

ELIANA ELIZABET DOS SANTOS

**DIAGNÓSTICO E MONITORAMENTO DOS TECNOSSOLOS DE REJEITO  
DE MINERAÇÃO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO POR MEIO  
DE TÉCNICAS REMOTAS E PROXIMAIS DE INSPEÇÃO DO SOLO**

Tese 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*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2019

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Santos, Eliana Elizabet dos, 1988-  
S237d                    Diagnóstico e monitoramento dos tecnossolos de rejeito de  
2019                    mineração de ferro da barragem de Fundão por meio de técnicas  
                             remotas e proximais de inspeção do solo / Eliana Elizabet dos  
                             Santos. – Viçosa, MG, 2019.  
                             96 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Barragens de rejeitos. 2. Engenharia geotécnica.  
3. Sistemas de varredura. 4. Radar de penetração no solo.  
5. Rejeitos de minério de ferro. I. Universidade Federal de  
Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em  
Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 622.341

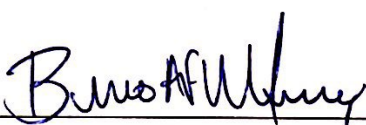
ELIANA ELIZABET DOS SANTOS

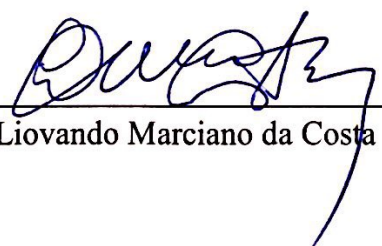
**DIAGNÓSTICO E MONITORAMENTO DOS TECNOSSOLOS DE REJEITO  
DE MINERAÇÃO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO POR MEIO  
DE TÉCNICAS REMOTAS E PROXIMAIS DE INSPEÇÃO DO SOLO**

Tese 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*.

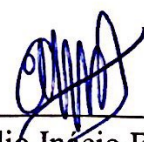
APROVADA: 26 de fevereiro de 2019.

  
Adriano Luis Schünemann

  
Bruno Araújo Furtado de Mendonça

  
Liovando Marciano da Costa

  
Márcio Rocha Francelino  
(Coorientador)

  
Elpídio Inácio Fernandes Filho  
(Orientador)

À minha família, amigos e orientadores.  
**Dedico**

*“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor,  
a eletricidade e a energia atômica: a vontade”.*  
*Albert Einstein*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa por proporcionar toda estrutura e condições para realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo concessão da bolsa de Doutorado.

Ao meu orientador, professor Elpídio por todo conhecimento, pela paciência e principalmente pela amizade nestes longos anos de LABGEO, por ser um excelente professor e uma excelente pessoa.

Ao professor Márcio Francelino pela sabedoria para além da academia. Por escutar minhas dificuldades e meus “desabores” da vida sempre com palavras de incentivo e sempre procurando levantar meu astral!

Ao professor Carlos Schaefer, pessoa espetacular, com uma carga e conhecimento de vida incrível que eu tive o prazer de conviver e ser orientanda.

Ao professor Liovando pelas longas conversas e discussões esclarecedoras e sobretudo pelo carinho e respeito como pesquisador e como ser humano, que sempre esteve disposto a ajudar, aconselhar e com palavras sábias e nunca ter desistido de mim mesmo eu indo em sua sala toda semana.

Aos queridos amigos e parceiros do Labegeio pela amizade, presteza e trocas de conhecimento principalmente aos amigos: Felipe Santana, Pedro Almeida, Lucas Timo, Alisson, Athos, Guilherme, Raiza, Ganso e todos que passaram por lá algum dia e foram importantes nesta caminhada especialmente Bruno Mendonça e Adriano, membro da minha banca.

Aos queridos amigos de vida Mayara, Leiliane, Nathalie, Darlene, Meire, Bárbara, Beatriz, Lucas, Kelly, e todos que de certa forma me motivaram e acreditaram que eu pudesse concluir mais essa etapa.

À minha família pelo carinho e apoio, à minha mãe Eunice, aos meus irmãos Patrícia e Júlio, ao meu amigo Rinaldo e minha querida sobrinha Thaís.

Em especial minha tia Nadir por todo carinho e apoio sem a qual seria impossível estar trilhando este caminho.

**MUITO OBRIGADA!!**

## **BIOGRAFIA**

ELIANA ELIZABET DOS SANTOS, filha de Eunice Elisabet Moreira Santos e João Manoel dos Santos (in memoriam), nasceu no dia 12 de fevereiro de 1988 em Divinópolis, Minas Gerais.

Iniciou a graduação na Universidade Federal de Viçosa no curso de Geografia no ano de 2008, graduando-se nas modalidades Licenciatura e Bacharelado no ano de 2013. Deu início ao mestrado em Solos e Nutrição de Plantas no ano de 2013, concluindo-o em 2015. Ingressou no Doutorado no mesmo ano pelo mesmo programa de pós graduação, concluindo-o em janeiro de 2019.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>12</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>13</b>

### CAPÍTULO 1

#### **PEDOGÊNESE DOS TECNOSSOLOS DE MINÉRIO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL**

<b>RESUMO .....</b>	<b>14</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>15</b>
<b>1.INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2.REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>17</b>
2.1 Rejeito .....	17
<b>3.MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1 Área de estudo .....	19
3.2 Amostragem .....	21
3.3 Análises físicas .....	21
3.3.1 Densidade do solo e densidade de partícula .....	21
3.3.2 Análise granulométrica.....	21
3.3.4 Análises químicas .....	22
3.4 Análise Mineralógica .....	23
<b>4.RESULTADOS.....</b>	<b>23</b>
4.1 Análise dos pontos de coleta .....	23
4.2 Análise temporal de atributos químicos e físicos .....	29
4.3. Análises Mineralógicas .....	40
<b>4.CONCLUSÕES .....</b>	<b>42</b>
<b>5.REFERENCIAL.....</b>	<b>42</b>

## CAPÍTULO 2

<b>UTILIZAÇÃO DE LASER SCANNER PARA ESTIMATIVA DE VOLUME DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM TERRAÇOS FLUVIAIS</b>	
<b>RESUMO .....</b>	<b>45</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>46</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>2. MÉTODOS .....</b>	<b>48</b>
2.1 Área de estudo .....	48
2.2 Laser Scanner .....	49
2.3 Processamento dos dados .....	50
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>51</b>
3.1 Validação da altitude com dados de campo .....	54
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>57</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>58</b>

## CAPÍTULO 3

<b>ESTIMATIVA DE VOLUME DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM TERRAÇOS FLUVIAIS POR MEIO DE TECNOLOGIA LiDAR</b>	
<b>RESUMO .....</b>	<b>59</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>59</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>60</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>63</b>
2.1 Área de estudo .....	63
2.2 Varreduras com Laser Scanner.....	64
2.2.1 Processamento dos dados .....	64
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>66</b>
3.1 Ajuste e processamento das nuvens .....	66
3.2 Espacialização do rejeito nos terraços fluviais.....	68
3.2.1 Validação da altitude com dados de campo .....	72
3.3 Comparação nuvem de pontos LST 2016-2018.....	73
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>76</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>

## CAPÍTULO 4

### USE OF GROUND PENETRATING RADAR (GPR) IN THE STUDY OF IRON ORE TAILING UNDER ALLUVIAL TERRACES

<b>ABSTRACT</b> .....	<b>79</b>
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	<b>79</b>
<b>2. MATERIAL AND METHODS</b> .....	<b>82</b>
2.1 Study area .....	82
2.2 Use of GPR for soil inspection.....	83
2.3 Data processing .....	84
2.4 Obtaining volumetric moisture values from radargrams.....	85
2.5 Identification of reflection areas.....	85
<b>3.RESULTS AND DISCUSSION</b> .....	<b>86</b>
3.1 Radargram analysis .....	86
3.2 Validation of the tailing layer depth.....	91
3.3 Analysis of moisture values.....	93
<b>4. CONCLUSIONS</b> .....	<b>95</b>
<b>5. REFERENCES</b> .....	<b>95</b>

## RESUMO

SANTOS, Eliana Elizabet dos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2019. **Diagnóstico e monitoramento dos Tecnosolos de rejeito de mineração de ferro da barragem de fundão por meio de técnicas remotas e proximais de inspeção do solo.** Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Coorientadores: Márcio Rocha Francelino e Carlos Ernesto Reynaud Schaefer.

O rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015, levantou importantes questões ambientais, principalmente aquelas ligadas à recuperação das planícies fluviais onde foi depositado uma quantidade considerável de rejeito de minério de ferro interferindo severamente na biodiversidade. A recuperação das áreas afetadas precedem análises criteriosas da evolução da gênese dos Tecnosolos, abordando aspectos que sirvam de parâmetros para melhoria de suas condições químicas, físicas e biológicas. Avaliar a espacialização do rejeito nos terraços também torna-se de fundamental importância pois pode fornecer informações cruciais no emprego de técnicas de recuperação. Diante disso, este estudo foi dividido em 4 capítulos sendo que o primeiro capítulo teve como objetivo avaliar as mudanças das condições pedogenéticas dos Tecnosolos depositados nas planícies fluviais a partir de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas após três anos da ocorrência do desastre. O segundo capítulo teve como objetivo estimar o volume e a espessura a camada de rejeito, por meio da tecnologia Laser Scanner Aéreo (LSA) e Laser Scanner Terrestre (LST) comparando a microtopografia em alta resolução, utilizando base de dados de nuvem de pontos interpolada anterior (LSA) e posterior (LST) ao desastre de parte do Rio Gualaxo do Norte. O terceiro capítulo teve como objetivo mensurar a camada e o volume de rejeito de um trecho do Rio Gualaxo do Norte por meio de tecnologia LiDAR e utilização dos instrumentos Laser Scanner Terrestre (LST) e Laser Scanner Aéreo (LSA) através de base de dados LSA anterior ao desastre e duas bases LST escaneadas em 2016 e 2018 sem realizar interpolações. Por fim, o quarto capítulo teve como objetivo avaliar a eficiência do Radar de Penetração no Solo (GPR) para detectar a profundidade dos rejeitos de minério de ferro bem como estimar valores de umidade e compará-los com técnicas laboratoriais. Como resultado foi possível avaliar que os Tecnosolos de forma geral obtiveram melhoras nas condições químicas e apresentam potencial para o emprego de técnicas de recuperação. As características físicas e mineralógicas não sofreram grandes alterações entre os dois tempos. O uso

do Laser Scanner nos capítulos 2 e 3 mostrou-se promissor para avaliar o volume e a espessura da camada de rejeito depositados nos terraços do Rio Gualaxo do Norte indicando que houve deposição de uma camada média de 1,17 metros e 0,72 m<sup>3</sup> de rejeito na maior parte do terraço (32%). Após 3 anos do desastre, foi possível avaliar com a topografia de alta resolução que houve adição de topsoil no local, o que foi demonstrando pela subtração da nuvem de pontos. Em ambos os capítulos foi possível avaliar que houve remoção de material pela empresa responsável pelas técnicas de recuperação. O Radar de Penetração do Solo mostrou-se eficaz para medição de umidade não diferenciando estatisticamente dos valores obtidos em laboratório sendo a antena de 200 MHz mais adequada para medição de profundidade e umidade de rejeito em detrimento da antena de 400 e 900 MHz.

## ABSTRACT

SANTOS, Eliana Elizabet dos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2019. **Diagnosis and monitoring of the iron ore tailings Technosols of the Fundão dam by means of remote and proximal techniques of soil inspection.** Adviser: Elpídio Inácio Fernandes Filho. Co-advisers: Márcio Rocha Francelino and Carlos Ernesto R. Schaefer

The disruption of the Fundão dam in November 2015 raised important environmental issues, particularly those related to the recovery of river plains where a considerable amount of iron ore tailings was deposited, severely interfering with biodiversity. The recovery of the affected areas precedes careful analysis of the evolution of the genesis of the Technosols, addressing aspects that serve as parameters for the improvement of their chemical, physical and biological conditions. Assessing the spatialization of tailings on terraces is ALS o critical because it can provide crucial information in the use of recovery techniques. Therefore, this study was divided in 4 chapters and the first chapter had as objective to evaluate the evolution of the pedogenetic conditions of the Tecnosolos deposited in the fluvial plains from their physical, chemical and mineralogical properties after three years of the occurrence of the disaster. The second chapter aimed to evaluate the efficiency of the Soil Penetration Radar (GPR) to detect the depth of iron ore tailings as well as to estimate moisture values and to compare them with laboratory techniques. The third chapter aimed to estimate the volume and thickness of the tailings layer using the Airbone Laser Scanner (ALS) and Terrestrial Laser Scanner (TLS) technology, comparing the high resolution microtopography using a previous interpolated cloud point data base (ALS) and later (TLS) to the disaster of part of the Rio Gualaxo do Norte. Finally, the fourth chapter had the objective of measuring the layer and the tailings volume of a section of the Rio Gualaxo do Norte using LiDAR technology and using Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Airbone Laser Scanner (ALS) of pre-disaster LSA data and two TLS databases scanned in 2016 and 2018 without performing interpolations. As a result, it was possible to evaluate that the Technosols in general obtained improvements in the chemical conditions and show potential for the use of recovery techniques. Physical and mineralogical characteristics did not change significantly. The Soil Penetration Radar showed to be effective for the measurement of moisture, not statistically different from the values obtained in the laboratory, and the antenna of 200MHz is more adequate for measuring depth and humidity of tailings. The use of the Laser

Scanner in chapters 3 and 4 was promising to evaluate the volume and thickness of the tailings layer deposited on the terraces of the Rio Gualaxo do Norte indicating that there was deposition of a mean layer of 1.17 meters and  $0.72 \text{ m}^3/\text{m}^2$  of tailings on most of the terrace (32%). After 3 years of the disaster, it was possible to evaluate with the high-resolution topography that there was addition of topsoil in the place, which was demonstrated by the subtraction of the cloud of points. In both chapters it was possible to evaluate that there was removal of material by the company responsible for the techniques of recurrence.

## INTRODUÇÃO GERAL

Em novembro de 2015 ocorreu o rompimento da barragem do Fundão, localizada no município de Mariana-MG, lançando um volume de cerca de 50 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito de minério de ferro, nos afluentes e no próprio Rio Doce afetando severamente a biodiversidade. Deste total, estima-se que 16 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos permaneceram acumulados próximos ao local do desastre e cerca de 32 milhões m<sup>3</sup> foram extravasados e chegaram a atingir uma altura de 5,5 m (IBAMA, 2015). Estima-se que aproximadamente 80% desse material ficou retido ao longo dos primeiros 100 km, envolvendo os rios Gualaxo do Norte, Carmo, Piranga e Doce até a usina Risoleta Neves. A lama de rejeitos percorreu no total 663 km lineares até chegar no litoral do Espírito Santo (CPRM, 2015).

Segundo Schaefer et al (2015; 2016), nos terraços enterrados pelos sedimentos tecnogênicos de origem minerária, foi gerada uma nova situação, onde os problemas físicos são maiores que os químicos para fins de recuperação ambiental. Na superfície ocorreu selamento do solo (*hard-setting*) formando uma crosta resistente à penetração quando seco, mas altamente susceptível ao transporte quando umedecido. Estes autores ainda salientam que, quando ocorre a erosão, preferencialmente do material fino, mais dispersante, deixa um substrato residual rico em areia fina e silte, altamente compactado, constituindo um entrave à recuperação natural sem alguma intervenção.

Estudos preliminares e abrangentes da área afetada, (Schaefer et al., 2006, Guerra et al., 2017), não revelaram uma grande variabilidade física e morfológica dos Tecnoossolos gerados pelo desastre, com condição química geral ainda menos variável, com materiais de solos tectogênicos muito pouco reativos, valores de pH médios e baixas concentrações de nutrientes essenciais, além de baixos teores de elementos tóxicos.

O esforço para minimizar os impactos sobre o solo vêm ocorrendo de forma gradativa pela empresa responsável pela recuperação do Tecnoossolos. A atenção vem sendo retomada para recuperação dos Tecnoossolos a fim de atribuir a estas áreas, o uso agrícola a que antes era destinada, a fim de evitar processos erosivos que agravem ainda mais o assoreamento dos cursos d'água além de minimizar os passivos ambientais causados nestas áreas.

Diante disso, este estudo foi dividido em 4 capítulos sendo que o primeiro capítulo teve como objetivo avaliar as mudanças das condições pedogenéticas dos

Tecnossolos depositados nas planícies fluviais a partir de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas após três anos da ocorrência do desastre. O segundo capítulo teve como objetivo estimar o volume e a espessura da camada de rejeito, por meio da tecnologia Laser Scanner Aéreo (LSA) e Laser Scanner Terrestre (LST) comparando a microtopografia em alta resolução, utilizando base dados de nuvem de pontos interpolada anterior (LSA) e posterior (LST) ao desastre de parte do Rio Gualaxo do Norte.

O terceiro capítulo teve como objetivo mensurar a camada e o volume de rejeito de um trecho do Rio Gualaxo do Norte por meio de tecnologia LiDAR e utilização dos instrumentos Laser Scanner Terrestre (LST) e Laser Scanner Aéreo (LSA) através de base de dados LSA anterior ao desastre e duas bases LST escaneadas em 2016 e 2018 sem realizar interpolações

Por fim, o quarto capítulo objetivo avaliar a eficiência do Radar de Penetração no Solo (GPR) para detectar a profundidade dos rejeitos de minério de ferro bem como estimar valores de umidade e compará-los com técnicas laboratoriais

## **REFERÊNCIAS**

- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce – Relatório 1. 33p. 2015
- Guerra, M.B.B., Teaney, B.T., Mount, B.J., Asunskis, D.J., Jordan, B.T., Barker, R.J., Santos, E.E., Schaefer, C.E.G.R., 2017. 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 Pollut.* 228, 252. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3430-5>
- IBAMA, 2015. Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Laudo Técnico Prelim. 1, 2–35. <https://doi.org/2015>
- Schaefer, C. E. G. R.; Santos, E. E. Filho, E. I. F.; Assis, I.R., 2016. Paisagens de Lama: Os Tecnossolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana. *vicosa MG.*
- Schaefer, C.E.G.R., Santos, E.E., Souza, C.M. de, Neto, J.D., Filho, E.I.F., Delpupo, C., 2015. 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.

## **PEDOGÊNESE DOS TECNOSSOLOS DE MINÉRIO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL**

### **RESUMO**

O rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015, levantou importantes questões ambientais, principalmente aquelas ligadas à recuperação das planícies fluviais onde se encontram depositados os rejeitos de minério de ferro. A recuperação das áreas afetadas precedem análises criteriosas da evolução da gênese dos Tecnoossolos, abordando aspectos que sirvam de parâmetros para melhoria das condições dos Tecnoossolos. O objetivo deste trabalho foi avaliar as condições pedogenéticas dos Tecnoossolos depositados nas planícies fluviais a partir de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas após três anos da ocorrência do desastre na Bacia do Rio Doce, Minas Gerais, Brasil. Foram analisados sete pontos ao longo do Rio do Carmo e Rio Doce. A primeira coleta foi realizada cinco dias após o desastre e a segunda em dezembro de 2018, em um intervalo de mais de 3 anos. Neste período, identificou-se aumento do pH e ganhos em macro e micronutrientes, principalmente de K, Mg e Ca, Cu e Zn. Registrou-se aumento nos teores de matéria orgânica (de 0,64 para 1,29 dag/kg). Quanto aos metais pesados como Pb, Cd e Cr não houve grandes mudanças apresentando valores dentro das normas estabelecidas pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente. A heterogeneidade química é expressa também em profundidades nas camadas de rejeito, embora de maneira geral a matéria orgânica (MO) está concentrada nos primeiros centímetros. Quanto às características físicas, o rejeito apresentou e ainda apresenta valores altos de densidade do solo e densidade de partícula, influenciados diretamente pelo material de origem. Os rejeitos são classificados como material de textura média. As alterações mineralógicas foram pouco perceptíveis, sendo identificados quartzo (dominante na fração areia), mineral secundário 1:1 como caulinita (frações silte e argila), óxidos de Fe como hematita ( $Fe_2O_3$ ) e óxi-hidróxidos de Fe como goethita ( $FeOOH$ ), na fração argila com ocorrência no silte. Conclui-se que as limitações físicas são severas para o crescimento de plantas e ocupação da fauna, apesar das melhorias nas propriedades químicas dos solos ainda são necessários medidas de intervenção que acelerem o processo de recuperação. São recomendados novos experimentos e ensaios para otimização dos processos de recuperação, os quais apresentam potencialidades de recuperação nos primeiros centímetros do solo e podem ter avanço em profundidade com a posterior atuação biológica.

**Palavras-chave:** planícies fluviais; recuperação de áreas degradadas; lama de rejeito;

## **ABSTRACT**

The rupture of the Fundão dam in November 2015 raised important environmental issues, especially those related to the recovery of the fluvial plains where the iron ore tailings are deposited. The recovery of the affected areas precede careful analysis of the evolution of the genesis of the Technosols, addressing aspects that serve as parameters to improve the conditions of the Technosols. The objective of this work was to evaluate the pedogenetic conditions of the Tecnosols deposited in the fluvial plains from their physical, chemical and mineralogical properties after three years of the occurrence of the disaster in the Rio Doce Basin, Minas Gerais, Brazil. Seven points were analyzed along the Rio do Carmo and Rio Doce. The first collection was carried out five days after the disaster and the second in December 2018, in an interval of more than 3 years. During this period, pH and macronutrient gains were detected, mainly K, Mg and Ca, Cu and Zn. There was an increase in organic matter content (from 0.64 to 1.29 dag/kg). As for heavy met ALS such as Pb, Cd and Cr, there were no significant changes presenting values within the norms established by the National Council of the Environment. Chemical heterogeneity is ALS o expressed at depths in the tailings layers, although OM is generally concentrated in the first centimeters. Regarding the physical characteristics, the reject presented and still presents high values of soil density and particle density, influenced directly by the source material. Tailings are classified as medium texture material. No major mineralogical changes were observed, with quartz (dominant in the sand fraction), secondary mineral 1:1 as kaolinite (silt and clay fractions), Fe oxides as hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) and Fe hydroxides as goethite ( $\text{FeOOH}$ ), in the clay fraction with occurrence in the silt. It is concluded that physical limitations are severe for plant growth and fauna occupation, although improvements in soil chemical properties still require intervention measures that accelerate the recovery process. New experiments and tests are recommended for optimization of the recovery processes, which have recovery potential in the first centimeters of the soil and can be advanced in depth with the subsequent biological performance.

**Keywords:** river plains; recovery of degraded areas; tailings sludge

## 1. INTRODUÇÃO

A ruptura da barragem de Fundão, no Município de Mariana-MG no dia 5 de novembro de 2015, acarretou problemas socioambientais graves, necessitando de intervenção imediata para contenção e reparação dos danos causados pelo depósito de rejeito ao longo dos principais contribuintes da Bacia do Rio Doce. Estima-se que 50 milhões de metros cúbicos de rejeito de minério de ferro tenham sido carreados ou depositados pelos principais cursos d'água da Bacia até a foz do Rio Doce, na cidade de Regência-ES, percorrendo 879 km, afetando diretamente a população das cidades ribeirinhas (IBAMA, 2015; Schaefer et al., 2015).

O depósito da grande quantidade de rejeito e a baixa vazão dos rios criou um ambiente estéril, tecnogênico, levando ao assoreamento e a aniquilação da biodiversidade nas planícies fluviais, áreas amplamente utilizadas para agricultura e pecuária. Neste sentido, a base conceitual de Tecno solos, sustenta a nova composição destas áreas caracterizados como solos que se desenvolvem de substratos decorrentes da atividade antrópica, inclusive da mineração, e que podem sofrer intervenções visando a recuperação da qualidade (Rossiter, 2007). De acordo com a WRB (2006), para ser considerado um Tecno solo, o solo artificial deve conter mais de 20% de material tecnogênico nos primeiros 100 cm, entendendo por estes materiais como ladrilhos, cerâmicas, vidros, pedras trituradas, resíduos industriais, resíduos de minas dentre outros.

Uma das principais aplicações dos estudos de Tecno solos tem sido sua recuperação para permitir um uso sustentável. Assim, estudos diagnósticos dos Tecno solos da área afetada, fornecem informações para sua recuperação, como denotam estudos recentes com ênfase na Matéria Orgânica e transformações minerais e geoquímicas (Uzarowicz and Skiba, 2011; Zikeli et al., 2002) na recuperação de estrutura e funções ecológicas do sistema (Monserie et al., 2009).

Avaliações preliminares da área afetada pela lama (Guerra et al., 2017; Schaefer et al., 2015) revelaram pouca variabilidade física e morfológica dos Tecno solos gerados pelo desastre em Mariana. As condições químicas apresentaram-se menos variáveis com valores de pH médios e baixas concentrações de nutrientes essenciais, além de baixos teores de elementos tóxicos. Pela natureza do rejeito da mineração de ferro constituir-se material praticamente inerte, sua fertilidade é naturalmente reduzida.

O esforço para minimizar os impactos sobre o solo vêm ocorrendo de forma gradativa. A atenção vem sendo retomada para recuperação dos Tecnosolos a fim de atribuir a estas áreas, o uso agrícola a que antes era destinada, seguindo a legislação do Código Florestal referente a Áreas de Preservação Permanentes (APP's) a fim de evitar processos erosivos que agravem ainda mais o assoreamento dos cursos d'água (IBAMA, 2015).

Diante disto, avaliar a recuperação destas áreas e a evolução pedogenética dos Tecnosolos, é de grande importância para estabelecer medidas de intervenção que melhorem as propriedades do solo com intuito de criar condições para reestabelecimento da atividade biológica. Desta forma o presente trabalho teve como objetivo avaliar e comparar as condições originais e atuais do rejeito evidenciando a perda/ganho nutricional e o uso atual destinado à cada área.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Rejeito de minério de ferro e origem do Fe no Quadrilátero Ferrífero**

Os rejeitos são partículas resultantes de processos de beneficiamento dos minérios visando extrair os elementos de interesse econômico. Sua constituição é caracterizada pela presença de uma fração líquida e sólida, com concentração de 30% a 50% em massa que varia de acordo com a composição do minério bruto e do processo industrial utilizado no beneficiamento (Espósito, 2005). Ainda segundo o autor, os rejeitos podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até partículas de granulometria fina e com alta plasticidade (lamas) (Araújo, 2006). Quando de granulometria fina, são denominados lama, e quando de granulometria grossa (acima de 0,074 mm), são denominados rejeitos granulares.

Quando se trata de lamas e rejeitos de minério suas propriedades físico-químicas dependem fundamentalmente do processo industrial utilizado no beneficiamento, como as operações de moagem usadas e a água contida no efluente e do tipo de minério (Ghose e Sen, 2001). Quanto maior o teor de argila do minério de ferro, mais partículas finas serão lançadas no rejeito pós processado.

De acordo com Takehara (2004), o Fe é o quarto elemento mais abundantemente na crosta terrestre sendo que mais de 400 minerais apresentam Fe em concentrações detectáveis. No entanto, apenas algumas classes minerais apresentam teores de Fe que as tornam economicamente viáveis de serem explorados. Os minérios

tidos como economicamente exploráveis se agrupam em classes a partir de suas composições químicas em: óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Os solos das regiões tropicais e subtropicais tendem a acumular, residualmente, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Souza Junior et al., 2010).

Diante desta condição de viabilidade econômica de exploração deste recurso, os estados de Minas Gerais, Pará e Mato Grosso do Sul se destacam na exploração do minério de ferro. Sendo os mineiros responsáveis por cerca de 68% das extrações que em sua grande maioria, advêm do Quadrilátero Ferrífero (QF) (Quaresma, 2014).

Segundo Chemele et al. (1991), o QF como uma unidade geotectônica do Brasileiro, circundado por cinturões orogênicos que vertem para seu interior encontra-se na borda sul do Cráton do São Francisco. Tal unidade dispõe-se num quadrangular grosseiro constituído por sinclinais onde afloram sedimentos plataformais do Supergrupo Minas, de idade Paleoproterozóica, separados por estruturas arqueanas do tipo greenstone do Supergrupo Nova Lima e domos de rochas cristalinas Arqueanas e Proterozóicas.

O minério de ferro explorado no QF pode ser entendido a partir de dois grupos principais sendo eles: minério itabirítico e minério hematítico de alto grau (Rosière e Chemale, 2006). Os minérios itabiríticos que pertencem a Formação Cauê são fortemente afetados pelo cavalgamento e pelas zonas de cisalhamento. Estes depósitos estão relacionados com as Minas de mineração de Alegria, Capanema, Cauê, Chacrinha, Conceição, Dois Córregos, Esmeril, Mutuca, Onça, Periquito, Pico e Timboeba (Rosière e Chemale, 2006).

No âmbito composicional o itabirito pode ser separado em três tipos principais: Itabirito comum – formado de bandas abundantes em  $\text{SiO}_2$  e óxido de Fe; Itabirito dolomítico – constituído de bandas ricas em carbonatos e óxidos de Fe; Itabirito anfibólico – trata-se de um combinado de anfibólios com óxido de Fe. Já os minérios hematíticos de alto teor são mais homogêneos e compostos, basicamente, por hematita e abundantes em Fe (64%) e tem como acessórios o quartzo, a magnetita e a pirofilita (Takehara, 2004).

