações detalhadas e precisas das propriedades e classes de solo, além de permitir a criação de modelos preditivos que relacionam as características observadas do solo com variáveis ambientais (Wadoux et al., 2024). Esses modelos podem ser utilizados para fazer previsões em áreas não amostradas, melhorando significativamente a eficiência do mapeamento (Chen et al., 2022).

O uso do MDS tem se destacado como uma ferramenta eficaz na avaliação de impactos ambientais (Ardabili et al., 2019), pois oferece uma abordagem detalhada e abrangente para compreender as mudanças nos solos decorrentes de diversas atividades humanas. Nesse sentido,

a utilização de indicadores de qualidade do solo, como textura, densidade, umidade e composição química do solo, podem indicar os efeitos das alterações significativas (De Araújo et al., 2012), seja devido à mineração, urbanização, agricultura intensiva ou outros processos industriais. Um dos benefícios fundamentais da aplicação do MDS, é a capacidade de monitorar as mudanças ao longo do tempo. Ao comparar mapas de solos em diferentes períodos, é possível avaliar a dinâmica das transformações, identificar tendências e entender a evolução dos impactos ambientais em uma determinada região (Dalmolin et al., 2015).

Por muito tempo, os solos foram vistos como corpos naturais relativamente estáveis, evoluindo ao longo de séculos a milhões de anos. Contudo, evidências crescentes apontam para mudanças mais rápidas no solo, ocorrendo agora em uma escala temporal de décadas (van Breemen & Buurman, 2002; De Kimpe & Morel, 2000; Howard e Olszewska, 2011; Tugel et al., 2005; Richter, 2007). Essa evolução é ainda mais intensa quando trata dos Tecnosolos, como os desenvolvidos pela deposição dos rejeitos de Fundão, onde estudos recentes demonstraram as rápidas transformações nas suas propriedades após as intervenções realizadas no local (Santos, 2019; Martins, 2022; Palma, 2022).

Em um cenário de crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental, o mapeamento digital de solos surge como uma ferramenta valiosa, fornecendo informações cruciais para a tomada de decisões fundamentadas e a promoção de práticas de manejo que visem a conservação e o uso sustentável dos recursos naturais, sobretudo para modelagem de Tecnosolos. Nessa perspectiva, o conhecimento da evolução desse solos, seja no que concerne à sua distribuição espacial, seja no interrelacionamento com os componentes bióticos e abióticos do meio, e mesmo no que tange às suas características intrínsecas, é portanto ainda incipiente. A modelagem quantitativa da evolução do solo, especialmente dos Tecnosolos, torna-se crucial para objetivos cognitivos e aplicados. Isso inclui a compreensão dos processos evolutivos, avaliação do futuro dos solos, impacto ambiental e desenvolvimento de soluções inovadoras para desafios como a recuperação de ambientes. Nesse sentido o objetivo deste trabalho foi caracterizar de forma abrangente os solos da região afetada pelo rompimento da barragem de Fundão a partir de ferramentas de MDS, avaliar suas relações com os principais componentes do meio natural, com a finalidade de contribuir com a avaliação das principais características que contribuem para evolução desses ambientes.

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

Este estudo focou áreas situadas na bacia do rio Doce que foram afetadas pelo rompimento da Barragem de Rejeitos de Fundão. Esse incidente desencadeou uma mistura de rejeitos e água, contaminando os cursos d'água locais, como o córrego Santarém, rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce, além do ambiente marítimo na foz do rio Doce. A pesquisa delimitou sua área de estudo aos segmentos à montante do reservatório da UHE Risoleta Neves, que sofreu impactos físicos consideráveis devido à ruptura da barragem de rejeitos. Nessa região, caracterizada por um clima tropical chuvoso com invernos secos (classificado como Aw, segundo Köppen, 1948), os impactos ambientais foram profundos e duradouros.

A bacia dos rios Gualaxo do Norte e Carmo, situada na região Leste-sudeste do Quadrilátero Ferrífero, destaca-se pela predominância de rochas contendo depósitos de ferro (Fe) e ouro (Au). A posição tectônica do Quadrilátero Ferrífero propiciou a formação de vários depósitos minerais, resultado de diversas fases de deformação geológica. As unidades geológicas ao longo do curso incluem rochas do Supergrupo Minas e suas subdivisões, formando uma sucessão paleoproterozóica de rochas sedimentares de interesse para a mineração.

Na porção mais elevada da bacia ocorrem a região das serras e encostas do Quadrilátero Ferrífero, caracterizada por terrenos em maior altitude e declividade, predominantemente ocupados por Cambissolos e Neossolos Litólicos. A vegetação, composta por campos rupestres e matas de candeias, reflete a complexidade dessa paisagem ecotonal entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica. Nos platôs elevados ocorre a predominância dos campos rupestres ferruginosos formados sob Plintossolos Pétricos, representando um setor de especial interesse para a conservação.

Ao adentrar a região de transição para as terras baixas da bacia, existem as cristas alinhadas e as Florestas de Transição, com predominância de Cambissolos distróficos. Nestas áreas, o material de origem é majoritariamente composto por filitos. Nas cotas mais baixas da bacia, sob domínio de rochas do embasamento cristalino, encontramos a região de mares de morros. Neste ambiente, ocorre a predominância de Latossolos e Argissolos, originalmente cobertos por Floresta Estacional Semidecidual. Contudo, a expansão de pastagens e áreas agrícolas substituiu parte dessa vegetação nativa.

Ao longo do curso principal, também existem solos relacionados à dinâmica de transporte de sedimentos, incluindo Neossolos e Cambissolos Flúvicos, bem como Gleissolos em áreas de drenagem insuficiente. Esses solos foram cobertos pelos rejeitos da barragem, originando os Tecossolos abordados neste estudo. Notavelmente, a ocorrência desses Tecossolos abrange uma área de aproximadamente 5,5 km², correspondendo a 2,8% da bacia do rio Gualaxo do Norte, conforme indicado por Da Cruz e Domingues (2017). Este estudo, portanto, proporciona uma visão abrangente das complexas interações entre os solos, a geologia e as atividades humanas, especialmente após um evento de impacto ambiental significativo, como o rompimento da barragem de rejeitos em Mariana-MG.

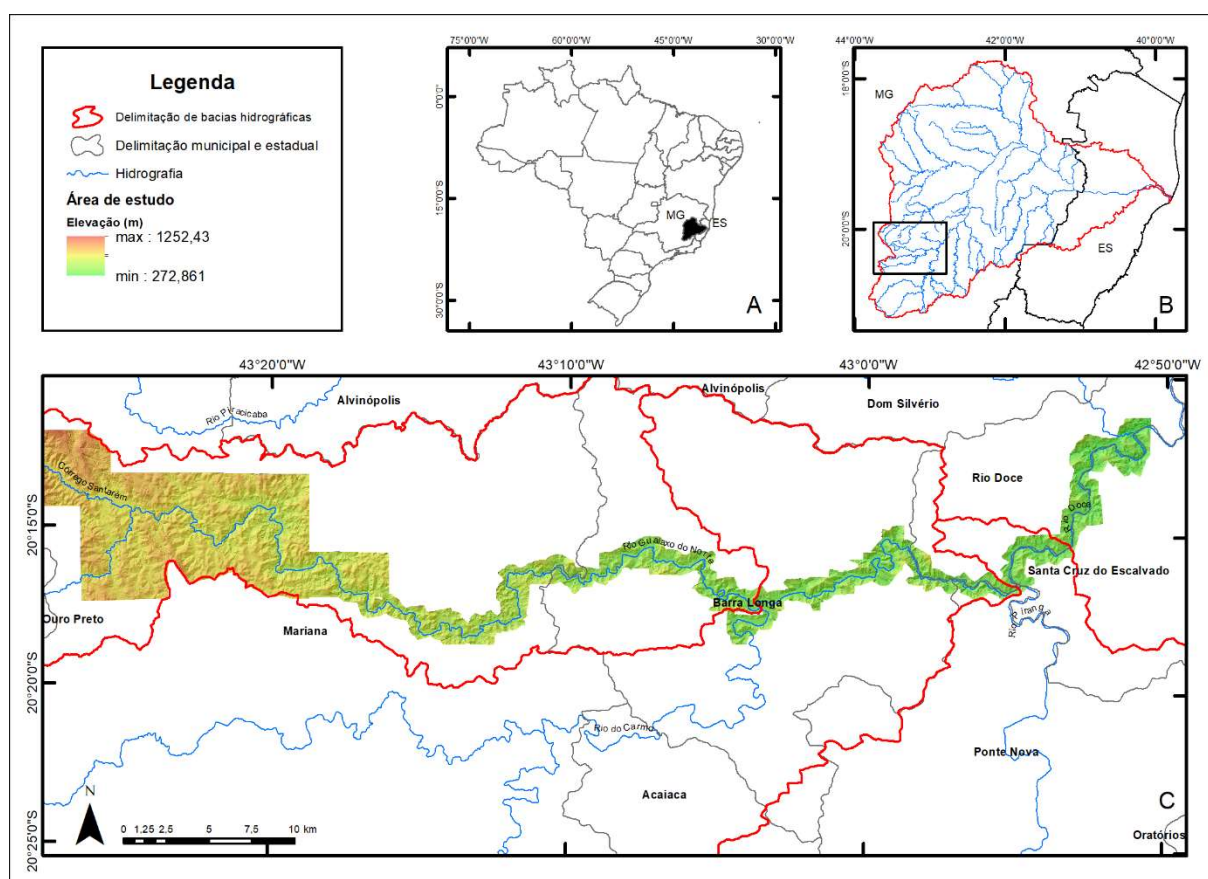


Figura 27 - Área de estudo representada no contexto nacional em A, no contexto da bacia hidrográfica do rio Doce em B, e no contexto regional em C

2.2 Base de dados de solos

A realização do presente trabalho contou com a utilização de uma base de dados de propriedades físicas de 1970 amostras de solos coletados em áreas afetadas e não afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão. Essas amostras fazem parte de base de dados legados da Fundação Renova, coletados *in situ* por Schaefer et al. (2016), Souza (2019) e WSP/Golder (2016 a 2023). O conjunto de dados é composto por perfis de solos, além de amostras de superfície coletadas por meio de gradagem.

Todas as amostras utilizadas nesse trabalho foram analisadas seguindo rotinas de determinações químicas e físicas analíticas usando procedimentos padronizados pela Embrapa (Embrapa, 2017). Os parâmetros físicos analisados nesse estudo foram: profundidade do solo, distribuição granulométrica (areia grossa, areia fina, silte, argila), densidade do solo, densidade de partículas e porosidade).

A transformação dos dados não foi realizada para atender às alegadas restrições de composição, presumivelmente consideradas necessárias devido à natureza tridimensional da composição dos dados de textura do solo, onde a soma é constantemente mantida em 100% (Siqueira et al., 2023). De acordo com esses autores, isso ocorre porque nem sempre há benefícios consistentes ao aplicar transformações nos dados para modelar a textura do solo, sendo essa abordagem condicionada à área de estudo e à distribuição dos dados, como destacado por Lark e Bishop (2007).

No contexto deste estudo, considerou-se os diferentes estratos do solo como camadas, uma vez que a grande parte do conjunto de dados são provenientes de materiais depositados que não resultam ou são pouco influenciados pelos processos de formação do solo (Pereira et al., 2019). Na Figura 28 é apresentada a localização das amostras utilizadas nesse estudo.

Conforme pode ser observado, a grande maioria dos dados foram coletados ao longo de transectos dispostos transversalmente ao curso d'água principal (rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce), de forma que fosse possível representar a diversidade de solos localizados em áreas mais planas, sob influência dos processos agradacionais, e declivosas, sob efeito de processos denudacionais.

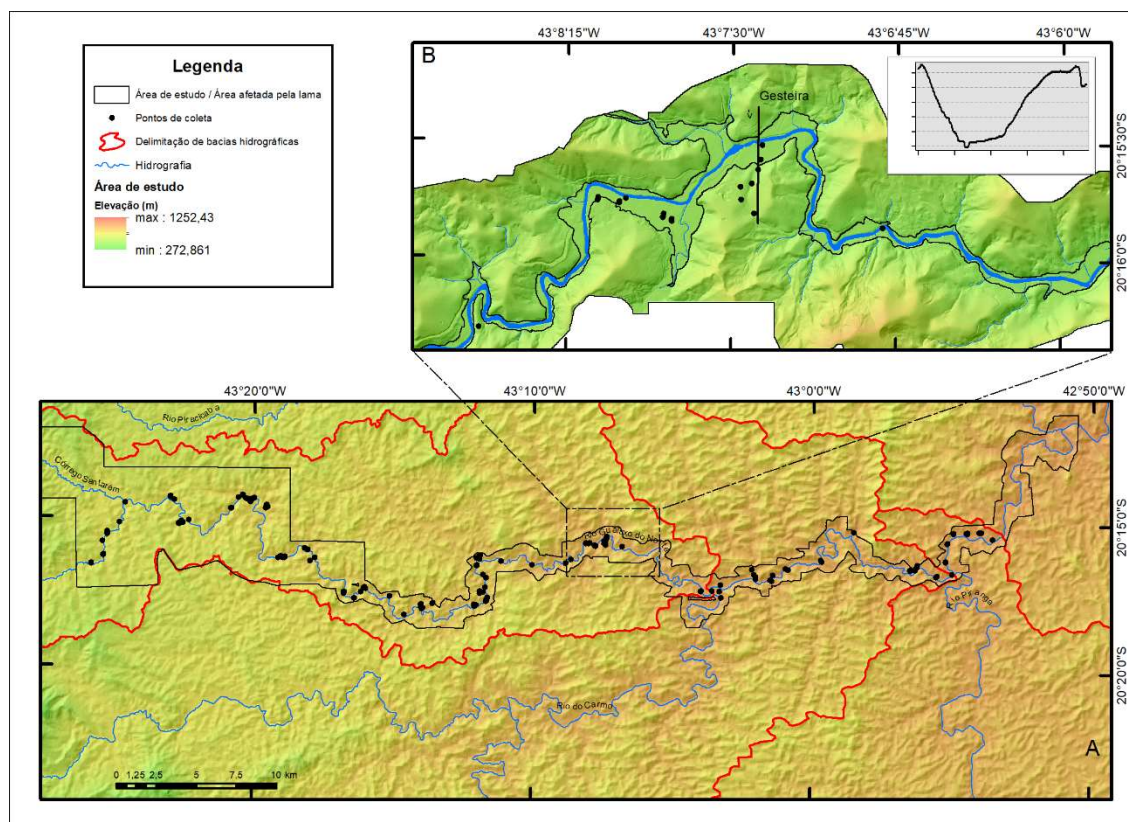


Figura 28 - Localização dos pontos amostras ao longo da área de estudo em A. Em B é apresentado em detalhe o grid amostral, considerando a área afetada como fator espacial na modelagem

2.3 Covariáveis ambientais do ‘*Scorpan*’

A abordagem para o mapeamento digital do solo utiliza métodos estatísticos e tecnologia da informação para prever as propriedades do solo a partir de observações pontuais do solo e variáveis ambientais correlacionadas (Hengl et al., 2015).

A partir dos pressupostos de Dokuchaev a respeito dos fatores de formação do solo, Jenny (1941) equacionou as características do solo em qualquer localidade relacionadas a interações de cinco fatores formadores do solo, representados por 'c' - clima; 'o' - vegetação e organismos vivos; 'r' - atributos de relevo, topografia e paisagem; 'p' - material parental, litologia; e 'a' - tempo ou idade. Adicionalmente, Mcbratney et al. (2003) adicionaram os fatores n e s ao modelo. O fator s indica que as propriedades do solo podem ser preditas a partir de outras propriedades do solo. Já o fator n é o responsável por espacializar as relações entre as propriedades do solo e as características do ambiente de ocorrência, indicando que o solo e as características do ambiente em que o mesmo ocorre. Nesse sentido pode-se afirmar que a formação do solo é influenciada pela ação do clima e dos organismos sobre o material original, controlada pela topografia ao longo de um período de tempo.

A variação no grau de interação desses fatores contribui para a diversidade das características do solo (Shukla et al., 2018). A posição dos humanos nesta teoria tem sido alvo de debate (Leguédois et al., 2016). No entanto, com o aumento da consciência em relação aos impactos das atividades antrópicas no meio ambiente, o homem passou recentemente a ser reconhecido como um fator distinto na formação do solo (Amundson & Jenny, 1991; Bidwell & Hole, 1965; Dudal, 2005; Schaetzl e Anderson, 2007a).

Para avaliar como ocorre a relação desses fatores com a variabilidade da textura do solo na área de estudo, foi utilizado um conjunto de preditores ambientais relacionados aos fatores SCORPAN (McBratney et al., 2003). Foi gerado um conjunto de 27 preditores topográficos, envolvendo atributos primários e secundários do terreno, além de classificações de atributos baseadas no terreno (Tabela 5), derivadas de um Modelo Digital de Elevação obtido por meio da tecnologia LiDAR, com resolução espacial original de 1 metro, posteriormente reduzido para 3 metros para reduzir os esforços computacionais.

Além disso, foram utilizados dados multiespectrais de imagens de satélite dos sensores Geoeye e Worldview 2, compreendendo as bandas do visível e do infravermelho, representando o fator biológico (organismos). De acordo com McBratney et al. (2003), os dados de sensoriamento remoto são capazes de fornecer informações detalhadas sobre o solo, pois a refletância da superfície nua é uma propriedade intrínseca do material do solo e pode indicar outros atributos do solo, como textura ou mineralogia. O índice NDVI foi obtido a partir de razões de bandas da imagem de satélite, conforme a equação 01.

$$NDVI = \frac{NIR - Vermelho}{(NIR + Vermelho)} \quad (1)$$

O fator de posição espacial foi incorporado a partir das coordenadas geográficas dos pontos, da distância euclidiana à drenagem, além da espacialização da área afetada pela mancha de lama.

Tabela 5 - Covariáveis utilizadas, subdividas pelos fatores de formação do solo

Preditores ambientais

(s) Propriedades do solo	(r)
	Normalized height
Geoeye band (red)	Plan curvature
Geoeye band (green)	Profile curvature
Geoeye band (blue)	Slope
Geoeye band (NIR)	Slope height
Textura do solo (Areia grossa) ¹	Standard height
Textura do solo (Areia fina) ¹	Surface specific points
Textura do solo (Silte) ¹	Terrain ruggedness index
Textura do solo (Argila) ¹	Topographic position index
	Topographic wetness index (Wti)
(c) clima	Valley depth
	Vector ruggedness measure
(o) organismos	
	(p) Material parental
NDVI	
®(r) Topografia	
	(a) tempo
Aspect	
Convergence index	(n) Posição espacial
Cross-sectional curvature	
General curvature	Latitude
Gradient	Longitude
Hillshade	Distância euclidiana da drenagem
Landforms	
Local curvature	
Longitudinal curvature	
Mass-balance index	
Mid slope position	
Minimum curvature	
Morphometric protection index	
Multi-resolution ridge top flatness	
Multi-resolution index of valley bottom flatness	

¹ - Variáveis utilizadas para prever a densidade de solo. Representam o resultado da modelagem dos atributos físicos do solo, realizado na primeira etapa do estudo

2.4 Preparação de dados

Todo o processamento foi realizado no sistema estatístico livre software R. Os atributos e classificações de terreno usados como covariáveis de topografia foram geradas com o pacote RSAGA (Brenning, 2008). A modelagem da densidade do solo nos diferentes conjuntos de dados foi realizada a partir de um conjunto de treinamento composto por 39 amostras, contendo camadas com e sem indícios de rejeito.

Para representar o ambiente estudado em três períodos distintos, foi necessário separar os conjuntos de dados seguindo algumas premissas na seleção do conjunto de dados. Minasny et al. (2008) propõem a criação de coleções de horizontes com objetivo da modelagem pedogênica, sugerindo que a representação da heterogeneidade espacial dentro perfil é essencial para simular a evolução do solo.

Dessa forma para representar o ambiente em condição anterior ao rompimento, foram selecionadas amostras das camadas que, no momento da coleta, não apresentavam indícios de conter rejeito e que apresentassem indícios que ocorriam na área antes da ruptura da barragem. Dessa forma foram selecionadas amostras coletadas no perfil do solo imediatamente abaixo da camada de rejeito.

Nessa abordagem, foi necessário desconsiderar o processo erosivo causado pela lama e eventuais interferências que poderiam afetar a modelagem. Essa escolha baseou-se na escassez de informações pré-rompimento. Considera-se também que a erosão mais significativa causada pelo fluxo de lama ocorreu nas áreas localizadas mais a montante da área de estudo. Nos locais onde o fluxo de lama perdeu energia, a lama depositou-se sobre os solos, frequentemente preservando as características do solo natural, conforme evidenciado nos perfis de solo apresentados na (Figura 29).

Para modelar os ambientes fora da área impactada utilizou-se dados coletados na superfície (profundidade = 0). Esse conjunto de dados foi estendido para os três períodos modelados, uma vez não sofreram alterações provocadas pela lama proveniente da barragem de Fundão. Além disso desconsiderou-se os possíveis efeitos causados nessas áreas pelos processos de pedogênese ou eventuais alterações antrópicas.

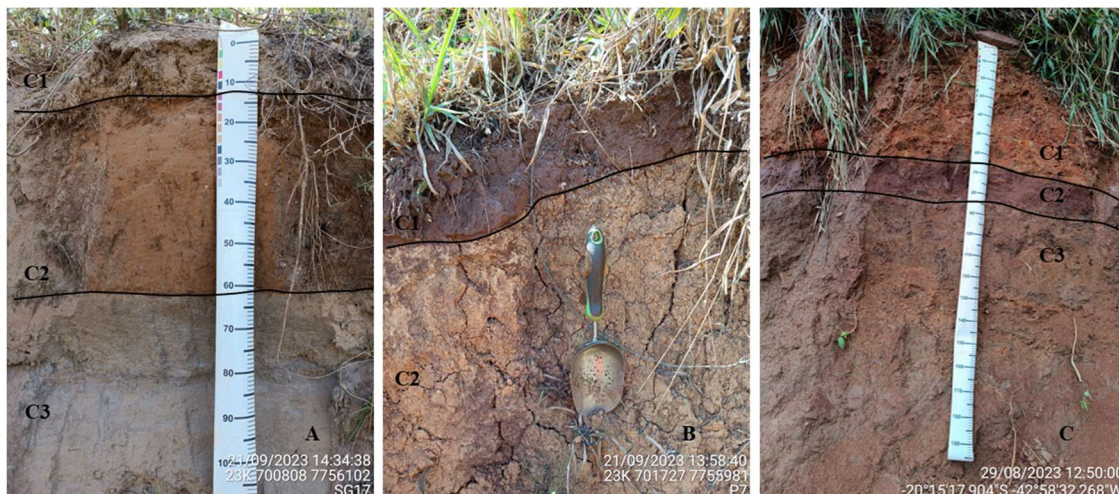


Figura 29 - Perfis de Tecnosolos descritos na área de trabalho. Na Figura A (C1 = atual; C2 = pós rompimento; C3 = Anterior ao rompimento); Figura B (C1 = atual/pós rompimento; C2 = anterior ao rompimento), Figura C (C1 = atual; C2 = pós rompimento; C3= anterior

Para representar a distribuição textural do solo em condição pós-rompimento, foram selecionadas apenas amostras que indicavam a presença de rejeito. A premissa adotada é que logo após a passagem da lama, todas as áreas afetadas foram cobertas pelo material composto por rejeito e materiais detríticos. Como já se passaram 8 anos do rompimento da barragem de Fundão, ocorreram alterações na área de ordem natural e antrópica. Nesse contexto, a profundidade das amostras utilizadas nesse conjunto de dados variou de acordo com a presença ou ausência de uma camada de solo natural acima do rejeito.

Conforme exibido na Tabela 6, a profundidade média do topo da camada foi de 7 cm, ou seja, a camada de rejeito não se encontra majoritariamente em superfície. Relaciona-se a presença de camadas de solo acima do rejeito, ao aporte sedimentar fluvial, ao transporte de colúvios da vertente e à adição de *topsoil* por parte dos proprietários rurais em alguns pontos da área afetada. Essas condições são evidenciadas na Figura 29, com a presença de camada de textura arenosa na figura A (aporte fluvial), e na figura C, material das vertentes depositado sobre a camada de rejeito.

Para refletir a condição atual na área afetada, foram selecionadas todas as amostras coletadas na superfície (profundidade da camada superior = 0), que poderiam ou não conter uma camada de rejeito. Foram excluídas desse conjunto de dados as amostras coletadas logo após o rompimento por Souza (2019), uma vez que tais amostras representavam o ambiente ainda as condições do pós rompimento.

Tabela 6- Bancos de dados utilizados na modelagem dos atributos físicos do solo em 3 períodos diferentes

Cenário	Dentro da área afetada	Fora da área Afetada ¹	Total	Profundidade média do topo da camada ²
Anterior ao rompimento	357	137	494	57
Após o rompimento	468	137	605	7
Cenário Atual	529	137	666	0

¹ - Profundidade do topo da camada avaliada = 0 cm

² - Apenas amostras dentro da área afetada. Profundidade em cm.

Selecionados os grupos de dados, foi realizado o processo de extração de informações das variáveis ambientais. Para isso utilizou-se o pacote *mdsFuncs* (Fernandes-Filho et al., 2021). Posteriormente os dados de textura do solo foram divididos aleatoriamente para cada profundidade em treinamento e conjuntos de testes em uma proporção de 3:1 (*holdout*), com a função *createDataPartition*, que organiza os dados em subconjuntos com base em percentis e amostras dentro desses subconjuntos. Dessa forma, 75% dos dados foram incluídos no conjunto de treinamento e 25% no conjunto de teste.

2.5 Seleção de preditores

A escolha das variáveis para compor o modelo foi guiada pela identificação de correlações significativas entre a variável alvo (frações granulométricas) e as variáveis preditoras. Posteriormente, foi implementada a exclusão de fatores altamente correlacionados, empregando um critério de $|0,95|$ para a Correlação de *Spearman* e utilizando a função "*findcorrelation*".

A análise da relevância de cada fator na previsão foi conduzida utilizando a função "*VarImp*". Neste contexto, os valores de importância foram normalizados em uma escala de 0 a 100, onde 100 representa o fator mais significativo, enquanto 0 indica o menos relevante. A escolha entre uma abordagem baseada no modelo, que fornece métricas específicas para calcular a importância, ou uma abordagem independente do modelo pode ser feita considerando as características do modelo (Kuhn, 2008). A sequência é gerada a partir do sistema de estimativa de erro interno do RF conhecido como Out-Of-Bag. O RF modifica a disposição das variáveis no conjunto Out-Of-Bag e estima a importância da variável pela variação causada no erro (Taghizadeh & Merjardhi, 2016).

2.6 Algoritmo de *machine learning*

Para a previsão dos atributos físicos do solo, optou-se pela utilização do algoritmo *Random Forest* (Florestas Aleatórias ou RF), uma escolha fundamentada nos consistentes resultados que este algoritmo tem demonstrado na modelagem de atributos do solo, conforme indicado por diversas fontes (Grim et al., 2008; Lieb, 2012; Hengl et al., 2015; Gambil et al., 2015; ; Chagas et al., 2016; Wadox et al., 2019; Gomes et al., 2019; Siqueira et al., 2023). Conforme destacado por Breiman (2001), RF constituem uma combinação de preditores em forma de árvores, onde cada árvore depende dos valores de um vetor aleatório amostrado de maneira independente e com distribuição uniforme em todas as árvores da floresta. De acordo com Grim et al. (2018), o algoritmo RF é robusto ao ruído nos preditores, eliminando a necessidade de pré-seleção de variáveis (Diaz-Uriate e de Andres, 2006). Sua eficácia reside no uso de um número limitado aleatório de preditores para buscar a melhor divisão em cada nó, aumentando a diversidade da floresta e reduzindo a carga computacional.

O treinamento do algoritmo foi realizado a partir de 100 rodadas, determinando-se o número de 500 árvores. O principal hiperparâmetro ajustado para melhorar o desempenho do modelo foi o ‘mtry’, que é o número de preditores usados em cada árvore.

2.7 Teste do modelo

Para avaliar o desempenho dos modelos, procedeu-se à aplicação dos modelos ajustados nos dados de teste (validação independente), os quais foram obtidos por meio da divisão do conjunto original de dados (25%). Essa seleção resultou em 124 amostras para a condição de pré rompimento, 151 para o cenário pós rompimento e 167 amostras para o cenário atual.

A avaliação do desempenho de previsão foi realizada por meio de quatro índices estatísticos. O erro médio absoluto (MAE) (Equação (2)), e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Equação (3)), sintetizam os resíduos e indicam a precisão absoluta dos modelos, representando quão próximos os valores previstos estão dos valores reais (Siqueira et al., 2023). O coeficiente de determinação (R²) (Equação (4)) denota a proporção da variância na variável alvo explicada pelo modelo, comparando o quanto a previsão melhora em relação ao uso simples da média da variável alvo observada como previsão.

