

**UFV**

Universidade Federal de Viçosa

# TECNOSSOLOS DE REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO POR MEIO DE TÉCNICAS REMOTAS E PROXIMAS DE INSPEÇÃO DO SOLO



**LABgeo**

Departamento de Solos  
Universidade Federal de Viçosa



**Prof. Carlos E. Schaefer (UFV)**  
**Pesq. CNPq 1A**

# INTRODUÇÃO GERAL

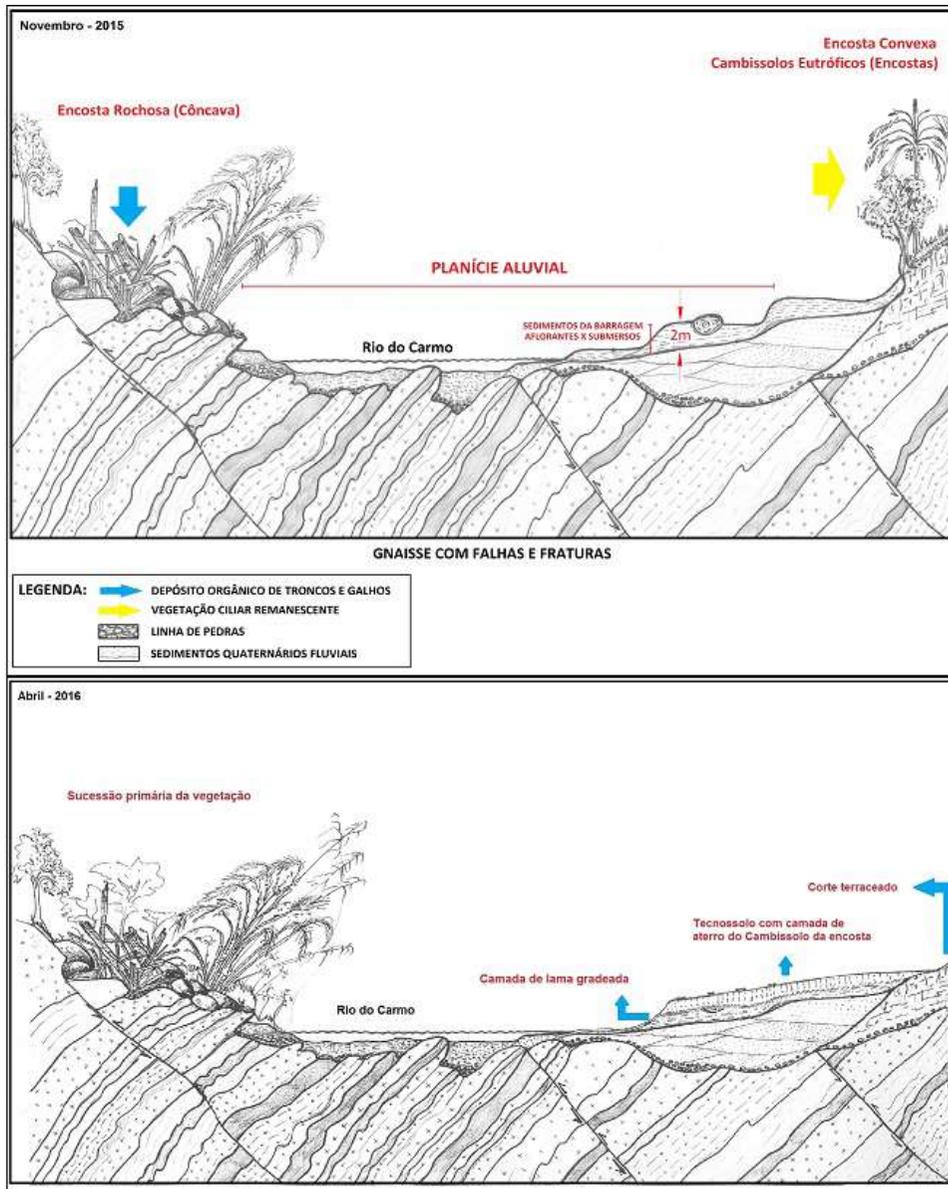
- 50 milhões de m<sup>3</sup> de rejeito de minério de ferro;
- 16 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos permaneceram acumulados próximos ao local do desastre;
- 32 milhões m<sup>3</sup> foram extravasados e chegaram a atingir uma altura de 5,5 metros acima da planície aluvial;
- 80% desse material ficou retido ao longo dos primeiros 100 km;
- Gualaxo do Norte, Carmo, Piranga e Doce até a usina Risoleta Neves;
- total de 663 km lineares até chegar no litoral do Espírito Santo (CPRM, 2015).



**O Vale suspenso com Candeial e Matas antes da Barragem (2005) e ampliações sucessivas (2011, 2015) até Dez 2015 (logo após desastre) - Um Vale, Florestas subtropicais e Microbacias suprimidos!**

# TECNOSSOLOS

- Solos que se desenvolvem à partir de substratos decorrentes da atividade antrópica, inclusive da mineração, e que devem sofrer intervenções visando a recuperação da qualidade (Rossiter, 2007); provê um marco conceitual importante, pois requer ação corretiva.
- > 20% de material tecnogênico nos primeiros 100 cm;
- Ladrilhos, cerâmicas, vidros, pedras trituradas, rejeitos diversos, resíduos industriais e urbanos, resíduos de minas dentre outros WRB (2006).
- Não são Antrossolos!



**Perfil esquemático do depósito de lama proveniente do rompimento da barragem e Tecnossolos em seu estágio Zero de evolução- cenário imediatamente após o desastre (Novembro 2015).**

**Corte e aterro das encostas vizinhas para promover a formação de um novo terraço e tecnossolo Com melhores características físicas e químicas (Depósito de Cambissolo sobre tecnossolo) e recuperação (2018)**



**Rejeito galgou 7 metros nas encostas com Cambissolos!!!**

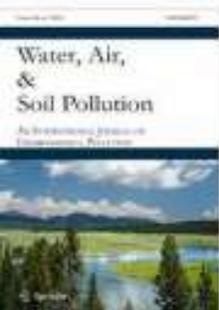


**Deposito de rejeito: decapitação e deposição sobre Neossolos Flúvicos da planície: até 200 cm!!**

- Momento inicial: superfície com forte selamento do solo (*hard-setting*); muita areia fina e silte, com argila dispersa cimentante
- Crosta resistente à penetração quando seco, mas altamente susceptível ao transporte quando umedecido;
- Com a erosão do material, substrato residual é rico em areia fina e silte;
- Naturalmente Compactado;
- Entrave à recuperação natural sem alguma intervenção físico-mecânica e biológica.

**Tabela 2:** Quadro síntese de Análises químicas e físicas de 65 amostras de lama e solos : pelo desastre. Adaptado de Schaefer et al. (2016).

Análises		Tecnosolo (lama)		Neossolo Flúvico		Cambissolo	
		Média	Desvio Pad.	Média	Desvio Pad.	Média	Desvio Pad.
pH	H <sub>2</sub> O	5,69	0,19	5,65	0,19	5,77	0,15
	KCl	6,25	1,25	4,91	0,6	4,6	0,3
P		9,34	3,48	11,05	24,5	5,38	3,97
K	mg/dm <sup>3</sup>	18,43	22	15,87	12,32	46,67	62,81
Na		11,61	11,98	5,23	4,62	4,88	8,91
Ca <sup>2+</sup>		1,45	0,69	1,61	0,99	1,76	1,44
Mg <sup>2+</sup>		0,34	0,48	0,57	0,43	0,48	0,37
Al <sup>3+</sup>		0,016	0,07	0,07	0,15	0,14	0,22
H+Al	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	1,06	1,33	1,53	1,07	3,28	1,23
CTC (T)		2,96	2,09	3,78	1,54	5,67	2,3
MO	dag/kg	0,91	1,54	0,85	0,69	1,42	1,03
P-rem	mg/L	28,68	11,07	29,57	11,2	24	9,4
Fe	mg/dm <sup>3</sup>	499,2	476,01	610,3	528,28	604,72	556,04
Pb		0,41	0,44	0,73	1,38	1,57	1,45
Areia Grossa	kg/kg	0,16	0,18	0,24	0,21	0,26	0,08
Areia Fina		0,33	0,19	0,36	0,21	0,2	0,08
Silte		0,32	0,18	0,16	0,1	0,14	0,07
Argila		0,18	0,17	0,23	0,19	0,39	0,11
Dens. Solo	g/cm <sup>3</sup>	1,41	0,53	-	-	-	-
Dens. Solo profundidade		1,54	0,42	-	-	-	-
Dens.Part		2,75	0,29	-	-	-	-
Dens.Part. Profundidade		2,8	0,23	-	-	-	-



[Water, Air, & Soil Pollution](#)

July 2017, 228:252 | [Cite as](#)

# Post-catastrophe Analysis of the Fundão Tailings Dam Failure in the Doce River System, Southeast Brazil: Potentially Toxic Elements in Affected Soils

[Authors](#)

[Authors and affiliations](#)

Marcelo Braga Bueno Guerra , Brian T. Teaney, Brianna J. Mount, Daniel J. Asunskis, Brennan T. Jordan, Ryan J. Barker, Eliana E. Santos, Carlos Ernesto G. R. Schaefer

Article

First Online: 20 June 2017

1k

4

Downloads Citations



**Arquivos**  
DO MUSEU DE HISTÓRIA NATURAL  
E JARDIM BOTÂNICO

ARQUIVOS DO MUSEU DE HISTÓRIA NATURAL E JARDIM BOTÂNICO/FMG BELO HORIZONTE v.34, n.1/2, 2018

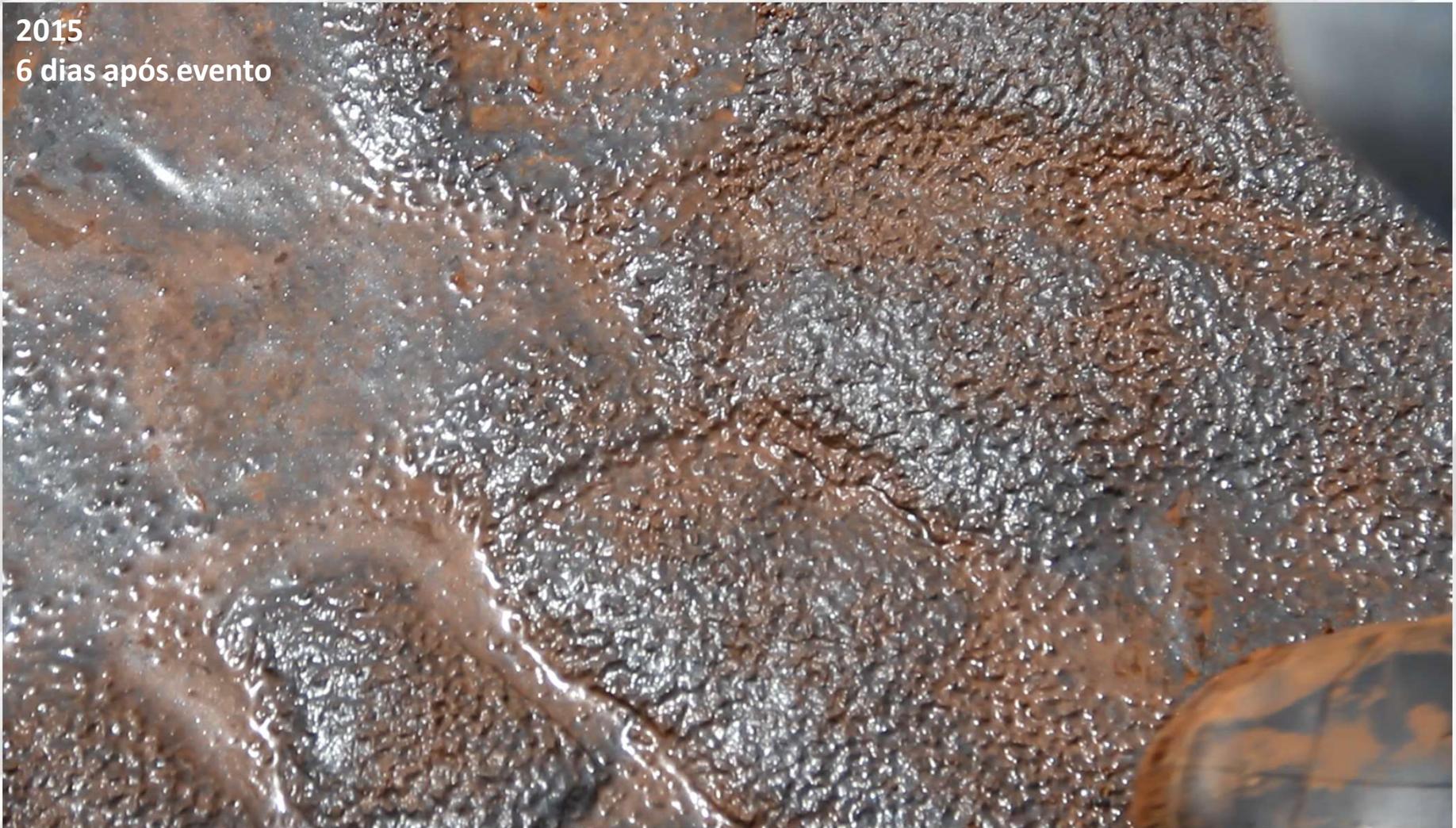
**Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnoossolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG.**

**Historical scenario, physiography and strategies for environmental rehabilitation of the landscape affected by the Fundão Dam breaking accident at Mariana, Minas Gerais State.**

Carlos Ernesto G. Reynaud Schaefer<sup>1</sup>, Eliana Elizabet dos Santos<sup>2</sup>, Caetano Marciano de Souza<sup>3</sup>, José Damato Neto<sup>4</sup>, Elpídio Inácio Fernandes Filho<sup>5</sup>, Caroline Delpupo<sup>6</sup>

**RESUMO**

2015  
6 dias após evento



11/2015



Fonte: Labgeo

Diferentes Tecnosolos  
monitorados desde 2015  
Background físico-químico inicial  
preservado (Schaefer et al., 2016)



11/2015



Encontro do Rio Gualaxo do Norte com Rio do Carmo.

