



**ATIVIDADES REALIZADAS NO ÂMBITO DO PROJETO TECNOSSOLOS DO
REJEITO DE MINERAÇÃO DE FERRO DA BARRAGEM DE FUNDÃO - MARIANA
(MG): CARACTERIZAÇÃO ESPECTRAL, DIAGNÓSTICO, PRIORIZAÇÃO E
MODELOS DE RECUPERAÇÃO EDAFO-AMBIENTAL
(COMPLEMENTO)**

**Coordenação
Carlos Ernesto Schaefer
Márcio Rocha Francelino**

**Viçosa MG
Julho 2023**

SUMÁRIO

IMPACTOS E PERSPECTIVAS DE RECUPERAÇÃO DOS TECNOSSOLOS DO REJEITO DA BARRAGEM DE FUNDÃO - MARIANA (MG): SÍNTESE DOS DIAGNÓSTICOS E MODELOS DE RECUPERAÇÃO EDAFO-AMBIENTAL.....	4
INTRODUÇÃO	4
1. PANORAMA GERAL DA ÁREA DE ESTUDO	5
1.1. AMOSTRAGEM	7
1.2. ANÁLISES FÍSICAS	7
1.2.1. Densidade do solo e densidade de partícula	7
1.2.2. Análise granulométrica.....	8
1.3. ANÁLISES QUÍMICAS	8
1.4. MINERALOGIA	9
2. RESULTADOS OBTIDOS E AVALIAÇÃO TÉCNICA INTEGRADA.....	9
2.1. TRABALHOS REALIZADOS PELA UFV	9
2.1.1. Análise dos pontos de coleta	9
2.1.2. Análises químicas e físicas	15
2.1.3. Análise temporal de atributos químicos e físicos	18
2.2. TRABALHOS EXECUTADOS PELA RENOVA NAS ÁREAS DE TECNOSSOLOS (GOLDER, 2019)	19
2.2.1. Granulometria.....	19
2.2.2. Porosidade	19
2.2.3. Micromorfologia.....	20
2.2.4. Análises químicas	25
2.3. TRABALHOS DE MONITORAMENTO DESENVOLVIDOS PELA AGROFLOR E UFV	27
2.3.1. Características Físicas.....	27
3. CARACTERÍSTICAS DOS PLANTIOS E TECNOSSOLOS	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES ORIGINAIS E ATUAIS DO REJEITO EM PONTOS ESPECÍFICOS	46
1. INTRODUÇÃO	46
2. ATIVIDADES REALIZADAS.....	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1. ANÁLISES QUÍMICAS E FÍSICAS	49
3.1.1. Análises químicas	49
3.1.2. Análise granulométrica.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5. OUTRAS ATIVIDADES	57
5.1. SELEÇÃO DE SÍTIOS DE MONITORAMENTO PEDOCIMÁTICO	57
4. INSTITUCIONAL.....	58
5. BIBLIOGRAFIA	59

6. ANEXO- IMAGENS.....	60
ESTUDO DA COMUNIDADE MICROBIANA NOS REJEITOS.....	64
1. INTRODUÇÃO	64
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	64
2.1. Local de estudo e amostragem.....	64
2.2. Extração de DNA total do solo e sequenciamento	65
2.3. Processamento dos dados e análises estatísticas.....	65
3. RESULTADOS.....	66
4. REFERÊNCIAS.....	70
INSTALAÇÃO DE SÍTIO DE MONITORAMENTO TERMICO E HIDRICO DO TECNOSSOLO.....	72
1. OBJETIVO.....	72
2. METODOLOGIA.....	73

IMPACTOS E PERSPECTIVAS DE RECUPERAÇÃO DOS TECNOSSOLOS DO REJEITO DA BARRAGEM DE FUNDÃO - MARIANA (MG): SÍNTESE DOS DIAGNÓSTICOS E MODELOS DE RECUPERAÇÃO EDAFO-AMBIENTAL

INTRODUÇÃO

Pouco mais de três anos de acompanhamento contínuo e monitoramento de propriedades físicas, químicas, estruturais e biológicas dos Tecnoossosolos de rejeito da barragem de Fundão, em diferentes estudos realizados ou em realização, já permitem concluir que o contexto de recuperação ambiental *in situ* do passivo de 20 milhões de m³ rejeitos depositados pelo acidente da Barragem de Fundão, no trecho ribeirinho entre Bento Rodrigues e Candonga, revela-se bastante favorável e positivo. Tal realidade promissora mostra-se evidente pela consistente recuperação de propriedades e funções ecossistêmicas chave dos Tecnoossolo, com plena possibilidade de retorno das atividades agrossilvopastoris em curto e médio prazos. Os dados que evidenciam o alcance da recuperação são advindos de diferentes estudos acadêmicos e técnicos, ora em curso. O monitoramento de alterações bióticas e abióticas nos Tecnoossosolos advindos da deposição do rejeito da barragem de Fundão, Mariana (MG), mostraram que os sinais físico-químicos não mostram elementos de toxidade problemática, enquanto os teores de carbono orgânico, CTC, fósforo e a fertilidade geral e microbiota revelam um quadro de crescente melhoria, em relação ao cenário pré-desastre. O potencial de recuperação da área afetada pela deposição (terraços e planícies fluviais) é bom. Os Tecnoossosolos do rejeito, que possuíam limitações iniciais de ordem física bem mais acentuadas do que as químicas, mostram excelente recuperação produtiva com a prática de recobrimento de topsoil (até 50 cm de solo estruturado) e manejo adequado, com calagem e adubação seguindo recomendações agronômicas. Resultados satisfatórios foram alcançados similarmente com seu manejo *in situ*, sem necessidade de cobertura de *topsoil*, mas com manejo de calagem e adubação mais intensivos. Em qualquer caso, adições de fontes de matéria orgânica parcialmente humificada (esterco de curral, cama de frango, palhada) aceleram muito o processo de recuperação, favorecendo a microbiota. Dada a ausência de problemas químicos maiores e baixo risco à saúde humana, recomenda-se a continuidade do processo de recuperação priorizando o uso criterioso de topsoil, calagem e adubação moderadas, e adubação orgânica parcimoniosa, sem qualquer necessidade de remoção do rejeito depositado, salvo em casos muito especiais, onde se detectam problemas físicos ou paisagísticos incontornáveis. Há necessidade urgente de estudos setORIZADOS no eixo afetado

para seleção de áreas de solos adequados ao desaterro para obtenção de *topsoil* estruturado para recobrimento, com qualidade física recomendável. Os teores de Ferro total elevados não se traduzem em qualquer problema significativo, já que o Ferro se encontra quase todo precipitado como oxi-hidróxidos de Fe^{3+} , altamente estável, e sem processos redutores que podem gerar elevação dos teores de Fe^{2+} solúvel. Os experimentos conduzidos em campo devem ser continuados a fim de aferir-se a natureza dos Tecossolos formados após o condicionamento, bem como para testar formas inovadoras de mitigação e recuperação das áreas impactadas, com alternativas seguras e econômicas de recuperação. Em síntese, o conjunto das propriedades físicas monitorados já permitem apontar uma recuperação progressiva, segura e consistente do potencial agrícola dos Tecossolos, com adoção de algumas medidas corretivas.

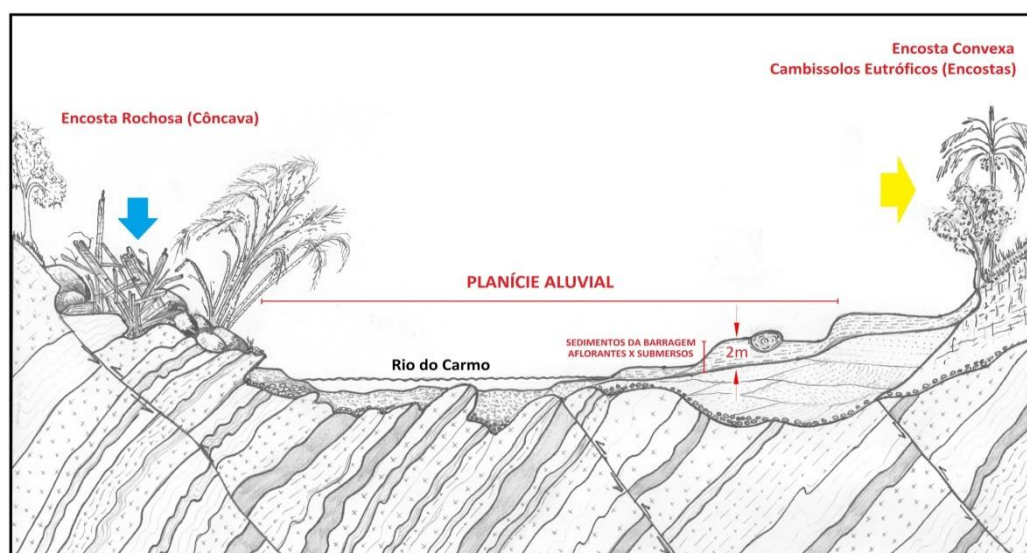


Figura 1. Transecto Esquemático da planície fluvial do Rio do Carmo afetada pela deposição de rejeito do rompimento da barragem. Atualmente, todos os níveis de terraços e planícies afetados se encontram revegetados em graus variáveis. O leito do Rio se encontra praticamente inalterado, com forte carga sedimentar depositada.

1. PANORAMA GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A área dos estudos de monitoramento é situada na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD), e possui aproximadamente 40 km de eixo, 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 segmento 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.

A BHRD, possui uma área total de 83.400 km², dos quais 86% encontram-se em território mineiro e 14% no 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).

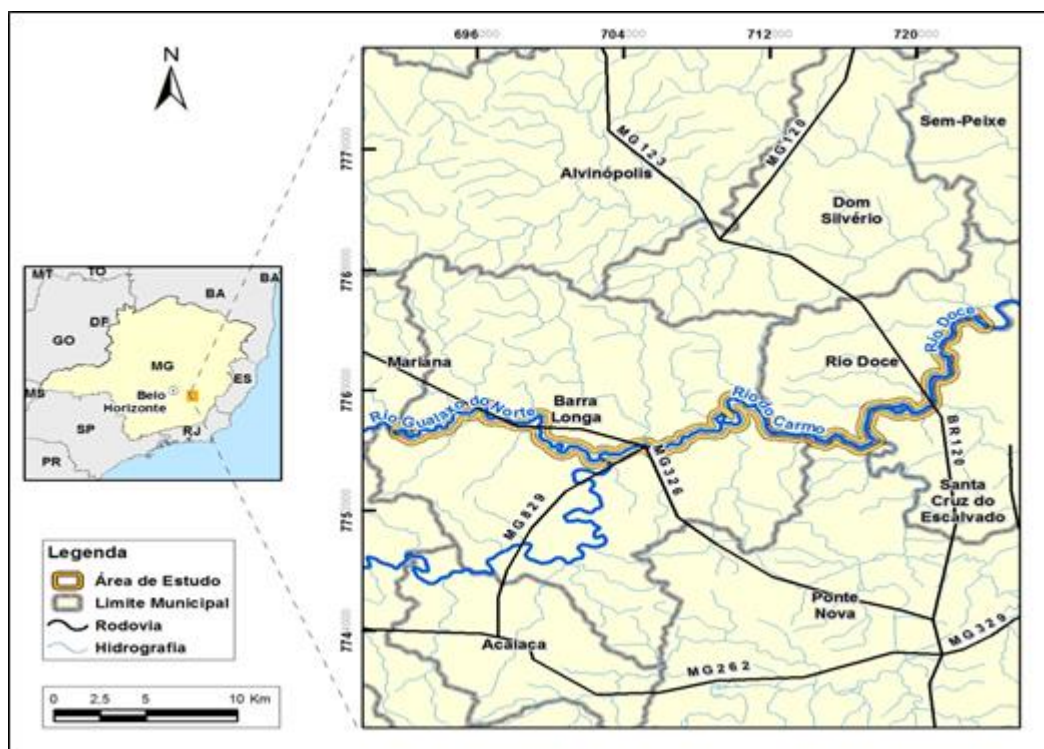


Figura 2: Localização da área de estudo

A vegetação remanescente é floresta semidecidual (de Mata Atlântica) e se encontra distribuída principalmente em alguns topos de morro e ao longo do curso dos rios, em matas ciliares. 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 cone, o Complexo Piedade têm predominância de paragnaisses (CPRM, 2003). Os solos predominantes na região são Latossolos, Argissolos, Cambissolos e Neossolos Flúvicos (RADAMBRASIL, 1983).

Segundo a classificação de Köppen o clima da região 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 (PEEL et al., 2007).

1.1. Amostragem

Para a análise da recuperação da fertilidade e incorporação de nutrientes e MO nos Tecnosolos, foram utilizadas amostras de referência coletadas no dia 10 de novembro de 2015, cinco dias após o desastre, quando 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. Destas, em 16 pontos foram coletadas amostras de rejeito e em 6 pontos, amostras do solo do entorno. Estes resultados foram utilizadas como tempo 0, ou seja, como referência inicial imediata pos-desastre, para o processo de recuperação dos Tecnosolo nas áreas afetadas.

A segunda rodada de amostras foi realizada em agosto de 2018. Dos 16 pontos de coleta de rejeito da primeira coleta, apenas 6 estavam aptos a uma segunda coleta devido a diversas ações de recobrimento e condicionamento do material pela empresa responsável pela recuperação da área, ou por motivos de obra nas mesmas localidades dos pontos do tempo 0. Desta forma foram realizadas coletas semelhantes nas profundidades de 0-15, 15-45 e 45-60 centímetros. Nesta etapa também foi observado a profundidade/presença de raízes e atividade biológica nos perfis.

1.2. Análises físicas

1.2.1. Densidade do solo e densidade de partícula

A densidade do solo foi realizada através do método do anel volumétrico de acordo com EMBRAPA, (2010):

$$D_s = M_{\text{solo}} / V_T \quad (1)$$

A densidade de partículas foi determinada, medindo-se o volume ocupado por 20 g de material fino seco em estufa, usando-se álcool etílico absoluto como líquido penetrante e balão aferido de 50 ml (EMBRAPA 2010).

$$D_p = M_s / V_s = M_s / (V_B - V_G) \quad (2)$$

Em que V_s é o volume das partículas de solo (cm^3)

1.2.2. 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 do silte será reavaliada 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) (Xi), em kg/kg, serão calculadas a partir das fórmulas:

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

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

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

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

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

1.3. 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. Será determinado também o pH em KCl 1mol/l para posterior determinação de ΔpH .

Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} serão extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹, sendo quantificados por espectrofotometria de absorção atômica, e o Al^{3+} por titulação com solução NaOH 0,025 mol L⁻¹; K^+ e Na^+ trocável será extraído com solução de HCl 0,05 mol L⁻¹ e quantificado por fotometria de chama. Para determinação do P, Fe, Mn, Zn, Cu e Pb será utilizado o extrator Mehlich-1 e determinado por absorção atômica e o P por colorimetria. Será 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 será calculado a soma de bases (S), capacidade de troca catiônica – CTC (t efetiva e T pH 7,0); saturação por bases (V%); alumínio (m%); e a capacidade de troca catiônica corrigida pela argila (CTCr) calculada pela expressão:

$$T(\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) \times 1000 / \text{conteúdo de argila (g kg}^{-1}) \quad (9)$$

1.4. Mineralogia

A mineralogia qualitativa das frações argila, silte e areia dos materiais será avaliada por difratometria de raios-X. Para a confecção da lâmina orientada usada na difração será utilizada a técnica do esfregaço (Theisen & Harward 1962). O difratograma, será obtido utilizando radiação monocromática de Cu-K α , obtida pelo uso de filtro de níquel. A análise mineralógica será realizada apenas para um grupo de amostras a ser definido posteriormente.

2. RESULTADOS OBTIDOS E AVALIAÇÃO TÉCNICA INTEGRADA

2.1. Trabalhos realizados pela UFV

2.1.1. Análise dos pontos de coleta

No campo realizado logo após o rompimento, no dia 10 de novembro de 2015, foi observado um intenso selamento superficial, agravado pelo ravinamento do material argiloso, deixando um substrato residual rico em areia fina e silte altamente compactado (hard-setting). Quase três anos após o desastre, observa-se revegetação espontânea e introduzida em alguns pontos de coleta. As figuras a seguir retratam o ponto um dia após o desastre. É possível visualizar o alcance da lama pelos terraços bem como a cor turva das águas fluviais. As imagens recentes representam a mesma área, agora com presença de vegetação, retratando também e os respectivos perfis de coleta.

Foram selecionados alguns pontos do estudo para exemplificar o processo de recuperação ambiental, sendo descritas características de cada ponto quanto à presença de raízes, atividades de térmitas, vegetação encontrada ao entorno e uso atual da área.

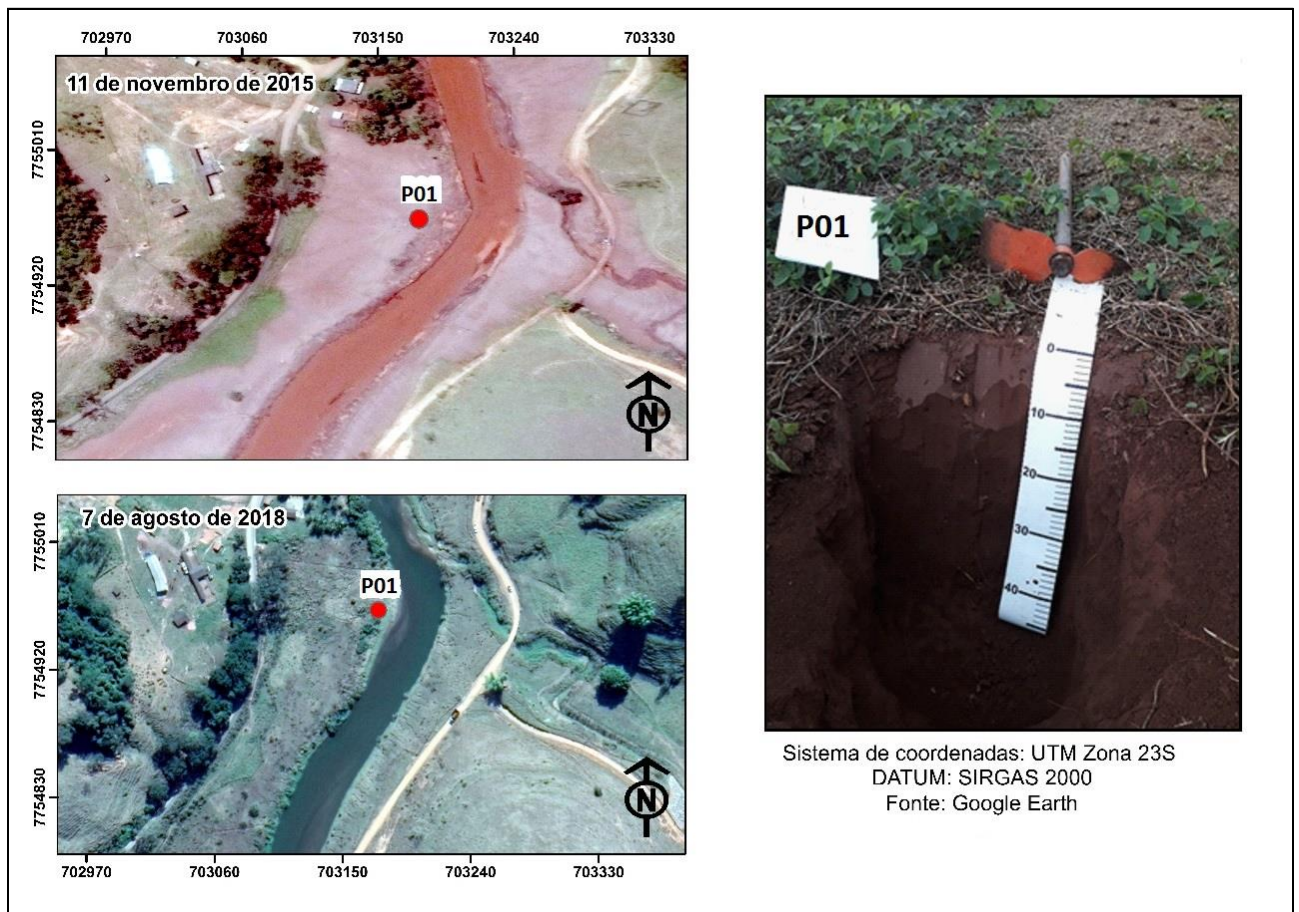


Figura 3. Ponto de coleta n°01

Ponto de coleta a jusante do rio Gualaxo do Norte. Apresentou fraca atividade de térmitas. Até 10 centímetros apresentaram poucas raízes, presença de raízes médias, finas e raras ao longo do perfil. Apresentou raízes médias até 10 cm e raízes, raras e finas até 40 cm. Presença de vegetação arbustiva, leguminosas e gramíneas espaçadas em touceiras. Local de uso de pasto, pastagem. Sem adição de Topsoil. Uso: pastagem, presença de esterco. Estrutura maciça. Atividade biológica fraca, fraca atividade de térmitas.