Por último, o coeficiente de correlação de concordância de Lin (LCCC) avalia a concordância entre os valores observados e previstos. O LCCC analisa a precisão e a exatidão da previsão, onde a precisão refere-se à distribuição de pontos em torno da linha de regressão

(coeficiente de correlação) para previsto versus observado (Siqueira et al., 2023). A exatidão, por sua vez, refere-se à correspondência entre essa linha de regressão e a linha ideal (linha 1:1). De maneira geral, o LCCC pode ser considerado um método mais apropriado para avaliação do que R^2 , pois captura o viés na previsão do modelo (Khaledian e Miller, 2020). Ele varia entre -1 e 1 e é representado pelo termo ρ_c (Equação (5)).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}| \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2} \quad (3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

$$LCCC = \frac{2\rho\sigma_{x_i}\sigma_{y_i}}{\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{y_i}^2 + (\bar{x} - \bar{y})^2} \quad (5)$$

Onde: \hat{y} – predicted value of y
 \bar{y} – mean value of y

2.8 Previsão e incerteza

Os mapas de previsão de textura do solo foram obtidos a partir dos modelos estabelecidos na etapa de treinamento do modelo.

Para a validação através de informações de campo, foram descritos perfis de solos ao longo da área afetada conforme Santos et al. (2005). Esses perfis de solos foram descritos em novembro de 2023, e buscou-se coletar amostras referentes aos três períodos da modelagem. Na Figura 30 é apresentado um fluxograma com todas as etapas do processamento.

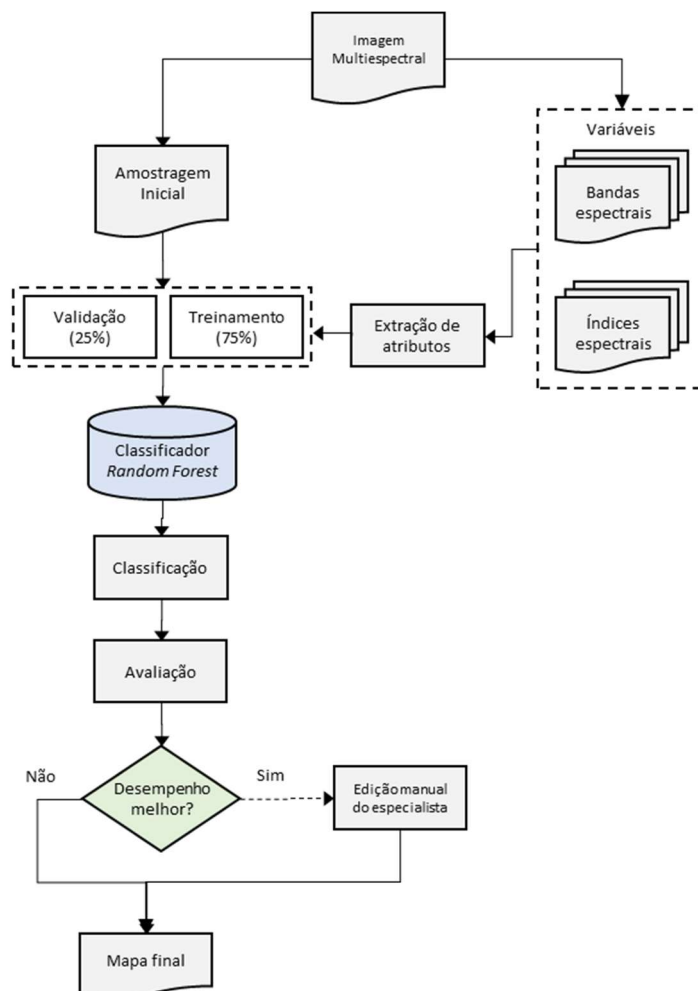


Figura 30 – Fluxograma da metodologia utilizada nesse estudo

3. Resultados

3.1 Caracterização dos conjuntos de dados

O sumário estatístico apresentado na Tabela 7 evidencia diferenças significativas entre os conjuntos de dados, especialmente nas frações de areia grossa, silte e argila. Observa-se uma redução na concentração média nos conjuntos de pós-rompimento e no cenário atual. Além disso, destaca-se que o coeficiente de variação (CV%) diminuiu, especialmente no conjunto de pós-rompimento. As maiores variações ocorreram nos teores de silte, pois na condição de pós-rompimento o valor do 1º quartil (270 g/kg) foi o dobro do identificado na condição pré-rompimento (121,01 g/kg), assim como o valor mediano de 195,52 g/kg para 402,88 g/kg na condição pós-rompimento.

O destaque para o conjunto de dados representando a condição atual está relacionado ao leve aumento na média de concentração de areia grossa, areia fina e argila, resultando em um aumento no desvio padrão e no CV no respectivo conjunto de dados.

Tabela 7 - Sumário estatístico dos conjuntos de dados utilizados na construção e validação dos modelos texturais

	Cenário	Min	1st Qu	Mediana	Média	3rd Qu.	Max	sd	CV (%)
Areia grossa (g/kg)									
n=474	Pre	5.97	76.26	163.82	172.59	243.69	512.53	112.17	64.99
n=605	Pos	6.30	39.63	60.55	110.14	163.94	470.00	99.81	90.62
n=666	Atual	6.30	43.21	82.16	125.60	200.94	475.15	102.07	81.27
Areia fina (g/kg)									
n=474	Pre	19.59	190.68	305.54	352.18	500.47	850.99	196.07	55.67
n=605	Pos	27.39	266.00	362.46	335.62	396.07	803.98	109.74	32.69
n=666	Atual	27.39	253.63	362.24	359.46	415.88	805.64	149.69	41.64
Silte (g/kg)									
n=474	Pre	0.11	121.01	195.52	223.78	303.10	878.27	142.91	63.86
n=605	Pos	1.33	270.00	402.88	352.95	455.00	630.00	147.16	41.24
n=666	Atual	1.00	167.92	335.48	308.28	450.17	630.00	155.39	50.40
Argila (g/kg)									
n=474	Pre	0.5	74.5	167.5	201.4	304.5	669.5	148.22	73.58
n=605	Pos	0.5	72.0	108.0	157.7	212.0	669.5	126.48	80.20
n=666	Atual	0.5	71.5	119.5	170.8	254.9	669.5	135.93	79.57

Conforme evidenciado nos triângulos texturais (Figura a Figura 34), destaca-se uma notável diversidade de dados, sobretudo no conjunto pré-rompimento. A textura encontrada nesse contexto é resultado do processo de pedogênese dos solos examinados, assim como da deposição de sedimentos fluviais, ambos fortemente influenciados pelo ambiente circundante. Essa marcante variabilidade é expressa por meio dos valores mais elevados de Coeficiente de Variação (CV) e Desvio Padrão (SD).

Ao analisar o conjunto de dados selecionado para representar o estado do ambiente imediatamente após o rompimento, observa-se uma menor dispersão dos dados, evidenciando a formação clara de dois grupos distintos. As amostras coletadas fora da área impactada exibem uma frequência mais elevada de classificação como média argilosas e argilosas, em comparação aos solos coletados em áreas afetadas.

Destaca-se a concentração de dados na classe média siltosa em áreas impactadas. Um fato que chama atenção é a redução de amostras classificadas como siltosas no conjunto em pós rompimento, evidenciando que a presença de solos com altos teores de silte era presente na área, provavelmente associados às áreas de drenagem insuficiente.

O conjunto de dados que representa as condições atuais das áreas investigadas revela uma maior diversidade de dados em comparação com o conjunto que descreve o ambiente imediatamente após o rompimento. Além disso, nota-se uma significativa presença de amostras com textura média siltosa, possivelmente relacionada à presença de rejeitos superficiais na área afetada. No entanto, destaca-se uma frequência mais elevada de amostras com textura média arenosa e arenosa, possivelmente associada ao aporte sedimentar, principalmente nas áreas mais próximas das margens dos cursos d'água.

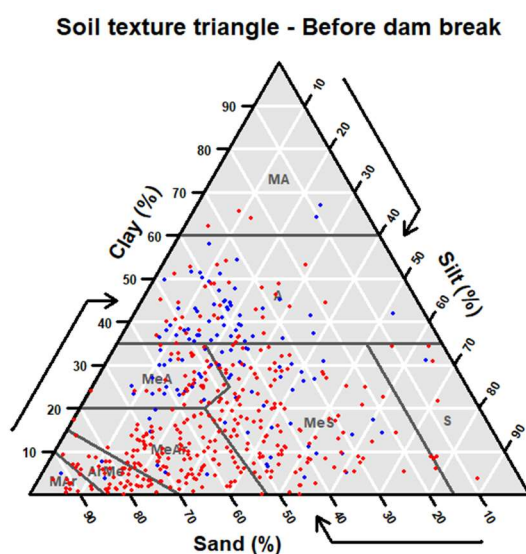


Figura 32 - Triângulo textural de acordo com a classificação SiBCS, 2013 do conjunto de dados utilizado para modelar a condição pré rompimento. Em azul são amostras coletadas na fora da área impactada pela lama. Pontos em vermelho representam amostras coletadas dentro da área afetada

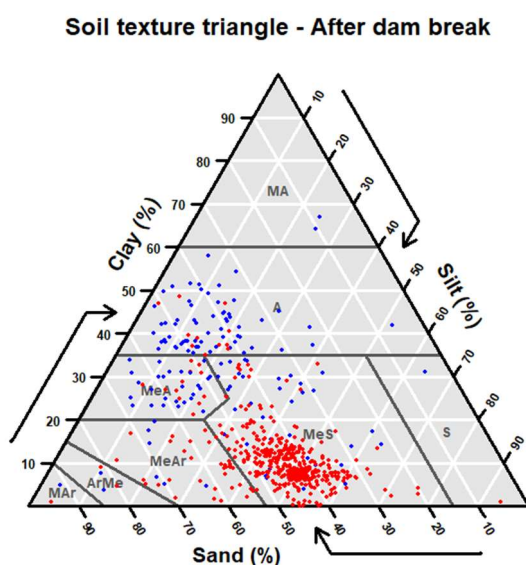


Figura 31 - Triângulo textural do conjunto de dados representando o ambiente em após o rompimento (SiBCS, 2013). Em azul são amostras coletadas na fora da área impactada pela lama. Pontos em vermelho representam amostras coletadas dentro da área afetada

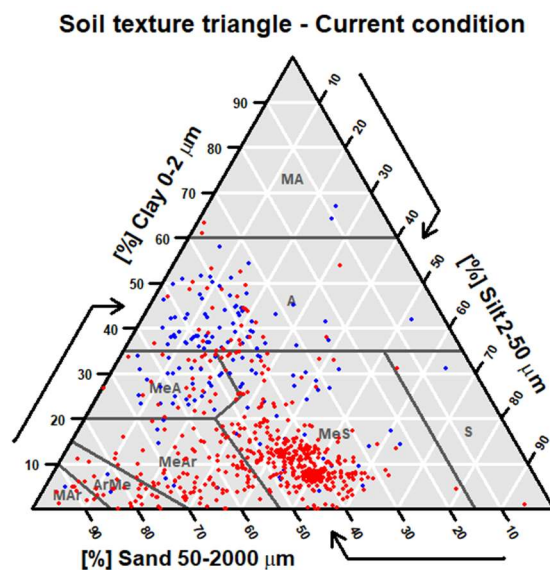


Figura 32 - Triângulo textural do conjunto de dados representando o ambiente em após o rompimento (SiBCS, 2013). Em azul são amostras coletadas na fora da área impactada pela lama. Pontos em vermelho representam amostras coletadas dentro da área afetada

3.2 Seleção e importância de preditores

Na seleção das covariáveis, priorizou-se aquelas que apresentaram as maiores correlações significativas. Adicionalmente, foram excluídas variáveis com elevada correlação entre si. Dentre as variáveis que apresentaram correlação significativa com a variável alvo (fração granulométrica), a única variável eliminada foi o "*slope*".

Ao empregar a função "*varImp*" para avaliar a importância das variáveis, obteve-se a medida de importância global para cada variável no modelo. Essa métrica reflete o impacto médio de cada variável em todas as árvores da floresta. Durante o cálculo da importância global, o algoritmo de floresta aleatória analisou como cada variável contribui para a redução do erro médio durante a construção de árvores individuais, calculando, então, uma média dessas contribuições em todas as árvores. Os valores fornecidos indicam o impacto médio de cada variável no desempenho preditivo do modelo de floresta aleatória. Quanto maior o valor, mais significativa é a variável para o modelo. Essa métrica auxilia na identificação das variáveis que exercem uma influência mais expressiva no resultado preditivo do modelo.

A Distância Euclidiana, o Índice de Posição Topográfica e a Profundidade do Vale aparecem como as variáveis mais significativas em condições pré-rompimento. No modelo

gerado para o pós-rompimento, a variável "impacted_a", representando a espacialização da área impactada pela ruptura da barragem de Fundão, apresentou 100% de importância, enquanto as variáveis Índice de Rugosidade do Terreno e Distância Euclidiana apresentaram importância próxima a 30%. No modelo representando as condições atuais, a área afetada delimitada também se destaca como a variável de maior importância, havendo um aumento na relevância das variáveis Distância Euclidiana à drenagem e Índice de Rugosidade do Terreno.

Na modelagem de areia fina em condições pré-rompimento, a Distância Euclidiana foi a variável de maior importância, seguida de WTI e Índice de Rugosidade do Terreno. Em condições pós-rompimento, a variável relacionada à espacialização da área afetada assume a maior importância no modelo, seguida pela Distância Euclidiana à drenagem e WTI. Já em condições atuais, a Distância Euclidiana volta a destacar-se como a variável mais importante no modelo, enquanto a delimitação da área afetada assume a segunda posição, ainda com forte importância. O Índice de Rugosidade do Terreno apresenta-se como a terceira variável mais importante do modelo.

Para a modelagem do silte, observa-se uma maior variabilidade na importância das variáveis. O Índice de Rugosidade do Terreno foi aquela que apresentou a maior importância, seguido de WTI e a banda 3 da imagem *Geoeye*. Conforme ocorreu também para as demais frações, no modelo relacionado ao pós-evento, a delimitação da área impactada foi aquela com maior importância do modelo, seguida de Índice de Rugosidade do Terreno e a banda 1 da imagem *Geoeye*. Em condições atuais, a variável Índice de Rugosidade do Terreno volta a apresentar a maior importância no modelo, seguida da delimitação da área impactada e WTI.

Para a argila, a Distância Euclidiana também se apresenta como uma importante variável para modelar essa fração. Em condições pré-rompimento, ela destaca-se das demais, com 100% de importância, seguida de WTI e Índice de Rugosidade do Terreno. Já em condições pós-rompimento, a delimitação da área impactada apresentou-se como aquela mais importante, seguida pela Distância Euclidiana à drenagem e Índice de Rugosidade do Terreno. Para a condição atual, a Distância Euclidiana volta a destacar-se como a variável mais importante do modelo, seguida pela delimitação da mancha e Índice de Rugosidade do Terreno.

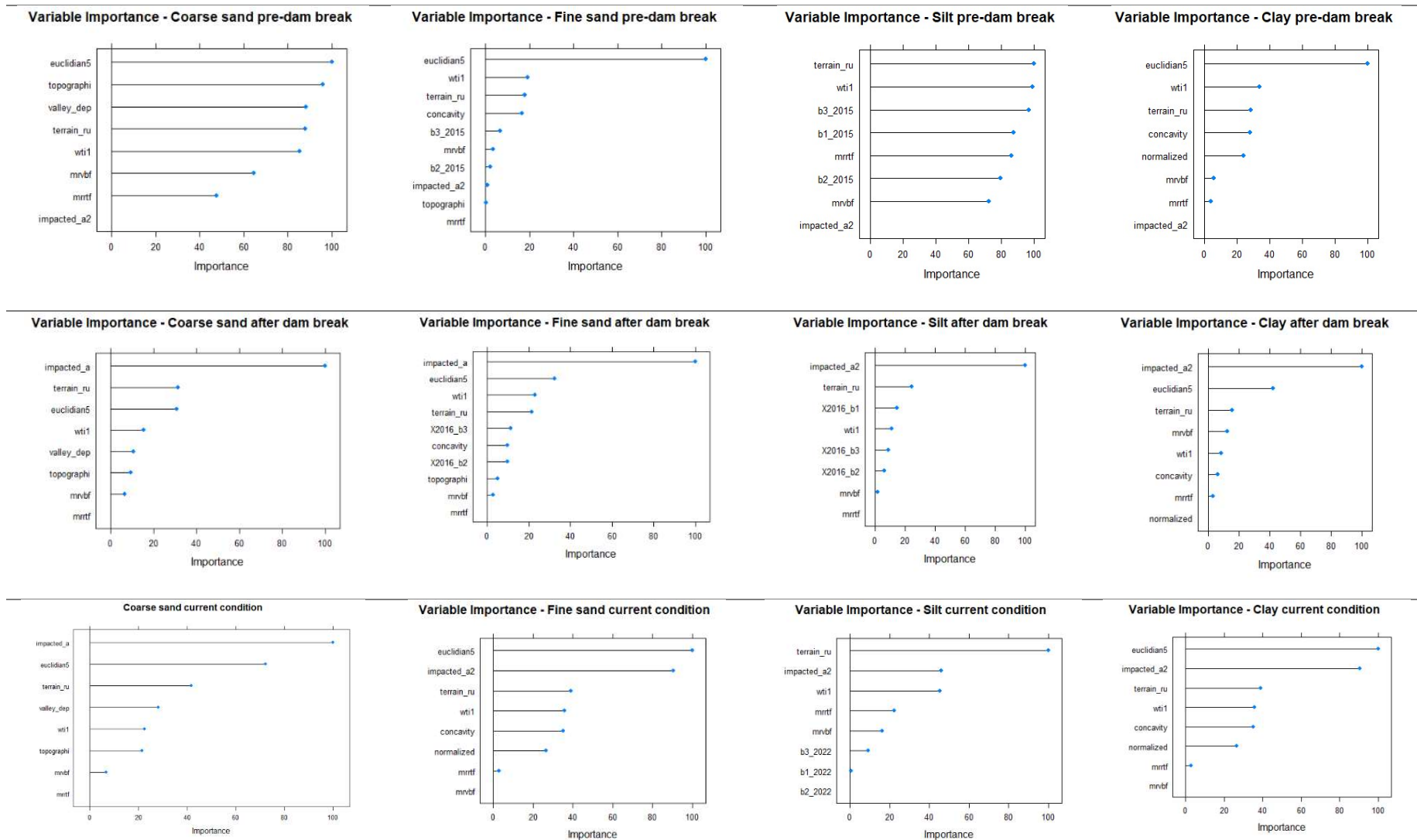


Figura 33 - Importância das variáveis utilizadas para modelar a textura do solo nos três períodos de análise (pré rompimento, pós rompimento e cenário atual)

3.3 Desempenho dos modelos

No contexto de avaliação de modelos, o coeficiente de determinação r^2 é uma métrica essencial que fornece informações importantes sobre a qualidade do ajuste de um modelo aos dados observados. Este indicador expressa a proporção da variação na variável dependente que é explicada pelas variáveis independentes incluídas no modelo.

Ao examinar as métricas derivadas do conjunto de teste (Tabela 8), evidenciam-se resultados desafiadores, principalmente para o modelo em pré-rompimento. Nessa condição, foram obtidos valores notavelmente mais baixos de R^2 , especialmente para as variáveis silte e areia grossa (0,04 e 0,08, respectivamente). Esses resultados indicam que uma pequena parcela da variação na variável resposta pode ser explicada pelas variáveis independentes consideradas neste contexto específico. Tais achados sugerem uma capacidade limitada do modelo em capturar e representar adequadamente os padrões subjacentes nos dados de pré-rompimento.

Contrastando com essa situação, observamos um desempenho mais assertivo no caso das variáveis Argila e Areia Fina, em que o R^2 atingiu um valor mais elevado de 0,26 e 0,19, respectivamente. Esse aumento na medida de ajuste para a Argila sugere uma concordância mais substancial entre as previsões do modelo e os valores reais observados para a variável Argila.

O modelo gerado para representar as condições pós-rompimento da barragem de Fundão foi aquele que apresentou os maiores valores de R^2 . As variáveis Argila e Areia Grossa foram aquelas cujos R^2 foram mais elevados (0,58 e 0,68, respectivamente). Por outro lado, as variáveis Silte e Areia Fina apresentaram valores mais baixos de R^2 (0,35 e 0,27). Entretanto, quando comparado ao modelo em condição de pré-rompimento, observa-se um aumento significativo no ajuste do modelo para esses parâmetros.

O Coeficiente de Correlação de Concordância de Lin (LCCC) é uma métrica estatística que avalia a concordância entre duas variáveis contínuas. Essa medida estatística considera simultaneamente a precisão, que reflete a proximidade das observações à linha de melhor ajuste, e a acurácia, que mensura quão bem as observações se alinham com essa linha. Assim, o LCCC proporciona uma abordagem abrangente para avaliar o nível de concordância entre as variáveis em análise, variando de -1 a 1, onde 1 indica concordância perfeita, 0 indica ausência de concordância e -1 indica discordância perfeita.

Seguindo o que foi constatado para o R^2 , observa-se que os maiores valores de LCCC foram obtidos para o conjunto de dados em pós rompimento. A variável que apresentou o maior valor foi a variável Areia Grossa em condição de pós rompimento, sendo verificado um valor

de 0,79. Já os modelos gerados para a condição de pré rompimento apresentaram os menores valores de LCCC para a variável Silte.

A métrica MAE representa a média das diferenças absolutas entre as previsões do modelo e as observações reais, oferecendo uma medida robusta da precisão, indicando o tamanho médio dos erros cometidos pelo modelo. Nesse sentido quanto menor o MAE, melhor foi o ajuste do modelo.

Ao analisar os resultados, notamos que o menor valor de MAE foi verificado para a variável Areia Fina, em condição de pós rompimento. Se avaliado os diferentes conjuntos de dados, observa-se que os menores valores como um todo foram encontrados na condição de pós rompimento.

A avaliação do desempenho dos modelos também considerou o Erro Quadrático Médio (RMSE), uma métrica que mensura a dispersão das diferenças entre as previsões do modelo e as observações reais. Seguindo a tendência verificada na métrica MAE, o conjunto de dados em pós rompimento foi aquele que apresentou os menores valores de RMSE, com destaque para a variável areia grossa, cujo RMSE foi de 54,82. Em contrapartida os valores mais elevados de RMSE foram encontrados para o conjunto de pré rompimento, corroborando com as demais métricas utilizadas nesse estudo.

Tabela 8 - Métricas de precisão de treinamento para todos os modelos

Conjunto Teste	Condição	R ²	LCCC	MAE	RMSE
				Areia grossa	
n=117	Pre	0.08	0.18	83.28	106.66
n=190	Pós	0.68	0.79	41.65	54.82
n=164	Atual	0.32	0.51	78.27	94.32
				Areia fina	
	Pre	0.19	0.33	144.55	180.07
	Pós	0.27	0.45	66.26	95.90
	Atual	0.40	0.52	91.00	117.05
				Silte	
	Pre	0.04	0.14	104.89	131.69
	Pós	0.35	0.54	89.36	119.61
	Atual	0.16	0.30	118.67	143.44
				Argila	
	Pre	0.26	0.44	98.57	119.07
	Pós	0.58	0.69	63.25	87.76
	Atual	0.39	0.55	77.69	108.59

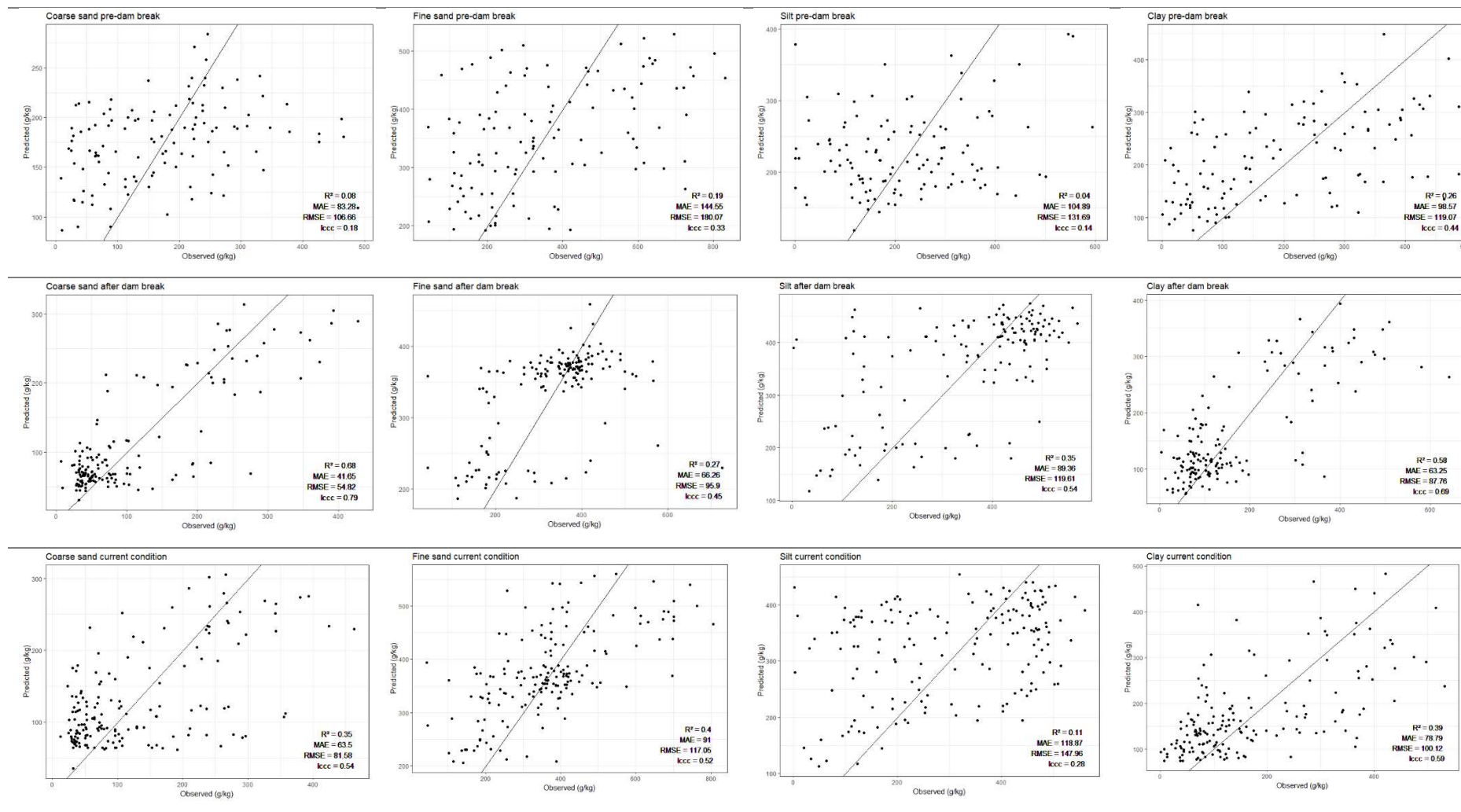


Figura 34 - Resultados dos ajustes dos modelos nos três períodos avaliados (pré rompimento, pós rompimento e cenário atual)

3.4 Previsão e mapeamento

3.4.1 Textura do solo

De acordo com as estatísticas dos mapas finais para a condição pré rompimento, a argila foi a fração que apresentou a maior média de 318,24 g/kg, enquanto que a areia grossa foi a com menor média (208,00 g/kg), considerando todo o conjunto de dados. O Silte apresentou teor médio de 220,73 g/kg e Areia Fina 238,83 g/kg. A fração areia fina apresentou o maior CV%, alcançando 28%. Já areia grossa foi a que apresentou menor variação, com 13%.

Em condição de pós rompimento a fração argila também foi a que apresentou o maior valor médio (300 g/kg), sendo a fração areia grossa a de menor média com 207 g/kg. A fração areia fina apesar de não apresentar valores medianos elevados, foi aquela que apresentou o maior valor máximo, com 531 g/kg, seguida da fração silte, cujo valor máximo foi de 531 g/kg e valor mínimo de 91 g/kg, representando o maior CV, com 28%.