04/2016







04/2016



- **Subprojeto 1**

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

- **Subprojeto 2**

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

- **Subprojeto 3**

- ESTIMATIVA DE VOLUME DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM TERRAÇOS FLUVIAIS POR MEIO DE TECNOLOGIA LIDAR

- **Subprojeto 4**

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

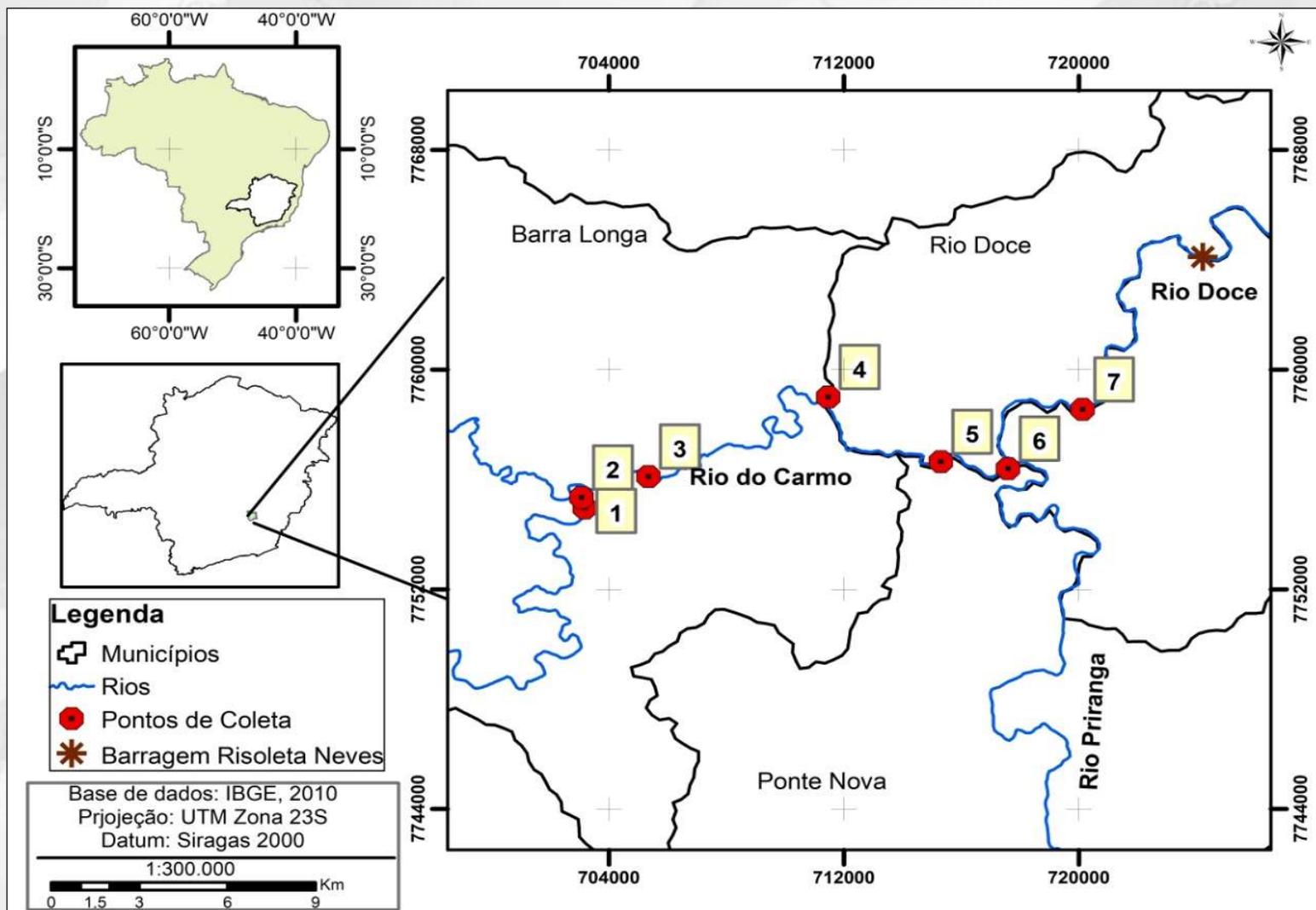
# PEDOGÊNESE DOS TECNOSSOLOS DE MINÉRIO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO – ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL

- Avaliar a evolução pedogenética dos Tecnossolos, é de grande importância para estabelecer medidas de intervenção que melhorem as propriedades do solo com intuito de criar condições para reestabelecimento da biodiversidade.
- Desta forma o presente trabalho teve como objetivo avaliar e comparar as condições originais e atuais do rejeito evidenciando a perda/ganho nutricional caracterizando as modificações que houve nas áreas afetadas.

# MATERIAL E MÉTODOS

- Coletas em novembro de 2015- (T1)
- 22 pontos - profundidades de 0-20, 20-40 e 40-60 cm
- Análises químicas, físicas (EMBRAPA, 2011)
- Análise Mineralógica- separação das frações granulométricas segundo método da centrífuga (Jackson, 2005)
- Difractometria de Raios-X (DRX);
- 16 pontos - rejeito
- 6 amostras do solo do entorno (Referência)
- Publicados por (Schaefer et al., 2016).

- A segunda coleta de amostras (T2) - dezembro de 2018.
- Dos 16 pontos, apenas 7 estavam aptos à realização da segunda coleta, pois não sofreram intervenções na paisagem superficial
- Coletas nas profundidades de 0-15, 15-45 e 45-60 cm
- Nesta etapa também foi observadas e quantificadas: profundidade/presença de raízes e atividade biológica nos perfis.



# RESULTADOS E DISCUSSÃO

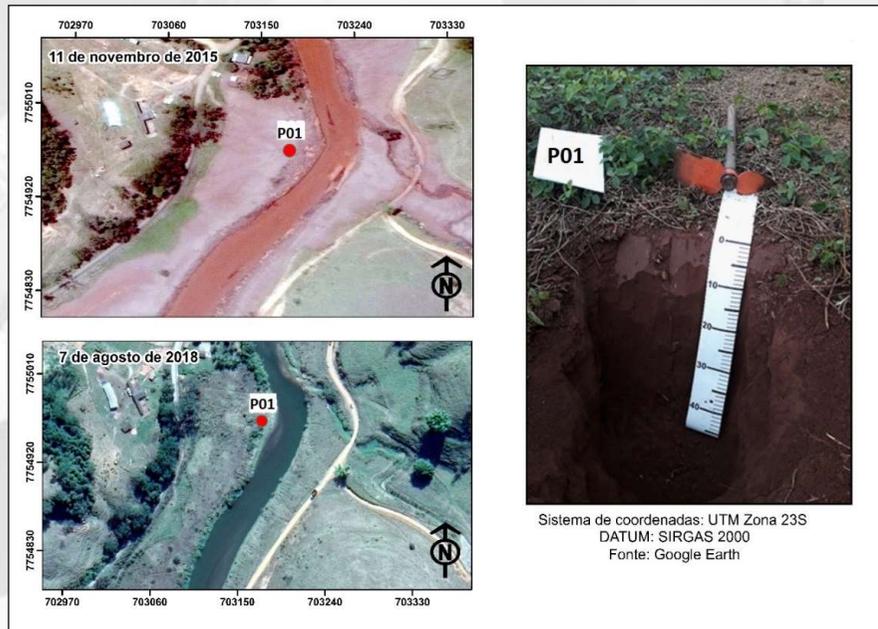


Figura 2. Ponto de coleta nº01

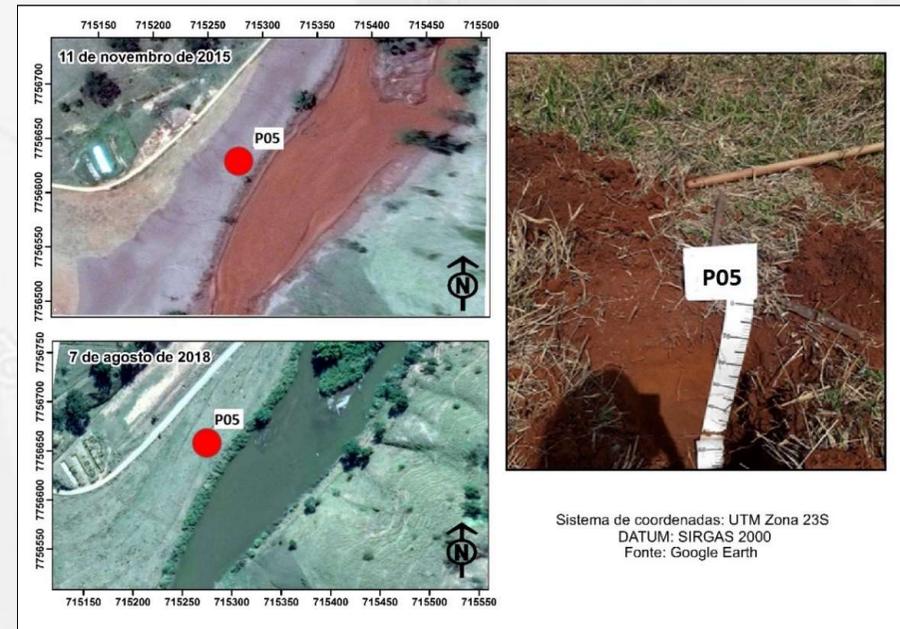
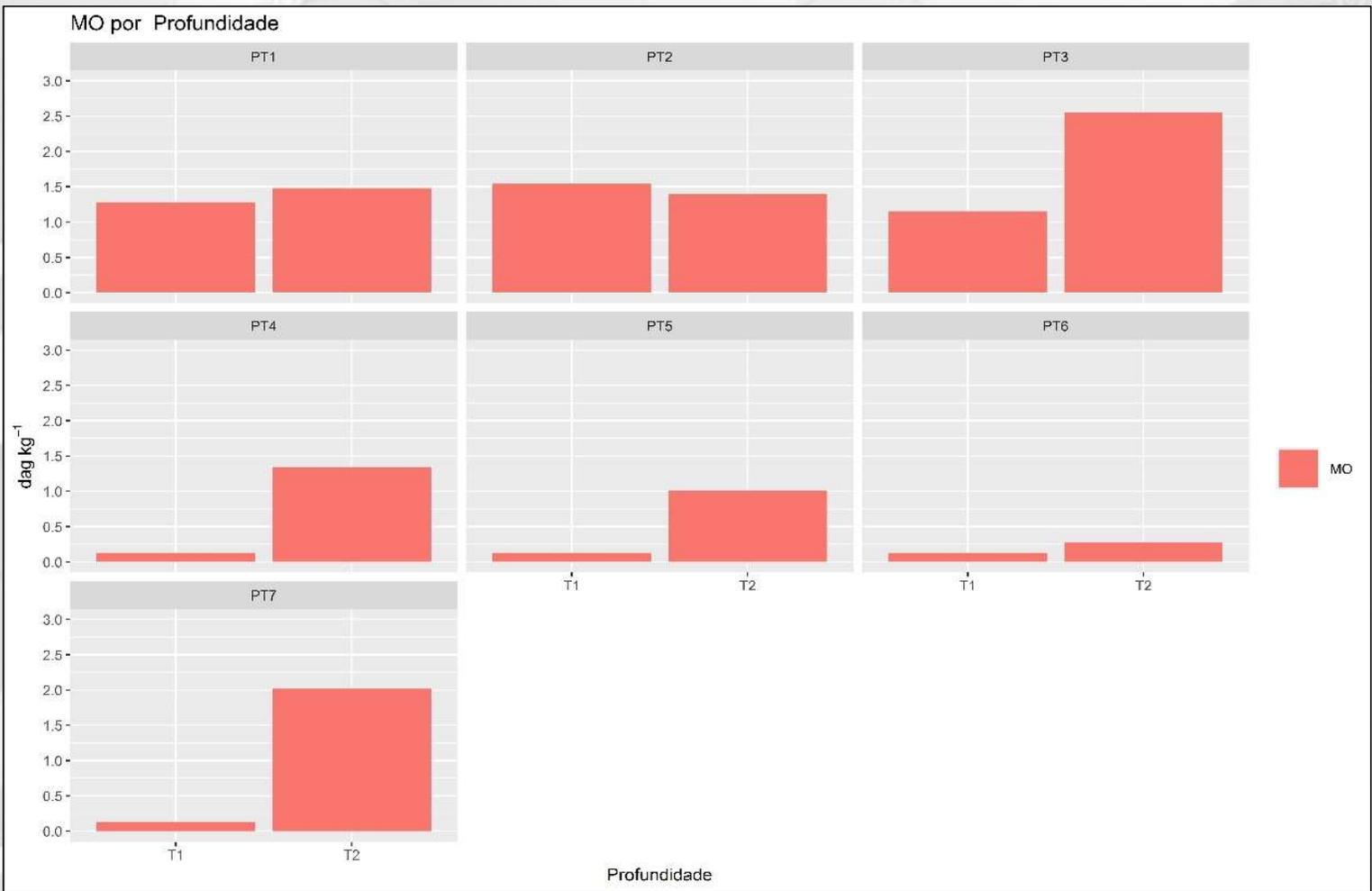