Uma das formas de armazenamento mais comum do rejeito em forma líquida (polpas) é o depósito em barragens de rejeito que geralmente são construídas em vales formando naturalmente pela disposição do relevo uma bacia de armazenamento ajudando a evitar rupturas em sua estrutura. Rejeitos na forma de lamas, cuja granulometria se assemelha a das argilas, geralmente são dispostos em barragens

convencionais, semelhantes as barragens de contenção de água, mas construídas com solo argiloso, onde se faz a deposição subaquática do material (Milonas, 2006)

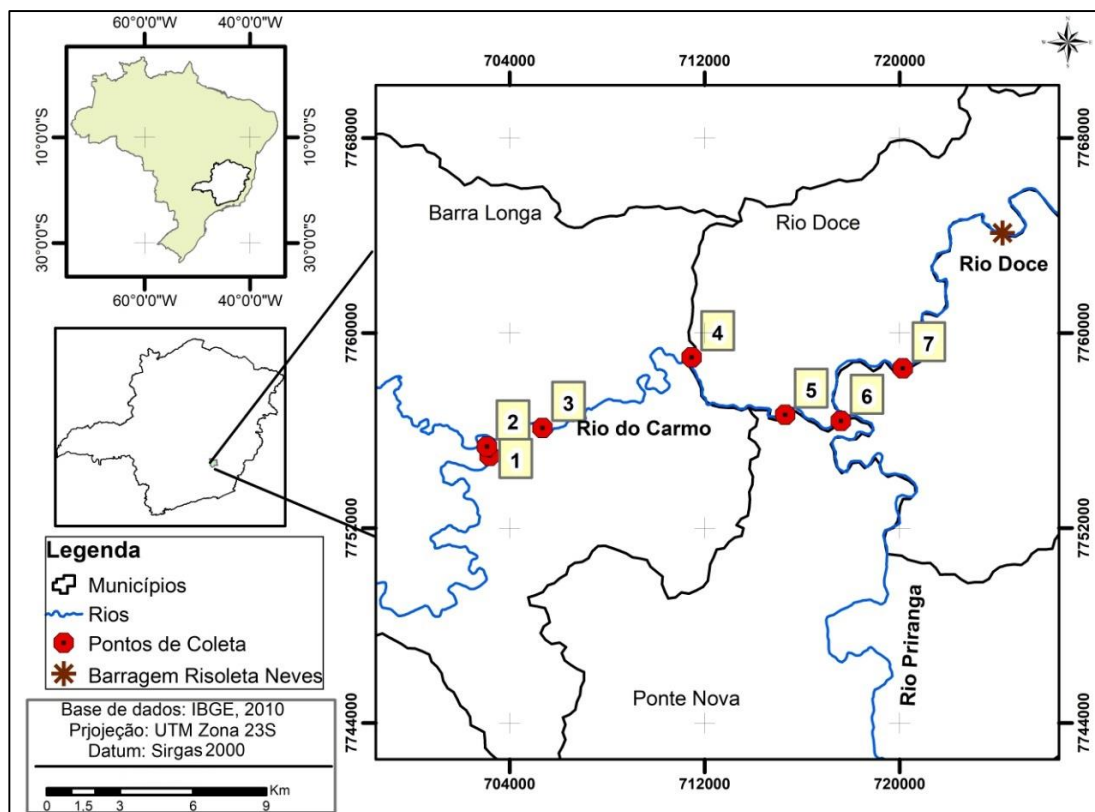
As condições das barragens de contenção estão sempre mudando com o aumento progressivo da carga dos rejeitos na fundação do reservatório com o tempo, e por isso sua segurança deve ser continuamente reavaliada (Cirilo, 2003). As principais causas de rompimento de barragens são problemas de fundação, capacidade inadequada dos vertedouros, instabilidade dos taludes, falta de controle da erosão, deficiências no controle e inspeção pós-fechamento e falta de dispositivos graduais de segurança ao longo da vida útil da estrutura (ICOLD, 2010).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Área de estudo**

A área de estudo está compreendida na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), possui aproximadamente 40 km de extensão, abrangendo o Rio Gualaxo do Norte a partir da Cidade de Barra Longa, assim como o Rio do Carmo e posteriormente o trecho inicial do Rio Doce, (Figura 1), na cidade de Rio Doce. Este configura o trecho mais afetado pela lama, uma vez que, grande parte do rejeito foi contido pela estrutura física da barragem Risoleta Neves “Candonga” também situada na cidade de Rio Doce cujo 80% do material ficou à sua montante.

A BHRD possui uma área total de 83.400 km<sup>2</sup>, dos quais 86% encontram-se em território de Minas Gerais e 14% no estado do Espírito Santo (ANA, 2010). O bioma Mata Atlântica compreende 98% da área total da bacia e apresenta altos índices de biodiversidade e de endemismo, entretanto, em situação crítica de alteração de seus ecossistemas naturais (IBAMA, 2015).



**Figura 1:** Localização da área de estudo

A vegetação remanescente é floresta semidecidual (Mata Atlântica) e se encontra distribuída principalmente em alguns topos de morro e ao longo do curso dos rios, em matas ciliares (CPRM, 1993). A geologia é basicamente formada por depósitos aluvionares Quaternários sobre uma litologia heterogênea: nas partes mais baixas ocorre o Complexo Mantiqueira, composto principalmente por ortognaisses extremo leste do Rio Gualaxo do Norte, passando pelo Complexo Acaiaca (gnaisse granulítico), e pela formação Dom Silvério, composta predominantemente por quartzitos, xistos e paragnaisses no setor do Rio do Carmo; na porção mais ao sul, o Complexo Piedade têm predominância de paragnaisses (CPRM, 1993). Os solos predominantes na região são Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos Flúvicos (SMADS, 2010).

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região da BHRD é dividido em três tipos: Cwb- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, Cwa- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, e, Aw - clima quente com chuvas de verão, sendo o clima da área de estudo classificado como Cwa (Peel et al., 2007).

## **3.2 Amostragem**

Para a análise das mudanças na quantidade de nutrientes e matéria orgânica do solo (MO) nos Tecossolos, foram utilizadas amostras coletadas no mês de novembro de 2015, cinco dias após o desastre, chamado de tempo 1 (T1), onde foram realizadas análises químicas, físicas e mineralógicas de 22 pontos ao longo da área de estudo nas profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm. Destes, em 16 pontos foram coletadas amostras de rejeito e em 6 amostras do solo do entorno que serviram como material de referência de comparação com a segunda coleta, sendo os dados da primeira coleta, publicados por (Schaefer et al., 2015).

A segunda coleta de amostras (T2) foi realizada no mês de dezembro de 2018. Foram realizadas as coletas nos mesmos pontos de T1 com auxílio de GPS de navegação para localização dos pontos. Foram coletadas amostras nas profundidades de 0-15, 15-45 e 45-60 cm. A mudança nas profundidades das coletas de T1 e T2 foram provenientes da mudança de profundidade no ponto, em que, alguns casos foi adicionado topsoil ou retirado material pela empresa responsável pela recuperação. Nesta etapa também foi observado a profundidade/presença de raízes e atividade biológica nos perfis.

## **3.3 Análises físicas**

### **3.3.1 Densidade do solo e densidade de partícula**

A densidade do solo ( $D_s$ ) e densidade de partículas ( $D_p$ ) foram determinadas de acordo com a EMBRAPA (2011).

### **3.3.2 Análise granulométrica**

Foi utilizada solução de NaOH a 0,05 mol/L (Barreto, 1986) como agente dispersante de partículas. Para cálculo da estimativa de sedimentação foi utilizada a Lei de Stokes (1851) levando em consideração a natureza do material em análise.

As proporções de areia grossa (AG), areia fina (AF), argila (Arg) e silte (S) ( $X_i$ ), em kg/kg, serão calculadas a partir das fórmulas a seguir de acordo com Ruiz, H.A, (2005).

$$X_{AG} = M_{AG} / M_{TFSA} \quad (3)$$

$$X_{AF} = M_{AF} / M_{TFSA} \quad (4)$$

$$X_{(S+Arg)} = [M_{(S+Arg+D)} - M_D] V_T / V_C / M_{TFSA} \quad (5)$$

$$X_{Arg} = [M_{(Arg+D)} - M_D] V_T / V_C / M_{TFSA} \quad (6)$$

$$X_S = X_{(S+Arg)} - X_{arg} \quad (7)$$

### 3.3.3 Análises químicas

A análise de pH em água foi realizada de acordo com a EMBRAPA, (2011) empregando a relação 1:2,5 solo: líquido utilizando eletrodo combinado imerso em suspensão. Foi determinado também o pH em KCl 1 mol/L para posterior determinação de  $\Delta$ pH (variação de pH).

Os teores de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Al^{3+}$  foram extraídos com solução de KCl 1 mol/L, sendo quantificados por espectrofotometria de absorção atômica, e o  $Al^{3+}$  por titulação com solução NaOH 0,025 mol/L;  $K^+$  e  $Na^+$  trocável foi extraído com solução de HCl 0,05 mol/L e quantificado por fotometria de chama. Para determinação do P, Fe, Mn, Zn, Cu e Pb foi utilizado o extrator Mehlich-1. O P foi determinado por colorimetria e o Fe, Mn, Zn, Cu e Pb foram determinados por absorção atômica. Foi também avaliada a acidez potencial (H + Al) extraída com acetato de cálcio a pH 7, quantificada por titulometria. O carbono orgânico foi quantificado pelo método de Walkley-Black, segundo Defelipo & Ribeiro (1981).

A partir das análises prévias foi calculado a soma de bases (S), capacidade de troca catiônica – CTC (t efetiva e T pH 7,0); saturação por bases (V%); saturação por alumínio (m%); e a capacidade de troca catiônica corrigida pela argila (CTCr) calculada pela expressão:

$$T(\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) \times 1000 / \text{conteúdo de argila (g kg}^{-1}) \quad (8)$$

A partir dos resultados das análises físicas e químicas, foram obtidos a média e o coeficiente de variação para discussão dos resultados.

### **3.4 Análise Mineralógica**

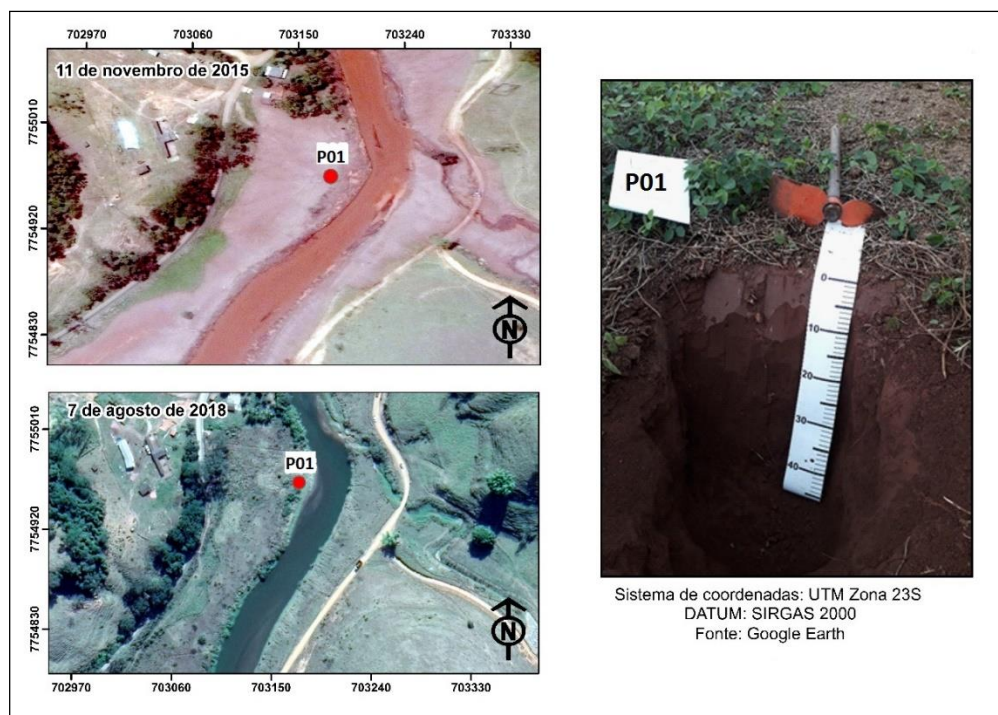
Para análises mineralógicas, foram utilizadas amostras coletadas em 3 pontos ao longo da área de estudo nos dois tempos (T1 e T2). Com intuito de identificar a mineralogia presente na lama de rejeitos foi realizada a preparação das amostras para análise por Difractometria de Raios-X (DRX). As amostras foram submetidas a separação das frações granulométricas segundo método da centrífuga (Jackson, 2005) e uso de solução de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  em pH 9,5 como dispersante. As frações de areia, silte e argila naturais, após serem trituradas em almofariz de ágata, foram analisadas por Difrátômetro de Raios-X em varredura na amplitude de 4 a 70 graus 2 theta de acordo com Chen, (1997).

Foram analisadas e descritas a partir de observações de campo, características de cada ponto quanto à presença de raízes, atividades de térmitas, vegetação encontrada ao entorno e uso atual da área.

## **4. RESULTADOS**

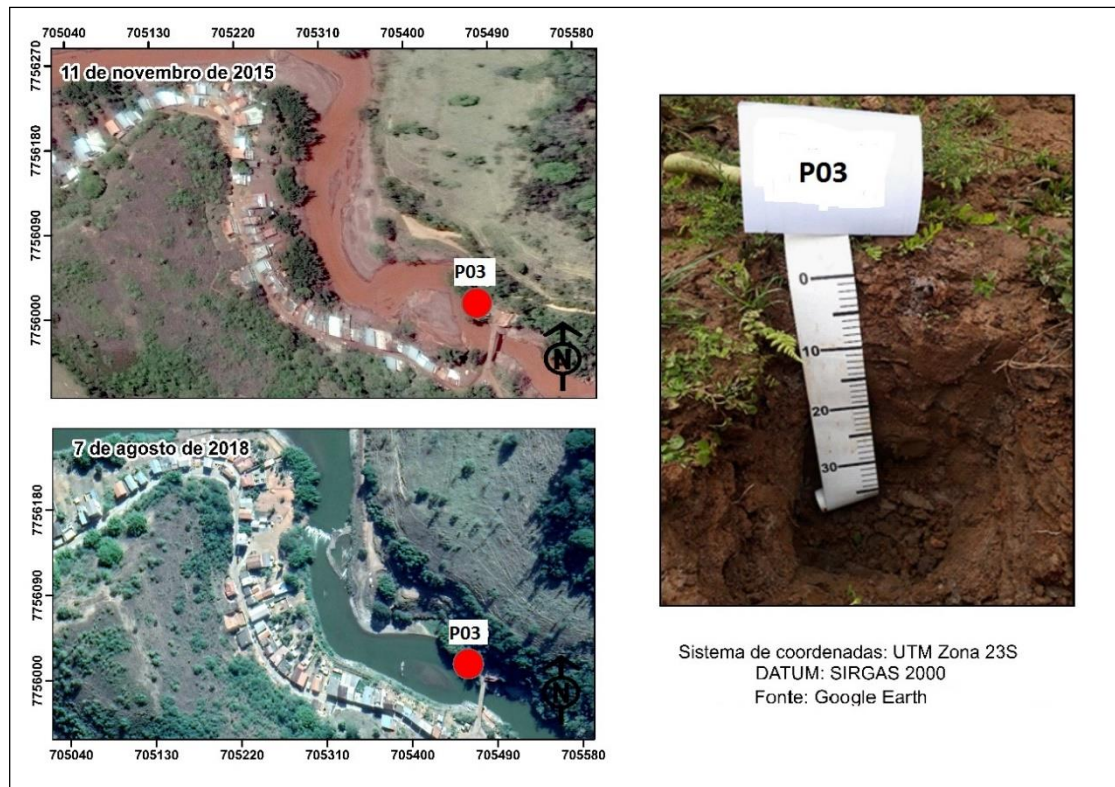
### **4.1 Análise dos pontos de coleta**

No campo realizado no dia 10 de novembro de 2015 logo após o desastre, foi observado a presença de um intenso selamento superficial, agravado pela remoção do material argiloso mais fino, deixando um substrato residual rico em areia fina e silte altamente compactado (*hard-setting*) (Schaefer et. al., 2015). As figuras a seguir retratam os locais de estudo com datas próximas às datas de coleta, bem como o perfil de solo analisado já em T2. É possível visualizar o alcance da lama pelos terraços e a cor turva das águas causadas pelas partículas de rejeito. Já nas imagens recentes (2018), é possível observar a presença de vegetação (figuras de 2 a 7).



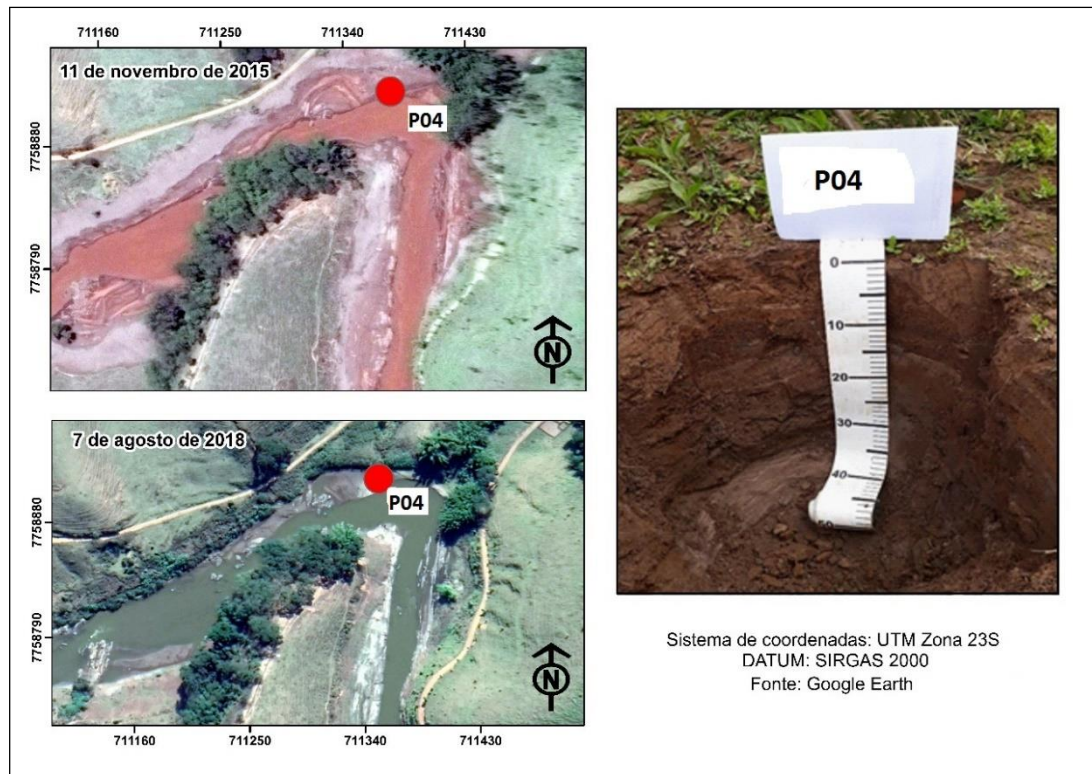
**Figura 2:** Ponto de coleta nº01. Localização do ponto de coleta antes e depois do desastre e perfil do solo.

O ponto de coleta 01, localizado à jusante do rio Gualaxo do Norte apresentou fraca atividade de térmitas, com raízes finas até os 10 centímetros de profundidade. De 20 a 40 centímetros, foram observadas raízes finas e esparsas. Observou-se também fraca atividade biológica. Na área de entorno, foi observada a presença de vegetação arbustiva com leguminosas e gramíneas espaçadas e em touceiras. O uso atual da área é destinado à pastagem, onde foi observado a presença de esterco bovino. Não houve adição de topsoil no local, caracterizando assim o rejeito *in situ* com estrutura maciça.



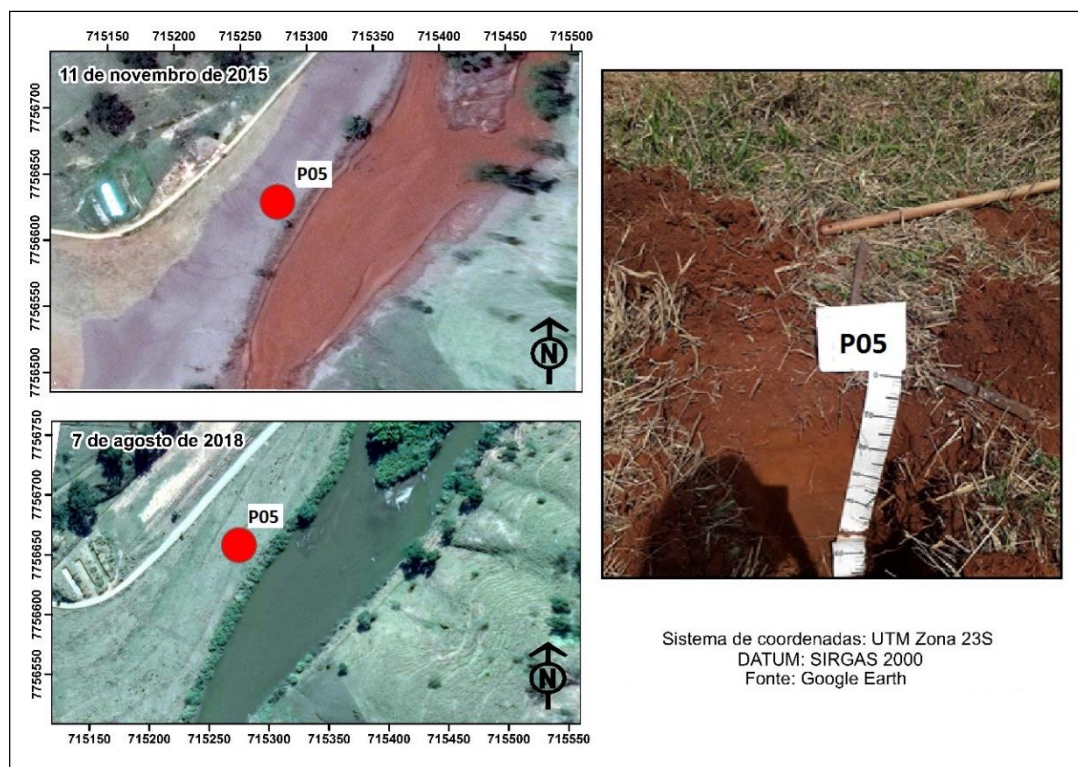
**Figura 3:** Ponto de coleta nº03. Localização do ponto de coleta antes e depois do desastre e perfil do solo.

O ponto de coleta 03 localiza-se à montante do rio do Carmo próximo à cidade de Barra Longa. Foi observado que o leito maior está sujeito à cheia sazonal. O rejeito desta área tem composição variada e arenosa sobrepondo o Neossolo Flúvico presente na área. Possivelmente houve a elutriação de argila, carreamento por processo erosivos de menor intensidade- erosão laminar em ravinas. Foi observado a presença de raízes finas apenas nos primeiros 20 cm, sem atividade biológica significativa. A vegetação do entorno é esparsa e espontânea.



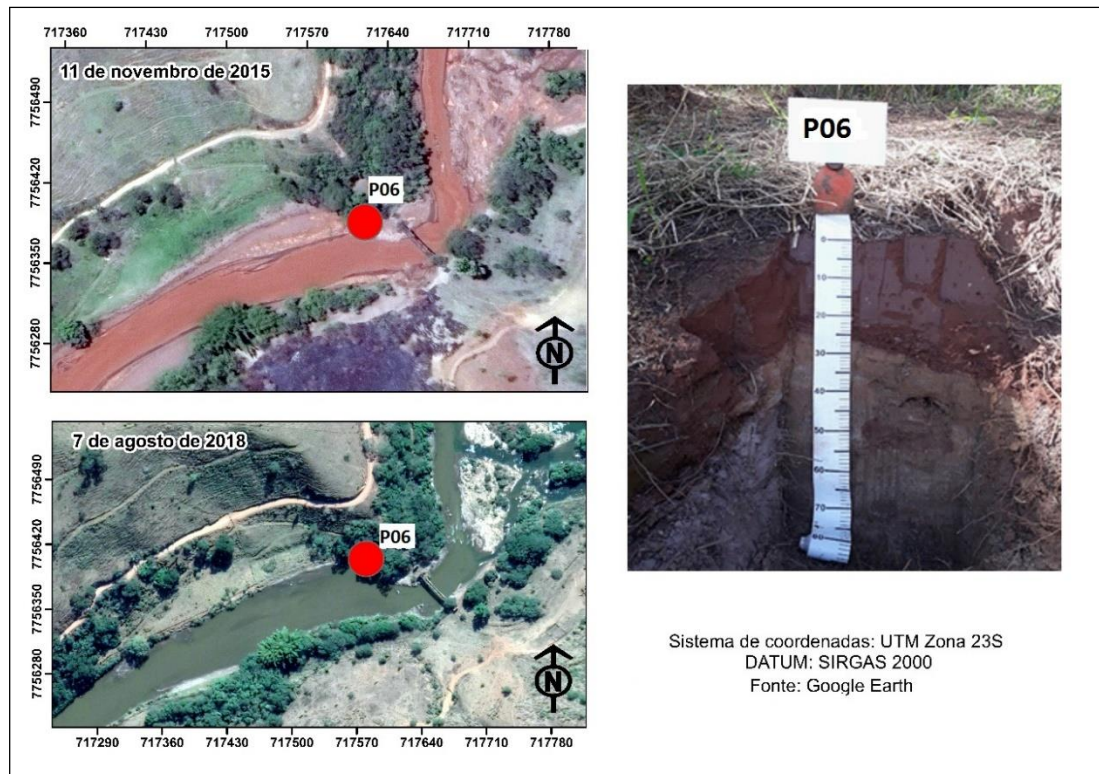
**Figura 4:** Ponto de coleta 04. Localização do ponto de coleta antes e depois do desastre e perfil do solo.

O ponto de coleta número 04 encontra-se em uma área de meandro em cotovelo no rio do Carmo. Foi observado a presença de raízes finas apenas até os primeiros 10 cm. Não foi constatada atividade biológica significativa e aparentemente não houve intervenção de recuperação da área pois foi observada a presença de vegetação arbustiva espontânea. O material coletado aparentemente trata-se do rejeito in situ sobre Neossolo Flúvico.



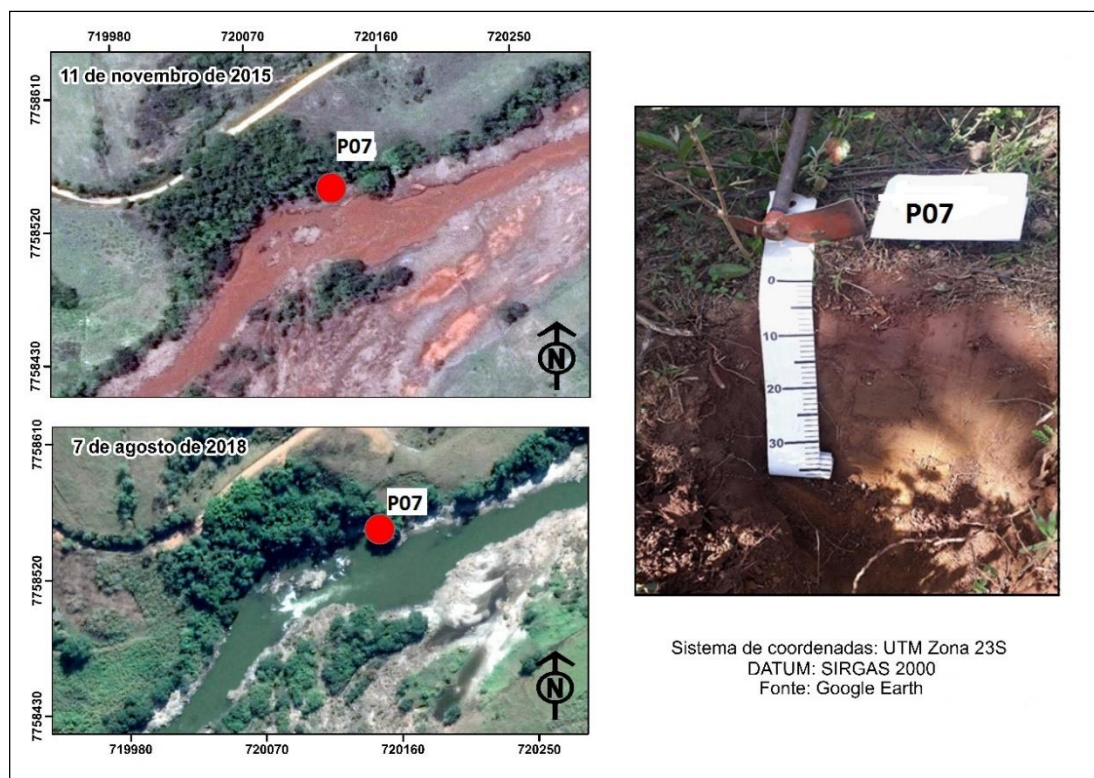
**Figura 5:** Ponto de coleta nº05. Localização do ponto de coleta antes e depois do desastre e perfil do solo.

O ponto de coleta número 05 está a aproximadamente 25 metros do leito menor, localizado na Fazenda Porto Alegre. Nesta área, foi adicionada uma camada de 35 cm de topsoil sobre o rejeito, sendo este retirado de horizontes superficiais dos Cambissolos das encostas adjacentes. O topsoil foi parcialmente misturado com o rejeito e a camada de rejeito subsuperficial alcançou de 35 a 50 cm de profundidade. Foi observado a presença de muitas raízes profundas, chegando a penetrar na camada de rejeito a 35 cm de profundidade, tornando-se a partir daí escassas e finas, com presença de baixa atividade biológica. O uso destinado à área é prioritariamente pastagem, constituindo-se de braquiária irrigada, bem desenvolvida, com a presença de algumas espécies invasoras.



**Figura 6:** Ponto de coleta nº06. Localização do ponto de coleta antes e depois do desastre e perfil do solo.

O ponto de coleta número 06 encontra-se próximo à calha do Rio do Carmo. Foi observado uma camada de 25 cm de rejeito seguido por Neossolo Flúvico decapitado. Foi observado a presença de raízes finas. Não foi constatado a presença de atividade biológica. A vegetação da margem é composta por braquiária aparentemente espontânea esparsa e em touceiras.