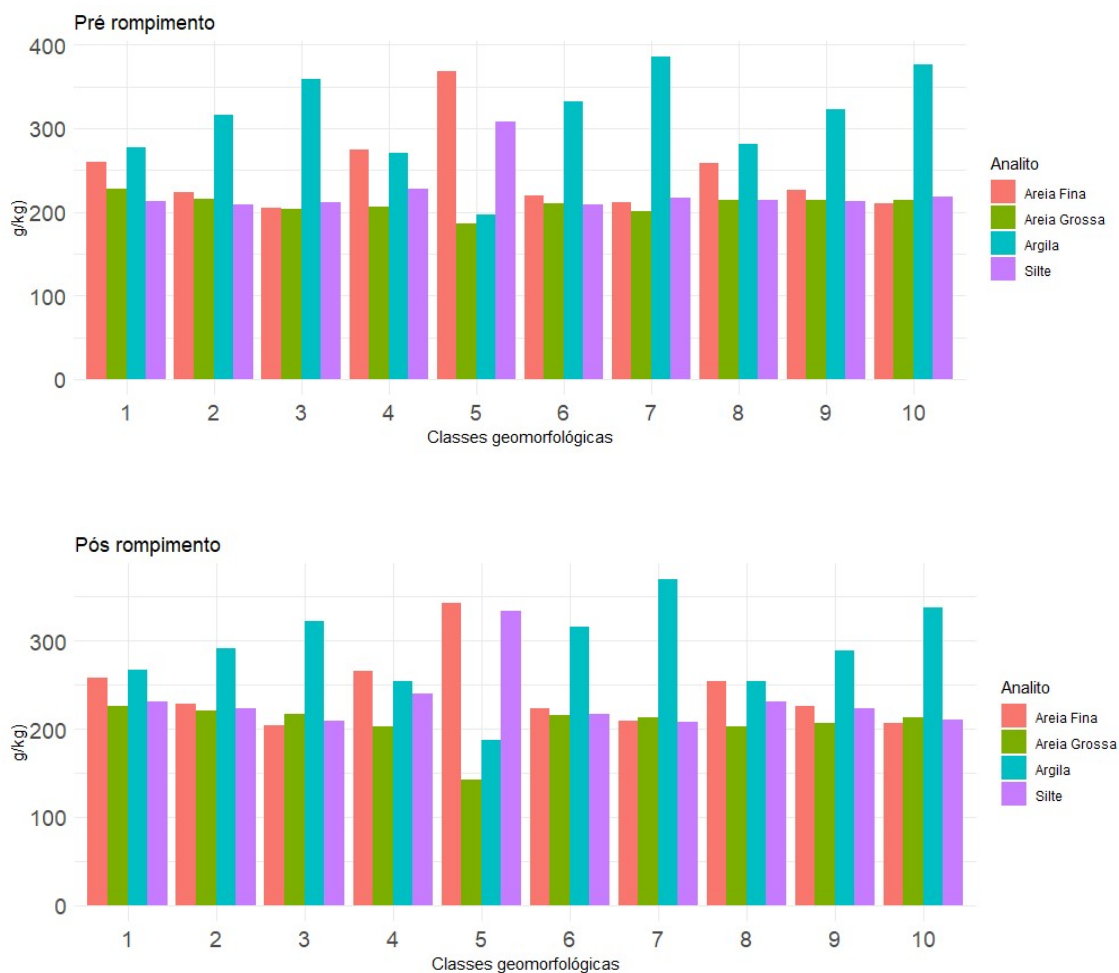
Os resultados obtidos para a atual condição dos solos em superfície na área estudada, apontam que a fração Argila continuou sendo a fração com os maiores teores médios, de aproximadamente 32% ou 323 g/kg. Para essa fração o valor máximo foi de 491 g/kg e o mínimo de 35,10, apresentando um CV de 24%. A areia grossa também foi a fração que apresentou o menor valor médio, com 213 g/kg. Para essa fração o mínimo encontrado foi de 35 g/kg e o máximo de 337 g/kg. A fração areia fina foi aquela que apresentou o maior valor, com 653 kg, com mínimo de 139 g/kg e CV de 29%.

Considerando a área afetada pela barragem de fundão, constatou-se que a fração predominante em condição pré rompimento era a areia fina, com média de 396 g/kg. Os teores de silte apresentavam-se em torno de 278 g/kg, com areia grossa e argila apresentando os menores valores médios, com 178 e 180 g/kg, respectivamente.

No cenário pós rompimento o a fração silte apresenta-se como a aquela predominante na área afetada, com média de 397 g/kg, seguida pela areia fina 384 g/kg. Constatou-se os menores valores médios de areia grossa com 88 g/kg e 118 g/kg de argila. No cenário atual a fração granulométrica predominante foi a areia fina, com 407 g/kg de média. A média de silte foi de 330 gkg, enquanto a concentração de areia grossa e argila foram as menores, com 110 e 146 g/kg, respectivamente.

Para a avaliação da distribuição das diferentes frações em relação às diferentes geoformas do terreno, recorreu-se ao método de classificação de geoformas proposto por Weiss

(2001) e Jenness (2006), utilizando o índice de posição topográfica (TPI) (Guisa et al., 1999). Diferentes valores de parâmetros de entrada (slope, curvature, plan, profile, elevation) foram utilizados para a classificação do relevo. Os resultados da avaliação da relação solo e geoformas são exibidos na Figura 35.



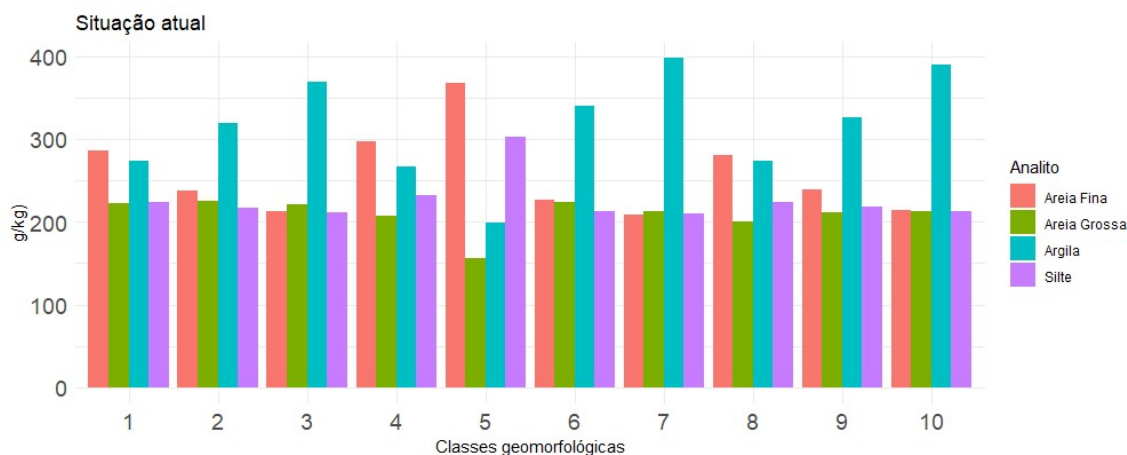


Figura 35 - Distribuição textural nas diferentes geomorfias do presente estudo. 1- Desfiladeiros, riachos profundamente incisivos; 2-Drenagens de encosta média, vales rasos; 3-Drenagens de terras altas, cabeceiras; 4-Vales em forma de U; 5-Planícies; 6-Encostas amplas e abertas; 7-Encostas superiores, mesas; 8-Cumes/colinas locais em vales; 9-Pequenas colinas em planícies; 10- Topos de montanha, cumes altos

De maneira geral, é possível notar uma distribuição textural bastante semelhante nos três modelos analisados. A análise gráfica revela que a argila é a que apresentou maior concentração média nas principais geomorfias presentes na área de estudo.

Especificamente, a maior concentração de argila foi identificada nas áreas de encostas superiores/mesas (Classe 7). Quanto à areia fina, as maiores concentrações foram observadas nas feições 1 (Desfiladeiros, riachos profundos), 4 (Vales em forma de U) e 5 (Planícies).

A distribuição de areia grossa pela área de estudo ocorre de maneira homogênea, com uma média aproximada de 200 g/Kg. Para essa fração, nota-se uma ligeira redução na média em áreas de planície, sendo mais evidente essa diminuição nos modelos que retratam as condições pós-rompimento e situação atual. A distribuição de silte também se apresenta de maneira uniforme, com as áreas de planície exibindo os maiores valores dessa fração em condições pré-rompimento.

Ao avaliar os três cenários, destacam-se alterações significativas na textura do solo apenas em áreas localizadas em planícies. Nessas regiões, observa-se uma redução na concentração média de argila e areia grossa. Adicionalmente, foi constatado um aumento no teor médio de silte no cenário pós-rompimento. A espacialização dos atributos físicos para os três cenários é apresentado nas Figura 36, Figura 37 e Figura 38.

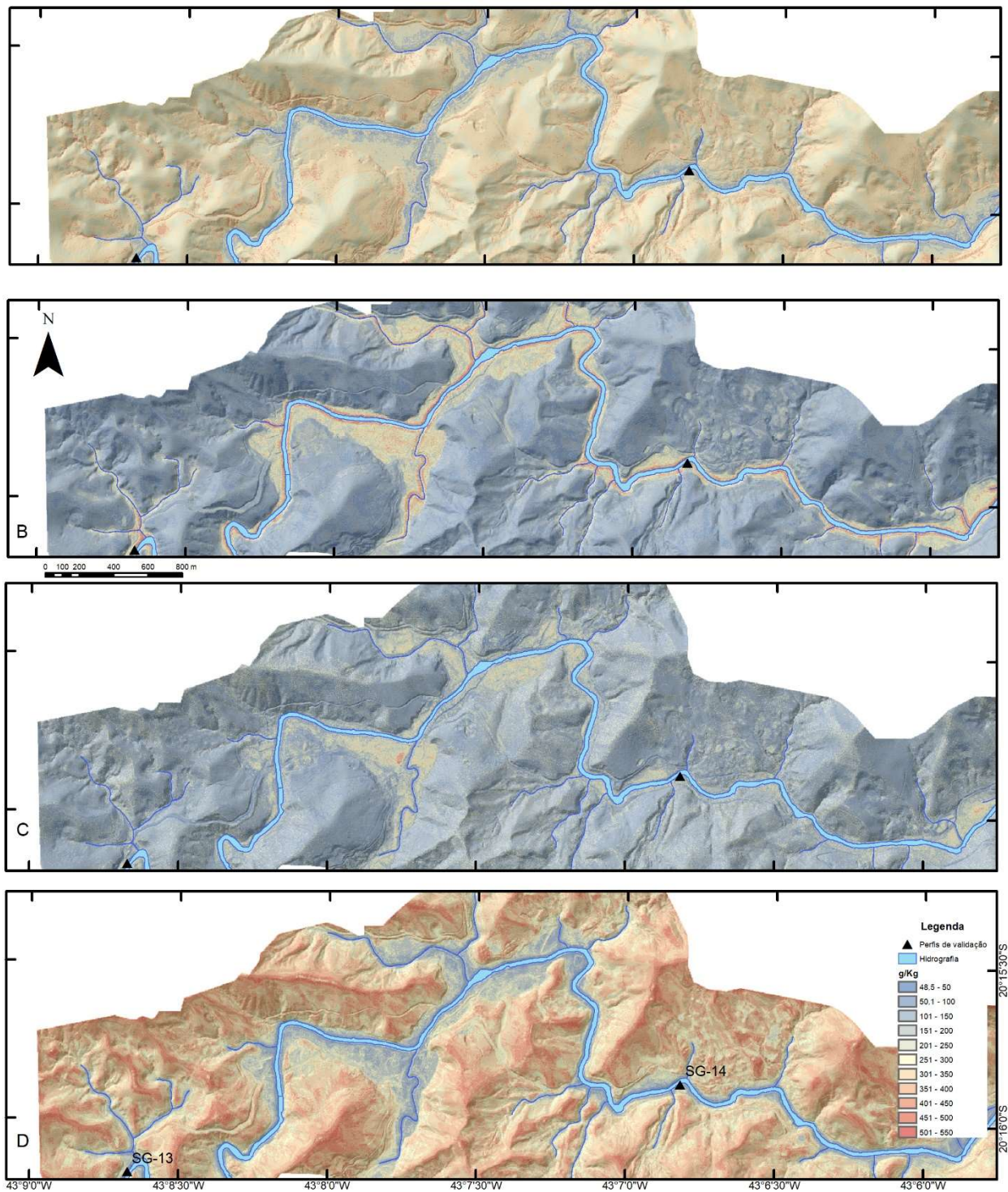


Figura 36 – Detalhe de parte da área de estudo, localizada próxima do distrito de Gesteira (Barra Longa-MG), com os resultados da predição de Areia Grossa (A), Areia Fina (B), Silte (C) e Argila (D) em pré condição pré rompimento.

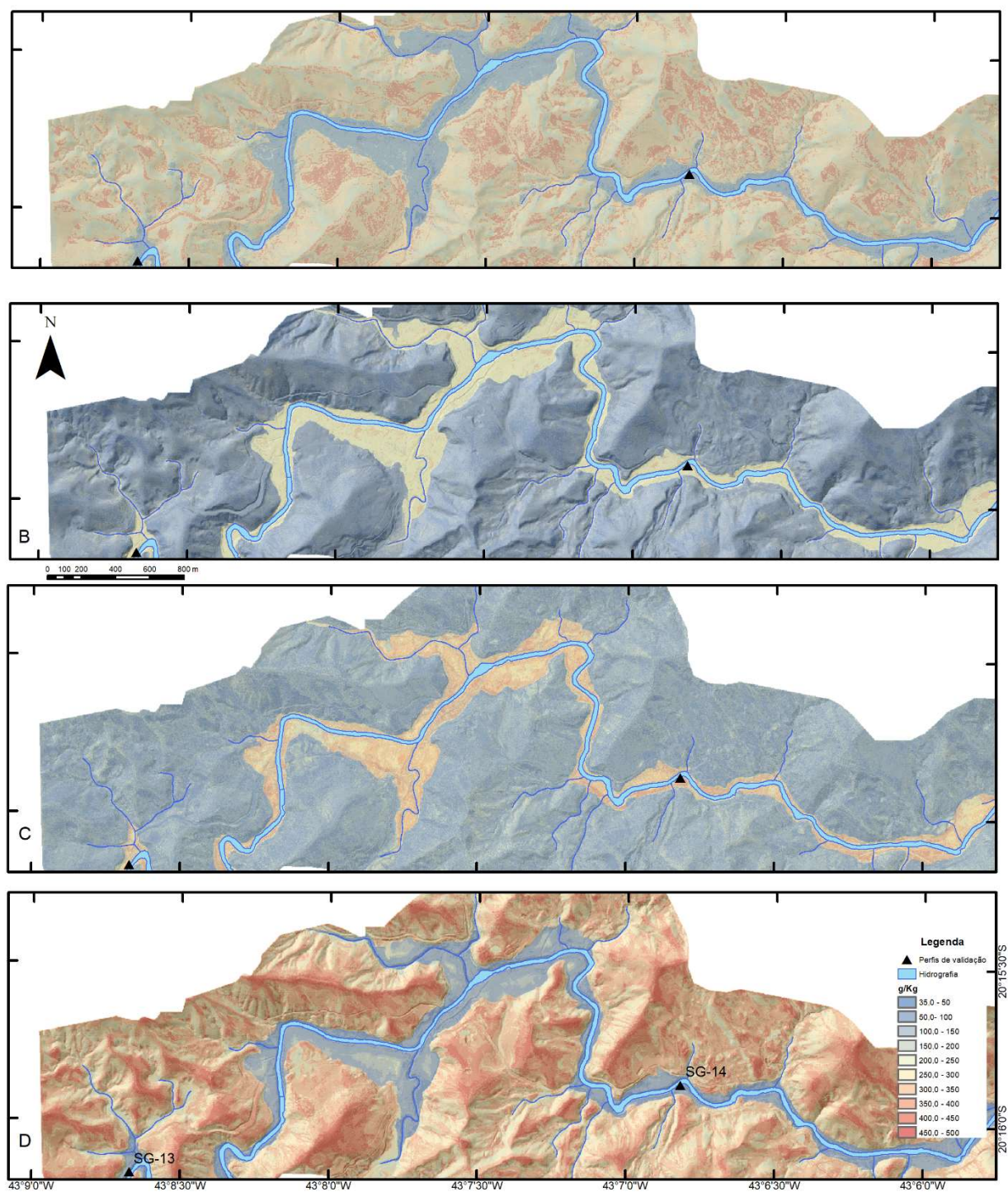


Figura 37 - Detalhe de parte da área de estudo, localizada próxima do distrito de Gesteira (Barra Longa-MG), com os resultados da predição de Areia Grossa (A), Areia Fina (B), Silte (C) e Argila (D) em pré condição pós rompimento.

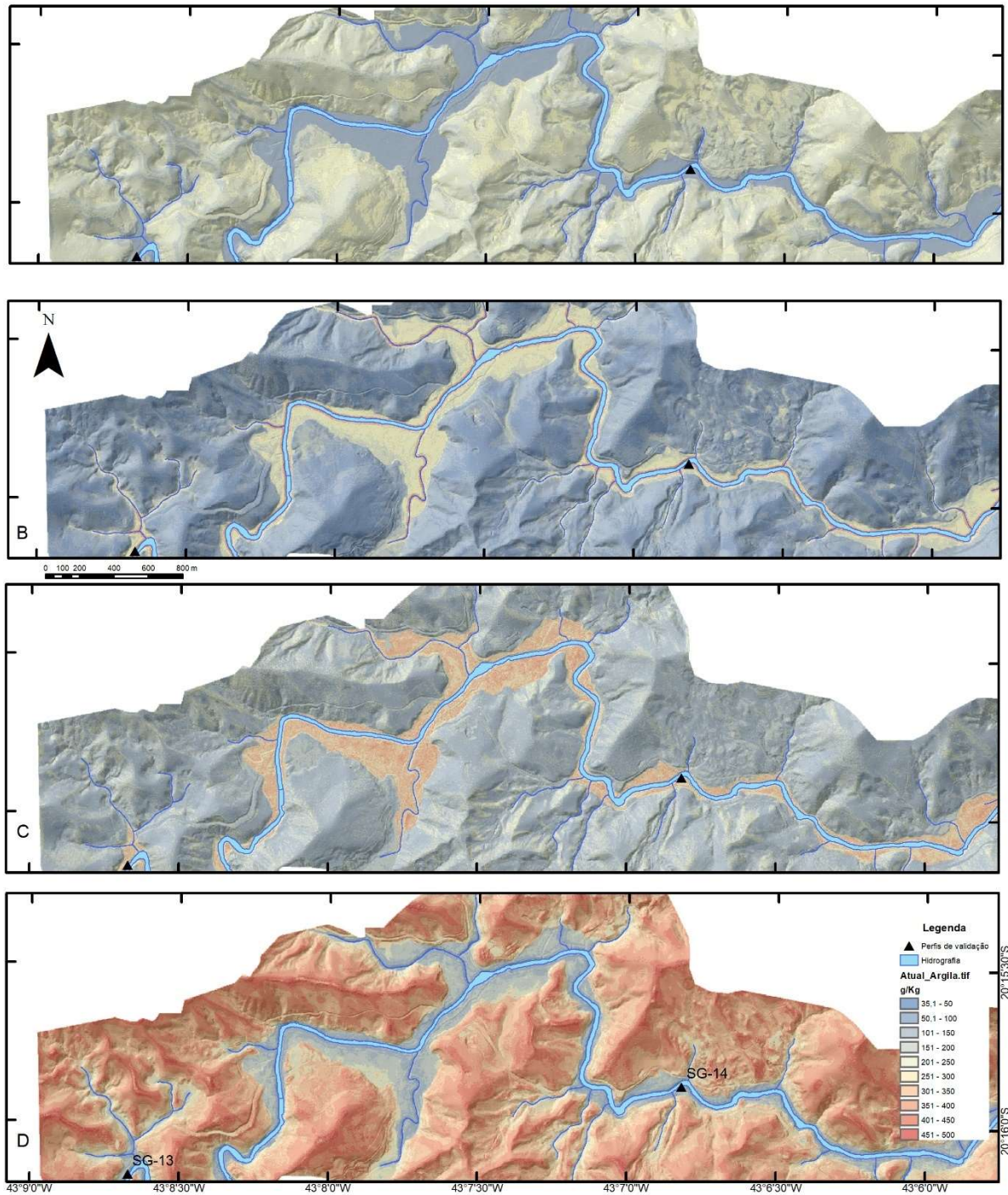


Figura 38 - Detalhe de parte da área de estudo, localizada próxima do distrito de Gesteira (Barra Longa-MG), com os resultados da predição de Areia Grossa (A), Areia Fina (B), Silte (C) e Argila (D) para a situação atual

Ao avaliar em detalhe um trecho da área de estudo com a presença de um tributário do Gualaxo do Norte, observa-se que, a distribuição de areia grossa na área de estudo está associada aos terrenos com maior declividade, geralmente localizados nas partes intermediárias da encosta. Para as áreas não impactadas a média de areia grossa foi de 211,94 g/kg, 220,23 g/Kg em pós rompimento e 224,96 g/Kg em condição atual, demonstrando uma concordância entre os três modelos gerados.

Ao avaliar os três cenários (Figura 39), observa-se uma distribuição de areia grossa menor em um cenário pré-rompimento nos locais mais planos, localizados próximos às drenagens principais. Esses teores reduzem-se consideravelmente após o rompimento, devido à composição do rejeito. No cenário atual constata-se um ligeiro incremento de areia grossa nas áreas impactadas. Foi constatado que esse aumento está associado também à elevação dos teores de argila, principalmente em áreas mais declivosas próximo ao limite da área impactada, ou seja, em áreas sujeitas ao aporte de colúvios, transportados por fluxos gravitacionais de áreas mais elevadas da paisagem. Os teores médios nas áreas afetadas foram de 177 g/Kg em condição pré rompimento, 85 g/Kg em condição pós rompimento e 111 g/Kg na atual situação.

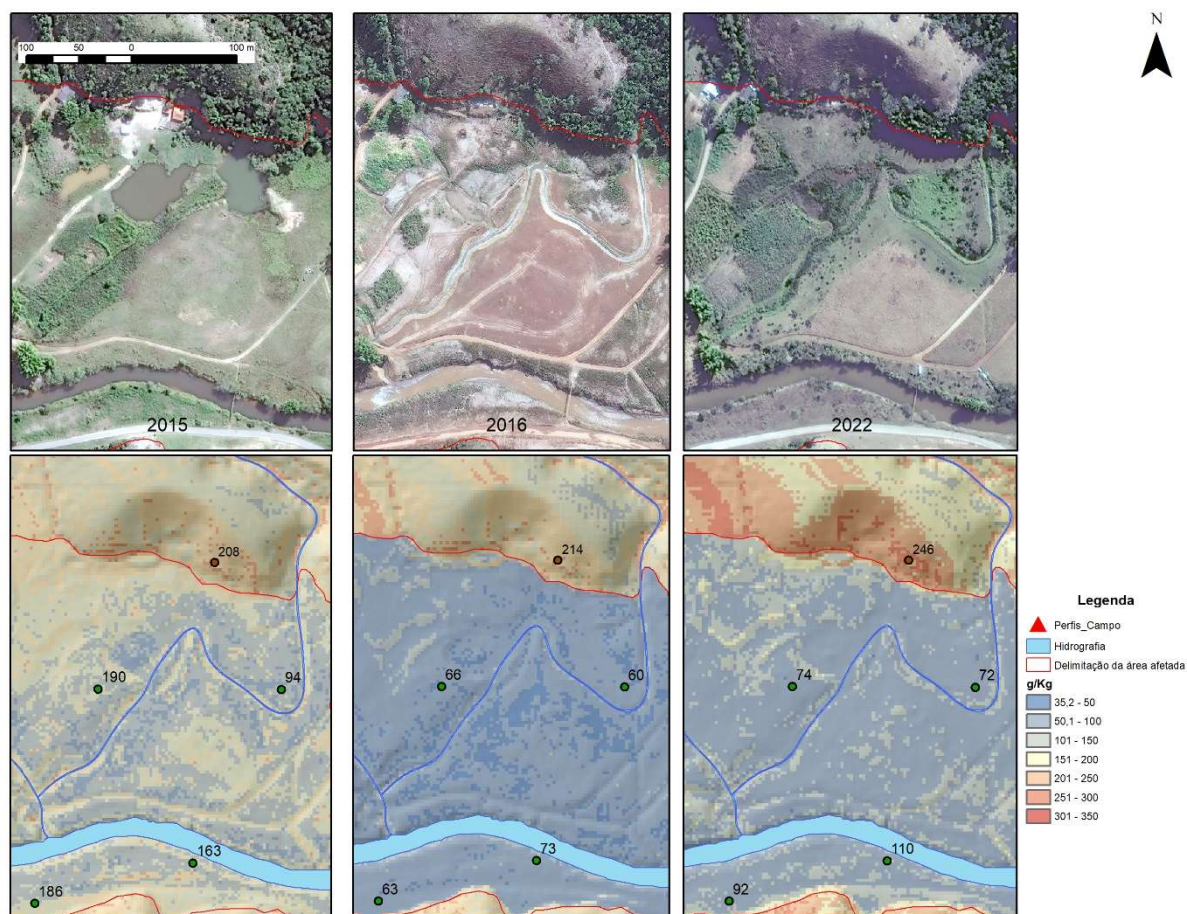


Figura 39 - Distribuição de areia grossa nos três cenários modelados. À esquerda o modelo em pré rompimento, pós rompimento no centro e situação atual representada na imagem da direita.

De forma geral teores mais elevados nas áreas mais planas e associadas aos terraços fluviais (Figura 40). Em locais em que a drenagem se apresenta mais encaixada no relevo, com ausência de planície fluvial bem formada observa-se que os teores são reduzidos. Já em áreas mais planas, localizadas geralmente em planícies ou terraços aluvionares os teores são mais elevados, condição esta que reflete a processos sedimentares associados à drenagem.

Ao avaliar a área afetada, constatou-se que a concentração de média era de 367 g/Kg, com valores mais elevados nas áreas adjacentes às drenagens, representando os diques aluvionares. Após o rompimento a concentração média foi de 369 g/Kg, valor este que se apresenta próximo ao que é encontrado atualmente (382 g/Kg). As principais diferenças entre os três cenários estão relacionadas a distribuição espacial dessa fração.

Com o aporte de rejeito na área, ocorreu um alteamento das planícies aluvionares, e consequentemente um soterramento dos diques aluvionares e antigos terraços. Por apresentar composição rica em areia fina, o rejeito proveniente da barragem de Fundão provocou uma homogeneização dessas planícies. Com o passar do tempo e o retorno das condições naturais

de transporte de sedimentos, observa-se uma reconstrução gradual desses diques aluvionares, evidenciados pelas concentrações mais elevadas de areia fina nas áreas adjacentes aos cursos d'água principais e seus afluentes.

A distribuição de silte na área foi drasticamente alterada com o aporte de rejeito. Em condição pré rompimento, constatou-se que a concentração se apresentava mais elevada nas planícies dos rios principais, relacionadas à confluência com tributários. Além disso foram constatados valores mais elevados nas áreas planas dos tributários, ocorrendo próximo às nascentes de cursos d'água, e em porções intermediárias com topografia mais plana.

Antes do rompimento a concentração média de silte em áreas afetadas era de 253 g/Kg. Após o aporte de rejeito, a concentração passou para 394 g/Kg, um aumento constatado de 55%. Atualmente os valores ainda são altos nos solos em superfície, porém observa-se uma ligeira redução na concentração, sendo constatada uma média de 322 g/Kg.

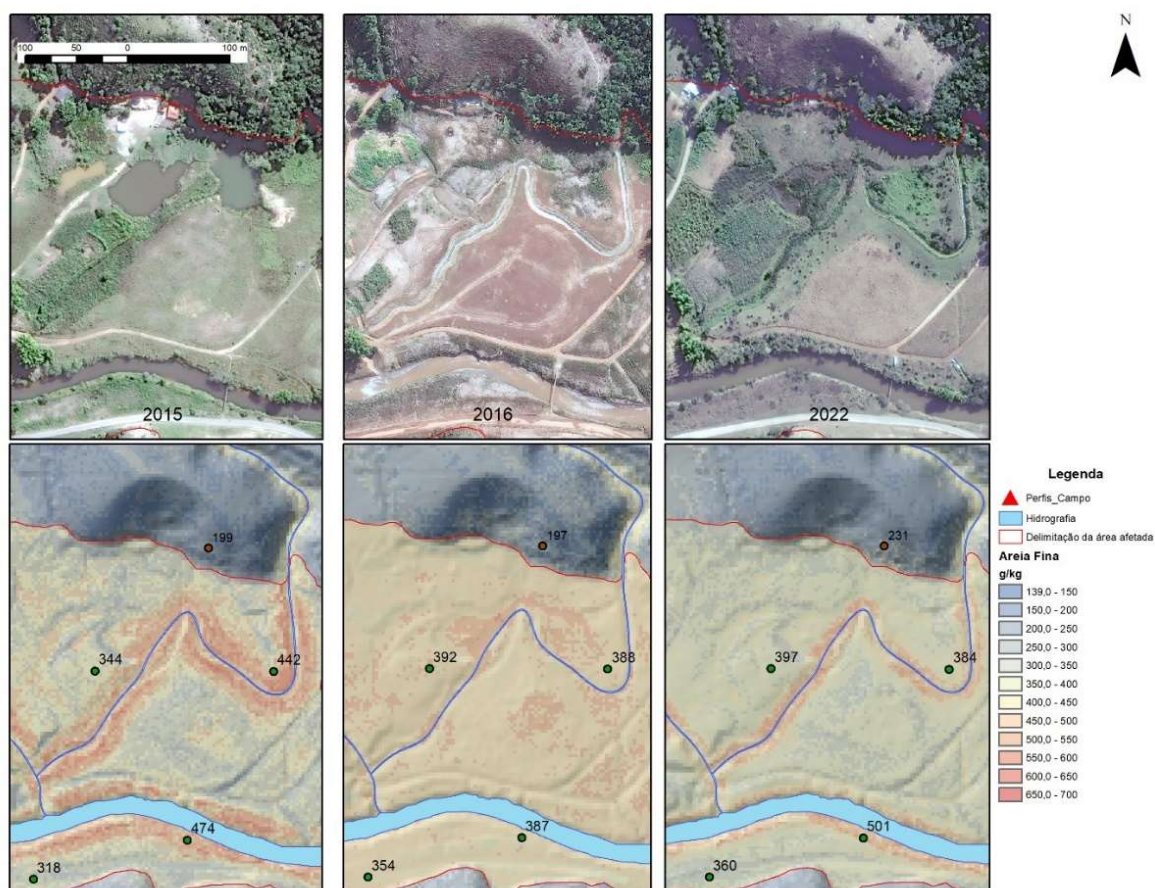


Figura 40 – Distribuição de areia fina nos três cenários modelados. À esquerda o modelo em pré rompimento, pós rompimento no centro e situação atual representada na imagem da direita.

