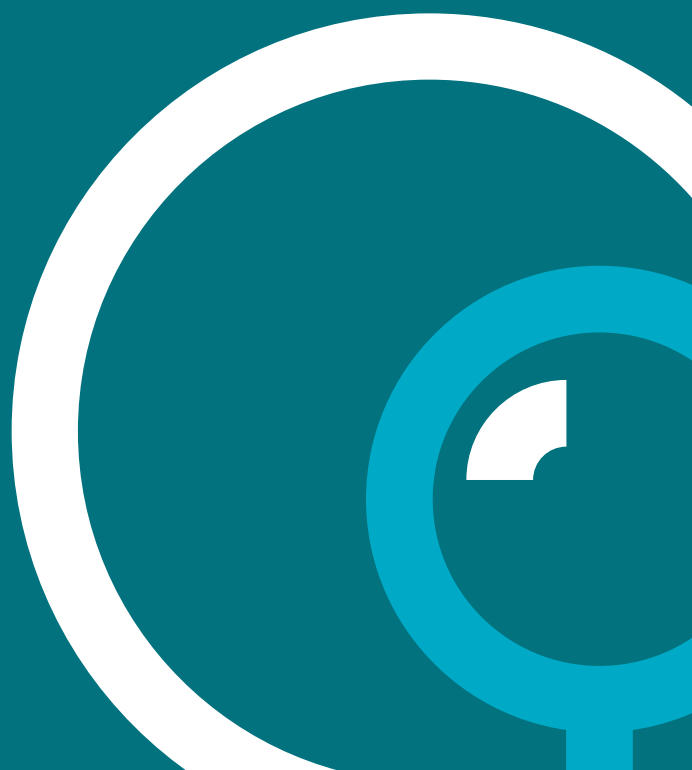


Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente

Acompanhamento de danos

TOMO III – Ambiente Terrestre e Atmosfera

Lactec
Curitiba – Paraná – Brasil
Julho/2021



Documento:	Diagnóstico Socioambiental dos Danos Decorrentes do Rompimento da Barragem de Fundão na Bacia do Rio Doce e Região Costeira Adjacente Acompanhamento de danos: TOMO III – Ambiente Terrestre e Atmosfera
Considerações Gerais:	Este documento refere-se ao Relatório de Acompanhamento de Danos, parte integrante do Diagnóstico Socioambiental dos Danos Decorrentes do Rompimento da Barragem de Fundão na Bacia do Rio Doce e Região Costeira Adjacente, o qual apresenta o acompanhamento dos danos socioambientais advindos do desastre no ambiente terrestre e atmosfera.
Contrato:	4500173758 – Samarco/Lactec
Solicitante:	Empresa: Ministério Público Federal Procuradoria da República em Minas Gerais
	Endereço: Av. Brasil, 1877
	Bairro: Bairro Funcionários
	Cidade: Belo Horizonte/MG
	CEP: CEP 30140-007
	A/C: Dr. Carlos Bruno Ferreira da Silva
	E-mail: carlosbruno@mpf.mp.br
Executante:	Lactec Avenida Comendador Franco, nº 1341 Jardim Botânico CEP 80215-090 Curitiba – PR – BR e-mail: leonardo.bastos@lactec.org.br Meio Ambiente T + 55 (41) 99102-8276

Autoria:

Equipe Técnica do Lactec

Emitido por:

Leonardo Pussieldi Bastos, M. Sc.
Biólogo / CRBio 28808-07D
Meio Ambiente

Aprovado por:

Tânia Lucia Graf de Miranda, D. Sc.
Engenheira Agrônoma / CREA RS 069105/D
Gerente de Serviços Tecnológicos e Inovação

Luiz Alkimin de Lacerda, D. Sc.
Engenheiro Civil / CREA PR 155674/D
Gerente de Pesquisa e Inovação

PRESIDÊNCIA		
Luiz Fernando Vianna	Diretor Presidente	
DIRETORIA		
Lauro Elias Neto	Diretor de Operações Tecnológicas	
Hélio Padilha	Diretor de Desenvolvimento Tecnológico	
Katia Patrícia Campanharo Fiebich Peroni	Diretora Administrativo-Financeira	
GERÊNCIA DE SEGMENTO		
André Ricardo Capra	MSc. Engenheiro Mecânico	Ensaios e Análises. Laboratoriais
Luiz Alkimin de Lacerda	Dr. Engenheiro Civil	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
Tania Lucia Graf de Miranda	Dra. Engenheira Agrônoma	Serviços Tecnológicos e Inovação
GERÊNCIA DE ÁREA		
Betina Lepretti Medeiros	MSc. Engenheira Civil	Estruturas Cíveis
Fabiano Scheer Hainosz	MSc. Engenheiro Cartógrafo	Geossoluções
Guilherme Cunha da Silva	Dr. Engenheiro Eletricista	Materiais
Leandro Zem	Administrador de Empresas	Escritório de Projetos
Jefferson Arndt	Esp. Analista de Sistemas	Inteligência de Negócios
Rodrigo Soares Ferreira	MSc. Químico	Análises Químicas
Rosana de Fátima Colaço Gibertoni	MSc. Engenheira Civil	Meio Ambiente
EQUIPE TÉCNICA		
COORDENAÇÃO DO PROJETO		
Leonardo Pussieldi Bastos	MSc. Biólogo	Coordenação Geral
Luiz Alkimin de Lacerda	Dr. Engenheiro Civil	Coordenação Técnica
Tania Lucia Graf de Miranda	Dra. Engenheira Agrônoma	Coordenação Técnica
Gleiciane Fernanda de Carvalho Blanc	MSc. Engenheira Ambiental	Coordenação Executiva
GESTÃO E ACOMPANHAMENTO		
Franciele Dãobroski	Esp. Engenheira Eletricista	Analista de Projeto
Renato Cipriano de Jesus	Esp. Economista	Analista de Projeto
Guilherme de Poli	Administrador de Empresas	Analista de Projeto
Leandro Zem	Esp. Administrador de Empresas	Analista de Projeto
LÍDERES DE GRUPOS DE TRABALHO		
Gleiciane Fernanda de Carvalho Blanc	MSc. Engenheira Ambiental	Coordenação GTs
Mariana D’Orey Gaivão Portella Bragança	Dra. Engenheira Ambiental	GT Integração
Joseane Valente Gulmine	Dra. Química	GT Integração