Figura 5. Ponto de coleta nº05

Análises		P01		P02		P03		P04		P05		P06		P07		Média		
		T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	
		pH	H <sub>2</sub> O	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	5,96
P	mg/dm <sup>3</sup>	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	7,14	8,47	
K		37	132	22	227	50	87	10	53	7	100	10	62	9	144	20,71	115	
Ca <sup>2+</sup>	cmol <sub>c</sub> /dm <sup>3</sup>	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	1,32	2,11	
Mg <sup>2+</sup>		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	0,22	0,74	
H+Al		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	0,35	0,88	
CTC (T)		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	2,41	4,04	
t		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	1,76	3,15	
V	%	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	77,45	80,02	
MO	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	0,64	1,43	
P-rem	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	32,30	33,37	
Fe	mg/dm <sup>3</sup>	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	183	308	
Cu		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	1,40	2,38	
Mn		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	134	101	
Zn		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	0,86	2,70	
Cr		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	0,99	1,00	
Ni		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	1,20	1,01	
Cd		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	0,27	0,28	
Pb		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	1,76	0,65	
Areia Grossa		kg/kg	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	0,14	0,07
Areia Fina			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	0,33	0,34
Silte	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	0,35	0,35	
Argila	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	0,17	0,21	
Dens.Part	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	3	2,93	
Dens.Solo	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	2,1	1,97		



**Figura 10:** Matéria orgânica em T1 e T2

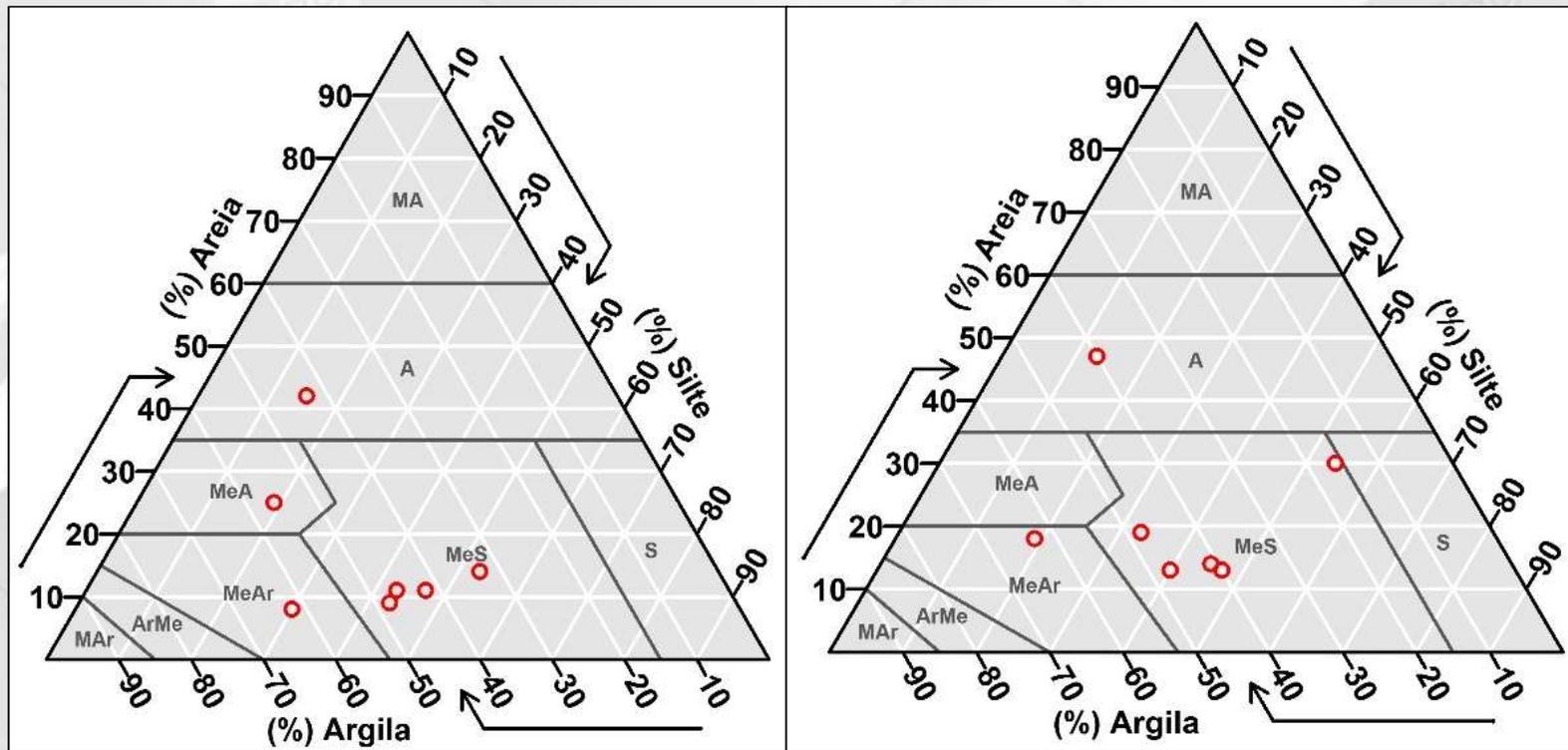


Figura 9: Classificação textural do rejeito em T1 e T2

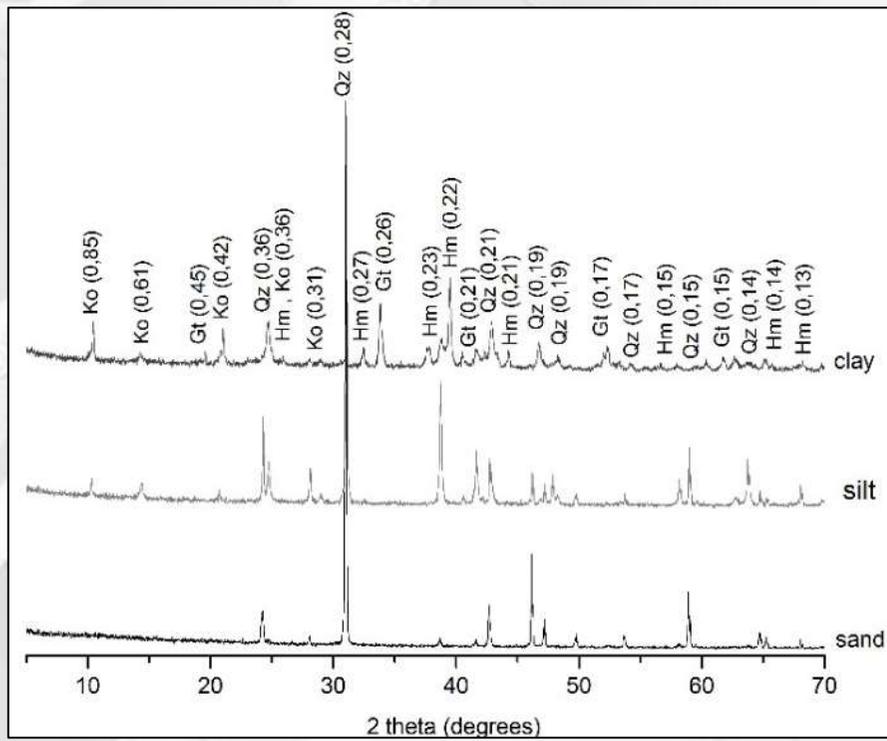


Figura 12. Difratoograma ponto 1 tempo 1

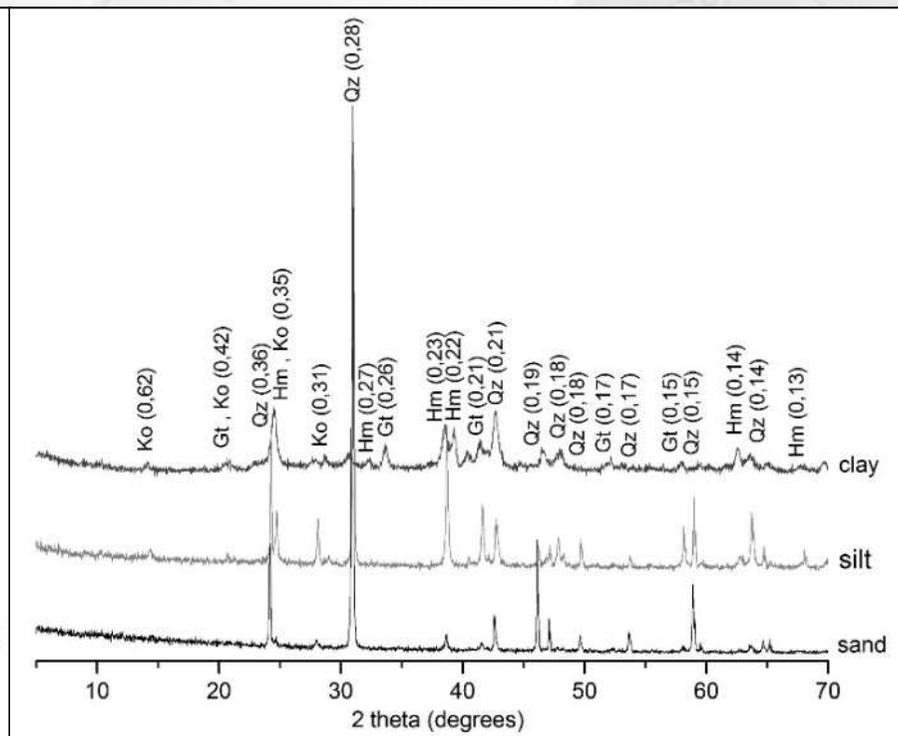


Figura 13. Difratoograma ponto 1 tempo 2

# CONCLUSÕES gerais sub projeto 1

- Comparando com os solos do entorno, os Tecnosolos apresentam pobreza química ligeiramente maior e limitações físicas mais severas para a recuperação; não há contaminação ponderável.
- Verificou-se bom potencial de melhoria nas condições físicas e químicas do solo, principalmente nos horizontes superficiais, através da atividade biológica, nos processos de recuperação dos tecnosolos; Indicadores conjugados!
- Estão sendo testadas novas estratégias de intervenção e experimentos para potencializar os processos de recuperação da área de forma localizada e específica.

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

- *Light Detection and Ranging;*
- Coordenadas tridimensionais de pontos em uma superfície, baseando-se na emissão de um pulso laser, tendo como instrumentos por exemplo os LST e LSA (Giongo et al., 2010).