**Figura 7:** Ponto de coleta nº07. Localização do ponto de coleta antes e depois do desastre e perfil do solo.

O ponto de coleta número 07 encontra-se à jusante do Rio Doce. Foi observado uma camada de 15 cm de rejeito seguido do horizonte C de Neossolo Flúvico. Foi observado ainda a presença de raízes finas e raras ao longo do perfil e não foi constatado a presença de atividade biológica aparente. A vegetação do entorno é composta por espécies invasoras em quantidade expressiva.

#### **4.2 Análise temporal de atributos químicos e físicos**

A tabela 1 apresenta os resultados das análises químicas e físicas nos dois períodos de coleta (T1 e T2). Foi calculado também a média e o coeficiente de variação (CV) dos resultados analíticos. A tabela 3 apresenta os resultados das análises químicas e físicas dos solos do entorno de acordo com Schaefer et al. (2015).

**Tabela 1:** análises físicas e químicas dos Tecnosolos no tempo 1 e 2

Análises		Tecossolo (lama)																	
		P01		P02		P03		P04		P05		P06		P07		Média		CV	
		T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
<b>pH</b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>	6,32	7,08	7,36	7,18	5,75	6,58	5,87	6,03	5,23	6,19	5,76	6,97	5,44	6,23	<b>5,96</b>	<b>6,60</b>	<b>11,83</b>	<b>7,13</b>
<b>P</b>		1,7	18,5	7,5	7,3	1,4	8,2	10,2	4,7	10	6,1	9,1	7,4	10,1	7,1	<b>7,14</b>	<b>8,47</b>	<b>55,06</b>	<b>53,86</b>
<b>K</b>	mg/dm <sup>3</sup>	37	132	22	227	50	87	10	53	7	100	10	62	9	144	<b>20,71</b>	<b>115</b>	<b>80,77</b>	<b>51,85</b>
<b>Ca<sup>2+</sup></b>		1,82	3,15	1,51	1,04	1,25	3,44	1,21	1,86	1,25	2,02	1,14	1,23	1,11	2,07	<b>1,32</b>	<b>2,11</b>	<b>19,07</b>	<b>42,46</b>
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		0,42	0,79	0,04	0,27	1	1,44	0,03	0,71	0,03	0,69	0,04	0,19	0,03	1,13	<b>0,22</b>	<b>0,74</b>	<b>162,87</b>	<b>59,25</b>
<b>H+Al</b>		1,2	0,3	0,3	0,3	2	1,5	0,03	1,3	0,02	1,2	0,03	0,1	0,03	1,5	<b>0,35</b>	<b>0,88</b>	<b>151,68</b>	<b>70,34</b>
<b>CTC (T)</b>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	3,59	4,58	2,17	2,19	4,62	6,6	1,66	4,01	1,66	4,17	1,63	1,68	1,6	5,07	<b>2,41</b>	<b>4,04</b>	<b>49,85</b>	<b>41,53</b>
<b>t</b>		2,39	4,28	1,87	1,89	2,62	5,1	1,36	2,71	1,46	2,97	1,33	1,58	1,3	3,57	<b>1,76</b>	<b>3,15</b>	<b>31,05</b>	<b>39,93</b>
<b>V</b>	%	66,6	93,4	86,2	86,3	56,7	77,3	81,9	67,6	88	71,2	81,6	94	81,2	70,4	<b>77,45</b>	<b>80,02</b>	<b>14,79</b>	<b>13,93</b>
<b>MO</b>	dag/kg	1,28	1,48	1,54	1,4	1,15	2,55	0,13	1,34	0,13	1,01	0,13	0,27	0,13	2,02	<b>0,64</b>	<b>1,29</b>	<b>101,04</b>	<b>63,56</b>
<b>P-rem</b>	mg/L	30,9	47,7	30,8	42,1	34,6	15,2	30	32,2	32,6	19,2	36,2	37,7	31	39,3	<b>32,30</b>	<b>33,37</b>	<b>7,13</b>	<b>36,07</b>
<b>Fe</b>		43,7	24	132,4	79,2	73,3	1215,3	214,2	668,2	248,1	32,4	319,5	67,1	249,8	70,9	<b>183</b>	<b>308</b>	<b>55,68</b>	<b>149,66</b>
<b>Cu</b>	mg/dm <sup>3</sup>	1,31	0,11	1,17	1,12	0,99	6,51	1,52	2,81	1,48	4,46	1,67	0,7	1,67	0,97	<b>1,40</b>	<b>2,38</b>	<b>18,32</b>	<b>98,60</b>
<b>Mn</b>		24,9	99,4	228,9	56,3	125,1	315,8	97,8	67,7	87,1	48	82	55	295,6	68,7	<b>134</b>	<b>101</b>	<b>70,09</b>	<b>94,46</b>
<b>Zn</b>		0,96	4,08	0,66	0,95	1,62	4,54	0,61	2,18	0,58	3,79	0,98	0,75	0,63	2,66	<b>0,86</b>	<b>2,70</b>	<b>43,25</b>	<b>55,64</b>
<b>Cr</b>		0,28	1,22	0,53	0,72	0,37	1,3	1,34	1,07	1,42	0,99	1,63	0,9	1,37	0,85	<b>0,99</b>	<b>1,00</b>	<b>57,67</b>	<b>20,43</b>
<b>Ni</b>		1,04	0,83	1,11	0,62	1,16	2,05	1,25	0,91	1,22	0,7	1,57	0,77	1,1	1,19	<b>1,20</b>	<b>1,01</b>	<b>14,54</b>	<b>48,88</b>
<b>Cd</b>		0,3	0,31	0,18	0,21	0,33	0,39	0,26	0,25	0,27	0,23	0,27	0,29	0,28	0,31	<b>0,27</b>	<b>0,28</b>	<b>17,11</b>	<b>21,38</b>
<b>Pb</b>		3,01	0,88	3,37	0,41	3,66	0,79	0,78	0,12	0,64	0,42	0	0,5	0,91	1,48		<b>0,65</b>	<b>85,82</b>	<b>67,34</b>
<b>Areia Grossa</b>		0,16	0,038	0,02	0,055	0,26	0,017	0,07	0,01	0,05	0,252	0,38	0,058	0,05	0,104	<b>0,14</b>	<b>0,07</b>		
<b>Areia Fina</b>	kg/kg	0,40	0,37	0,31	0,42	0,16	0,13	0,39	0,62	0,43	0,14	0,24	0,35	0,37	0,38	<b>0,33</b>	<b>0,34</b>	<b>94,81</b>	<b>109,42</b>
<b>Silte</b>		0,18	0,47	0,53	0,39	0,14	0,53	0,43	0,19	0,42	0,13	0,30	0,45	0,46	0,33	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	<b>42,09</b>	<b>41,87</b>
<b>Argila</b>		0,25	0,13	0,13	0,14	0,42	0,29	0,11	0,18	0,09	0,48	0,07	0,14	0,10	0,19	<b>0,17</b>	<b>0,21</b>	<b>75,42</b>	<b>57,54</b>
<b>Dens.Part</b>		3,05	3,11	3,1	2,96	2,67	2,74	3,03	2,80	3,12	2,74	3,07	3,16	2,99	3,01	<b>3</b>	<b>2,93</b>	<b>5,11</b>	<b>5,94</b>
<b>Dens.Solo</b>		2,32	2,19	2,52	2,63	2,3	1,34	1,58	1,42	2,01	1,57	1,31	2,45	2,36	2,25	<b>2,1</b>	<b>1,97</b>	<b>21,94</b>	<b>26,52</b>

Foi observado uma pequena elevação na média de pH de T1 para T2 de 5,96 (acidez fraca) para 6.60 respectivamente (acidez fraca). O pH dos Tecnosolos é elevado em todos os pontos de análise o que ocorre pelo uso de NaOH como dispersante de partículas no processo de flotação do minério (Totou et al., 2011). Os valores de pH tendem a ser elevados também devido ao Ponto de Carga Zero (PCZ) dos óxidos de ferro que predominam neste tipo de material e não devido a presença de bases, como é mais comumente associados. Os solos do entorno, Neossolo Flúvico e Cambissolos, apresentam valores de pH ligeiramente ácido (5,65 e 5,77, respectivamente) de acordo com Schaefer et al., (2015) (Tabela 2).

**Tabela 2:** Análise química e física dos solos de referência do entorno

Análises		Neossolo Flúvico		Cambissolos	
		Média	D.P	Média	D.P
<b>pH</b>	H <sub>2</sub> O	5,65	0,19	5,77	0,15
<b>P</b>	mg/dm <sup>3</sup>	11,05	24,5	5,38	3,97
<b>K</b>		15,87	12,32	46,67	62,81
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	1,61	0,99	1,76	1,44
<b>Mg<sup>2+</sup></b>		0,57	0,43	0,48	0,37
<b>Al<sup>3+</sup></b>		0,07	0,15	0,14	0,22
<b>H+Al</b>		1,53	1,07	3,28	1,23
<b>CTC (T)</b>		3,78	1,54	5,67	2,3
<b>MO</b>	dag/kg	0,85	0,69	1,42	1,03
<b>P-rem</b>	mg/L	29,57	11,2	24	9,4
<b>Fe</b>	mg/dm <sup>3</sup>	610,3	528,28	604,72	556,04
<b>Pb</b>		0,73	1,38	1,57	1,45
<b>Areia Grossa</b>	kg/kg	0,24	0,21	0,26	0,08
<b>Areia Fina</b>		0,36	0,21	0,2	0,08
<b>Silte</b>		0,16	0,1	0,14	0,07
<b>Argila</b>		0,23	0,19	0,39	0,11

**Fonte:** Schaefer, et al. (2016)

A acidez potencial (H + Al) aumentou de T1 para T2 (0,35 para 0,88 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>, respectivamente) os solos naturais do entorno apresentam média de 1,53 e 3,28 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> para os Neossolos Flúvicos e Cambissolos (tabela 4). A acidez potencial para os Tecnosolos passou de muito baixa ( $\leq 1,0$  cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) para baixo (1,01 – 2,50 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) enquanto para o solos do entorno é considerada de média (2,51 – 5,0 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) tendo como base valores apontados por (Ribeiro, 1999)

Houve um aumento das bases de T1 em relação a T2, o que era de se esperar, devido corretivos e fertilizantes empregados na área da empresa responsável pela recuperação. Estes valores são mais expressivos para K, que aumentou para todos os pontos, tendo um aumento na média de quase 6 vezes (de 20,71 para 115 mg/dm<sup>3</sup>) com valores bem inferiores para os solos do entorno (Schaefer et. al., 2016), sendo 15,87 e 46,67 mg/dm<sup>3</sup> para Neossolos Flúvicos e Cambissolos, respectivamente. Quanto à classificação da fertilidade dos Tecossolos para fins agronômicos, de acordo com Ribeiro et. al (1999), os níveis médios de K foram considerados muito bons (> 120 mg/dm<sup>3</sup>).

Houve um aumento nos valores médios de Ca (de 1,32 para 2,11 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) e Mg (de 0,22 para 0,74 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup>) de T1 para T2, respectivamente. Os valores de Ca são considerados como valores médios para fins agronômicos nos dois tempos e nos Cambissolos e Neossolos do entorno enquanto os valores de Mg passaram de muito baixo para médio, sendo que nos solos de entorno os valores de Mg foram considerados como médios.

A Saturação por bases (V) passou de bom (77,45%) para muito bom (80,02%) de acordo com a interpretação sugerida por Ribeiro et. al (1999). Nas análises tanto de T1 quanto de T2, todos os pontos analisados foram considerados eutróficos (V > 50%). O aumento da saturação por base se deu pela elevação dos teores de cálcio e magnésio trocáveis na CTC.

Os valores de CTC efetiva (t), apresentaram um aumento médio de 1,76 para 3,15 cmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> de T1 para T2, variando de baixo para médio de acordo com a classificação agronômica proposta por Ribeiro et al (1999). O aumento de t, acompanha o aumento dos cátions Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> encontrados nas análises assim como os valores de da CTC a pH 7 (T).

Nos pontos 01 e 03 houve um aumento do fósforo disponível, acompanhando a diminuição dos teores de argilas destes pontos. Existe uma relação direta do P com o tipo de argila oxídica comumente encontrada em rejeito de mineração de ferro (Silva et al., 2006), este processo de adsorção específica retira o P da solução do solo ligando-o covalentemente com a molécula de óxido o que explica maiores teores de P em solos com menores teores de argila.

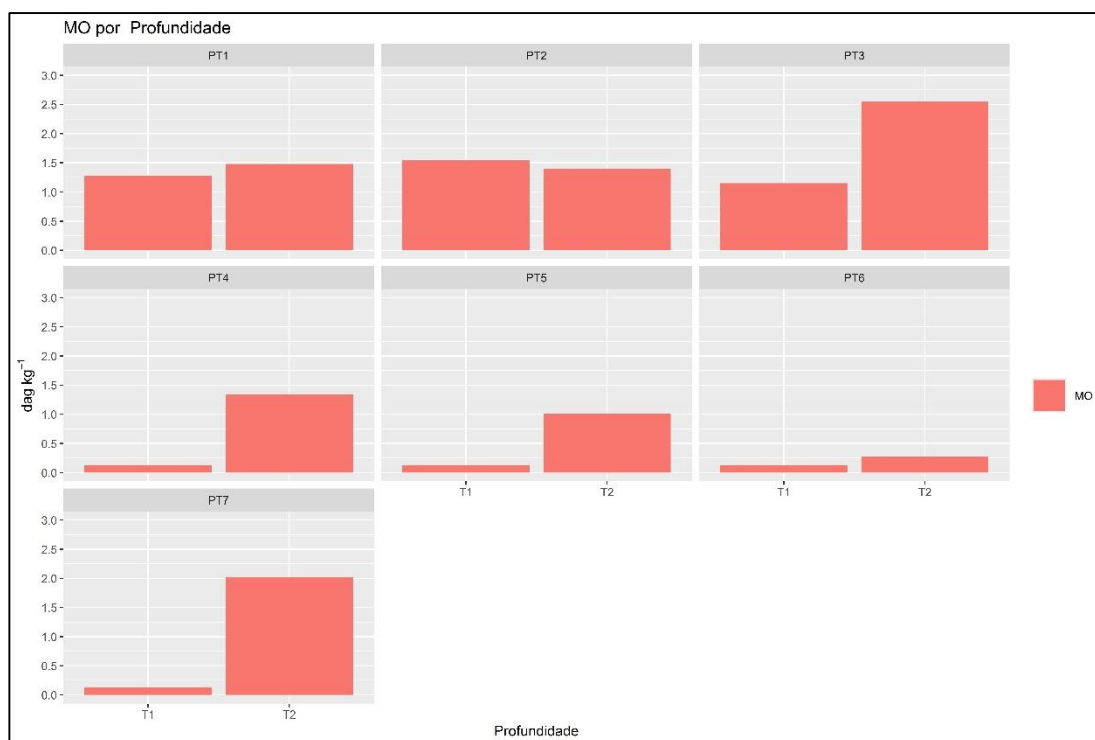
Os metais pesados formam um grupo de elementos com particularidades relevantes e de ocorrência natural no ambiente, como elementos acessórios na constituição de rochas. Esses elementos, apesar de associados à toxidez, possuem

importância no desenvolvimento de plantas como o Fe, Mn, Ni, Cu e Zn (Biondi et al., 2011). A concentração de metais pesados nos solos está relacionado ao seu material de origem, ou a fontes antropogênicas, sendo esta a principal razão do seu acúmulo (Abreu et al., 2002).

Desta forma, os micronutrientes Cu e Zn apresentaram aumento nos valores médios de T1 para T2 sendo classificados como alto (Ribeiro, 1999). Embora encontrado em baixas concentrações, houve uma ligeira queda nos valores médios de Ni variando de 1,20 para 1,01 mg/dm<sup>3</sup>, sendo estes valores corroborados por Guerra et.al. (2017). De acordo com Konzen et al. (1988), esses elementos merecem uma atenção especial em função da capacidade de acumulação no perfil do solo com risco de contaminação da água subterrânea por processo de lixiviação e pela tendência de acumulação em profundidade.

Na maioria dos pontos, houve redução nos teores de Mn, sendo que sua média passou de 134 para 101 mg/dm<sup>3</sup>, de T1 para T2 classificado como alto. Esta ligeira queda pode estar relacionado com o aumento do pH e aumento do potencial redox dos Tecossolos, com melhor drenagem com o passar do tempo, aliados também com o aumento dos teores de matéria orgânica (Moreira et al., 2006).

Foi observado um aumento médio nos teores de MOS de 0,64 para 1,29 dag/kg de T1 para T2 com a classificação agrônômica de muito baixo para baixo (Ribeiro et al, 1999). Em todos os pontos houve incremento de MOS exceto para o ponto 02, onde os teores foram de 1,54 para 1,4 dag/kg (figura 8), o que pode ser explicado pela heterogeneidade do rejeito e seu revolvimentos com os horizontes superficiais do solo. A incorporação de MOS pode ser explicada pela revegetação da área e pelo incremento de C proveniente da adubação orgânica como esterco bovino, encontrado na maioria dos pontos de coleta. Embora baixos, a média de MOS é maior do que a média encontrada para os Neossolos Flúvicos do entorno de acordo com Schaefer, et al. (2016) (de 0,85 dag/kg) e menor que os Cambissolos (1,42 dag/kg). O ponto de coleta 07 apresentou a maior diferença nos teores de MO entre T1 e T2 enquanto no ponto 06 houve pouco incremento,



**Figura 8:** Acúmulo de MO nos horizontes superficiais dos Tecnosolos (0 a 5 cm)

O níveis de Fe passaram de 183 para 308 mg/dm<sup>3</sup>, classificados como alto de acordo com (Ribeiro et al. 1999). A grande disponibilidade de Fe encontrado no rejeito, é devido à natureza do material hematítico-itabirítico do Quadrilátero Ferrífero (Rosière and Chemale, 2006). Como nem todo minério fica retido no processo de beneficiamento, grande parte que é lavado e compõe o rejeito, quanto maior o teor de Fe concentrados, maior é a perda, ou seja, mais baixas são as recuperações (Luz et al., 2010).

Os metais pesados não essenciais para as plantas como o Pb, Cd e Cr, (Alcântara et al., 2011), não apresentaram grandes mudanças entre os dois tempos analisados com exceção do Pb que caiu de 1,76 para 0,65 mg/dm<sup>3</sup>. De acordo com valores estabelecidos pela resolução CONAMA nº 420/2009 e pelo órgão norte-americano USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) estes elementos estão abaixo das concentração de metais pesados indicados para solos agrícolas, como pode ser analisado na tabela 3. Os valores para estes metais pesados são corroborados por Guerra et.al (2017).

**Tabela 3:** Concentrações máximas de metais pesados em solos

Metais	USEPA	CONAMA
-----mg/kg-----		
<b>Cu</b>	750	68,5
<b>Zn</b>	1400	222,5
<b>Cr</b>	1500	77
<b>Ni</b>	210	37
<b>Pb</b>	150	20,5
<b>Cd</b>	19,5	2

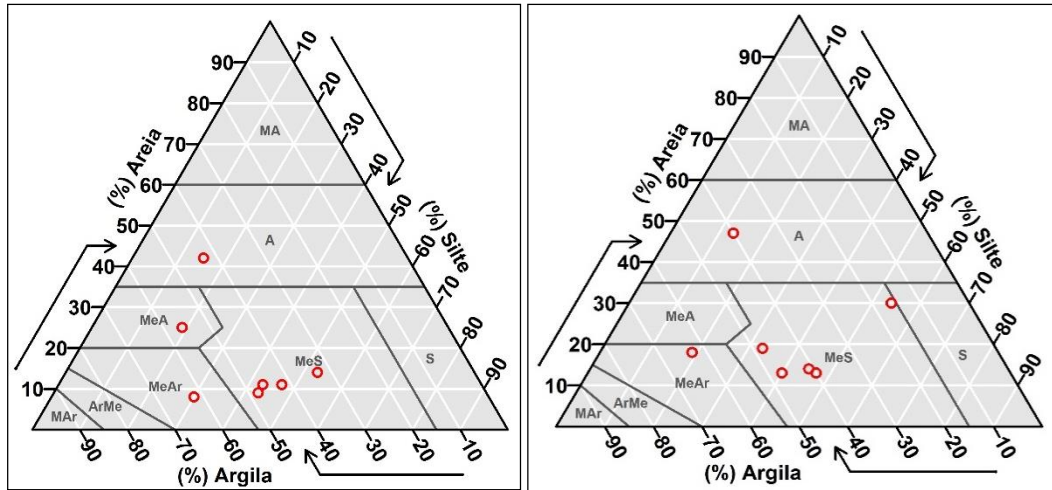
Fonte de dados: Giroto (2007), adaptado

Nas análises físicas, é possível avaliar a alta densidade de partícula do rejeito tanto em T1 como em T2. A alta DP pode ser explicada pela composição mineralógica do rejeito. Os oxi-hidróxidos de ferro, como a hematita, possuem densidade de 5,26 g/cm<sup>3</sup>, e a goethita, com 4,26 g cm<sup>-3</sup>, o que faz elevar as médias (3 e 2,93 g/cm<sup>3</sup> em T1 e T2 respectivamente). Estes valores aproximam-se de valores encontrados por (Schaefer et al., 2015, Silva et al., 2006) nos rejeitos de mineração da mina de Alegria, e da barragem de Fundão, respectivamente. Silva et al. (2006) encontraram valores médios de 3,35 considerando que o campo amostral foi da própria barragem de rejeito, ou seja, sem revolvimento com o solo pelo carregamento da lama como ocorrido no desastre.

Os valores de densidade do solo do rejeito passaram de 2,1 para 1,97 g/cm<sup>3</sup>, os valores altos também podem ser relacionados com a alta densidade e partículas dos minerais presentes na composição do minério explorado. Silva et al. (2006) encontraram valores de 2 g/cm<sup>3</sup> para densidade do solo nos rejeitos do complexo da Alegria.

A textura do rejeito em T1 e T2 é apresentada no triângulo textural proposto pela (EMBRAPA, 2013) na figura 9 com as seguintes correspondências: MA- muito argilosa; A- argilosa; S- siltosa; MeS- média siltosa; MeA- média argilosa; MeAr- média arenosa; ArMe- arenosa média; MAr- muito arenosa.

De maneira geral, os Tecnosolos podem ser considerados como siltosos tanto em T1 como em T2 e ao longo do tempo não houve mudança em sua classe textural.



**Figura 9:** Classificação textural das amostras de rejeito em T1 e T2 respectivamente.

Os solos do entorno são predominantemente arenosos (0,60 e 0,46 kg/kg respectivamente), com baixo teor de silte (0,16 e 0,14 kg/kg). Os Cambissolos apresentam teores mais elevados de argila (0,39 kg/kg) em comparação com os Neossolos (0,23 kg/kg) (tabela 4).

A tabela 4 apresenta a relação das análises químicas e físicas em profundidade para o T2. Foi observado em campo, grande variação da espessura do rejeito. No ponto 05 é necessária uma análise mais crítica, pois foi adicionado uma camada de 35 cm de topsoil como mencionado anteriormente, sendo que, a profundidade de 30 a 50 cm representa o rejeito sob o topsoil.

**Tabela 5:** Análise química e física dos Tecossolos em diferentes profundidades-tempo 2

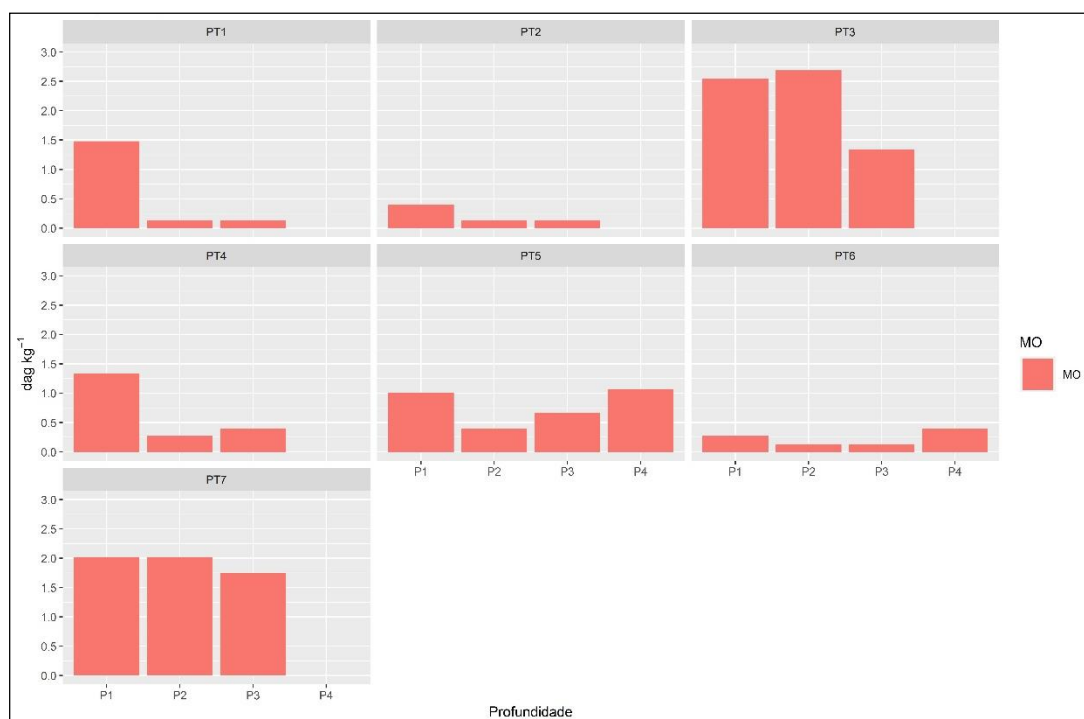
PT	Prof.	pH	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al	t	T	V	MO	P-Rem	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb	Areia	Silte	Argila
		H2O	mg/dm <sup>3</sup>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>				%	dag/kg	mg/L	mg/dm <sup>3</sup>												
P01	0 - 5	7,08	18,5	132	3,15	0,79	0,3	4,28	4,58	93,4	1,5	47,7	0,11	99,4	24	4,1	1,22	0,83	0,3	0,88	0,73	0,12	0,15
	5 - 15	6,78	7,3	56	0,63	0,22	0,3	0,99	1,29	76,7	0,1	39,4	0,72	62	123	0,6	0,92	0,74	0,3	0,57	0,65	0,03	0,31
	15 - 40	6,91	6,8	27	0,97	0,04	0,1	1,08	1,18	91,5	0,1	37,5	0,4	58	85,20	0,5	0,85	0,65	0,3	0,73	0,48	0,40	0,14
P02	0 - 5	7,18	7,3	227	1,04	0,27	0,3	1,89	2,19	86,3	0,4	42,1	1,12	56,3	79,20	1	0,72	0,62	0,2	0,41	0,48	0,40	0,13
	5 - 15	6,79	7,7	98	1,03	0,09	0,3	1,37	1,67	82	0,1	41,4	1,09	54,3	114	0,7	1,01	0,58	0,2	0,44	0,42	0,44	0,14
	15 - 40	7,06	7,2	57	1,31	0,05	0,1	1,51	1,61	93,8	0,1	38,9	0,76	54	109	0,6	0,82	0,52	0,2	0,44	0,63	0,20	0,18
P03	0 - 5	6,58	8,2	87	3,44	1,44	1,5	5,1	6,6	77,3	2,6	15,2	6,51	316	1215	4,5	1,30	2,05	0,4	0,79	0,64	0,28	0,09
	5 - 15	6,2	6,3	62	2,55	0,82	2,4	3,53	5,93	59,5	2,7	12,2	8,26	1152	1574	6,2	1,52	3,14	0,4	1,32	0,6	0,32	0,09
	15 - 40	6,15	6,1	48	1,33	0,52	1,6	1,97	3,57	55,2	1,3	29,2	4,82	460	1063	3,6	1,1	1,51	0,2	0,51	0,39	0,13	0,48
P04	0 - 5	6,03	4,7	53	1,86	0,71	1,3	2,71	4,01	67,6	1,3	32,2	2,81	67,7	668	2,2	1,07	0,91	0,3	0,12	0,38	0,08	0,54
	5 - 15	6,57	5	36	1,31	0,44	0,7	1,84	2,54	72,4	0,3	37,1	2,04	90	574	2,1	1,09	1,04	0,3	0,04	0,39	0,08	0,54
	15 - 40	6,48	7,7	32	0,88	0,43	0,7	1,39	2,09	66,5	0,4	39,8	2,74	453	667	2,6	0,99	1,52	0,3	0,29	0,43	0,19	0,38
P05	0 - 5*	6,19	6,1	100	2,02	0,69	1,2	2,97	4,17	71,2	1	19,2	4,46	48	32,4	3,8	0,99	0,7	0,2	0,42	0,41	0,45	0,14
	5 - 15*	5,9	5,1	39	2,09	0,36	1,3	2,55	3,85	66,2	0,4	10,4	4,73	35,6	31,5	3,1	1,00	0,83	0,2	0,66	0,44	0,44	0,12
	15 - 35*	5,74	3	11	1,98	0,19	1,2	2,2	3,4	64,7	0,7	11,3	4,44	53,6	37,2	2,7	0,96	0,95	0,3	0,84	0,44	0,45	0,12
	35 - 50	5,7	1,7	16	2,32	0,25	1,8	2,61	4,41	59,2	1,1	18,6	5,51	61,5	42,9	4,4	0,77	1,09	0,3	0,93	0,4	0,45	0,13
P06	0 - 5	6,97	7,4	62	1,23	0,19	0,1	1,58	1,68	94	0,3	37,7	0,7	55	67,1	0,8	0,90	0,77	0,3	0,5	0,41	0,53	0,07
	5 - 15	7,07	7,5	22	1,08	0,02	0	1,16	1,16	100	0,1	37	0,78	52,9	120	0,7	1,13	0,77	0,3	0,93	0,42	0,46	0,12
	15 - 25	7,16	6,3	27	1,13	0,02	0	1,22	1,22	100	0,1	35,7	0,72	59,7	112	0,6	1,23	0,73	0,2	0,71	0,15	0,57	0,28
	25 - 65**	5,7	2,4	26	1,04	0,27	1	1,38	2,38	58	0,4	44,3	1,32	51,3	108	1,1	0,54	0,87	0,2	0,29	0,14	0,51	0,35
P07	0 - 5	6,23	7,1	144	2,07	1,13	1,5	3,57	5,07	70,4	2	39,3	0,97	68,7	70,9	2,7	0,85	1,19	0,3	1,48	0,53	0,32	0,16
	5 - 15	5,97	3,8	80	2,08	1	1,9	3,29	5,19	63,4	2	37,5	1,68	60,7	112	2,4	0,97	1,42	0,3	1,15	0,48	0,33	0,19
	15 - 35**	5,55	1	81	1,26	0,9	2,2	2,37	4,57	51,9	1,8	31,7	2,49	37,7	149	0,8	1,15	1,17	0,3	1,28	0,64	0,11	0,25

\* Camada de topsoil \*\*horizonte C de Neossolo Flúvico

Os valores de pH foram variáveis ao longo dos perfis de todos os pontos e coleta. A camada superficial dos Tecnoossolos com topsoil apresentou valor de pH maior que o horizonte subsuperficial de rejeito 6,19 e 5,7, respectivamente. De maneira geral, os valores de P, Ca<sup>2+</sup> K e Mg<sup>2+</sup> tendem a diminuir com a profundidade podendo essa maior concentração no horizonte superficial estar ligado com o acúmulo de matéria orgânica, ao acúmulo de nutriente com as cheias dos rios, com a adubação química da área ou com a presença da vegetação levando ao aporte de nutriente ao solo.