Luciana Rodrigues de Souza Bastos	Dra. Bióloga	GT Integração
Fernando Camargo da Silva	Esp. Engenheiro Florestal	GT Terrestre e Atmosfera
Letícia de Pierri	Dra. Engenheira Agrônoma	GT Terrestre e Atmosfera
Marcelo Alejandro Villegas Vallejos	MSc. Biólogo	GT Terrestre e Atmosfera
Isabella Francoso Rebutini Figueira	Dra. Geóloga	GT Aquático Continental
Bruna Arcie Polli	Dra. Engenheira Ambiental	GT Aquático Continental
Marianne Schaefer França Sieciechowicz	MSc. Engenheira Ambiental	GT Aquático Continental
Patricia Dammski Borges de Andrade	MSc. Bióloga	GT Zona Costeira e Marinha
Ana Carolina Wosiack	MSc. Bióloga	GT Zona Costeira e Marinha
Cristiane Schappo Wessling	MSc. Engenheira Ambiental	GT Patrimônio Cultural
Renata Cristine da Silva Gonçalves	Esp. Economista	Valoração Econômica

EQUIPE EXECUTORA

Ana Paula Zampieri da Silva	Técnica em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Davi da Silva Nascimento	Esp. Engenheiro Cartógrafo	Geoprocessamento
Edson Haruo Yoshizumi	Técnico em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Fabiano Scheer Hainosz	MSc. Engenheiro Cartógrafo	Geoprocessamento
Lazaro Filipe de Souza	Geógrafo	Geoprocessamento e Paisagem
Maricler Toigo	Tecnóloga em Processamento de Dados	Geoprocessamento
Peterson da Silva Beherend	Técnico em Geomática	Geoprocessamento
Henrique Reisdorfer Leite	MSc. Geógrafo	Sensoriamento Remoto
Bruna Gomes Dias	Técnica em Química	Caracterização físico-química
Camila Marçal Gobi Pacher	MSc. Química	Caracterização físico-química
Camila Melo Pesqueira	MSc. Química	Caracterização físico-química
Fernando Henrique Coffacci de Lima	Químico	Caracterização físico-química
Heloisa Nunes da Motta	Dra. Engenheira Química	Caracterização físico-química
Joseane Valente Gulmine	Dra. Química	Caracterização físico-química e Química Ambiental
Juliano de Andrade	Dr. Engenheiro Químico	Caracterização físico-química
Kassia dos Santos Kanieski	MSc. Química	Caracterização físico-química
Sebastião Domingos de Oliveira	Geólogo	Rejeitos, Geoquímica e Geotecnia
Mariana D'Orey Gaivão Portella Bragança	Dra. Engenheira Ambiental	Rejeitos e Química Ambiental

Claudia Bueno dos Reis Martinez	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Leticia da Silva Pereira Fernandes	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Luciana Rodrigues de Souza Bastos	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Angélica Alves de Paula	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Mônica Lopes Ferreira	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Aline Ingrid	Técnica de laboratório	Ecotoxicologia
Natália Vitorino	Técnica de laboratório	Ecotoxicologia
Lilian Dalago Salgado	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Kelly Sabrina Riby Afonso	Técnica em química	Ecotoxicologia
Leticia da Silva Pereira Fernandes	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Luciana Rodrigues de Souza Bastos	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Luís Fernando Fávaro	Dr. Biólogo	Ecotoxicologia
Mariana Machado Lauer	Dra. Oceanógrafa	Ecotoxicologia
Tiago Tomiama Alvim	M.Sc. Biólogo	Ecotoxicologia
Ricardo de Souza Santana	M.Sc. Biólogo	Triagem de Altos Valores de Conservação
Ellen Brown Watson	MSc. Antropologia Ambiental	Triagem de Altos Valores de Conservação
Sebastiaan De Smedt	Dr. Engenharia em Biociências	Triagem de Altos Valores de Conservação
Jane Siqueira Lino	M.Sc. Ecóloga	Triagem de Altos Valores de Conservação
Pedro Zanetti Freire Santos	M.Sc. Engenheiro Florestal	Triagem de Altos Valores de Conservação
Alexandra Freitas	M.Sc. Engenheira Agrônoma	Triagem de Altos Valores de Conservação
Fernando Mainardi Fan	Dr. Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Hugo de Oliveira Fagundes	MSc. Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Irani do Santos	Dr. Geógrafo	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Batista Dias de Paiva	Dr. Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Paulo Jankowski Saboia	MSc. Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva	Dr. Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rosana de Fátima Colaço Gibertoni	MSc. Engenheira Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rubem Luiz Daru	MSc. Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Tobias Bernward Bleninger	Dr., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Alcides Conte Neto	Estatístico	Águas Superficiais Continentais
Ana Carolina Canossa Becker	MSc. Engenheira Civil	Águas Superficiais Continentais, Resíduos Sólidos
Ana Carolina Wosiack	MSc. Bióloga	Águas Superficiais Continentais
Bruna Arcie Polli	Dra. Engenheira Ambiental	Águas Superficiais Continentais

Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes	Dr. Engenheiro Civil	Águas Superficiais Continentais
Marianne Schaefer França Sieciechowicz	MSc. Engenheira Ambiental	Águas Superficiais Continentais
Nicole Machuca Brassac de Arruda	Dra. Bióloga	Águas Superficiais Continentais
André Filgueiras	MSc. Oceanógrafo	Águas e Sedimentos Costeiros
Emilio Marcelo Dolichney	Oceanógrafo	Águas e Sedimentos Costeiros
Luciano Hermanns	Dr. Oceanógrafo	Águas, Sedimentos Costeiros e Serviços Ecossistêmicos
Josiane Rovedder	MSc. Bióloga	Águas e Sedimentos Costeiros
Tomaz Bohrer Brentano	Engenheiro Ambiental	Águas, Sedimentos Costeiros e Serviços Ecossistêmicos
Tatiana Silva da Silva	Dra. Oceanógrafa	Serviços Ecossistêmicos
Milton Asmus	Dr. Oceanógrafo	Serviços Ecossistêmicos
Josiane Rovedder	MSc. Bióloga	Serviços Ecossistêmicos
Priscila Hiromi Yamazaki	Eng. Ambiental, Veterinária	Serviços Ecossistêmicos
Fernando Luiz Diehl	MSc. Oceanógrafo	Águas, Sedimentos e Zooplâncton Costeiros
Thiago Carvalho de Mello	MSc. Engenheiro Químico	Sistemas de Abastecimento de Água, Resíduos Sólidos
Mariana Vieira Calixto	Engenheira Ambiental	Resíduos Sólidos
Patricia Dammski Borges de Andrade	MSc. Bióloga	Fauna aquática
Priscila Izabel Tremarin	Dra. Bióloga	Fitoplâncton Continental e Costeiro
Claudia Costa Bonecker	Dra. Bióloga	Zooplâncton Continental
Dieison André Moi	Biólogo	Zooplâncton Continental
João Vitor Fonseca da Silva	MSc. Biólogo	Zooplâncton Continental
Leidiane Pereira Diniz	MSc. Bióloga	Zooplâncton Continental
Louizi de Souza Magalhães Braghin	Dra. Bióloga	Zooplâncton Continental
Luiz Felipe Machado Velho	Dr. Biólogo	Zooplâncton Continental
Ludmilla Dias Veado	MSc. Oceanógrafa	Zooplâncton e Ictioplâncton Costeiro
André Virmond Lima Bittencourt	Dr. Engenheiro Químico	Águas Subterrâneas
Ernesto Goldfarb Figueira	MSc. Geólogo	Qualidade de Sedimentos, Águas Subterrâneas e Geologia
Gheysa do Rocio Moraes Pires	MSc. Tecnóloga em Química Ambiental	Qualidade de Sedimentos e Águas Subterrâneas
Isabella Francoso Rebutini Figueira	Dra. Geóloga	Qualidade de Sedimentos, Águas Subterrâneas e Geologia
Leonardo Evangelista Lagoeiro	Dr. Geólogo	Geologia e Geoquímica
Camila Ghilardi Cardoso Fontanella	MSc. Bióloga	Macroinvertebrados Aquáticos e Bentos de Fundos Inconsolidados
Devon Gebauer Mayer	Biólogo	Bentos de Fundos Inconsolidados
Ericka Viviane Lemos Marcondes	Bióloga	Macroinvertebrados Aquáticos

Rosemary A. Brogim	Dra. Bióloga	Bentos de Fundos Inconsolidados
Adriano Hauer	Esp. Biólogo	Ictiofauna
Bruno Kazuo Nakagawa	MSc. Biólogo	Ictiofauna
Giuliano Menegale Martinazzo	Biólogo	Ictiofauna
Matheus Oliveira Freitas	Dr. Biólogo	Ictiofauna
Maurício Belezia de Oliveira	MSc. Biólogo	Ictiofauna
Vinícius Abilhoa	Dr. Biólogo	Ictiofauna
Emanuel Luis Razzolini	MSc. Biólogo	Ictiofauna – Diversidade Genética
Rafael Antunes Baggio	Dr. Biólogo	Ictiofauna – Diversidade Genética e Modelagem da dinâmica populacional
Walter Antônio Pereira Boeger	Dr. Oceanógrafo	Ictiofauna – Diversidade Genética
Angie Thaisa da Costa Souza	MSc. Bióloga	Ictiofauna – Modelagem da dinâmica populacional
Sabrina Borges Lino de Araújo	Dra. Física	Ictiofauna – Modelagem da dinâmica populacional
Fabício Locatelli Trein	Esp. Biólogo	Quelônios
Letícia Kienen Languer Rolim	Médica Veterinária	Quelônios
Lucas Reinert Mendes	Biólogo	Quelônios
Marcos André Navarro	MSc. Biólogo	Quelônios
Matheus Ferreira de Souza	Médico Veterinário	Quelônios
Letícia de Paula Koproski	Dra. Médica Veterinária	Quelônios
Leonardo Liberali Wedekin	Dr. Biólogo	Cetáceos
Samira Costa da Silva	MSc. Médica Veterinária	Cetáceos
Antônio Carlos Vargas Motta	Dr. Engenheiro Agrônomo	Solos
Bernardo Lipski	MSc. Engenheiro Agrônomo	Solos
Letícia de Pierri	Dra. Engenheira Agrônoma	Solos
Betina Lepretti Medeiros	MSc. Engenheira Civil	Geotecnia
Esther Dyck	Engenheira Civil	Geotecnia
Joubert Weigert Favaro	MSc. Engenheiro Ambiental	Geotecnia
Marcelo Buras	MSc. Engenheiro Civil	Geotecnia
Rodrigo Moraes da Silveira	Dr. Engenheiro Civil	Geotecnia
Ana Alice Biedzicki de Marques	Dra. Bióloga	Biodiversidade
Fernando Camargo da Silva	Esp. Engenheiro Florestal	Flora
Juliano José da Silva Santos	MSc. Biólogo	Flora e Bioespeleologia
Marcelo Augusto da Silva	Biólogo	Flora
Tamara Molin	Bióloga	Flora
Vanessa Ariati	MSc. Bióloga	Flora

Marcelo Alejandro Villegas Vallejos	MSc. Biólogo	Fauna Silvestre e Áreas Protegidas
Luiz Eduardo Macedo Reis	Dr. Biólogo	Fauna Silvestre – entomofauna
Rafael Lucchesi Balestrin	Dr. Biólogo	Fauna Silvestre – herpetofauna
Raphael Eduardo Fernandes Santos	Esp. Biólogo	Fauna Silvestre – avifauna
Andressa Gatti	Dra. Bióloga	Fauna Silvestre – mastofauna terrestre
Daniel da Silva Ferraz	MSc. Biólogo	Fauna Silvestre – mastofauna terrestre
João Eduardo Cavalcanti Brito	MSc. Biólogo	Fauna Silvestre – mastofauna terrestre
Michel Barros Faria	Dr. Biólogo	Fauna Silvestre – mastofauna terrestre
Paulo Rogerio Mangini	Dr. Médico Veterinário	Fauna Silvestre – mastofauna terrestre
Thadeu Sobral de Souza	Dr. Biólogo	Modelagem da biodiversidade
Ana Tereza Bittencourt Guimarães	Dra. Bióloga	Modelagem da biodiversidade
João Luís Bittencourt Guimarães	MSc. Eng. Florestal	Modelagem de Serviços Ecossistêmicos
Leandro Moraes Scoss	MSc. Zootecnista	Áreas Protegidas
Robson Odeli Espíndola Hack	MSc. Biólogo	Áreas Protegidas e Fauna Silvestre
Karime Dawidziak Piazzetta	MSc. Tecnóloga em Processos Ambientais	Atmosfera
Luis Eduardo Soares Mayer	Geógrafo	Atmosfera