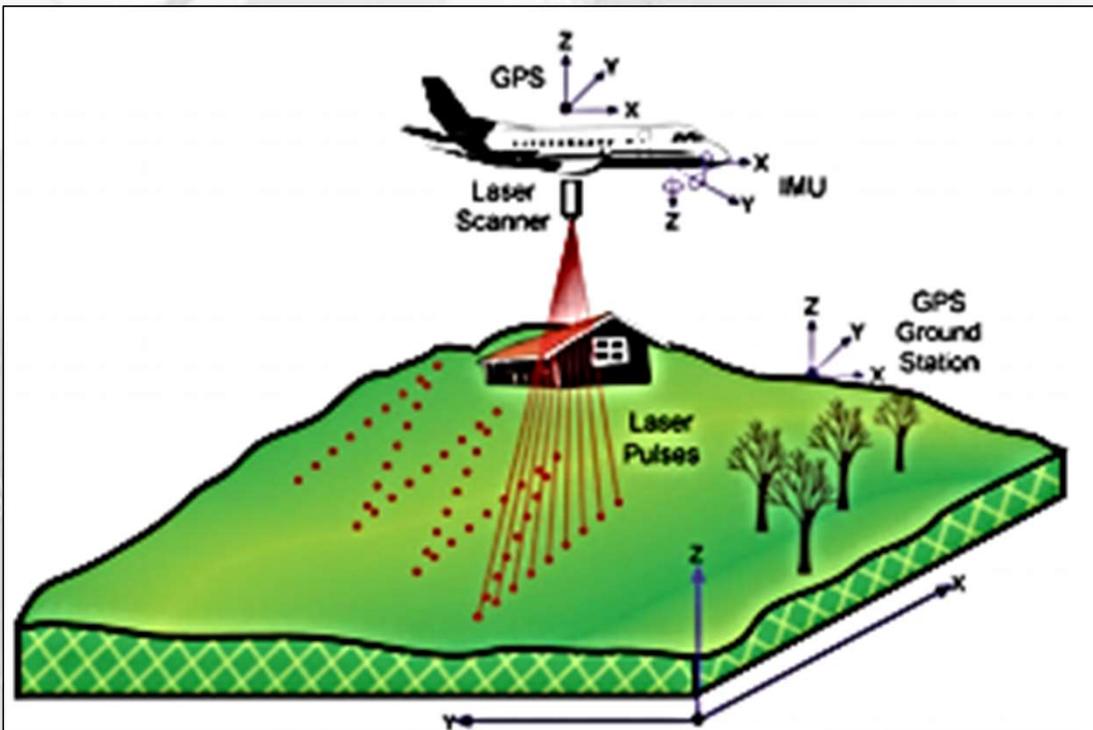


Figura 1: LSA

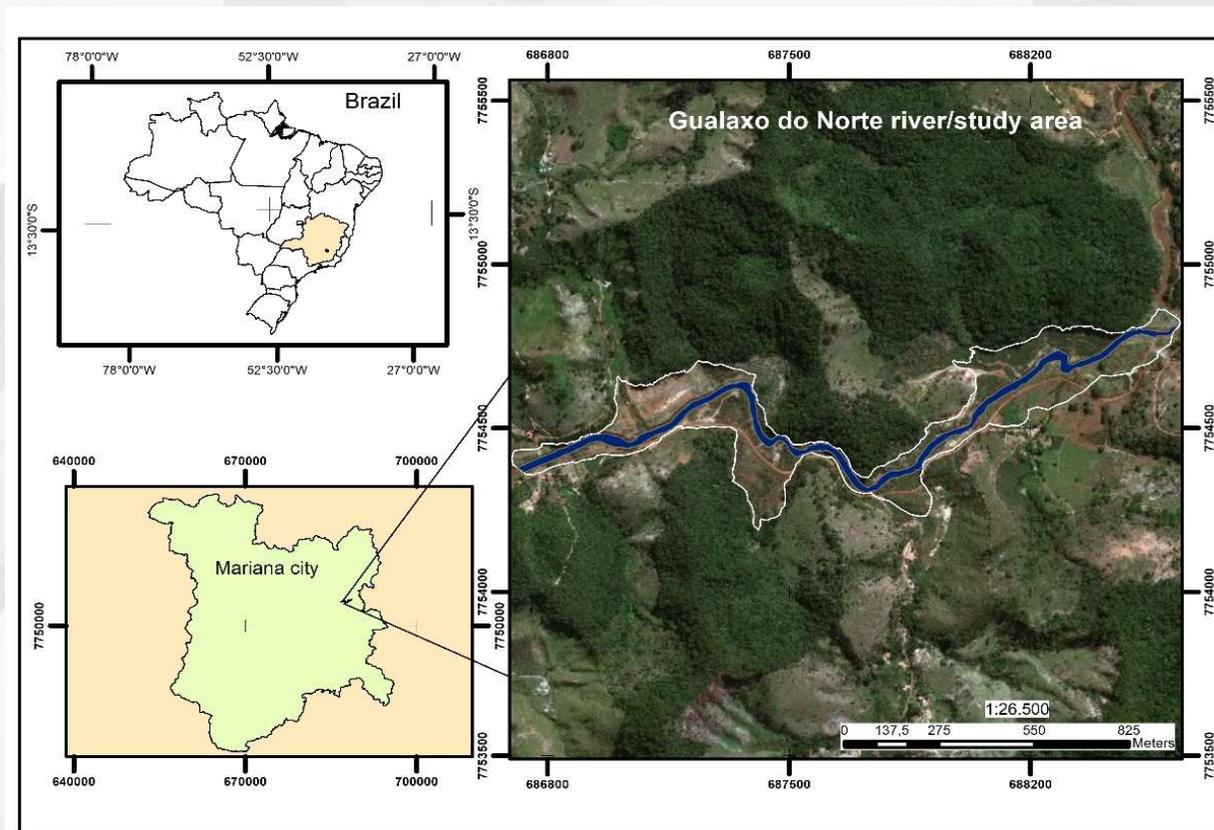


Figura 2: TSA

# OBJETIVOS

- Avaliar as alterações nas áreas afetadas pela deposição de rejeito antes e após o desastre, bem como as modificações após a implementação de ações de recuperação, utilizando nuvens de pontos geradas por sistemas de varredura Laser Scanner.

# MATERIAIS E MÉTODOS



**Figura 2:** Localização da área de estudo

- Área com 3 quilômetros de extensão e área de 5 ha;
- LSA – 2011;
- LSA-50 (Leica Geosystems), com abertura de 70° e frequência de até 150 kHz;
- LST modelo RIEGL VZ-1000- 300 kHz (450 m) e panorama 40;
- 2016/2018.

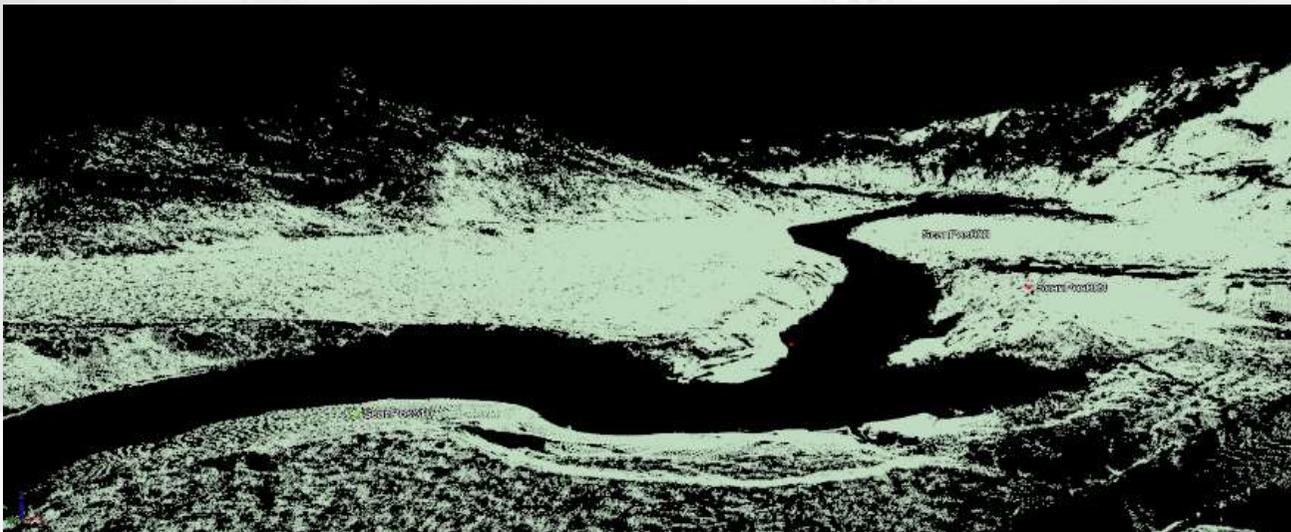
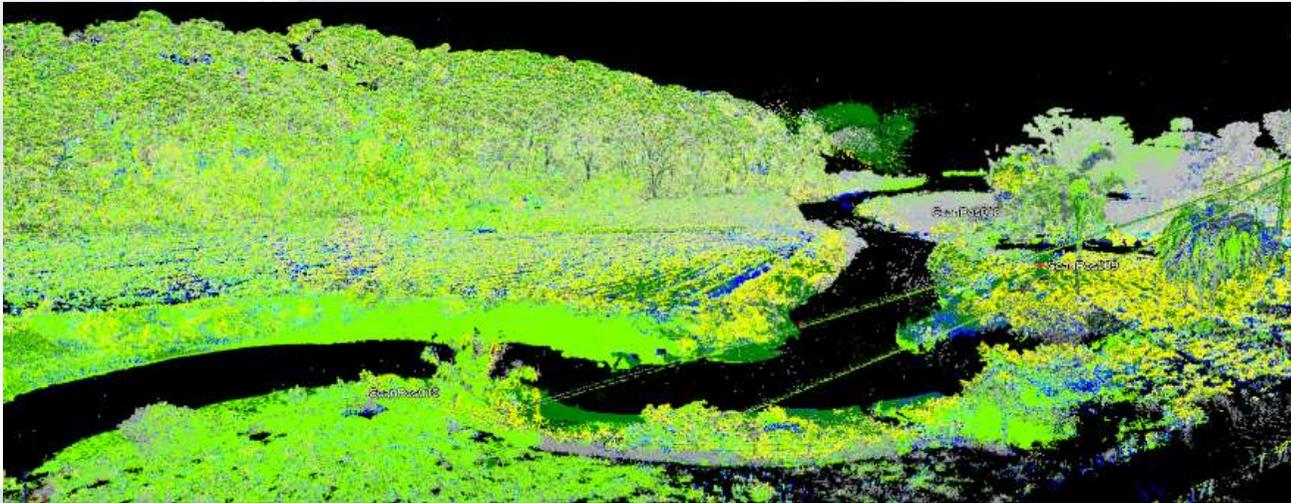
- GNSS (Global Navigation Satellite System) modelo Leica GS8 Plus



**Figura 3:** Leica GS8

# Processamento

- Software Leica Geoffice 5.1;
- Riscan Pro. 6.1- registro e ajuste das nuvens de pontos;
- Filtros para remoção da vegetação ( 3 filtros).



**Figura 4:** Parte da nuvem de pontos sem e com filtros

# VALIDAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS

- 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

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

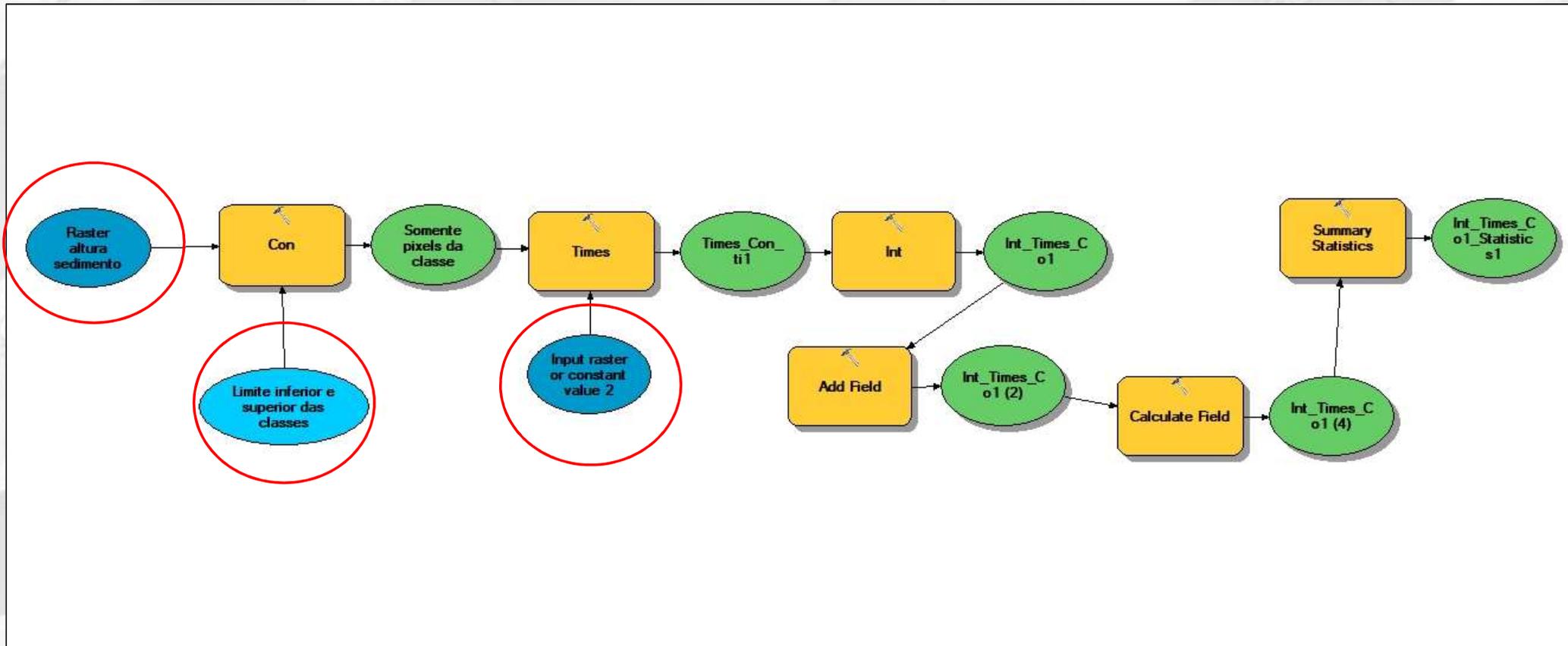
Onde,

Pi são os valores preditos;

Oi são os valores observados

N são o número de observações

- CloudCompare versão 2.10;
- 2011 (LSA) e de 2016 (LST);
- LST de 2016 e 2018;
- Sem interpolações;
- ArcGis 10.6- Cálculo de volume- layout.



**Figura 5: Model Builder para cálculo de volume**

## Validação 2 - do eixo Z

- Aberto 7 perfis no rejeito até seu contato com solo;
- Comparação com a espessura da camada gerado pela diferença da nuvem antes e posterior ao desastre.

# RESULTADOS E DISCUSSÃO

- **Ajuste e processamento das nuvens - LST de 2016 e 2018**

**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

- Próximos aos obtidos por Schunemann et al. (2017), que encontraram  $\sigma$  máximo de 0,0848 no mapeamento das áreas livres de gelo da Antártica marítima por LST.

# Ajustamento entre as nuvens

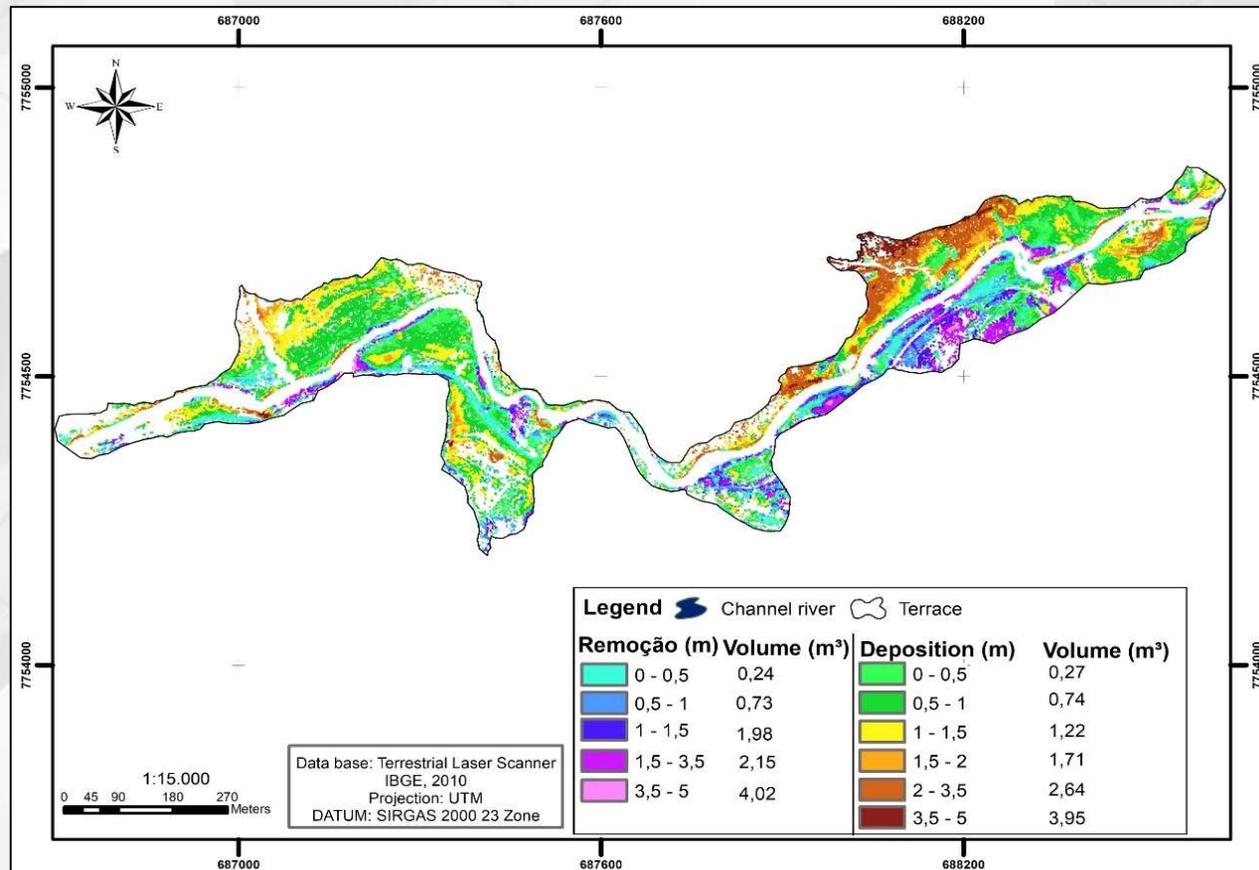
- 10 pontos em comum entre LST 2016 e 2018 onde não fosse possível haver modificações no eixo Z como estruturas de casas, postes e pontes;
- O erro médio de ajustamento no eixo X entre as nuvens foi em média de 0,15 cm, enquanto que tanto para Y como para Z foi de 0,20 cm.