A acidez potencial (H+Al), apresentou-se bastante variável ao longo dos perfis para todos os pontos, sendo maior para o rejeito do que para o topsoil no ponto 05 e maior para o horizonte C do Neossolo Flúvico do que para as camadas de rejeito subjacentes no ponto 07.

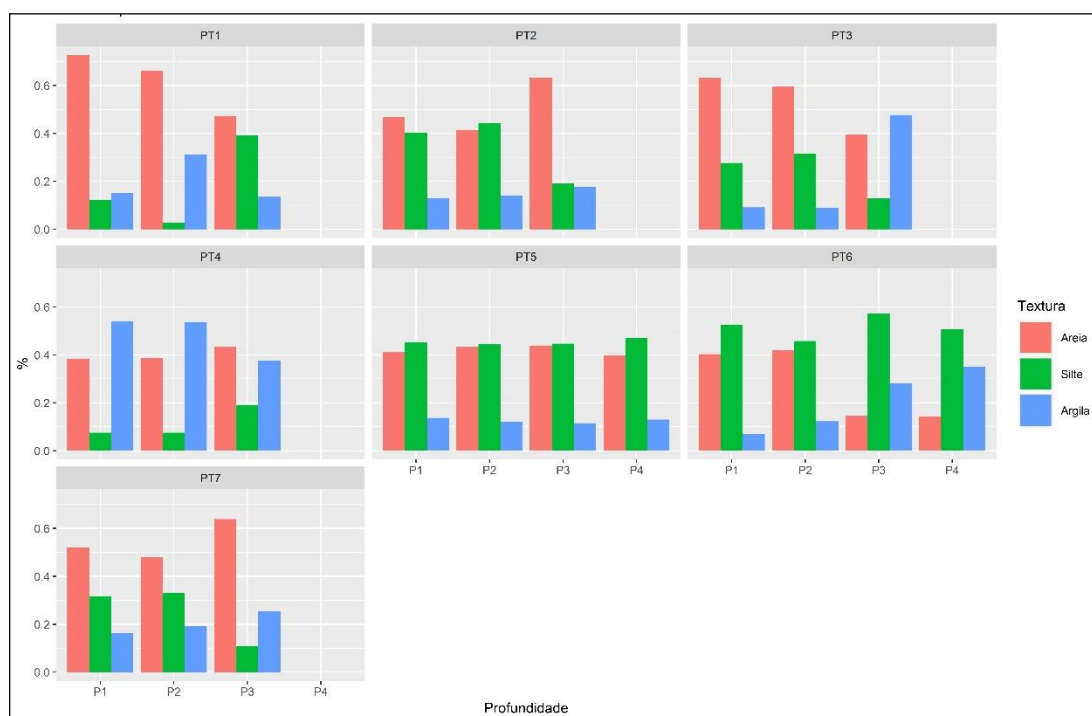
Embora o Fe disponível seja variável em todas as profundidades dos perfis, existe uma tendência de aumento em profundidade. Quanto aos valores de MO no perfil, é possível analisar, que no ponto 01 houve uma grande queda em profundidades abaixo dos primeiros 5 cm (figura 10).



**Figura 10:** Teores de MO em profundidade. Os valores de P1, P2, P3 e P4, referem-se às profundidades correspondentes a cada ponto

No PT2, a diferença de acúmulo de MO torna-se mais sutil, embora todos os horizontes apresentem valores muito baixos (0,4 a 0,1 dag/kg em profundidade) de acordo com Ribeiro, et al. (1999). O PT3 apresenta os maiores valores de MO, o que pode estar associado à localização do ponto, que por ser uma área sujeita à inundação sazonal, pode haver o acúmulo de matéria orgânica carregado pelas águas e depositados nas áreas inundáveis do leito maior. Nos demais pontos, houve pouca variação no acúmulo de MO em profundidade.

Os teores de silte areia e argila podem ser analisadas nos gráficos da figura 11. Em cinco dos sete pontos de coleta na camada superficial (0-5) apresentou maior quantidade de areia sendo a textura classificada como franca e franca arenosa. A fração silte predomina no PT 05 e 06 sendo estas amostras classificadas como franco-franco siltosas.



**Figura 11:** Granulometria dos Tecnosolos em profundidade

A granulometria mais grosseira em superfície (que de fato cresce na maioria dos casos em profundidade), pode indicar a eluviação de argila no perfil, na maioria dos pontos ou a erosão de frações menores como argila e silte no horizonte superficial.

Assim como observado por Silva et al. (2006), é válido ressaltar que a soma dos valores das frações, na composição textural dos materiais, não atinge o valor de 100%. A não detecção de alguma parte das frações pode estar relacionadas à alta

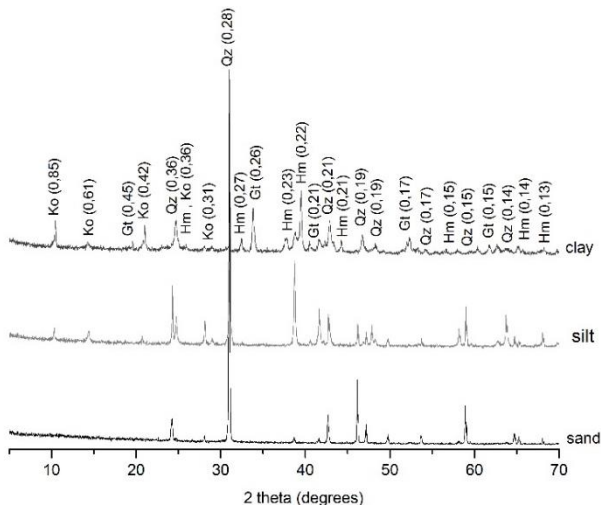
densidade de partículas do rejeito ou, também, a algum problema de floculação das frações argila, já que as demais frações foram obtidas por peneiramento. A metodologia utilizada foi originalmente desenvolvida para solos agrícolas e não para rejeitos e, ou, estéreis da mineração, mas, devido à inexistência de métodos específicos para caracterizar esses materiais, os resultados apresentados podem servir como referencial.

### **4.3. Análises Mineralógicas**

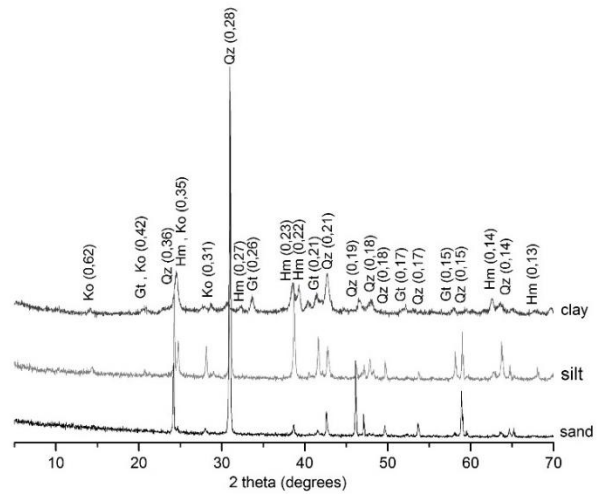
Os difratogramas (figuras 12 a 17) de DRX apresentaram pequenas diferenças entre os três pontos coletados. A mineralogia também não sofreu grandes alterações entre os dois momentos analisados. Foram identificados na lama de rejeito minerais como quartzo (mineral primário dominante na fração areia), mineral secundário 1:1 como caulinita (presente nas frações silte e argila), óxidos de Fe como Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e óxi-hidróxidos de Fe como Goethita ( $\text{FeOOH}$ ), estes dois últimos foram dominantes na fração argila com ocorrência no silte. A ocorrência destes minerais foi comum para todos os pontos amostrados e nos dois tempos.

O destaque para a presença dos óxidos e óxi-hidróxidos de Fe corrobora com Silva et al. (2017) com as análises mineralógicas do rejeito da mina de Alegria. A ocorrência significativa destes minerais é consequência direta da composição do itabirito, explorado na região (Rosière e Chamele, 2001).

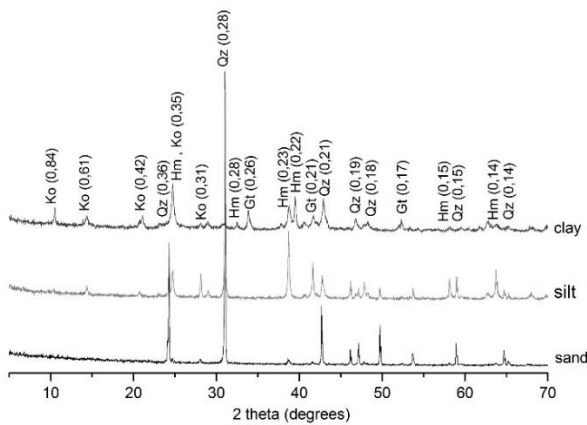
Por causa de sua natureza química e alta área superficial específica, estes minerais atuam com eficiência na adsorção de diversos compostos e ainda apresentam possibilidade de substituição isomórfica do Fe por vários cátions metálicos tornando-os excelentes para recuperação de áreas degradadas pela contaminação (Costa e Bigham, 2009)



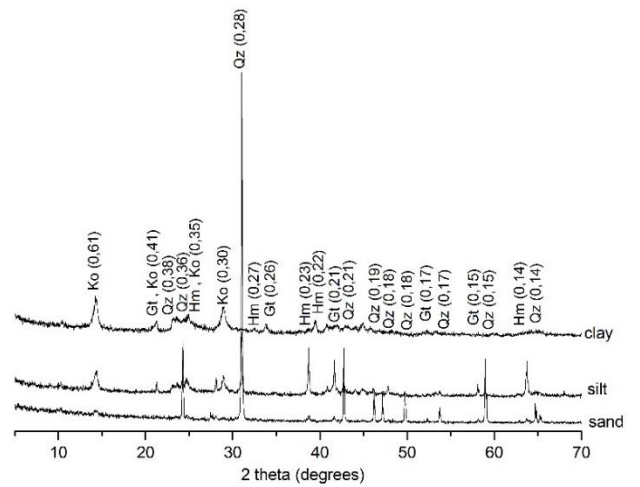
**Figura 12:** difratograma ponto 1 tempo 1



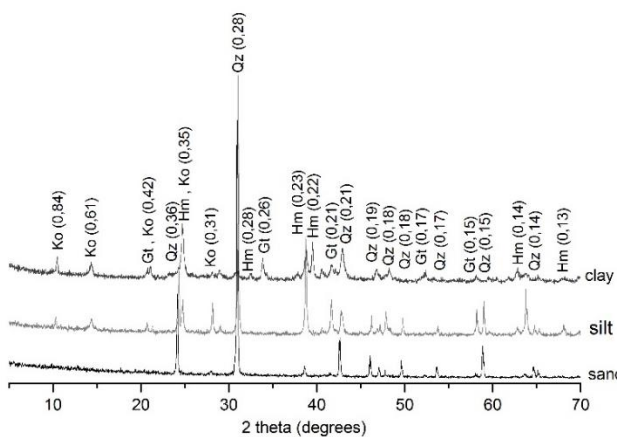
**Figura 13:** difratograma ponto 1 tempo 2



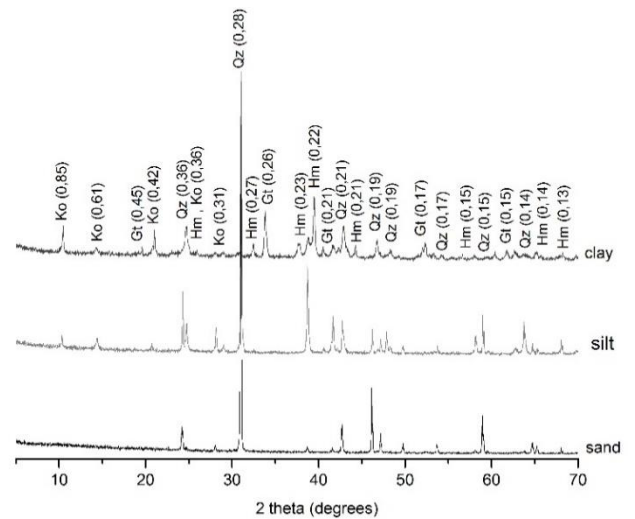
**Figura 14:** Difratograma ponto 4 tempo 1



**Figura 15:** Difratograma ponto 4 tempo 2



**Figura 16:** Difratograma ponto 5 tempo 1



**Figura 17:** Difratograma ponto 5 tempo 2

#### 4. CONCLUSÕES

A partir das propriedades físicas, químicas e mineralógicas identificou-se que os Tecossolos localizados nas planícies fluviais da Bacia do Rio Doce apresentaram poucas restrições químicas e/ou físicas para revegetação. Comparando com os solos do entorno identificou-se que os Tecossolos apresentam pobreza química ligeiramente maior e limitações físicas maiores.

Apesar das melhorias nas propriedades dos solos ao longo do período analisado (2015-2018), ainda são necessárias medidas de intervenção mais prolongadas com o intuito de minimizar os impactos na área atingida pela lama.

Registrou-se potencialidade de melhoria nas condições do solo, principalmente nos horizontes superficiais, o que se torna essencial por fortalecer a atividade biológica, e os processos de recuperação da área.

É necessário novas estratégias de intervenção e experimentos para potencializar os processos de recuperação da área.

#### 5. REFERENCIAL

- Alcântara, A.J. de O., Pierangeli, M.A.P., Souza, C.A. de, Souza, J.B. de, 2011. Teores de As, Cd, Pb, Cr e Ni e atributos de fertilidade de Argissolo Amarelo distrófico usado como lixão no município de Cáceres, estado de Mato Grosso. *Rev. Bras. Geociências* 41, 539–548. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011413539548>
- Araújo, C., 2006. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. UFOP.
- BARRETO, W. Eletroquímica de solos tropicais de carga variável: capacidade da dupla camada elétrica. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1986. 273p. (Tese de Doutorado)
- Chemele, ROSIÈRE, C.A., ENDO, I., 1991. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um Modelo. *Pesqui. em Geociências* 18, 104–127. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21350>
- Cirilo, J.A., 2003. Soluções para o Suprimento de Água de Comunidades Rurais Difusas no Semi-Árido Brasileiro: Avaliação de Barragens Subterrâneas. *Rev. Bras. Recur. Hídricos* 8, 5–20. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n4.p5-24>
- COSTA, A.C.S. & BIGHAM, J., 2009. Óxidos de Ferro, in: *Química e Mineralogia Do Solo; Conceitos Básicos*. Viçosa, MG, p. p 505-573.
- CPRM, 1993. Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-XB-1. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000.
- DEFELIPO, B.V. & RIBEIRO, A.C. Análise química de solo (metodologia). Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1981. 17p. (Boletim de Extensão, 29)
- EMBRAPA, 2013. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, 3a edição. ed. Brasília-DF.
- Espósito, T.J., 2005. Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito –

- Análise da Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação. UNB.
- Ghose, M.K., Sen, P.K., 2001. Characteristics of Iron Ore Tailing Slime in India and Its Test for Required Pond Size. *Environ. Monit. Assess.* 68, 51–61. <https://doi.org/10.1023/A:1010782822753>
- Guerra, M.B.B., Teaney, B.T., Mount, B.J., Asunskis, D.J., Jordan, B.T., Barker, R.J., Santos, E.E., Schaefer, C.E.G.R., 2017. 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 Pollut.* 228, 252. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3430-5>
- Guimarães Moreira, S., Ignácio Prochnow, L., de Castro Kiehl, J., Martin Neto, L., Pauletti, V., 2006. Formas químicas, disponibilidade de manganês e produtividade de soja em solos sob semeadura direta (1). *Rev. Bras. Ci. Solo* 30, 121–136.
- IBAMA, 2015. Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Laudo Técnico Prelim. 1, 2–35. <https://doi.org/2015>
- ICOLD, 2010. ICOLD publications. *Dams Reserv.* 20, 181–181. <https://doi.org/10.1680/dare.2010.20.4.181>
- Jackson, M., 2005. Soil chemical analysis : advanced course : a manual of methods useful for instruction and research in soil chemistry, physical chemistry of soils, soil fertility, and soil genesis. Parallel Press, University of Wisconsin-Madison Libraries.
- Konzen, E.A., Pereira Filho, I.A., Castro Bahia, A.F., Pereira, F.A., 1988. Manejo do esterco líquido de suínos e sua utilização na adubação do milho. Sete Lagoas, MG.
- Luz, A.B., Sampaio, J.A., França, S.C.A., 2010. Tratamento-De-Minerios-5-Edicao. Rio de Janeiro, Brazil. <https://doi.org/10.1176/appi.ps.56.4.420>
- Milonas, J., 2006. Análise Do Processo de Reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro Em Aterro Hidráulico. UNB.
- Miranda Biondi, C., Williams Araújo do Nascimento, C., de Brito Fabricio Neta, A., Rosas Ribeiro, M., 2011. Teores De Fe, Mn, Zn, Cu, Ni E Co em solos de Referência De Pernambuco (1). *Rev. Bras. Ciência do Solo* 35, 1057–1066.
- Monserie, M.F., Watteau, F., Villemin, G., Ouvrard, S., Morel, J.L., 2009. Technosol genesis: Identification of organo-mineral associations in a young technosol derived from coking plant waste materiLSA. *J. Soils Sediments* 9, 537–546. <https://doi.org/10.1007/s11368-009-0084-y>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Quaresma, A. de V., 2014. Monitoramento de microcontaminantes orgânicos por métodos cromatográficos acoplados a espectrometria de massa e inorgânicos por fluorescência de raios-x por reflexão total nas águas da Bacia do Rio Doce. UFOP.
- Ribeiro, 1999. Calagem, Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5a Aproximação. <https://doi.org/631.42>
- Rosière, C.A., Chemale, F., 2006. Itabiritos e Minérios De Ferro de Alto Teor Do Quadrilátero Ferrífero-Uma Visão Geral e Discussão. *Geonomos* 8, 27–43.
- Rossiter, D.G., 2007. Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soil resources. *J. soils sediments* 7, 96–100.

<https://doi.org/10.1065/jss2007.02.208>

- Schaefer, C. E. G. R.; Santos, E. E. Filho, E. I. F.; Assis, I.R., 2016. Paisagens de Lama: Os Tecnosolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana. Boletim da SBCS, Viçosa MG.
- Schaefer, C.E.G.R., Santos, E.E., Souza, C.M. de, Neto, J.D., Filho, E.I.F., Delpupo, C., 2015. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnosolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. Arq. do Mus. História Nat. e Jard. Botânico 24.
- Silva, A.C., Cavalcante, L.C.D., Fabris, J.D., Júnior, R.F., Barral, U.M., Farnezi, M.M. de M., Viana, A.J.S., Ardisson, J.D., Fernandez-Outon, L.E., Lara, L.R.S., Stumpf, H.O., Barbosa, J.B.S., Silva, L.C. da, 2017. Chemical, mineralogical and physical characteristics of a material accumulated on the river margin from mud flowing from the collapse of the iron ore tailings dam in Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil. Rev. Espinhaço 5, 44–53.
- Silva, P., Fontes, F., Paulo, M., Marciano, L., Barros, D., Félix, N., Ferro, M.D.E., Mina, D.A., Alegria, D.A.M.D.E., Silva, G.P., Paulo, M., Fontes, F., 2006. Caracterização Química, Física E Mineralógica De Estéreis E Rejeito Da Mineração De Ferro Da Mina De Alegria, Mariana-MG. Pesqui. Agropecuária Trop. 1, 45–52.
- SMADS, 2010. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida., 1st ed, Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Belo Horizonte.
- Souza Junior, I.G. de, Costa, A.C.S. da, Vilar, C.C., Hoepers, A., 2010. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. Ciência Rural 40, 513–519. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782010000300003>
- Stokes, G.G. (1851) On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums. Transactions of the Cambridge Philosophical Society, Part II, 9, 8-106.
- Takehara, L., 2004. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros. UFRGR.
- Totou, A.R., Pereira, C.A., Adolpho, C., Baltar, M., 2011. Efeito da dispersão em polpas de minérios itabiríticos. Rev. da Esc. Minas 64, 227–232. <https://doi.org/44672011000200015>
- Uzarowicz, Ł., Skiba, S., 2011. Technogenic soils developed on mine spoils containing iron sulphides: Mineral transformations as an indicator of pedogenesis. Geoderma 163, 95–108. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2011.04.008>
- WRB, 2006. World reference base for soil resources 2006. Rome.
- Zikeli, S., Jahn, R., Kastler, M., 2002. Initial soil development in lignite ash landfills and settling ponds in Saxony-Anhalt, Germany. J. Plant Nutr. Soil Sci. 165, 530. [https://doi.org/10.1002/1522-2624\(200208\)165:4<530::AID-JPLN530>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/1522-2624(200208)165:4<530::AID-JPLN530>3.0.CO;2-J)

## UTILIZAÇÃO DE LASER SCANNER PARA ESTIMATIVA DE VOLUME DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM TERRAÇOS FLUVIAIS

### RESUMO

Com a magnitude do desastre do rompimento da barragem de Fundão, uma quantidade significativa de rejeito foi depositada nas planícies fluviais e terraços dos rios Gualaxo/Carmo/Rio Doce, cuja estimativa de volume mais precisa para mensurar estes valores encontra dificuldades metodológicas e operacionais devido a extensão da área. Neste trabalho foi utilizado um método para estimar o volume e a espessura a camada de rejeito, por meio da tecnologia Laser Scanner Aéreo (LSA) e Laser Scanner Terrestre (LST) comparando a microtopografia em alta resolução, utilizando base dados de nuvem de pontos anterior (LSA) e posterior (LST) ao desastre de parte do Rio Gualaxo do Norte. Após realizar a varredura com LST, foi realizado o ajuste da nuvem no programa Riscan Pro e gerados modelos digitais do terreno (MDT) no ArcGis 10.1 utilizando o interpolador Inverse Distance Weighted (IDW). A nuvem LSA, já disponível e ajustada, foi submetida apenas à interpolação. Ao comparar as duas nuvens, foi constatado grande variação do volume de rejeito em relação a área total, cujo valor médio foi de  $0,82 \text{ m}^3$ . Áreas onde houve intervenção pós-desastre para retirada do rejeito também foram analisadas, revelando grandes variações, com média de  $0,79 \text{ m}^3$ , de rejeito removido. A calha do rio também foi analisada e foi observada mudança no curso do canal (proveniente da dinâmica do rejeito sob os cursos d'água), áreas onde houve erosão e grande deposição de rejeito. Antes do desastre o leito menor era de aproximadamente  $44.797 \text{ m}^2$ , sendo que depois do desastre passou a ter  $47.358 \text{ m}^2$ , significando maior solapamento dos seus meandros o que fez que o canal do rio ganhasse  $2.561 \text{ m}^2$ , embora esta área também foi preenchida com rejeito em diferentes níveis formando novos patamares dentro do próprio canal. O volume de rejeito depositado nas planícies fluviais, estimado por meio de tecnologia Laser Scanner, apresentou valores espacialmente muito variáveis, guardando coerência com avaliações de campo. A tecnologia Laser Scanner mostrou-se promissora para um estudo mais amplo, apresentando precisão e escala adequada para tal estudo.

**Palavras-chave:** Tecnosolos, Barragem de Fundão, Laser Scanner Aéreo, Laser Scanner Terrestre

## ABSTRACT

With the magnitude of the dam disruption of the Fundão dam, a significant amount of tailings was deposited in the fluvial plains and terraces of the Gualaxo/Carmo/Rio Doce Rivers, whose most accurate estimate encounters methodological and operational difficulties due to the extension of the area. In this work, a method was used to estimate the volume and thickness of the tailings layer, using the Airbone Laser Scanner (ALS) and Terrestrial Laser Scanner (TLS) technology, comparing high resolution micro topography using a previous point cloud database (ALS) and later (TLS) to the disaster of part of the Rio Gualaxo do Norte. After scanning with TLS, points cloud was performed in the Riscan Pro program and digital elevation model (DEM) were generated in ArcGis 10.1 using the Inverse distance weighted (IDW) interpolator. The ALS cloud, already available and adjusted, was submitted to interpolation only. When comparing the two clouds, a large variation of the waste volume was observed in relation to the total area, whose average value was  $0.82 \text{ m}^3/\text{m}^2$ . Areas where there was post-disaster intervention to remove the tailings were ALS o analyzed, revealing large variations, with a mean of  $0.79 \text{ m}^3/\text{m}^2$  of waste removed. The river channel was ALS o analyzed and a change was observed in the canal course, areas where there was erosion and large deposition of tailings. Before the disaster the river bad was of approximately  $44,797 \text{ m}^2$ , being that after the disaster happened to have  $47,358 \text{ m}^2$ , meaning greater overlap of its meanders what caused that the channel of the river gained  $2,561 \text{ m}^2$ , although this area was ALS o filled with tailings in levels forming new heights within the channel itself. The volume of tailings deposited in the fluvial plains, estimated by means of Laser Scanner technology, presented values very spatially variable, keeping coherence with field evaluations. Laser Scanner technology has shown promise for a broader study, presenting accuracy and scale for such a study.

**Keywords:** Technosols, Fundão Dam, Airbone Laser Scanner, Terrestrial Laser Scanner

## 1. INTRODUÇÃO

O rompimento da barragem de Fundão, localizada no distrito de Bento Rodrigues, no município de Mariana, estado de Minas Gerais, Brasil, no dia 5 de novembro de 2015, ocasionou vazamento de aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de lama de rejeito de minério de ferro (IBAMA, 2015). Esse material rapidamente chegou aos afluentes do Rio Doce, percorrendo 663,2 km até o litoral do Estado de Espírito Santo. Nesse trajeto foi depositado quantidade de rejeito considerável nas margens dos rios, o que afetou a biodiversidade, bem como a economia local, o abastecimento de água para as cidades localizadas às margens destes rios, além de ter provocado 19 óbitos. O assoreamento dos rios também foi evidente

visto a carga de sedimentos carreados e baixa capacidade de vazão dos mesmos (IBAMA, 2015; Schaefer et al., 2015).

A dinâmica fluvial foi altamente alterada, configurando novos meandros e cotovelos de rios. Essas mudanças influenciam significativamente nas áreas de preservação permanente, nas áreas cultiváveis e na pedogemorfologia, indicando um novo ambiente onde os cursos dos rios foram severamente modificados.

Desastres dessa magnitude causam prejuízos sem precedentes, irreversíveis pois superam a capacidade de resiliência do sistema. Projetos emergenciais e de longo prazo, que visam a atenuação de danos, são necessários e podem ser originados de diversas áreas da ciência.

Desta maneira, a geotecnologia pode ser grande aliada no processo de compreensão da espacialização do depósito do rejeito. Mais especificamente o sensoriamento remoto, e a geração de modelos digitais do terreno (MDT) de alta precisão, constituem ferramentas importantes na observação do fenômeno auxiliando sistematicamente no planejamento de ações de recuperação do solo em larga e pequena escala. Recentemente, a tecnologia de escaneamento de superfície (Laser Scanner) possibilita esta análise em escala detalhada (Pike et al., 2009), permitindo maior conhecimento da dinâmica de superfície e de seus elementos.

O sistema de varredura laser terrestre (Terrestrial Laser Scanner – LST e Airborne Laser Scanner LSA) é um método para a determinação de coordenadas tridimensionais de pontos na superfície da terra. Seu funcionamento baseia-se na utilização de um pulso de laser de onda curta que é disparado na direção da superfície e ao atingir a superfície, parte do sinal emitido é refletida na direção do sensor. O equipamento mede tanto a intensidade do sinal de retorno, como também o tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno, que é usado para calcular a distância sensor-objeto, considerando que o pulso laser se propaga à velocidade da luz (Baltsavias, 1999).

O resultado final do processo de medição é um conjunto de dados tridimensionais (X, Y, Z) correspondentes aos pontos na superfície do objeto. Este conjunto de dados é geralmente denominado nuvem de pontos, representada por uma densa concentração de observações no espaço tridimensional (Tommaselli, 2003).