EQUIPE DE CAMPO

Rômulo Henrique Santos Correa	Técnico em hidrologia	Águas Superficiais, Sedimentos e Macroinvertebrados aquáticos
Fernando Figueiredo Laabs	Técnico em hidrologia	Águas Superficiais e Sedimentos
Adilson José de Lara	Hidrometrista	Águas Superficiais e Sedimentos
Edson Haruo Yoshizumi	Técnico	Águas Superficiais e Sedimentos
Fernando Gonçalves Opalinski	Técnico em eletrônica	Águas Superficiais e Sedimentos
Rafael Santos	Biotecnólogo	Águas Superficiais e Sedimentos
Jéssica Cristina Lozovei	Geógrafa	Águas Superficiais e Sedimentos
Adriano Hauer	Esp. Biólogo	Ictiofauna
Roger Henrique Dalcin	MSc. Biólogo	Ictiofauna
Bruno Nadalin Lima de Melo	Biólogo	Ictiofauna
Thiago Toniolo Batista	Biólogo	Ictiofauna
Bruno Kazuo Nakagawa	MSc. Biólogo	Ictiofauna
Giuliano Menegale Martinazzo	Biólogo	Ictiofauna
Helen Sadauskas Henrique	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Matheus Ferreira de Souza	Médico Veterinário	Ecotoxicologia
Sabrina Loise de Moraes Calado	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia

Lygia Sega Nogueira	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Affonso Henrique Nascimento de Souza	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Alex Chavier Silva	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Cleandson Ferreira Santos	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Fabiano de Oliveira Silva	Esp. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Fernanda Vieira da Costa	Dra. Bióloga	Fauna silvestre – entomofauna
Flávio Siqueira de Castro	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Lucas Neves Perillo	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – entomofauna
Tandara de Souza Gomes	Bióloga	Fauna silvestre – entomofauna
Arthur Schramm de Oliveira	Esp. Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Bernardo Franco da Veiga Teixeira	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Cyro de Sousa Bernardes	Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Guilherme Bard Adams	Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Martin Schossler	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – herpetofauna
Dalila de Fátima Ferreira	Bióloga	Fauna silvestre – avifauna
João Antônio de Bittencourt Vitto	Biólogo	Fauna silvestre – avifauna
João Paulo Gava Just	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – avifauna
Willian Menq dos Santos	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – avifauna
Ariel Guilherme Santos do Nascimento	Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Isteliene Lopes Leodoro	Bióloga	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Lizandra Regina Bigai	Bióloga	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Max Antonioni da Silva	Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Ruan Márcio Ruas Nunes	Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Vinicius Peron de Oliveira Gasparotto	MSc. Médico Veterinário	Fauna silvestre – mastofauna de pequeno porte
Diego Afonso Silva	MSc. Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de grande porte
Mattheus Torrezani Silveira	Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de grande porte
Paula Beatriz Mangini	Dra. Médica Veterinária	Fauna silvestre – mastofauna de grande porte
Ricardo Krul	Dr. Biólogo	Fauna silvestre – mastofauna de grande porte
Bruna da Silva Fonseca	Dra. Bióloga	Fauna silvestre – quiropteroфаuna
Cristina Jaques da Cunha	MSc. Bióloga	Fauna silvestre – quiropteroфаuna
Danielle de Oliveira Moreira	Dra. Bióloga	Fauna silvestre – quiropteroфаuna

Paula Modenesi Ferreira	Bióloga	Fauna silvestre – quiroptero fauna
Thali Leal Sampaio	MSc. Médica Veterinária	Fauna silvestre – quiroptero fauna
Ana Lúcia Cypriano Souza	Dra. Bióloga	Cetáceos
Aline Figueredo Dassoler	Msc. Bióloga	Cetáceos
Clarêncio Gomes Baracho	MSc. Biólogo	Cetáceos
Daniela Pitol	Bióloga	Cetáceos
Denis Alessandro Hille	Biólogo	Cetáceos
Matheus Caiafa Ribeiro de Lima	Oceanógrafo	Cetáceos
ESTAGIÁRIOS		
Bruno Nadalin Lima de Melo	Ciências Biológicas	Áreas Protegidas e Fauna Silvestre
Matheus de Andrade Machado	Engenharia Cartográfica e de Agrimensura	Geoprocessamento
Eliana Vieira de Freitas	Engenharia Cartográfica e de Agrimensura	Geoprocessamento
Janiny Zanda Soares da Silva	Engenharia Cartográfica e de Agrimensura	Geoprocessamento
Laura Damasceno da Silva	História	Patrimônio Arqueológico
Sabrina Lisboa Alves	História	Patrimônio Arqueológico
Milena Machado Sachi	Química	Química Ambiental e Integração dos Danos
Bruna Bergman Machado	Ciências Biológicas	Cetáceos
Marina Ferraz Sampaio	Ciências Biológicas	Fauna Silvestre
Emerson Fernando Garcia Machado	Biólogo	Ictiofauna – diversidade genética
Saymon Hamses Monastier	Engenharia Florestal	Flora
Gabriela Naomi Tanaka dos Santos	Ciências Biológicas	Zooplâncton
Phillip Alves Schuster	Ciências Biológicas	Macroinvertebrados bentônicos
Antônio José Hamerschmidt	Estatística	Águas Superficiais Continentais
Eduarda Bertoletti Duarte	Ciências Biológicas	Águas Superficiais Continentais
Mirian Kaori Nagano	Geografia	Qualidade de Sedimentos Continentais
Julia Ribeirete de Souza Ferreira	Engenharia Civil	Resíduos Sólidos
Beatriz Tomaselli	Engenharia Ambiental	Serviços Ecossistêmicos
Maria Fernanda Dames dos Santos Lima	Engenharia Ambiental	Solos
Tamires Maiara Ercole	Agronomia	Solos
Bruno Cesar Falkievicz	Engenharia Florestal	Flora
Rebeca Dias Pegollo	Ciências Biológicas	Fauna Aquática
Fernanda Araujo Fernandes	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Carlos Denilson Soares	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia