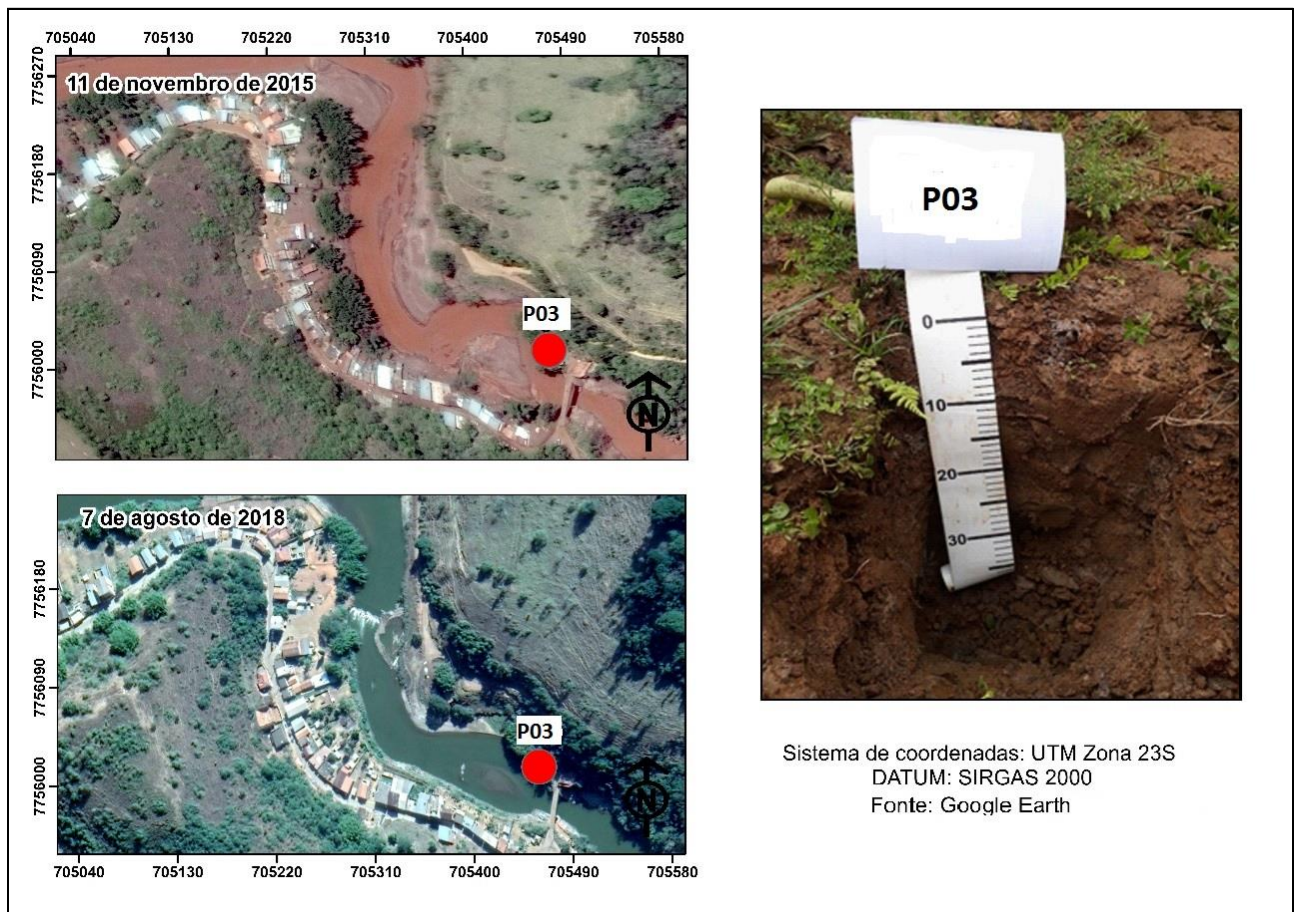


Figura 4. Ponto de coleta n°03

Ponto a montante do rio do Carmo. Área de leito menor, sujeito a encharcamento sazonal. Localiza-se a uns 20 metros do leito atual, uns 200 metros da ponte. Presença de lama misturada com material arenoso aparentemente da própria lama e não do Neossolo Flúvico. Vegetação espaça, aparentemente espontânea. Raízes raras e finas até 20 cm, depois de 20 cm sem presença de raízes. Sem atividade biológica. Rejeito com muita areia tudo misturado.

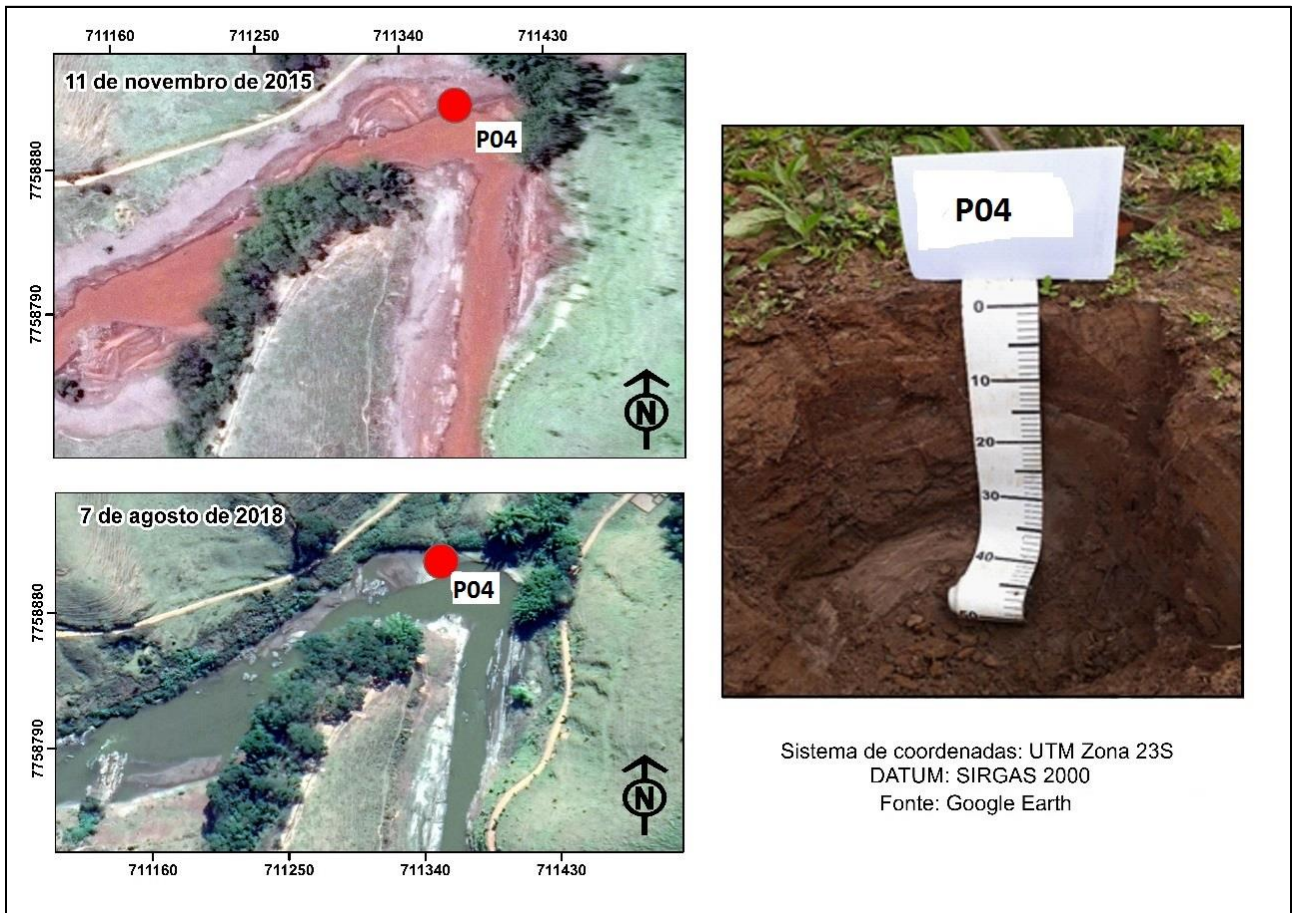


Figura 5 : ponto de coleta 04

Área de meandro do rio do Carmo. Foi observado vegetação natural, regeneração arbustiva espontânea do tipo herbácea, raízes raras e finas até 10 cm. Aparentemente não houve adição de insumos químicos no local, não houve intervenção de recuperação, o material foi coletado diretamente sobre os rejeitos. Neossolo Flúvico.

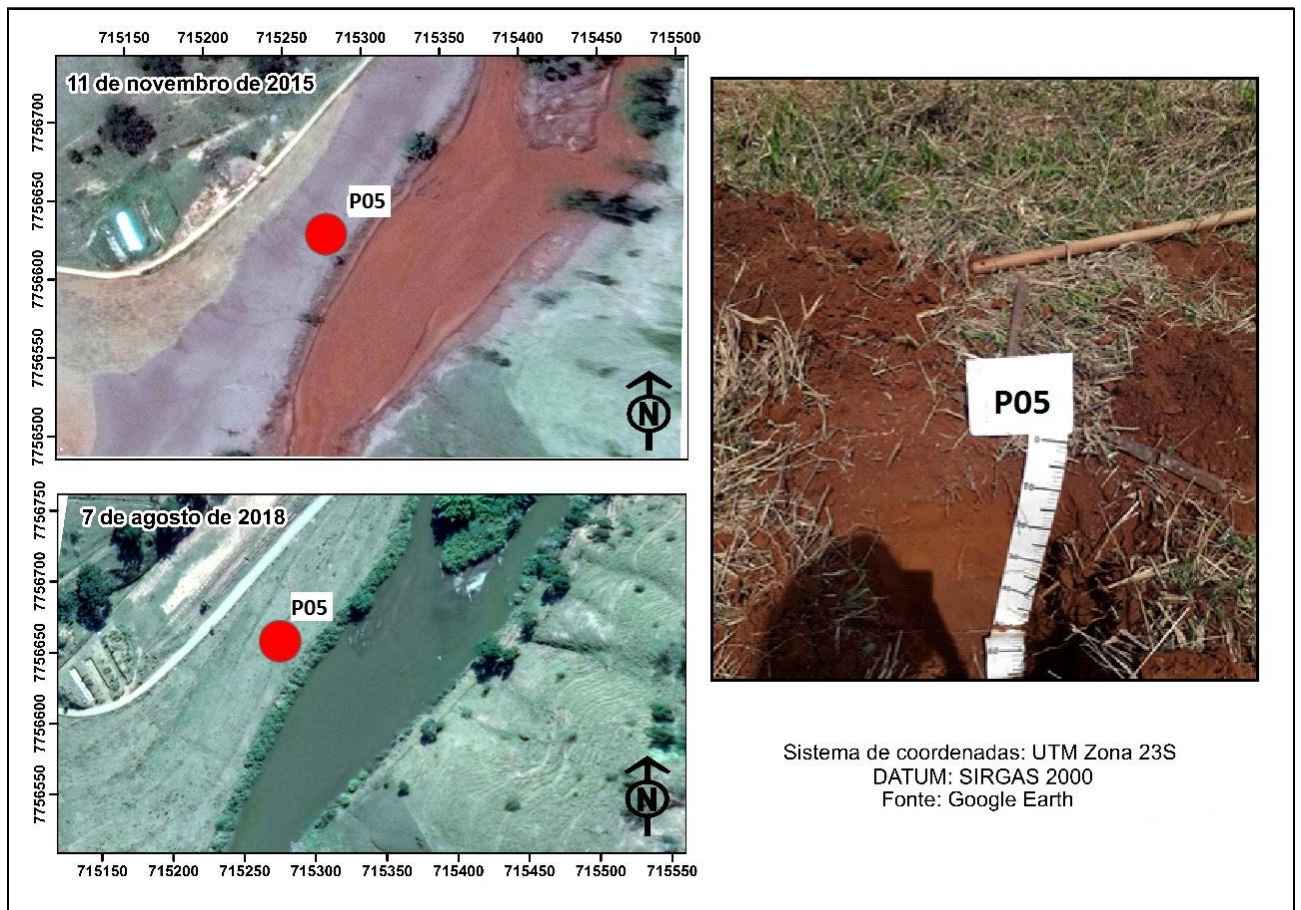


Figura 6. Ponto de coleta n°05

Área a 25 metros do leito menor. Uso destinado à pastagem (Fazenda Porto Alegre). Presença de braquiária irrigada desenvolvida com algumas invasoras. Foi misturado solo com rejeito (Topsoil com rejeito), adicionaram 35 cm de Topsoil. Presença de muitas raízes, M profundas, Raízes saindo do topsoil e penetrando no rejeito a 38 cm. Raízes finas abundantes até 38 cm penetram no rejeito e tornam se raras finas no rejeito. Rejeito de 38 a 50 cm. Baixa atividade biológica. Obs: O topsoil solo de cima está um pouco misturado com a lama.

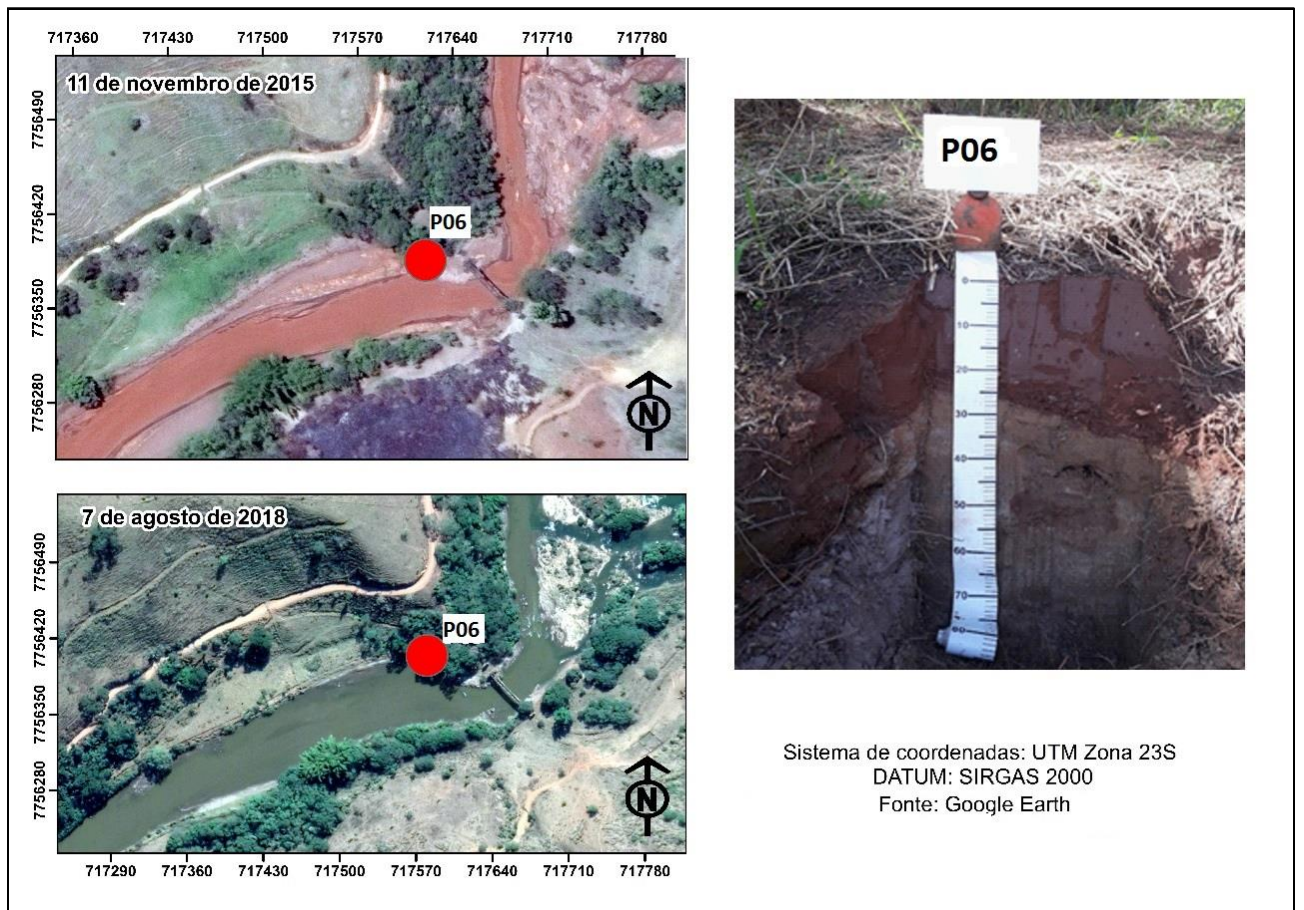


Figura 7. Ponto de coleta n°06

Presença de vegetação espontânea, em sua maioria braquiária. Rejeito com 25 cm de espessura seguidos de Neossolo Flúvico decaptado na camada C Raízes finas. No rejeito não tem raízes, de 25 a 65 cm ocorre presença de raízes finas.