**Figura 8:** Parte da nuvem LST 2016, 2018 e LSA, respectivamente.

- A nuvem LST de 2016, possui 56 milhões de pontos, enquanto a nuvem de 2018, 30 milhões – 1120 pontos/m<sup>2</sup>; 600 pontos/m<sup>2</sup>;
- A nuvem LSA contém aproximadamente 63 mil pontos – 1,2 pontos/m<sup>2</sup>

# Exemplo de Espacialização do rejeito nos terraços fluviais



**Figura 9:** Camada de rejeito depositada e retirada nos terraços fluviais.

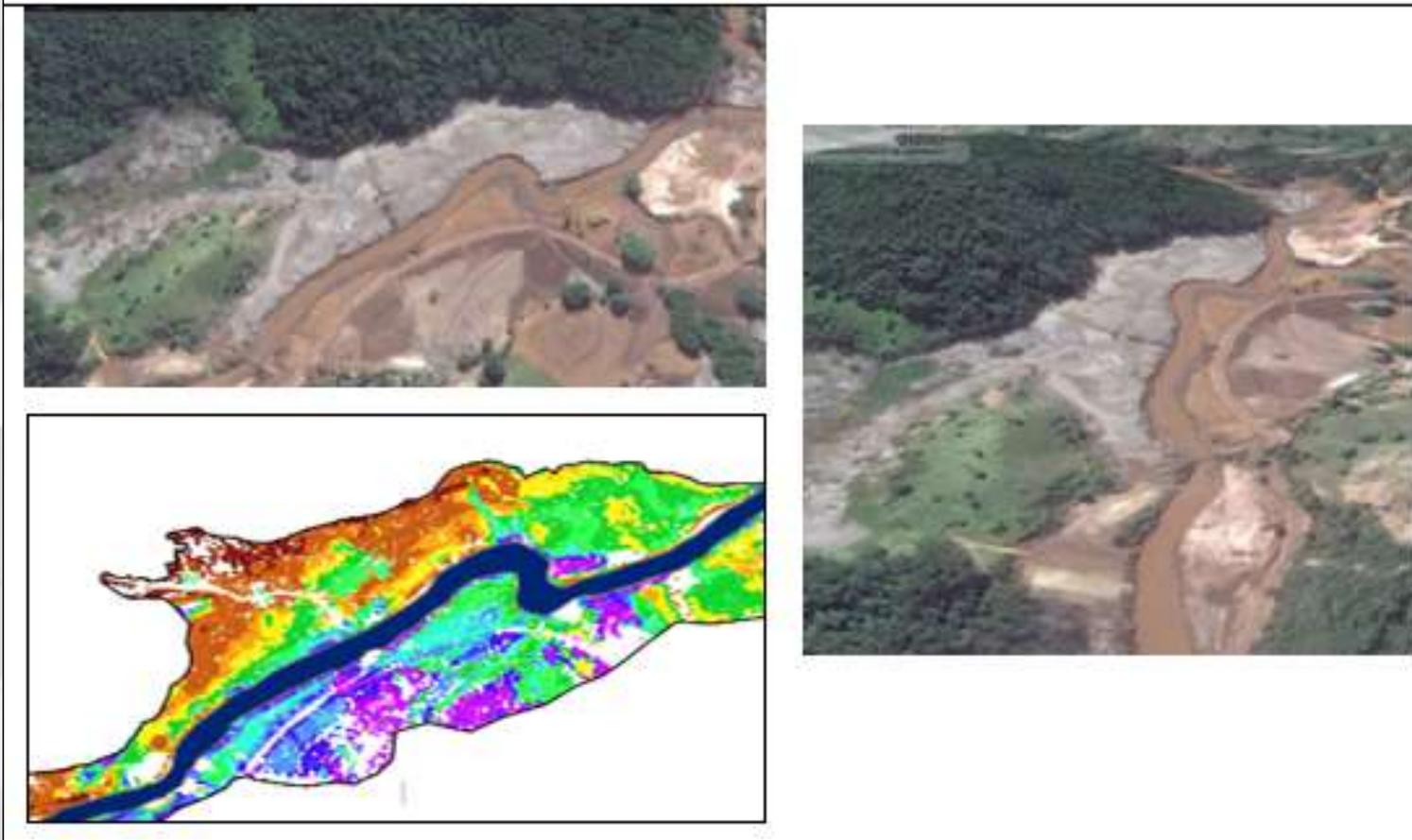
- Volume de 39.294 m<sup>3</sup> em uma área de 33.570 m<sup>2</sup>, obtendo-se uma média de 1,17 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>;
- A área de deposição representa 68% da área total de estudo (área relativa);
- Predominância de deposição no intervalo da camada de 0,5 a 1 metros, o que corresponde a 32% total da área relativa com 0,27 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de rejeito.

**Tabela 1:** Espessura da camada erodida entre 2016-2018 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

- 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 11.



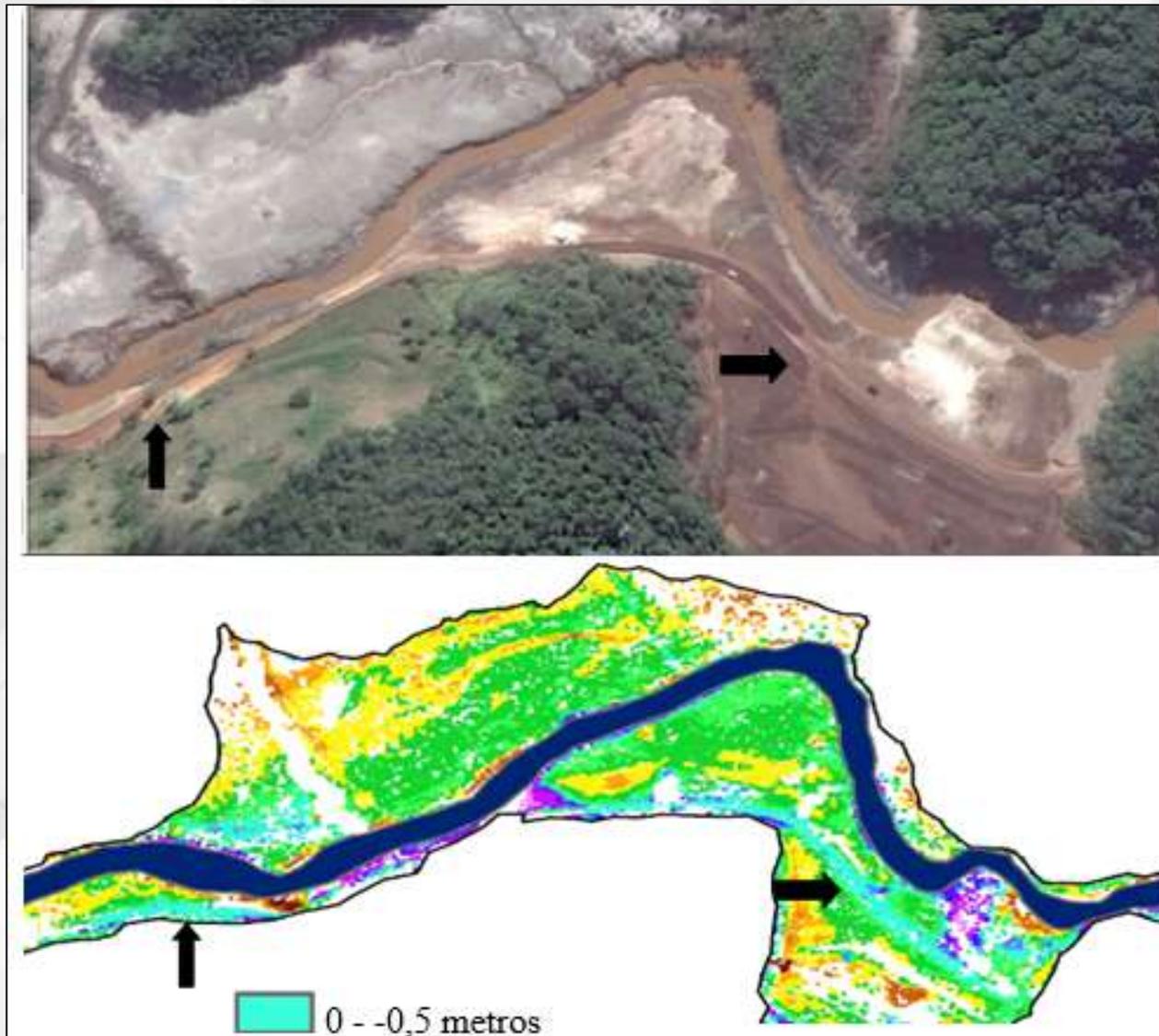
**Figura 11:** Áreas com maior deposição de Tecnosolo sob diferentes perspectivas.

A área de remoção representa 32% da área total de estudo com um volume de 10.059 m<sup>3</sup>, conferindo assim o volume de retirada de 1,31 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de rejeito;

**Tabela 1:** Espessura da camada erodida por área relativa.

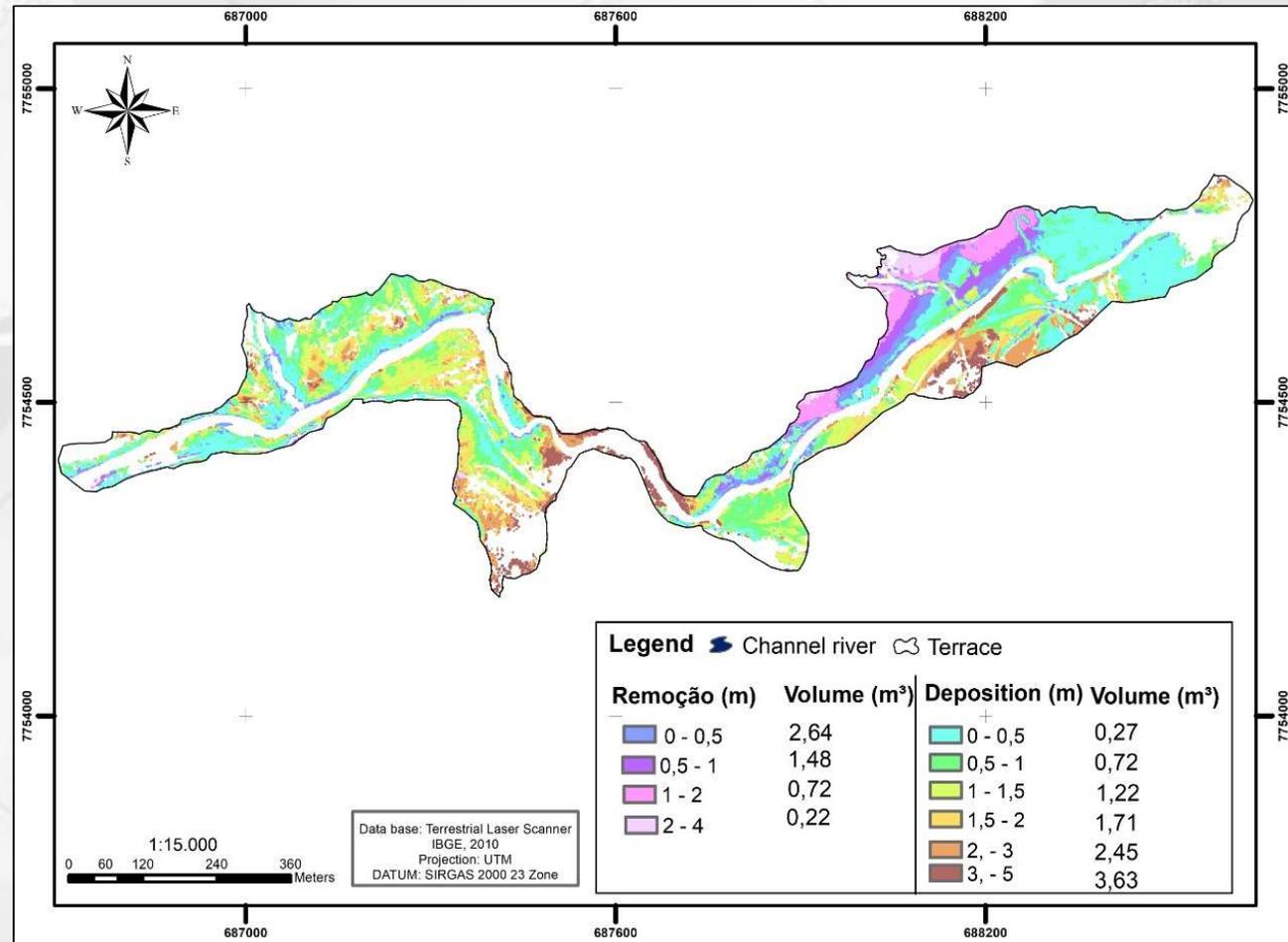
Deposição (m)	Área relativa (%)	Remoção (m)	Área relativa (%)
0 a 0,5	20	0 a 0,5	30
0,5 a 1	32	0,5 a 1	19
1 a 1,5	23	1 a 1,5	32
1,5 a 2	10	1,5 a 3,5	17
2 a 3,5	13	3,5 a 5	2
3,5 a 5	2	5 a 3,5	1