Fellip Rodrigues Marcondes	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Yasmim Cristine Brunholo Carvalho	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Carolina Valério Leme	Engenharia Ambiental	Ecotoxicologia
Gisele Tatiane Soares da Veiga	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Luiz Guilherme Tatsh Henrique	Engenharia Ambiental	Ecotoxicologia
Mayara dos Santos Rodrigues	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Rafaela Cruz Dias	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Divisão por compartimentos adotada no diagnóstico. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020b).	43
Figura 2 – Localização da Área de Estudo para avaliação de resíduos sólidos. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	46
Figura 3 – Área de passagem e deposição da lama atualizada (APDL 2016) realizada com base na modelagem, para a região de Colatina-ES até a foz do rio Doce.	48
Figura 4 – Imagem de sensoriamento remoto com a especificação da área da APDL e da Supressão vegetal no período pré-desastre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	50
Figura 5 – Imagem de sensoriamento remoto com a especificação da área da APDL e da Supressão vegetal no período pós-desastre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	50
Figura 6 – Edificações atingidas no município de Mariana/MG (Pré-desastre).	52
Figura 7 – Edificações atingidas no município de Mariana/MG (Pós-desastre).	53
Figura 8 – Edificações atingidas no município de Barra Longa (Pré-desastre).	53
Figura 9 – Edificações atingidas no município de Barra Longa (Pós-desastre).	54
Figura 10 – Imagem T0 Centro de Exposições de Barra Longa e Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	60
Figura 11 – Imagem T2 Centro de Exposições de Barra Longa e Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	61
Figura 12 – Imagem T5 Centro de Exposições de Barra Longa e Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	61
Figura 13 – Imagem T0 Campo de Futebol Esporte Clube Barralenguense e Praça Manoel Limo Mol. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	62
Figura 14 – Imagem T2 Campo de Futebol Esporte Clube Barralenguense e Praça Manoel Limo Mol. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	62
Figura 15 – Imagem T4 Campo de Futebol Esporte Clube Barralenguense e Praça Manoel Limo Mol. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	63
Figura 16 – Imagem após T5 Centro de Exposições de Barra Longa e Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários.	64
Figura 17 – Imagem após T5 Campo de Futebol Esporte Clube Barralenguense e Praça Manoel Limo Mol.	64
Figura 18 – Imagem T0 Aterro Fazenda Vista Alegre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	65
Figura 19 – Imagem T2 Aterro Fazenda Vista Alegre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	66
Figura 20 – Imagem T5 Aterro Fazenda Vista Alegre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	66
Figura 21 – Imagem após T5 Aterro Fazenda Vista Alegre.	67
Figura 22 – Localização dos setores utilizados para disposição dos rejeitos (Setores 1 ao 6). Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	68

Figura 23 – Localização dos setores utilizados para disposição dos rejeitos (Setor 8). Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	68
Figura 24 – Imagem T0 Setor 4 e 5 e Ecobags. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	70
Figura 25 – Imagem T2 Setor 4 e 5 e Ecobags. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	70
Figura 26 – Imagem T4 Setor 4 e 5 e Ecobags. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).	71
Figura 27 – Imagem após T5 Setor 4 e 5 e Ecobags.	71
Figura 28 – Imagem após T5 Setor 8.	72
Figura 29 – Registros de manchas de inundação do rio Doce na porção extracalha (Compartimento 2). Fotos: Lactec (2019).	75
Figura 30 – Locais de coleta de solos em áreas afetadas e controle no Compartimento 2 (L1 a L3).	76
Figura 31 – Locais de coleta de solos em áreas afetadas e controle no Compartimento 2 (L4 a L16).	77
Figura 32 – Locais de coleta de solos em áreas afetadas e controle no Compartimento 2 (L15 a L17).	77
Figura 33 – Locais de coleta de solos em áreas afetadas e controle nos Compartimentos 3 e 4 (L18 a L23).	78
Figura 34 – Coleta da pastagem em áreas dentro e fora das manchas de inundação. Foto: Lactec (2019).	79
Figura 35 – Coleta de solo e planta em áreas dentro e fora das manchas de inundação sob cultivo de cacau. Foto: Lactec (2020).	80
Figura 36 – Material coletado em Governador Valadares (MG), em decorrência das inundações ocorridas nos meses de janeiro e fevereiro de 2020, para utilização no experimento. Fotos: BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).	84
Figura 37 – Vasos organizados para início do experimento na casa de vegetação e amostras das águas de irrigação para envio ao laboratório. Fotos: Lactec (2020).	85
Figura 38 – Diagrama exemplificando a criação de escores que separam os tratamentos em grupos de acordo com as médias de postos.	88
Figura 39 – Difratoograma de raios X da amostra L1 (afetada) em comparação à amostra L1 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	92
Figura 40 – Difratoograma de raios X da amostra L2 (afetada) em comparação à amostra L2 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	93
Figura 41 – Difratoograma de raios X da amostra L3 (afetada) em comparação à amostra L3 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	94
Figura 42 – Difratoograma de raios X da amostra L4 (afetada) em comparação à amostra L4 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).	95
Figura 43 – Difratoograma de raios X da amostra L5 (afetada) em comparação à amostra L5 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).	96
Figura 44 – Difratoograma de raios X da amostra L6 (afetada) em comparação à amostra L6 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	97
Figura 45 – Difratoograma de raios X da amostra L7 (afetada) em comparação à amostra L7 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).	98

Figura 46 – Difratoograma de raios X da amostra L8 (afetada) em comparação à amostra L8 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).	99
Figura 47 – Difratoograma de raios X da amostra L9 (afetada) em comparação à amostra L9 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).	100
Figura 48 – Difratoograma de raios X da amostra L10 (afetada) em comparação à amostra L10 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	101
Figura 49 – Difratoograma de raios X da amostra L11 (afetada) em comparação à amostra L11 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	102
Figura 50 – Difratoograma de raios X da amostra L12 (afetada) em comparação à amostra L12 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	103
Figura 51 – Difratoograma de raios X da amostra L13 (afetada) em comparação à amostra L13 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	104
Figura 52 – Difratoograma de raios X da amostra L14 (afetada) em comparação à amostra L14 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	105
Figura 53 – Difratoograma de raios X da amostra L15 (afetada) em comparação à amostra L15 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	106
Figura 54 – Difratoograma de raios X da amostra L16 (afetada) em comparação à amostra L16 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	107
Figura 55 – Difratoograma de raios X da amostra L18 (afetada) em comparação à amostra L18 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	108
Figura 56 – Difratoograma de raios X da amostra L19 (afetada) em comparação à amostra L19 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	109
Figura 57 – Difratoograma de raios X da amostra L20 (afetada) em comparação à amostra L20 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	110
Figura 58 – Difratoograma de raios X da amostra L21 (afetada) em comparação à amostra L21 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	111
Figura 59 – Difratoograma de raios X da amostra L22 (afetada) em comparação à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)). O local 22 não apresenta área controle.	112
Figura 60 – Difratoograma de raios X da amostra L23 (afetada) em comparação à amostra L23 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).	113
Figura 61 – Distribuição granulométrica: areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C) e argila (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.	115
Figura 62 – Distribuição granulométrica: silte(A); e densidade de partículas (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.	116
Figura 63 – Distribuição granulométrica: areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C) e argila (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.	117
Figura 64 – Distribuição granulométrica: silte(A); e densidade de partículas (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.	118