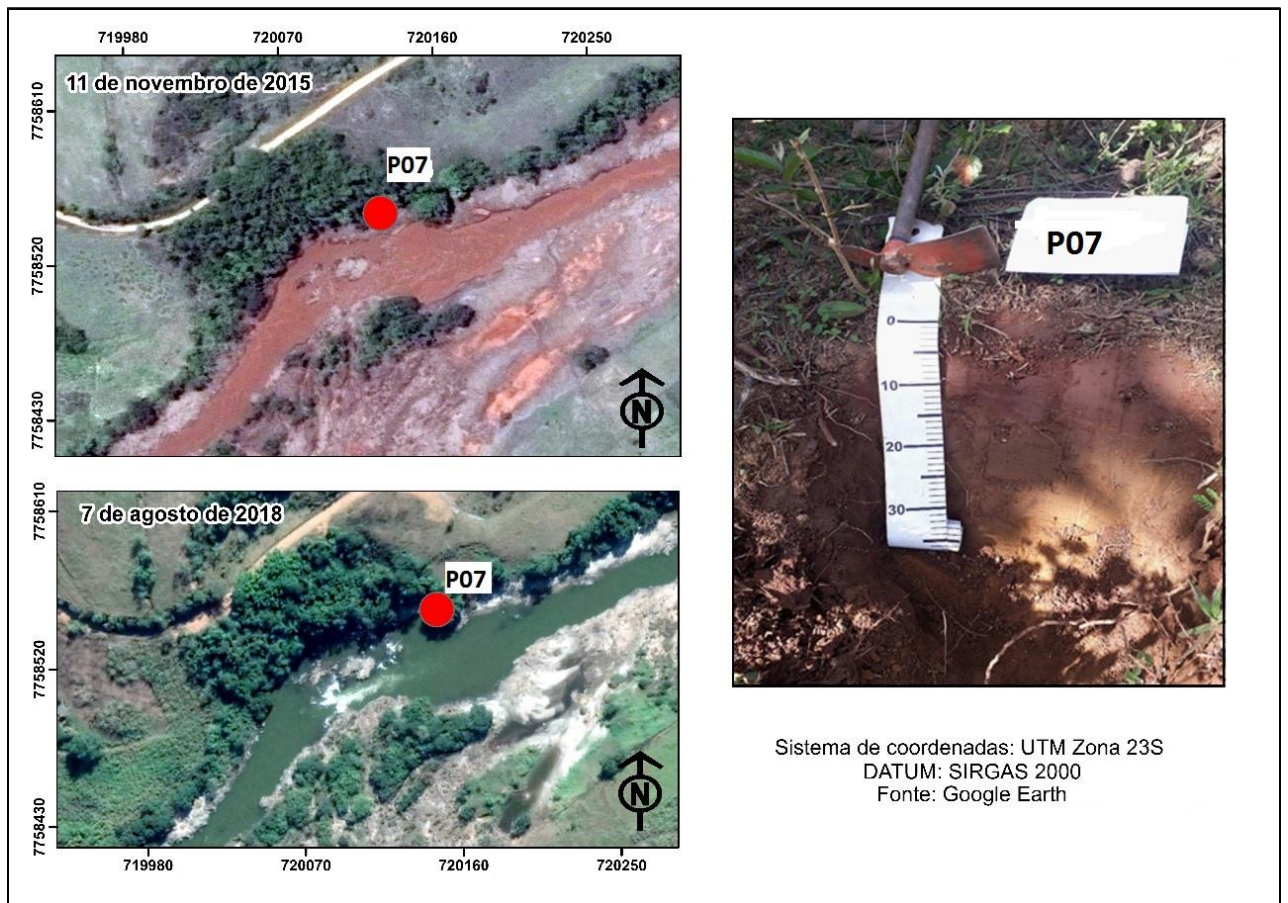


Figura 8. Ponto de coleta n°07

Ponto a jusante do rio Doce. Nas profundidades 0-5 cm encontra-se apenas lama, 5-15 cm lama, 15-35 cm C Flúvico, raízes raras de 0-15 cm, 5-15 cm raízes raras, 15- 35 cm raízes finas e comuns Presença de vegetação invasora. Sem atividade biológica.

2.1.2. Análises químicas e físicas

A tabela 1 apresenta os resultados das análises químicas e físicas nos dois períodos de coleta sendo que T1 refere-se ao tempo 0 e T2 as condições dos Tecno solos em agosto 2018. Foi calculado também a média e desvio padrão dos resultados analíticos. A tabela 2 apresenta os resultados das análises químicas e físicas dos Tecno solos no tempo 2 em diferentes profundidades. A tabela 4 apresenta os resultados das análises químicas e físicas dos solos encontrados na área de acordo com Schaefer, et.al (2016).

Tabela 1: Síntese das análises química e física dos Tecnosolos no tempo 1 (Novembro 2015) e camadas superficiais (Projeto UFV-CAPES-FAPEMIG).

Análises		Tecnosolo (lama)																	
		P35		P44		P45		P22		P16		P13		P05		Média		D.PAD	
		T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
pH	H₂O	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	5,76	6,58	0,65	0,43
P	mg/dm ³	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	9,1	7,3	3,70	4,24
K		37	132	22	227	50	87	10	53	7	100	10	62	9	144	10	100	15,94	55,46
Ca²⁺	cmol _c /dm ³	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	1,25	2,02	0,23	0,83
Mg²⁺		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	0,04	0,71	0,34	0,40
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	0,3	1,2	0,64	0,58
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	1,66	4,17	1,14	1,55
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	1,46	2,97	0,51	1,16
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	81,6	77,3	1,55	10,70
MO	dag/kg	1,28	1,48	1,54	0,4	1,15	2,55	0,13	1,34	0,13	1,01	0,13	0,27	0,13	2,02	0,13	1,34	10,70	10,36
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	31	37,7	0,62	0,76
Fe	mg/dm	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	214,2	70,9	2,17	11,24
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	1,48	1,12	94,98	435,1
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	97,8	67,7	0,23	2,22
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	0,66	2,66	0,35	1,39
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	1,4	0,99	0,54	0,19
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	1,16	0,83	0,16	0,46
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	0,29	0,04	0,05
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	0,91	0,5	1,43	0,41
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	0,07	0,05	0,131
Areia Fina	0,40		0,361	0,31	0,418	0,16	0,128	0,39	0,624	0,43	0,143	0,24	0,353	0,37	0,375	0,375	0,357	0,09	0,15
Silte	0,18		0,47	0,53	0,391	0,14	0,527	0,43	0,19	0,42	0,128	0,30	0,452	0,46	0,33	0,42	0,391	0,14	0,13
Argila	0,25		0,13	0,13	0,135	0,42	0,282	0,11	0,177	0,09	0,477	0,07	0,137	0,10	0,191	0,11	0,177	0,12	0,11
Dens.Part																			

Tabela 2: Síntese das análises química e física dos Tecossolos em diferentes profundidades-tempo 2 (agosto 2018)

		pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H +Al	t	T	V	MO	P-Rem	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	
	Prof.	H ₂ O	mg/dm ³			cmol _c /dm ³				%	dag/kg	mg/L	mg/dm									Kg/kg			
P35	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	0,26	0,471	0,123	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	0,05	0,609	0,026	0,312	
	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	85,2	0,5	0,85	0,65	0,3	0,73	0,06	0,418	0,391	0,135	
P44	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	79,2	1	0,72	0,62	0,2	0,41	0,05	0,424	0,403	0,128	
	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	0,06	0,356	0,443	0,141	
	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	0,01	0,624	0,19	0,177	
P45	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	1,3	2,05	0,4	0,79	0,01	0,625	0,277	0,091	
	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	115	1574	6,2	1,52	3,14	0,4	1,32	0,01	0,589	0,316	0,089	
	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	0,25	0,143	0,128	0,477	
P22	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	0,25	0,129	0,075	0,541	
	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	0,26	0,128	0,075	0,538	
	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	0,21	0,224	0,191	0,376	
P16	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	0,06	0,353	0,452	0,137	
	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	0,83	0,2	0,66	0,06	0,376	0,444	0,122	
	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	0,05	0,387	0,447	0,115	
	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	0,04	0,361	0,47	0,13	
P13	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	0,9	0,77	0,3	0,5	0,04	0,368	0,527	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	0,04	0,377	0,458	0,123	
	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	0,02	0,128	0,572	0,282	
	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	0,02	0,121	0,506	0,35	
P05	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	0,08	0,445	0,317	0,163	
	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	0,1	0,375	0,33	0,191	
	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	0,23	0,411	0,109	0,253	

Tabela 3: análise química e física dos solos do entorno, não afetados pelo rejeito

Análises		Neossolo Flúvico		Cambissolo	
		Média	D.P	Média	D.P
pH	H ₂ O	5,65	0,19	5,77	0,15
P	mg/dm ³	11,05	24,5	5,38	3,97
K		15,87	12,32	46,67	62,81
Ca²⁺	cmol _c /dm ³	1,61	0,99	1,76	1,44
Mg²⁺		0,57	0,43	0,48	0,37
Al³⁺		0,07	0,15	0,14	0,22
H+Al		1,53	1,07	3,28	1,23
CTC (T)		3,78	1,54	5,67	2,3
MO	dag/kg	0,85	0,69	1,42	1,03
P-rem	mg/L	29,57	11,2	24	9,4
Fe	mg/dm	610,3	528,28	604,72	556,04
Pb		0,73	1,38	1,57	1,45
Areia Grossa	Kg/kg	0,24	0,21	0,26	0,08
Areia Fina		0,36	0,21	0,2	0,08
Silte		0,16	0,1	0,14	0,07
Argila		0,23	0,19	0,39	0,11

Fonte: Schaefer, et al (2016)

2.1.3. Análise temporal de atributos químicos e físicos

É observado uma pequena elevação na média de pH de T0 para T1 5,76 para 6,58 respectivamente. Os valores de pH tendem a ser elevados 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, sendo assim para os solos do entorno a média de pH é ligeiramente menor (5,65). Os elevados teores totais de ferro não se traduzem em qualquer problema de toxidez, pois são formas de oxi-hidróxidos estáveis.

A acidez potencial (H + Al) aumentou de T0 para T1 (0,3 para 1,2 respectivamente) os solos naturais do entorno apresentam média de 1,53 e 3,28 para os Neossolos Flúvicos e Cambissolos respectivamente. De acordo com Ribeiro et. al (1999), a acidez potencial para os Tecossolos passou de muito baixa ($\leq 1,0$) para baixo (1,01 – 2,50) enquanto para os solos do entorno é considerada de média (2,51 – 5,0). Estes valores são diretamente relacionados aos teores de MO nos solos.

Houve um aumento das bases de T1 em relação a T0, o que era de se esperar, devido a fertilização e calagem eventuais da área pelas empresas responsáveis pela recuperação. Estes valores são mais expressivos para K, que aumentou para todos os pontos, tendo uma média aumenta em 10 vezes (de 10 para 100) com valores bem inferiores para os solos do entorno,

segundo Schaefer e. al. 2016 (15,87 e 46,67 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).

2.2. Trabalhos Executados pela RENOVA nas áreas de Tecossolos (GOLDER, 2019)

2.2.1. Granulometria

Em relação aos resultados de granulometria dos solos, obtidos ao longo das campanhas amostrais (1ª, 4ª e 5ª), não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na distribuição granulométrica dos Tecossolos monitorados.

2.2.2. Porosidade

A porosidade Total dos Tecossolos mostra valores semelhantes a solos agricultados normais, obtida a partir de determinações de Densidade do Solo (Ds) e Densidade de Partícula (Dp), exemplificado abaixo (Golder, 2019) (**Tabela 4**).

Tabela 4: Valores de Porosidade Total calculada para amostras de Tecossolos (Dados extraídos de Golder, 2019).

Amostra	Profundidade de coleta	Ds	Dp	P total calc.
Tecossolo 10 PF 02	0-3	1.82	2.98	0.39
Tecossolo 10, PF 02	3-100	1.98	3.05	0.35
Tecossolo 08, Pf01	0-10	1.78	3.03	0.41
Tecossolo 08 Pf01	10-35	1.89	3.13	0.40
Tecossolo 05 Pf02	0-40	1.75	2.94	0.40
Tecossolo 05 Pf02	40-90	1.94	2.93	0.34
*Ds: Densidade do Solo; Dp: Densidade de partícula. P total calc.: Porosidade total calculada a partir da equação: $Pt = 1 - (Ds/Dp)$				

Considerando que resultados de porosidade total dos solos fornece informações inconclusivas sobre seu sistema poroso, foram realizadas outras observações micromorfológicas, para ampliar as investigações dos parâmetros físicos dos Tecnossolos

2.2.3. Micromorfologia

Foram realizados estudos micromorfológicos a partir da coleta de lâminas com amostras dos Tecnossolos de perfis selecionados com o intuito de obter, em microescala, informações sobre a existência de processos de perda de argila nos perfis por erosão diferencial (elutriação). Além disso, as observações micromorfológicas tiveram o intuito de buscar evidências sobre o estabelecimento de processos pedogenéticos no perfil (Tabela 5).

As lâminas de micromorfologia demonstraram que a porosidade nas amostras obtidas dos perfis estudados foi incipiente ou mesmo nula, com estruturação massiva e/ou densificada, e raros vazios não conectados.

Observações micromorfológicas identificaram formação de uma delgada camada “lag” residual de areia na superfície, gerada pela combinação de elutriação (perda seletiva de argila mais fina por erosão) e empacotamento de grãos de areia fina remanescente. Trata-se de processo pedogenético essencial, com padrão clássico de distribuição relativa do tipo Mônico – ou seja, distribuição onde as partículas em geral pertencem a um só grupo de tamanho e tipo de material – contendo grãos minerais e fragmentos rochosos (Kuhn et al., 2019) e feições semelhantes às descritas por Kuhn (2003) para bioturbação (turbacão do solo pela atuação da fauna do solo), e transporte lateral (Pawluk e Bal, 1985).

Preenchimentos de areia são também comuns, sugerindo forte redistribuição pela bioturbação. Não se evidenciou qualquer processo de pedoplasmação (gênese de argila) e estruturação mais avançada, conforme Stoops e Schaefer (2018) e Stoops et al (2018), indicando pedogênese ainda incipiente, pelo pouco tempo decorrido desde a reegetação da área.

A perda de argila referida não foi constatada em macroescala a partir dos estudos de granulometria. Entretanto, em microescala, os Tecnossolos 05, 08, 10 e 11 mostraram sinais variáveis de elutriação (perda seletiva) e formação de Lag residual arenoso. Este fenômeno foi máximo no Tecnossolo 10, tendo se manifestado de forma intermediária em 8, e menos desenvolvido nos demais (5, 11) (Tabela 5).

Um avanço pedogenético ainda incipiente, porém, notável pelo pouco tempo decorrido, se faz evidente em todos os Tecnosolos monitorados, embora haja grandes variações entre os sítios, decorrentes de formas variadas de tratamento do rejeito, e manejos subsequentes (adubação, calagem, uso de esterco, plantio). Um bom enraizamento de gramíneas se faz notar até 20 cm, com estruturação pedobiológica marcante até essa profundidade. Em alguns casos há aprofundamento bem maior.

Embora o tempo decorrido desde a deposição do rejeito / formação do Tecnosolo seja muito recente (44 meses), já existem evidências de processos de formação de solos, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Feições micromorfológicas indicadoras de formação de estrutura pedogenética nos Tecnosolos

Amostras de lâminas de solos /profundidade	% de grãos areia fina e silte na matriz	Estrutura e porosidade	Feições associadas	Arenização superficial	Cobertura vegetal	Image m
Tecnossolo 05 Pf02 0-40 cm	50% AF + 40% Silte	Estrutura massiva, fraco desenvolvimento de pedalidade; poros fissurais e vazios não conectados	Abundantes microconcreções, litorelíquias de filitos e canga	Fraca arenização	Pastagem	
Tecnossolo 05 Pf02 40-90 cm	40% AF + 40% Silte	Estrutura massiva, densificada, sem desenvolvimento de pedalidade; porosidade praticamente nula e raros vazios não conectados	Microconcreções comuns, litorelíquias de filitos	Arenização ausente	Pastagem	
Tecnossolo 08 Pf01 0-10 cm	40% AF + 40% Silte	Estrutura blocos subangulares, incompleta, moderado desenvolvimento de pedalidade; poros de empacotamento parcialmente conectados;	Muitos microfragmentos de concreções e litorelíquias de filitos	Fraca a moderada arenização	Regeneração por Mix de sementes (gramíneas e leguminosas forrageiras)	

Amostras de lâminas de solos /profundidade	% de grãos areia fina e silte na matriz	Estrutura e porosidade	Feições associadas	Arenização superficial	Cobertura vegetal	Image m
Tecnossolo 10 Pf 0-10 cm	70% AF, Coalescida	Material sem estrutura, grãos simples; misturado à M.O. residual e nodulos e litorelíquias	Litorelíquias de filito ferruginizado	Forte arenização por elutriação	Regeneração por Mix de sementes (gramíneas e leguminosas forrageiras)	
Tecnossolo 10 Pf 01 20-30 cm	40% AF e 40% Silte	Estrutura massiva e densificada sem desenvolvimento de pedalidade; porosidade negligível e raros vazios não conectados	Microconcreções e litorelíquias de filitos	Arenização ausente	Regeneração por Mix de sementes (gramíneas e leguminosas forrageiras)	
Tecnossolo 10 Pf 01 55-65 cm	Parte 45% areia, 40% silte	Contato de estrutura massiva, sem porosidade, com restos vegetais indecompostos, de tamanho grande, fíbrico, lenhoso	Microconcreções quebradas, fragmentos filito	Arenização ausente, mistura de materiais	Regeneração por Mix de sementes (gramíneas e leguminosas forrageiras)	

Amostras de lâminas de solos /profundidade	% de grãos areia fina e silte na matriz	Estrutura e porosidade	Feições associadas	Arenização superficial	Cobertura vegetal	Image m
Tecnossolo 05 Pf01 0-18 cm	40% AF + 40% Silte	Estrutura moderada em blocos subangulares, parte densificada, com desenvolvimento de pedalidade; porosidade conectada, em macro e mesoporos	Muitos nódulos ferruginizados, Microconcreções comuns, litorelíquias de filitos, plasma ferruginoso intergranular	Arenização fraca, com elutriação incompleta	Pastagem	
Tecnossolo 05 Pf01 50 cm	60-70% Areia G+ F	Estrutura massiva de sedimento antigo (Horizonte C), densificada, sem desenvolvimento de pedalidade; porosidade praticamente nula e raros vazios não conectados	Concreções difusas comuns, litorelíquias de filitos e ferruginização de grãos (coating); flocos de mica comuns, dispersos na matriz	Ausente; Perfil truncado de paleossolo erodido pela passage de lama	Pastagem	
Tecnossolo 11 Pf02 0-15 cm	40% AF + 40% Silte	Estrutura massiva e fissural, densificada (hard-setting), fraco desenvolvimento de pedalidade; porosidade incipiente e raros vazios não conectados	Fragmentos orgânicos, concreções, fragmentos de filitos; grãos de quartzo arestados e subarredondados	Arenização muito fraca	Floresta	

2.2.4. Análises químicas

Observou-se, de modo geral, estabilidade nos parâmetros de fertilidade ao longo das campanhas de monitoramento dos Tecnosolos. A fertilidade é considerada baixa, com teores baixos de macronutrientes essenciais para as plantas, e acidez generalizada nos Tecnosolos e solos de referência, indistintamente. São também muito reduzidos os teores de matéria orgânica em quase todas as amostras. Pontualmente, os teores de Na trocável são ligeiramente elevados, mas muito distantes de qualquer condição de salinidade (o ISNa foi superior a 6%, com caráter solódico), e em apenas dois pontos a saturação foi > 15% (caráter sódico). Tais teores não seriam, contudo, prejudiciais a maioria das culturas, especialmente no caso de pastagens (braquiária ou mix de gramíneas e leguminosas).