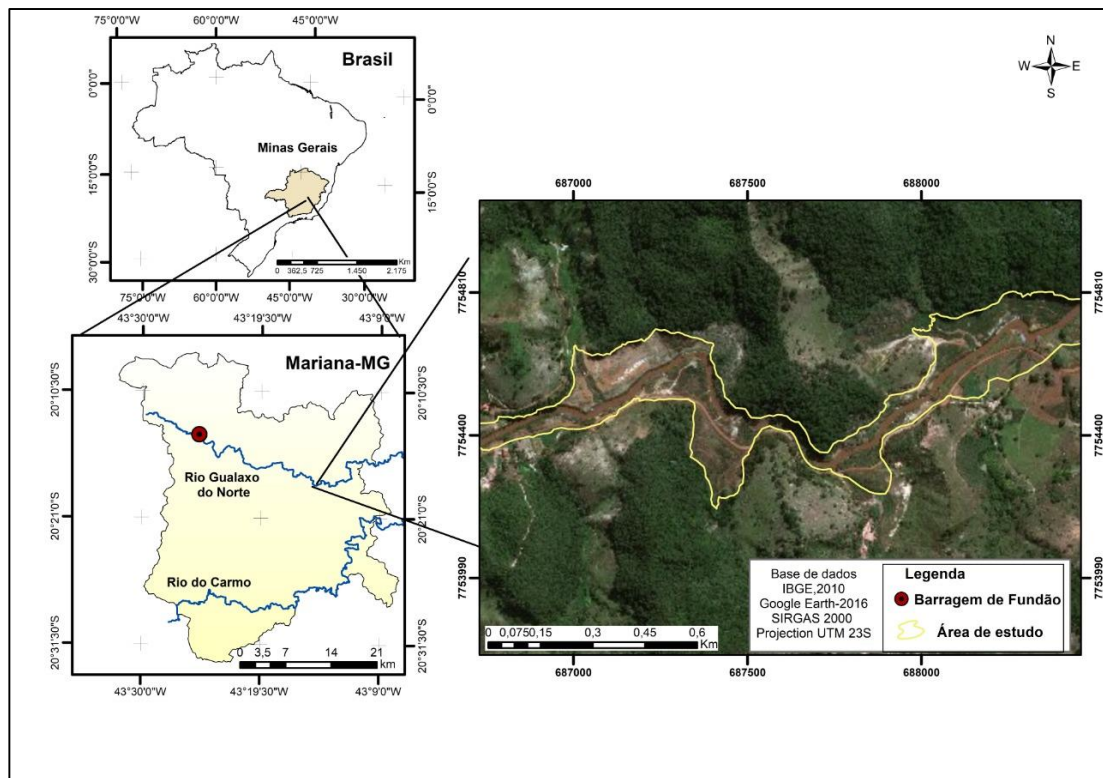
Diante da necessidade conhecer melhor a espacialização do rejeito depositado ao longo dos cursos d'água afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, o objetivo deste estudo foi determinar o volume de rejeitos depositado em um trecho do

rio Gualaxo do Norte por meio da comparação dos modelos digitais de superfícies gerados por laser scanner terrestre e aerotransportado.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo foi selecionada devido à disponibilidade de nuvem de pontos obtido por LSA, do ano de 2011 (anterior ao desastre) o que viabilizou a comparação entre nuvens antes e pós desastre. A área possui aproximadamente 3 quilômetros de extensão e 77.793 m<sup>2</sup> e está situada no Rio Gualaxo do Norte, um dos principais afluentes do Rio Doce, ao leste da cidade de Mariana (figura 1).



**Figura 1:** Localização da área de estudo

A vegetação remanescente da região é floresta semidecidual de Mata Atlântica e se encontra distribuída principalmente em alguns topos de morro e ao longo dos cursos dos rios, em matas ciliares (CPRM, 1993).. A geologia é basicamente formada por depósitos aluvionares Quaternários sobre uma litologia heterogênea: nas partes mais baixas ocorre o Complexo Mantiqueira, composto principalmente por

ortognaisses no extremo leste do Rio Gualaxo do Norte, passando pelo Complexo Acaiaca (gnaisse granulítico), e pela formação Dom Silvério, composta predominantemente por quartzitos, xistos e paragnaisses no setor do Rio do Carmo (CPRM, 1993). Os solos predominantes na região são o Latossolo Vermelho-Amarelo e nos leitos dos rios ocorrem domínio de Argissolos Vermelho-Amarelo e, em menor proporção, Neossolos Litólicos e Cambissolos Háplicos (SMADS, 2010).

Segundo a classificação de Köppen o clima da região da BHRD é dividido em três tipos: Cwb- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, Cwa- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, e, Aw - clima quente com chuvas de verão, sendo a área de estudo classificada como Cwa (Peel et al., 2007).

## **2.2 Laser Scanner**

A varredura LSA do ano de 2011 foi disponibilizada pela empresa VALE e faz parte do acervo digital do Laboratório de Geoprocessamento da Universidade Federal de Viçosa. O equipamento utilizado foi o LSA50 (Leica Geosystems, Suíça), com abertura de 70° e frequência de até 150 kHz. Para atingir a quantidade mínima de 4 pontos/m<sup>2</sup>, foi realizado o voo em altitudes de 2.340 a 3.040 metros.

Para levantamento topográfico da área pós desastre foi utilizado o LST modelo RIEGL VZ 1000, que possui acurácia de 8 mm e precisão de 5 mm. Foi utilizada a frequência de 300 kHz, (panorama 40) sendo que a partir destas configurações o laser consegue capturar pontos com precisão até 450 m de distância.

Para georreferenciamento preciso dos dados LST foi utilizado um equipamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) modelo Leica GS800 que foi instalado próximo à área mapeada para correção geodésica dos dados durante o pré-processamento das nuvens, com base situada na cidade de Belo Horizonte.

Foram realizados trabalhos de campo no mês de outubro de 2016, onde foram selecionados estrategicamente 13 pontos para varredura com LST, de maneira que se obteve um melhor ângulo de visada para cada varredura e assim otimizou-se o pós-processamento dos dados. A localização dos pontos de varredura foi definida visualmente em imagens de alta resolução do Google Earth e com Modelos de Elevação (SRTM) no programa ArcGis 10.1.

### 2.3 Processamento dos dados

Os dados GNSS foram processados no software Leica Geoffice 5.1. Utilizou-se como base a altitude ortométrica e dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). Após referenciar os dados, utilizou-se o programa Riscan Pro. 6.1 para processar a nuvem de pontos para cada ponto de varredura LST. Ainda nesse programa, as nuvens foram sobrepostas e posteriormente aplicados filtros para remoção da vegetação. Pontos abaixo e acima do terreno e objetos alheios a essa pesquisa como edificações, automóveis, etc foram suprimidos. O resultado do processamento foi uma nuvem única de pontos de superfície.

No programa ArcGis 10.1 a nuvem de pontos final foi convertida para o formato raster, com 1 metro de resolução espacial. Esse mesmo procedimento foi realizado com os dados obtidos antes do rompimento da barragem, gerando, portanto dois modelos digitais do terreno de antes e pós desastre. A nuvem de pontos anterior ao desastre já tratada, foi interpolada assim como a nuvem de pontos LST pelo interpolador IDW uma vez que para base de dados densa, interpoladores mais robustos como *Topo to Raster* e *Spline* torna-se irrelevante (Schünemann et al., 2018). Ainda no programa ArcGis os dois modelos foram sobrepostos e obtidos as áreas de remoção e erosão de Tecnosolo sendo posteriormente calculado o volume por área a partir da ferramenta *Surface Difference*.

O canal do rio foi vetorizado, na data anterior e posterior ao desastre para uma análise mais precisa de ganho e perda de área do seu leito menor e calculada as áreas de diferença entre os vetores das diferentes datas.

Para validação das nuvens de ponto (LSA e LST), quando à posição XYZ, foi realizado trabalho de campo na área de estudo e com auxílio de um GPS geodésico, foi identificado 7 pontos independentes para validação dos deslocamentos de posicionamento X, Y e Z. Para comparação do erro, foi calculado o RMSE dos dados a partir da fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n=N} (P_n - O_n)^2}{N - 1}} \quad (1)$$

Onde,  
Pi são os valores preditos;  
Oi são os valores observados  
N são o número de observações

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processamento das nuvens de pontos geradas pelo LST e LSA, o desvio padrão do erro ( $\sigma$ ) dos ajustes variaram de 0,0108 m à 0,0863 m sendo que a média do desvio padrão foi de 0,0306 m. Estes valores estão próximos aos obtidos por Schunemann et.al., (2016) que encontrou  $\sigma$  máximo de 0,0848 no mapeamento das áreas livres de gelo da Antártica marítima por LST. Considerando que a base de dados anterior ao desastre é de 1 m de resolução, este valor torna-se irrisório.

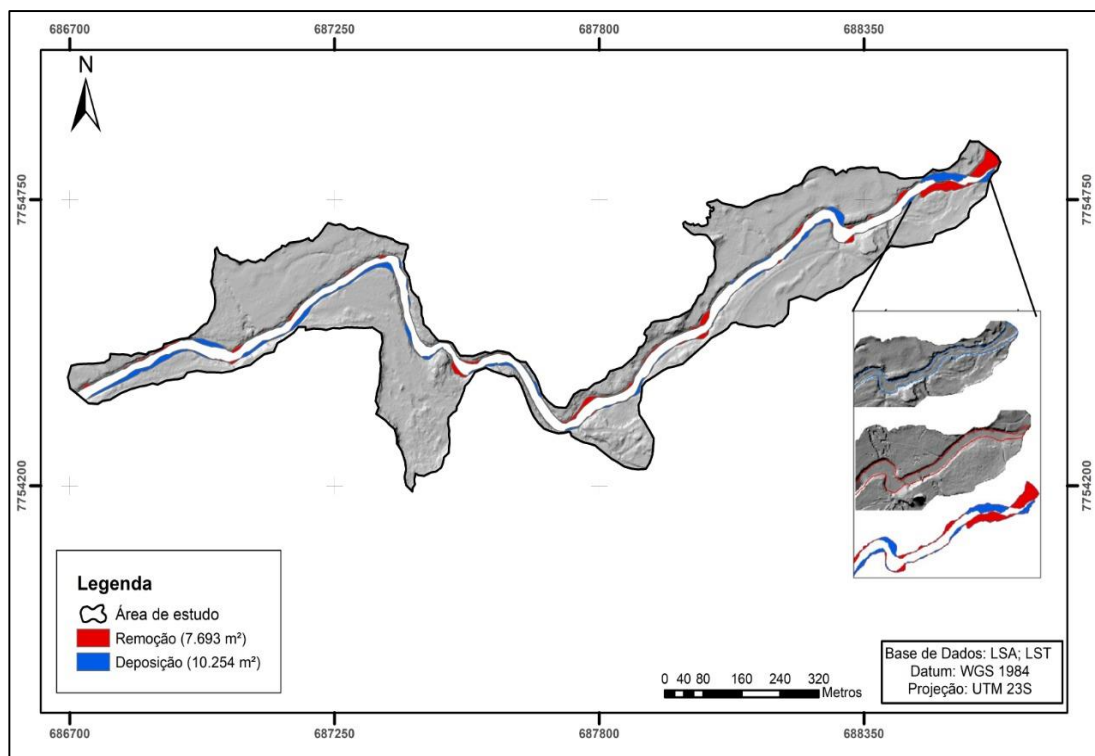
A Tabela 1 mostra o RMSE do posicionamento XYZ do LSA e LST comparados os dados de validação coletados em campo.

**Tabela 1:** RMSE da validação das posições XYZ (m).

LST (X)	LST (Y)	LST (Z)	LSA (X)	LSA (Y)	LSA (Z)
0,19	0,11	0,18	0,74	0,55	0,35

O deslocamento da nuvem de pontos imageada pelo LSA apresenta valores maiores de erro se relacionado ao LST. Isso é aceitável devido ao fato do LSA possuir mais variáveis que influenciam na exatidão do posicionamento como altura de voo, deslocamento, dentro outras (Goodwin et al., 2017).

A Figura 2 apresenta as áreas onde ocorreram erosão e remoção de rejeito na calha do rio. Antes do desastre o leito menor possuía uma área 44.797 m<sup>2</sup>, sendo que depois do desastre passou a ter 47.358 m<sup>2</sup>. Isso significa que, houve maior solapamento dos seus meandros o que fez que o canal do rio ganhasse 2.561 m<sup>2</sup>, embora esta área também foi preenchida com rejeito em diferentes níveis formando novos patamares dentro do próprio canal.



**Figura 2:** Áreas de ganho e perda de solo na calha do Rio Gualaxo do Norte, indicadas pela aproximação da figura os detalhes de retirada e deposição de material.

Em várias partes do rio ocorreram alterações no seu curso, como pode ser observado na Figura 3, onde o assoreamento do meandro força o deslocamento do curso d'água. Isto se comprova por ser uma das áreas de maior erosão do canal, que apesar do leito menor do rio ganhar área (remoção da vegetação e do desnível natural), a mesma também foi preenchida por rejeito, mudando seu curso, o que também pode ser observados na figura 3.



**Figura 3:** Indicação do assoreamento dos meandros. Fonte: Google Earth.

Possivelmente, com o período de chuvas, parte do rejeito acumulado nas novas margens foram carreados pela água, aumentando ainda mais a área de escoamento do

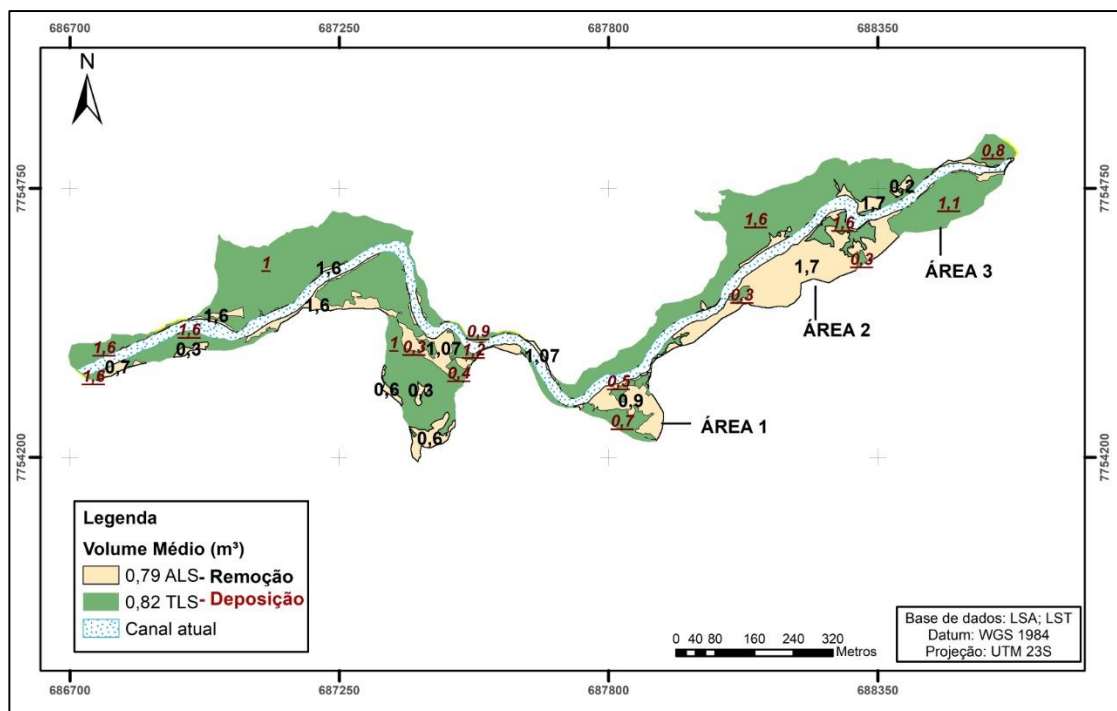
rio. Outro fator de grande ganho de massa no leito menor possivelmente está associado ao seu intenso assoreamento, fazendo com que o rio buscasse novas linhas de escoamento. Esse condição pôde ser constatado nos trabalhos de campo e visualizado na Figura 4.



**Figura 4:** Trechos assoreados do leito menor do rio Gualaxo do Norte em 11/12/2015. Fonte: Google Earth

Avaliando o volume de rejeito nos terraços, foi possível estimar a distribuição do volume por área como demonstrado na Figura 5. A área indicada pela cor verde, representa as áreas onde o MDT obtido pelo LST apresenta altitude acima do LSA, ou seja, áreas onde houve deposição de rejeito e as áreas em amarelo indicam situação inversa, remoção.

Apesar de bastante variável, a média de deposição de rejeito nos terraços foi de  $0,82 \text{ m}^3$  sendo que as áreas de deposição representaram 82,38% da área total de estudo. A média de retirada de material pela empresa responsável pela recuperação foi de  $0,79 \text{ m}^3$  ocupando área de 16,6% da área total.



**Figura 5:** Mapa do volume de rejeito

Embora imediatamente após o desastre, todo o terraço tenha sido preenchido por rejeito, intervenções em algumas áreas para retirada da lama, retaludamento e desassoreamento dos afluentes do rio Gualaxo do Norte, foram realizadas, o que poderia ter gerado as áreas onde o MDT-LSA está acima do MDT-LST (áreas de erosão).

### 3.1 Validação da altitude com dados de campo

A tabela 2 apresenta a coordenada de cada ponto bem como o valor obtido em campo da camada de rejeito e o valor da diferença entre as nuvens LSA e LST (2016).

**Tabela 2:** validação de valores de Z LSA/LST

Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Campo (m)	MDT (m)	Diferença (m)
688445,6893	7754705,5779	0,98	0,61	0,36
688448,8669	7754695,9255	1,25	0,85	0,39
688452,3746	7754681,3916	1,27	0,95	0,31
688439,2220	7754692,3966	1,17	0,72	0,44
688444,4994	7754673,1680	1,17	0,54	0,62
688463,6563	7754676,6167	1,18	0,76	0,41

A média da diferença entre os valores de campo e os valores da diferença entre as nuvens de pontos LSA e LST 2016 é de 42 cm. Esta diferença provavelmente está atrelada ao erro de ajuste e posicionamento das nuvens que foi em média de 0,35 metros para nuvem LSA e 0,18 m para nuvem LST 2016.

As áreas 1 e 2 indicadas na Figura 5, são as maiores áreas de retirada de rejeito após o desastre e a Figura 6 representa uma sequência de imagens da área 1 obtidas do histórico do Google Earth, todas oriundas do satélite Geoeye (composição colorida, com 41 cm de resolução espacial). A primeira imagem da sequência, cerca de 4 meses antes do desastre, mostra a área ainda coberta por vegetação, onde é possível também observar um afluente do Rio Gualaxo do Norte. A imagem seguinte, do dia 12/11/2015, é de 7 dias após o rompimento da barragem de Fundão. Pode ser notado que o vale foi totalmente preenchido pelo rejeito que atingiu inclusive algumas habitações. A imagem do dia 25/04/2016, cerca de 5 meses após o desastre mostra que a área sofreu algumas perdas do material depositado, pois apresentam sulcos ocasionados pelo fluxo da água sobre o rejeito, onde também é possível notar melhor o contorno do afluente que erodiu o rejeito até encontrar novos caminhos de escoamento.

Por fim, é possível analisar na última imagem da sequência, dia 09/08/2016, nove meses após o desastre, que foi realizado forte intervenções na área. A retirada do material de entorno provavelmente ocorreu para evitar novo assoreamento do contribuinte uma vez que este estava cercado por rejeito e além disto encontra-se em cotas mais baixas.

Considerando que a varredura com LST foi realizada no dia 24/08/2016, 15 dias após as obras de retificação do canal e retirada do rejeito, é possível verificar que a área 1 da Figura 5 esteja indicando que a o LST encontra-se abaixo do LSA, com a retirada de em média  $0,9 \text{ m}^3$ .



**Figura 6:** Sequência de imagens indicando a retirada de rejeito. Fonte: Google Earth

A sequência de imagens da Figura 7 representa a área 2 indicada no mapa da Figura 5. A primeira imagem da sequência, assim como na Figura 6, retrata a condição do local 4 meses antes do desastre. É composta por pastagem como a maioria dos terraços adjacentes. A imagem do dia 12/11/2015 também de 7 dias pós desastre mostra a área coberta por rejeito deixando de cobrir apenas a vegetação mais arbustiva, de maior porte. A imagem seguinte, do dia 25/04 já indica intervenção na área. Em ambas situações é possível observar outro afluente (indicado pela seta azul), que também aparece retificado na imagem do dia 25/04/2016. É possível observar alguns sulcos no solo nesta mesma imagem indicando raspagem do terreno bem como uma elevação nas duas últimas imagens indicadas pela elipse vermelha que não aparece nas duas primeiras imagens. Esta elevação indica mais uma vez a raspagem do terreno a sua volta e segundo observações de campo tem aproximadamente 3 metros de altura.



**Figura 7:** Sequência de imagens indicando a retirada de rejeito. Fonte: Google Earth

Ao observar a área 3 indicada no mapa da figura 5, observa-se que o volume de rejeito para aquela área é de  $1,1 \text{ m}^3$ , o que está de acordo com trabalho desenvolvido na mesma área por Santos et.al., 2017 (não publicado) que ao realizar varredura com Radar de Penetração do Solo encontrou valores de  $1,15 \text{ m}^3$  de rejeito para a mesma área.

#### 4. CONCLUSÕES

O volume de rejeito depositado nas planícies fluviais, estimado por meio de tecnologia Laser Scanner, apresentou valores espacialmente muito variáveis, indicando que a deposição seguiu os padrões de relevo. O solapamento dos meandros ficou evidente deixando-os mais pronunciados havendo também a deposição subsequente de rejeito nas áreas solapadas.

As varreduras LSA e LST mostraram-se promissoras para este estudo indicando que a topografia de alta resolução pode ser uma alternativa de análise da paisagem para fornecer dados em grande escala que preceda projetos de técnicas de recuperação

A remoção dos Tecno solos ficou evidente principalmente nas áreas próximas ou onde existem afluentes do Rio Gualaxo do Norte devido à necessidade de reestabelecimento do fluxo natural dos canais.

A validação dos erros XYZ com coordenadas de campo mostrou-se dentro dos

limites aceitáveis de erro de posicionamento do Laser Scanner (0,003 m) e a validação de campo para dados de Z indica que a diferença média nos valores de altitude podem ser em decorrência dos erros de ajuste e posicionamento das nuvens.

## 5. REFERÊNCIAS

- Baltsavias, E., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54, 199–214. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00015-5)
- CPRM, 1993. Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-XB-1. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000.
- Goodwin, N.R., Armston, J.D., Muir, J., Stiller, I., 2017. Monitoring gully change: A comparison of airborne and terrestrial laser scanning using a case study from Aratula, Queensland. *Geomorphology* 282, 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.001>
- IBAMA, 2015. Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Laudo Técnico Prelim. 1, 2–35. <https://doi.org/2015>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Pike, R. J., Evans, I., Hengl, T., 2009. Geomorphometry: a brief guide, in: Elsevier (Ed.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Amsterdam, pp. 3–30.
- Schaefer, C.E.G.R., Santos, E.E., Souza, C.M. de, Neto, J.D., Filho, E.I.F., Delpupo, C., 2015. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecno solos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. *Arq. do Mus. História Nat. e Jard. Botânico* 24.
- Schunemann, A.L., 2016. Geotecnologias para Mapeamento Digital na Antártica Marítima. UFV.
- Schünemann, A.L., Almeida, P.H.A., Thomazini, A., Fernandes Filho, E.I., Francelino, M.R., Schaefer, C.E.G.R., Pereira, A.B., Schünemann, A.L., Almeida, P.H.A., Thomazini, A., Fernandes Filho, E.I., Francelino, M.R., Schaefer, C.E.G.R., Pereira, A.B., 2018. High-resolution topography for Digital Terrain Model (DTM) in Keller Peninsula, Maritime Antarctica. *An. Acad. Bras. Cienc.* 90, 2001–2010. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201820170296>
- SMADS, 2010. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida., 1st ed, Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Belo Horizonte.
- Tommaselli, A.M.G., 2003. Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância. *GEODÉSIA Online-Revista da Comissão Bras. Geodésia* 4.

## **ESTIMATIVA DE VOLUME DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM TERRAÇOS FLUVIAIS POR MEIO DE TECNOLOGIA LiDAR**

### **RESUMO**

Com o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015, grande volume de rejeito de minério de ferro foi depositado nos terraços dos afluentes e do próprio Rio Doce. O Rio Gualaxo do Norte, localizado à jusante da barragem de Fundão foi o primeiro e mais severamente afetado, tendo seus terraços em quase sua totalidade cobertos por uma camada considerável de Tecnossolo. Conhecer as novas condições do ambiente, torna-se essencial para o planejamento de técnicas de recuperação mais efetivas e condizentes com as alterações do meio. Diante disso, este trabalho teve como objetivo mensurar a camada e o volume de rejeito de um trecho do Rio Gualaxo do Norte por meio de topografia de alta resolução com tecnologia LiDAR, tanto com utilização de sensores terrestres (Laser scanner terrestre-LST), como aerotransportado (Laser scanner aerotransportado-LSA). Para tanto, foram utilizadas uma base de dados LSA anterior ao rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG) e duas bases LST escaneadas em 2016 e 2018. Após a aplicação de filtros no programa Riscan, foi utilizado o programa CloudCompare para operações entre nuvem de pontos. Foi observado o depósito médio de 1,17 m<sup>3</sup> de rejeito nos terraços onde 32% da área de deposição possuía uma camada com espessura de 0,5 a 1 metro de rejeitos de mineração, com um volume de 0,74 m<sup>3</sup>. Ao analisar a atual situação dos terraços comparando as nuvens de 2016 e 2018, foi possível observar um acréscimo de material em torno de 0,99 m<sup>3</sup>, provavelmente oriundo da adição de topsoil no local, onde 37% da área a camada de Tecnossolo variou de 0 a 0,5 metros tendo um total de 0,27 m<sup>3</sup>. A tecnologia LiDAR mostrou-se promissora para cálculo de volume e camada de Tecnossolo nos terraços fluviais, sendo este instrumento promissores no auxílio da recuperação das áreas afetadas pelo desastre.

**Palavras-chave:** Tecnossolos; Laser Scanner Terrestre; Laser Scanner Aéreo

### **ABSTRACT**

With the disruption of the Fundão dam in November 2015, large volumes of iron ore tailings was deposited on the tributaries and Rio Doce itself. The Rio Gualaxo do Norte, located downstream of the Fundão dam was the first and most severely affected, with its terrace almost entirely covered by a considerable layer of Technosols. Knowing the new conditions of the environment becomes essential for the planning of recovery techniques more effective and consistent with the changes of the environment. The objective of this work was to measure the layer and the tailings volume of a section of the Rio Gualaxo do Norte by means of high-resolution topography with LiDAR technology and the use of Terrestrial Laser Scanner (TLS) and Airbone Laser Scanner (ALS). In order to do so, a pre-disaster ALS database and two TLS databases scanned in 2016 and 2018 was used. After the application of filters in the Riscan program, the CloudCompare program was used for operations between cloud of points and it was

possible to observe the deposit of 1,17 m<sup>3</sup> of tailings on the terraces where 32% of the deposition area had a layer of 0.5 to 1 meter tail with a volume of 0.74 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. When analyzing the current situation of the terraces comparing the clouds of 2016 and 2018, it was possible to observe an accumulation of material 0.99 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> probably coming from the addition of topsoil in the place where 37% of the deposition area the layer of Technosols ranged from 0 to 0.5 meters having 0.27 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. The LiDAR technology was promising for the calculation of the volume and layer of Tecnosolo in the fluvial terraces and these promising instruments are in the aid of the recovery of the areas affected by the disaster.

**Keywords:** Technosols; Terrestrial Laser Scanner; Airbone Laser Scanner

## 1. INTRODUÇÃO

O rompimento da barragem de Fundão no distrito de Bento Rodrigues, no município de Mariana-MG no dia 5 de novembro de 2015, levou ao derramamento de aproximadamente 50 milhões de metros cúbicos de lama de rejeito de minério nos afluentes e no próprio Rio Doce (IBAMA, 2015). O rejeito percorreu 663,2 km até o litoral do Estado de Espírito Santo, e parte foi depositada nas margens dos rios, principalmente do Gualaxo do Norte, afetando severamente a biodiversidade e os solos dos antigos terraços desses rios. O assoreamento dos leitos também foi evidente visto a carga de sedimentos carregados e baixa capacidade de vazão dos mesmos (IBAMA, 2015; Schaefer et al., 2015).

Desastres dessa magnitude causam prejuízos sem precedentes, irreversíveis pois superam a capacidade de resiliência do sistema. Contudo, medidas que auxiliem na avaliação e na recuperação do ecossistema podem ser tomadas e são extremamente necessárias visto seu impacto ambiental, econômico e social. Projetos emergenciais e de longo prazo, que visam a atenuação de riscos e danos, são necessários e podem partir de diversas áreas da ciência.

No âmbito da ciência do solo, o conceito de Tecnosolos, como solos que se desenvolvem de substratos decorrentes da atividade antrópica, inclusive da mineração, oferece uma moldura conceitual útil na compreensão do desastre. Desde que foram incluídos na última versão da Base Referencial de Solos do Mundo (World Reference Base For Soil Resources – WRB) (2006), várias pesquisas tem se dedicado ao tema do estudo da transformação de materiais tectogênicos (lixões, pilhas de rejeito, barragens, pilhas de estéril, cinzas de usinas, deposições orgânicas tóxicas, escória siderúrgica,

lama de processamento industrial, entre outras). Segundo IUSS-Working Group WRB (2006), para ser classificado como Tecnosolos, o material deve conter mais de 20% de material tectogênico nos primeiros 100 cm. Embora sejam mais comuns em áreas urbanas, tem sido cada vez mais detectados em larga escala em áreas rurais, onde representam as maiores áreas contaminadas do planeta (Rossiter, 2007).