Figura 65 – Teores de carbono orgânico de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 2 (A) e 3 e 4 (B).	118
Figura 66 – Valores de pH em água (A), pH em CaCl_2 0,01 mol L ⁻¹ (B), teores de alumínio trocável (C) e saturação por alumínio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.	120
Figura 67 – Valores de pH em água (A), pH em CaCl_2 0,01 mol L ⁻¹ (B), teores de alumínio trocável (C) e saturação por alumínio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.	121
Figura 68 – Teores de cálcio (A), magnésio (B), relação cálcio:magnésio (C) e teores de potássio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2....	123
Figura 69 – Teores de cálcio (A), magnésio (B), relação cálcio:magnésio (C) e teores de potássio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.	124
Figura 70 – Soma de bases (A), acidez potencial (B), capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (C) e CTC potencial (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.	125
Figura 71 – Soma de bases (A), acidez potencial (B), capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (C) e CTC potencial (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.....	126
Figura 72 – Saturação por bases (A), teores de P disponível (B), teores de ferro disponível (C) e manganês disponível (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.	128
Figura 73 – Saturação de bases (A), teores de P disponível (B), teores de ferro disponível (C) e manganês disponível (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.	129
Figura 74 – Teores de cobre disponível (A) e zinco disponível (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.	130
Figura 75 – Teores de cobre disponível (A) e zinco disponível (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.	130
Figura 76 – Teores de cálcio e magnésio na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	132
Figura 77 – Teores de potássio e fósforo na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	133
Figura 78 – Teores de sódio e enxofre na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	135
Figura 79 – <i>Heatmap</i> para os teores de Ca, S, P, Mg, K e Na dos tecidos vegetais analisados no experimento de casa de vegetação. Cores iguais (em cada linha) indicam que os tratamentos pertencem ao mesmo grupo e não diferem entre si.	137
Figura 80 – Teores de nutrientes quantificados no tecido vegetal da alface (<i>Lactuca sativa</i>) cultivada no experimento.....	139

Figura 81 – Teores de nutrientes quantificados no tecido foliar da beterraba (<i>Beta vulgaris</i>) cultivada no experimento.....	140
Figura 82 – Teores de nutrientes quantificados na raiz tuberosa da beterraba (<i>Beta vulgaris</i>) cultivada no experimento.....	141
Figura 83 – Teores de nutrientes quantificados no tecido vegetal do feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i>) cultivado no experimento.	142
Figura 84 – Teores de nutrientes quantificados no tecido vegetal do milho (<i>Zea mays</i> L.) cultivado no experimento.....	143
Figura 85 – Teores de nutrientes quantificados no tecido foliar do morangueiro (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) cultivado no experimento.....	144
Figura 86 – Teores de nutrientes quantificados nas infrutescências do morangueiro (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) cultivado no experimento.	145
Figura 87 – Massa fresca e massa seca produzida pelas culturas da alface e beterraba no experimento de casa de vegetação.	147
Figura 88 – Massa fresca e massa seca produzida pelas culturas do milho e feijão no experimento de casa de vegetação.	148
Figura 89 – Massa fresca e massa seca produzida pela cultura do morango no experimento de casa de vegetação.	149
Figura 90 – Fotos do experimento (alface). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6; D: água com rejeito, T2, T4 e T6.	150
Figura 91 – Fotos do experimento (alface). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.....	150
Figura 92 – Fotos do experimento (beterraba). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6; D: água com rejeito, T2, T4 e T6.....	151
Figura 93 – Fotos do experimento (beterraba). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.	152
Figura 94 – Fotos do experimento (milho). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6; D: água com rejeito, T2, T4 e T6.	152
Figura 95 – Fotos do experimento (milho). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.....	153
Figura 96 – Fotos do experimento (feijão). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6 D: água com rejeito, T2, T4 e T6.	153
Figura 97 – Fotos do experimento (feijão). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.....	154

Figura 98 - Fotos do experimento (morango). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6; D: água com rejeito, T2, T4 e T6.....	155
Figura 99 – Fotos do experimento (morango). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.	156
Figura 100 – Conteúdo de nutrientes extraídos pela alface (<i>Lactuca sativa</i>) cultivada no experimento.....	158
Figura 101 – Conteúdo de nutrientes extraídos pelas folhas da beterraba (<i>Beta vulgaris</i>) cultivada no experimento.....	159
Figura 102 – Conteúdo de nutrientes extraídos pela raiz tuberosa da beterraba (<i>Beta vulgaris</i>) cultivada no experimento.	160
Figura 103 – Conteúdo de nutrientes extraídos pelo feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i>) cultivado no experimento.....	161
Figura 104 – Conteúdo de nutrientes extraídos pelo milho (<i>Zea mays</i> L.) cultivado no experimento.....	162
Figura 105 – Conteúdo de nutrientes extraídos pela parte aérea do morangueiro (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) cultivado no experimento.....	163
Figura 106 – Conteúdo de nutrientes extraídos pelas infrutescências do morangueiro (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) cultivado no experimento.	164
Figura 107 – <i>Heatmap</i> para os parâmetros de rotina de fertilidade do solo analisados nos substratos dos vasos ao final do experimento de casa de vegetação. Cores iguais (em cada linha) indicam que os tratamentos pertencem ao mesmo grupo e não diferem entre si.....	166
Figura 108 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos da alface ao final do experimento.....	167
Figura 109 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos da beterraba ao final do experimento.....	168
Figura 110 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos do feijoeiro ao final do experimento.....	169
Figura 111 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos do milho ao final do experimento.....	170
Figura 112 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos do morangueiro ao final do experimento.....	171
Figura 113 – Teores pseudo totais de prata (A), alumínio (B), arsênio (C) e bário de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.....	174
Figura 114 – Teores pseudo totais de alumínio (A), arsênio (B), bário (C) e cádmio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.....	175
Figura 115 – Teores pseudo totais de cádmio (A), cobalto (B), cromo (C) e cobre de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.....	176
Figura 116 – Teores pseudo totais de cobalto (A), cromo (B), cobre (C) e ferro (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.....	177