Os dados levantados pelo trabalho de Kasuya (2019) foram submetidos a testes de correlação de Spearman considerando o conjunto de parâmetros avaliados, conforme Figura 9. Destaca-se o papel da matéria orgânica na acidificação dos Tecnosolos, com entrada de íons H^+ ou Al^{3+} , associados aos grupos funcionais de compostos orgânicos.

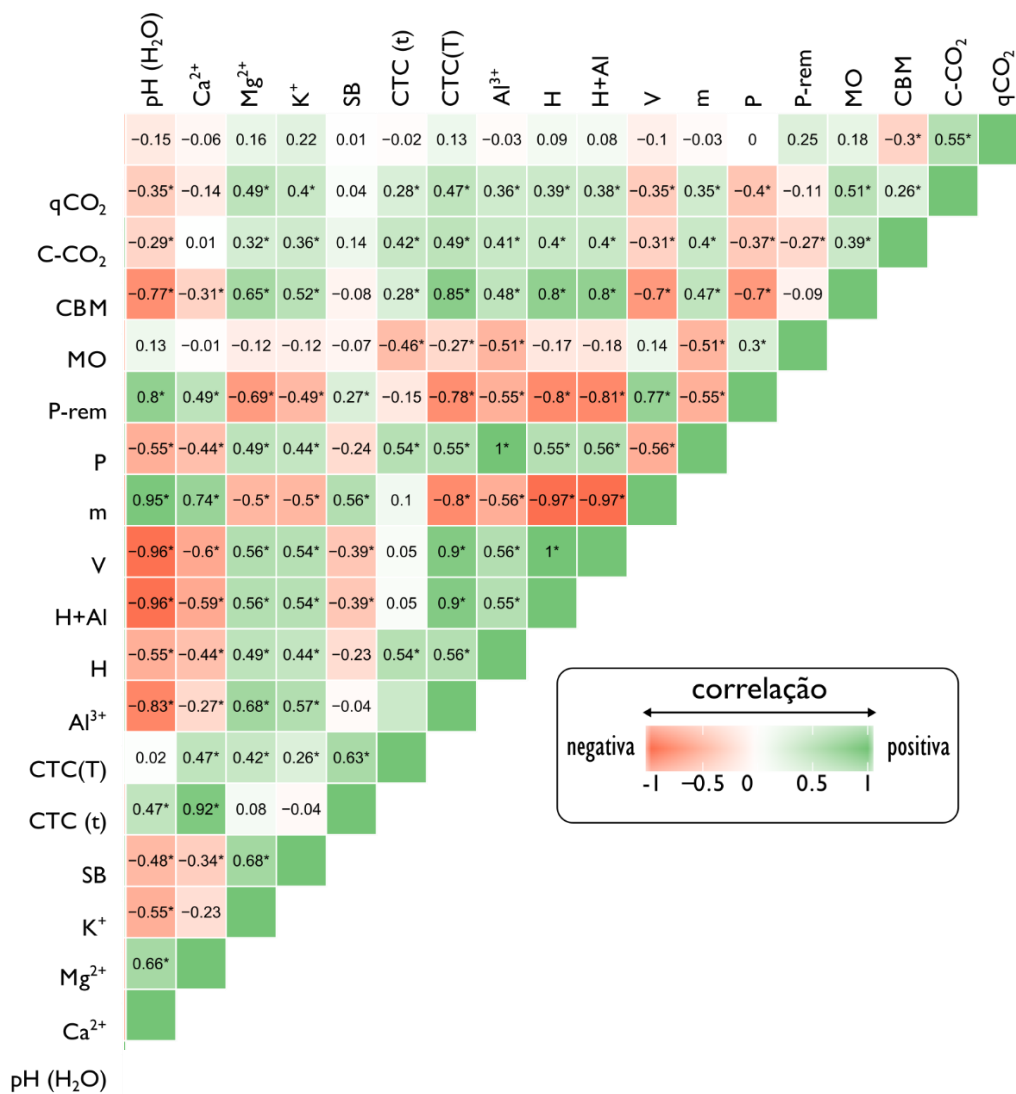


Figura 9: Correlação de Spearman entre as variáveis avaliadas. Valores no interior de cada célula representam valores da correlação para cada par de variável. Valores seguidos por asterisco indicam diferença estatística (p-valor < 0.05).

2.3. Trabalhos de monitoramento desenvolvidos pela AGROFLOR e UFV

Os dados levantados referem-se também ao eixo afetado, entre a Ponte do Gama e Barra Longa (figura 10).

2.3.1. Características Físicas

Ao longo do trecho impactado pela deposição, foram coletados materiais de rejeito na época do evento, abrangendo sedimentos e Tecno solo, além de solos não afetados, sendo procedidas análises de rotina química e física, visando caracterizar preliminarmente a condição natural das áreas no momento. Tais análises são importantes exclusivamente para mensuração de parâmetros da dinâmica de evolução dos solos, e para dar subsídio à prescrição de corretivos e adubação, bem como práticas de manejo.

Majoritariamente, a lama depositada como tecno solo, é quimicamente pobre, sendo que limitações físicas tendem a ser bem maiores que as químicas, no âmbito de recuperação ambiental. Os valores de densidade do solo ao longo de todo o trecho ribeirinho monitorado, determinados logo após o evento, mostraram faixa muito variável de 0,94 a 2,38 g/cm³. Os valores extremos são muito altos e a situação aparentemente se agravou com a passagem do verão chuvoso e quente, pelo natural assentamento. Quatro meses após o rompimento, houve assentamento e selamento do solo (*hard-setting*) formando uma crosta de areia fina/silte duríssima à penetração, onde o rejeito permaneceu exposto. A seguir, apresenta-se uma caracterização geral das características do tecno solo conforme levantamento de dados e análises realizados por Schaefer et al. (2015).

A densidade do solo apresenta-se extremamente variável, com média de 1,41 g/cm³ em superfície e 1,54 g/cm³ na lama enterrada, com valores de desvio padrão de 0,53 a 0,52, respectivamente. A densidade de partícula é bem mais elevada pela natureza do minério de ferro constituinte que possui alta massa específica 2,75 g/cm³ (superfície); 2,80 g/cm³ (enterrada) e menor desvio padrão - 0,29 e 0,23 g/cm³, respectivamente. O material de lama possui capacidade de troca de cátions (CTC) muito baixa, sendo praticamente destituído de carga elétrica negativa, como pode ser avaliado pelo ΔpH positivo (diferença entre pH KCl e pH em H₂O), o que indica um substrato com carga líquida positiva, típico de materiais oxidicos muito intemperizados e semelhantes à solos e materiais de canga ferrífera do Quadrilátero (Schaefer et al., 2015) (média pH KCl = 6,25, média pH em água = 5,69).

Os valores de pH tendem a ser relativamente elevados, não devido à presença de bases (Ca, Mg), que é baixa, mas sim à aproximação do Ponto de Carga Zero dos óxidos de Ferro (próximo da neutralidade), que predominam nesses substratos muito intemperizados. O pH elevado pode ser atribuído, ainda, ao uso de hidróxido de sódio na chamada gelatinização na mistura com amido, com o material suspenso atingindo pH 10,5. Já os solos enterrados (Neossolos Flúvicos e/ou Cambissolos) mostram valores de pH em água bem maiores que pH KCl, e portanto, CTC e carga líquida negativa. A CTC média da lama é muito baixa (2,96) e os solos do entorno possuem valores maiores, com destaque para os Cambissolos das encostas.

O Alumínio trocável é praticamente nulo em todos os solos e o teor de matéria orgânica (MO) encontrado foi baixo e pouco variável, tendo em vista que os solos adjacentes foram “truncados” pela erosão antes da deposição da lama, perdendo todo o horizonte A mais rico em matéria orgânica. Contudo, como o rejeito da mineração é normalmente mais rico em manganês, os valores devem ser afetados pela oxidação do dicromato pelo manganês reduzido presente, e os teores de MO seriam, assim, bem menores.

Por outro lado, estudos prévios indicaram baixos teores de Mn nas barragens de rejeitos de Germano e Santarém, com a lama do rejeito sendo constituída, basicamente, de Goethita (63%), Hematita (24%), Quartzo (11%) e Caulinita (7%), o que corrobora a baixíssima CTC e condição eletropositiva. A determinação de C neste material deve ser realizada em analisador elementar, por infravermelho (Schaefer et al., 2015).

A lama possui teor de P extraível por Melich I mais alto (média 9,34 mg/dm³) que os Cambissolos/ Argissolos do entorno (5,38 mg/dm³) e menores que os Neossolos Flúvicos/Gleissolos (11,05 mg/dm³). São teores relativamente altos e podem tanto refletir a intensa mistura do material com os solos superficiais arrastados pela erosão na passagem da onda de lama, quanto alguma presença leve de arsênio, pois o rejeito é normalmente pobre em P. Neste caso, o método colorimétrico não deve ser aplicado, e teores totais devem ser investigados por espectrometria de emissão óptica (ICP ou MS). Os teores de Na são maiores na lama e devem refletir efeitos do tratamento do minério, mas sem alcançar qualquer valor anômalo.

Observou-se logo após o rompimento um intenso e generalizado selamento superficial, agravado pela erosão preferencial do material fino, mais dispersável, deixando um substrato residual rico em areia fina e silte, altamente compactado (*Hard-setting*), o qual

constitui um entrave à recuperação natural sem alguma intervenção. Segundo Schaefer et al (2017), passados aproximadamente cinco meses após o desastre, a lama compactada permanecia fisicamente inóspita, e praticamente sem vegetação natural, exigindo medidas para sua recuperação.

Após diversas medidas de recuperação, no entanto, passados quase três anos, observações de campo realizadas recentemente e, conforme monitoramentos realizados na área, evidenciam um cenário de recuperação bem distinto daquele logo após o evento. As ações de recuperação que vêm sendo implementadas revelam-se bastante eficazes nas áreas impactadas. Neste sentido, e visando a caracterização do estado atual das áreas alvo, foram realizadas diversas coletas de solo visando caracterizar um segundo cenário, após quase três anos. Tais coletas foram realizadas em áreas alvo para plantio de culturas; ao todo, foram realizadas amostras compostas ao longo de toda área impactada em 72 propriedades, conforme identificado na Figura 4.

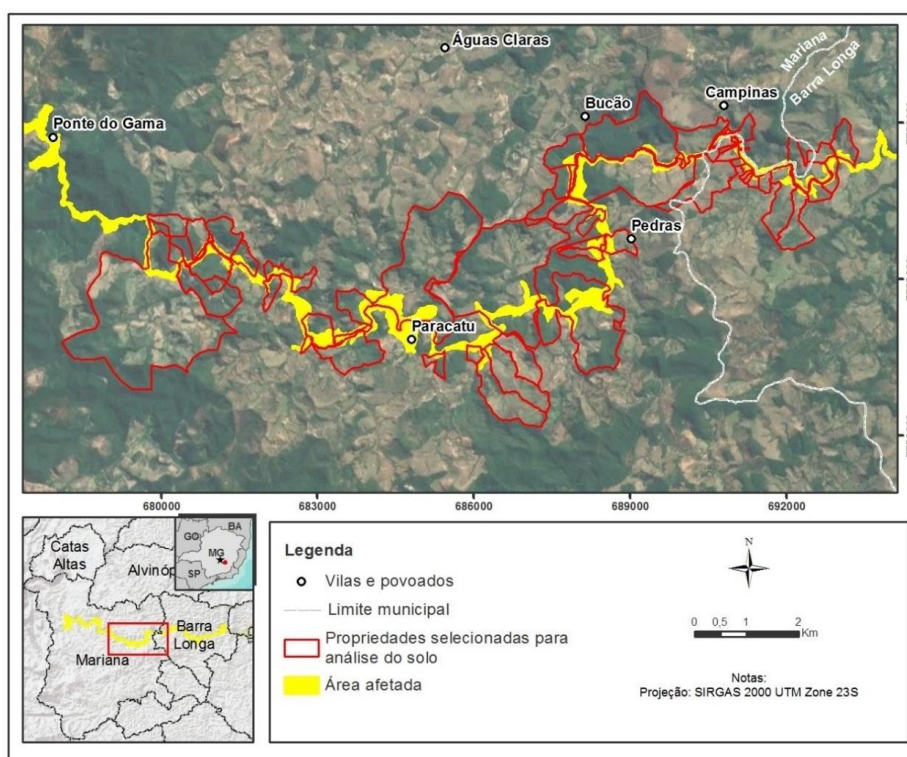


Figura 10. Localização das propriedades alvo das análises de solo.

Por meio das análises realizadas, além de uma caracterização geral da área-alvo de estudo foi possível comparar ainda o desenvolvimento de um mesmo tipo de cultura em locais distintos, sendo possível avaliar as principais características do solo atrelada à vegetação aparente. Em termos agrônômicos (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ,

1999), a análise descritiva dos solos coletados nas áreas de Tecnosolos indica grande variabilidade espacial de atributos. A exceção dos valores de pH, as demais características químicas tiveram variação superior a 20%, e variação máxima de 311,66% para saturação por alumínio (m) (Tabela 6). Os tecnossolos mostram valores médios de baixa acidez com pH (H₂O) médio de 5,97. Nesse sentido, em termos médios, são observados baixos valores de acidez trocável (Al³⁺), que é dependente de pH (Acidez ativa) (7).

Em relação à fertilidade dos solos, a baixa soma de bases e os baixos teores de Ca e Mg indicam a baixa fertilidade dos solos. Entretanto, em média apresentam saturação por bases (V) acima de 50% e CTC efetiva média de 1,31 cmolc dm⁻³. Quando observados os valores de matéria orgânica, mesmo os valores mais elevados são classificados apenas como medianos segundo Ribeiro, Guimarães e Alvarez (1999). Em relação à presença de micronutrientes, ferro e manganês têm valores medianos altos, sendo bem superiores aos limites inferiores da classe (Alto para Fe > 45 mg dm⁻³, e Mn > 12 mg dm⁻³), sem revelar valores potencialmente tóxicos.

Tabela 6: Resultados médios da análise dos solos coletado nas áreas atingidas pelos rejeitos de lama

Estatística *	pH	P		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	CTC (t)	CTC(T)	V	M	P-rem	Zn	F	Mn	Cu	B	
	H ₂ O	mg dm ⁻³					cmolc dm ⁻³					O	mg L ⁻¹		e	mg dm ⁻³			
Mín	5,00	1,10	10,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,40	0,40	0,50	22,00	0,00	0,00	23,90	0,15	50,80	45,00	0,30	0,00
Máx	7,70	15,20	70,00	1,44	0,65	0,40	3,10	1,94	4,59	4,36	100,00	21,00	1,88	45,00	3,10	479,00	248,50	4,00	0,90
Méd	6,25	5,00	22,23	0,78	0,15	0,04	0,90	0,99	1,31	1,74	57,57	1,70	0,82	31,85	1,18	176,01	115,24	1,09	0,18
Desv. P.	0,72	2,83	11,38	0,24	0,14	0,09	0,75	0,35	0,81	0,91	18,52	5,29	0,45	4,30	0,66	73,71	46,51	0,74	0,22
C.V.	11,54	56,54	51,18	30,39	94,81	209,17	83,82	35,80	61,79	52,48	32,17	311,66	55,15	13,50	56,16	41,88	40,36	67,51	121,56
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
N		39	39	39	39	39	39	39	39	30	3	3	3	26	35	35	35	35	35
											9	0	9						

* Mín: valor mínimo valor máximo observado; Máx: valor máximo observado; Méd: média aritmética; Desv. P.: desvio padrão da amostra; C.V. coeficiente de variação; N: número de amostras.

Tabela 7: Interpretação dos resultados das análises dos solos coletados nas áreas atingidas pela lama de rejeito de minério de ferro.

Atributo	Mínimo	Máximo	Média
P	Baixo	Muito	Alto
H		Alto	
P	Muito	Baixo	Muito
	Baixo		Baixo
K	Muito	Médio	Baixo
	Baixo		
C	Muito	Médio	Baixo
a ²	Baixo		
+			
M	Muito	Médio	Muito
g ²	Baixo		Baixo
+			
Al	Muito	Baixo	Muito
3+	Baixo		Baixo
H + Al	Muito	Médio	Muito
	Baixo		Baixo
S	Muito	Médio	Muito
B	Baixo		Baixo
CTC (t)	Muito	Médio	Baixo
	Baixo		
CTC(T)	Muito	Médio	Baixo
	Baixo		
V	Baixo	Muito	Médio
		Bom	
M	Muito	Baixo	Muito
	Baixo		Baixo
M	Muito	Baixo	Muito
O	Baixo		Baixo
Z	Muito	Alto	Médio
n	Baixo		
Fe	Alto	Alto	Alto
M	Alto	Alto	Alto
n			
C	Muito	Alto	Alto
u	Baixo		
B	Muito	Bom	Baixo
	Baixo		

As amostras de Tecno solos das áreas atingidas pela lama de rejeito aparentemente se distribuem em três grupos distintos pela PCA. O primeiro grupo é composto apenas por 2 parcelas tendo maior associação com maior acidez potencial e trocável, bem como maiores teores de CTC efetiva (t) do solo. Também associado a estes atributos, mas com menor intensidade, observa-se um grupo que também está associado a maiores teores de bases (Ca e Mg). Em oposição a estes dois grupos, as amostras com maior associação ao pH mais básico e maior saturação por bases (V) (Figura 5-A). O posterior agrupamento dessas amostras por distância euclidiana apresenta a formação de apenas dois grupos, onde os grupos positivamente relacionados à acidez e as bases formam apenas um grupo (Figura 5-B). Valores mais elevados de Ca, Mg, K e CTC total revelam as áreas onde a correção de acidez e adubação deixaram efeitos residuais positivos na fertilidade.