Em conjunto com a evolução das práticas relacionadas com a Ciência do Solo, a geotecnologia tornou-se grande aliada no processo de compreensão da espacialização de classes e atributos dos solos. Mais especificamente o sensoriamento remoto e a utilização de imagens de satélite bem como modelos do terreno de alta precisão constituem ferramentas importantes na observação do fenômeno auxiliando sistematicamente no planejamento de ações de recuperação do solo em larga e pequena escala.

Ferramentas de geotecnologias são utilizadas de diversas formas para auxiliar no estudo ambiental a fim de entender a paisagem e suas dinâmicas. Recentemente, a tecnologia de escaneamento de superfície (Laser Scanner) possibilita esta análise em pequena escala, permitindo uma maior conhecimento da dinâmica de superfície e de seus elementos.

O sistema de varredura laser utiliza a tecnologia denominada de Lidar (*Light Detection and Ranging*). Essa tecnologia, foi projetada para medir coordenadas tridimensionais de pontos em uma superfície, baseando-se na emissão de um pulso laser, tendo como instrumentos básicos versões terrestres (LST) e aerotransportado (LSA) (Giongo et al., 2010).

O sistema de varredura por meio dos instrumentos LSA e LST baseiam-se na utilização de um pulso de laser que é disparado na direção da superfície. Ao atingir a superfície, parte do sinal emitido é refletida na direção do sensor. O sensor mede tanto a intensidade do sinal de retorno, como também o tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno, que é usado para calcular a distância sensor-objeto, considerando que o pulso laser se propaga à velocidade da luz (Baltsavias et.al., 1999).

O resultado final do processo de medição é uma nuvem de pontos, que compreende uma densa concentração de observações no espaço tridimensional. A resolução da nuvem de pontos, que determina a distância entre os pontos coletados pode ser fixada antes da varredura (Tommaselli, 2003).

De acordo com Passalacqua et al. (2015) a disponibilidade de dados topográficos de alta resolução vêm revolucionando a maneira como estudar a transferência de massa e energia através da paisagem, onde, essas características podem ser quantificadas com precisão e alta resolução espacial nos quais muitos processos hidrológicos, geomorfológicos e ecológicos ocorrem através da diferenciação de conjuntos de dados adquiridos em momentos diferentes. Ainda segundo esses autores.

Ainda segundo os autores, um dos maiores desafios da tecnologia LSA e LST é a incerteza de varredura em locais de densa vegetação, onde o feixe não consegue penetrar, assim como em áreas encharcadas, uma vez que estes sistemas operam na faixa do infravermelho no espectro eletromagnético (NIR) que é rapidamente atenuado ou absorvido pela água.

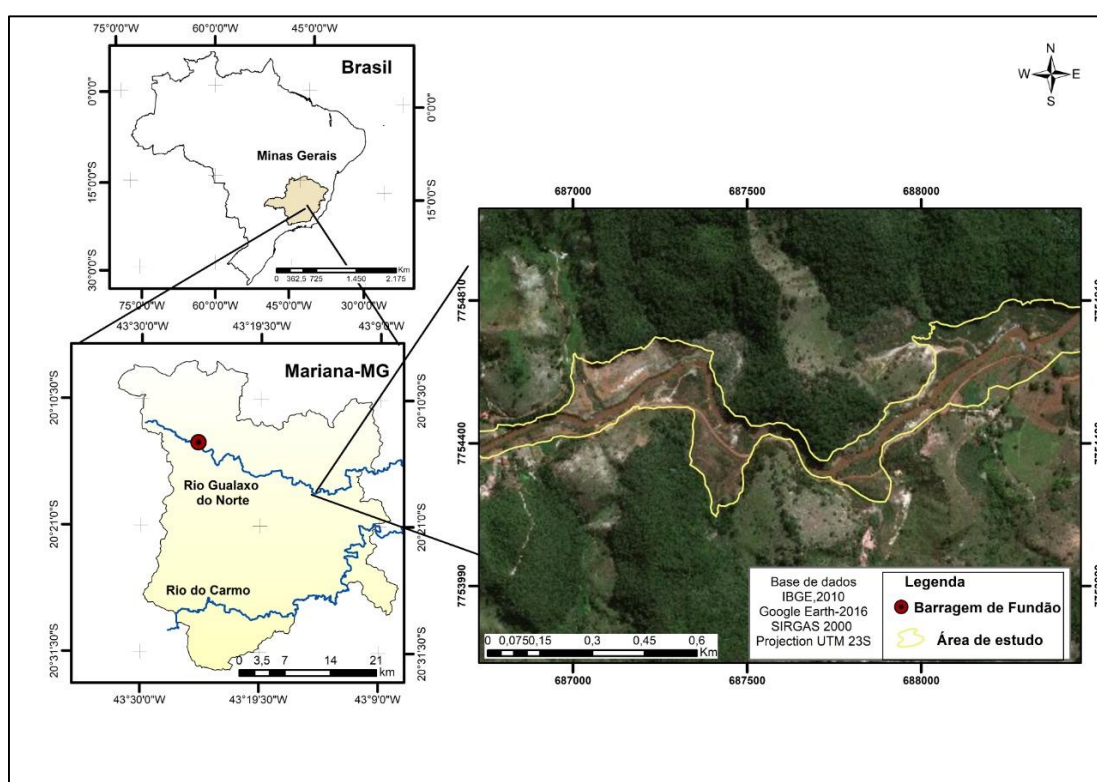
Lague et al. (2013) e Passalacqua et al. (2015) utilizaram o Laser Scanner como ferramenta de monitoramento de erosão com base na comparação direta de nuvens de pontos de diferentes datas. Para tanto, criaram um algoritmo de comparação baseada na rugosidade de superfície em sistemas tridimensionais e na medição da variação de superfície ao longo da direção normal com cálculo de intervalo de confiança. Após a geração de mapas de incerteza para o modelo, chegaram à conclusão que as incertezas do modelo estão relacionadas com o erro de registro do ponto de nuvem e superfícies rugosas.

Informações sobre o volume e a espessura da camada de rejeito de minério de ferro ao longo dos terraços podem ser essenciais para o planejamento de técnicas de recuperação dos Tecno solos. Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar as alterações na superfície em área afetada pela deposição de rejeitos de mineração oriundas do rompimento da barragem de Fundão, tanto antes e após o acidente, bem como as modificações após a implementação de ações de recuperação, utilizando nuvens de pontos geradas por sistemas de varredura por laser.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

A área de estudo foi selecionada devido à disponibilidade de nuvem de pontos obtido por LSA, do ano de 2011 (anterior ao desastre), o que viabilizou a comparação entre nuvens antes e após o desastre. A área possui aproximadamente 3 quilômetros de extensão e 50.000 m<sup>2</sup>. Está situada nas margens do Rio Gualaxo do Norte, um dos afluentes do Rio Doce mais afetado pelos rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão (Figura 1).



**Figura 1:** Localização da área de estudo

A vegetação remanescente da área e seu entorno é floresta semidecidual (de Mata Atlântica) e encontra-se distribuída principalmente em alguns topos de morro e ao longo do curso dos rios, em matas ciliares (CPRM, 1993). A Geologia é basicamente formada por depósitos aluvionares Quaternários sobre uma litologia heterogênea: nas partes mais baixas ocorre o Complexo Mantiqueira, composto principalmente por ortognaisses no extremo leste do Rio Gualaxo do Norte, passando pelo Complexo Acaiaca (gnaisse granulítico), e pela formação Dom Silvério, composta predominantemente por quartzitos, xistos e paragnaisses no setor do Rio do

Carmo (CPRM, 1993). Os solos predominantes na região são Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos Flúvicos (SMADS, 2010).

Segundo a classificação de Köppen o clima da região da BHRD é dividido em três tipos: Cwb- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões frescos, Cwa- clima tropical de altitude com chuvas de verão e verões quentes, e, Aw - clima quente com chuvas de verão, sendo a área de estudo classificada como Cwa (Peel et al., 2007).

## **2.2 Varreduras com Laser Scanner**

A varredura LSA foi realizada no ano de 2011 por empresa contratada pela VALE S.A. e foi posteriormente disponibilizada ao Laboratório de Geoprocessamento da UFV (LABGEO-UFV). O equipamento utilizado foi o LSA-50 (Leica Geosystems, Suíça), com abertura de 70° e frequência de até 150 kHz. Para atingir a quantidade mínima de 4 pontos/m<sup>2</sup>, foi realizado o voo em altitudes variando entre 2.340 a 3.040 m.

Para levantamento topográfico da área pós desastre foi utilizado o LST modelo RIEGL VZ-1000, que possui acurácia de 8 mm e precisão de 5 mm. Foi utilizada a frequência de 300 kHz, (panorama 40) sendo que a partir destas configurações o laser consegue capturar com precisão até 120.000 pontos/segundo a 450 m de distância .

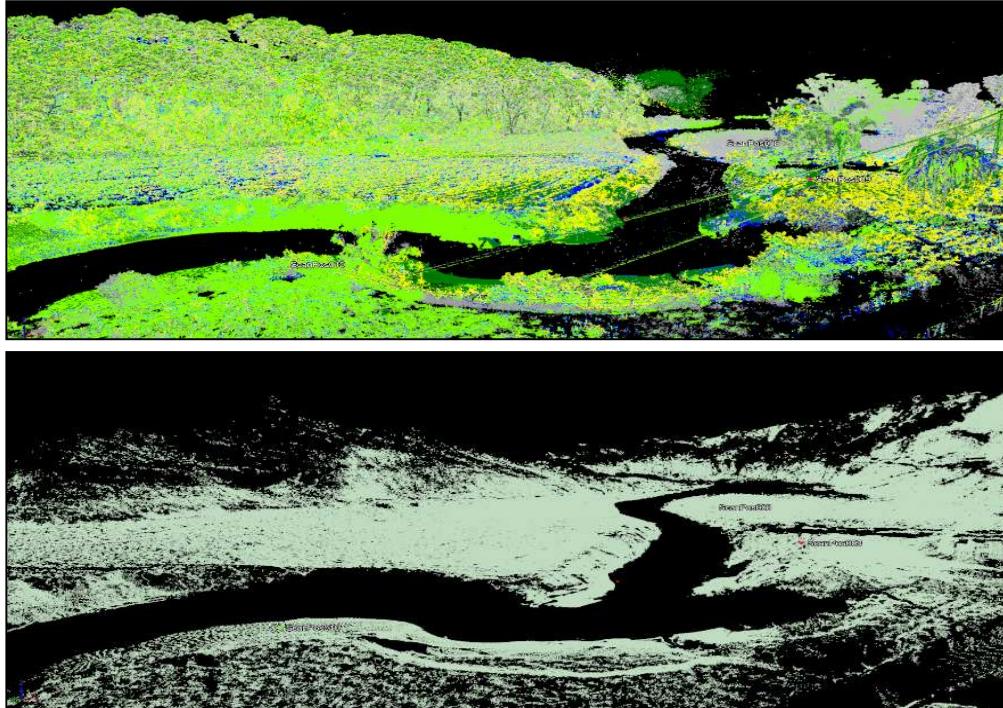
Foram realizadas duas varreduras com LST, a primeira no mês de outubro de 2016 e a segunda em dezembro de 2018 a fim de avaliar as modificações nos terraços no intervalo de aproximadamente de dois anos.

Para georreferenciamento preciso dos dados LST foi utilizado um equipamento GNSS (Global Navigation Satellite System) modelo Leica GS8 Plus, que foi instalado na parte superior do LST durante o levantamento das nuvens.

### **2.2.1 Processamento dos dados LSA e LST**

Os dados GNSS foram processados no software Leica Geoffice 5.1. Utilizou-se como base a altitude ortométrica e dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) existente na cidade de Belo Horizonte (MGBH- código SAT 93922). Após processar os dados, utilizou-se o programa Riscan Pro. 6.1 para o registro e ajuste das nuvens de pontos para cada varredura. Posteriormente foram aplicados filtros para remoção da vegetação, pontos abaixo do

terreno e objetos que não representassem a superfície. O resultado do processamento foi uma nuvem única de pontos para os anos de 2016 e 2018. A figura 2 representa parte do terreno com e sem filtros respectivamente.



**Figura 2:** Parte da nuvem de pontos sem e com a passagem de filtros respectivamente.

Para validação das nuvens (LSA e LST), de ponto quando à posição XYZ, foi realizado trabalho de campo na área de estudo e com auxílio de um GPS geodésico, sendo identificados sete pontos para validação dos deslocamentos de posicionamento X, Y e Z no ano de 2016 e 2018. Para comparação do erro, foi calculado o RMSE dos dados a partir da fórmula:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{n=N} (P_n - O_n)^2}{N - 1}} \quad (1)$$

Onde,

$P_n$  são os valores preditos;

$O_n$  são os valores observados

$N$  são o número de observações

Para avaliar a perda e/ou ganho de material, as nuvens foram processadas no programa CloudCompare versão 2.10. Foram feitas operações de subtração entre as nuvens de 2011 (LSA) e de 2016 (LST), com o objetivo de analisar a espessura da camada e o volume de rejeito depositados nos terraços em decorrência do desastre. Posteriormente, foi realizado operações entre a nuvens geradas somente pelo LST de 2016 e 2018, a fim de avaliar possíveis áreas de erosão e/ou adição de rejeito e topsoil bem como outras modificações antrópica em decorrência de obras de recuperação das áreas afetadas.

Para realização das operações entre nuvens de ponto, não foram realizadas interpolações, portanto, apenas áreas onde houvessem pontos em comum entre as nuvens no espaçamento de 1 m<sup>2</sup> foram computados. Estas condições foram determinadas a fim de minimizar ao máximo erros gerados pela interpolação de rasters. Após realizadas as comparações entre as nuvens, as mesmas foram exportadas no formato “TIF” para o programa ArcGis 10.6 onde foram calculados o volume de rejeito e topsoil depositado e/ou retirado da área para cada intervalo de espessura de camada de rejeito.

A validação do eixo Z foi validada através da conferência em campo da espessura da camada de rejeito. Para isso, foram abertos 7 perfis no rejeito até seu contato com solo. Posteriormente os valores de profundidade foram comparados com a espessura da camada gerado pela diferença da nuvem antes e posterior ao desastre.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Ajuste e processamento das nuvens

Após o ajuste fino entre as nuvens geradas pelo LST de 2016 e 2018, foram gerados automaticamente no programa Riscan Pro o desvio padrão dos erros de ajuste para as posições XYZ entre os scans do mesmo ano, descritos na tabela 1.

**Tabela 1:** Erros estimados das posições XYZ

Nuvens	( $\sigma$ ) mínimo(m)	( $\sigma$ ) máximo (m)	( $\sigma$ ) médio (m)
2016	0,0108	0,0863	0,0306
2018	0,0151	0,0471	0,0294

Estes valores estão próximos aos obtidos por Schunemann et al. (2017), que encontraram  $\sigma$  máximo de 0,0848 m no mapeamento das áreas livres de gelo da Antártica marítima por LST. Considerando que a base foi processada em células de 1 m, este valor torna-se irrisório.

A Tabela 1 mostra o RMSE do posicionamento XYZ do LSA e LST comparados aos dados de validação coletados em campo em centímetros.

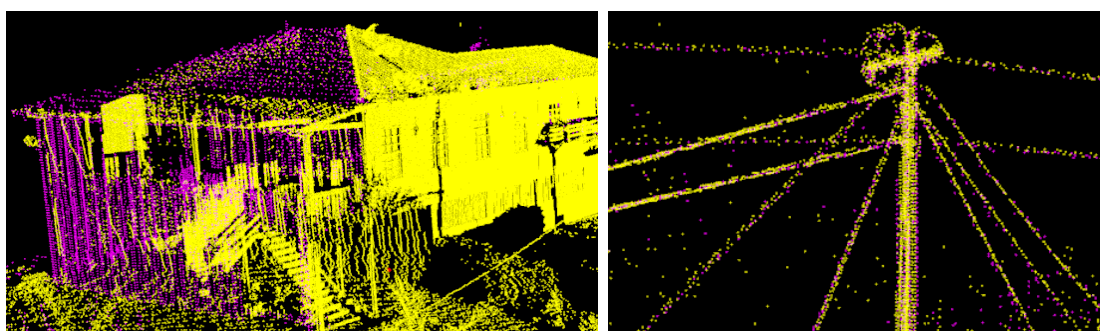
**Tabela 1:** RMSE da validação das posições XYZ (metros)

LST (X)		LST (Y)		LST (Z)		LSA (X)	LSA (Y)	LSA (Z)
2016	2018	2016	2018	2016	2018	2011	2011	2011
0,19	0,17	0,11	0,15	0,18	0,14	0,74	0,55	0,35

O deslocamento da nuvem de pontos imageada pelo LSA apresenta valores maiores de erro em detrimento do LST. Isso é aceitável devido ao fato do LSA possuir mais variáveis que influenciam na exatidão do posicionamento como altura de voo, deslocamento e velocidade da aeronave, dentre outros (Goodwin et al., 2017; Passalacqua et al., 2015).

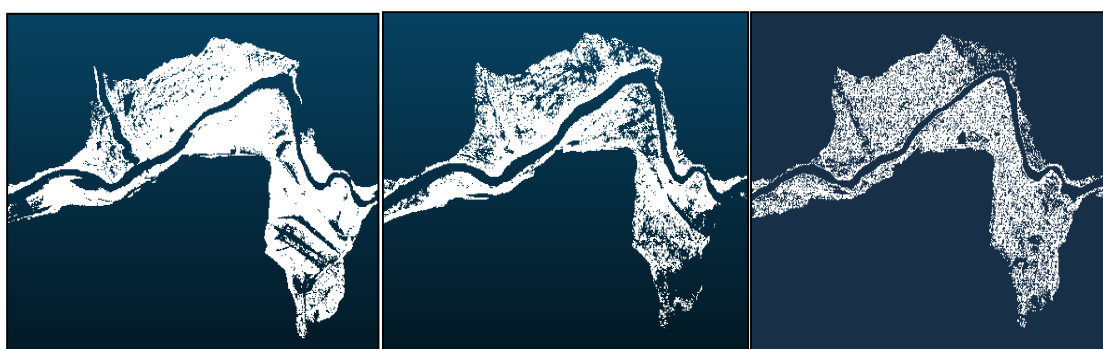
Foi avaliado também o ajustamento entre as nuvens. Para tanto, foram selecionados 10 pontos em comum entre LST 2016 e 2018 onde não fosse possível haver modificações no eixo Z como estruturas de casas, postes e pontes. Este erro foi calculado apenas para as nuvens LST, uma vez que a nuvem LSA já submetida a filtros de elementos externos ao terreno não apresentou estruturas físicas satisfatórias para tais cálculos.

O erro médio de ajustamento no eixo X entre as nuvens foi em média de 0,20 m, enquanto que tanto para Y como para Z foi de 0,30 m. As figuras abaixo representam o alinhamento entre as varreduras das nuvens de 2016 e 2018.



**Figura 3:** Alinhamento entre as nuvens de 2016 (roxo) e 2018 (amarelo)

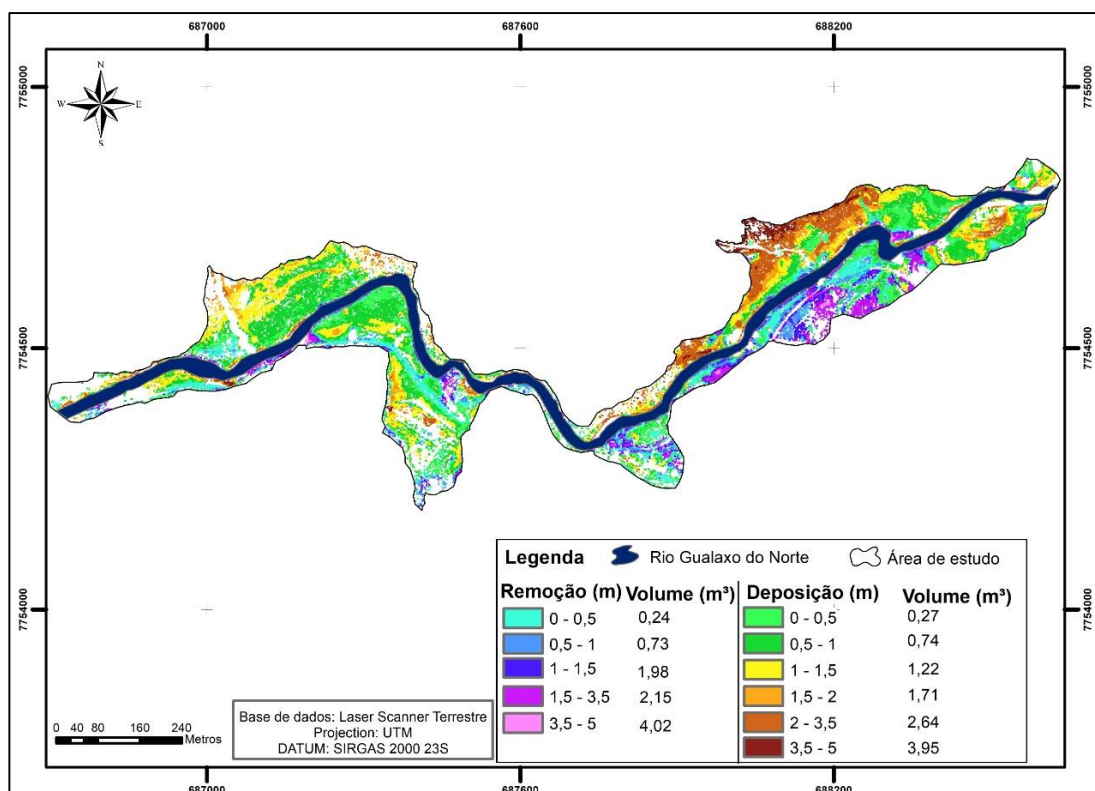
Após a limpeza e união dos scans, foi gerado uma única nuvem de pontos para 2016 e outra para 2018. Houve uma diferença significativa de número de pontos entre as três nuvens. A nuvem LST de 2016, possui 56 milhões de pontos, enquanto a nuvem de 2018 este número foi de aproximadamente 30 milhões. Essa diferença se deu pela quantidade significativamente maior de vegetação na área, impossibilitando a penetração do laser no solo no LST no ano de 2018. A nuvem LSA contém aproximadamente 63 mil pontos, quantidade inferior devido provavelmente à altura de voo estabelecida e as configurações de varredura. A figura 4 representa parte das 3 nuvens já processadas, onde é nítida a diferença na densidade de pontos.



**Figura 4:** Parte da nuvem LST 2016, 2018 e LSA respectivamente

### **3.2 Espacialização do rejeito nos terraços fluviais**

A figura 5 apresenta a espacialização da camada de rejeito nos terraços fluviais derivado da subtração entre a nuvem LSA anterior ao desastre e a nuvem LST de 2016, posterior ao desastre.



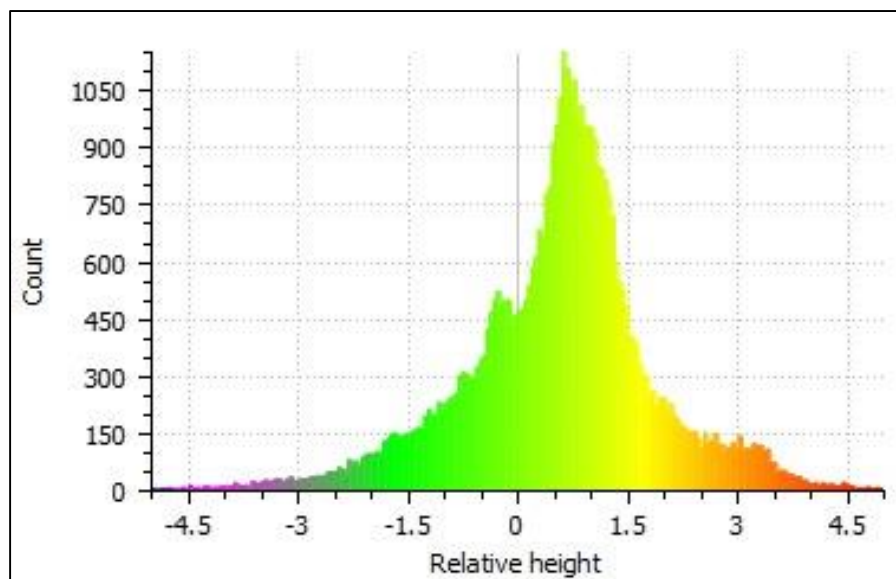
**Figura 5:** Camada de rejeito depositada e retirada nos terraços fluviais de parte do Rio Gualaxo do Norte.

O volume total de deposição estimado foi de 39.294 m<sup>3</sup> em uma área de 33.570 m<sup>2</sup>, obtendo-se uma média de 1,17 m<sup>3</sup> para a área de estudo. A área de deposição representa 68% da área total de estudo (área relativa). É possível observar na figura 5 que há uma predominância de deposição no intervalo da camada de 0,5 a 1 metro, o que corresponde a 32% total da área relativa com 0,27 m<sup>3</sup> de rejeito, enquanto a faixa entre 1 a 1,5 metros correspondem a 23% com 1,22 m<sup>3</sup>, a faixa entre 0 a 0,5 metros a 20%, e a faixa entre e 1,5 a 2 metros corresponde a 10% (Tabela 1).

**Tabela 1:** Espessura da camada removida por área relativa

Deposição (m)	Área relativa (%)	Remoção (m)	Área relativa (%)
0 a 0,5	20	0 a 0,5	30
0,5 a 1	32	0,5 a 1	19
1 a 1,5	23	1 a 1,5	32
1,5 a 2	10	1,5 a 3,5	17
2 a 3,5	13	3,5 a 5	2
3,5 a 5	2	5 a 3,5	1

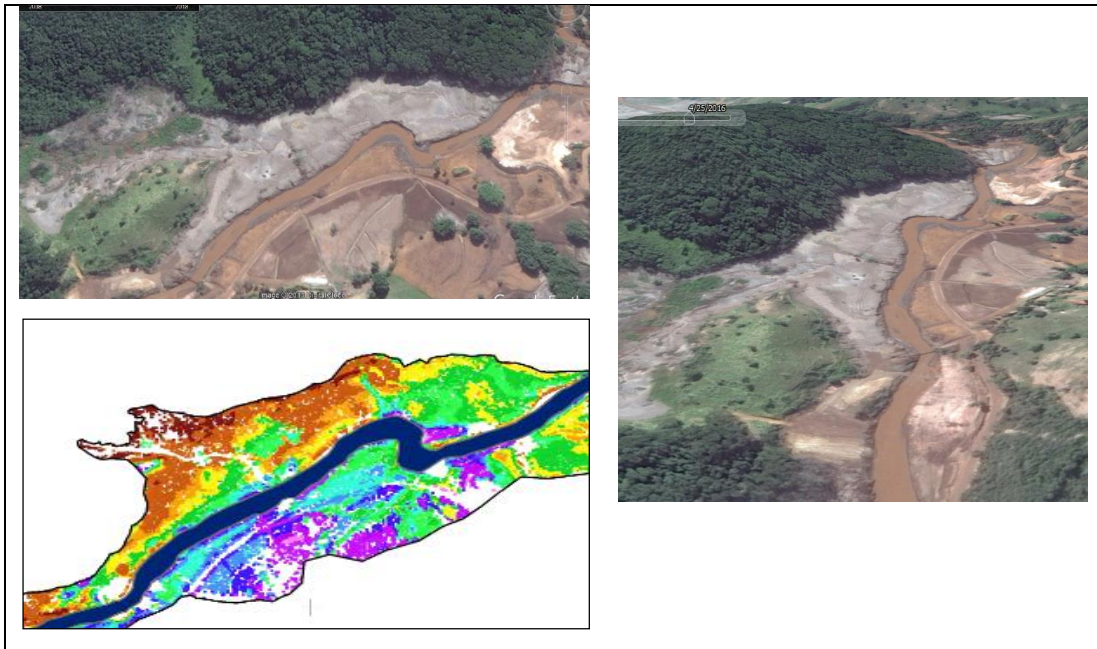
Estes valores somados representam 85% da área, o que pode ser inferido que, a maior parte dos terraços foram atingidos com camada de rejeito de 0 a 2 metros, o que pode ser corroborado através do histograma do mapa na figura 6.



**Figura 6:** Histograma da altura da camada de Tecnosolo nos terraços fluviais do Rio Gualaxo do Norte.

Valores acima de 2 metros de deposição representam 15% da área total, sendo divididos entre: 2 a 3,5 metros (13%) e 3,5 a 5 (2%). Estes locais indicam um maior acúmulo de rejeito de forma natural como pode ser demonstrado na figura 7.

Essa área corresponde ao meandro mais pronunciado do trecho, em cota maior, sendo que além disso, vegetação serviu como contenção natural para o fluxo do rejeito, levando ao depósito de camadas mais espessas nesta área.