- **Efeito das intervenções:**Essas áreas de remoção, estão relacionadas com a retirada de rejeito realizada pela empresa responsável pelas obras de recuperação;

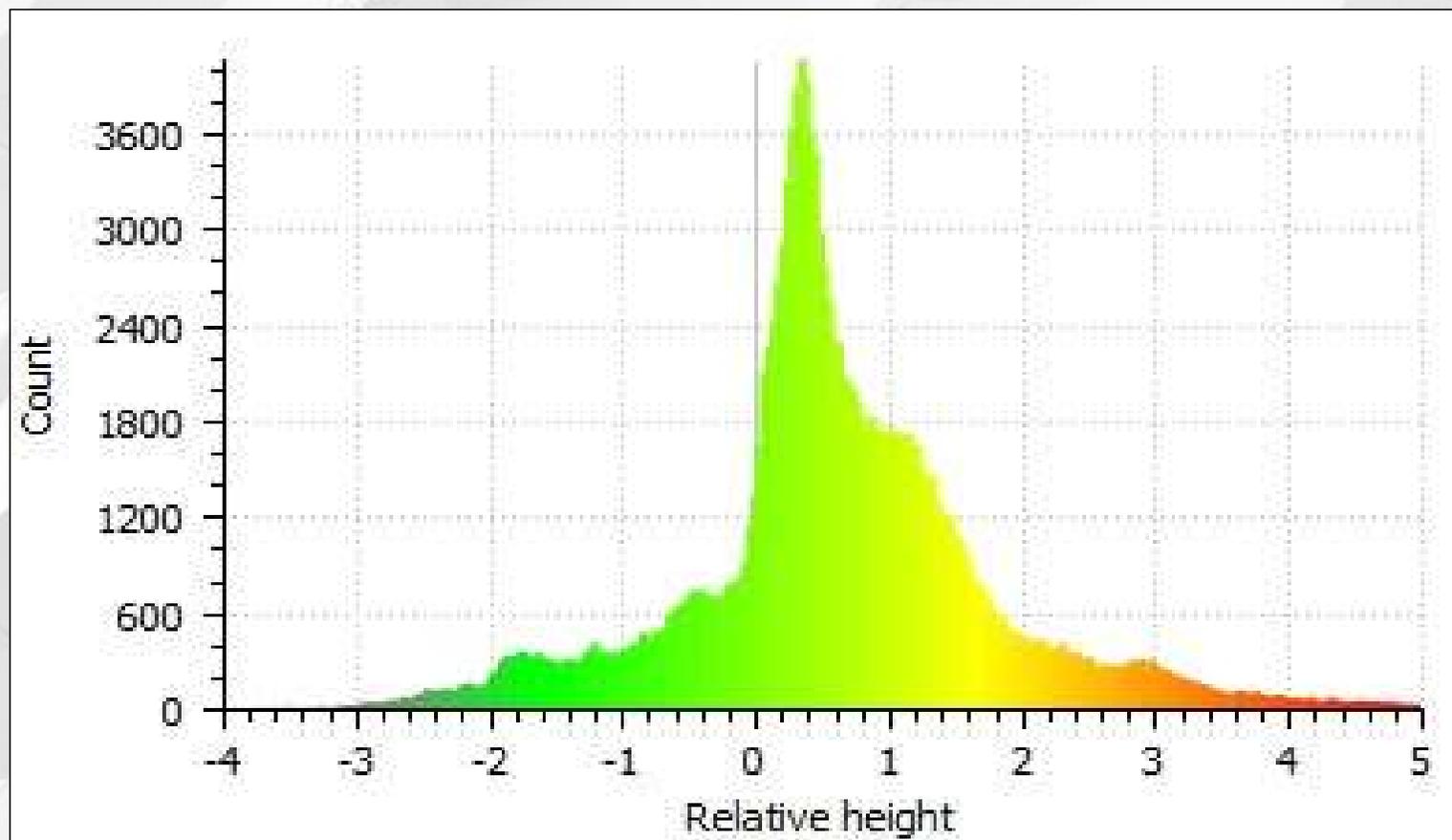


**Figura 12:** Representação de parte da estrada.

# Comparação nuvem de pontos LST 2016-2018



**Figura 13:** Situação atual de acúmulo de rejeito nos terraços fluviais.



**Figura 16:** Distribuição de valores da camada de rejeito (metros).

**Tabela 3:** Espessura da camada por área relativa.

Deposição (m)	Área relativa (%)	Remoção (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	—	—

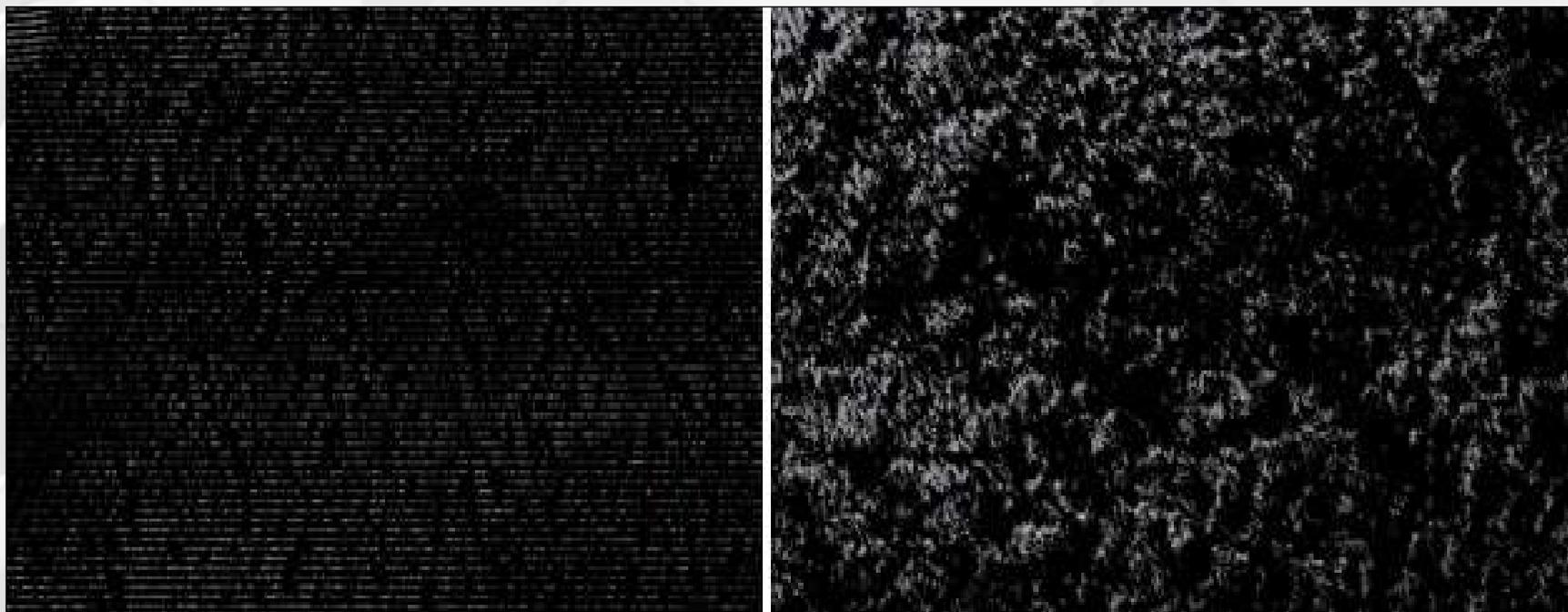
- O intervalo de 0 a 0,5 metros de rejeito compreende 37% da área onde houve depósito de material, seguido da camada de 0,5 a 1 metro, ocupando 25% e 1,5 a 2 metros com 18%. As demais classes somam juntas 21%.

- Acúmulo de material na maior parte do terraço (79% da área total);
- Este acúmulo provavelmente é também devido à adição de *topsoil* sobre a camada de rejeito (Schaefer et al., 2015) para o emprego de técnicas de recuperação e/ou efeito da vegetação na área.



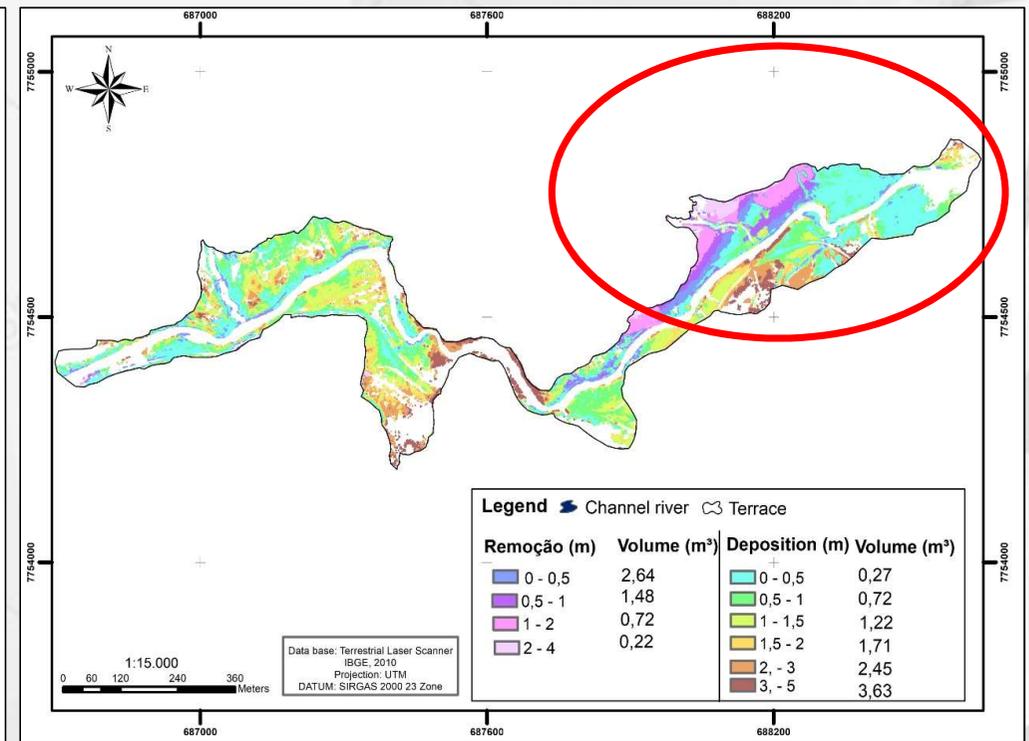
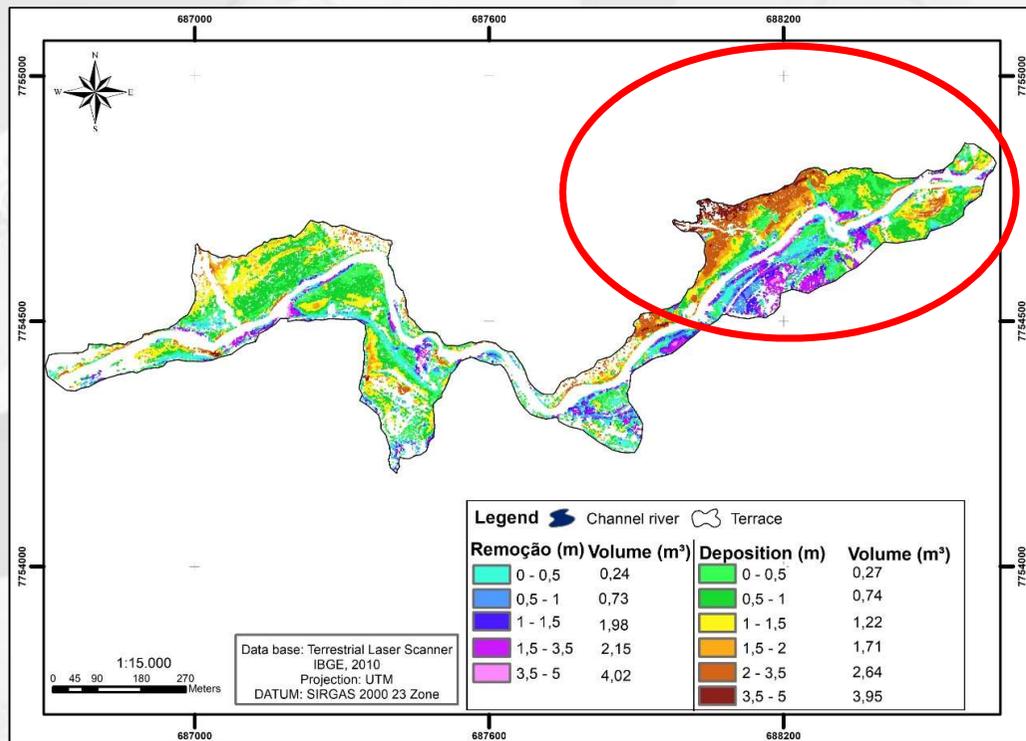
**Figura 14:** Vegetação nos terraços de trecho do Rio Gualaxo do Norte.

- A Figura 15 mostra o padrão de rugosidade do terreno para a mesma área (foto 3 da figura 14), indicando a interferência da cobertura vegetal sobre a leitura do Laser Scanner.