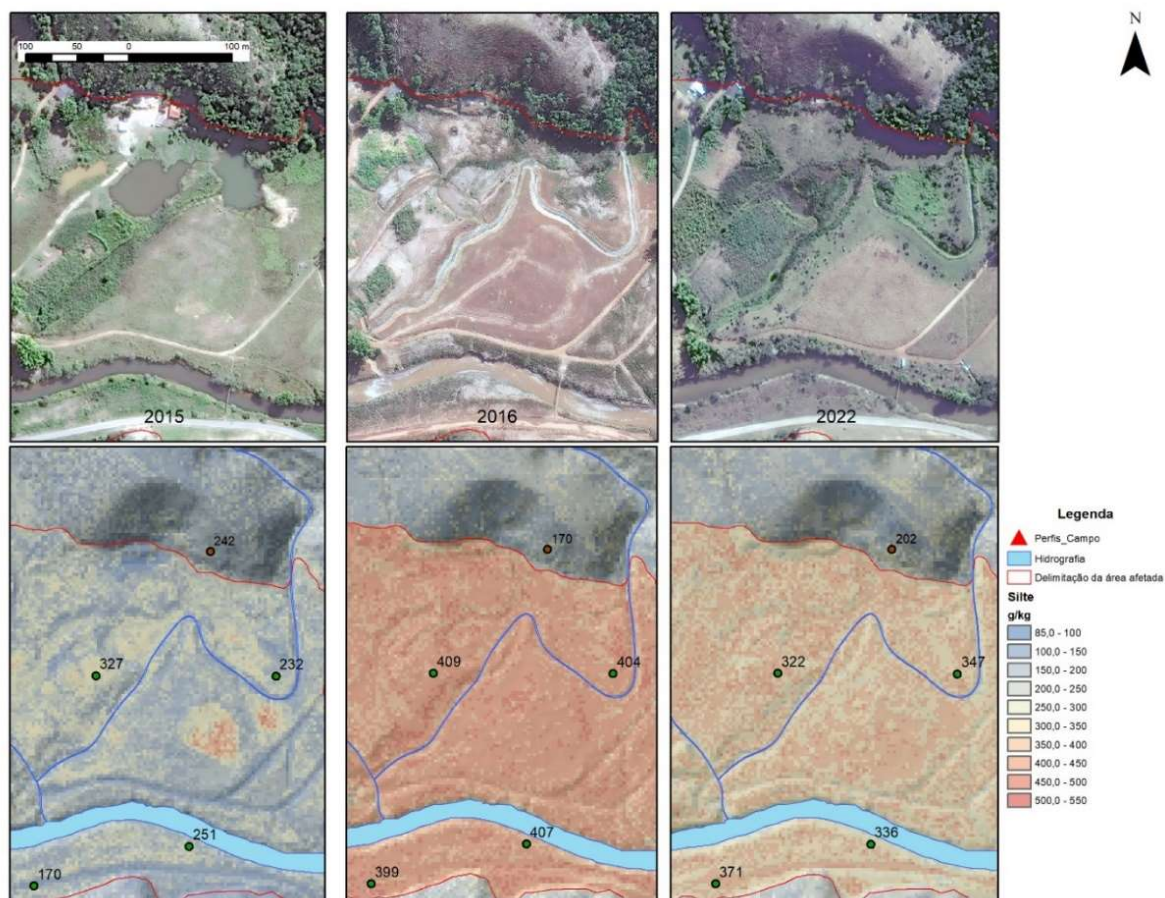


Figura 41 - Distribuição de silte nos três cenários modelados. À esquerda o modelo em pré rompimento, pós rompimento no centro e situação atual representada na imagem da direita.

A relação entre geformas e a distribuição da argila segue um padrão distinto das frações silte e areia fina. Ao contrário dessas frações, os teores de argila são mais elevados nas porções mais elevadas da paisagem, com valores mais altos constatados nas áreas mais estáveis da paisagem (Encostas superiores/mesas).

A concentração média de argila em condição pré rompimento em áreas afetadas era de 196 g/Kg. Após o rompimento passou para 121 g/Kg e atualmente apresenta média de 149 g/Kg. Na Figura 42 é possível avaliar a distribuição de argila, constando que em condição pré rompimento as áreas próximas às drenagens eram as áreas com menor concentração de argila, o que alterou com o aporte de rejeito, de forma que os teores ficaram mais homogêneos na área afetada.

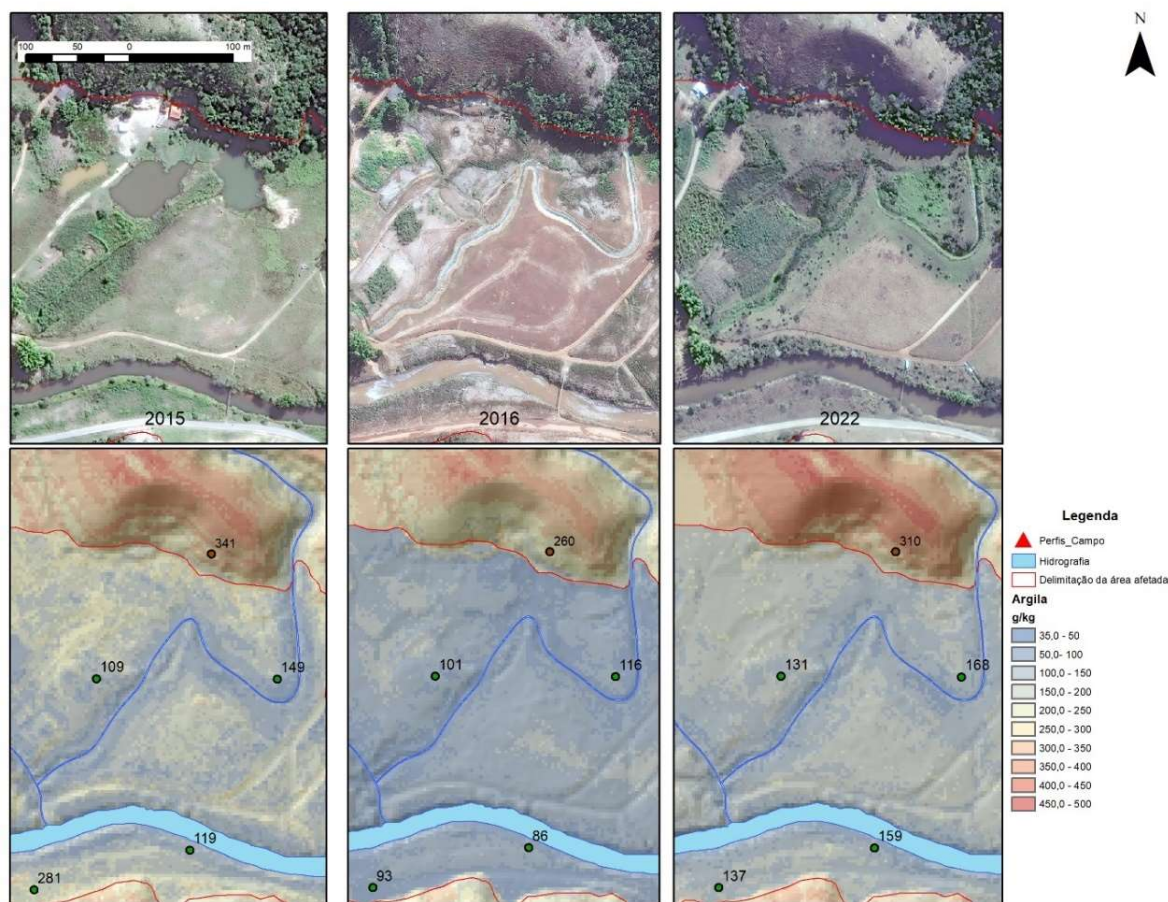


Figura 42 – Distribuição de argila nos três cenários modelados. À esquerda o modelo em pré rompimento, pós rompimento no centro e situação atual representada na imagem da direita.

3.4.2 Densidade do solo em distintos cenários

Conforme mostrado na Figura 43, a densidade do solo apresentou forte correlação com silte e areia grossa, correlação moderada com argila e fraca com areia fina. Os resultados indicam uma correlação positiva entre silte e areia fina, contribuindo para o aumento da densidade do solo com o aumento de suas concentrações. Por outro lado, areia grossa e argila apresentam correlação negativa, influenciando em valores mais baixos de densidade do solo à medida que suas concentrações aumentam.

Ao otimizar o modelo preditivo, notamos um ajuste notável, alcançando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,89. É importante ressaltar que esse alto valor de R^2 foi alcançado durante a fase de treinamento, considerando que o conjunto de dados original é relativamente limitado em termos de amostras. Adicionalmente, o conjunto de dados exibe um desequilíbrio significativo em relação às propriedades do material, com a maioria das amostras caracterizadas

pela presença de rejeitos. Diante dessa situação, optou-se por avaliar a precisão do modelo utilizando os resultados das amostras coletadas durante a etapa de campo deste estudo.

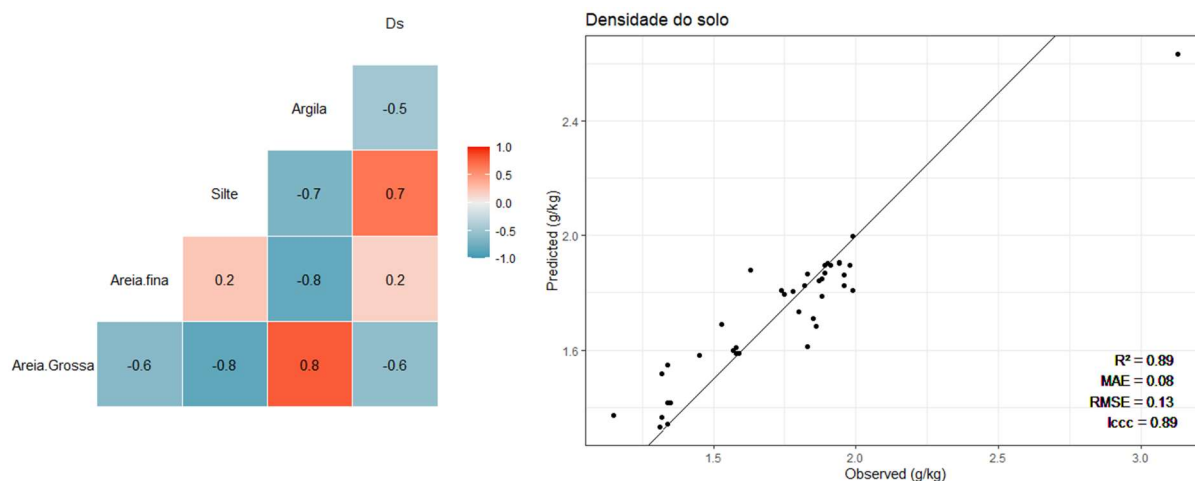


Figura 43 - Correlação das diferentes frações granulométricas e densidade do solo à esquerda, e à direita os resultados do ajuste da predição de densidade do solo estimada a partir das frações granulométricas do solo

Ao examinar os três cenários, destaca-se uma consonância com a avaliação textural, pois a condição pré-rompimento revelou uma menor densidade do solo na área afetada em comparação com as demais. Influenciado pelo aumento do teor de silte após o rompimento, o valor médio da densidade do solo atingiu $1,76 \text{ g/cm}^3$, alcançando um máximo de $1,94 \text{ g/cm}^3$.

Em contraste, os solos fora da área impactada apresentaram valores semelhantes, indicando que a textura do solo predita na etapa anterior, utilizada como variável nesta fase, manteve consistência nos três cenários modelados. Essa coerência reforça a confiabilidade da análise textural como um indicador relevante para compreender as variações na densidade do solo em diferentes contextos pós-rompimento.

Tabela 9 - Sumário estatístico dos conjuntos de dados utilizados na construção dos modelos de densidade do solo e resultados da modelagem

	Cenário	Min	1st Qu	Median	Mean	3rd Qu.	Max	sd	CV (%)
		Conjunto de dados original (g/cm ³) ¹							
n=39	-	1.15	1.55	1.82	1.73	1.89	3.13	0.33	19.27
		Densidade do solo predita na área não afetada (g/cm ³)							
	Pre	1.42			1.57		2.28	0.03	
	Pos	1.40			1.56		1.71	0.03	
	Atual	1.42			1.57		1.73	0.03	
		Densidade do solo predita na área afetada (g/cm ³)							
	Pre	1.43			1.62		2.34	0.03	
	Pos	1.51			1.76		1.94	0.08	
	Atual	1.44			1.46		1,73		

¹ - Conjunto de dados composto por amostras de camadas com e sem a presença de rejeito

A Figura 44 e Figura 45 apresentam 3 perfis de solos descritos 8 anos após o rompimento da barragem de Fundão. Esses perfis foram utilizados nesse estudo para validar a modelagem da densidade do solo.

O perfil exibido na Figura 44 foi descrito em uma planície aluvionar do rio do Carmo, localizada a jusante do núcleo urbano do município de Barra Longa. Nesse perfil foi possível identificar 3 camadas distintas, as quais representam as três condições do solo modeladas nesse estudo. A parte superior do perfil é composto por uma camada arenosa, relacionada ao aporte sedimentar no período chuvoso do ano. Na parte central do perfil é observada a camada de rejeito bem homogênea, assentada sobre camadas sedimentares arenosas.

Correlacionou-se os resultados obtidos na modelagem (resultados à direita), com a densidade do solo medida por método do anel volumétrico (resultados à esquerda). Observa-se uma concordância entre o valor medido e o valor modelado para as três camadas.

Conforme previsto, a camada de rejeito demonstra uma densidade do solo superior às demais. Esses resultados são consistentes também para as camadas arenosas situadas acima e abaixo da camada de rejeito. A presença dessas camadas em outros pontos ao longo da área afetada fortalece a concordância dos resultados, conforme ilustrado nos perfis apresentados nas Figura 44 a Figura 48. Em todas as imagens, destaca-se a presença da camada arenosa acima do rejeito, com espessuras variáveis, a depender da topografia local e distância da drenagem.

Os resultados da espacialização de densidade do solo nos três cenários são apresentados na Figura 50.

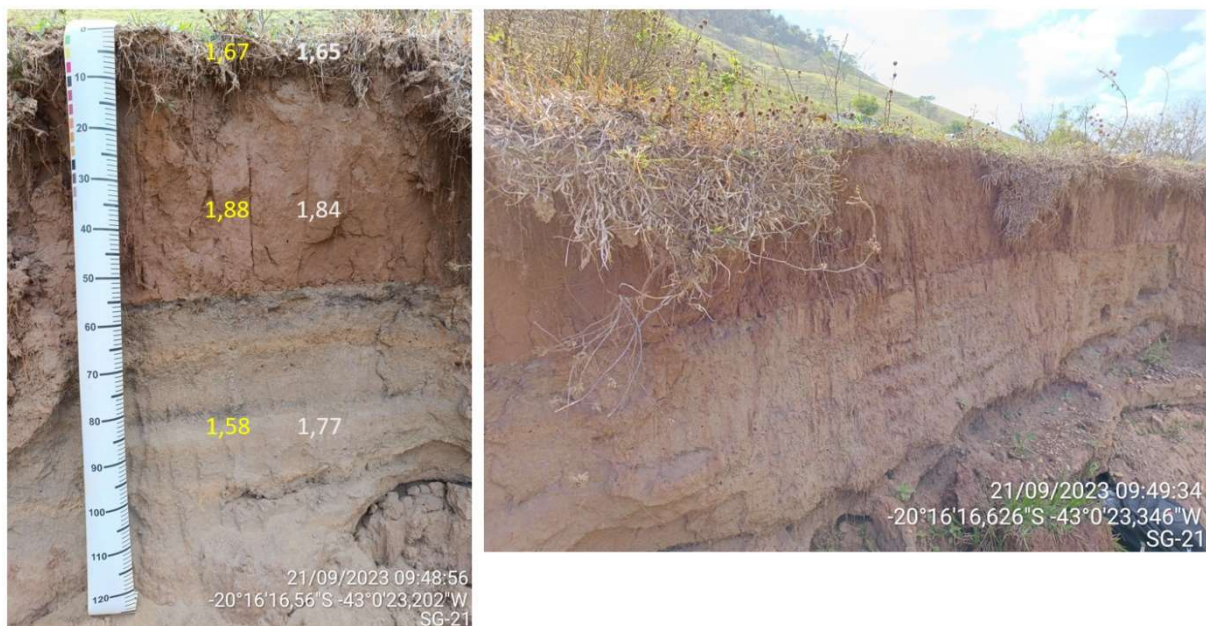


Figura 44 – Perfis de solo descritos em planícies aluvionares do rio do Carmo, em Barra Longa-MG. Em amarelo valores medidos pelo método do anel volumétrico. Em branco os valores preditos pelo modelo.

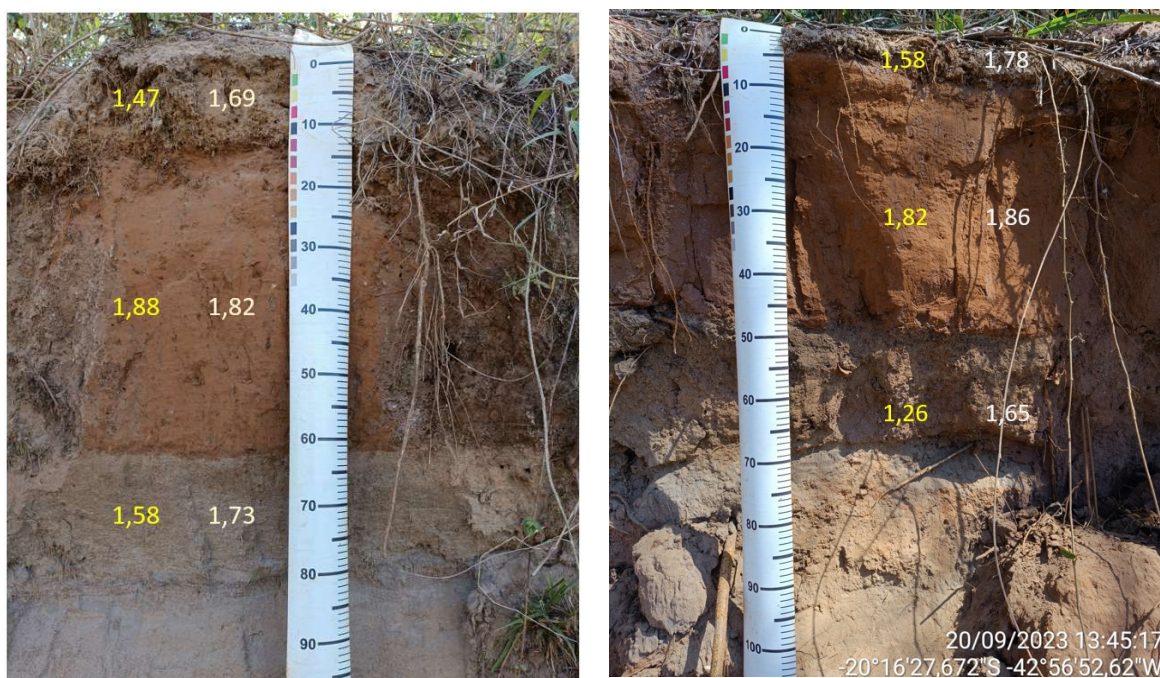


Figura 45 - Perfis de solo descritos em planícies aluvionares do rio Gualaxo do Norte. Em amarelo valores medidos pelo método do anel volumétrico. Em branco os valores preditos pelo modelo. Na imagem da direita é exibido em detalhe o horizonte A em formação acima da camada de rejeito



Figura 46 - Perfis de solo descritos em planícies aluvionares do rio Gualaxo do Norte. Em amarelo valores medidos pelo método do anel volumétrico. Em branco os valores preditos pelo modelo. Na imagem da direita é exibido em detalhe o horizonte A em formação acima da camada de rejeito



Figura 47 - Em amarelo valores medidos pelo método do anel volumétrico. Em branco os valores preditos pelo modelo. Imagem da esquerda apresenta perfil de solo descrito no ano de 2021. Do lado direito é apresentado um perfil de solo descrito no mesmo local no ano de 2023. Destaca-se a presença de um horizonte A de aproximadamente 10 cm com nítido acúmulo de matéria orgânica.



Figura 48 - Perfis de solo descritos em planícies aluvionares do rio Gualaxo do Norte. Resultados medidos de densidade do solo à esquerda, e à direita, valores preditos a partir da modelagem.

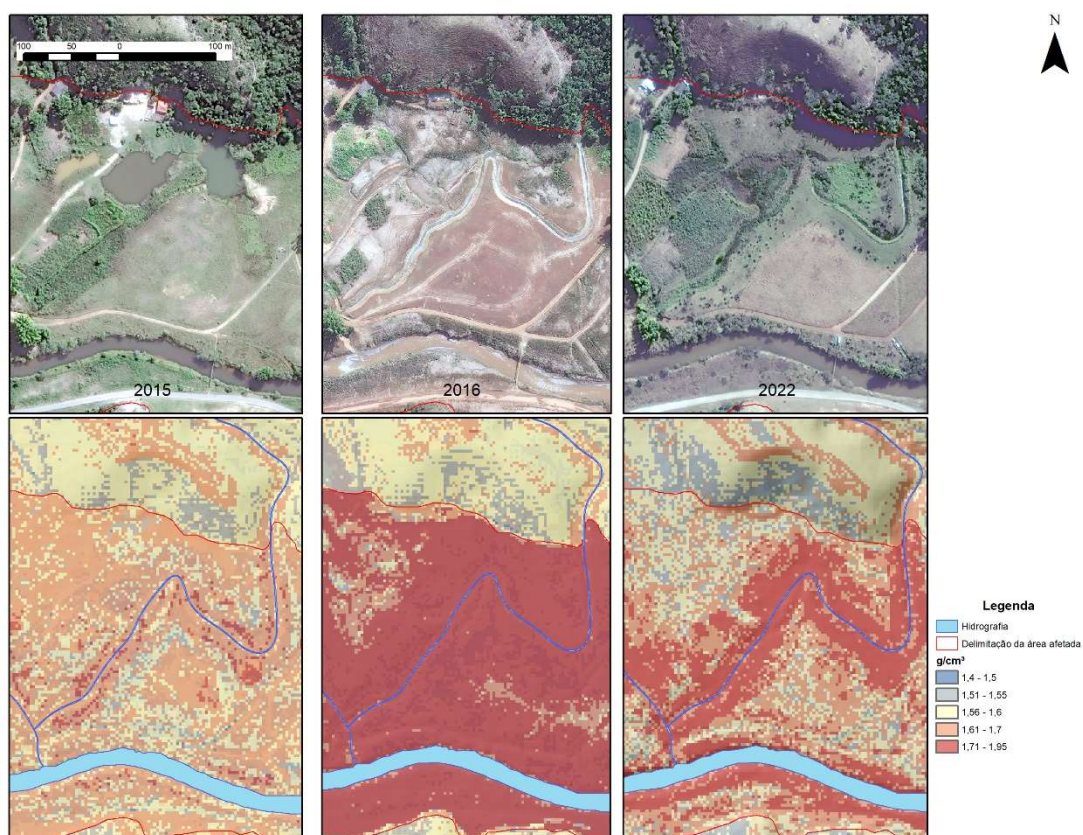


Figura 49 - Resultados da predição de densidade do solo em um recorte da área de estudo

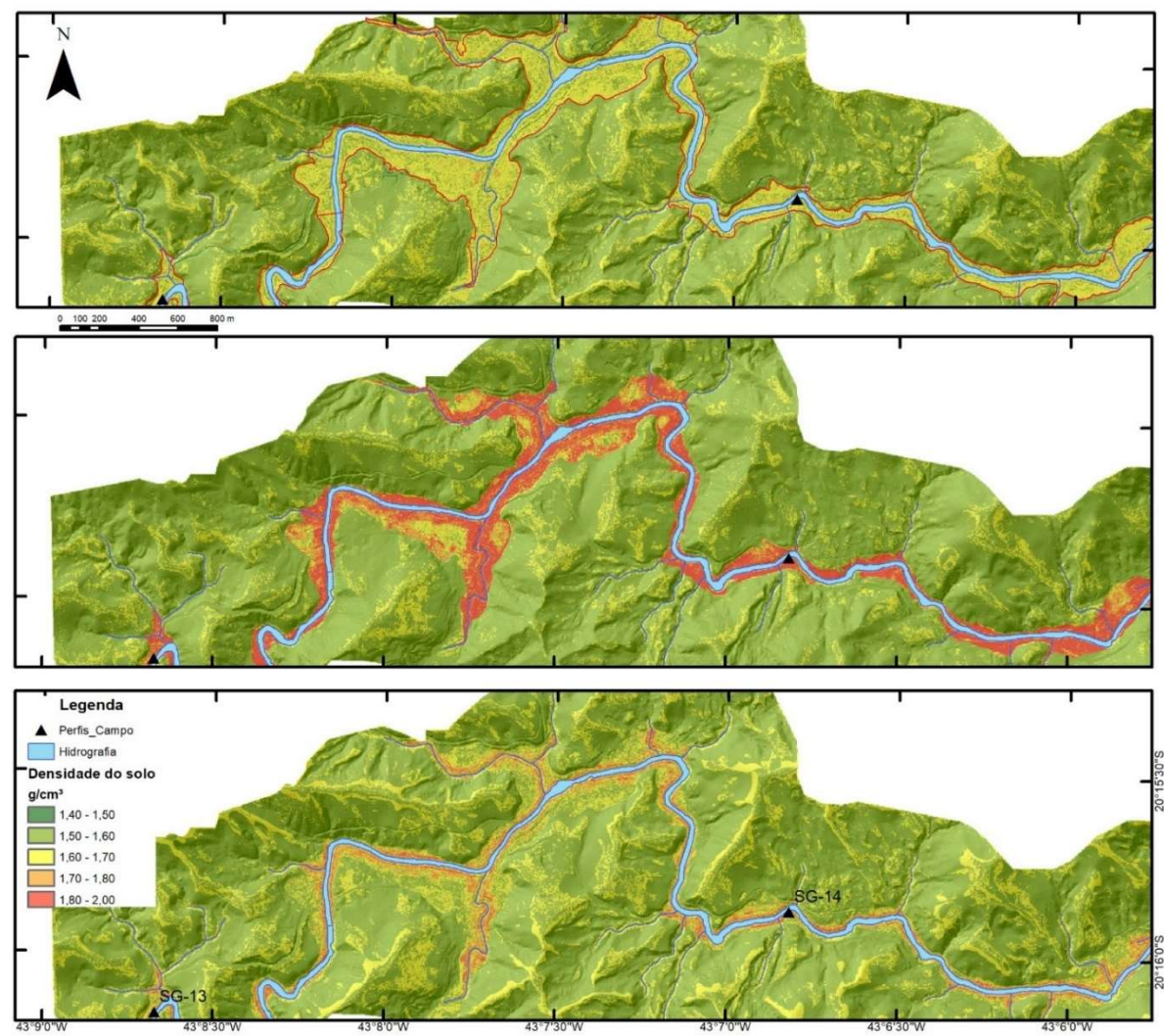


Figura 50 - Resultados da predição de densidade do solo em um recorte da área de estudo. (Pré rompimento - topo; Pós rompimento - centro; Situação atual - abaixo)

4. Discussão

O artigo em análise proporciona uma visão abrangente sobre a evolução dos tecnossolos nos rios impactados pelo rompimento da barragem de Fundão. A narrativa, que perpassa desde o período pré-rompimento até a recuperação ao longo de cinco anos, destaca a intrincada interação entre os processos naturais e as interferências humanas. Um ponto de destaque é a resiliência demonstrada pelos ecossistemas fluviais na fase pós-ruptura, revelando uma notável capacidade adaptativa da natureza, essencial para a sustentabilidade a longo prazo desses ambientes, mesmo diante de eventos extremos.

O uso do machine learning para a realização de estudos ambientais, especialmente no mapeamento digital de solos, oferece uma abordagem inovadora e eficiente na avaliação de impactos ambientais. A aplicação de técnicas de aprendizado de máquina nesse contexto proporciona uma série de vantagens que podem transformar a maneira como entendemos e monitoramos os efeitos ambientais.

Segundo Leguedois et al. (2016) os processos pedogênicos em Tecnossolos são semelhantes aos de solos naturais, agindo rapidamente e promovendo uma evolução acelerada do solo, embora estejam associados a conjuntos incomuns. Dessa forma, desenvolver uma estrutura de modelagem para a pedogênese de Tecnossolos com base em modelos existentes para solos naturais, apresenta-se como uma importante ferramenta na avaliação de ambientes afetados por atividades humanas.