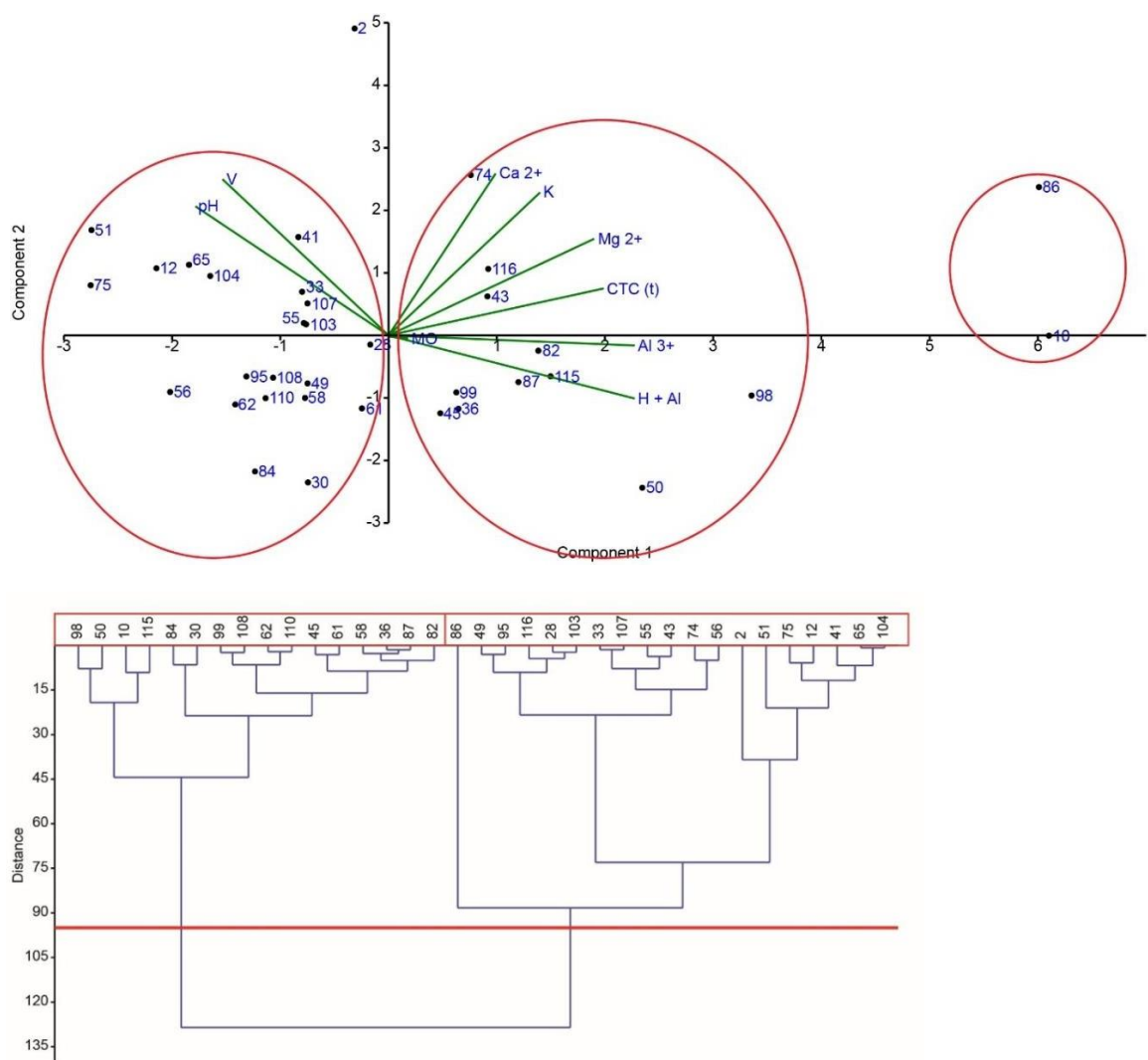


Figura 11: Distribuição das áreas amostradas em função das características químicas do solo.

Em relação ao teor de micronutrientes, a formação de grupos demonstra um possível gradiente nos teores de metais nas amostras (da esquerda para a direita) (Figura 6). Há um grupo formado por amostras com baixos teores de Fe, Mn, Cu e Zn, e dois outros grupos, sendo um mais associado a Cu, e outro aos demais elementos.

Estes resultados corroboram com a descrição e as características do rejeito inicialmente descritas por Schaefer et al. (2015). Apesar da maior saturação por bases nas áreas onde o pH é mais elevado, não há maiores teores de cátions acompanhando o pH. Segundo estes autores, a característica oxidica do rejeito torna estes solos mais eletropositivos, e conseqüentemente com poucos sítios de carga negativa (baixa CTC), e conseqüentemente menores quantidades de cátions absorvidos. Valores elevados de pH para rejeito de mineração na região de Mariana também foram observados por Silva et al. (2006), e ambos os trabalhos referidos destacam a utilização de hidróxido de sódio no processo de tratamento do minério como outro fator na elevação do pH em conjunto com a mineralogia do material.

Em contrapartida, nas áreas em que há maior CTC, boa parte é representada por Al^{3+} , que apesar de mostrar valores baixos, ocupam a maior parte dos sítios de carga. Neste sentido, os baixos valores de CTC implicam em sérios problemas de nutrição vegetal, uma vez que o rejeito tem baixa capacidade de retenção de bases e elevada capacidade de retenção de P, podendo funcionar como um sumidouro deste último, característica presente em muitos solos com elevados teores de óxidos.

Os resultados observados dos solos coletados podem indicar duas situações levando em consideração que são áreas ainda sem intervenção. Na primeira as áreas dispõem de uma maior camada de Tecnosolo sobre o solo original, representado pelo grupo de amostras associados positivamente aos valores de pH e a V (Figura 5) e ao maior teor dos micronutrientes (Figura 6), representando amostras coletadas apenas de Tecnosolo. O segundo grupo de amostras pode indicar áreas onde há uma menor camada do Tecnosolo e as coletas representam a mistura de Tecnosolo com o solo original da área, ou ainda que próprio Tecnosolo depositado nas áreas é resultante do arraste de resíduo e solos de toda a área atingida, uma vez que estas amostras estão associadas a características de solos mais ácidos e saturado por Al.

Em comparação ao estudo realizado por Silva et al. (2006) e como já caracterizado anteriormente, os teores de Fe e Mn são elevados. Este fato associado a baixos

percentuais de matéria orgânica, principalmente a fração, que tem elevada capacidade de complexar metais. Entretanto, estes valores estão abaixo dos Valores de Referência de Qualidade para os solos e risco a saúde humana, presentes na Resolução CONAMA nº 420/2009 e na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 02/ 2010, e não mostram riscos de fitotoxidez para plantas.

Com base na divisão dos solos amostrados e dois grupos distintos, as técnicas utilizadas para a recuperação dos tecnossolos podem ser direcionadas, favorecendo sua maior efetividade. Entretanto, essas devem englobar tanto as características químicas quando as físicas do solo, funcionando em sinergia para a melhoria deste. De maneira geral, a boa homogeneidade físico-química mostra que as práticas de manejo podem ser bem calibradas para os Tecnossolos de rejeito ou de recobrimento sem maiores limitações.

3. CARACTERÍSTICAS DOS PLANTIOS E TECNOSSOLOS

Por meio de programa de visitas em algumas propriedades alvos dos plantios, foi possível identificar distintas alternativas empregadas, as quais refletem diretamente nas características nas culturas existentes. Essas estão diretamente ligadas ao tipo de manejo realizado nas áreas que antecedeu os plantios em questão e à deficiência de nutrientes do solo. Apresenta-se na 8 as principais características identificadas nas áreas correlacionas às alternativas adotadas.

Tabela 8: Análise integrada e síntese dos principais modelos aplicados na área

Alternativas empregadas	Resultados alcançados (2 anos de observações)	
	Físicos	Químicos
Tecnossolo do rejeito <i>in situ</i> sem condicionamento físico¹	<ul style="list-style-type: none"> Formação de camada arenosa ("lag") com compactação moderada. Cobertura total do solo exposto de rejeito após 12 meses Redução do <i>hard-setting</i> com 24 meses Perda de argila dispersa após 12 meses Boa estruturação do solo pelas raízes, até 20 cm 	<ul style="list-style-type: none"> Bons resultados com calagem e adubação nas pastagens e capineiras Resultados variáveis com cana, milho e frutíferas
Tecnossolo do rejeito com recobrimento de solo das encostas²	<ul style="list-style-type: none"> Sem formação de camada arenosa (lag) Redução acentuada da erosão hídrica Compactação moderada e variável Boa estruturação dos solos pelas raízes até 40 cm Hard setting moderado, pelo uso de horizonte C estéril; onde houve uso de horizonte A e B, não se observou hard-setting 	<ul style="list-style-type: none"> Bons resultados com alguma adubação e calagem Resultados variáveis com cultivos anuais e cana (uso de solo inadequado) Boa recuperação nos solos com adição de esterco
Tecnossolo com mistura e inversão do rejeito com solo subjacente³	<ul style="list-style-type: none"> Heterogeneidade do Topsoil Pouca formação de camada arenosa ("lag") e pouco hard setting Compactação baixa e variável Boa estruturação dos solos pelas raízes até 40 cm 	<ul style="list-style-type: none"> Bons resultados com calagem e adubação Bom resultado com cultivos anuais Ativa resposta com adição de doses moderadas de esterco de curral

Cada alternativa empregada apresenta peculiaridades que fomentam diferentes níveis de recuperação edáfica do tecnossolo. Assim, apresenta-se na Tabela 6 o prognóstico alcançado por meio de cada técnica, sendo aqueles destacados em verde, os que possuem melhores atribuições quando comparado entre os demais.

Plantio em tecnossolo sem realização de manejo na área e aplicação insumos para correções das características químicas.

¹ Recobrimento do material tecnogênico com uma camada de solo fértil oriunda do entorno.

² Remoção do horizonte A do solo pretérito, por meio de trincheiras e inversão do tecnossolo de rejeito de modo que a camada de solo que anteriormente estava inferior ao tecnossolo, fique disposta superficialmente.

Tabela 9: Prognóstico considerando a recuperação edáfica

ALTERNATIVA A Tecnossolo do rejeito <i>in situ</i> sem condicionamento físico	ALTERNATIVA B Tecnossolo do rejeito com recobrimento de solo das encostas	ALTERNATIVA C Tecnossolo com mistura e inversão do rejeito com solo subjacente
Fechamento total das falhas de solos expostos em até 36 meses	Fechamento total das falhas de solos expostos já completada	Fechamento total das falhas de solos expostos já completada
Enraizamento efetivo até 60-70 cm pelas gramíneas (destaque Braquiária e Mombaça)	Enraizamento efetivo até 80- 90 cm pelas gramíneas (destaque Braquiária e Mombaça)	Enraizamento efetivo até 100 cm pelas gramíneas (destaque Braquiária, Cana e Mombaça)
Recuperação dos valores de matéria orgânica após 3 anos	Recuperação dos valores de matéria orgânica após 4 anos	Recuperação dos valores de matéria orgânica com dois anos
Necessidade de aportes substanciais de esterco	Necessidade de aportes substanciais de esterco, onde houve uso de solo inadequado	Necessidade de aportes moderados de esterco
Calagem e adubação por mais 5 anos, no mínimo; parcelamento recomendado	Calagem e adubação por mais 5 anos; parcelamento recomendado	Calagem e adubação por mais 3 anos, no mínimo; parcelamento recomendado

Dentre as alternativas empregadas, percebe-se que em todas é possível alcançar bons resultados considerando os atributos químicos do solo haja vista a introdução da calagem e adubação. No entanto, considerando os atributos físicos, tem-se que para a alternativa A houve formações de camadas arenosas com compactação moderada, com redução do *hard-setting* em 24 meses e perda de argila dispersa após 12 meses. Já para a Alternativa C, constatou-se que a camada de *topsoil* fica heterogênea, devido à desigual inversão das camadas. A Alternativa B por sua vez, apresenta-se sem formação de camada arenosa e redução acentuada da erosão hídrica, entretanto, a compactação do solo é considerada como moderada e variável.

Diante das técnicas de manejo adotadas, constata-se que o plantio de culturas pode ser plenamente satisfatório desde que realizado corretamente o manejo do solo. Destaca-se como diferencial nas propriedades analisadas a incorporação de composto orgânico por parte dos produtores. A simples correção do solo, independente do recobrimento do Tecnossolo, com a fertilização orgânica e mineral já permite alcançar plantios satisfatórios. O equilíbrio do pH, conforme o tipo de cultura a ser adotado, será a base para que todos os nutrientes sejam disponibilizados para a absorção da planta. Apresenta-se a seguir (9), algumas características identificadas nas áreas-alvo deste estudo.

Tabela 9: Algumas das características identificadas nas áreas-alvo de plantio.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e recobrimento de solo inadequado (horizonte C com saprolito) anterior ao plantio de cana-de-açúcar. Constatou-se uma biomassa satisfatória, no entanto a porcentagem de cobertura encontra-se variável e descontínua.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e recobrimento de solo inadequado (horizonte C com saprolito) anterior ao plantio de milho, onde constatou-se deficiência de potássio.

As folhas apresentam queimaduras, secamento ou bronzeamento da ponta e nas margens das folhas inferiores, além de manchas marrons no interior do colmo.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e recobrimento de solo inadequado (horizonte C com saprolito) anterior ao plantio de milho, onde constatou-se deficiência de potássio.

As espigas apresentam grãos desalinhados com ausência destes nas extremidades.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e recobrimento de solo inadequado (horizonte C com saprolito) anterior ao plantio de milho, onde constatou-se a deficiência de fósforo.

As folhas apresentam coloração púrpura (arroxamento) nas margens, colmos frágeis e delgados.



Propriedade A, plantio de cana-de- açúcar como solo inadequado de recobrimento; constatou-se eutrofização nas linhas de plantio onde houve adubação. Após a decomposição das algas será liberado ao solo nitrogênio.



Propriedade A. Planta remanescente do primeiro plantio de leguminosas (mix) na área. As raízes pivotantes cresceram de modo superficial, sem aprofundamento, devido ao selamento do solo, mas se encontram bem modeladas (detalhe dos nódulos de bactéria fixadora de N).



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e adição de solo inadequado anterior ao plantio de milho. Constata-se o efeito de arenização em camada de até 10 cm, evidenciando deficiência da cobertura vegetal e solo exposto à erosão seletiva.



Propriedade A na qual houve a incorporação de adubo e calcário e adição de solo inadequado anterior ao plantio de milho.

Devido ao efeito de arenização, a argila se dispersa do tecnossolo dando origem à formação de blocos.



Propriedade A plantio de Brachiaria em área com adição de solo inadequado. Constatou-se deficiência de nitrogênio. As folhas encontram-se com coloração amarelada e faixas de biomassa reduzida.



Propriedade B. Plantio de Mombaça com adição de solo inadequado, com forte incremento orgânico, adubação e calagem. Constatou-se biomassa bem satisfatória, aparentemente sem deficiência de nutrientes e boa cobertura do solo, sem *hard-setting*.



Propriedade B. Plantio de Mombaça com solo de recobrimento inadequado, incremento orgânico, adubação e calagem. Constatou-se matéria orgânica humificada, alcançando cerca de 40 cm de profundidade do tecnossolo.



Propriedade C. Plantio de cana-de- açúcar diretamente no tecnossolo do rejeito, sem manejo. Constatou-se deficiência nas folhas, no entanto essa pode ser atribuída à colheita tardia; realizou-se calagem e adubação. A cobertura é satisfatória.



Propriedade C. Plantio de cana-de-açúcar diretamente sobre o tecnossolo de rejeito. Constatou-se acamamento de sílica baixo. Solos com horizonte A com cerca de 5 cm e início de formação de estrutura granular.

Presença de migração de argila abaixo do horizonte A.



Propriedade D. Plantio de cana-de-açúcar em área de tecnossolo de rejeito com incorporação de solo, calcário e composto orgânico. Plantio recente, realizado há três meses. Constatou-se que o tecnossolo se encontra extremamente compactado, o que reflete diretamente no desenvolvimento radicular.



Propriedade E. Plantio de cana-de-açúcar em área com inversão e incorporação de solo na parte inferior. Constata-se grande diferencial neste plantio devido à não compactação do solo, o que difere fortemente do plantio realizado na propriedade D.

Foi possível constatar por meio das visitas técnicas que a dificuldade de acesso em determinadas propriedades, declividade do terreno e presença de pedras nas áreas alvo de plantio tornam-se fatores limitantes para a eficácia dos plantios. Tais constatações

podem resultar em um decréscimo de produção e aumento da energia necessária para o preparo do solo.

Assim, têm-se que os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo estão diretamente relacionados com a forma e a estabilidade estrutural do solo, tais como: compactação do solo, resistência do solo à penetração das raízes, porosidade total, tamanho e continuidade dos poros, adsorção e absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água e desenvolvimento do sistema radicular. Importante destacar visando mitigar grande parte de tais impactos, a Fundação Renova já executou distintas obras de drenagem nas propriedades alvo deste estudo.

Avaliando os Tecnosolos quimicamente, tem-se que as suas características não são exatamente favoráveis para o plantio de culturas, mas não se revelam limitantes e nem se permite pensar em qualquer medida de remoção completa das áreas para a efetivação do plantio. Para isso, bastam ser adotadas técnicas de manejo adequadas para que as culturas se desenvolvam satisfatoriamente, conforme detalhamento apresentado no Item 7, a seguir.

Diante das análises e evidências constatadas em campo, têm-se que o plantio no Tecnosolo considerando o manejo adequado, pode atingir resultados satisfatórios e apresentar culturas com excelente biomassa e porcentagem de cobertura.

Neste sentido e, em comum acordo com a Fundação Renova, constata-se que o plantio com remoção do Tecnosolo não se torna viável uma vez que, caso seja aplicado este método, tal situação fomentaria impactos significativos, não só considerando custos de execução, mas também a necessidade de transporte, e disponibilidade de áreas para acondicionamento do Tecnosolo removido.

Tabela 10: Principais características das culturas passíveis de utilização na área.

Cultura	Principais características
Cana-de-açúcar	<p>Cultivo ideal: solos com profundidade maior que um metro. Desenvolve-se de acordo com as características física do solo, principalmente com a capacidade de retenção de água. Necessita de solo com boa capacidade de infiltração. Solos arenosos são menos indicados.</p> <p>É bastante tolerante à acidez e alcalinidade. Seu cultivo desenvolve-se em solos com pH entre 6 e 8,4.</p> <p>O sistema de raízes desenvolve-se em maior profundidade.</p>
Capineira	<p>A forrageira mais indicada para a formação de uma capineira é o capim-elefante, por produzir um bom aporte de biomassa, boa adaptação a diferentes ecossistemas, boa aceitação e palatabilidade dos animais. É exigente em relação aos nutrientes; e não tolera baixo pH e alumínio no solo. Seu cultivo desenvolve-se em solos com pH entre 6 e 8,4.</p> <p>O plantio deve ser realizado em áreas com topografia que facilitem a colheita e com boa drenagem do solo.</p>
Milho	<p>Espécie anual, estival, cespitosa, ereta, com baixo afilhamento, monóclona. Para atingir o seu máximo potencial produtivo, a cultura necessita de temperaturas altas, em torno de 24 e 30°C, radiação solar elevada e adequada disponibilidade hídrica do solo.</p> <p>O cultivo possui maior desempenho em solos bem estruturados com alta capacidade utilizável para a água e disponibilidade de nutrientes. O solo deve ter textura mediana, o pH deve estar entre 6 a 7,2.</p>
Mombaça	<p>Espécie de ciclo anual e cespitosa. Recomenda-se o plantio em solos férteis, ou corrigidos areno-argilosos, bem drenados. Apresenta baixa tolerância a solos encharcados.</p>
Tifton	<p>Cultura perene estolonífera com grande massa folhear, rizomas grossos, que são os caules subterrâneos que mantêm as reservas</p>
	<p>de carboidratos e nutrientes que proporcionam uma maior resistência a secas, geadas, fogos e pastejo intensivos.</p> <p>O solo deve estar bem corrigido com o PH entre 5,5 e 6,5 e devidamente adubado. Vestígios de outras pragas ou gramíneas (Brachiaria, por exemplo), devem ser eliminadas.</p>
Brachiaria	<p>As gramíneas do gênero Brachiaria, amplamente utilizadas nas fases de cria, recria e engorda dos animais, adaptam-se à diversas condições de solo e clima. Sendo bem tolerantes a solos ácidos e inférteis, porém, possui grande potencial de resposta a melhorias do nível de fertilidade do solo. Tolerante pisoteio e pastejo intenso e continuado. É moderadamente tolerante a solos encharcados. O pH ideal aproxima-se de 6,5.</p>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS, N.; DELLA LUCIA. T.M.C.; MAYHÉ-NUNES, A.J. Guia prático sobre formigas cortadeiras em reflorestamentos. **Ponte Nova: Graff Cor**, 1998. 97p.

IUSS WORKING GROUP WRB. World reference base for soil resources 2006. **World Soil Resources Report**, n. 103. FAO, Rome. 2006.