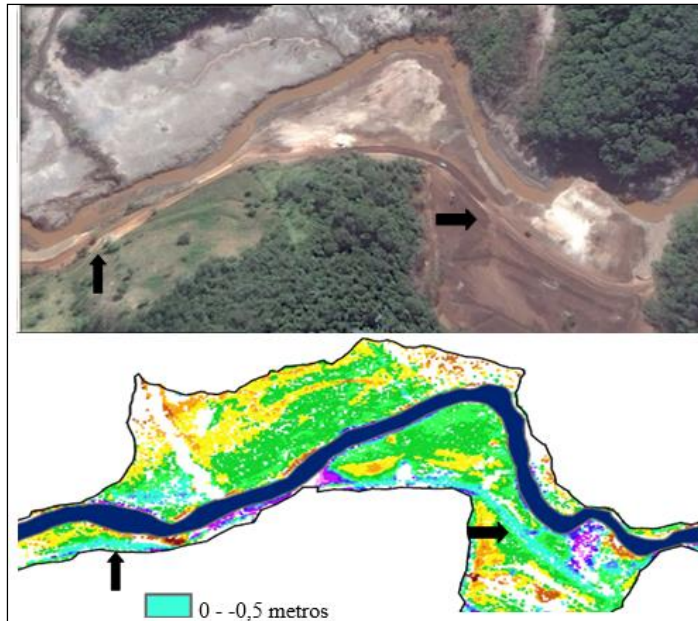


**Figura 7:** Áreas com maior deposição de Tecno solo sob diferentes perspectivas

As áreas de remoção representam 32% da área total de estudo com um volume de 16.059 m<sup>3</sup>, conferindo assim o volume de retirada de 1,31 m<sup>3</sup> de rejeito pela empresa responsável pela recuperação da área. O intervalo de 0,5 a 1 metro de espessura foi dominante, representando 32% da área de erosão, seguida da classe de 0,5 a 1 metro (30%). A classe que representa os maiores intervalos de retirada de rejeito, representam apenas 2% da área (intervalo de 3.5 a 5 metros) (Tabela 1).

Essas áreas de remoção, estão relacionadas com a retirada de rejeito realizada pela empresa responsável pelas obras de recuperação. A estrada da área está compreendida no intervalo de 0 a 0,5 m<sup>2</sup>. Após o desastre, várias estradas foram recobertas pelo rejeito, sendo necessário a limpeza do local, onde provavelmente houve também a perda de solo no nivelamento das vias.

A figura 8 representa parte da principal estrada de acesso à área de estudo. É possível avaliar que a mesma foi atingida pelo depósito de rejeito e que foi realizado a limpeza da via por máquinas, o que pode explicar que os valores de intervalo de espessura do rejeito indiquem erosão da área.



**Figura 8:** Representação de parte da estrada

### 3.2.1 Validação da altitude com dados de campo

Foram selecionados seis pontos em campo onde foram abertos perfis no rejeito até o contato do mesmo com o solo remanescente. A tabela 2 apresenta a coordenada de cada ponto bem como o valor obtido em campo da camada de rejeito e o valor da diferença entre as nuvens LSA e LST (2016).

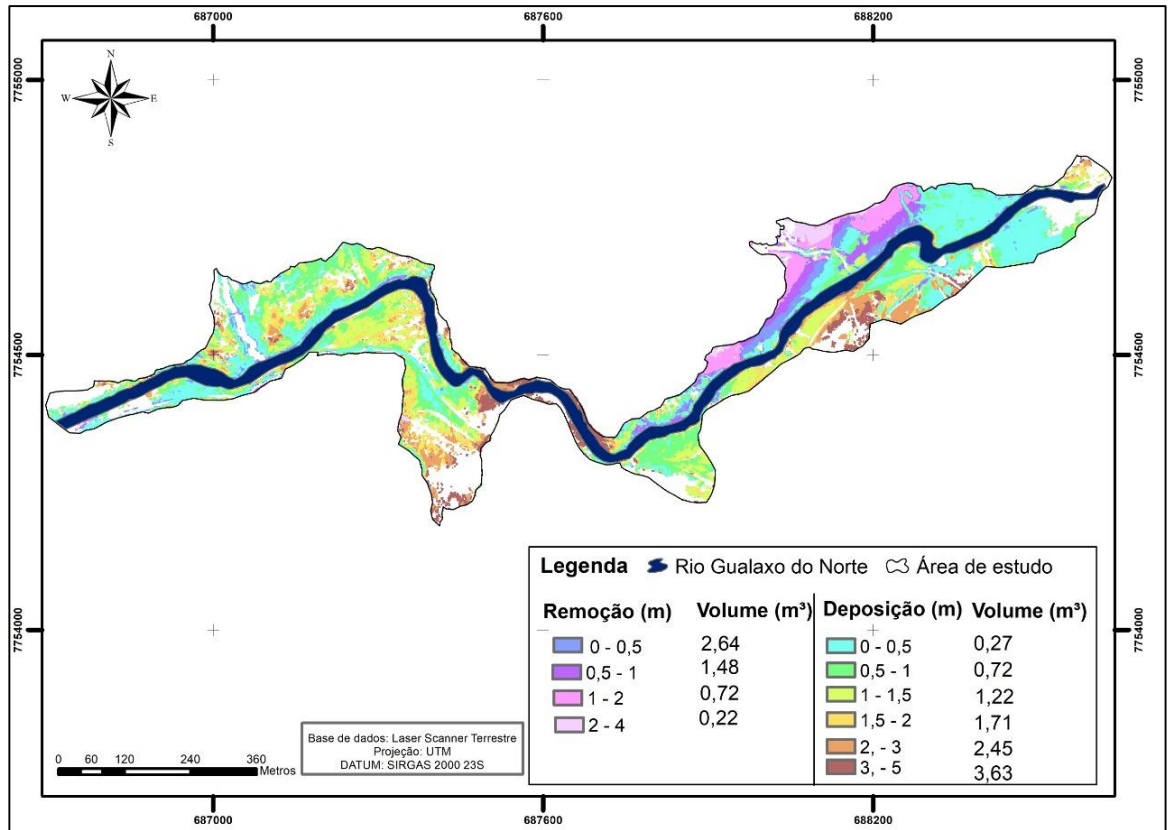
**Tabela 2:** Validação de valores de Z LSA/LST em campo

Coordenada (X)	Coordenada Y	Campo (m)	Nuvens (m)	Diferença (m)
688445,6893	7754705,5779	0,98	0,94	0,040
688448,8669	7754695,9255	1,25	0,92	0,330
688452,3746	7754681,3916	1,27	0,95	0,320
688439,2220	7754692,3966	1,17	0,78	0,390
688444,4994	7754673,1680	1,17	0,74	0,430
688463,6563	7754676,6167	1,18	0,85	0,330

A média da diferença entre os valores de campo e os valores da diferença entre as nuvens de pontos LSA e LST 2016 é de 30 cm. Esta diferença provavelmente está atrelada ao erro de ajuste e posicionamento das nuvens que foi em média de 0,35 para nuvem LSA e 0,18 cm para nuvem LST 2016.

### 3.3 Comparação nuvem de pontos LST 2016-2018

A figura 9 representa as modificações no terreno proveniente da comparação entre as nuvens LST de 2016 e 2018 derivados da retirada e/ou adição de rejeito e *topsoil* em 2018.



**Figura 9:** Situação atual de acúmulo de rejeito nos terraços fluviais

É possível inferir a partir do mapa da figura 9 que ocorreu acúmulo de material na maior parte do terraço (79% da área total, indicado na tabela 3). Este acúmulo provavelmente é devido à adição de *topsoil* sob a camada de rejeito (Schaefer et al., 2015) para o emprego de técnicas de recuperação ou efeito da vegetação densa da área.

Em casos de áreas com muita vegetação, arbustiva ou arbórea, a eficiência do sistema deve ser avaliada pelo fato do pulso emitido nem sempre atingir o terreno, podendo ser refletido totalmente pelas folhas das árvores ou outros obstáculos. Com isto é gerada uma incerteza na estimativa da superfície do terreno, que é função da densidade de pulsos que penetram na camada de vegetação e incidem sobre o terreno (Janssen e Pereira, 1999).

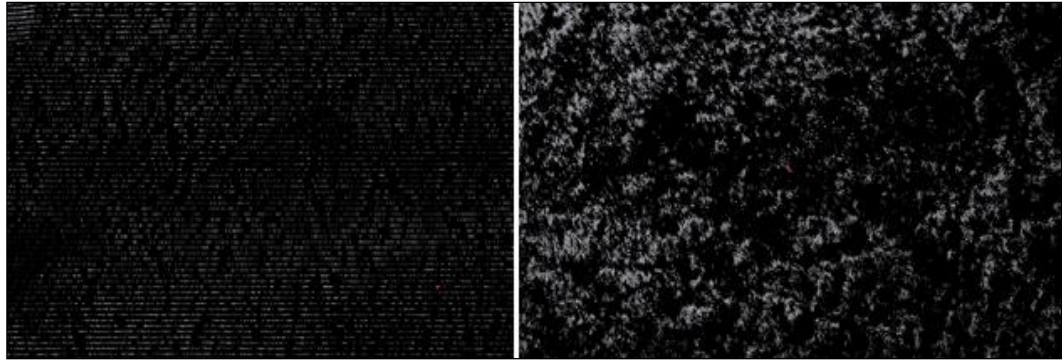
Na figura 10 é possível observar uma vegetação densa no leito maior e nos terraços (1). É possível observar vegetação de grande porte (2), sendo essas partes do terraço desprovidas de áreas com maior altitude onde fosse possível escanear a superfície a fim de minimizar o efeito da vegetação mesmo ajustando o ângulo de visada do Laser.

Quando a vegetação se torna de menor porte, geralmente se estabelece em touceiras (foto 3) e em grande quantidade, o que pode influenciar diretamente na resposta do laser quando à valores de altitude para estas áreas.



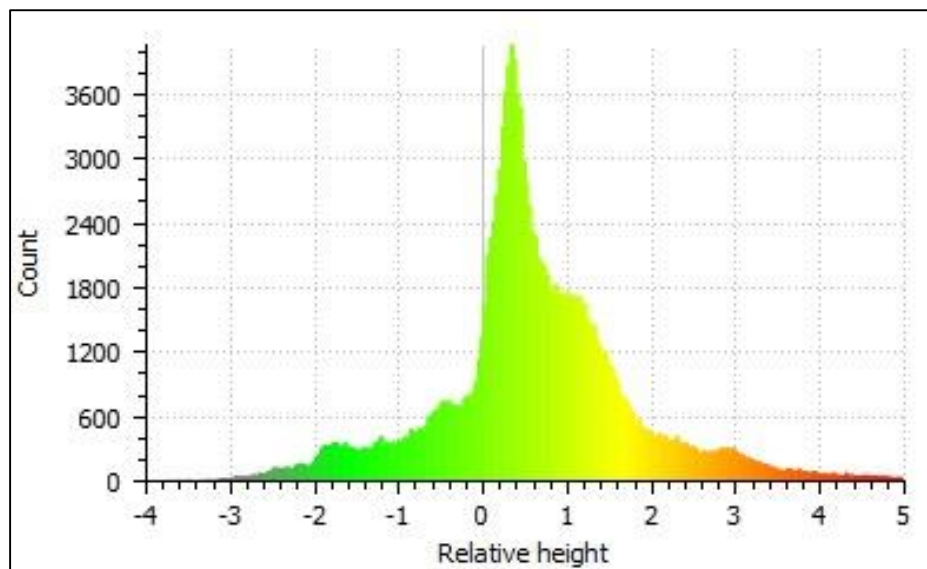
**Figura 10:** Vegetação nos terraços de trecho do Rio Gualaxo do Norte

A figura 11 mostra o padrão de rugosidade do terreno para a mesma área (foto 3 da figura 10), indicando a possível interferência da cobertura vegetal sobre a leitura do Laser Scanner.



**Figura 11:** Padrão de rugosidade LST 2016 e 2018 respectivamente

É possível observar no histograma do mapa da figura 9 a distribuição dos valores de camada de rejeito derivados da diferença entre a nuvem LST de 2016 em detrimento da nuvem de 2018. Valores negativos representam a remoção e valores positivos a adição de material (figura 12).



**Figura 12:** Distribuição de valores da camada de rejeito derivados da diferença da nuvem de pontos de 2011 e 2016 de trecho do Rio Gualaxo do Norte.

Na análise de distribuição dos valores, existe uma concentração na faixa entre 0 a 1,8 metros positivos, indicando acúmulo de material. A partir da análise da tabela 3, pode-se avaliar que o intervalo de 0 a 0,5 metros de rejeito compreende 37% da área onde houve depósito de material, seguido da camada de 0,5 a 1 metro, ocupando 25% e 1,5 a 2 metros com 18%. As demais classes somam juntas 21%.

A área com o menor intervalo de camada de topsoil possui  $0,27 \text{ m}^3/\text{m}^2$  de rejeito seguido da segunda área com  $0,72 \text{ m}^3/\text{m}^2$ . Estes valores compreendem também os erros de posição no eixo Z que pode ser de 30 centímetros para mais ou para menos.

**Tabela 3:** espessura da camada por área relativa

Deposição (m)	Área relativa (%)	Erosão (m)	Área relativa (%)
0 a 0,5	37	0 a 0,5	38
0,5 a 1	25	0,5 a 1	23
1 a 1,5	18	1 a 2	30
1,5 a 2	9	2 a 4	9
2 a 3	8	—	—
3 a 5	4	—	—

É válido ressaltar que as áreas onde houve maior acúmulo de rejeito são as áreas onde sofreram maior erosão (figura 5 e 9), indicando que a perda de material está relacionada com a camada de rejeito depositada.

#### 4. CONCLUSÕES

A tecnologia LiDAR mostrou-se promissora para mensurar a camada e o volume de rejeito nos terraços fluviais de um trecho do Rio Gualaxo do Norte. A vegetação apresentou-se como um obstáculo para obtenção de topografia de alta resolução uma vez que interfere diretamente no pulso emitido pelo laser scanner, sendo necessário avaliar o uso de outros filtro para amenizar a rugosidade do terreno de forma minuciosa a fim de obter dados mais concisos.

O acúmulo de rejeito resultante da comparação das nuvens LSA e LST 2016 (68% da área) onde a espessura da camada de 0 a 0,5 metros são predominantes. Estes dados fornecem uma base de dados importante para tomada de decisão sobre técnicas de recuperação sabendo-que que há uma grande variação no volume e na profundidade do rejeito na área.

A comparação das nuvens LST 2016 e 2018 indica que está havendo processo de recuperação na área com a adição de topsoil, sendo que os valores de erro de ajuste entre as nuvens precisam ser considerados para avaliação dos resultados de forma mais confiável. Os valores positivos de espessura da camada de rejeito que indicam a deposição de material (79% da área) podem ser consequência da densa vegetação da área, aumentando os valores de altitude da nuvem de pontos LST 2018 e fornecendo dados errôneos de altitude.

Apesar de mostrar-se promissora, é recomendado a criação de algoritmos de avaliação da rugosidade em função de valores de altitude em pontos de terreno conhecido e validados bem como a criação de possíveis filtros que minimizem o efeito da densa vegetação.

## 5. REFERÊNCIAS

- Baltsavias, E., 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54, 199–214. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00015-5)
- CPRM, 1993. Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-XB-1. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000.
- Giongo, M., Koehler, H.S., Machado, A., Kirchner, F.F., 2010. LiDAR : princípios e aplicações florestais. *Pesqui. Florest. Bras.* 30, 231–244. <https://doi.org/10.4336/2010.pfb.30.63.231>
- Goodwin, N.R., Armston, J.D., Muir, J., Stiller, I., 2017. Monitoring gully change: A comparison of airborne and terrestrial laser scanning using a case study from Aratula, Queensland. *Geomorphology* 282, 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.001>
- IBAMA, 2015. Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Laudo Técnico Prelim. 1, 2–35. <https://doi.org/2015>
- Janssen, L.L., 1999. Suitability of laser data for DTM generation: a case study in the context of road planning and design. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 54, 244–253. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00018-0](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00018-0)
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J., 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 82, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>
- Passalacqua, P., Belmont, P., Staley, D.M., Simley, J.D., Arrowsmith, J.R., Bode, C.A., Crosby, C., DeLong, S.B., Glenn, N.F., Kelly, S.A., Lague, D., Sangireddy, H., Schaffrath, K., Tarboton, D.G., Wasklewicz, T., Wheaton, J.M., 2015. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review. *Earth-Science Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.012>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Rossiter, D.G., 2007. Classification of urban and industrial soils in the world reference base for soil resources. *J. soils sediments* 7, 96–100. <https://doi.org/10.1065/jss2007.02.208>
- Schaefer, C.E.G.R., Santos, E.E., Souza, C.M. de, Neto, J.D., Filho, E.I.F., Delpupo, C., 2015. 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.
- Schunemann, A.L., 2016. Geotecnologias para Mapeamento Digital na Antártica Marítima. UFV.

- SMADS, 2010. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida., 1st ed, Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Belo Horizonte.
- Tommaselli, A.M.G., 2003. Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância. GEODÉSIA Online-Revista da Comissão Bras. Geodésia 4.

# USE OF GROUND PENETRATING RADAR (GPR) IN THE STUDY OF IRON ORE TAILING IN ALLUVIAL TERRACES

## ABSTRACT

The use of geophysical techniques for soil inspection can considerably contribute to the advancement and optimization of pedological studies, especially in soil physical attributes. However, its use is still incipient in soil science. The aim of this work was to evaluate the efficiency of the Ground Penetrating Radar (GPR) with different frequencies to detect the depth of iron ore tailings along a stretch of the Gualaxo do Norte River, affected by the rupture of the Fundão dam in the municipality of Mariana -MG. The ability to estimate soil moisture through the values of dielectric constants of tailings obtained in radargrams was ALS o evaluated. When evaluating frequencies (antennas) of 200, 400 and 900 MHz, it was found that 200 MHz was more efficient for the detection of the tailing layer, whose signal recorded the entire layer thickness of this material, as well as part of the underlying original soil. After field validation, polynomial regression was adjusted for the ranges of tailing depth values for this study. For tailing moisture, values determined in laboratory in samples collected in the field and those estimated from the interpretation of radargrams, no statistical difference (ANOVA) was observed between values of both methods, indicating that the GPR technique can be used as a satisfactory method to estimate moisture values in the ferruginous substrate.

**Keywords:** GPR, Iron mining tailing moisture, electromagnetic frequency

## 1. INTRODUCTION

Environmental disturbances can be understood as ecological disturbances in a given ecosystem that interrupt or redirect environmental interactions. On November 5, 2015, one of the largest environmental disasters ever recorded in Brazil, in the town of Mariana-MG, occurred when the Fundão dam, belonging to the Germano dam complex in the district of Bento Rodrigues, broke and approximately 50 million cubic meters of iron ore tailings were launched in the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers and their tributaries, reaching the Atlantic Ocean (IBAMA, 2015).

The tailing traveled approximately 630 km to the coast, severely affecting rivers, ictnofauna and the economy of the riverside population, in addition to causing 19 deaths. Areas of arable terraces were covered by considerable tailing layers, creating a new edaphic, tectogenic environment, making it impossible to continue agropastoral activities to which these areas had always been destined (Guerra et al., 2017).

Due to the magnitude of the disaster, several emergency measures have been taken in the short and long term, mainly those aimed at the recovery of soil in the greater river bed and in alluvial terraces, aiming at the revitalization of these areas. Knowing the physical characteristics of tailings are essential to obtain accurate diagnostics that optimize their stabilization process, avoiding the worsening of erosion processes.

In this sense, geophysical techniques of soil inspection become fully feasible to know these characteristics due to their rapid and precise responses, optimizing data acquisition and processing. One of the tools that stand out as a non-invasive method of soil inspection is the Ground Penetrating Radar (GPR), or simply Georadar, which although has a common use in geology, has still been little used in the study of soils (Coutinho et al., 2017). This tool can bring interesting contributions to the understanding of distributions and transitions among soil types, especially among soils that have high degree of morphological differentiation ( Ucha et al., 2002; Ronen et al., 2019).

Penetrating Radar (GPR) is an Electro Magnetic (EM) technique consisting of emitting an EM pulse into the ground within the radio frequency range (10-1000 MHz). (Assel et al., 2011; Martel et al., 2018). Upon penetrating the soil, the EM wave may undergo refraction and reflection when reaching discontinuities of material ALS present in the soil, and the reflected wave is captured by the receiving antenna. The receiver system amplifies the signal and conditions it to be visualized on the screen (Davis and Annan, 1989).

The higher frequency of electromagnetic waves, the greater vertical resolution of the sign ALS captured and the lower the depth reached. Frequency antennas between 500 and 900 MHz provide resolution of a few centimeters, but are unable to penetrate at greater depths due to signal attenuation. Antennas with frequencies between 80 and 125 MHz are able to work at greater depths, but the vertical resolution decreases (Benson et al., 1984).

The final information obtained by GPR is given by the interpretation of the time the signal takes to be detected after being reflected by interfaces present in the subsurface and that can be viewed and analyzed through radargrams. Due to external electromagnetic interferences, data should be processed to improve the signal-to-noise ratio of radargrams, guaranteeing better visualization of the patterns of interest (Ortega, 2006).

In pedology, GPR has been used mainly for studies related to physical properties such as estimation of volumetric moisture and compositional elements of the subsurface. Particle size, electrochemical nature, water content, physical and chemical properties within the soil matrix affect soil behavior in relation to the EM wave. According to Daniels et al. (1988), in more conductive terrains, the wave penetration depth is drastically reduced.

Martini (2014) used GPR to analyze iron ore sedimentation patterns in the Diogo dam, Rio Piracicaba-MG. The authors identified different reflection patterns arising from hematite concentration and presence of water, which caused multiple reflections identified in radargrams.

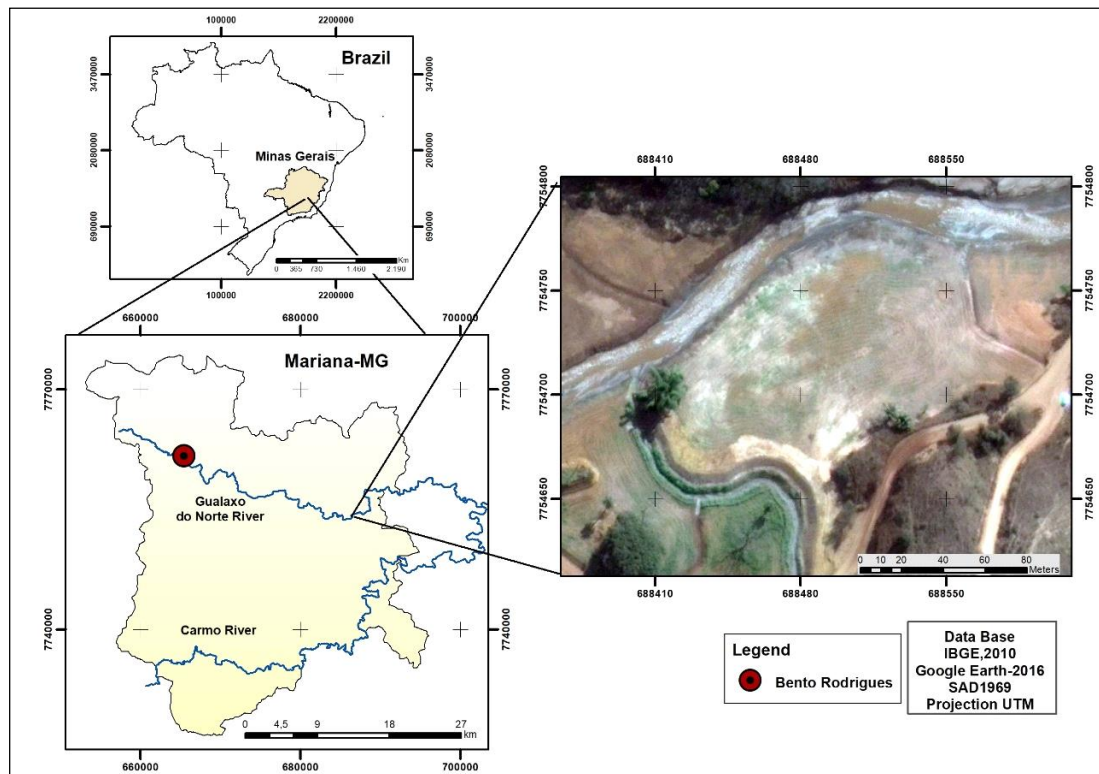
Souza (2005) evaluated the GPR potential in hydrogeological, geotechnical and environmental studies in the southeast region of Brazil, Barros (2011) used GPR to characterize subsurface horizons in soils in northern state of Rio de Janeiro. Ucha, et al., (2002) applied this equipment to study cohesive soils of the Coastal Plain and obtained satisfactory results in their research, indicating GPR as an efficient tool for subsurface studies.

The aim of the present work was to identify the depth of the iron ore tailing layer in a stretch of the Gualaxo do Norte River (MG) using the GPR technology, as well as to compare the estimated volumetric moisture by GPR and by the volumetric ring method, analyzing the feasibility of the GPR technique in estimating soil moisture in large scale, as well as in identifying the most efficient electromagnetic frequency for the analysis of this type of material.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1 Study area

The study area is located in the eastern portion of the municipality of Mariana-MG, in part of terrace of the Gualaxo do Norte river, with altitude of 512 meters (Figure 1).



**Fig. 1:** Location of the study area.

The remaining vegetation of the region is semideciduous forest of Atlantic Forest and is distributed mainly in some hilltops and along the courses of the rivers, in ciliary forests. The geology is basically formed by Quaternary alluvial deposits on a heterogeneous lithology: in the lower parts, the Mantiqueira Complex occurs, mainly composed of orthogneisses at the eastern end of the Gualaxo do Norte River, passing under the Acaiaca Complex (granulite gnaiss), and by the Dom Silvério formation, predominantly composed of quartzites, schists and paragneisses in the Rio do Carmo sector (CPRM, 1993).

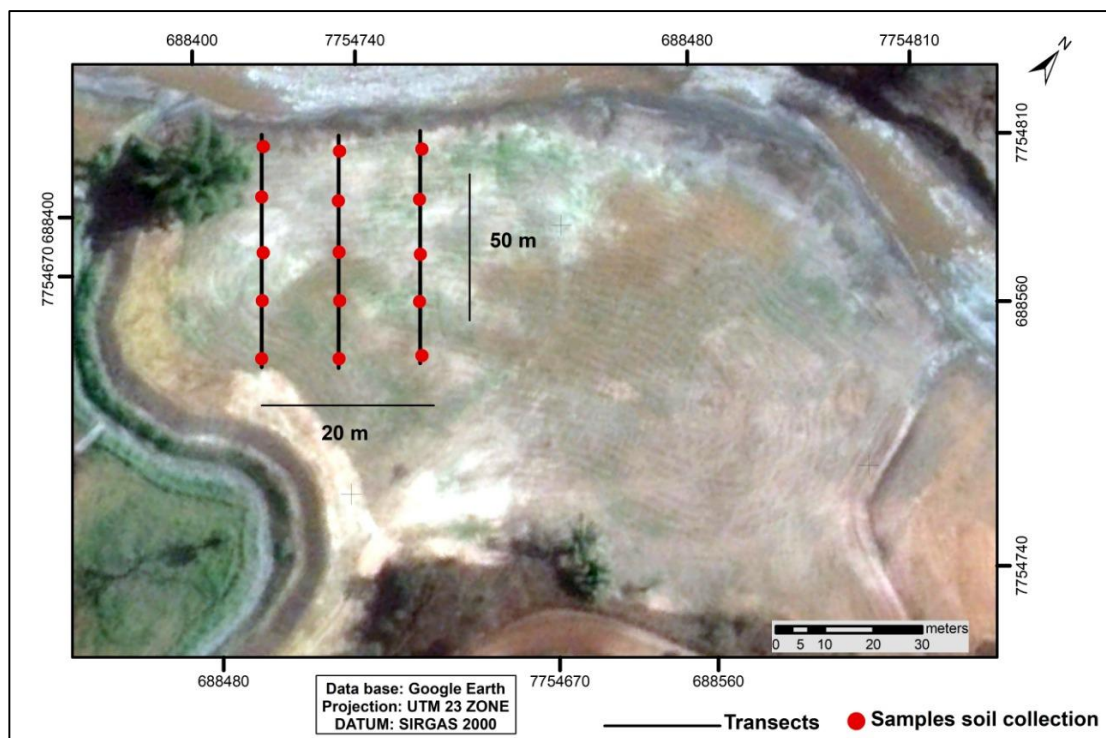
The predominant soils in the region are the Red-Yellow Latosol (Oxisols) and in river beds, there is predominance of Argisols (Ultisols) and, to a lesser extent,

Litolenic Neosols (Entisols) and Haplic Cambisols (Ineptisols) (SMADS, 2010). For recovery purposes, a topsoil layer was added to the tailings on the terrace under study. After field observations, it was observed that the thickness of this topsoil is variable along the area.

According to Köppen's classification, the climate of the region is divided into three types: Cwb - altitude tropical climate with summer rains and fresh summers, Cwa- altitude tropical climate with summer rains and hot summers, and, Aw - hot climate with rains (Peel et al., 2007).

## 2.2 Use of GPR for soil inspection

GPR inspection was carried out on the banks of the Gualaxo do Norte river, in an area of approximately 1000 m<sup>2</sup>. Three transects approximately 50 meters long, 10 meters apart were delimited (Figure 2). Five points were selected for profile opening in the tailings in each transect, where three samples were collected per profile in the following depth ranges: 0-15, 15-30 and 30-45 cm, totaling 45 samples. Samples were submitted to gravimetric moisture analysis in laboratory, which was later converted into volumetric moisture according to (EMBRAPA, 2011).