**Figura 15:** Padrão de rugosidade LST 2016 e 2018, respectivamente.

- Areas em que se registrou maior acúmulo de rejeito sofreram maior remoção de material.

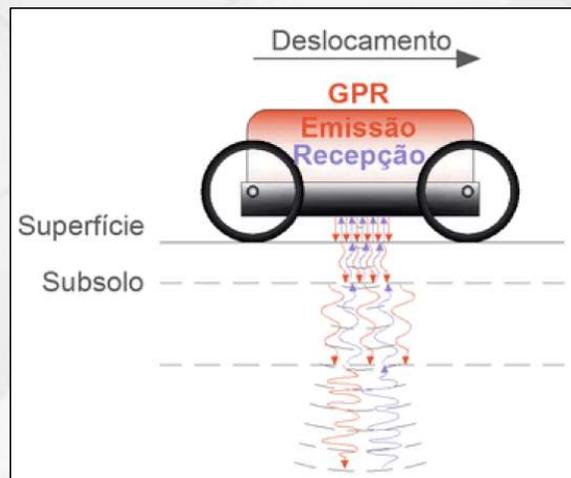


# CONCLUSÕES

- A tecnologia LiDAR mostrou-se promissora para mensurar a camada e o volume de rejeito nos terraços fluviais do Rio Gualaxo do Norte;
- 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;
- Recomenda-se 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 filtros que removam o efeito da vegetação que se desenvolve.

# UTILIZAÇÃO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO (GPR) NO ESTUDO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO EM TERRAÇOS FLUVIAIS

- Radar de Penetração do Solo – Georadar;
- Frequência de rádio (10 a 1000MHz) (Assel et al., 2011; Martel et al., 2018);



**Figura 1: GPR**

- Quanto maior a frequência das ondas eletromagnéticas, maior a resolução vertical dos sinais captados e menor a profundidade atingida;
- Antenas de frequência entre 500 e 900MHz proporcionam resolução de poucos centímetros(BENSON et al. 1982);
- Radargramas - para melhorar a razão sinal/ruído dos radargramas, garantindo a melhoria da visualização dos padrões de interesse (ORTEGA, 2006).

# OBJETIVOS

- Identificar por meio da tecnologia GPR a profundidade da camada de rejeito de minério de ferro em um trecho do Rio Gualaxo do Norte (MG).
- Comparar a estimativa da umidade volumétrica pelo GPR e pelo método do anel volumétrico analisando a viabilidade da técnica GPR em estimar a umidade do solo em larga escala.
- Identificar qual a frequência eletromagnética mais eficiente para análise deste tipo de material.

# MATERIAL E MÉTODOS

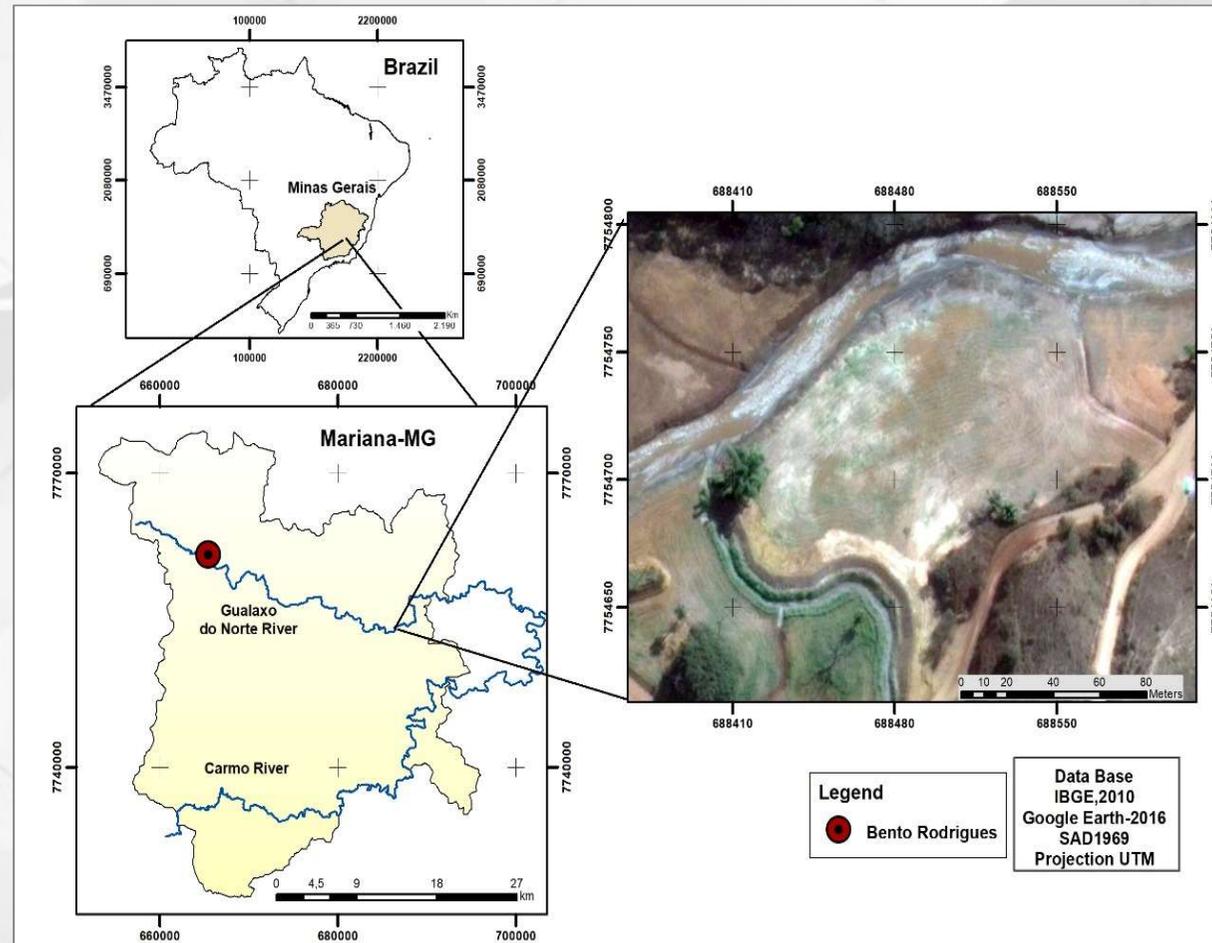
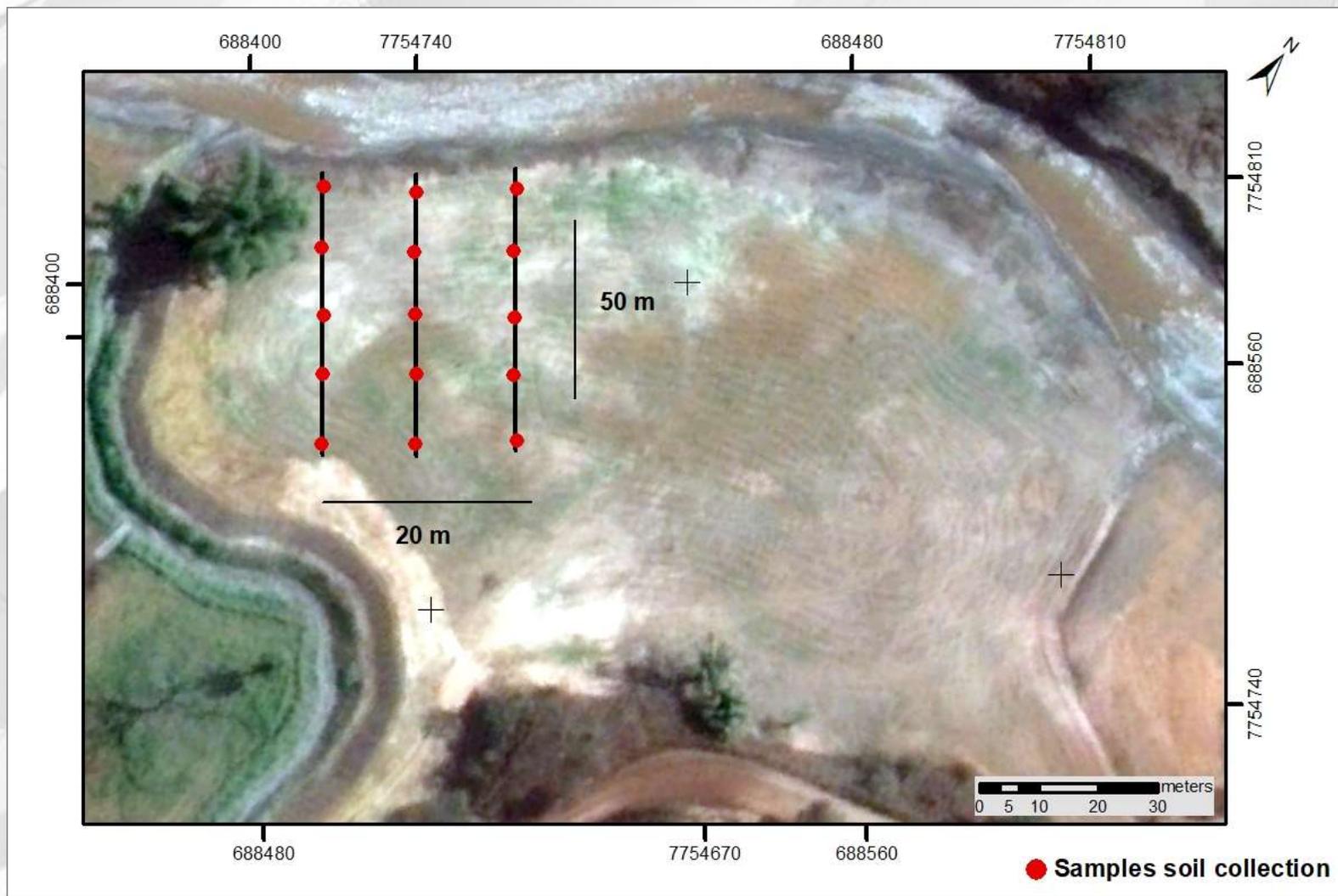


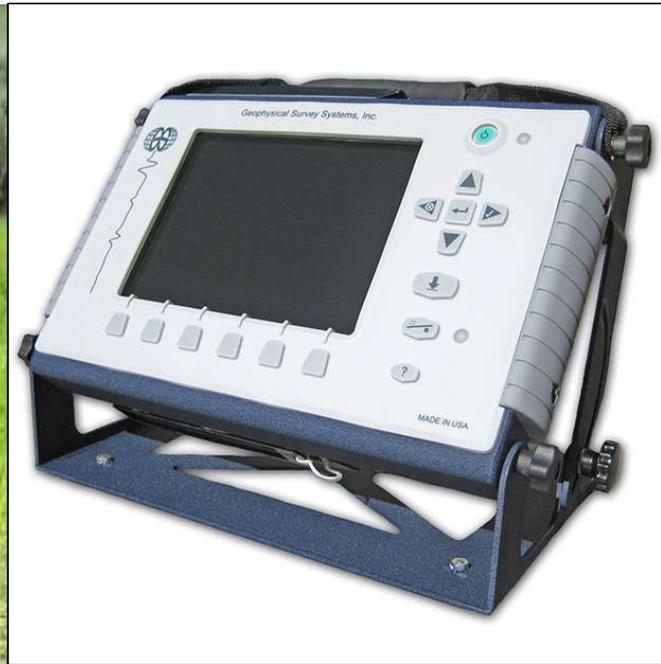
Figura 1: Localização da área de estudo

- A inspeção por GPR foi realizada às margens do rio Gualaxo do Norte, em uma área de aproximadamente 1000 m<sup>2</sup>. Foram delimitados três transectos de aproximadamente 50 metros de comprimento, distantes 10 metros entre si.
- Foram selecionados cinco pontos para abertura de perfil no rejeito em cada Transecto, onde foram coletadas três amostras por perfil nos seguintes intervalos de profundidades: 0-15, 15-30 e 30-45 cm, totalizando 45 amostras.
- As amostras foram submetidas a análise de umidade gravimétrica em laboratório que posteriormente, foi convertida em umidade volumétrica de acordo com EMBRAPA (2011).



**Figura 2:** Transectos com pontos de coleta de amostras de rejeito

- Para realização da inspeção do rejeito, foi utilizado GPR modelo SIR 3000, da GSSI, equipado com diferentes antenas blindadas (200, 400 e 900 MHz) nos três transectos.
- Foi utilizada a constante dielétrica ( $k$ ) 10 de acordo com Porsani (1999), considerando a natureza do rejeito de minério de ferro como argilosa/siltosa (SCHAEFER et.al 2016)



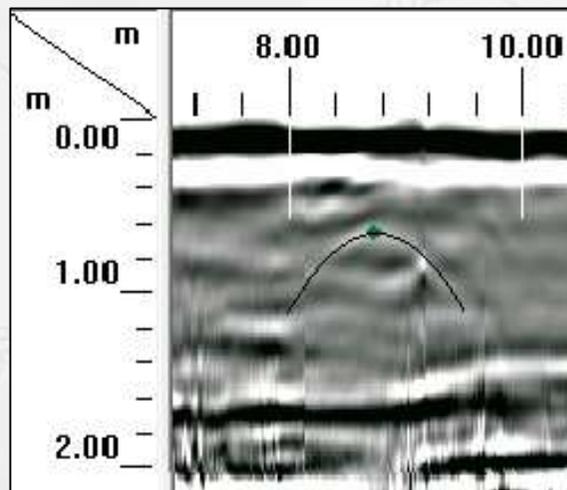
**Figura 2:** GPR - SIR 3000

# Processamento dos dados

- Radan.7 para aplicação de filtros para melhora do sinal eletromagnéticos, exclusão de ruídos e fantasmas;
- Avaliadas a formação de hipérboles de reflexão em radargramas gerados pelas três frequências utilizadas.