4.1 Desempenho do modelo RF

O modelo gerado para o ambiente em pós rompimento foi aquele que apresentou o melhor desempenho geral na previsão de textura do solo na área de estudo. Para esse conjunto foram obtidos os maiores valores de R^2 , destacando-se os valores de 0,68 e 0,58 para as frações areia grossa e argila. Pode-se considerar que esses valores são altos no MDS, uma vez que nos estudos de Chagas et al. (2016) o maior valor de R^2 alcançado foi de 0,44 para areia e 0,40 para argila. Conforme explanado por esses autores nos estudos de Ließ et al. (2012) os autores obtiveram valores de 0,30 e 0,43 para areia e argila respectivamente, na camada superficial dos solos utilizando atributos morfométricos do terreno. Já Akpa et al. (2014) relataram percentagens de variação, 0,49 para areia e 0,56 para argila, em um estudo realizado na Nigéria,

cuja densidade de amostragem (0,001 perfis km⁻². Os resultados obtidos por Vaysse & Lagacherie (2015) para a areia (0,35) 0,35 para argila.

Os modelos concebidos para representar o ambiente pré-rompimento apresentaram os valores mais baixos de R², especialmente para as frações de silte e areia grossa. Esses resultados podem estar vinculados à maior heterogeneidade na distribuição dessas frações na área, conforme evidenciado pelo maior coeficiente de variação para esse conjunto de dados. De acordo com Arruda et al. (2013), as divergências em mapeamentos digitais de solo podem ser atribuídas à baixa relação da variável alvo com as covariáveis ambientais utilizadas, resultando em deficiências na representação de todas as variações de solo encontradas na área (Chagas et al., 2010).

O material de origem é um dos principais determinantes da textura do solo. Os valores mais altos de R² para a condição pós-rompimento podem estar associados principalmente às características do próprio rejeito. De acordo com Schaefer et al. (2016), o rejeito apresenta uma composição mais homogênea em comparação com os solos naturais, caracterizando-se por altos teores de silte e areia fina. A homogeneidade na composição desse material pode ter contribuído para valores mais consistentes ao avaliar os conjuntos de teste. A drástica redução nos teores de areia grossa e argila, juntamente com o aumento considerável de areia fina e silte, indica que um modelo mais simplificado de distribuição dos solos na área favoreceu os valores mais elevados de R².

Ao analisar a contribuição das covariáveis na construção dos modelos, nota-se que os valores mais baixos de R² para areia grossa e silte em pré-rompimento apresentam uma relação direta com os modelos mais complexos, ou seja o modelo foi concebido a partir da contribuição de mais variáveis, com a maioria apresentando importância superior a 40%. Nesses casos específicos, a delimitação da área afetada não apresentou relevância significativa no modelo, o que era de se esperar, uma vez que alterações antrópicas não estão inseridas como processos de formação dos solos (Jenny, 1941).

No modelo de argila e areia fina, a distância euclidiana à drenagem emerge como a variável mais importante. Uma correlação negativa entre a distância à drenagem e os teores de areia fina é observada, com os maiores valores ocorrendo nas proximidades da drenagem, onde são encontrados Neossolos Flúvicos e Cambissolos Flúvicos, além dos Gleissolos nas áreas de drenagem insuficiente (Nunes et al., 2001). Já a distribuição da argila apresenta uma correlação positiva com a distância euclidiana à drenagem, uma vez que os maiores teores foram constatados em áreas mais estáveis da paisagem e distantes das drenagens.

Após o rompimento da barragem, os solos apresentaram elevados teores de silte e areia fina, refletindo a composição do rejeito. Nesse cenário, a delimitação da área impactada foi a variável de maior importância. A mudança na textura do solo na condição atual é evidenciada pela redução da importância da variável relacionada à área afetada. A distância euclidiana à drenagem reassume a maior importância nos modelos de areia fina e argila, uma vez que os processos de transformação do solo iniciaram-se imediatamente após a deposição de rejeito na área. No caso da areia fina, essa mudança pode ser atribuída ao transporte e deposição de material natural pelo rio, predominantemente arenoso.

4.2 Distribuição textural ao longo da área de estudo

Na área de estudo distinguem-se dois compartimentos claros: um, erosional, de relevo bastante movimentado, onde a relação entre os solos e o substrato rochoso é estreita, que corresponde aos locais onde a erosão geológica promoveu o desgaste das superfícies mais antigas e retrabalha atualmente o substrato rochoso, e uma pequena zona deposicional, correspondente às planícies fluviais. Segundo Oliveira et al. (2021), na região do Quadrilátero ferrífero o material de origem e o relevo representam uma maior influência sobre a ocorrência de solos na área.

O ambiente mais no topo da paisagem, em posições mais planas e estáveis da paisagem prevalecem os processos de transformação do material de origem, favorecendo a formação da argila. São caracterizados pela intensa intemperização e elevada profundidade efetiva, e ocorrem predominantemente nos pontos mais altos da paisagem, onde o fator relevo condiciona a boa drenagem e, associado a pequenas declividades, favorecem a maior infiltração da água (Costa et al., 2014). Conforme mencionado por Pereira et al. (2019), o aumento da umidade no sistema potencializa as reações de hidrólise, desencadeando a transformação dos minerais. Nesse contexto, observa-se a prevalência de quartzo na fração de areia e a presença de caulinita, óxidos de ferro e alumínio na fração de argila.

De acordo com Filho et al. (2010) na borda leste do Quadrilátero Ferrífero, ocorre uma sucessão de elevações de cumes estreitos, cujo padrão de distribuição de solos é marcada pela dissecação do relevo pelos afluentes do Rio Doce. De relevo montanhoso e forte ondulado, predominam nessas áreas Cambissolos, sobretudo nas encostas côncavas e trechos mais íngremes, com ocorrência menor de Latossolos Vermelho-Amarelos, ambos de textura argilosa, em topos um pouco mais amplos e encostas de conformação convexa. Em posição intermediária da bacia a drenagem principal é ladeada por pequenos terraços e encostas onduladas ou forte

onduladas, ocupadas por Latossolos Vermelhos. Nas áreas com depósitos aluviais mais expressivos, predominam Neossolos Flúvicos, predominando concentrações mais elevadas de areia fina nos diques aluvionares, e silte nas regiões de drenagem insuficiente, locais de ocorrência de Gleissolos.

4.2.1 Silte

A distribuição dos teores de silte em condição pré-rompimento apresentou maior CV em relação aos demais cenários, e está correlacionada aos locais de acúmulo de material, como ocorrem em planícies fluviais atuais e terraços mais elevados. Segundo Nunes et al. (2001) os solos das planícies fluviais apresentam expressiva variação textural de local para local, comum nestes ambientes, e refletem a natureza granulométrica do material sedimentado, já que experimentaram pouca evolução. De acordo com esses autores o Gleissolo Háptico apresenta altos teores de argila decorrentes da deposição mais afastada do rio Piranga. Já o Neossolo Flúvico pode apresentar contraste textural nas camadas superficiais, estando os valores mais elevados de areia em superfície atreladas a eventos de maior energia das águas durante a deposição do sedimento.

Após o rompimento da barragem de Fundão observou-se uma transformação completa nessa condição, com os teores de silte elevando-se consideravelmente, principalmente devido à influência do material do rejeito.

Conforme mencionado por Andrade (2014), a análise realizada em quatro barragens de minério de ferro revelou que os rejeitos compartilham características físicas bastante similares. Isso provavelmente decorre da semelhança nos processos de beneficiamento dos minérios, que envolvem principalmente operações de moagem para redução do tamanho das partículas, além de separação física e magnética. Em operações de mineração ou processamento, a eficiência dos métodos de separação pode influenciar na homogeneidade do rejeito. Tecnologias avançadas podem resultar em uma separação mais eficaz, levando a um rejeito mais homogêneo. Adicionalmente, a maior presença da fração silte-argila nos rejeitos pode ser atribuída a uma quantidade maior de rejeitos de hematita, minério que apresenta granulometria mais fina.

4.2.2 Argila

A redução dos teores de argila nas áreas afetadas, especialmente próximos aos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, pode ter implicações significativas nos processos de estruturação do solo e na formação de poros. Vale destacar que, mesmo antes do rompimento, os teores de argila nessas áreas já eram relativamente baixos, porém equilibrados dentro do ambiente específico. Solos mais argilosos eram comumente encontrados em locais mais elevados na paisagem, como em terraços ligeiramente mais altos que os atuais, bem como nas encostas e áreas de platôs no alto da paisagem..

A ausência de argila pode afetar a capacidade de agregação do solo, levando a uma estrutura mais compacta e menos favorável à infiltração de água e ao desenvolvimento radicular. A formação de poros, essenciais para a circulação da água, aeração e disponibilidade de nutrientes, também pode ser prejudicada pela redução desses teores (Silva et al., 2014). Nesse sentido a utilização de *topsoil*, especialmente em processos de recuperação pós-rompimento, pode ter sido um dos fatores importantes de mitigação dos efeitos da redução dos teores de argila. O *topsoil*, que consiste na camada superficial do solo rica em nutrientes orgânicos e minerais, foi incorporado em algumas áreas, sendo nítida a melhora da estrutura do solo nos locais da aplicação da técnica (Gonçalves et al., 2020).

A adição de *topsoil* ajuda a restabelecer os teores de argila, promovendo a formação de agregados e porosidade adequada. Além disso, essa prática contribui para a restauração da fertilidade do solo, oferecendo condições propícias para o crescimento vegetal e a recuperação da cobertura vegetal. A presença adequada de argila proveniente do *topsoil* é fundamental para a recriação de condições favoráveis à agricultura e a outras atividades produtivas.

4.2.3 Areia Fina

A presença de concentrações elevadas de areia fina ao longo dos cursos d'água é uma condição natural que está relacionada diretamente a formação dos diques fluviais. Essa estrutura pode consistir em uma acumulação de sedimentos, rochas e detritos que se acumulam e criam uma barreira ao longo do curso da água, retendo os materiais que foram transportados.

O processo natural de formação dos diques aluvionares ao redor de um rio é fundamental para a dinâmica dos ecossistemas fluviais. Esses diques se desenvolvem ao longo do tempo devido à deposição de sedimentos aluvionares durante eventos de cheias. Os passos principais envolvidos nesse processo incluem o transporte de sedimentos pelo rio, a desaceleração do

fluxo em áreas mais planas, a deposição gradual desses sedimentos, a formação de barras de sedimentos e, finalmente, a construção gradual do dique natural.

No contexto do rompimento da barragem de Fundão, a alteração drástica no cenário foi evidenciada pelos dados modelados. Antes do rompimento, a área era predominantemente ocupada por diques aluvionares ao longo dos cursos d'água, desempenhando um papel essencial na estrutura e dinâmica do ambiente. No entanto, o evento de rompimento alterou significativamente essa paisagem, começando pelo decapitamento das áreas afetadas e pela subsequente deposição de rejeitos.

Após oito anos do rompimento, os dados indicam uma mudança notável no cenário, com a formação de camadas arenosas compostas por material natural sedimentado. Essa transformação evidencia um processo natural de restauração do ambiente, no qual a deposição de areia desempenha um papel crucial. A aporte de areia tende a reduzir a densidade dos solos, uma vez que a presença desse material contribui para a porosidade do solo, favorecendo o crescimento de raízes, com consequente acúmulo de matéria orgânica

A redução da densidade do solo é um fator positivo para o ambiente, pois cria condições mais propícias para o restabelecimento da vegetação (Reinert et al. 2008). Solos menos densos facilitam a penetração das raízes, promovendo o crescimento das plantas e contribuindo para a recuperação da cobertura vegetal. Isso não apenas restaura a beleza cênica e a biodiversidade da região, mas também melhora a funcionalidade do ecossistema fluvial.

Além disso, a presença contínua de sedimentos naturais sugere que o processo de formação de diques aluvionares está se restabelecendo. Essa recuperação é vital para a estabilidade das margens dos rios, para a mitigação de processos erosivos e para a promoção de condições ambientais mais saudáveis.

No contexto da geomorfologia fluvial, a "acresção vertical" refere-se geralmente à elevação do leito do rio ao longo do tempo devido à deposição de sedimentos (Bayer et al., 2014). Isso ocorre quando um rio transporta sedimentos e os deposita ao longo de suas margens e leito.

A deposição vertical de sedimentos pode ocorrer de diversas maneiras, e mais comumente está associada às cheias, quando o rio está transportando uma grande quantidade de sedimentos em suspensão e os deposita ao perder velocidade. Esse processo contribui para a formação e mudanças nas características dos canais fluviais ao longo do tempo. Os dados modelados demonstraram que esse processo está ocorrendo em praticamente toda a área

adjacente aos cursos d'água, sendo corroborado pelos registros realizados na etapa de investigação de campo (Figura 51).



Figura 51 – Evidências do processo de acreção vertical em um perfil de tecnossolo descrito nas margens do rio Doce, próximo ao município de Santa Cruz do Escalvado-MG.

4.3 Densidade do solo

Ao aplicar o modelo RF para modelar a densidade do solo, foi possível superar os desafios associados à obtenção direta de dados de densidade do solo (DS) em uma ampla área geográfica.

A incorporação da avaliação de densidade do solo no contexto de avaliação de impactos ambientais apresenta-se como uma importante ferramenta na avaliação da qualidade do solo (De Araújo et al., 2012), visto que a densidade do solo é uma variável que apresenta estreita relação com os processos de transporte da água ao longo do perfil e crescimento de raízes (Reinert et al. 2008).

Ao examinar os três cenários, destaca-se uma consonância com a avaliação textural, pois a condição pré-rompimento revelou uma menor densidade do solo na área afetada em comparação com as demais. Influenciado pelo aumento do teor de silte após o rompimento, o valor médio da densidade do solo atingiu $1,76 \text{ g/cm}^3$, alcançando um máximo de $1,94 \text{ g/cm}^3$.

Em contraste, os solos fora da área impactada apresentaram valores semelhantes, indicando que a textura do solo predita na etapa anterior, utilizada como variável nesta fase, manteve consistência nos três cenários modelados. Essa coerência reforça a confiabilidade da análise textural como um indicador relevante para compreender as variações na densidade do solo em diferentes contextos pós-rompimento.

Abordando a questão da correlação positiva observada para a fração de areia fina, é importante considerar a atualidade do cenário, onde as amostras de sedimento apresentam uma concentração significativa dessa fração. O modelo gerado, ao interpretar esse contexto, desconsiderou a relação existente entre o aporte de areia fina nas margens dos cursos d'água e a redução na densidade do solo. Entende-se que para promover uma melhora da precisão do modelo, seja importante incluir um número mais representativo de amostras de solos naturais no conjunto de dados.

Outro fator que pode melhorar a modelagem é a incorporação de outras variáveis, como teor de carbono orgânico e a classificação da amostra quanto a presença ou não de rejeito. A expansão do conjunto de dados para incorporar uma diversidade mais ampla de condições de solo permitirá que o modelo seja mais sensível às nuances do ambiente, proporcionando resultados mais precisos e confiáveis. .

A alteração da densidade do solo pela deposição de rejeito, pode desencadear uma série de efeitos negativos que reverberam por todo o ecossistema. Quando a densidade do solo é modificada, seja por compactação devido a atividades humanas intensivas ou por eventos naturais como enchentes, diversos aspectos cruciais para a saúde do solo e da vegetação são impactados de maneira adversa.

Uma das consequências mais significativas da alteração da densidade do solo é a redução da porosidade, prejudicando a capacidade do solo de reter água e permitir a circulação de ar. Isso pode resultar em problemas de drenagem, levando à formação de áreas compactadas e propícias ao acúmulo de água, criando condições favoráveis para o desenvolvimento de patógenos e a asfixia das raízes das plantas.

Além disso, a compactação do solo pode comprometer a estrutura física do mesmo, dificultando o crescimento e a penetração das raízes, limitando sua expansão e, conseqüentemente, afetando a estabilidade e sustentabilidade das plantas. Esse fenômeno pode ser particularmente prejudicial em áreas agrícolas, onde a produtividade das culturas depende diretamente da saúde e do desenvolvimento eficaz das raízes.

Em ambientes naturais, a alteração da densidade do solo pode comprometer a

diversidade biológica, afetando organismos do solo, como micro-organismos e pequenos invertebrados, que desempenham papéis cruciais nos processos de decomposição e ciclagem de nutrientes.

4.4 Modelo de evolução dos ambientes estudados

Visto a magnitude dos impactos no meio ambiente, torna-se imperativo discutir como eventos extremos, como o rompimento de barragens, podem se tornar mais frequentes e intensos. Essa análise amplia a compreensão da importância de estratégias de gestão sustentável e de adaptação para enfrentar os desafios futuros, sublinhando a necessidade de abordagens mais robustas e integradas na gestão ambiental.

A recuperação observada ao longo de oito anos destaca a relevância do monitoramento contínuo das áreas afetadas. Esse acompanhamento não apenas fornece uma compreensão mais aprofundada dos processos de recuperação, mas também oferece insights valiosos para a gestão ambiental e a avaliação da resiliência de ambientes afetados por eventos extremos.

Além disso, ao expandir a discussão para os impactos na biodiversidade local, torna-se possível avaliar como as mudanças nos tecnossolos afetam as comunidades de plantas e animais. A recuperação dos diques aluvionares, por exemplo, sugere uma correlação com a restauração de habitats para espécies ribeirinhas, o que ressalta a importância ecológica dessas mudanças nos solos.

A evolução dos tecnossolos nos rios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão (Figura 53), oferece uma perspectiva interessante sobre a resiliência e a capacidade de recuperação dos ecossistemas após eventos extremos. A narrativa revela uma sucessão de mudanças nos solos, destacando a interação dinâmica entre os processos naturais e as influências antrópicas.

Antes do rompimento da barragem, as planícies aluvionares eram caracterizadas principalmente por solos aluvionares formados a partir da sedimentação natural dos cursos d'água. Esses solos eram parte integrante do ecossistema, desempenhando papéis vitais na retenção de água, na fertilidade e no suporte à vegetação local.

O rompimento da barragem introduziu lama com altos teores de silte e areia muito fina, modificando drasticamente as características físicas e químicas do solo. A presença desses materiais finos pode ter afetado a permeabilidade do solo e a capacidade de suporte para o crescimento vegetal, influenciando propriedades como a porosidade e a capacidade de infiltração.

Conforme exibido na Figura 52, nos locais onde foi aplicada uma camada de aterro proveniente de solos bem drenados (cambissolos e latossolos), localizados em áreas de encosta, observa-se um condicionamento do solo, com a presença de um Horizonte A muito bem formado, com diferença textural acentuada e concentração de areia mais elevada, sobre um Horizonte B onde a estrutura em blocos já se desenvolve de forma marcada.

Foram identificadas estruturas pedológicas notáveis nesse material depositado, apresentando policromia devido à mistura de diferentes materiais. Observam-se áreas mais vermelhas, caracterizando solos latossólicos mais drenados, ao lado de materiais câmbicos.

Atualmente, esses solos estão sendo manejados com pastagens, com um acúmulo expressivo de matéria orgânica no horizonte A, evidenciando uma transformação completa do tecnossolo em direção a um processo pedogenético. Raízes médias, finas e grossas são observadas superficialmente, enquanto penetram por todo o horizonte condicionado. Mesmo no rejeito, há penetração de raízes, embora a zona de raízes se concentre nas áreas onde o solo mais estruturado foi depositado.

A recolocação do *topsoil* na paisagem sobre esses tecnossolos resultou na elevação e sistematização dos terraços, proporcionando áreas mais bem drenadas. As grandes cheias no ribeirão do Carmo não afetam essas áreas, ficando limitadas à região adjacente ao rio.

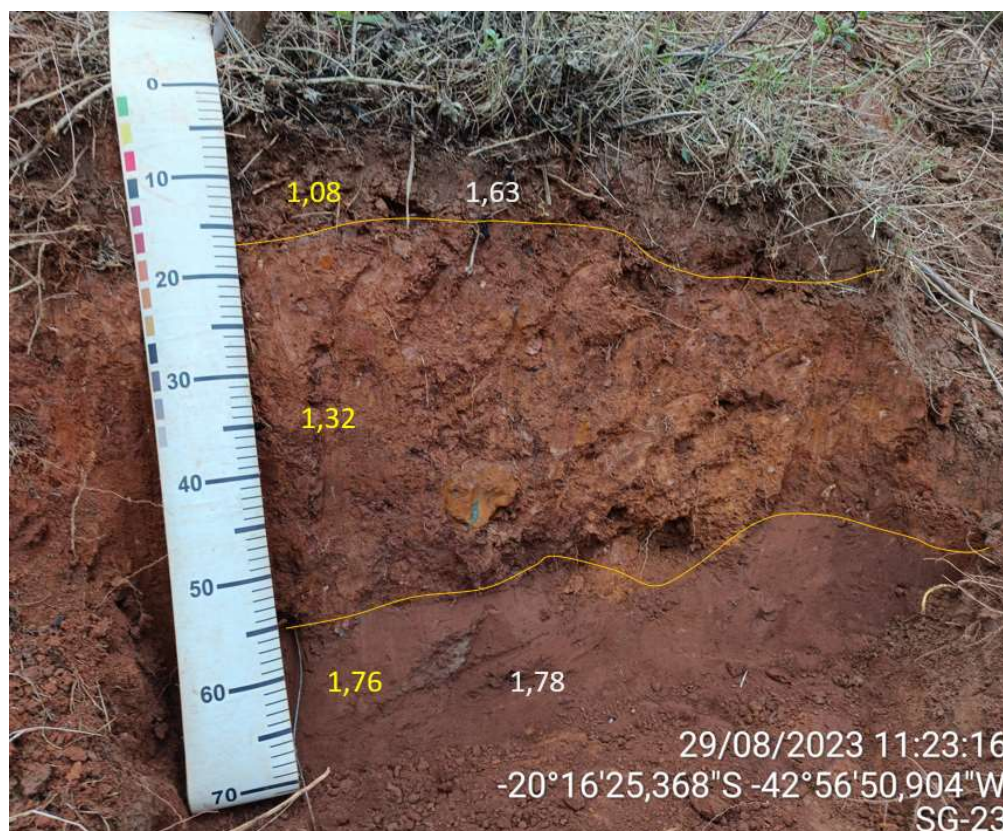


Figura 52 - Evidências dos processos de pedogênese tecnossolo com adição de *topsoil*, descrito nas margens do rio do Carmo, próximo ao município de Rio Doce-MG. Resultados em amarelo representam valores medidos de densidade do solo. Valores em cinza representam valores preditos de densidade do solo para esse ponto

Nessas áreas observa-se a formação de um dique aluvionar arenoso, reconfigurando a planície aluvial natural ao longo do tempo. Em apenas sete anos, constata-se que a planície aluvial do rio do Carmo recuperou um perfil hidrológico semelhante ao anterior, demonstrando um notável processo de autodepuração ambiental. Isso é surpreendente, considerando que milhões de toneladas de rejeito cobriram essas áreas. Atualmente, a paisagem está se revitalizando, tanto em termos de capacidade produtiva quanto nos aspectos naturais, com a configuração ativa da planície fluvial.

A reconstituição dos diques aluvionares não apenas restaura a característica dos solos aluvionares, mas também desempenha um papel crucial na mitigação de cheias, na manutenção da biodiversidade e na promoção de condições propícias para o desenvolvimento sustentável das áreas ribeirinhas.

O cenário atual das áreas afetadas demonstra a resiliência dos ecossistemas fluviais e a capacidade da natureza em se recuperar ao longo do tempo, apesar dos desafios impostos por eventos catastróficos. O retorno dos processos naturais de formação de solos aluvionares indica

uma recuperação progressiva das características ambientais fundamentais para a saúde dos ecossistemas fluviais dos rios afetados.

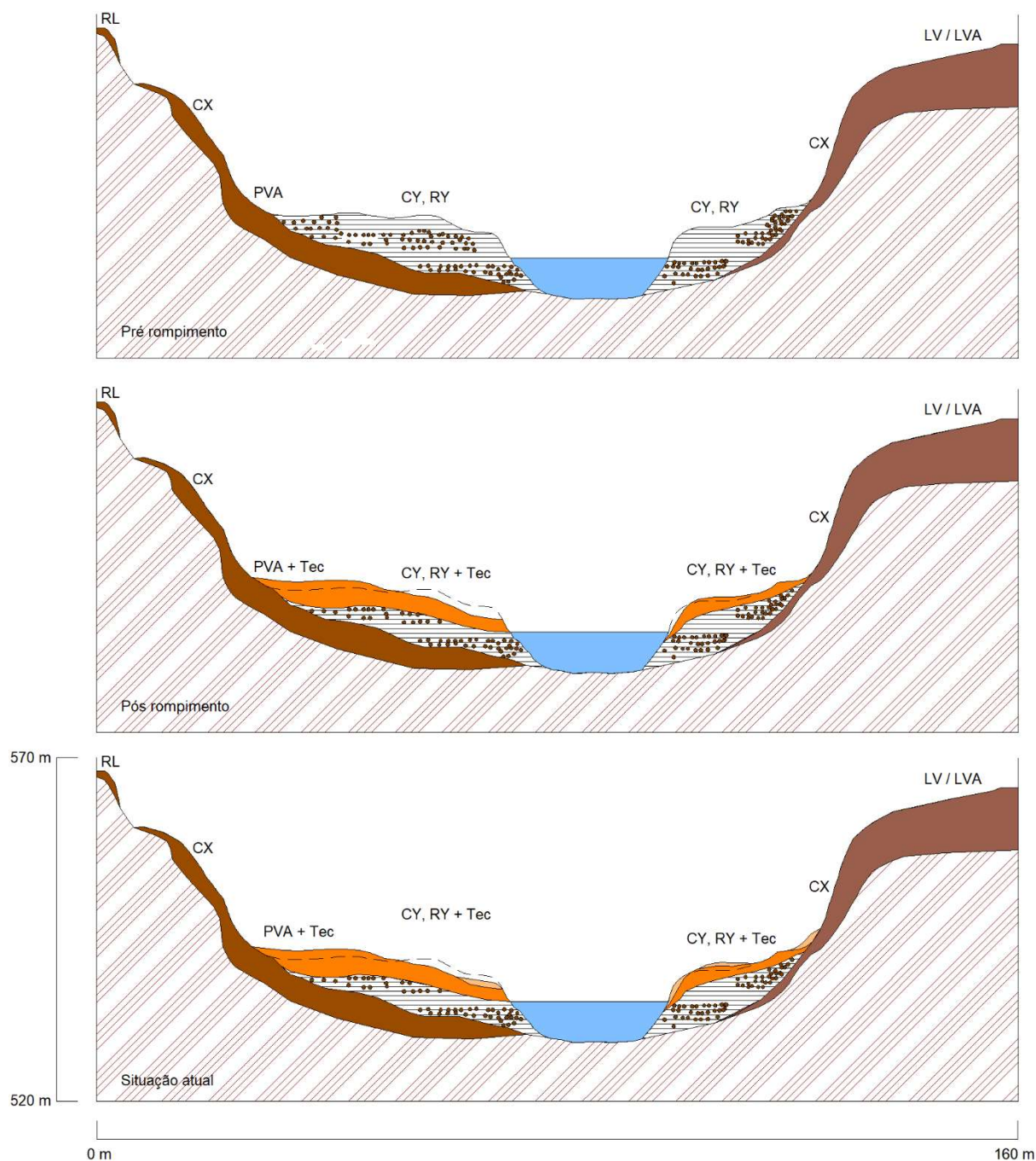


Figura 53 – Cenário em pré rompimento (acima), evidenciando os depósitos sedimentares, com a presença de antigos terraços aluvionares soterrados, locais de ocorrência de Gleissolos, Neossolos e Cambissolos Fluvicos, além de Argissolos vermelho amarelos nos terraços superiores. Cenário em pós rompimento (centro), caracterizado pela erosão de parte dos terraços com posterior sobreposição de rejeito. A situação atual é representada pelos processos de transformação da paisagem, influenciados principalmente pelo aporte sedimentar e reconstrução de diques aluvionares, além do aporte de material da encosta seja por interferência humana (adição de *topsoil*), ou por processos de transporte de colúvios, provenientes de encostas superiores.

5 Conclusões

No presente trabalho foi criado o primeiro mapeamento digital de solo para a área afetada pelo rompimento da barragem de fundão, produzindo mapas texturais com alta resolução espacial para áreas afetadas e não afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão.

Os modelos mais assertivos foram obtidos na modelagem da condição de pós rompimento, onde homogeneidade do material em áreas afetadas teve contribuição para a construção de modelos mais simples. Nesse sentido a delimitação da mancha de lama foi a variável de maior importância no modelo.

Na modelagem da condição de pré rompimento, as variáveis topográficas foram aquelas que apresentaram maior importância na reconstrução dos cenários. Para a situação atual, essas variáveis voltam a apresentar maior importância, frente a área delimitada pela lama, demonstrando que o modelo foi capaz de capturar as transformações que o ambiente afetado. Nesse sentido a característica mais marcante foi o retorno da variável distância euclidiana à drenagem como a mais importante para prever areia fina na condição atual, representando o reestabelecimento dos diques aluvionares

Diante da magnitude dos impactos ambientais causados pelo rompimento da barragem de Fundão, torna-se crucial a discussão sobre a crescente frequência e intensidade de eventos extremos. A constatação da recuperação ao longo de oito anos a partir da construção de modelos ressalta a importância do monitoramento desses ambientes, fornecendo valiosas informações para a gestão e avaliação da resiliência de ambientes afetados.

6 Referências bibliográficas

AMUNDSON, Ronald; JENNY, Hans. The place of humans in the state factor theory of ecosystems and their soils. *Soil Science*, v. 151, n. 1, p. 99-109, 1991.

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de, 1984- A553c 2014 Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil / Luana Caetano Rocha de Andrade. – Viçosa, MG, xiii, 96f. : il. (algumas color.) ; 29 cm. 2014.