MULLINS, C.E. Hardsetting Soils. In: SUMNER, M.E., ed. **Handbook of Soil Science**. Madison, CRC Press, p.65- 87. 1999.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARAES, P. T. G.; ALVAREZ V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5 aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - UFV, 359 p. 1999.

RODRIGUES, R.R.; GANDOLFI, S. Conceitos, tendências e ações para a recuperação de florestas ciliares. In: **Matas Ciliares: Conservação e Recuperação**. São Paulo: Edusp, 2000.

SBCS, SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10ª ed. Porto Alegre, 2004. 400p.

SCHAEFER CEGR, CANDIDO HG, CORREA GR, PEREIRA A, NUNES JA, SOUZA OFF, MARINS A, FERNANDES FILHO E, KER JC. Solos desenvolvidos sobre Canga Ferruginosa no Brasil: uma revisão crítica e papel ecológico de termiteiros. In: **Geossistemas Ferruginosos do Brasil (org. F.F Carmo & L. Y. Kamino pp. p 77-102**. 2015.

SCHAEFER CEGR, SANTOS EE, SOUZA CM, NETO JD, FILHO EIF, DELPUPO C. Cenário histórico, quadro fisiográfico e estratégias para recuperação ambiental de Tecnoossosolos nas áreas afetadas pelo rompimento da barragem do Fundão, Mariana, MG. **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico**, v.24, n 1/2, p. 105-135 , 2015

SILVA, G. P., FONTES, M. P., COSTA, L. M., & BARROS, N. F. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da mina de Alegria, Mariana – MG. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p.45-52, 2006.

SILVA, L.S.; RHEINHEIMER, D.S; KAMINSKI, J.; SCHLINDWEIN, J.; GATIBONI, L.C. **Acidez e o uso do calcário na agricultura**. Santa Maria (Departamento de Solos) – Universidade Federal de Santa Maria, 4p, 2002.

TACEY, W. H & GLOSSOP, B. L. Assessment of topsoil handling techniques for rehabilitations of sites mined for bauxite within the Jarrah forest of western Australia. *Journal of Applied Ecology*, p. 195-201,1980.

AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DAS CONDIÇÕES ORIGINAIS E ATUAIS DO REJEITO EM PONTOS ESPECÍFICOS

1. INTRODUÇÃO

Tecnossolos são solos que se desenvolvem a partir de substratos decorrentes da atividade antrópica, esse conceito oferece uma moldura útil na compreensão do desastre da Barragem do Fundão. Desde que foram incluídos na última versão da Base Referencial de Solos do Mundo (World Reference Base For Soil Resources — WRB) (2006), muita pesquisa 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). Conceitualmente devem conter mais de 20% de material tectogênico nos primeiros 100 cm (IUSS Working Group WRB 2006), e embora sejam mais comuns em áreas urbanas, tem sido cada vez mais detectado em larga escala em áreas rurais, onde representam as maiores áreas contaminadas do planeta (ROSSITER, 2007).

Os rejeitos da atividade minerária são partículas resultantes de processos de beneficiamento dos minérios que visam extrair os elementos de interesse econômico, no caso específico o minério de ferro. Sua constituição é caracterizada pela presença de frações líquida e sólida, com concentração de 30% a 50% em peso que varia de acordo com a composição do minério bruto e do processo industrial utilizado no beneficiamento. Os rejeitos podem variar de materiais arenosos não plásticos (rejeitos granulares) até granulometria fina com alta plasticidade (ARAUJO, 2006). Quando de granulométrica fina, são denominados lama, e quando de granulométrica grossa (acima de 0, 074 mm), são denominados rejeitos granulares (ESPOSITO, 2000).

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 (DOOR, 1965; ROSIERE e CHAMELE JR, 2001). Os minérios itabiríticos que pertencem a Formação Cauê são fortemente afetados pela tectônica e pelas zonas de cisalhamento. No âmbito composicional o itabirito pode ser separado em três tipos principais: Itabirito comum — formado de bandas abundantes em SiO₂ e óxido de ferro; 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 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). O rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, chegou rapidamente aos afluentes e ao Rio Doce percorrendo 826 km até o litoral do Estado do Espírito Santo. Nesse trajeto foi depositado imensa quantidade de rejeito nas margens dos rios, o que aniquilou a biodiversidade, e criou um novo ambiente edáfico, tectogênico e estéril. O assoreamento dos rios foi igualmente impactante, pela gigantesca carga de sedimentos carreados num único evento, e baixa capacidade de vazão dos mesmos.

Nesse trajeto boa parte das margens dos terraços baixos, até 4 metros de altura, e toda planície fluvial e leito menor, foram recobertos ou assoreados por um imenso volume de rejeito, atingindo profundidade máxima de 200 cm de material, além de galhos e restos orgânicos mais leves. Tecnoossolos praticamente estéreis, em forte contraste com os antigos Neossolos Flúvicos, Gleissolos e Cambissolos, na maioria eutróficos, que sustentavam a paisagem ribeirinha, e hoje truncados e enterrados.

É de se esperar, portanto que os locais afetados por esse material, principalmente terraços e leitos fluviais, possuam agora atributos químicos e físicos correlatos ao material tectogênico herdando as influências das dinâmicas na paisagem. Para compreender esse novo contexto ambiental e tomar medidas acertadas na reparação ambiental é necessário um estudo integrativo com metodologias comparativas das principais alterações ambientais em termos de sua natureza química, física e orgânica.

Avaliações preliminares da área afetada pela lama (Guerra et al., 2017; Schaefer et al., 2015) revelaram pouca variabilidade física e morfológica dos Tecnoossolos 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. Avaliar a recuperação destas áreas e a evolução pedogenética dos Tecnoossolos, 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 em pontos específicos e demais atividades realizadas dentro do escopo proposto para o primeiro trimestre do ano de 2020.

2. Atividades realizadas

- 1- Coleta e análise temporal dos atributos químicos/físicos de perfis modais afetados pela lama
- 2- Reconhecimento das áreas prioritárias com potenciais para a instalação das estações de monitoramento pedoclimático e das condições edáficas.
- 3- Participação do coordenador do projeto, prof. Carlos Schaefer, na gravação de vídeos institucionais da Fundação em Renova, em Gesteira.
- 4- Participação do coordenador do projeto, prof. Carlos Schaefer, na 38ª reunião da Câmara Técnica de Restauração Floresta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A análise temporal dos solos afetados fornece informações cruciais da dinâmica dos atributos químicos/físicos dos solos de forma a embasar as ações de recuperação sistêmica de cada ambiente. Esse monitoramento teve início em 2015, logo após o rompimento da barragem, e em 2018 e compôs parte de tese de doutorado desenvolvida no Departamento de Solos da UFV.

O local mais afetado pela lama possui aproximadamente 40 km de extensão e configura o trecho onde a maior parte do rejeito (80%) foi contido pela estrutura física da barragem Risoleta Neves “Candonga”, também situada na cidade de Rio Doce. Foram elencados 7 pontos dentro das principais áreas afetadas que abrangem o Rio Gualaxo do Norte, o Rio do Carmo e posteriormente o trecho inicial do Rio Doce, (Figura 1), na cidade de Rio Doce.

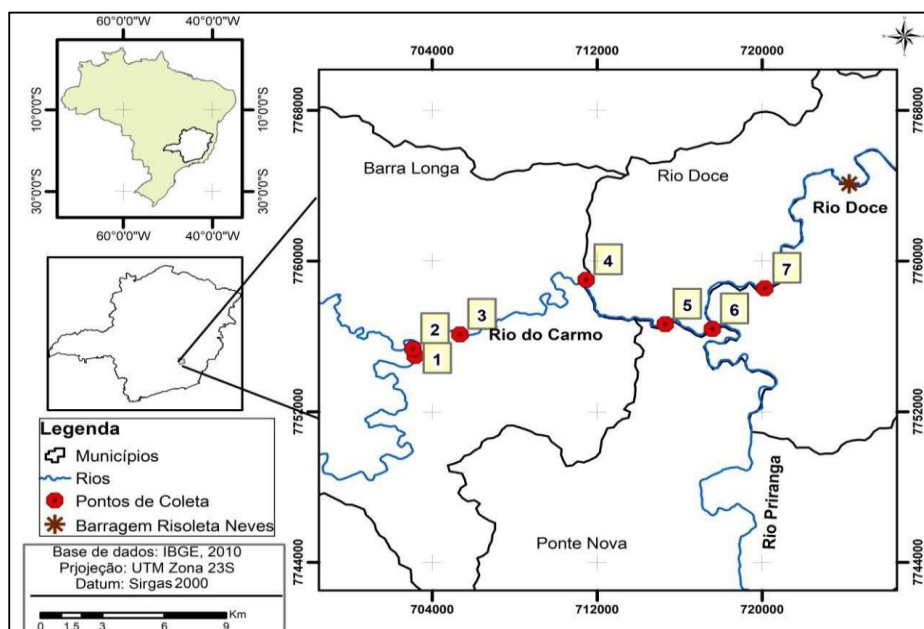


Figura 1. Área de estudo com os pontos de monitoramento físico/químico dos solos (Santos, 2019).

Para a análise temporal foram realizadas 3 coletas em tempos distintos (2015, 2018 e 2020) em 3 profundidades cada (0-20, 20-40 e 40-60) ao longo da área de estudo. O ponto 2 não foi encontrado e não foi incluído nas discussões.

3.1. Análises químicas e físicas

3.1.1. Análises químicas

A análise de pH em água foi realizada de acordo com a EMBRAPA, (2011) empregando a relação 1:2,5 solos: líquido utilizando eletrodo combinado imerso em suspensão. Foi determinado também o pH em KCl 1 mol/L para posterior determinação de Δ 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 ($\text{H} + \text{Al}$) 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: $T(\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}) \times 1000 / \text{conteúdo de argila (g kg}^{-1})$.

3.1.2. 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) (Xi), em kg/kg, serão calculadas a partir das fórmulas a seguir de acordo com Ruiz, H.A, (2005).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As descrições de cada ponto bem como os resultados analíticos, das camadas superficiais, estão sintetizadas nas Tabelas 2 e 3. De forma geral os pontos inseridos nas planícies fluviais, próximos as margens dos afluentes do Rio Doce, representam os compartimentos naturalmente mais dinâmicos da paisagem, com influência sedimentar recorrente. Dessa forma são solos morfologicamente distintos e heterogêneos, com estratificações verticais mais evidentes (P7, Figura 2) que marcam descontinuidades de deposição aluvial e maior variações químicas. Os pontos localizados em regiões relativamente mais afastadas das margens possuem maior estabilidade, maior desenvolvimento pedogenético e menor influência sedimentar, salvo em eventos anômalos, como o rompimento da barragem.



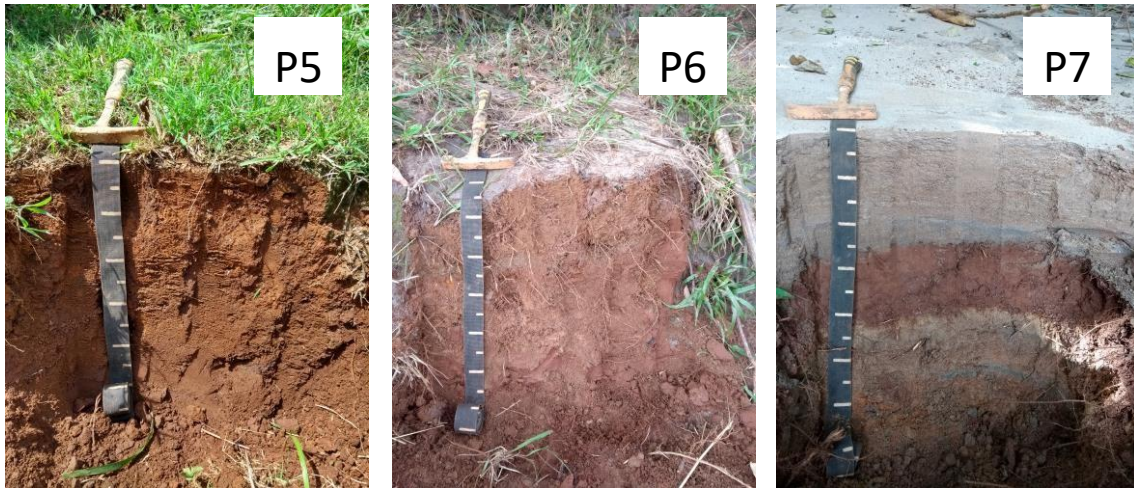


Figura 2. Perfis modais monitorados em fevereiro de 2020.

Os dados químicos ainda ressaltam o efeito residual de NaOH presente na lama refletido na elevação do pH dos solos, com exceção do P6 que pode ter sofrido alguma influência de deposições recentes com algum efeito acidificante. Nas análises temporais, todos os pontos analisados foram considerados eutróficos ($V > 50\%$). O aumento do pH foi acompanhado também do aumento da saturação de bases (Figura 3) e pode estar associado também com as técnicas de recuperação, via insumos e corretivos do solo. Das informações em cada ponto monitorado nos três primeiros anos 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 até 2018, acompanhada de um aumento dos cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} encontrados nas análises assim como os valores da CTC a pH 7 (T). Em 2020 houve queda significativa de $14,1 \text{ cmolc/dm}^3$ para $5,31 \text{ cmolc/dm}^3$, tais valores podem estar associados as deposições distróficas mais recentes ou perdas de bases.

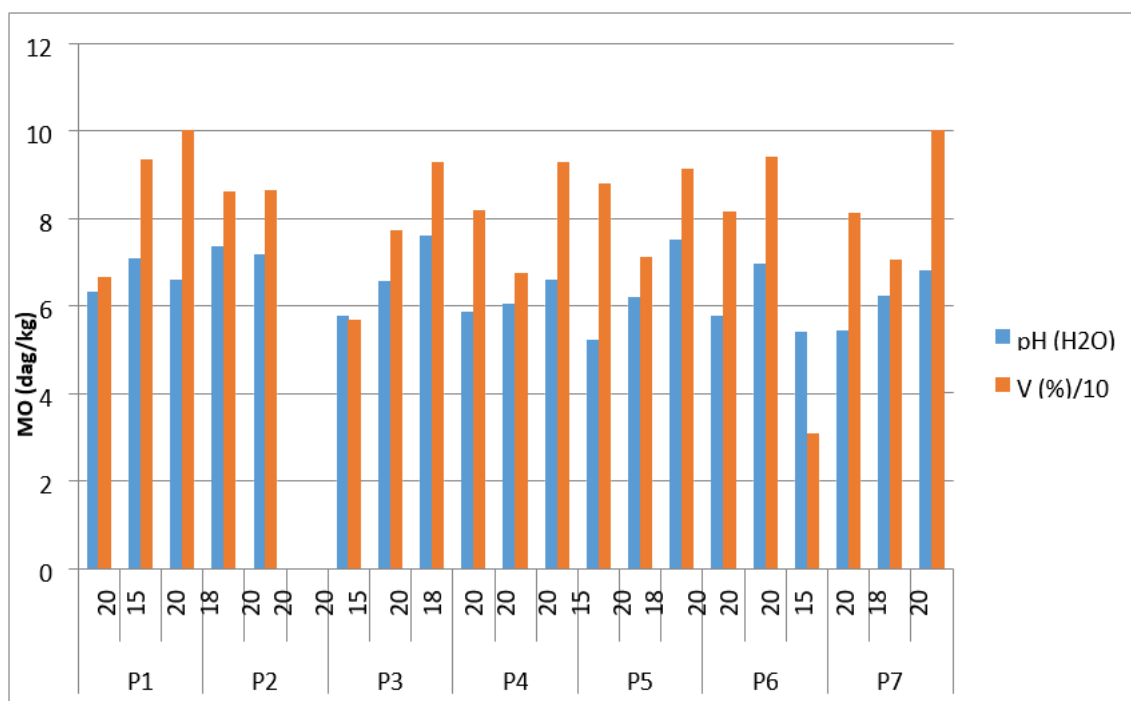


Figura 3. Evolução ao longo do tempo dos valores de pH(H₂O) e V% nos 7 pontos amostrados

Tabela 1. Síntese

Ponto	Coordenadas		Localização e situação	Cobertura	Raízes/Observações
	x	y			
P1	703175	7754963	Jusante do rio Gualaxo do Norte, coletado na borda do terraço, com deposição de material flúvico natural de aproximadamente 15cm de areia recente misturada com lama. Superfície erodida por enchente recente.	Vegetação arbustiva, recentemente roçada, com leguminosas e gramíneas espaçadas e entouceiradas. Uso atual de pastagem	Raízes finas até os 10 cm. Raízes finas e esparsas de 20 a 40 cm. Descontinuidade da areia em 10cm
P3	705346	775611	Montante do rio do Carmo próximo à cidade de Barra Longa. Presença de material misturado: lama-saprolito e areia. Muito cascalho/seixo a partir de 20 cm.	Uso atual pastagem com vegetação espontânea, próximo a curral de bovinos.	Raízes finas comuns até 40cm, e raras depois disso.
P4	711358	7758947	Meandro (cotovelo) do rio do Carmo. Deposição com partículas mais finas e adensadas, perfil adensado.	Pasto abandonado com regeneração natural, presença de vegetação herbáceo-arbustiva adensada com aproximadamente 1,5 metros de altura	Raízes finas comuns de 0-25cm, abaixo finas e raras
P5	715301	7756648	Fazenda Porto Alegre, a aproximadamente 20 metros do rio, antes da cerca com capineira. Área com adição de topsoil	Pastagem com irrigação, <i>Brachiaria</i> sp. bem desenvolvida, com pouca ocorrência de espécies invasoras.	Raízes finas comuns de 0-50 cm
P6	717589	7756399	Próxima à calha do Rio do Carmo, apresenta uma transição descontínua do pacote arenoso para a lama 10/40 cm.	Vegetação arrastada pela cheia do Rio recentemente.	Raízes finas comuns de 0-30 cm
P7	720130	7758554	Margem do rio Doce, com deposição de material flúvico recente.	Sem cobertura vegetal no ponto de coleta, mas com cobertura de formação secundária florestal.	Raízes finas rasas em superfície. Descontinuidade com 15cm de lama enterrado com areia (2C).

As dinâmicas dos valores de matéria orgânica foram distintas para cada ponto analisado, atrelado ao uso atual e ao tipo de manejo adotado em casa área. Além disso, há correlação entre os valores de MO e a textura dos solos, sendo mais baixos os valores onde há maiores incrementos de areia. P6 sendo representativo de uma fazenda de produção bovina (Fazenda Porto Alegre) teve um aumento significativo dos valores em função do manejo adotado, com adição de *topsoil* e esterco bovino, refletido também pastagens mais produtivas, apesar do uso intensivo. Os valores em P3 e P7 refletem a maior dinâmica do compartimento fluvial e deposições recentes de material arenoso não tendo relações aparentes entre os anos analisados. No quesito químico parece não haver impedimentos ao desenvolvimento vegetal, no entanto o grau de conservação variou entre os pontos, com áreas de regeneração incipiente sem componente arbóreo e pastagens com maior ou menor densidade e presença de plantas espontâneas. Em alguns, casos como em P6, foi relatado adensamento superficial ou “hard-setting” em associação a regeneração sem componente arbóreo.