# Obtenção de valores de umidade volumétrica a partir dos radargramas

- Hipérboles formadas a partir de reflexões em elementos subsuperficiais do solo, ou seja materiais refletoras, foram melhor identificados pela antena de 200 MHz,



**Figura 3:** Identificação de hipérboles de reflexão

- Após obter o valor da constante dielétrica, fornecida pelo programa utilizado, foi empregada equação proposta por Topp et al. (1980) para a estimativa dos teores de umidade a partir de uma relação empírica com a constante dielétrica (k) e umidade volumétrica,  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ):

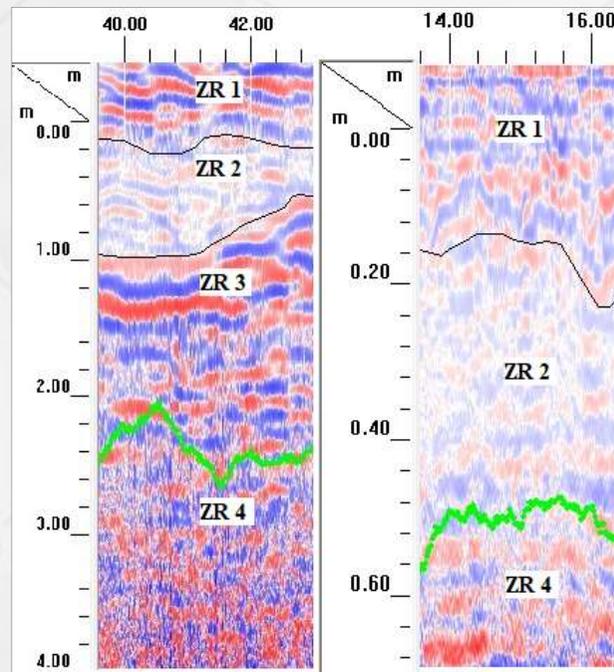
- $\theta = - 5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2}K - 5,5 \times 10^{-4}K^2 + 4,2 \times 10^{-6} K^3$  **(1)**

# Identificação de zonas de reflexão

- Baseou-se na separação visual de camadas de reflexão eletromagnética;
- Mudança de fase da onda através da análise pontual dos traços de amplitude do radargramas para identificar com maior fidelidade a separação das zonas de reflexão, como proposto por Jarentchuk, (2015).

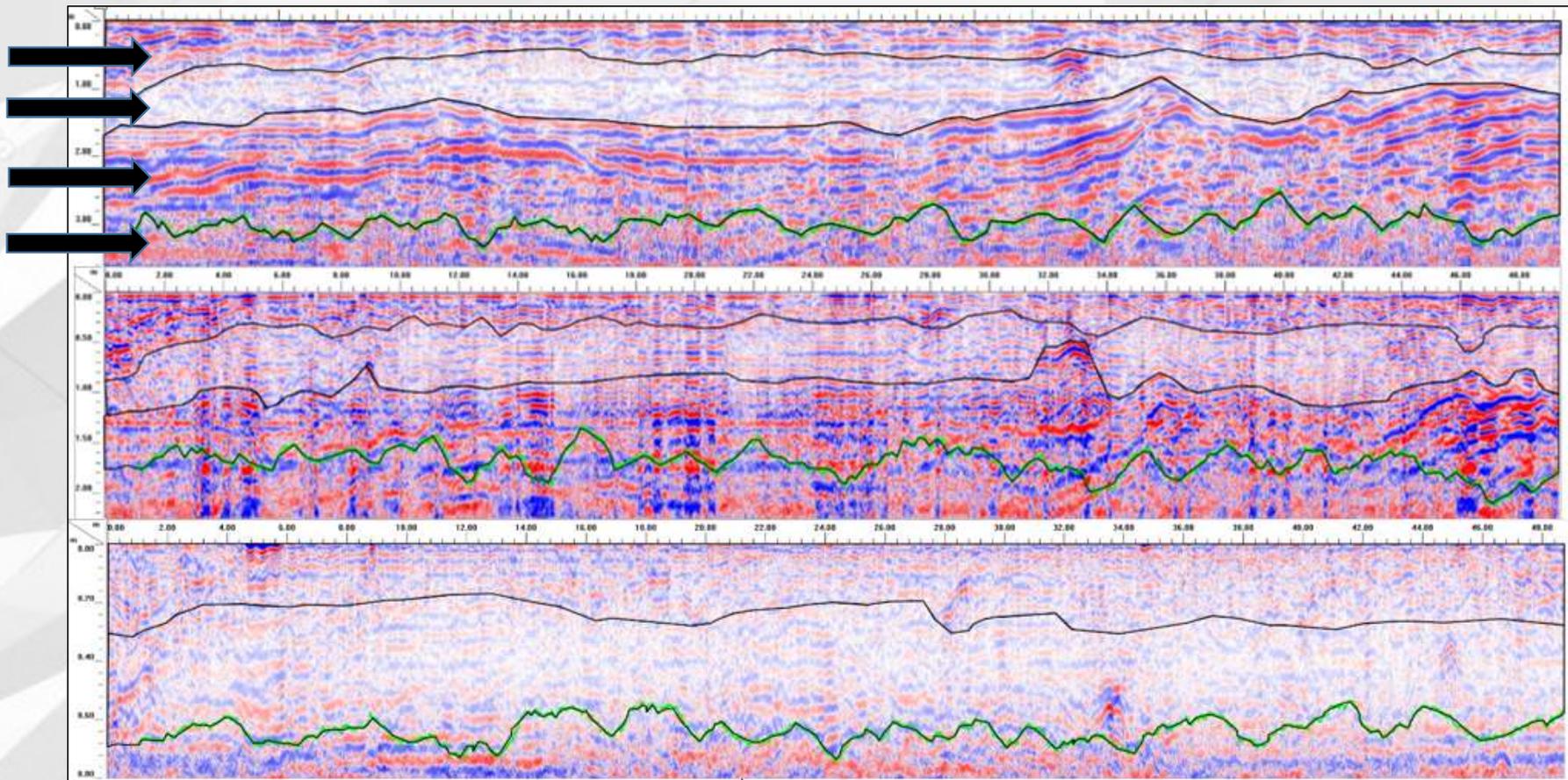
# RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Foram identificadas de duas a três zonas principais de reflexão (ZR) em cada radargramas, dependendo da frequência da antena utilizada

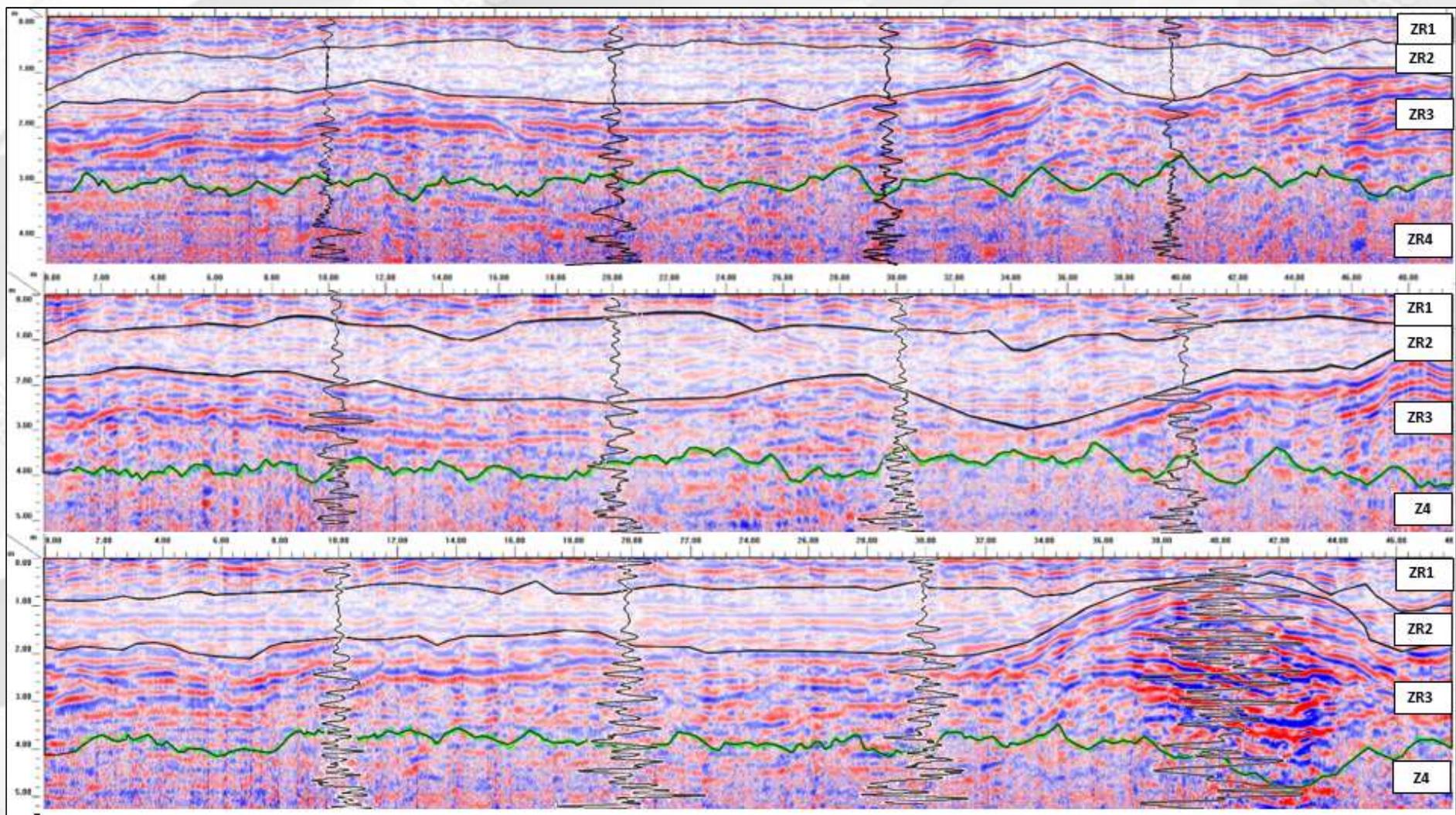


**Figura 4:** Radargrama com 3 e 2 zonas de reflexão. Antena de 200 e 900MHz respectivamente.

- A partir da análise dos três transectos e das três frequências, observou-se que a antena de 200 MHz diferenciou melhor os materiais em subsuperfície e o contato entre os diferentes materiais



**Figura 5:** Transecto 2- antena de 200, 400 e 900MHz respectivamente

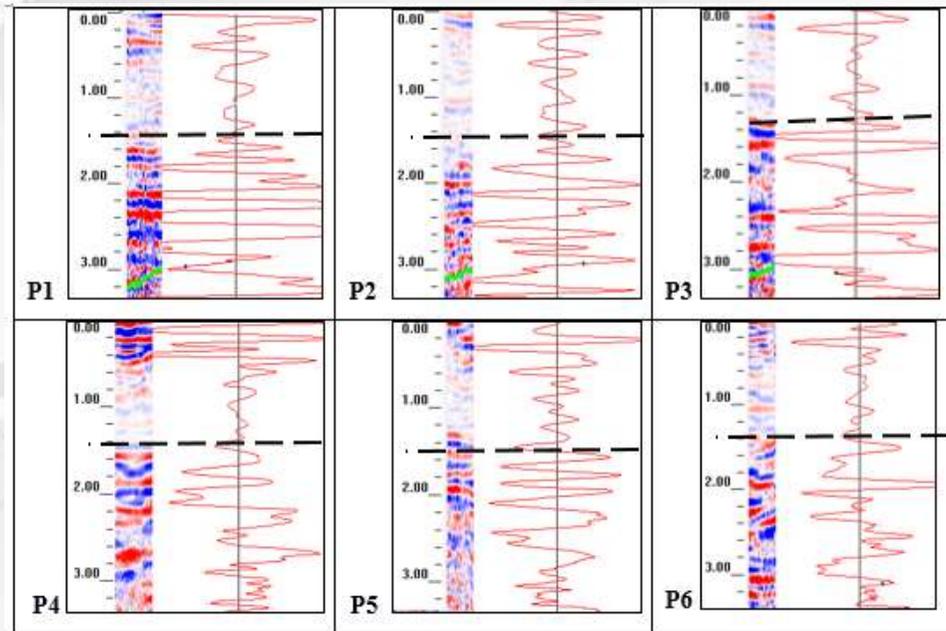


**Figura 6:** Radargramas com antena de 200MHz

# Validação da profundidade da camada de rejeito

**Tabela 2:** Profundidades encontradas no campo x radargramas

Perfil	Profundidade (m)		
	Radargrama (10 k)	Campo	Diferença
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



**Figura 7:** profundidade da camada de rejeito

- A diferença entre a profundidade medida e a estimada apresentou uma média de aproximadamente 28 cm.

# Análise dos valores de umidade

**Tabela 3:** umidade volumétrica pelo radargrama e por laboratório

Transecto	Profundidade (cm)	Constante Dielétrica (k)	Umidade ( $m^3.m^{-3}$ )	
			Radar	Laboratório
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

- Foi realizada análise estatística ANOVA para avaliação dos resultados a 5% de significância.
- As análises mostraram que não houve diferença significativa entre os valores de umidades obtidos pelos dois métodos, corroborando com trabalho de Barbosa et.al (2010) que ao comparar valores de umidade do solo por GPR e por métodos laboratoriais afirmaram que o GPR com a utilização de antena de 200 MHz foi sensível às condições de umidade do meio, não diferindo dos métodos laboratoriais.

# CONCLUSÕES

- Para este estudo a antena de 200MHz foi a mais eficiente na identificação da camada de rejeitos depositados nos terraços do rio Gualaxo do Norte.
- Os valores de umidade volumétrica encontrados através da constante dielétrica dada pelo GPR mostrou-se satisfatória reforçando a importância desta ferramenta para investigações deste parâmetro principalmente quando a espacialização desta variável otimizando estudos que necessitem de valores de umidade não pontuais