ARDABILI, Sina; MOSAVI, Amir; VÁRKONYI-KÓCZY, Annamária R. Advances in machine learning modeling reviewing hybrid and ensemble methods. In: *International conference on global research and education*. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 215-227. 2019.

ARRUDA, Gustavo Pais de; DEMATTÊ, José Alexandre M.; CHAGAS, César da Silva. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 327-338, 2013.

BAYER, Maximiliano; DE CAMPOS ZANCOPÉ, Márcio Henrique. Ambientes sedimentares da planície aluvial do rio Araguaia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 2, 2014.

BIDWELL, O. W.; HOLE, F. D. Man as a factor of soil formation. *Soil science*, v. 99, n. 1, p. 65-72, 1965.

BHERING, Silvio Barge et al. Mapeamento digital de areia, argila e carbono orgânico por modelos Random Forest sob diferentes resoluções espaciais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 51, p. 1359-1370, 2016.

BRENNING, Alexander. Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models. *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*, v. 19, n. 23-32, p. 410, 2008.

BREIMAN, Leo. Random forests. *Machine learning*, v. 45, p. 5-32, 2001.

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

CHAGAS, César S. et al. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, p. 218-226, 2010.

CHEN, Songchao et al. Digital mapping of GlobalSoilMap soil properties at a broad scale: A review. *Geoderma*, v. 409, p. 115567, 2022.

COSTA, Samuel Ângelo Diógenes et al. Pedogênese e classificação de Latossolos desenvolvidos de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, p. 359-371, 2014.

CORREIA, Ronaldo Machado. Reutilização de Topsoil: uma solução sustentável na restauração de áreas degradadas. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 5, p. 28258-28267, 2020.

DALMOLIN, Ricardo Simão Diniz et al. Mapeamento digital: nova abordagem em levantamento de solos. *Investigación Agraria*, v. 17, n. 2, p. 77-86, 2015.

DE KIMPE, Christian R.; MOREL, Jean-Louis. Urban soil management: a growing concern. *Soil science*, v. 165, n. 1, p. 31-40, 2000.

DE ARAÚJO, Edson Alves et al. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Applied Research & Agrotechnology*, v. 5, n. 1, p. 187-206, 2012.

Diaz-Uriate, R., de Andres, S.A., 2006. Gene selection and classification of microarray data using random forest. *Bmc Bioinformatics* 7. doi:10.1186/1471-2105-7-3.

- DONAGEMMA, G. K. et al. Análise granulométrica. 2017.
- DOS SANTOS OLIVEIRA, Diego Aniceto et al. Litossequência de solos na Serra da Moeda, Quadrilátero Ferrífero. *Geociências*, v. 40, n. 04, p. 1063-1080, 2021.
- FOODY, Giles M. Land cover classification by an artificial neural network with ancillary information. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 9, n. 5, p. 527-542, 1995.
- GAMBILL, Daniel R. et al. Predicting USCS soil classification from soil property variables using Random Forest. *Journal of Terramechanics*, v. 65, p. 85-92, 2016.
- HENGL, Tomislav et al. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. *PloS one*, v. 10, n. 6, p. e0125814, 2015.
- IUSS WORKING GROUP et al. World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. (No Title), 2014.
- JENNY, H., 1941. *Factors of Soil Formation*. McGraw-Hill, New York.
- JENNESS, Jeff. Topographic position index (tpi_jen. avx_extension for Arcview 3. x, v. 1.3 a, Jenness Enterprises [EB/OL]. <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>, 2006.
- GOMES, Lucas Carvalho et al. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil. *Geoderma*, v. 340, p. 337-350, 2019.
- GONÇALVES, José Roberto Moreira Ribeiro; DA SILVA MARTINS, Fabiano Battemarco;
- GRIMM, Rosina et al. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, v. 146, n. 1-2, p. 102-113, 2008.
- HENGL, Tomislav et al. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: Random forests significantly improve current predictions. *PloS one*, v. 10, n. 6, p. e0125814, 2015.
- HOWARD, Jeffrey L.; OLSZEWSKA, Dorota. Pedogenesis, geochemical forms of heavy metals, and artifact weathering in an urban soil chronosequence, Detroit, Michigan. *Environmental Pollution*, v. 159, n. 3, p. 754-761, 2011.
- LEGUÉDOIS, Sophie et al. Modelling pedogenesis of Technosols. *Geoderma*, v. 262, p. 199-212, 2016.
- LIEB, Mareike; GLASER, Bruno; HUWE, Bernd. Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: comparison of regression tree and Random Forest models. *Geoderma*, v. 170, p. 70-79, 2012.
- KÖPPEN, William. *Climatologia*. México. Fondo de Cultura Econômica, v. 9, 1948.

KUHN, Max. Building predictive models in R using the caret package. *Journal of statistical software*, v. 28, p. 1-26, 2008.

LARK, R. M.; BISHOP, T. F. A. Cokriging particle size fractions of the soil. *European Journal of Soil Science*, v. 58, n. 3, p. 763-774, 2007.

LOPES, Luciano Motta Nunes. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. *Sinapse Múltipla*, v. 5, n. 1, p. 1-1, 2016.

MCBRATNEY, Alex B.; SANTOS, ML Mendonça; MINASNY, Budiman. On digital soil mapping. *Geoderma*, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

MINASNY, Budiman; MCBRATNEY, Alex B.; LARK, R. Murray. Digital soil mapping technologies for countries with sparse data infrastructures. *Digital soil mapping with limited data*, p. 15-30, 2008

MINASNY, Budiman; MCBRATNEY, Alex B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons. *Geoderma*, v. 264, p. 301-311, 2016.

NUNES, W. A. G. A. et al. Relação solo-paisagem-material de origem e gênese de alguns solos no domínio do " Mar de Morros", Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 25, p. 341-354, 2001.

PALMA, Heitor Paiva. Recuperação variável dos tecnossolos do rejeito da barragem de fundão sob diferentes coberturas vegetais. 2022.

PEREIRA, Marcos Gervasio et al. Formação e caracterização de solos. Tulio L, organizador. *Formação, classificação e cartografia dos solos*. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, p. 1-20, 2019.

RAHMATI, Omid et al. Scrutinizing gully erosion hotspots using hybridized deep-learning analysis to avoid land degradation. *Land Degradation & Development*, 2023.

R CORE TEAM, R. et al. *R: A language and environment for statistical computing*. 2013.

REINERT, Dalvan José et al. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1805-1816, 2008.

RICHTER JR, Daniel deB et al. Humanity's transformation of Earth's soil: Pedology's new frontier. *Soil science*, v. 172, n. 12, p. 957-967, 2007.

LAMBERT JR, Raymond S. *Soils: Genesis and Geomorphology: (Randall Schaetzl and Sharon Anderson)*. 2007.

SANTOS, RD dos et al. Manual de descrição e coleta de solo no campo. revisada e ampliada. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 15, 2005.

SANTOS, Eliana Elizabet 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. 2019.

SCHAEFER, Carlos Ernesto G. Reynaud 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, 2015.

SIQUEIRA, Rafael G. et al. Machine learning applied for Antarctic soil mapping: Spatial prediction of soil texture for Maritime Antarctica and Northern Antarctic Peninsula. *Geoderma*, v. 432, p. 116405, 2023.

SHUKLA, Gaurav et al. An effective implementation and assessment of a random forest classifier as a soil spatial predictive model. *International Journal of Remote Sensing*, v. 39, n. 8, p. 2637-2669, 2018.

SÁNCHEZ, Luis Enrique et al. Os impactos do rompimento da Barragem de Fundão. O caminho para uma mitigação sustentável e resiliente. Relatório Temático, n. 1º, 2018.

SILVA, Antonio Sousa et al. Argila e matéria orgânica e seus efeitos na agregação em diferentes usos do solo. *Ciência rural*, v. 44, p. 1783-1789, 2014.

TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; NABIOLLAHI, K.; KERRY, R. Digital mapping of soil organic carbon at multiple depths using different data mining techniques in Baneh region, Iran. *Geoderma*, v. 266, p. 98-110, 2016.

TUGEL, A. J. et al. Soil change, soil survey, and natural resources decision making: a blueprint for action. *Soil Science Society of America Journal*, v. 69, n. 3, p. 738-747, 2005.

VAYSSE, Kévin; LAGACHERIE, Philippe. Evaluating digital soil mapping approaches for mapping GlobalSoilMap soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France). *Geoderma Regional*, v. 4, p. 20-30, 2015.

VAN BREEMEN, Nico; BUURMAN, Peter. Soil formation. Springer Science & Business Media, 2002.

WADOUX, Alexandre MJ-C.; BRUS, Dick J.; HEUVELINK, Gerard BM. Sampling design optimization for soil mapping with random forest. *Geoderma*, v. 355, p. 113913, 2019.

WADOUX, Alexandre MJ-C. et al. Spatial evaluation of the soils capacity and condition to store carbon across Australia. *Geoderma*, v. 442, p. 116805, 2024.

WEISS, Andrew. Topographic position and landforms analysis. In: Poster presentation, ESRI user conference, San Diego, CA. 2001.

CAPÍTULO 3

Relações entre textura e concentração de metais em solos aluviais do médio Rio Doce-MG

Resumo

Dados históricos do solo podem ser utilizados em estudos científicos para ampliar o conhecimento em temas específicos, mas apresentam vieses e limitações metodológicas que afetam a precisão e confiabilidade das informações obtidas. Desde o rompimento da barragem de Fundão em 2015, a bacia do rio Doce tem sido alvo de estudos relacionados aos impactos ambientais, incluindo no solo, que foi classificado como Tecnosolo. A maior parte dos estudos até o momento foi realizada na área que se estende até o reservatório da UHE Risoleta Neves, mas ainda são poucos os trabalhos para entender os impactos nos solos das regiões do médio e baixo rio Doce. Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi realizar uma análise integrada de múltiplas bases de dados para diagnosticar as condições edáficas dos solos afetados pelo rompimento da barragem, para identificar possíveis relações entre concentrações granulométricas, metais pesados e atributos físicos do solo. O estudo foi conduzido na região conhecida como médio rio Doce, a qual possui um histórico antigo de ocupação e degradação, desde o ciclo da mineração no século XVIII. A avaliação dos dados foi realizada a partir de análise exploratória dos dados, e incluiu estatística descritiva, análise de correlação de *Spearman* e análise de componentes principais (PCA) para identificar possíveis agrupamentos entre os solos afetados e não afetados por rejeitos. Testes de comparação de médias e avaliações gráficas *boxplot* foram realizados para avaliar os agrupamentos gerados. A influência da variabilidade granulométrica na concentração de metais foi avaliada através da criação de grupos de amostras. A harmonização de dados de solo foi realizada em relação ao horizonte/camada afetada por rejeito e profundidade do solo, utilizando o algoritmo "*slice-wise*". A distribuição dos elementos químicos nos solos das planícies aluviais do rio Doce é influenciada pela granulometria, com uma forte correlação entre silte e argila e as concentrações de metais pesados.

Palavras chave: geoquímica, textura do solo, metais no solo

Relationships between texture and metal concentrations in alluvial soils of the Middle Doce River, MG

Abstract

Historical soil data can be used in scientific studies to expand knowledge on specific topics, but they present biases and methodological limitations that affect the accuracy and reliability of the information obtained. Since the Fundão dam collapse in 2015, the Doce River basin has been the target of studies related to environmental impacts, including on the soil, which was classified as Technosol. Most of the studies to date have been carried out in the area that extends to the Risoleta Neves HPP reservoir, but there are still few studies to understand the impacts on the soils of the middle and lower Doce River regions. In this sense, the objective of this study was to perform an integrated analysis of multiple databases to diagnose the soil conditions of the soils affected by the dam collapse, to identify possible relationships between particle size concentrations, heavy metals and physical attributes of the soil. The study was conducted in the region known as the middle Doce River, which has a long history of occupation and degradation, dating back to the mining cycle in the 18th century. Data evaluation was performed using exploratory data analysis, and included descriptive statistics, Spearman correlation analysis and principal component analysis (PCA) to identify possible groupings between soils affected and unaffected by tailings. Comparison tests of means and graphical boxplot evaluations were performed to evaluate the generated groupings. The influence of granulometric variability on metal concentration was evaluated by creating groups of samples. Soil data harmonization was performed in relation to the horizon/layer affected by tailings and soil depth, using the "slice-wise" algorithm. The distribution of chemical elements in the soils of the Doce River floodplains is influenced by granulometry, with a strong correlation between silt and clay and heavy metal concentrations.

Keywords: geochemistry, soil texture, metals in soil

1 Introdução

A utilização de dados históricos a partir da integração de diferentes bases de dados de solo é uma alternativa econômica para expandir o conhecimento em temas específicos (Simões et al., 2017). Para isso é essencial realizar uma análise crítica e contextualizada dos dados de solo disponíveis, levando em consideração outros fatores ambientais e de gestão da terra durante a interpretação dos resultados (Lagacherie e McBratney, 2007).

Desde que a barragem de Fundão, se rompeu em novembro de 2015, a bacia do rio Doce vem sendo alvo de diversos estudos relacionados aos impactos no ambiente, muitos deles relacionados a solos (Schaefer et al., 2016; Schaefer et al., 2017; Guerra et al., 2017; Davila et al., 2020; Santos et al., 2019A; 2019B; Foesh et al., 2020a, 2020b). A maioria dos estudos até então vêm sendo conduzidos na área diretamente impactada pela deposição de lama, principalmente os relacionados à condição edáfica nas planícies fluviais e terraços atingidos dos rios Gualaxo do Norte e Carmo. No entanto, ainda são escassos os trabalhos para compreender os impactos causados pelo rompimento da barragem nos solos das regiões do médio e baixo Rio Doce, uma vez que representa um longo trecho fluvial, além dos efeitos do rejeito em solos serem constatados após grandes eventos chuvosos na bacia, ocorridos nos anos de 2016, 2020 e 2022.

Os solos potencialmente afetados na área do Médio e Baixo Rio Doce são parte da planície fluvial mais baixa, e paleocanais inundáveis. Na maior parte, correspondem à Áreas de Preservação Permanente–APP. No entanto possui um histórico antigo de devastação florestal para instalação de cultivos e pastagens, resultando em um cenário de uso permanente e pouco sustentável.

Os solos das áreas suscetíveis às inundações, especialmente aquelas mais próximas à margem, consistem principalmente em camadas de sedimentos aluvionares, tornando esses sistemas dinâmicos sob a dinâmica da bacia hidrográfica (Curi et al., 1988). Esses solos são classificados como Neossolos Flúvicos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), sendo pouco desenvolvidos do ponto de vista pedogenético, com camadas variadas em espessura e granulometria.

A caracterização geoquímica de solos permitem compreender os processos de migração, dispersão e concentração de elementos químicos no perfil, embasando a correlação dos atributos deles com as classes de solos formadas, o que possibilita inferências acerca das gênese desses solos (Coringa et al., 2014).

De acordo com Fadigas et al. (2002), os valores médios de concentração de metais pesados variam amplamente em todo o mundo. Portanto, é importante realizar estudos sobre esse tema na bacia do rio Doce, onde ainda há uma lacuna no conhecimento. Os estudos precedentes apontam a importância dos monitoramentos ambientais que estão em desenvolvimento pela Fundação Renova, nos trechos distintos, para avaliar potenciais efeitos de médio e longo prazo nos ambientes diretamente impactados ao longo do Rio Doce, e particularmente, nos ambientes de margem costeiro, adjacentes (Segura et al., 2016; Guerra et al., 2017; Aires et al., 2018; Queiroz et al., 2018; Bernardino et al., 2019; Quadra et al., 2019; Gabriel et al., 2020).

Nesse sentido, o objetivo principal deste estudo foi realizar uma análise integrada de bases de dados para avaliar as relações existentes entre a diversidade textural e geoquímica de Neossolos Flúvicos localizados ao longo da calha fluvial do rio Doce.

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de estudo

A Bacia do Rio Doce possui uma extensão total de 83.400 km², dos quais 86% estão em território mineiro e 14% no Espírito Santo (Ana, 2020). O clima ao longo da bacia do Rio Doce é bem diferenciado: na parte do Alto Rio Doce, região que vai de Ouro Preto e Mariana até a confluência com o rio Piracicaba, prevalece o clima tropical de altitude, bem ameno (Cwb). No médio rio Doce, região que inicia na confluência com o rio Piracicaba e vai até a divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito, ocorre um clima transicional Aw (na classificação de Köppen), megatérmico com longo inverno seco e verão chuvoso (Antunes, 1986). Já no Baixo Rio Doce, o clima predominante também é Aw, mas caracterizado pelas altas temperaturas combinadas a maior umidade, e período de estiagem mais curto no inverno—de um a dois meses (Nimer, 1977, Alvares et al., 2013).

Nesse trabalho investigou-se duas áreas distintas na bacia: (1) MRD - Alto e Médio Rio Doce, composto principalmente por gnaisses e apresentando solos como Argissolos Amarelos ou Vermelho-Amarelos, Neossolos Flúvicos, Gleissolos Háplicos e Cambissolos Flúvicos na calha fluvial; (2) BRD - Baixo Rio Doce, com Gnaisses, sedimentos Cenozóicos do Grupo Barreiras e Flúvio-Marinhas Quaternários, associados com Latossolos e Argissolos Amarelos, além de Gleissolos Sálidos, Háplicos ou Tiomórficos, Espodossolos

Segundo Embrapa (1978) os Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce ocorrem sobre sedimentos aluviais do Quaternário recente, depositados nas planícies de inundação ou nos deltas dos cursos d'água a que estão associados. O material de origem é alóctone, sendo sua reserva mineral relacionada à granulometria do sedimento a partir do qual eles se desenvolvem. Solos de textura arenosa e média apresentam reserva mineral insuficiente a regular e regular a boa. Já os solos de textura argilosa as reservas minerais são insuficiente ou quase nula. Ainda de acordo com esse autor constatou-se que há uma maior tendência de ocorrer a presença de minerais pesados em solos de textura média (teor de argila entre 15 e 35%).

Os Neossolos Flúvicos avaliados nesse estudo (Figura 56) podem ter sofrido influência do material proveniente do rompimento da barragem de Fundão no município de Mariana (MG), uma vez que milhões de toneladas de rejeito foram despejadas no sistema fluvial do rio Doce. Após os primeiros eventos de chuva, o material, anteriormente desagregado no leito, pode ter sido depositado nas margens e planícies do rio Doce em quantidades variáveis, a depender das características ambientais de cada local. Como esses materiais são de difícil detecção, desconsiderou-se na avaliação potenciais influências desses materiais, uma vez que representam a atual condição de transporte e deposição de sedimentos do sistema fluvial do rio Doce.

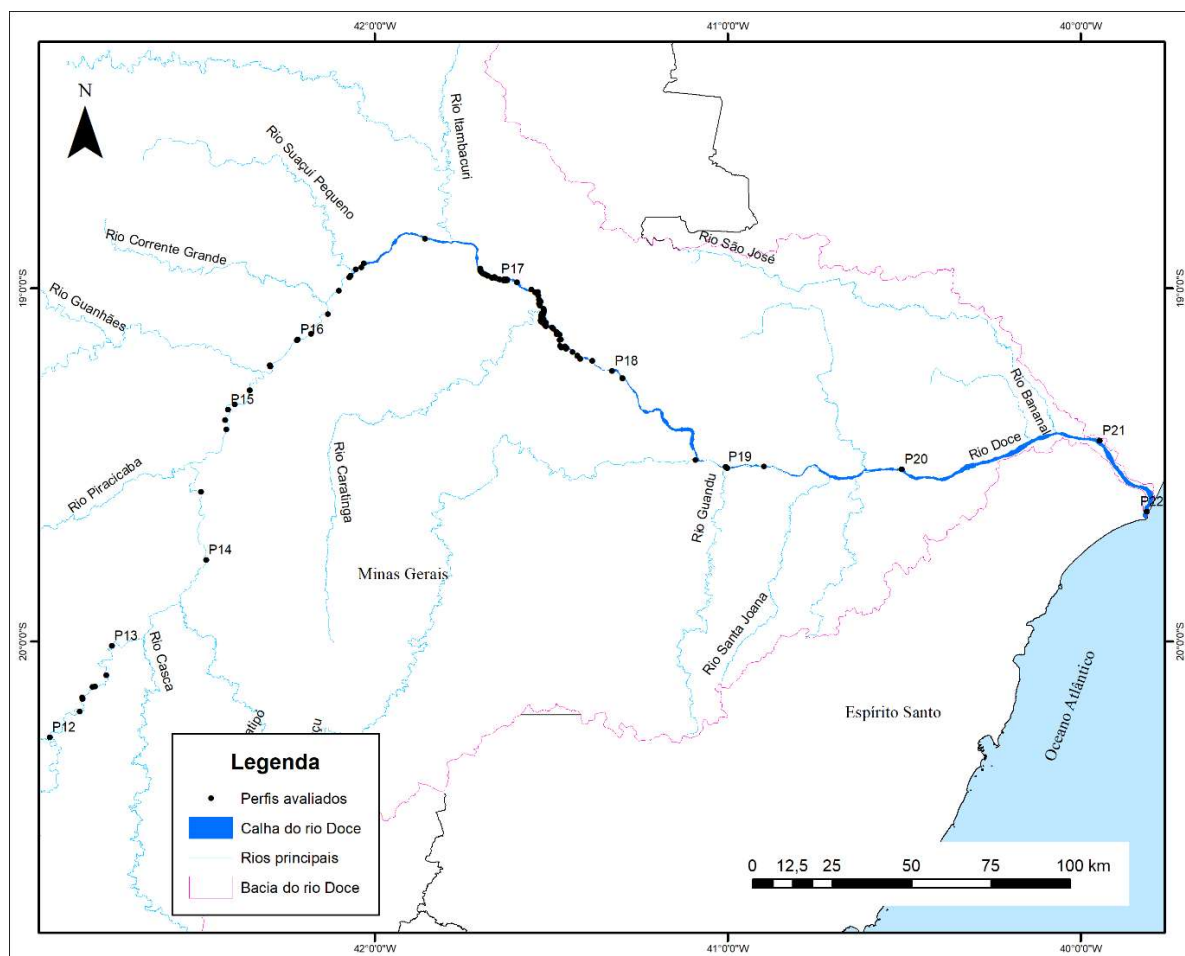


Figura 54 - Localização dos perfis de solos estudados

2.3 Base de solos utilizada

Foram analisados dados legados para avaliar o efeito da diversidade pedológica na concentração de metais em perfis de solos, localizados ao longo do rio Doce. O principal conjunto de dados utilizados nesse estudo compreende a bases de perfis de solos coletados durante os trabalhos de investigação ambiental pela Fundação Renova em 2021 (Tabela 10). Foram adicionados os perfis de Neossolos Flúvicos descritos por Pacheco (2015), como condição representativa do ambiental fluvial do rio Doce antes do rompimento da barragem de Fundão. Na Figura 56 são apresentados alguns exemplos de perfis de solos utilizados nesse estudo. Considerou-se todo o contexto do médio Rio Doce dentro da mesma condição de background geoquímico, permitindo comparar os solos ao longo de toda a área de estudo já que apresentam contexto geológico, climático e pedológico semelhante (Guevara et al., 2018).

Para realização da análise geoquímica, foi utilizado o método USEPA 3051A (USEPA, 2007) para cálculo dos teores semitotais de elementos, seguindo a Resolução CONAMA nº 420/2009 (CONAMA, 2009). Tal método utiliza subamostras de 150 mg, em triplicatas, em

vasos de Teflon com capacidade de 75 mL com 9 mL de HNO₃ (65%) e 3 mL de HCl (32%) concentrados, de pureza analítica, e submetidas à irradiação de micro-ondas. Nos extratos obtidos, foram determinados os elementos alumínio (Al), bário (Ba), , cromo (Cr), cobalto (Co), cobre (Cu), ferro (Fe), chumbo (Pb), manganês (Mn), níquel (Ni), vanádio (V) e zinco (Zn) por espectroscopia de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Os atributos físicos areia grossa, areia fina, silte e argila foram avaliados pelo método Embrapa (2013), através de peneiramento e separação do silte e argila pelo método da pipeta.

Tabela 10 - Base de dados e atributos do solo utilizados nesse estudo

NÚMERO DE PERFIS	NUMERO DE AMOSTRAS	CLASSES DE SOLOS	LOCALIZAÇÃO	FONTE	ATRIBUTOS DO SOLO
129	374	Neossolos Flúvicos e Cambissolos Flúvicos	Médio rio Doce	Fundação Renova (2021)	Granulometria e metais
11	82	Neossolos Flúvicos	Médio e Baixo rio Doce	Pacheco (2015)	Granulometria e metais
140	456				Total

Foi elaborado um amplo banco de dados de todos os perfis descritos ao longo de áreas afetadas dos rios Gualaxo do Norte e Carmo e rio Doce, com todos os dados de perfis de solos localizados nas planícies afetadas até hoje disponíveis (provenientes de estudos pretéritos conduzidos na região, dados disponíveis na literatura – pré e pós rompimento). Tal banco de dados foi fundamental para avaliar o as principais características do rejeito. A partir dele, comparações entre perfis coletados pré e pós-rompimento, além de horizonte com e sem influência de rejeito foram utilizados. Nesse trabalho considerou-se como solo sem influência de rejeito as camadas ou horizontes descritos nos perfis de solo em que não foram identificadas características de rejeito, sendo utilizadas como fonte de informação das concentrações de background natural.



Figura 56 – Exemplos de perfis avaliados nesse estudo

2.3 Avaliação estatística

A análise exploratória dos dados foi realizada através de representações gráficas *boxplot* e análises multivariadas, através da análise de correlação de *Spearman* ($p < 0,05$), análise de componentes principais (PCA) e análise de clusters, com o objetivo de avaliar há ou não agrupamentos distintos no banco de dados. Uma análise hierárquica de cluster é uma técnica de análise de dados utilizada para agrupar observações com base em sua similaridade. Nesse tipo de análise, os dados são agrupados em uma árvore hierárquica, denominada dendrograma, na qual os grupos são formados a partir dos níveis mais altos até os níveis mais baixos.

Por apresentarem distribuição assimétrica, as variáveis foram transformadas em \log_{10} e padronizadas (valor observado menos a média/desvio padrão), para evitar a interferência das diferentes unidades de medida nos cálculos. Para o agrupamento adotou-se a distância Euclidiana (distância geométrica entre dois objetos no espaço multidimensional) como medida de dissimilaridade.

Na análise de cluster foram considerados apenas teores de metais, uma vez que os atributos físicos (granulometria), possuem boa relação com o teor dos metais em estudo

(Fadigas, 2002). Essa análise permitiu interpretar como se dá a relação entre as variáveis e a formação de grupos de perfis de solos e sua relação com a granulometria.

Para padronização das profundidades avaliadas, recorreu-se a harmonização de dados de solos. Segundo Xavier et al. (2016) a análise de grandes conjuntos de perfis pode ser realizada de forma padronizada e simplificada, a partir da harmonização de informações coletadas em estudos distintos. Esse processo também permite a modelagem da distribuição espacial dos atributos do solo, tanto horizontalmente quanto verticalmente, permitindo a obtenção de resultados em intervalos predefinidos, conforme recomendado pelo projeto *Global SoilMap* (Arrouays et al., 2014). Para a harmonização da profundidade, as amostras coletadas em diferentes profundidades foram convertidas em um perfil comum de profundidade, utilizando o algoritmo “*slice-wise*” (Beaudette et al., 2013). Segundo Pinheiro et al. (2016), esse procedimento permite padronizar as propriedades do solo de acordo com as faixas de profundidade, sendo utilizado nesse estudo as profundidades de 0–20 cm e 20–50 cm.

A resolução CONAMA 420/2009 (Conama, 2009) preconiza que os VRQs (Valores de Referência de Qualidade) podem ser estabelecidos com base no percentil 75 ou 90 do universo amostral, retiradas previamente as anomalias. Neste trabalho, foi considerado o percentil 75, ou quartil superior, no estabelecimento das concentrações para os diferentes solos de planícies aluvionares do rio Doce. Para amostras abaixo do limite de quantificação foi utilizado o LQ/2.

Todas as avaliações foram realizadas no software R (R Core Team, 2020), utilizando os seguintes pacotes: *rgdal*, para dados gerenciamento, preparação e visualização de dados (Brenning et al., 2018; Bivand e Lewin-Koh, 2019; Bivand et al., 2019; Hijmans, 2019); *factoextra* (Kassambara e Mundt, 2017) para análise de componentes principais (PCA); *cluster* (Maechler et al., 2019) para análise de agrupamento; *aqp* (Beaudette et al., 2013) para análise de dissimilaridade e gráficos de perfil de solo.

3 Resultados

3.1 Análise descritiva da granulometria dos solos

Considerando todos as amostras coletadas do banco de dados (n=456), constatou-se que a composição granulométrica dos solos avaliados é predominantemente composta por areia fina e silte. Apesar do predomínio dessas duas frações, observa-se uma grande variação nos dados avaliados. Para o silte, os valores variaram entre 2 e 756,59 g/kg. Embora os teores médios

entre as duas profundidades apresentem valores semelhantes, a camada superficial mostrou valores levemente mais elevados em comparação com a camada mais profunda.