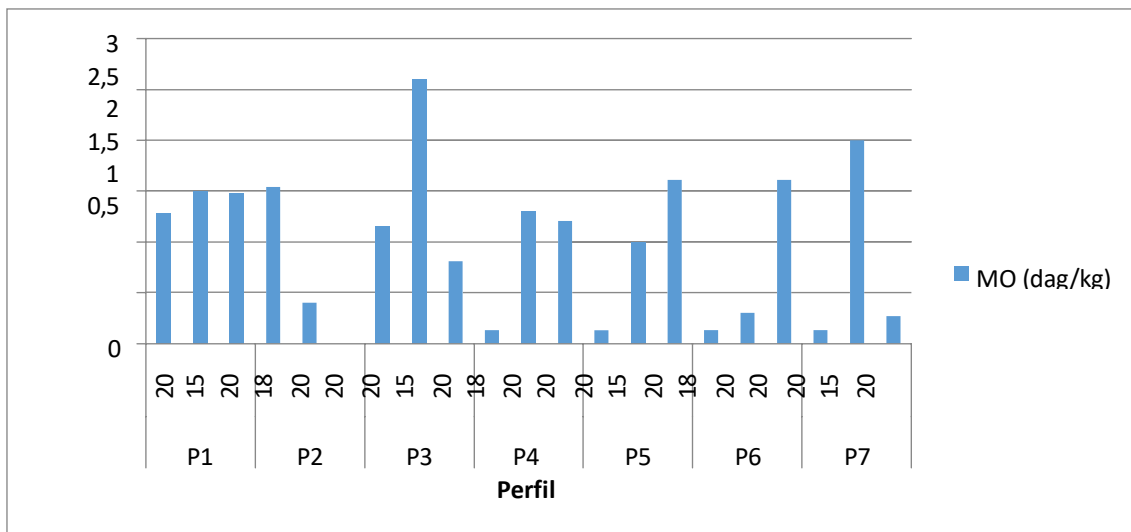


Figura 4. Gráfico do comportamento da MO, em superfície para cada ponto.

As análises texturais mostram disparidade para todos os pontos analisados e retratam discontinuidades entre todos os anos, porém mais evidentes onde há maior proximidade do ambiente de deposição como em P7, além disso, possuem uma distribuição espacial heterogênea quando atingem o terraço fluvial.

Tabela 2. Resultados químicos e físicos para todos os pontos em três tempos (2015, 2018 e 2020)




Ponto		P1			P2			P3			P4			P5			P6			P7			Média			C V		
Ano		2015	2018	2020	2015	2018	2020	2015	2018	2020	2015	2018	2020	2015	2018	2020	2015	2018	2020	2015	2018	2020	2015	2018	2020	2015	2018	2020
pH	H ₂ O	6,32	7,08	6,6	7,36	7,18	.	5,75	6,58	7,6	5,87	6,03	6,6	5,23	6,19	7,5	5,76	6,97	5,4	5,44	6,23	6,8	5,961	6,6086	6,75	0,4975	0,2222	0,631
P	mg/dm	1,7	18,5	9,9	7,5	7,3	.	1,4	8,2	16,7	10,2	4,7	3,5	10	6,1	6,7	9,1	7,4	2,2	10,1	7,1	13,4	8,085	20,4	8,73	15,47	20,816	32,16
K	mg/dm	37	132	57	22	227	.	50	87	145	10	53	85	7	100	164	10	62	33	9	144	27	73,05	3793,7	85,2	279,9	3556	3339
Ca ²⁺	cmolc/dm ³	1,82	3,15	1,41	1,51	1,04	.	1,25	3,44	1,65	1,21	1,86	0,69	1,25	2,02	2,26	1,14	1,23	0,69	1,11	2,07	0,36	1,558	0,6	1,18	0,064	0,807	0,519
Mg ²⁺		0,42	0,79	7	0,04	0,27	.	1	1,44	11	0,03	0,71	4	0,03	0,69	2	0,04	0,19	6	0,03	1,13	4	2,041	8,7	5,67	0,1369	0,1952	9,867
H+Al		1,2	0,3	0	0,3	0,3	.	2	1,5	0,33	0,03	1,3	0,33	0,02	1,2	0,33	0,03	0,1	2,64	0,03	1,5	0	0,672	0,6	0,61	0,6119	0,3881	1,02
(T)		3,59	4,28	18,05	2,17	1,89	.	4,62	5,1	4,61	1,66	2,71	4,66	1,66	2,97	3,72	1,63	1,58	3,81	1,6	3,57	0,62	3,725	13,1	5,91	1,4538	1,589	37,56
(t)		2,39	4,58	18,05	1,87	2,19	.	2,62	6,6	4,28	1,36	4,01	4,33	1,46	4,17	3,39	1,33	1,68	1,47	1,3	5,07	0,62	3,639	14,1	5,36	0,2992	2,8193	40,95
V	%	66,6	93,4	100	86,2	86,3	.	56,7	77,3	92,8	81,9	67,6	92,9	88	71,2	91,1	81,6	94	30,7	81,2	70,4	100	80,5	276,7	84,6	131,21	124,32	711,6
MO	dag/kg	1,28	1,5	1,48	1,54	0,4	.	1,15	2,6	0,81	0,13	1,3	1,21	0,13	1	1,61	0,13	0,3	1,61	0,13	2	0,27	1,029	0,5	1,17	0,42	0,6867	0,285
P-rem	mg/L	30,9	47,7	32,4	30,8	42,1	.	34,6	15,2	32,4	30	32,2	35,9	32,2	19,2	34,7	36,2	37,7	35,9	31	39,3	38,8	33,46	50,2	35	5,2795	144,63	5,934
Fe	mg/dm ³	43,7	0,11	578	132,4	1,12	.	73,3	6,51	205,4	214,2	2,81	190,9	248,1	4,46	77	319,5	0,7	221,9	249,8	0,97	356,5	146,4	24384,2	272	10384	5,5199	30465
Cu		1,31	99,4	2,9	1,17	56,3	.	0,99	316	1,1	1,52	67,7	0,8	1,48	48	5,1	1,67	55	2,3	1,67	68,7	1,2	36,72	5296,6	2,23	0,0659	9216,7	2,615
Mn		24,9	24	347,5	228,9	79,2	.	125,1	1215	132,3	97,8	668	108,3	87,1	32,4	162,3	82	67,1	107,5	295,6	70,9	177,8	206,7	78153,8	173	8885,8	212576	8144
Zn		0,96	4,1	3,3	0,66	1	.	1,62	4,5	2	0,61	2,2	1,3	0,58	3,8	15,7	0,98	0,8	1,6	0,63	2,7	2,1	2,557	11,1	4,33	0,1393	2,1924	31,47
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	.	1,00	0,2	.	0,3269	0,0423	.
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	.	1,11	0,1	.	0,0308	0,2437	.
Cd		0,3	0,3	.	0,18	0,2	.	0,33	0,4	.	0,26	0,3	.	0,27	0,2	.	0,27	0,3	.	0,28	0,3	.	0,278	0,0	.	0,0021	0,0048	.
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	.	1,212	1,5	.	2,2999	0,1958	.
Areia Grossa		kg/kg	0,16	0,04	0,08	0,02	0,06	.	0,26	0,02	0,16	0,07	0,01	0,09	0,05	0,25	0,23	0,38	0,06	0,11	0,05	0,10	0,03	0,11	0,01	0,12	0,018	0,007
Areia Fina	0,40		0,37	0,18	0,31	0,42	.	0,16	0,13	0,18	0,39	0,62	0,45	0,43	0,14	0,18	0,24	0,35	0,32	0,37	0,38	0,07	0,30	0,02	0,23	0,010	0,029	0,018
Silte	0,18		0,12	0,24	0,53	0,40	.	0,14	0,28	0,44	0,43	0,08	0,06	0,42	0,45	0,45	0,30	0,53	0,07	0,46	0,32	0,34	0,31	0,02	0,27	0,022	0,028	0,030
Argila	0,25		0,15	0,50	0,13	0,13	.	0,42	0,09	0,22	0,11	0,54	0,40	0,09	0,14	0,14	0,07	0,07	0,50	0,10	0,16	0,56	0,24	0,03	0,39	0,016	0,026	0,029
Dens. Part		3,05	3,11	.	3,10	2,96	.	2,67	2,74	.	3,03	2,80	.	3,12	2,74	.	3,07	3,16	.	2,99	3,01	.	2,97	0,03	.	0,02	0,03	.
Dens. Solo		2,32	2,19	.	2,52	2,63	.	2,30	1,34	.	1,58	1,42	.	2,01	1,57	.	1,31	2,45	.	2,36	2,25	.	2,02	0,22	.	0,20	0,28	.




5. OUTRAS ATIVIDADES

5.1. Seleção de sítios de monitoramento pedoclimático

O objetivo dessa atividade foi visitar e descrever as áreas para avaliar as potencialidades quanto a diversidade ambiental para o monitoramento, considerando ainda pontos de acesso e segurança. Foi realizado um reconhecimento in loco de 6 (Tabela 3) das 16 áreas prioritárias para seleção e instalação de 3 estações de monitoramento. Cada estação constará de sensores pedoclimáticos, trincheiras de observação dos atributos edáficos (desenvolvimento de estrutura, raízes etc.). Novas campanhas serão realizadas para prospecção das outras áreas e eleição das áreas mais aptas.

Tabela 3. Áreas prioritárias visitadas

Áreas/ Cod	Situação	Uso Atual	Imagem
14	Planície fluvial a montante Rio do Carmo	Pastagem bem manejada, presença de lagoas artificiais	
6	Planície fluvial Gualaxo do Norte BFL-27	Pastagem degradada	
9	Planície fluvial Gualaxo do Norte BFL-26	Pecuária extensiva, relevo forte ondulado para montanhoso, drenagem bem encaixada. Atividade de maquinário, passando sulcador na margem do rio, revirando a terra.	

7	Planície fluvial Gualaxo do Norte BFL-17	<p>Pasto abandonado, sem casas; a montante de área encachoeirada/ antes do encontro</p> <p>Pouca área útil, relevo estrutural, encaixado; Plantações de milho com deficiência nutricional</p> <p>Perímetro de Paracatu- com vegetação espontânea/regeneração natural (assa-peixe)</p> <p>A montante de Paracatu predominam terraços, áreas de capineira, relevo menos encaixado</p>	
5	Planície fluvial Gualaxo do Norte BFL-11	<p>Várias sedes com diferentes usos: capineira/pastagem. Presença de estação meteorológica em área de regeneração natural</p>	
8	Planície fluvial Gualaxo do Norte BFL-10	<p>Paastejem e capineira, em área mais restritas pela pouca extensão do terraço, área mais encaixada.</p>	

4. INSTITUCIONAL

No dia 29/01/2020 o coordenador prof. Carlos Ernesto Schaefer participou da gravação de vídeos institucionais da Fundação em Renova, na localidade de Gesteira.

No dia 05 de março de 2020, o coordenador do projeto prof. Carlos Ernesto Schaefer teve participação na 38ª reunião da Câmara Técnica de Restauração Florestal — CTFLOR em Belo Horizonte - MG para apresentar o laudo técnico do Tecnossolos de Mariana aos membros da CT (imagens em anexo).

5. BIBLIOGRAFIA

- IUSS WORKING GROUP WRB. World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports n. 103. FAO, Rome. 2006.
- ROSSITER, D. G. Classification of Urban and Industrial Soils in The World Reference Base for Soil Resources. In: Journal of Soil and Sediments 7 (2), 2007. p. 96 -100.
- ARAUJO, M. S. B.; SCHAEFER, C. E. R. G.; SAMPAIO, E. V. S. B. Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latossols and Luvisols in northeastern Brasil. Geoderma, v. 119. 2004. pp.309-321.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2011. 230 p. (Documentos 132). Disponível em: Acesso em 29 de fevereiro de 2016.
- ESPOSITO, T. J. Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. 2000. 363 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) — Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2000.
- ROSIERE, Carlos A.; CHEMALE JR, Farid. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero—uma visão geral e discussão. Revista Geonomos, 2013. v. 8, n. 2. 27-43p.
- TAKEHARA, L. Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros—fraco sinter feed. Tese de Doutorado aprovada pelo CPGEO/UFRGS, Porto Alegre, 2004. 421 p. Disponível em:<http://www.cprm.gov.br/publique/media/dou_lucytakehara.pdf>
- 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.
- 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. Boletim da SBCS, Viçosa MG.
- SOUZA E.E.. 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 de doutorado. Departamento de Solos. UFV 2019.

6. ANEXO- IMAGENS



Figura 6. Localização dos pontos de monitoramento



Figura 7. Descrição do P7 com descontinuidade, deposição arenosa recente



Figura 8. Diferentes coberturas do solo, regeneração arbustiva e pastagem “suja”



Figura 9. Regeneração dos meandros afetados com lama



Figura 10. Estruturação biológica do topsoil



Figura 11. Participação do coordenador prof. Carlos Schaefer na 38ª reunião da Câmara Técnica de Restauração Florestal.



Figura 12. Apresentação do laudo técnico do Tecnossolos de Mariana aos membros da CT pelo coordenador do projeto.

ESTUDO DA COMUNIDADE MICROBIANA NOS REJEITOS

1. INTRODUÇÃO

A comunidade microbiana desempenha um papel crítico no funcionamento do solo e sustentabilidade do ecossistema (Singh e Gupta, 2018), uma vez que participa de vários processos do ecossistema, como ciclos biogeoquímicos (Li et al., 2013), ciclagem de nutrientes (McGuire e Treseder, 2010), produção metabólica e interações simbióticas. Os microrganismos são excelentes bioindicadores para o solo monitoramento de qualidade (Cardoso et al., 2020; Schloter et al., 2017), e seu uso é crítico para avaliar solos em recuperação. Eles são especialmente vulneráveis e pode responder rapidamente a quaisquer mudanças no ambiente (Van der Voort et al., 2016). Os estudos da comunidade microbiana podem preceder mudanças detectáveis nas propriedades físicas e químicas do solo e fornecer os primeiros sinais de degradação e recuperação do ecossistema (Dangi et al., 2012). Esse trabalho teve o objetivo de avaliar a presença de microrganismos em amostras de rejeitos e solos ao longo dos primeiros 100 quilômetros afetados pelo material oriundo do rompimento da barragem de Fundão.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local de estudo e amostragem

As coletas de amostras de solo foram realizadas ao longo dos primeiros 100 quilômetros afetados pela deposição de rejeito de mineração, em diversas planícies que sofreram inundação, nos municípios de Mariana e Barra Longa, estado de Minas Gerais, que sofreram ou não a intervenção de programas de revegetação, totalizando 84 pontos de coletas, divididos em 7 talhões distintos nomeados de M03, B36, M8, B65, B82, B98 e B139. Também, foram coletados 3 pontos de solo em matas adjacentes, que não foram diretamente afetadas pela lama do rejeito e 3 pontos de áreas não afetadas diretamente pelo rejeito que possui vegetação natural (Controle Regeneração) para serem utilizadas como referência.

A amostragem foi realizada pelo corpo técnico da Golder Associates, no mês de fevereiro dos anos 2017, 2018 e 2018, representando a estação chuvosa. Cada amostra composta foi constituída de 3 subamostras coletadas numa área de 1,5 m², na profundidade de 0 a 15 cm, acomodadas em sacos plásticos e estocadas a -80 °C, para extração do DNA total do solo.

Por problemas técnicos, a amostragem dos talhões M03, B36 e o controle de regeneração não foram realizadas para o ano de 2019.

2.2. Extração de DNA total do solo e sequenciamento

Foi extraído, de cada amostra, o DNA total do solo. Para isso, foi utilizado 0,5g e a extração foi realizada usando o Kit *Nucleospin Soil* (Macherey-Nagel Laboratories), seguindo as instruções do fabricante. Para cada amostra foi realizado a extração em triplicata, totalizando 657 amostras. A qualidade do DNA foi checada em eletroforese de gel de agarose 1%, corado com *Gel Red* (Biotium, USA) e quantificado em *Nanodrop* (Nanodrop ND-100, Nanodrop Technologies Inc.).

As amostras foram enviadas para sequenciamento da região V4 do gene RNAr 16S na empresa Argonne (<https://www.anl.gov/>). Os primers utilizados foram illCUs515 F (5'GTGYCAGCMGCCGCGGTAA3') e 806 RB (5'GGACTACNVGGGTWTCTAAT3'), e o DNA foi sequenciado usando a plataforma MiSeq Illumina, com *reads paired-end* 150x150 pb.

2.3. Processamento dos dados e análises estatísticas

As *reads* foram separadas nas respectivas amostras com base nos barcodes usando o comando *joinpairedends.py* (Qiime). As *reads* brutas foram filtradas usando Quantitative Insights Into Microbial Ecology QIIME (versão 1.8.0). O parâmetro erro esperado ($E_{max} = 0,5$) foi usada para remover contigs de baixa qualidade no *software* USEARCH, usando UCHIME (http://www.drive5.com/usearch/manual/uchime_algo.html), as quimeras foram removidas usando o banco de dados GOLD como referência (Haas et al., 2011).

Por meio do *software* QIIME (version 1.8.0), as OTUs (*Operational Taxonomic Units*) (97% identidade) foram agrupadas (Edgar et al., 2011). O banco de dados Silva versão 132 (<http://www.arb-silva.de>) foi utilizado para afiliar taxonomia.

As análises de estatística e diversidade foram realizadas utilizando os programas R (version 3.6.1) e PAST (Hammer *et al.*, 2001), respectivamente. A análise NMDS (Non-metric multidimensional scaling) foi realizada com base na matrix de dissimilaridade de Bray-Curtis usando a função “metaMDS” do pacote Vegan (Oksanen *et al.*, 2013).

Wilcoxon-Mann-Whitney foi aplicado para testar diferenças nos índices de diversidade, $p < 0.05$ foi considerado significante.