Figura 117 – Teores pseudo totais de ferro (A), mercúrio (B), manganês (C) e molibdênio de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.....	178
Figura 118 – Teores pseudo totais de mercúrio (A), manganês (B), molibdênio (C) e níquel (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.	179
Figura 119 – Teores pseudo totais de níquel (A), chumbo (B), antimônio (C) e selênio de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.....	180
Figura 120 – Teores pseudo totais de chumbo (A), antimônio (B), selênio (C) e estanho (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.	181
Figura 121 – Teores pseudo totais de estanho (A) e zinco (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2 e de zinco (C) nas amostras dos Compartimentos 3 e 4.....	182
Figura 122 – Fatores de contaminação para EPTs de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2 em comparação com a linha base.	184
Figura 123 – Fatores de contaminação para EPTs de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4 em comparação com a linha base.....	185
Figura 124 – Teores de prata e alumínio na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	187
Figura 125 – Teores de arsênio e bário na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	188
Figura 126 – Teores de cádmio e cobalto na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	189
Figura 127 – Teores de cromo e cobre na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	190
Figura 128 – Teores de ferro e mercúrio na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	191
Figura 129 – Teores de manganês e molibdênio na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	192
Figura 130 – Teores de níquel e chumbo na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	193
Figura 131 – Teores de antimônio e selênio na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	194

Figura 132 – Teores de estanho e zinco na biomassa aérea de pastagens (<i>Poaceae</i>) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.....	195
Figura 133 – <i>Heatmap</i> para os teores de elementos potencialmente tóxicos nos tecidos vegetais de morango, beterraba (folha e tubérculo), milho, feijão, alface e morango (folha e fruto). Cores iguais (em cada linha) indicam que os tratamentos pertencem ao mesmo grupo e não diferem entre si.	199
Figura 134 – Teores de elementos potencialmente tóxicos quantificados no tecido vegetal da alface (<i>Lactuca sativa</i>) cultivada no experimento.....	200
Figura 135 – Teores de elementos potencialmente tóxicos quantificados no tecido foliar da beterraba (<i>Beta vulgaris</i>) cultivada no experimento.....	201
Figura 136 – Teores de elementos potencialmente tóxicos quantificados na raiz tuberosa da beterraba (<i>Beta vulgaris</i>) cultivada no experimento.....	202
Figura 137 – Teores de elementos potencialmente tóxicos quantificados no tecido vegetal do feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i>) cultivado no experimento.....	203
Figura 138 – Teores de elementos potencialmente tóxicos quantificados no tecido vegetal do milho (<i>Zea mays</i> L.) cultivado no experimento.	204
Figura 139 – Teores de elementos potencialmente tóxicos quantificados no tecido foliar do morangueiro (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) cultivado no experimento.....	205
Figura 140 – Teores de elementos potencialmente tóxicos quantificados nas infrutescências do morangueiro (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) cultivado no experimento.....	206
Figura 141 – Sintomas visuais de toxidez de Mn no feijoeiro cultivado no rejeito depositado no Compartimento 1. Da esquerda para direita: identificação do sintoma nas folhas maduras; sintomas em estágio inicial e avançado.	207
Figura 142 – Conteúdo de elementos potencialmente tóxicos extraídos pela alface (<i>Lactuca sativa</i>) cultivada no experimento.	212
Figura 143 – Conteúdo de elementos potencialmente tóxicos extraídos pelas folhas da beterraba (<i>Beta vulgaris</i>) cultivada no experimento.....	213
Figura 144 – Conteúdo de elementos potencialmente tóxicos extraídos pela raiz tuberosa da beterraba (<i>Beta vulgaris</i>) cultivada no experimento.....	214
Figura 145 – Conteúdo de elementos potencialmente tóxicos extraídos pelo feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i>) cultivado no experimento.....	215
Figura 146 – Conteúdo de elementos potencialmente tóxicos extraídos pelo milho (<i>Zea mays</i> L.) cultivado no experimento.	216
Figura 147 – Conteúdo de elementos potencialmente tóxicos extraídos pela parte aérea do morangueiro (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) cultivado no experimento.....	217
Figura 148 – Conteúdo de elementos potencialmente tóxicos extraídos pelas infrutescências do morangueiro (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) cultivado no experimento.....	218
Figura 149 – <i>Heatmap</i> para os teores pseudo totais de elementos potencialmente tóxicos analisados nos substratos dos vasos ao final do experimento de casa de vegetação. Cores iguais (em cada linha) indicam que os tratamentos pertencem ao mesmo grupo e não diferem entre si.....	219