Para a areia fina, os teores variaram entre 16,86 e 819,39 g/kg, com o teor médio mais elevado em profundidade. O teor médio de argila foi mais elevado na camada superficial, com um valor de 157,50 g/kg, variando entre 11,5 e 530,00 g/kg. Para a areia grossa, os teores variaram entre 107,09 e 152,98 g/kg, sendo os teores médios semelhantes entre as duas profundidades avaliadas.

Tabela 11 - Estatística descritiva das variáveis avaliadas em duas profundidades

Variável e	N	Unidade	Média	Min	Mediana	Max	Sd	Assimetria	Curtose
Profundidade (cm)									
Silte (0-20)	456	g/kg	312,67	2	295,06	727,91	196,77	0,30	-0,99
Silte (20-50)	456	g/kg	277,64	2	262,59	756,59	173,12	0,39	-0,51
Argila (0-20)	456	g/kg	157,50	11,5	148,5	530	90,10	1,08	1,91
Argila (20-50)	456	g/kg	148,08	11,5	130,5	530	91,23	1,24	2,30
Areia Fina (0-20)	456	g/kg	421,29	22,15	424,13	819,39	192,46	-0,14	-1,05
Areia Fina (20-50)	456	g/kg	462,09	16,86	496,69	819,39	178,31	-0,34	-0,70
Areia Grossa (0-20)	456	g/kg	107,10	0	51,11	863	143,99	2,69	8,58
Areia Grossa (20-50)	456	g/kg	111,06	0	49,62	863	152,98	2,76	8,62

3.2 Análise descritiva dos teores de metais no solo

Valores mais elevados foram reportados na superfície para os parâmetros Ferro, Manganês, Alumínio, Cromo, Cobre, Níquel, Vanádio e Zinco. Para Ferro e Manganês, a diferença constatada foi superior a 10%, enquanto os demais metais apresentaram diferenças médias inferiores a esse percentual.

Os valores de Alumínio variaram entre 2.690 e 92.200 mg/kg, com uma média de 29.523,36 mg/kg. A concentração média de Bário foi mais elevada na subsuperfície, com um valor médio de 129,64 mg/kg. Cromo, Cobre e Cobalto apresentaram valores médios de 49,31 mg/kg, 19,36 mg/kg e 12,28 mg/kg, respectivamente. Embora o valor máximo de Ferro tenha sido encontrado na camada mais profunda (246000 mg/kg), a média foi mais elevada na superfície, assim como para o Manganês, que apresentou uma concentração média de 756,92 mg/kg. Níquel, Vanádio e Zinco mostraram concentrações ligeiramente mais elevadas na superfície, com médias de 19,70 mg/kg, 56,62 mg/kg e 48,69 mg/kg, respectivamente.

Em prospecções geoquímicas, valores altos de assimetria, curtose e desvio-padrão dos dados indicam a ocorrência de anomalias geoquímicas, e o coeficiente de variação denota o grau de variação dos dados geoquímicos (Licht, 1998). Dentre as variáveis analisadas, Ferro e Manganês apresentam os maiores valores de assimetria positiva, indicando que a distribuição dos dados tem uma cauda mais longa à direita do eixo X. Isso significa que a maioria dos valores está concentrada à esquerda, mas há alguns valores extremos à direita que puxam a média para cima.

Ao avaliar os resultados frente aos valores de qualidade da legislação CONAMA 420/2009, verifica-se que com exceção do Bário que apresentou valor de P75 acima do VP da norma, todos os demais elementos os valores estiveram abaixo do padrão de qualidade estabelecido pela norma.

Tabela 12 - Estatística descritiva das variáveis avaliadas em duas profundidades. N horizonte superficial = 455. N horizonte subsuperficial = 456 amostras

Variável e	Unidade	VP	VI	Mediana	P75	Min	Max	Sd	Assimetria	Curtose
Profundidade (cm)										
Alumínio (0-20)	mg/kg	-	-	25100,00	42300	2690	92200	19005,47	0,88	0,20
Alumínio (20-50)	mg/kg	-	-	25200,00	40200	1400	86300	18369,84	0,81	0,10
Bário (0-20)	mg/kg	150	300	120,00	157	14,1	358	54,58	0,79	1,33
Bário (20-50)	mg/kg	150	300	121,00	166	9,03	358	64,29	0,63	0,23
Cromo (0-20)	mg/kg	75	150	48,90	65,8	6,7	103	22,23	0,22	-0,58
Cromo (20-50)	mg/kg	75	150	45,90	61,6	5,75	109	21,59	0,40	-0,22
Cobre (0-20)	mg/kg	60	200	18,40	25,7	1,36	51,8	9,71	0,71	0,42
Cobre (20-50)	mg/kg	60	200	17,20	23,7	1,36	57,6	9,64	0,95	1,45
Cobalto (0-20)	mg/kg	25	35	12,40	14,9	2	24,5	4,15	0,26	-0,01
Cobalto (20-50)	mg/kg	25	35	12,50	15,7	2	25,9	4,74	0,12	-0,29
Ferro (0-20)	mg/kg	-	-	56200,00	89100	5350	230000	41764,02	1,45	2,51
Ferro (20-50)	mg/kg	-	-	46900,00	65200	5350	246000	35982,73	2,42	7,83
Manganês (0-20)	mg/kg	-	-	615,00	1100	56,7	2290	477,17	0,90	0,13
Manganês (20-50)	mg/kg	-	-	529,00	777	56,7	2450	436,40	1,63	2,71
Níquel (0-20)	mg/kg	30	70	19,10	24,5	1,8	51,6	8,23	0,70	0,91
Níquel (20-50)	mg/kg	30	70	19,30	24,4	1,8	51,6	8,40	0,55	0,51
Vanádio (0-20)	mg/kg	-	-	56,10	73,9	7,6	115	23,10	0,29	-0,49
Vanádio (20-50)	mg/kg	-	-	56,30	72,1	7,6	149	24,09	0,32	-0,11
Zinco (0-20)	mg/kg	300	450	48,30	60,1	6,1	107	17,01	0,14	0,02
Zinco (20-50)	mg/kg	300	450	49,20	61,3	5,94	107	18,74	0,00	-0,24

Nota: VP e VI – CONAMA 420/2009

3.3 Avaliação dos testes de Correlação

Nesse trabalho foi utilizado uma extensa base de dados de Neossolos Flúvicos, coletados em diferentes porções da bacia hidrográfica. A utilização de análises multivariadas teve o objetivo de identificar relações entre as variáveis quantificadas no solo, auxiliando identificar padrões nos conjuntos de dados.

Os resultados do teste de correlação de Spearman (Figura 57), apontaram respostas diferentes para as frações mais grosseiras e finas do solo, mostrando-se estar inversamente relacionadas. No geral, os teores de silte e argila foram aqueles que apresentaram correlação positiva para a concentração de metais, corroborando com estudos de Goulart Júnior (1987), Fadigas et al. (2002), Souza et al., (1996) e Lavado et al. (1998).

Nesse sentido é de se esperar que amostras com teores mais elevados de silte a argila apresente também concentrações mais elevadas de alguns metais no solo. O Silte apresentou-se correlacionado positivamente com Ferro, Manganês, Cromo e Alumínio. Já a fração argila apresentou correlações positivas com Alumínio, Bário, Cobalto, Níquel e Vanádio.

Entre os metais avaliados, destaca-se as correlações positivas entre Ferro e Manganês (0,75), e correlações acima de 0,8 entre Alumínio e Cromo, Cobalto com Bário, Cobalto e Zinco, e Vanádio com Bário, Cobalto, Níquel e Zinco.

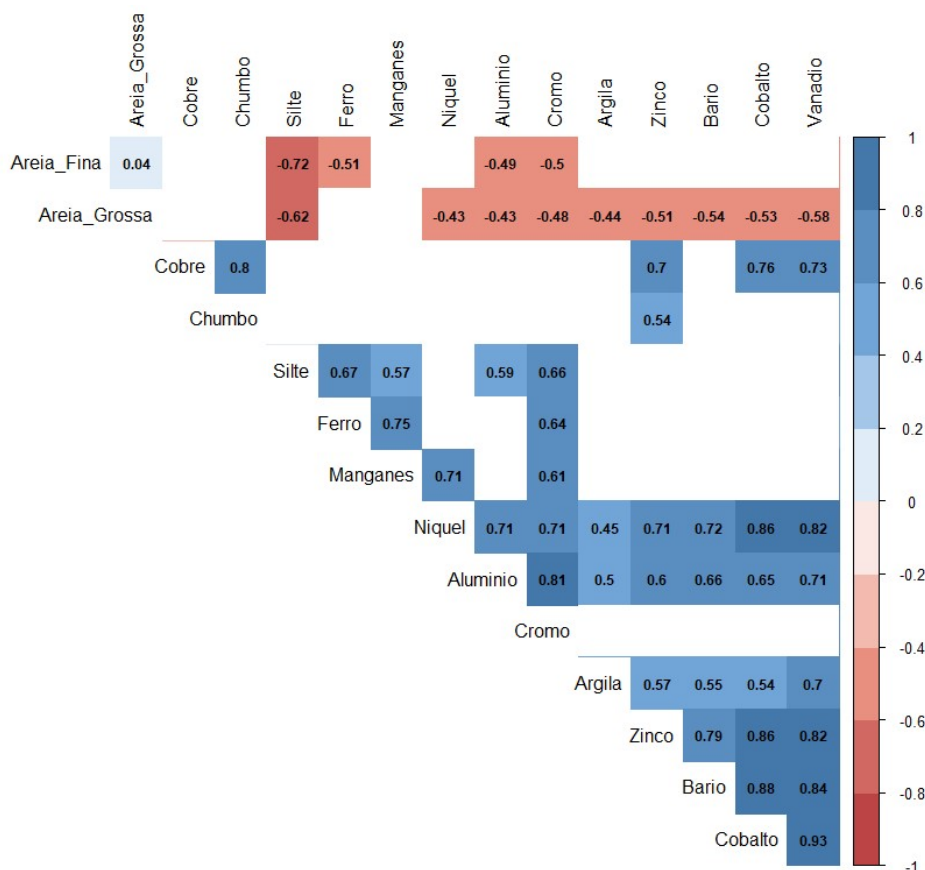


Figura 57 - Resultados do teste de correlação de spearman para as variáveis avaliadas considerando todo o conjunto de dados. N=456 amostras

3.4 Classificação dos perfis em grupos – Análise de clusters

As amostras de solo foram agrupadas com base no seu grau de semelhança, com o objetivo de classifica-las em grupos mais ou menos homogêneos (Figura 58). Utilizaram-se como variáveis os conteúdos de Alumínio, Cobalto, Ferro, Manganês, Níquel e Zinco. Para o agrupamento adotou-se a distância Euclidiana como medida de similaridade, considerando-se a formação de 4 grupos.

O grupo 1 contou com total de 22 perfis, sendo 2 de Pacheco (2015). O grupo 2 apresentou apenas 4 perfis agrupados, todos provenientes do banco de dados da Fundação Renova (2021). O grupo 3 é formado por 55 perfis, sendo 3 perfis de Pacheco (2015). O grupo 4 apresenta 6 perfis de Pacheco (2015), totalizando 59 perfis. O resultado do agrupamento é apresentado na Figura 62, sendo destacado os teores teores de silte + argila nessa figura.

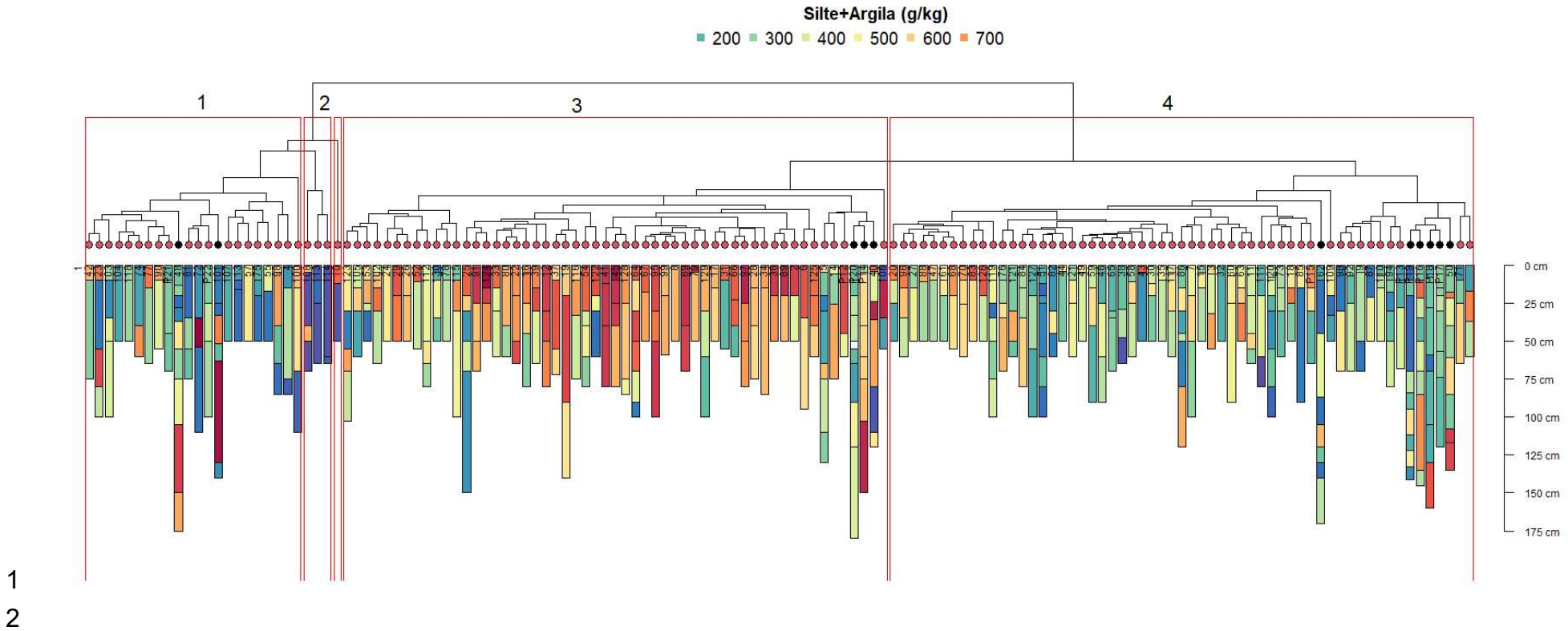


Figura 58 - Resultados do agrupamento dos 140 perfis desse estudo (Grupos 1 a 4). Círculos acima dos perfis indicam a origem da base de dados. Círculos preto indicam os perfis do conjunto de dados de Pacheco (2015) e círculos vermelhos dados da Fundação Renova (2021).

Quanto à textura dos perfis avaliados, foram identificadas diferenças para todas as frações, com destaque para os teores de silte e argila. Foram reportados valores mais elevados dessas frações seguindo a ordem: grupo 3, grupo 4, grupo 1 e grupo 2, conforme exibido na Tabela 13 e Figura 63. Os resultados apresentados referem-se à mediana, obtida a partir da harmonização dos dados dos perfis de solos. A tabela apresenta ainda os teores de Argila e Silte dos solos avaliados por Souza et al. (2015) para solos de Minas Gerais e Guevara et al. (2018), com resultados de solos da bacia do rio Doce.

Tabela 13 - Estatística descritiva (Mediana) das avaliadas em duas profundidades. N horizonte superficial e subsuperficial = 456 amostras

Variável e Profundidade (cm)	Unidade	VP	VI	VRQ1	VRQ2	VRQ3	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Nº de perfis							22	4	55	59
Silte (0-20)	g/kg			-	140	290	126,21	7,00	444,32	225,67
Silte (20-50)	g/kg			-	-	-	164,57	10,00	423,25	239,06
Argila (0-20)	g/kg			340	400	360	84,50	24,00	203,00	124,00
Argila (20-50)	g/kg			-	-	-	79,75	21,00	188,50	114,50
Areia Fina (0-20)	g/kg			-	-	-	584,50	189,41	285,97	533,23
Areia Fina (20-50)	g/kg			-	-	-	584,50	160,50	355,76	550,59
Areia Grossa (0-20)	g/kg			-	-	-	159,73	697,00	22,32	74,13
Areia Grossa (20-50)	g/kg			-	-	-	85,36	789,00	28,59	57,93
Relação Silte / Argila	-						1,5	0,29	2,18	1,81
Relação Silte / Argila	-						2,07	0,47	2,25	2,09

VRQ1- Solos de Minas Gerais, 697 amostras (Souza et al., 2015); VRQ2- Solos bacia do rio Doce, 107 amostras (Guevara et al., 2018); VRQ3- Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce, 5 amostras (Guevara et al., 2018)

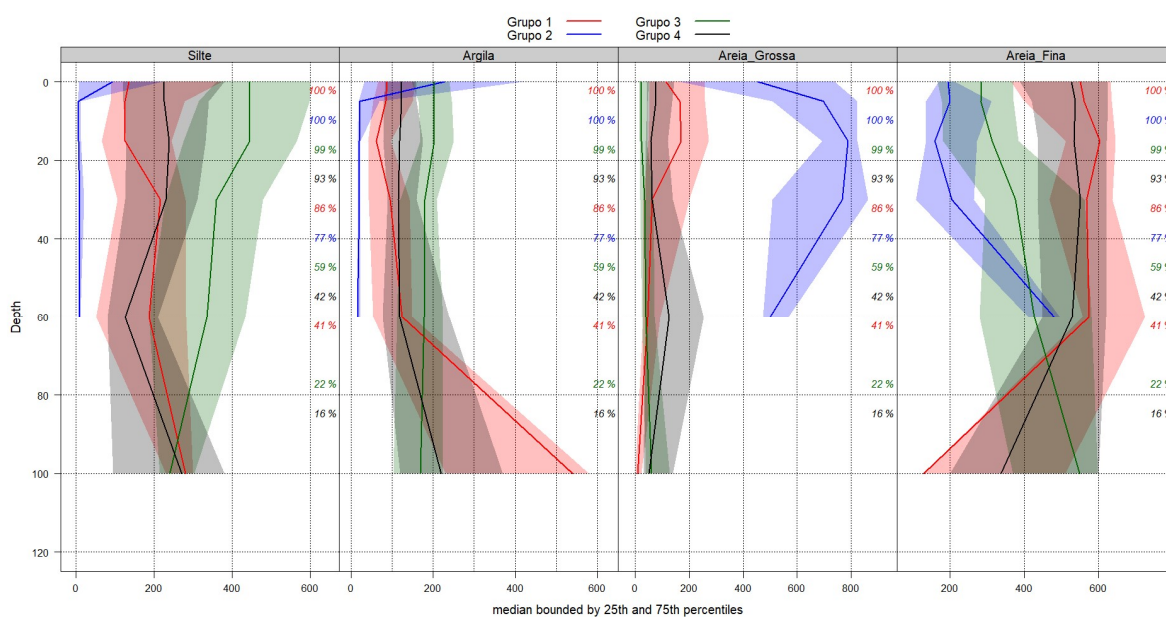


Figura 59 – Distribuição granulométrica em profundidade para os grupos de solos avaliados (g/kg)

As amostras do grupo 1 destacam-se por apresentar os maiores teores de areia fina em ambas as profundidades. Para esse grupo, constatou-se teores mais elevados de areia grossa na superfície (0-20 cm). Já os teores de silte foram ligeiramente superiores na camada subsuperficial(20-50 cm). O grupo 2 apresenta os menores teores de silte e argila do conjunto de dados, sendo esses semelhantes em ambas as profundidades. Os teores de areia fina são semelhantes para as duas profundidades, sendo observado um incremento de areia grossa em profundidade.

Para o grupo 3, foram obtidos teores ligeiramente mais elevados na superfície em comparação com a camada mais profunda. Já a distribuição de areia fina tende a aumentar em profundidade. Os teores de areia grossa são praticamente nulos.

No grupo 4, os teores de areia fina são semelhantes aos solos do grupo 1. Entretanto os teores de argila e silte são maiores, sendo semelhantes em ambas as profundidades. Os teores de areia grossa também são baixos nesse grupo de solos, semelhante ao observado para os solos do grupo 3.

Do ponto de vista da geoquímica dos perfis avaliados, observam-se concentrações mais elevadas de metais seguindo a ordem: grupo 3, grupo 4, grupo 1 e grupo 2. Para todos os elementos avaliados, as concentrações foram mais elevadas na camada mais profunda (20-50 cm) nos perfis do grupo 1. O grupo 2 apresentou as diferenças mais pronunciadas entre amostras superficiais e subsuperficiais apenas para Al, cujas concentrações foram o dobro na camada superficial (0-20 cm).

Apesar dos perfis dos grupos 3 e 4 apresentarem concentrações mais elevadas de metais no solo, não foram identificadas diferenças para a maioria dos parâmetros entre as profundidades avaliadas. Apenas concentrações mais elevadas de Fe e Mn na superfície foram identificadas para ambos os grupos.

Tabela 15 - Estatística descritiva (P-75) das variáveis avaliadas em duas profundidades. N horizonte superficial e subsuperficial = 456 amostras

Variável e	Unidade	VP	VI	VRQ1	VRQ2	VRQ3	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Nº Perfis							22	4	55	59
Alumínio (0-20)	mg/kg	-	-	57000,00	49000,00	29000,00	18300,00	5030,00	57800,00	27000,00
Alumínio (20-50)	mg/kg	-	-	-	-	-	18100,00	3905,00	53200,00	30400,00
Bário (0-20)	mg/kg	150	300	93,00	75,96	155,69	101,00	21,00	182,00	134,00
Bário (20-50)	mg/kg	150	300	-	-	-	81,70	20,55	199,00	144,00
Cromo (0-20)	mg/kg	75	150	51,60	158,36	57,49	37,80	23,30	79,20	49,20
Cromo (20-50)	mg/kg	75	150	-	-	-	30,08	23,30	74,80	49,40
Cobre (0-20)	mg/kg	60	200	75	50,37	46,12	11,30	5,68	28,60	19,40
Cobre (20-50)	mg/kg	60	200	31,7	50,37	46,12	10,20	5,68	28,40	19,80
Cobalto (0-20)	mg/kg	25	35	4,60	12,46	12,46	10,00	4,45	17,10	13,20
Cobalto (20-50)	mg/kg	25	35				8,33	4,25	18,40	13,80
Ferro (0-20)	mg/kg	-	-	38000,00	40000,00	39000,00	51200,00	34900,00	121000,00	61700,00
Ferro (20-50)	mg/kg	-	-	-	-	-	53900,00	34900,00	82400,00	51700,00
Manganês (0-20)	mg/kg	-	-	-	368,12	368,12	393,00	128,00	1450,00	761,00
Manganês (20-50)	mg/kg	-	-	-	-	-	393,00	128,00	1140,00	582,00
Níquel (0-20)	mg/kg	30	70	19,50	36,77	17,36	13,40	5,48	29,90	19,40
Níquel (20-50)	mg/kg	30	70	-	-	-	12,20	6,22	31,20	20,10
Vanádio (0-20)	mg/kg	-	-	82,70	132,56	71,91	43,60	15,70	85,20	56,20
Vanádio (20-50)	mg/kg	-	-	-	-	-	38,10	15,55	85,70	61,90
Zinco (0-20)	mg/kg	300	450	35,10	36,05	70,18	38,00	14,40	68,90	52,20
Zinco (20-50)	mg/kg	300	450	-	-	-	33,70	11,85	72,25	53,90

VRQ1- Solos de Minas Gerais, 697 amostras (Souza et al., 2015); VRQ2- Solos bacia do rio Doce, 107 amostras (Guevara et al., 2018); VRQ3- Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce, 5 amostras (Guevara et al., 2018)

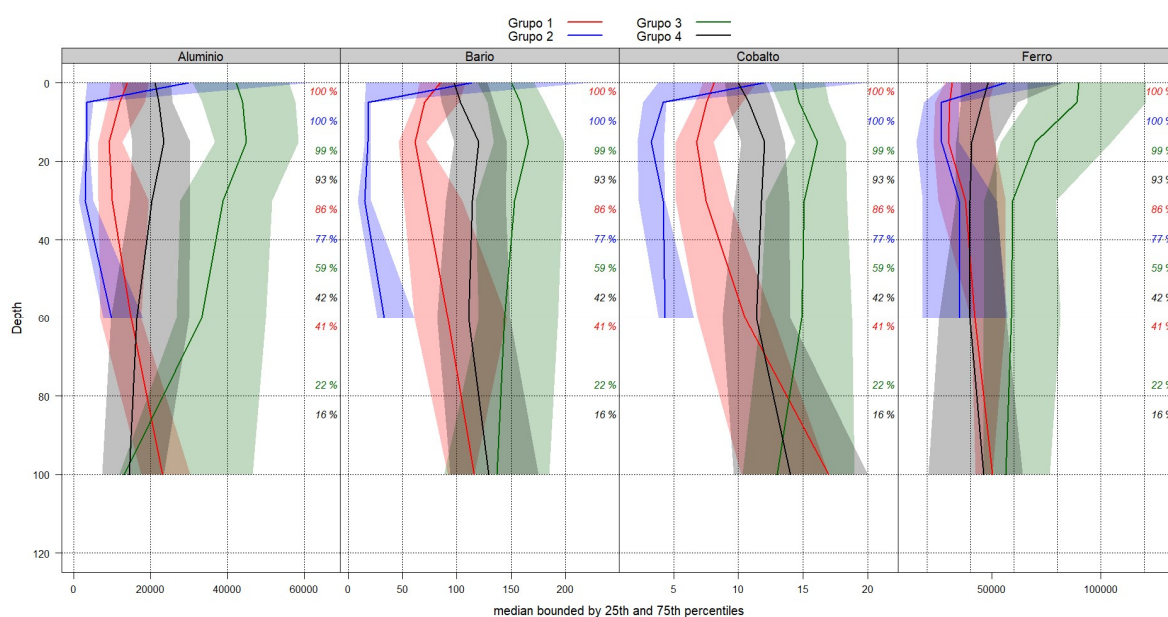


Figura 60 – Concentração de metais em profundidade para os grupos de solos avaliados (mg/kg)

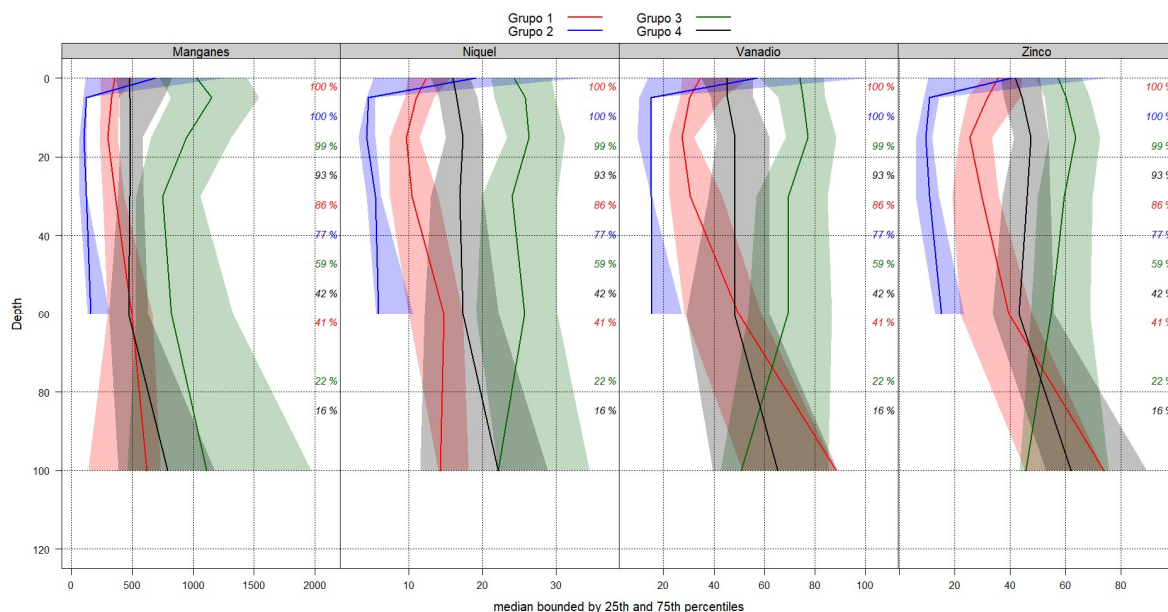


Figura 61 – Concentração de metais em profundidade para os grupos de solos avaliados (mg/kg)

A análise espacial (Figura 62), revela que a distribuição dos grupos é heterogênea em toda a área de estudo. Apenas perfis do Grupo 2 ocorrem de forma mais concentrada, entre os municípios de Galiléia e Conselheiro Pena, no estado de Minas Gerais. O Grupo 1 está disperso por toda a bacia, exceto na região entre o ponto de confluência do rio Doce com os rios Casca e Piracicaba. Além disso há uma ausência de perfis do grupo 1 na região próxima à cidade de Governador Valadares, no trecho que compreende a confluência do rio Doce com o rio Suaçuí Pequeno e rio Itabamcuri, onde predominam os perfis dos Grupos 3 e 4.

Se considerar apenas os perfis de Pacheco (2015), estes apresentam uma distribuição espacial semelhante aos demais perfis analisados, sobretudo para os perfis classificados no grupo 3 e grupo 4. Os perfis do Grupo 3 foram descritos na parte alta (P12 e P14), e baixa da bacia do rio Doce (P20). Por ter agrupado um número maior de perfis, os perfis de Pacheco (2015) do grupo 4 (P13, P15, P16, P17, P18 e P19), apresentam uma distribuição mais ampla por toda a calha fluvial do rio Doce. Já os perfis do grupo 1 (P21 e P22), apresentam-se concentrados na parte final da bacia do rio Doce, na região deltaica do rio Doce.