**Fig.2.** Transects with collection points of tailings samples

To perform the tailing inspection, GPR model SIR 3000, from GSSI, was used with different shielded antennas (200, 400 and 900 MHz) in the three transects. The dielectric constant ( $k$ ) 10 was used, according to Porsani and Sauck, (2007), considering the nature of the iron ore tailing as clayey / silty . Table 1 shows the acquisition parameters used:

**Table 1:** Parameters used in data acquisition

<b>Frequencies (MHz)</b>	<b>Scans/meter</b>	<b>Scans/second</b>	<b>Samples/scan</b>	<b>Bits/sample</b>
<b>200; 400; 900</b>	50.000	100.000	512	16

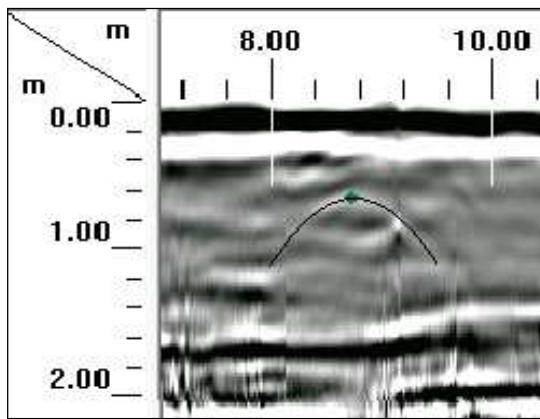
### 2.3 Data processing

Data generated were processed in the Radan.7 software, where basic processing tools and advanced electromagnetic signal improvement processing were applied, according to GSSI, (2003).

- a) Correction of time zero: Corresponds to the correction of the air band of data acquired before the direct wave in contact with the surface;
- b) Background Noise Removal: Horizontal background noise degrades GPR data resolution and is associated with electromagnetic wave interference on GPR antennas, the Background filter is applied to remove interference, improving standards in the radargram;
- c) Deconvolution: Horizontal filter for removal of noise and / or multiple reflections (ghosts). Deconvolution processing eliminates low-frequency noise by improving GPR data resolution;
- d) Finite Impulse Response Filters (FIR): Vertical filter for low and high frequency reduction. It is a linear digital filter characterized by the finite duration of its input signal, the pulse. The boxcar method is based on a simple average function determined through the desired frequency cutoff (bandpass) and applied to rectangular sampling windows;
- e) Gains: gain is the addition of signal in order to neutralize the attenuation of electromagnetic waves, amplifying the resolution of the image and allowing the identification of low-intensity reflectors.

## 2.4 Obtaining volumetric moisture values from radargrams

When comparing radargrams generated by the 200, 400 and 900 MHz antennas, it was observed that the hyperboles formed from reflections in subsurface elements of the ground, that is, reflective material ALS, were better identified by the 200 MHz antenna, being therefore adopted to identify the dielectric constant of the reflection hyperbola (Figure 2). Hyperboles located at the same points and depths where soil samples were collected to determine moisture in laboratory were selected.



**Fig.2.** identification of reflection hyperboles

After obtaining the dielectric constant value, provided by the program used, the equation proposed by Topp et al. (1980) for the estimation of moisture contents from an empirical relation with dielectric constant ( $K$ ) and volumetric humidity,  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) was used:

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2}K - 5.5 \times 10^{-4}K^2 + 4.2 \times 10^{-6}K^3 \quad \text{Eq. (1)}$$

## 2.5 Identification of reflection areas

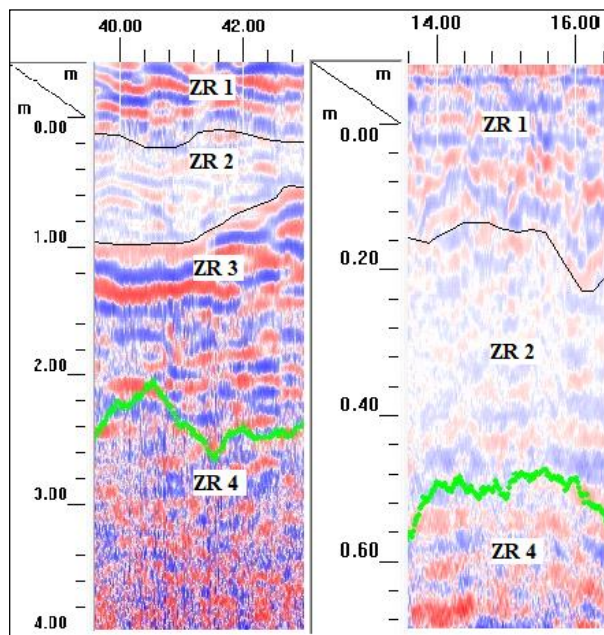
The interpretation of radargrams after the application of filters for signal improvement was based on the visual separation of electromagnetic reflection layers, considering their reflectance contrasts and signal attenuations between sections, indicating homogeneity or heterogeneity of the material according to its dielectric properties.

The wave phase change was ALS used through the analysis of the amplitude traces of radargrams to identify with more fidelity the separation of reflection zones, as proposed by Jarentchuk, (2013). Thus, it was possible to identify the differentiation of the pedological material in subsurface being the contact between the tailings and topsoil layers, as well as the thickness of each layer.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1 Radargram analysis

Two to three main reflection zones (ZR) were identified in each radargram, depending on the frequency of the antenna used (Figure 3). The Z4 represents the area out of reach of the electromagnetic signal.



**Fig.3.** Radargram with 3 and 2 reflection zones. Antenna of 200 and 900 MHz respectively.

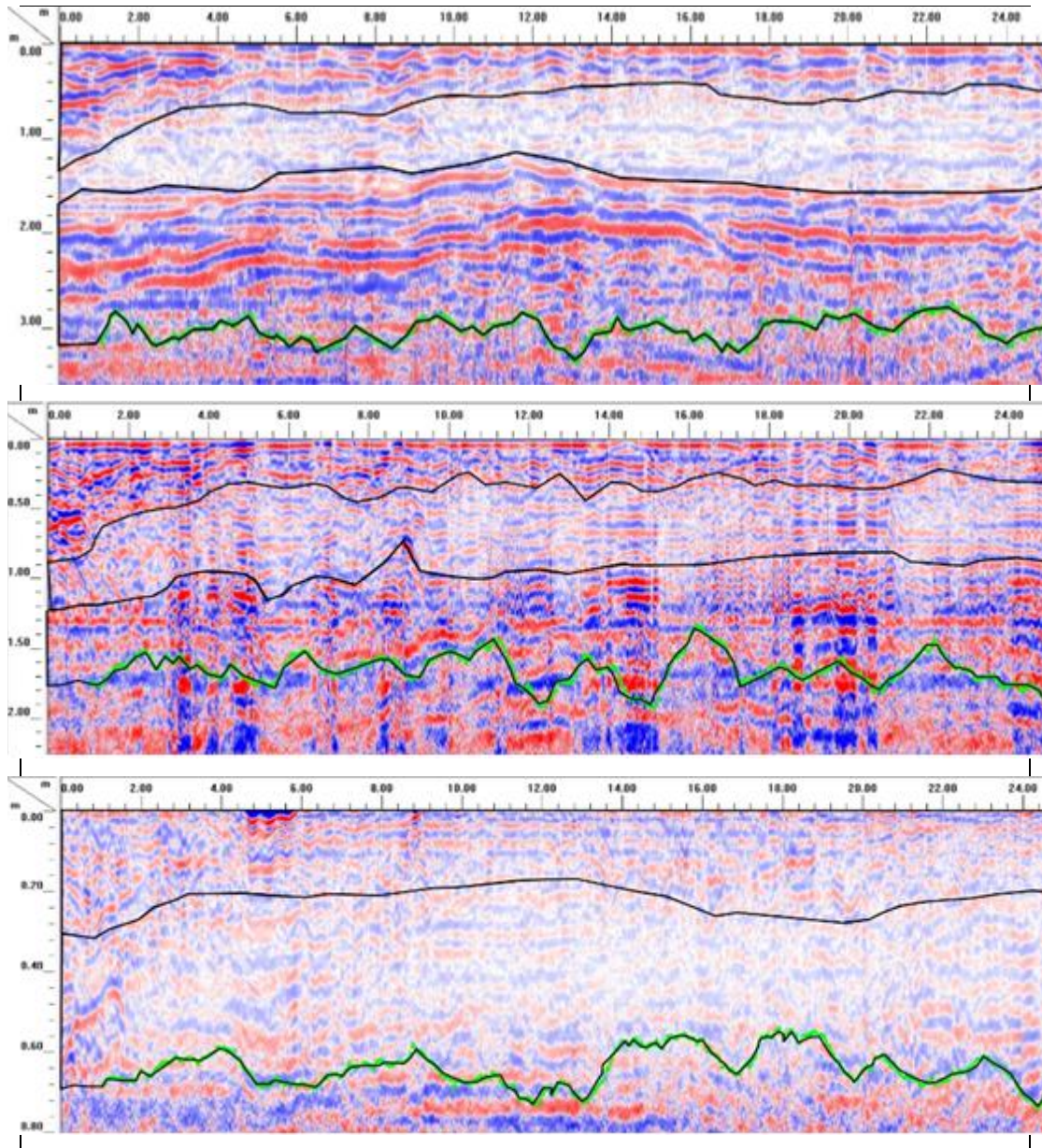
For the analysis of these areas of reflection and their better understanding, it was necessary to evaluate the signal quality for the differentiation of ferruginous and pedological substrates in all frequencies used in this study and that best represent each zone. From the analysis of the three transects and three frequencies, it was observed that the antenna of 200 MHz differentiated better the material ALS in subsurface and

the contact among the different material ALS as can be observed in Figure 4, being therefore used for the analyses and discussions of this study.

Duarte et. al. (2012) ALS is adopted this frequency in the inspection of laterite bauxite and goethite layers in soils, claiming that, to the detriment of results obtained with antenna of 80 and 400MHz, antenna of 200 MHz presented better resolution and greater practicality in their study.

Antenna of 400 MHz presented many noises even after treatment with filters to remove external electromagnetic interference. These noises prevented the effective differentiation of material ALS under analysis and smaller reach of the signal, which on average reached about 1.9 m in depth. However, this depth is close to the maximum range defined by (Porsani et al., 2004) for this frequency (2 meters).

Antenna of 900 MHz detailed the surface layers, but was unable to penetrate at greater depths due to signal attenuation, since its range is restricted to up to 1 meter in depth, depending on the material evaluated, as described by (Benson et al., 1984) and (Porsani and Sauck, 2007). Thus, this frequency does not reach topsoil- tailing contact, therefore, ineffective for this study.



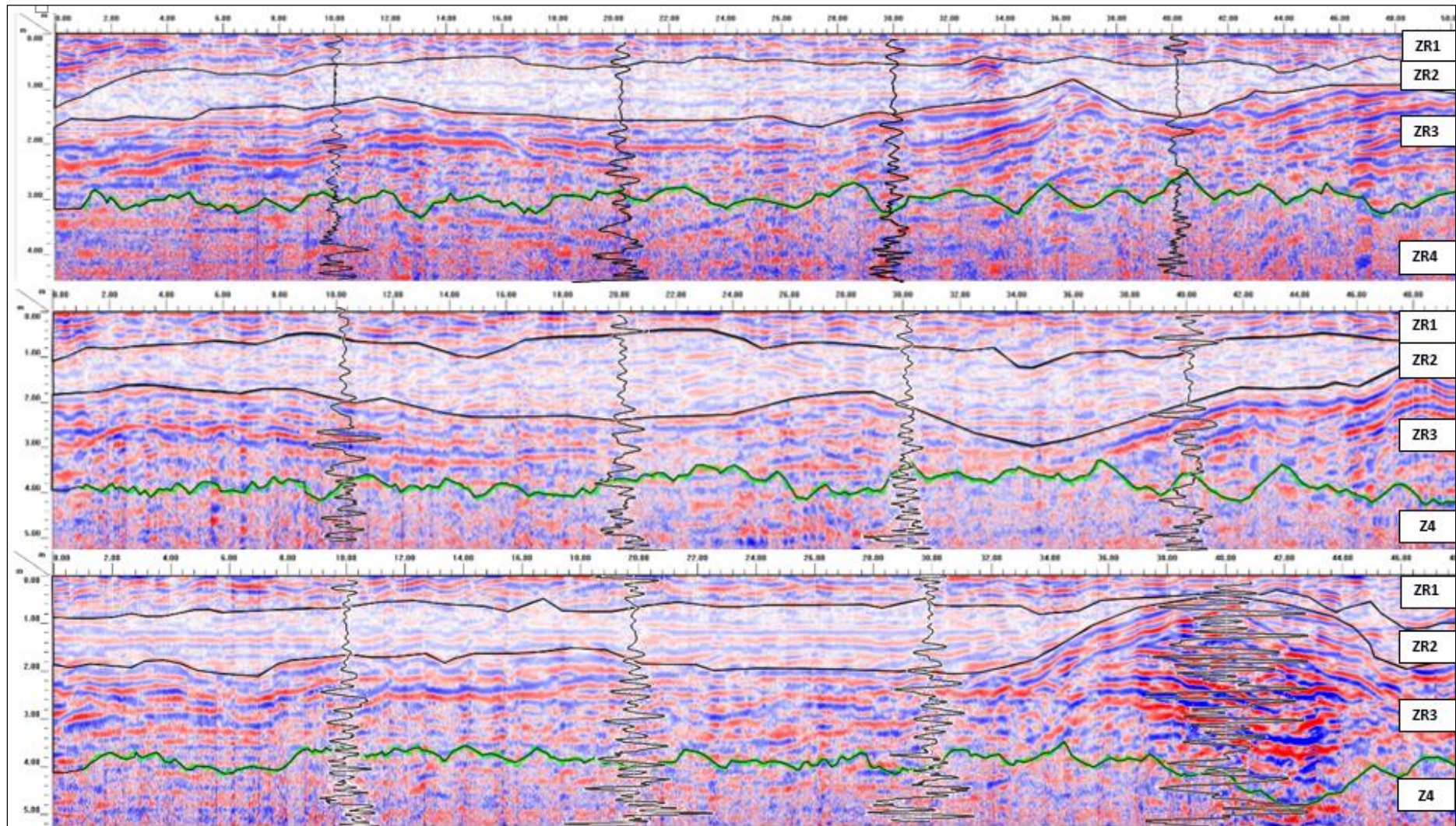
**Fig 4.** Part of Transect 2-antenna of 200, 400 and 900 MHz respectively.

When evaluating the efficiency of frequencies at subsurface range, it is observed that the antenna of 200 MHz reached an average of 3.2 meters while antenna of 400 MHz and 900 MHz reached 1.88 and 0.76 meters respectively (Table 2). These values correspond to the maximum penetration per frequency values presented by Porsoni (1999), which indicates values obtained by practical experiments using several GPR models.

Figure 5 presents the three transects with antenna of 200 MHz. In all radargrams, no multiple reflections were observed and most of reflectors were of the continuous and inclined line types. In the ZR1 layer, it is possible to verify the reflection behavior similar to ZR3, but with a slightly more attenuated signal. Based on field observations, it was possible to identify that the material is a tailing mixed with the topsoil that was distributed in the site to establish the vegetation introduced after the dam rupture. It was observed at the beginning of the radargram that this zone is thicker, precisely at the road site, where tailing deposition was smaller.

ZR1 and ZR2 layers are the areas of greatest interest for this study. ZR2 corresponds to the ferruginous tailing from the Fundão dam, which may in some situations be mixed with material transported along the avalanche. This more homogeneous tailing layer produces a more attenuated reflector as a result of its high electrical conductivity due to its high Fe content as indicated by Schaefer et al, (2016). The same behavior was observed by Martini (2014), who studied piles of iron ore tailings in Minas Gerais, where even when dealing with a highly conductive medium, it was possible to use GPR to identify the tailing deposition zones efficiently.

This situation was LSAo found by Jarentchuk (2006), who found strong signal attenuation in the radargrams in his study, caused by soil contamination with hydrocarbons (diesel), a material with high electrical conductivity.



**Fig. 5.** Transects with frequency of 200 MHz and recording the signal reflection intensity.

ZR3 is the C horizon of the original soil in the area. Such an assertion was possible from field observations and can be proved by analyzing the signal response in radargrams. Due to decrease of iron, it was observed that the behavior of the material greatly differs from ZR2, and higher electromagnetic signal intensity can be observed.

Z4 represents the zone where there was no signal, and from these depths, the energy (EM wave) does not return to the surface, or due to the wave attenuation, or to its dissipation by the conductive material. Therefore, it is a zone where there are no data for the present discussion, although its representation is important to identify the signal penetration limit in the upper layers.

### 3.2 Validation of the tailing layer depth

For validation purposes, six randomly distributed boreholes were performed in the field to measure the thickness of the tailings layer and its comparison with data observed in radargrams, as shown in Table 2.

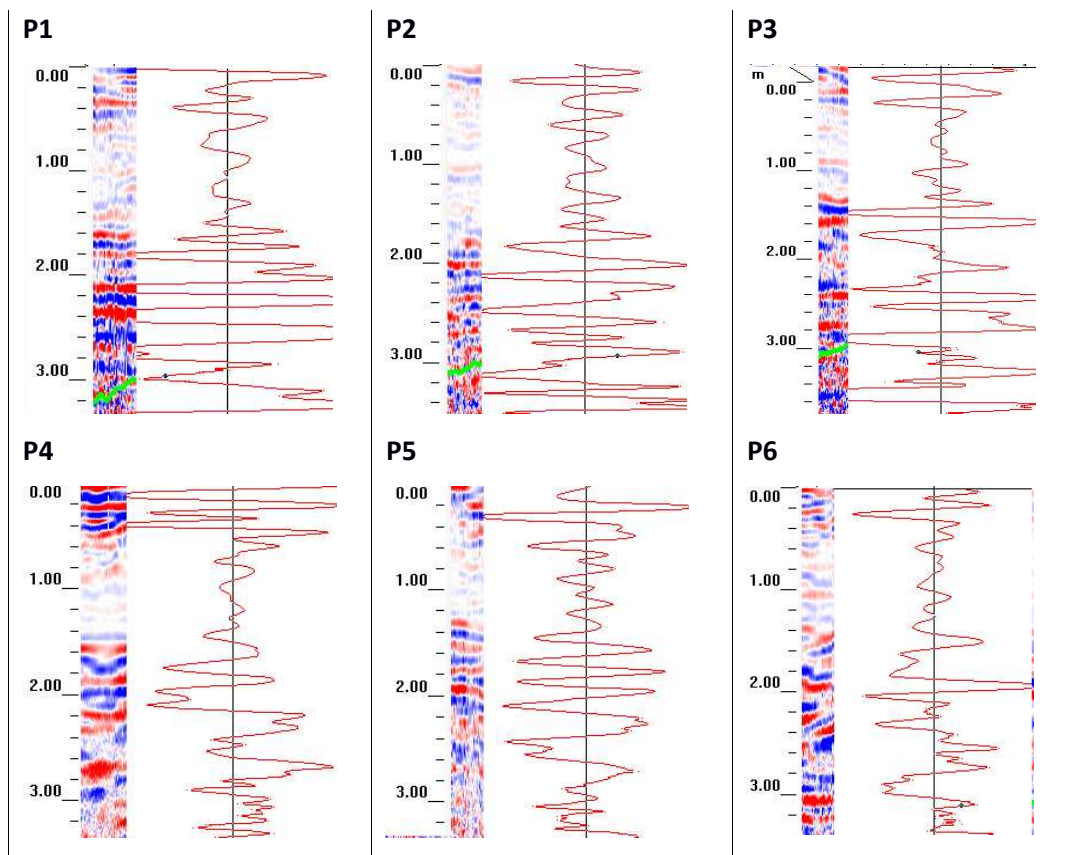
**Table 2:** Depths found in the field x radargrams

Profile	Depth (m)		
	Radargram (10 k)	Field	Difference
P1	1,45	1,27	0,18
P2	1,60	1,25	0,35
P3	1,30	0,90	0,40
P4	1,4	1,17	0,23
P5	1,45	1,17	0,28
P6	1,40	1,18	0,22

The same points were identified in radargrams and the depth reached by the layer was verified from the viewing of the reflection band characteristic of the tailing signal layer along with the wave behavior in the trace corresponding to the analysis point as shown in figure 6. The difference between measured and estimated depth presented an average of approximately 28 cm. This difference may be due to the determination of the signal reach depth, which was automatically delimited by the software used in radargrams (Radan 7), which may be overestimating the signal range and, consequently, increasing the thickness of the studied layer.

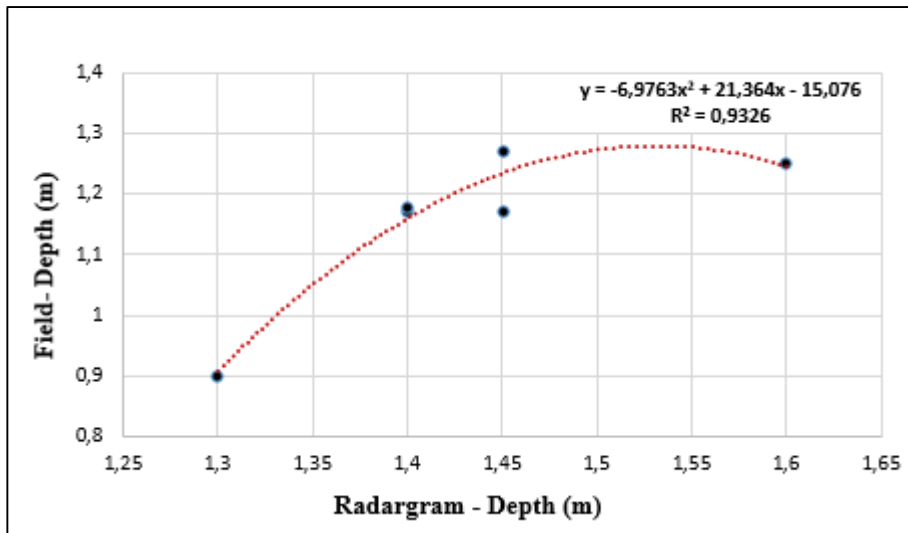
The tailing layer varied from 0.90 to 1.27 m, with mean of 1.15 m, according to field data, while the radargram overestimated the depth, presenting values between

1.30 and 1.60 m and mean of 1.43 m. The difference between the field readings and the radargram ranged from 0.18 to 0.40 m. Considering the study area of 1,000 m<sup>2</sup> and the average obtained by the borehole, the total tailing volume in the area is 1,150 m<sup>3</sup> and when considering the mean obtained by the radargram, this value would be 1,430 m<sup>3</sup>, thus showing an overestimation of 280 m<sup>3</sup> of tailings by the GPR method. Although the antenna of 200 MHz does not have the ideal resolution to verify the exact contact between the material, it was the only frequency that allowed reaching the greatest depths and thus to adequately measure all the layers of interest.



**Fig.6.** Tailing layer depth

Due to the differences among depth readings, it was necessary to adjust an equation that allows calculating the real depth in the field of tailing layer from the radargram information. The best fit was given by the polynomial equation, since the behavior presented by the tailing depth is not explained by linear regression. Thus,  $r^2$  of 0.93 was obtained as shown in Figure 7.



**Fig .7.** Polynomial regression adjustment for the tailing depth

Thus, for depth interval ALS between 1.30 and 1.60 m for field conditions equivalent to those of this study, it was possible to estimate depth values from GPR with satisfactory accuracy.

### 3.3 Analysis of moisture values

Table 3 shows the moisture values obtained by the volumetric ring method and the methodology of (Topp et al., 1980) as a function of the dielectric constant at the indicated depths.

**Table 3:** Volumetric moisture by radargram and laboratory

Transect	Depth (cm)	Dielectric Constant (k)	Moisture (m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> )	
			Radar	Laboratory
1	45	11.59	0.218	0.258
1	40	11.31	0.213	0.247
1	30	11.49	0.216	0.253
1	35	10.28	0.194	0.222
1	45	10.53	0.199	0.197
2	40	13	0.243	0.284
2	45	12.3	0.231	0.243
2	35	10.74	0.202	0.259
2	40	11.83	0.223	0.218
2	45	12.8	0.240	0.265
3	45	11.88	0.223	0.246
3	40	12.49	0.234	0.207
3	35	10.2	0.192	0.223
3	40	10.28	0.194	0.208
3	35	13	0.243	0.194

Although soil samples were collected at three depths, only from 30 cm, it was possible to identify reflection hyperboles in radargrams to obtain dielectric constant values; therefore, volumetric moisture data were used in the 30-45 layer cm as described in Table 3.

ANOVA statistical analysis was performed to evaluate the results at 5% significance. The analyses showed that there was no significant difference between the moisture values obtained by both methods, corroborating work by (Barbosa et al., 2010), who compared soil moisture values by GPR and laboratory methods and concluded that GPR with the use of antenna of 200 MHz was sensitive to the moisture conditions of the medium, not differing from laboratory methods, being, therefore, an important tool to evaluate the spatial distribution of moisture in shallow surfaces.

#### 4. CONCLUSIONS

The use of three different frequencies showed that, for this study, antenna of 200 MHz was the most efficient in identifying the layer of tailings deposited on the Gualaxo do Norte river terraces after the rupture of the Fundão dam, not neglecting the importance of antenna or 900 MHz in identifying patterns in the first centimeters of soil.

The volumetric moisture values found through the dielectric constant provided by GPR proved to be satisfactory, reinforcing the importance of this tool for investigations of this parameter, especially when the spatialization of this variable optimizes studies that require non-point moisture values.

#### 5. REFERENCES

- Assel, N. El, Kchikach, A., Teixidó, T., Peña, J.A., Jaffal, M., Guerin, R., Lutz, P., Jourani, E.-S., Amaghazaz, M., 2011. A Ground Penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography Prospection for Detecting Sterile Bodies in the Phosphatic Bearing of Sidi Chennane (Morocco). *Int. J. Geosci.* 02, 406–413. <https://doi.org/10.4236/ijg.2011.24044>
- Barbosa, E.E.M., Prado, R.L., Mendes, R.M., Marinho, F.A.M., 2010. Estimativas do teor de umidade empregando o método GPR: Uma avaliação comparativa em experimentos de laboratório e campo. *Rev. Bras. Geofis.* 28, 691–701. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2010000400012>
- Benson, R., Glaccum, R., Noel, M., 1984. Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration.
- Coutinho, F.S., Pereira, M.G., De Oliveira Tostes, J., Rocha Francelino, M., Gaia-Gomes, J.H., 2017. Application of Georadar in Areas with Different Vegetation Cover. *Floresta e Ambient.* 24, 20160011. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.001116>
- CPRM, 1993. Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Mariana – Folha SF.23-XB-1. Estado de Minas Gerais. Escala 1:100.000.
- Daniels, D.J., Gunton, D.J., Scott, H.F., 1988. Introduction to subsurface radar. *IEE Proc. F Commun. Radar Signal Process.* 135, 278. <https://doi.org/10.1049/ip-f-1.1988.0038>
- Davis, J.L., Annan, A.P., 1989. Ground-Penetrating Radar For High-Resolution Mapping Of Soil And Rock Stratigraphy1. *Geophys. Prospect.* 37, 531–551. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x>
- Donagema, G.K., Campos, D.V.B., Calderano, S.B., Teixeira, W.G., Viana, J.H.M., 2011. Manual de métodos de análises de solos, Embrapa Solos. <https://doi.org/1517-2627>
- GSSI, 2003. Radan 7 user's manual 135.
- Guerra, M.B.B., Teaney, B.T., Mount, B.J., Asunskis, D.J., Jordan, B.T., Barker, R.J., Santos, E.E., Schaefer, C.E.G.R., 2017. 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 Pollut.* 228, 252. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3430-5>
- IBAMA, 2015. Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Laudo Técnico Prelim. 1, 2–35. <https://doi.org/2015>
- J. M. Ucha, M. Botelho, G. S. Vilas Boas, L. P. Ribeiro, P.S.S., Ucha, J.M., Botelho, M., Boas, G.S.V., Ribeiro, L.P., Santana, P.S., 2002. Uso do radar penetrante no solo (GPR) na investigação dos solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado da Bahia. *Rev. Bras. Ciência do Solo.* <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000200011>
- Jarentchuk, O., 2013. Aplicação Do Georradar (Gpr) Na Prospecção Eletromagnética. Universidade Federal do Paraná.
- Luiz Medeiros Barros Júnior, V., 2011. Utilização Do Radar De Penetração Em Dois Solos Do Norte Fluminense. UENF.
- Martel, R., Castellazzi, P., Gloaguen, E., Trépanier, L., Garfias, J., 2018. ERT, GPR, InSAR, and tracer tests to characterize karst aquifer systems under urban areas: The case of Quebec City. *Geomorphology* 310, 45–56. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2018.03.003>
- Martini, R.J., 2014. Aplicação do Ground Penetrating Radar em estudos para disposição de rejeitos de minério de ferro. CEFET. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4735.7281>
- Matos De Souza, M., 2005. Uso Do Georadar (Gpr) Em Investigações Ambientais. Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil. <https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.7719>
- ORTEGA, Rodrigo Alves. Localização e Delineamento de Pluma de Contaminação por Hidrocarbonetos através dos Métodos GPR e Tomografia Elétrica. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Cap. 6.
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Porsani, J., Sauck, W., 2007. Ground-penetrating radar profiles over multiple steel tanks: Artifact removal through effective data processing. *Geophysics.* <https://doi.org/10.1190/1.2783412>
- Porsani, J.L., Filho, W.M., Elis, V.R., Shimeles, F., Dourado, J.C., Moura, H.P., 2004. The use of GPR and VES in delineating a contamination plume in a landfill site: a case study in SE Brazil. *J. Appl. Geophys.* 55, 199–209. <https://doi.org/10.1016/J.JAPPGEO.2003.11.001>
- Ronen, A., Ezersky, M., Beck, A., Gateno, B., Simhayov, R.B., 2019. Use of GPR method for prediction of sinkholes formation along the Dead Sea Shores, Israel. *Geomorphology* 328, 28–43. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2018.11.030>
- Schaefer, C. E. G. R.; Santos, E. E. Filho, E. I. F.; Assis, I.R., 2016. Paisagens de Lama: Os Tecnosolos para recuperação ambiental de áreas afetadas pelo desastre da barragem do Fundão, em Mariana. vicosa MG.
- SMADS, 2010. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais: legenda expandida., 1st ed, Secretaria do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Belo Horizonte.
- Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.* <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>