3. RESULTADOS

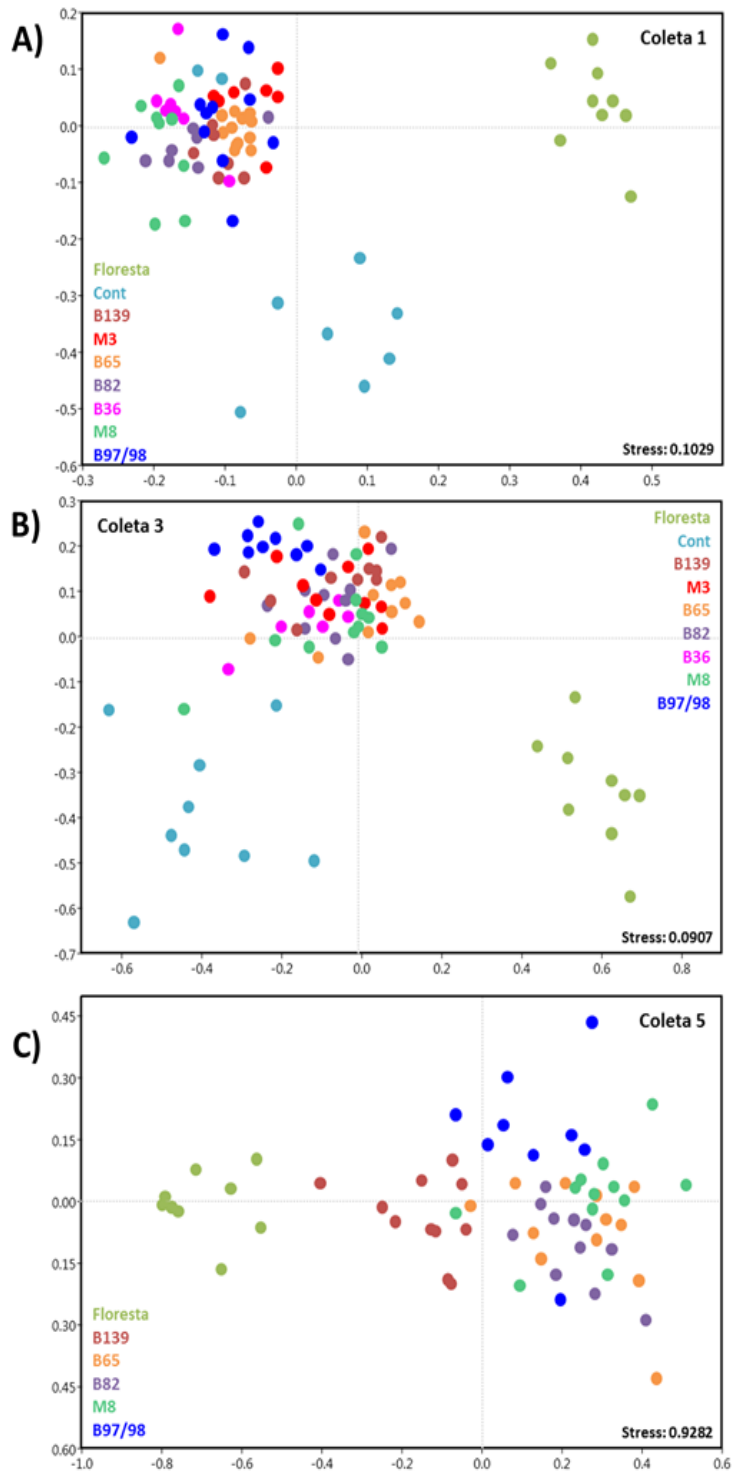


Figura 01: Análise de agrupamento NMDS com base nos gêneros bacterianos (95% de identidade). A) Coleta realizada no ano de 2017, B) Coleta realizada no ano de 2018 e C) Coleta realizada no ano de 2019.

As mudanças mais significativas na estrutura da comunidade microbiana ocorreram no primeiro e segundo ano de amostragem, é possível observar uma separação clara entre as amostras de rejeito e a áreas de floresta e controle de regeneração (Figura 01). As amostras referentes às áreas afetadas pelo rejeito de mineração agruparam-se muito próximas entre si, mostrando elevada dissimilaridade com as áreas de floresta não afetada pelo rejeito. Também foi possível observar uma separação das amostras referente ao controle de regeneração, entretanto, elas mostraram-se mais similares as amostras de rejeito do que das amostras de florestas. Ao longo da amostragem, há uma tendência das áreas afetadas pelos rejeitos se tornarem mais similares às áreas de floresta, no ano de 2019 é possível observar uma separação de grupos entre as amostras de floresta e amostras afetadas pelo rejeito de mineração, contudo, podemos observar maior similaridade entre essas áreas quando comparado com os anos anteriores, principalmente para as amostras referentes ao talhão B139 (Figura 01 C), sugerindo a ocorrência de um processo de sucessão microbiana ao longo do tempo nessas áreas.

A diversidade é composta pelo número de espécies em um local definido e o quanto similar as espécies são em abundância e, em um ambiente estabilizado, a tendência é que haja similaridade de abundância entre as diferentes espécies, termo conhecido como equitabilidade. É possível mensurar a diversidade alfa por meio de índices. O índice de Chao é um estimador de riqueza, esse índice indica qual é a riqueza estimada para determinado ambiente, quanto maior o valor do índice maior é a riqueza estimada desse ambiente. O índice de Shannon é um índice que mensura a diversidade, pois utiliza o parâmetro abundancia e riqueza para o cálculo.

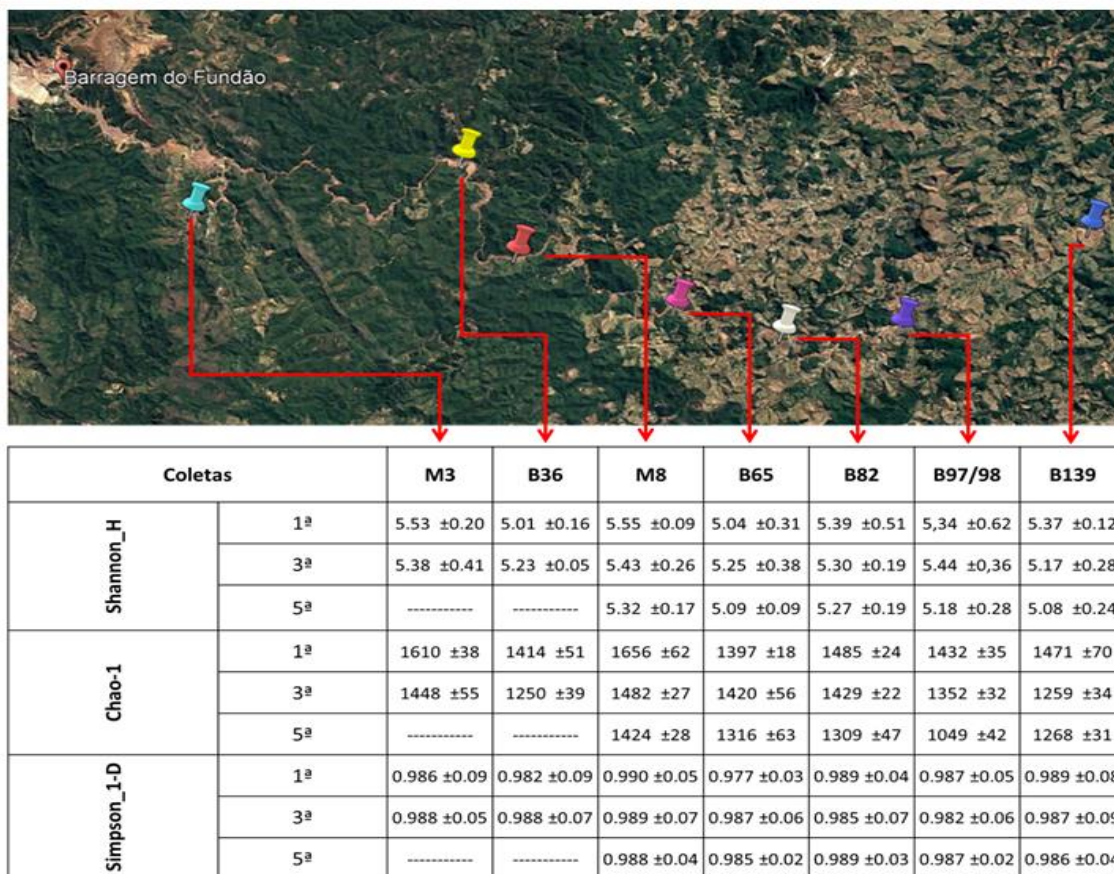


Figura 02: Média dos índices de diversidade (n=12), ± representa o desvio-padrão.

O índice de Simpson_1-D calcula a dominância de espécies, que está relacionado com a equitatividade, o valor dele varia entre 0 a 1, quanto mais próximo do valor 1 indica que menor é a dominância de determinadas espécies no ambiente (Magurran *et al.*, 2004). Não houve diferença estatística entre todos os índices de diversidade avaliados. Podemos observar que as áreas impactadas pelo rejeito de mineração apresentou elevado valor para os índices de diversidade alfa (Tabela 1), podendo ultrapassar inclusive a área de floresta. Esse fenômeno tem sido relatado para diferentes ambientes impactados, têm-se observado o aumento da diversidade alfa ocorre com o objetivo de manter os ecossistemas impactados em operação refletindo nos valores dos índices, com isso, apresentam maior redundância funcional, porém a diversidade beta é maior nesses casos (Mendes *et al.*, 2015; Goss-Souza *et al.*, 2019).

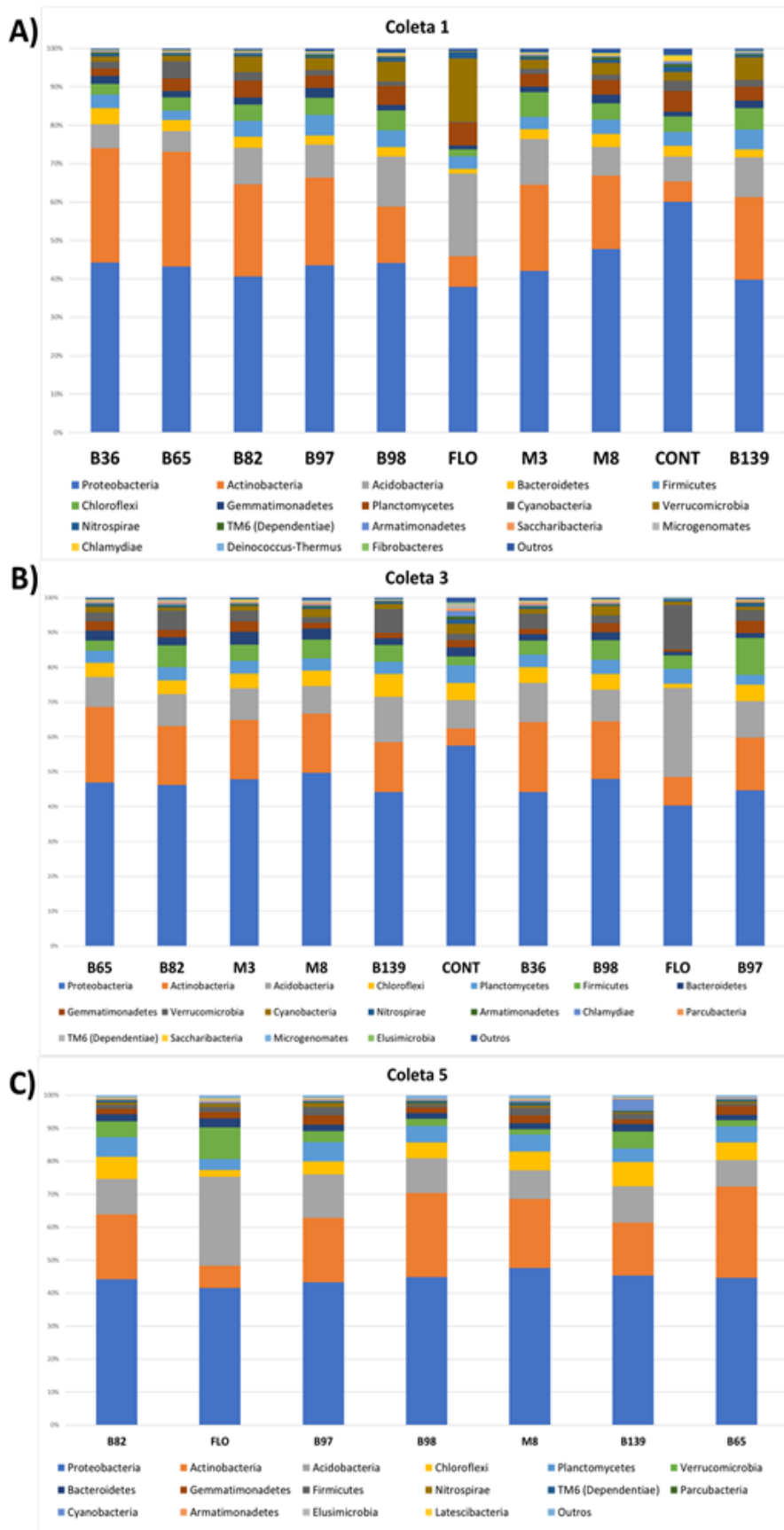


Figura 03: Média da abundância relativa dos filos bacterianos no período.

Proteobacteria foi filo de maior abundância em todas as amostras ao longo dos 3 anos de coleta, mostrando que o rejeito não interferiu diretamente na abundância desse filo. A deposição da camada de rejeito sobre o solo acarretou na elevação da abundância relativa das bactérias filiadas ao filo Actinobacteria. Bactérias pertencentes aos filios Proteobacteria e Actinobacteria são conhecidas por apresentarem alta diversidade metabólica, por isso têm a capacidade de colonizar rapidamente diferentes nichos, inclusive aqueles que surgiram da deposição de rejeitos no solo.

Os filios de baixa abundância da área da UND tiveram redução nas regiões afetadas pelos rejeitos, principalmente nas amostras coletadas nos dois primeiros anos (Figura 3^a e B), sendo representados principalmente pelos filios Acidobacteria e Verrucomicrobia. Mudanças nas características físico-químicas das áreas afetadas pela deposição de rejeitos de mineração impactaram diretamente na abundância desses filios, que naturalmente se encontram em baixa abundância em áreas não impactadas, mostrando que esses filios possivelmente apresentam dificuldade de adaptação ao ambiente impactado. O filo Acidobacteria já é reconhecido por ser muito sensível às condições ambientais, principalmente às variações de pH, carbono orgânico, nitrogênio disponível, além da concentração de metais, uso e cobertura do solo, apresentando respostas distintas às mudanças ambientais (Navarrete et al., 2015; Kielak et al., 2016). Assim, é possível que a diminuição na abundância relativa desses filios esteja relacionada a mudanças nas características químicas devido à deposição de rejeitos, como aumento do pH e redução de matéria orgânica.

4. REFERÊNCIAS

Edgar R C, Haas B J, Clemente J C, et. al. (2011). UCHIME improves sensitivity and speed of chimera detection. *Bioinformatics*, 27, 2194-2200. doi: 10.1093/bioinformatics/btr381

Goss-Souza D, Mendes L W, Borges C D, et. al. (2019). Amazon forest-to-agriculture conversion alters rhizosphere microbiome composition while functions are kept. *FEMS Microbiol Ecol*, 95, fiz009. doi: 10.1093/femsec/fiz009

Haas B J, Gevers D, Earl A M, et. al. (2011). Chimeric 16S rRNA sequence formation and detection in Sanger and 454-pyrosequenced PCR amplicons. *Genome Res*, 21, 494-504. doi: 10.1101/gr.112730.110

Hammer, Ø., Harper, D., Ryan, R. (2001). Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.*, 4, 1-9. Retrieved from: https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm

Kielak A M, Barreto C C, Kowalchuk G A, et. al. (2016). The Ecology of Acidobacteria: Moving beyond Genes and Genomes. *Front Microbiol*, 7, 1–16. doi: 10.3389/fmicb.2016.00744

Mendes L W, Tsai S M, Navarrete A A, et. al. (2015). Soil-borne microbiome: linking diversity to function. *Microb Ecol*, 70, 255-265. doi: 10.1007/s00248-014-0559-2

Navarrete A A, Soares T, Rossetto R, et. al. (2015). Verrucomicrobial community structure and abundance as indicators for changes in chemical factors linked to soil fertility. *Antonie van Leeuwenhoek*, 108, 741-752. doi: 10.1007/s10482-015-0530-3

Oksanen J, Blanchet F G, Kindt R, et. al. 2010. Vegan: community ecology package. R package version 1.17-4. Retrieved from: <http://cran.r-project.org> (13 February 2020, date last accessed).

INSTALAÇÃO DE SÍTIO DE MONITORAMENTO TÉRMICO E HÍDRICO DO TECNOSOLO

1. OBJETIVO

Com o objetivo de realizar o monitoramento Térmico-Hídrico do Tecnosolo, e avaliar as alterações dos fluxos de temperatura e umidade de solos afetados pelo rejeito da barragem do Fundão, foi iniciada a instalação dos sítios de monitoramento, tendo como primeiro local, a Fazenda Porto Alegre, localizada as margens do rio do Carmo (coordenadas: 20°16'25.681"S 42°56'54.734"W), no município de Rio Doce.

A Fazenda Porto Alegre foi selecionada, pois logo após o incidente em 2015 (Figura 1), foi realizada uma coleta de solo nas imediações, e vem sendo monitorada desde então, servindo como importante referência comparativa para os estudos de solos afetados pelo



rejeito e ainda, por se tratar de uma propriedade grande e organizada, oferecer segurança ao equipamento.

Figura 1. Fazenda Porto Alegre e terraços fluviais afetados pela deposição do Tecnosolo. Nov 2015 (C. Schaefer).

2. METODOLOGIA

Para a instalação do sítio de monitoramento foi escolhido um local próximo ao leito do rio, afetado por rejeito, em que não houvesse risco de alagamento ou enchente do Rio do Carmo, e também que não atrapalhasse as atividades da fazenda. Após a escolha do local, foi aberto, manualmente, um perfil de solo de profundidade de 1 metro para identificação das características (Figura 2), coleta de solo e inserção dos sensores de temperatura e umidade nas profundidades padrão previamente estabelecidas, que segue:

- Três sensores de temperatura do solo dualBASE nas profundidades: a 10cm, 50cm e 100cm;
- Quatro sensores de umidade do solo CS616 nas profundidades: a 10cm, 30cm, 50cm e 100cm.

No perfil aberto no solo, foram observadas as seguintes características:


<p>Terraço fluvial, declive baixo, cobertura de pastagem (Figura 3) Relevo local: plano Relevo regional: forte ondulado, montanhoso Erosão: não aparente Não pedregosa; não rochosa Floresta semidecidual Uso: pastagem</p>	
<p>horizonte A: 0-9cm 5YR3/2; não cascalhenta; estrutura fraca pequena blocos subangulares; muito friável; transição plana e abrupta;</p>	
<p>horizonte BC: 9-40cm 2.5YR4/6; não cascalhenta; estrutura fraca, média, blocos subangulares; friável; transição plana e abrupta;</p>	
<p>horizonte C (rejeito): 40-95cm: 5R3/2, pouco cascalhenta; maciça; consistência firme; transição plana e abrupta;</p>	
<p>horizonte 2AC: 95-120+cm: 7.5YR5/6, não cascalhenta, grão simples, muito friável;</p>	

Figura 2. Perfil de solo aberto

Raízes: Abundantes finas e médias em A, concentradas na base (5 a 9cm); poucas finas e médias em BC (concentradas na base do BC e topo do C); praticamente ausentes no restante do perfil.



Figura 3. Paisagem do perfil de solo com os sensores instalados.



Figura 4. Inserção dos sensores de temperatura e umidade do solo.

Foram inseridos os sensores nas profundidades acima descritas (Figura 4) e conectados a dois loggers dualBASE que fazem a coleta de dados a cada hora, alimentados por uma bateria externa. Os cabos dos sensores foram enterrados por dois metros (distância do perfil a bombona) e acomodados dentro da bombona azul, juntamente com os loggers e a bateria. A bombona foi parcialmente enterrada para sua fixação no local e o perfil de solo fechado, com suas respectivas camadas de material (Figura 5).

Os loggers coletarão dados dos sensores de temperatura e volume de água no solo nos perfis de solo selecionados a cada hora, durante todo ano. A profundidade do perfil foi determinada seguindo critérios pedológicos pré-existentes e aliado a configuração advinda da deposição do rejeito, e seguirá um padrão para todos os sítios instalados. A manutenção será feita periodicamente a cada seis meses, e consta de ver se o equipamento está funcionando corretamente, download dos dados e troca ou carga de bateria. Os dados serão processados através de rotinas geoestatísticas de forma a registrar as alterações ao longo do tempo, sendo utilizados os pacotes disponibilizados no software R



Figura 5. Fechamento do perfil de solo, e bombona parcialmente enterrada para fixação.