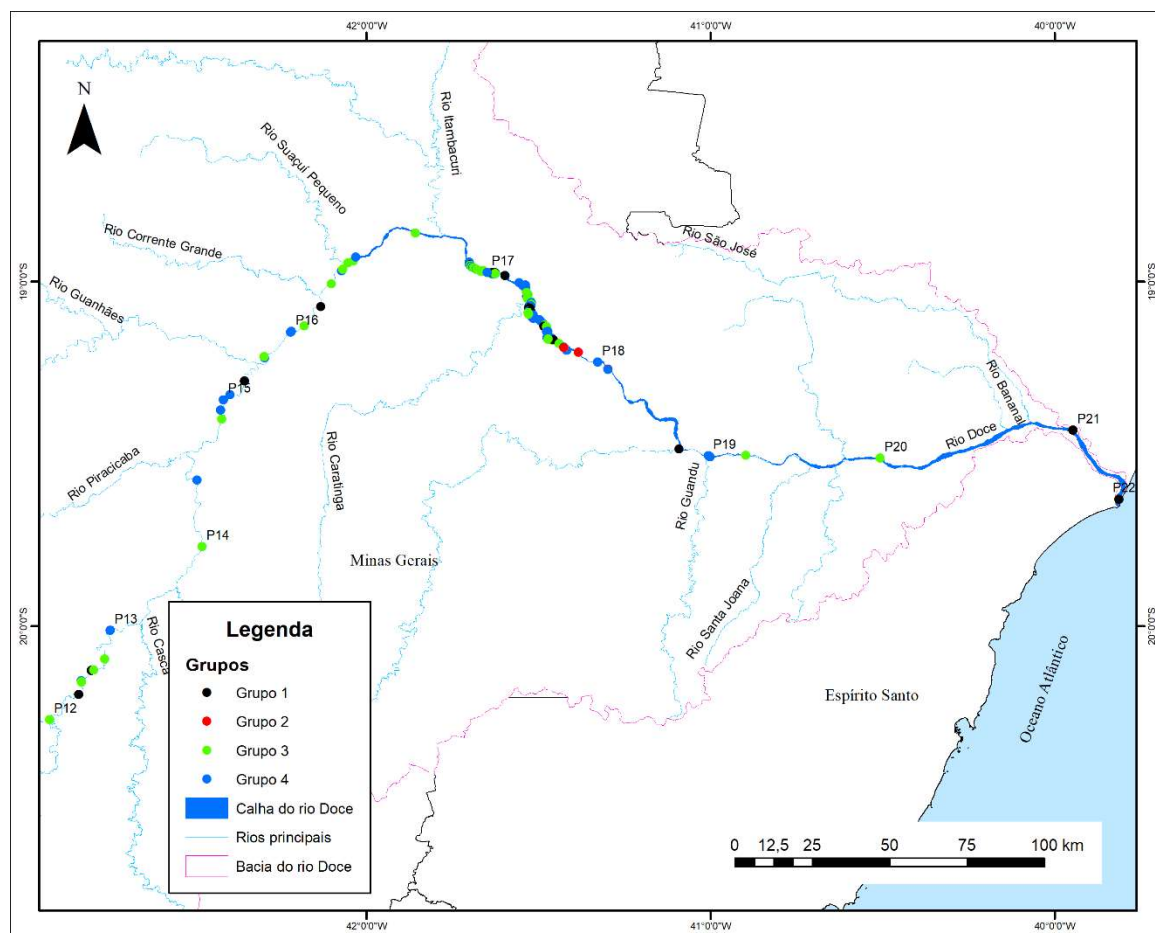


Figura 62 – Distribuição espacial dos perfis de acordo com os grupos formados

A região entre Galiléia e Conselheiro Pena foi a que apresentou a maior densidade amostral (100 perfis). Perfis do grupo 1 e 2 somam 19 perfis, com 15 e 4 perfis, respectivamente. Ocorre um predomínio de perfis do grupo 3 e 4 nessa região, com 37 e 44 perfis, respectivamente (Figura 63).

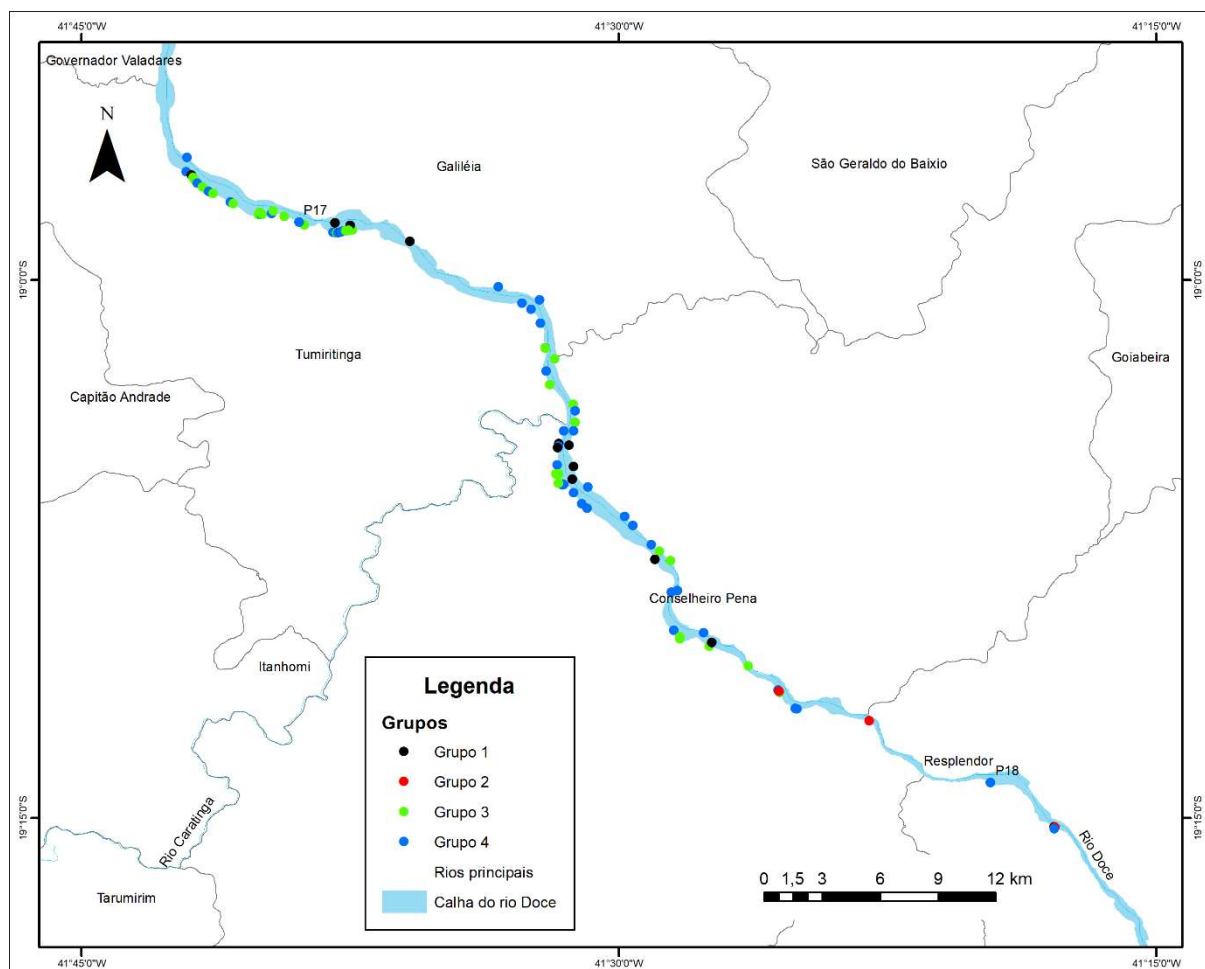


Figura 63 – Distribuição espacial dos perfis de acordo com os grupos formados

3.5 Análise de Componentes Principais

Os resultados das análises químicas e físicas foram ordenados através da PCA (Figura 64). Conforme apresentado na Tabela 16, apenas PC1 e PC2 tiveram autovalores maiores que 1, juntos representando 76,90% da variância cumulativa observada. Os resultados demonstram uma clara distinção entre solos mais arenosos e solos mais siltosos e argilosos, e suas relações com a concentração de metais.

Na Tabela 17 são apresentadas as respectivas cargas fatoriais dos parâmetros avaliados na PCA. O primeiro componente (PC1), com exceção do teor de Areia Fina, todos os demais parâmetros apresentaram alta carga fatorial (acima de 0,7). Destaca-se coordenadas negativas para Areia fina e Areia grossa, e positivas para silte, argila e todos os parâmetros químicos.

No segundo componente (PC2), destaca-se o teor de Areia Fina como o parâmetro com maior carga fatorial. Em contraste a Areia Fina e Areia Grossa, os parâmetros Argila e Silte apresentaram coordenadas negativas, assim como os parâmetros Ferro e Manganês.

Tabela 16 - Autovalores e porcentagem da variância explicada pelo componente principal

Dimensões	Autovalor	Porcentagem variância	Porcentagem variância acumulada
Dim 1	8,00	66,67	66,67
Dim 2	1,22	10,22	76,90
Dim 3	0,72	6,01	82,91
Dim 4	0,66	5,52	88,40
Dim 5	0,42	3,53	91,97
Dim 6	0,32	2,67	94,65
Dim 7	0,21	1,78	96,43
Dim 8	0,13	1,08	97,52
Dim 9	0,11	0,99	98,52
Dim 10	0,10	0,86	99,38
Dim 11	0,05	0,44	99,83
Dim 12	0,01	0,16	100,00

Tabela 17 - Cargas estimadas de componentes para análise de componentes principais dos atributos do solo avaliados

Variável	Areia Fina	Areia Grossa	Argila	Silte	Alumínio	Bário	Cobalto	Ferro	Manganês	Níquel	Vanádio	Zinco
Dim,1	-0,45	-0,73	0,79	0,8	0,83	0,89	0,92	0,72	0,82	0,89	0,97	0,87
Dim,2	0,63	0,35	-0,07	-0,31	0,05	0,33	0,33	-0,42	-0,14	0,22	0,11	0,37

Na Figura 64 é apresentada o resultado da PCA utilizando todo o conjunto de dados (n=456). Conforme observado, amostras coletadas nos perfis do grupo 1 tendem a agrupar do lado esquerdo do gráfico, com coordenadas negativas no PC1. Amostras coletadas nos perfis do Grupo 2 (n=11), também apresentam tendência de agrupar do lado esquerdo do gráfico, com coordenadas negativas na PC1. Entretanto, a presença de 3 amostras com teores mais elevados de Argila e Silte nesse conjunto de dados contribuiu com coordenadas positivas na PC1, influenciando na alta variabilidade dos dados, que somada ao baixo n amostral, refletiu na extensa área ocupada pela elipse.

O grupo 3 apresentou grande parte dos dados agrupados na parte direita do gráfico, indicando coordenadas positivas na PC1. Conforme exposto, os perfis do grupo 3 foram os que apresentaram os maiores teores de silte e argila em camadas coletadas entre 0 e 50 cm de profundidade. Além disso, nesse grupo foram reportadas as maiores concentrações de metais no conjunto de dados avaliado, com destaque os teores de Manganês e Ferro.

O grupo 4 assemelha-se ao grupo 1 no teor de Areia Fina em camadas mais superficiais. Entretanto os teores de silte são ligeiramente mais elevados em superfície, o que pode ter

refletido em concentrações ligeiramente mais elevadas em metais no grupo 4 em relação ao grupo 1.

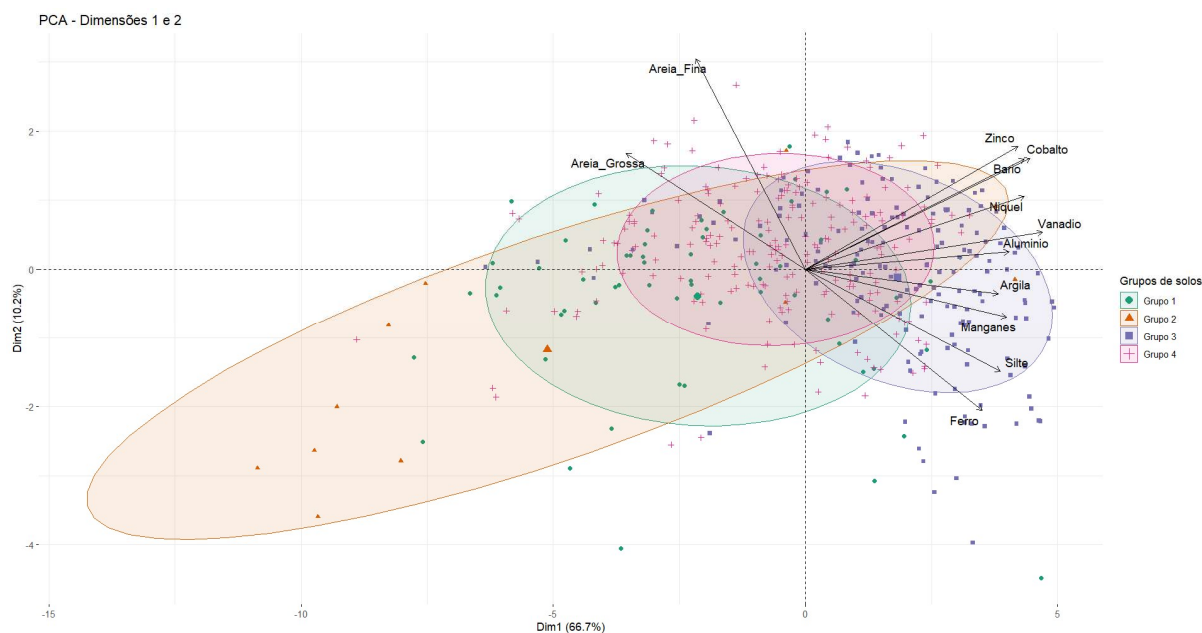


Figura 64 - Gráfico de PCA obtida a partir da utilização de todos os dados. N=456. Elipses representam 68% do intervalo de confiança do respectivo conjunto de dados

4 Discussão

A compilação dos dados de solo das planícies aluvionares do rio Doce emerge como um elemento crucial para entender os possíveis impactos do maior desastre ambiental da história do Brasil na região do médio rio Doce. A consistência dos resultados entre os dois conjuntos de dados, provenientes de diferentes fontes, fortalece a análise e permite a combinação das informações para formar um extenso banco de dados para a região de estudo.

A granulometria dos Neossolos Flúvicos do rio Doce é predominantemente composta por areia fina, seguida de silte. Embora os valores de silte tenham apresentado teores um pouco mais elevados que os dados de Pacheco (2015), constatou-se que a mediana para as duas profundidades esteve próxima da faixa encontrada por esse autor, assim como para os resultados de Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce de Guevara et al. (2018).

O agrupamento dos perfis de Neossolos Flúvicos a partir das características químicas reforçou as relações observadas entre as frações finas do solo e a concentração de metais. Foram constatados 4 grupos de Neossolos Flúvicos, com constituições granulométricas distintas, sendo

os teores de argila e silte mais elevados nos grupos Grupo 3 e Grupo 4, que juntos representaram 81 % dos perfis avaliados.

Os perfis do grupo 1 apresentaram teores elevados de areia fina com teores abaixo de 30% de silte e argila. A predominância da fração areia fina nos Neossolos Flúvicos dessa área de estudo já havia sido destacada por Pacheco (2015), o qual verificou teores de até 78% dessa fração e proporção muito menor de areia grossa, ao analisar amostras da calha principal do rio Doce.

Os perfis do grupo 2 podem ser classificados de acordo com o 3º nível categórico como Neossolos Flúvicos Psamíticos (Embrapa ,2018), uma vez que apresentaram predomínio da textura arenosa em todo o perfil do solo, sendo essa composta predominantemente por areia grossa.

A elevada relação silte/argila, superior a 0,50 para a maioria das amostras do grupo 1, 3 e 4, indicam um baixo grau de intemperismo sofrido pelos Neossolos Flúvicos e sedimentos fluviais (RESENDE ET AL., 2007). Os resultados encontrados por Nunes et al. (2001) e Pacheco (2015) na bacia do rio Doce também corroboram com esses dados. Entretanto, os valores mais elevados de silte em superfície também podem ser reflexo do aporte de sedimentos ricos em silte provenientes da barragem de Fundão. No caso do médio Rio Doce, onde não houve tal extravasamento imediato, pode-se considerar como negligível o efeito de deposição direta de rejeito durante o evento. Contudo, é plausível que a cheia de 2015/2016 tenha tido potencial de ressuspender a carga sedimentar, redepositando certo volume de rejeito extracalha nas planícies mais baixas.

Ao avaliar a concentração de metais observa-se que os solos com maiores concentrações seguem a mesma ordem apresentada. A harmonização realizada permitiu obter uma estimativa dos teores naturais de metais pesados para cada profundidade respectiva. Considerando todo o conjunto de dados, constatou-se que com exceção de Manganês e Ferro, todos os demais metais apresentam concentrações semelhantes entre as duas profundidades avaliadas.

A alta variação das concentrações de metais nos solos avaliados pode ser explicada pela composição distinta dos sedimentos e material de origem, além dos distintos graus de pedogênese. Pacheco (2015) observou que os Neossolos Flúvicos da bacia do rio Doce apresentam uma intercalação em profundidade de seus horizontes em eutróficos e distróficos, atribuindo essa diversidade aos distintos processos de sedimentação.

Nesse estudo as relações entre textura e concentração ficam evidentes quando aplicada técnicas de análise multivariada, como a correlação de Spearman, análise de componentes

principais (PCA) e a análise de Clusters. As correlações positivas encontradas entre a concentração de metais e teores de silte e argila indicam que o aumento dessas frações no solo resultam no aumento na concentração de metais. Isso ocorre devido à natureza e tamanho das partículas, visto que esse é um fator importante para a adsorção dos metais e elementos-traço, sendo que partículas menores possuem maior área de superfície específica com número de sítios de ligação, se comparada com as frações areia (Fadigas et al., 2002).

A natureza da fase sólida, proporção dos seus componentes e propriedades do solo são fatores que afetam a retenção e comportamento dos metais pesados no solo, como apontado por Fadigas et al. (2006) e Naidu et al. (1994). A presença de caulinita e óxidos de Fe e Al é fundamental na adsorção de metais pesados em solos tropicais, diminuindo sua mobilidade e biodisponibilidade, como destacado por Fontes e Weed (1991), Pierzynski e Schwab (1993) e Amaral Sobrinho et al. (1998). A adsorção pode ocorrer por meio de ligações eletrostáticas na superfície da caulinita e dos óxidos (adsorção não específica) ou por meio de ligações químicas covalentes ou parcialmente covalentes com os oxigênios da estrutura mineral (Spark et al., 1995).

Segundo Oliveira & Costa (2004), os fatores que afetam a mobilidade, atividade e biodisponibilidade de metais pesados e elementos-traço no solo incluem pH, temperatura, potencial redox, capacidade de troca catiônica, competição com outros metais, ligação com ânions e composição e força iônica da solução. Além disso, a mobilidade dos metais também é influenciada pela superfície específica, textura, densidade aparente, teor de matéria orgânica, tipo e concentração de minerais de argila, e tipo e teor de. Em geral, estudos demonstraram que o Pb, Cr e Cu apresentam baixa mobilidade, acumulando-se em suas camadas superficiais, enquanto o Zn, Mn, Ni e Cd são relativamente mais móveis (Zabowski & Zasoski, 1987; Fontes et al., 1993; Matos et al. 1994).

A distribuição espacial dos diferentes grupos apresentou-se de forma heterogênea por toda a bacia, com exceção do grupo 2, que se apresentou concentrado na região entre Galiléia e Tumiritinga. Os demais grupos apresentaram perfis ao longo de toda a calha do rio Doce, demonstrando que a heterogeneidade observada dentro de um perfil de Neossolo Flúvico, também é constatada quando avaliada a distribuição espacial ao longo da bacia do rio Doce.

Os perfis de Pacheco (2015) classificados no grupo 3 (P12, P14 e P20), cuja concentração de metais apresenta-se mais elevada, apresentaram os maiores teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e MnO₂ medidos por Fluorescência de Raios X (FRX). De forma similar, foram encontradas correlações entre os valores da relação Fe₂O₃/argila e os teores de cobre e zinco

(FADIGAS et al., 2002). Segundo Alleoni et al. (2005), para solos altamente intemperizados, onde a fração argila é dominada por mineralogia oxidada, os óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al), mesmo em baixas concentrações, exercem uma influência significativa na adsorção de metais como o cobre (Cu), devido à alta afinidade do metal pelas superfícies reativas desses componentes (Silveira et al., 1999).

A aplicação da Análise de Componentes Principais (PCA) forneceu uma visão abrangente da distribuição dos dados, destacando a influência das características físicas do solo e da concentração de metais. A clara distinção entre solos mais arenosos e solos mais siltosos e argilosos, especialmente nas dimensões 1 e 2, ressalta a importância dessas características na diferenciação dos perfis de solo. Além disso, os escores do componente principal 1 mostraram correlações positivas com silte, argila e metais pesados, destacando a influência desses fatores na variabilidade dos dados, corroborando com os estudos de Goulart Júnior (1987), Amaral Sobrinho et al. (1997); Fadigas et al. (2002).

Ao analisar os grupos que apresentam características comuns, observa-se uma variabilidade significativa entre as camadas. A Análise de Componentes Principais (PCA) revelou uma distinção mais acentuada entre os grupos de solos mais arenosos e aqueles mais argilosos/siltosos. No entanto, não foram formados grupos completamente separados, pois as elipses geradas pela análise compartilham áreas em comum. Isso demonstra que, apesar das diferenças identificadas, todos os perfis de solo compartilham características em comum.

5 Conclusão

A distribuição dos elementos químicos avaliados foi influenciada pela granulometria dos solos analisados, com uma forte correlação observada entre silte e argila e as concentrações desses elementos. A afinidade dos metais pesados por essas frações granulométricas é um aspecto relevante na avaliação da disponibilidade e distribuição desses elementos em solos de planícies aluviais do rio Doce. O incremento na concentração de metais nos solos afetados é resultado do incremento de partículas finas (silte e argila) nas amostras coletadas.

Quando avaliada a concentração de metais na profundidade entre 0 e 50 cm de profundidade, constatou-se a presença de 4 tipos de Neossolos Flúvicos, cuja distribuição espacial apresenta-se heterogênea ao longo da calha fluvial do rio Doce.

Os teores de metais mais elevados em superfície dos solos do grupo 3, podem estar ligados aos teores mais elevados de silte e argila nessas camadas. Dessa forma, a presença de materiais alóctones, cuja constituição granulométricas apresenta-se muito diferente dos solos das planícies do rio Doce pode influenciar nas concentrações de metais pesados desses solos.

Adicionalmente, os valores de referência (P-75) estabelecidos para cada grupo textural podem ser empregados como base para estabelecer critérios de qualidade do solo e guiar medidas de gestão ambiental, incluindo ações de recuperação e remediação de áreas possivelmente impactadas pelo rompimento da barragem de Fundão.

6 Referências Bibliográficas

ALVARES C.A., STAPE J.L., SENTELHAS P.C., DE MORAES GONCALVES J.L., SPAROVEK G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6):711–728, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Divisão hidrográfica nacional. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>> Acesso em: 12 dezembro 2022.

ANTUNES, Z.F. Caracterização climática do estado de Minas Gerais. *Inf. Agrop.*, 12(138): 1-13. 1986.

CURI, Nilton; RESENDE, Mauro; SANTANA, Derli Prudente. Solos de várzeas de Minas Gerais. 1988.

EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 4 2018.

FADIGAS, Francisco de Souza et al. Concentrações naturais de metais pesados em algumas classes de solos brasileiros. *Bragantia*, v. 61, p. 151-159, 2002.

FADIGAS, Francisco de S. et al. Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, p. 699-705, 2006.

FOESH, M. D. S.; FRANCELINO, M.R. .Physical-Chemical characteristic and spectral behavior of river water after the disaster of Mariana, Brazil. In: *Fundão Dam Science Meeting*, 2019, Brasília. Abstract *Fundão Dam Science Meeting*. Brasília: Capes, v. 1. p. 89-95, 2019.

FOESH, M. D. S., FRANCELINO, M. R., SANTANA, F. C. .Water Contamination of the rivers in the disaster of Mariana - MG. Aceito para publicação - *Floresta e Ambiente*, 2020.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Iron oxides in selected Brazilian oxisols: I. Mineralogy. Soil Science Society of America Journal, v. 55, n. 4, p. 1143-1149, 1991.

FONTES, M.R.; RESENDE, M.; RIBEIRO, A.C. Concreções ferruginosas de alguns solos Brasileiros. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.9, p.113-117, 1985.

GUEVARA Y. Z. C., SOUZA J. J. L. L., VELOSO G. V. VELOSO R. W., ROCHAP. A., ABRAHÃO W. A. P., FILHO E. I. F.. Reference Values of Soil Quality for the Rio Doce Basin. Rev Bras Cienc Solo, 42:1-16, 2018.

GOLDER A. Atualização do volume 10: Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 13 e 14. Novembro 2021.

HARTEMINK, Alfred E. et al. GlobalSoilMap. net—a new digital soil map of the world. Digital soil mapping: Bridging research, environmental application, and operation, p. 423-428, 2010.

IBAMA. Laudo Técnico Preliminar- Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana. Minas Gerais. 2015. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf>. Acesso em: 12 dezembro 2022.

LAGACHERIE, P., MCBRATNEY, A.B. Chapter 1. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for Digital Soil Mapping. In: P. Lagacherie, A.B. McBratney and M. Voltz (Eds.), Digital Soil Mapping, an introductory perspective. Developments in soil science, vol. 31. Elsevier, Amsterdam, pp. 3–24. 2007.

MELFI, A.J.; PEDRO, G.; VOLKOFF, B. Natureza e distribuição dos compostos ferríferos nos solos do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.3, p.47-54, 1979.

NAIDU, Ravendra; SUMNER, Malcolm E.; HARTER, R. D. Sorption of heavy metals in strongly weathered soils: an overview. Environmental Geochemistry and Health, v. 20, n. 1, p. 5-9, 1998.

NAIDU, Ravi et al. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils. European journal of soil science, v. 45, n. 4, p. 419-429, 1994.

OLIVEIRA, T.S. Metais pesados como indicadores de materiais de origem de solos. 128f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa. 1996.

PACHECO A.A.. Avaliação da contaminação em solos e sedimentos da bacia hidrográfica do rio Doce por metais pesados e sua relação com o fundo geoquímico natural. Tese, Universidade Federal de Viçosa. 2015.

PIERZYNSKI, Gary M.; SCHWAB, A. Paul. Bioavailability of zinc, cadmium, and lead in a metal-contaminated alluvial soil. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, 1993.

POLIDORO, J. C. et al. Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos). 2016.

SANTOS, E. E.; FRANCELINO, M. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R..Estimating of volume of iron ore reject in fluvial terraces with technology Lidar. In: Fundão Dam Science Meeting, 2019, Brasília. Abstract Fundão Dam Science Meeting. Brasília: Capes,v. 1. p. 34-40, 2019.

SANTOS, E. E.; FRANCELINO, M. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M. .Pedogenesis of iron ore Technosols of Fundão Barrage - Minas Gerais. In: Fundão Dam Science Meeting, 2019, Brasília. Abstract Fundão Dam Science Meeting. Brasília: Capes, v. 1. p. 56-61, 2019.

SERRA, C. Tragédia em Mariana: a história do maior desastre ambiental do Brasil. Editora Record, 2018.

SCHAEFER, C. E. G. R., SANTOS, E. E. DOS, FERNANDES-FILHO E. I., ASSIS, I. R.. Paisagens de lama: os tecnossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da Barragem do Fundão, em Mariana. Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 42(1):18–23, 2016.

SCHAEFER, C. E. G. R.; SANTOS, E. E.; SOUZA, C. M.; DAMATO NETO, J.; FERNANDES FILHO, E. I.; DELPUPO SOUZA, K. K. 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, 24:104-135, 2017.

SOUZA, J.J.L.L.; ABRAHÃO, W.A.P.; MELLO,J.W.V. DE; SILVA,J. DA; COSTA, L.M.DA ; OLIVEIRA, T.S. de.Geochemistry and spatial variability of metal(loid) concentrations in soils of the state of Minas Gerais. Brazil. Sci. Total Environ., 505:338-349, 2015.

SIMÕES, Margareth Gonçalves et al. Democratização da informação de solos do Brasil: Geoportal e banco de dados de solos com acesso via web. Cadernos de Ciência & Tecnologia, v. 32, n. 1/2, p. 55-69, 2017.

ROSSITER, David G. Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soil resources (5 pp). Journal of Soils and Sediments, v. 7, p. 96-100, 2007.

TILLER, K.G. Heavy metals in soil and their environmental significance. Advances in Soil Science, New York, v.9, p.113-142, 1989.

VALADARES, J.M.A.S. Cobre em solos do Estado de São Paulo: cobre total. Bragantia, Campinas, v.34, p.125- 132, 1975.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; SILVA, J. C. A. Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal. Rio de Janeiro: IBGE. 123 p., 1991.