Figura 150 – Teores pseudo totais de elementos potencialmente tóxicos nos substratos dos vasos da alface ao final do experimento.	220
Figura 151 – Teores pseudo totais de elementos potencialmente tóxicos nos substratos dos vasos da beterraba ao final do experimento.	221
Figura 152 – Teores pseudo totais de elementos potencialmente tóxicos nos substratos dos vasos do feijoeiro ao final do experimento.....	222
Figura 153 – Teores pseudo totais de elementos potencialmente tóxicos nos substratos dos vasos do milho ao final do experimento.	223
Figura 154 – Teores pseudo totais de elementos potencialmente tóxicos nos substratos dos vasos do morangueiro ao final do experimento.	224
Figura 155 – Limites geográficos para interpretação dos danos à fauna terrestre no Compartimento 1.....	243
Figura 156 – Limites geográficos para interpretação dos danos à fauna terrestre nos Compartimentos 2 e 3.....	244
Figura 157 – Comparação da prevalência da carga de ectoparasitos entre os sítios amostrais, Controle e Tratamento, no Compartimento 2.	247
Figura 158 – Variação na área florestal (em hectares) no Compartimento 1 nos cenários pré-desastre (T0), pós-desastre (T1), e nos cenários futuros sem mitigação (T2a) e com mitigação (T2b). ..	249
Figura 159 – Resultados da análise de perda de área funcionalmente conectada para a fauna. O eixo vertical indica área funcionalmente conectada média no Compartimento 1 em função de diferentes capacidades de dispersão (eixo horizontal).	250
Figura 160 – Área funcionalmente conectada média dos fragmentos funcionais que cruzam o Compartimento 1 (esquerda) e em cada um dos três subcompartimentos do Compartimento 1 (direita), para os quatro cenários de modelagem. Essa média foi calculada somente para os organismos com capacidade de dispersão menor que 300m.....	250
Figura 161 – Resultados da modelagem de corredores ecológicos para dez espécies da fauna. Em cada quadro ilustram-se mapas com o índice de frequência de seleção de rotas (RSFI), com as cores correspondentes ao número de corredores que cruzaram cada pixel (acima); e valores dos índices de linearidade e conectividade funcional médio para cada espécie (abaixo), nos quatro cenários de modelagem.	251
Figura 162 – Mapas ilustrativos da comparação de adequabilidade ambiental das sete espécies indicadoras no Compartimento 1. Células mais escuras indicam locais cuja adequabilidade ambiental não se recupera entre os cenários futuros (T2a e T2b) e o pré-desastre (T0).	253
Figura 163 – Compartimento 1, indicando a distribuição de perdas e ganhos de espécies (esquerda) e diferença de riqueza de espécies vegetais (direita) entre os cenários T1 (pós-desastre), T2a (regeneração natural) e T2b (regeneração e restauração) em relação a T0 (pré-desastre).....	259
Figura 164 – Compartimento 1, indicando a distribuição de perdas e ganhos de espécies da fauna entre os cenários T1 (pós-desastre), T2a (regeneração natural) e T2b (regeneração e restauração) em relação a T0 (pré-desastre).	263
Figura 165 – Diferença da diversidade beta de avifauna das campanhas em relação à campanha 1 em cada Unidade Amostral (UA) presente nos Compartimentos 1, 2 e 3 da Bacia do rio Doce.	266

Figura 166 – Diferença da diversidade beta de grandes mamíferos da mastofauna das campanhas em relação à campanha 1 em cada Unidade Amostral (UA) presente nos Compartimentos 1, 2 e 3 da Bacia do rio Doce.....	266
Figura 167 – Localização das estações de monitoramento da qualidade do ar instaladas pela Fundação Renova e operadas pela Ecosoft nos municípios de Mariana, Barra Longa e Rio Doce.	287
Figura 168 – Estação de monitoramento da qualidade do ar Santana do Deserto, localizada no município de Rio Doce – MG. Fonte: Fundação Renova.	287
Figura 169 – Perfil da precipitação acumulada mensalmente nos anos de 2016 a 2019 na estação Barra Longa Centro.	290
Figura 170 – Perfil da média horária da temperatura ambiente nos anos de 2016 a 2019 na estação Barra Longa Centro.	290
Figura 171 – Perfil da média horária da umidade relativa do ar nos anos de 2016 a 2019 na estação Barra Longa Centro.	291
Figura 172 – Rosa dos ventos para o período de 2016 a 2019 na Estação Barra Longa Centro, indicando a predominância dos ventos que chegaram à estação.....	291
Figura 173 – Distribuição de frequência dos ventos para o período de 2016 a 2019 na Estação Barra Longa Centro.	292
Figura 174 – Projeção no Google Earth da rosa dos ventos para o período de 2016 a 2019 na Estação Barra Longa Centro, indicando a predominância dos ventos que chegaram à estação.....	292
Figura 175 – Rosa dos ventos para o período de 2017 a 2019 na Estação Barra Longa Volta da Capela, indicando a predominância dos ventos que chegaram à estação.....	293
Figura 176 – Distribuição de frequência dos ventos para o período de 2017 a 2019 na Estação Barra Longa Volta da Capela.....	293
Figura 177 – Projeção no Google Earth da rosa dos ventos para o período de 2017 a 2019 na Estação Barra Longa Volta da Capela, indicando a predominância dos ventos que chegaram à estação.	294
Figura 178 – Análise dos dados obtidos para partículas totais em suspensão (PTS) na estação Barra Longa Centro nos anos de 2016 a 2019. A. Variação média diária. B. Concentração diária média mensal. C. Concentração mínima média mensal. D. Concentração máxima média mensal.	295
Figura 179 – Avaliação das violações da média diária e da máxima média horária do dia obtidos para as partículas totais em suspensão (PTS) na estação Barra Longa Centro em relação aos padrões estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 003/1990 (BRASIL, 1990) e CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).	296
Figura 180 – Índice de Qualidade do Ar (IQA _r) calculado para os dados obtidos para as partículas totais em suspensão (PTS) na estação Barra Longa Centro, nos anos de 2016 a 2019. Nos gráficos A, C, E e G o IQA _r foi calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990). Nos gráficos B, D, F e H o IQA _r foi calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).	297
Figura 181 – Análise dos dados obtidos para as partículas inaláveis (PM ₁₀) na estação Barra Longa Centro nos anos de 2016 a 2019. A. Variação média diária; B. Concentração média mensal; C. Concentração mínima média mensal; e D. Concentração máxima média mensal.....	298

- Figura 182** – Avaliação das violações da média diária (A) e da máxima média horária do dia (B) obtidos para as partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Barra Longa Centro em relação aos padrões estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 003/1990 (BRASIL, 1990) (C) e CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018) (A e B).....300
- Figura 183** – Índice de Qualidade do Ar (IQAr) calculado para os dados obtidos para partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Barra Longa Centro nos anos de 2016 a 2019. Nos gráficos A, C, E e G o IQAr foi calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990). Nos gráficos B, D, F e H o IQAr foi calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018). 301
- Figura 184** – Análise dos dados obtidos para partículas respiráveis ($PM_{2,5}$) na estação Barra Longa Centro nos anos de 2016 a 2019. A. Variação média diária; B. Concentração média mensal; C. Concentração mínima média mensal; D. Concentração máxima média mensal.302
- Figura 185** – Avaliação das violações da média diária (A) e da máxima média horária do dia (B) obtidos para as partículas respiráveis ($PM_{2,5}$) na estação Barra Longa Centro em relação aos padrões estabelecidos pela resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).303
- Figura 186** – Índice de Qualidade do Ar (IQAr) calculado para os dados obtidos para as partículas respiráveis ($PM_{2,5}$) na estação Barra Longa Centro nos anos de 2016 a 2019, de acordo com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).303
- Figura 187** – Análise dos dados obtidos para partículas totais em suspensão (PTS) na estação Barra Longa Volta da Capela nos anos de 2017 a 2019. A. Variação média diária; B. Concentração média mensal; C. Concentração mínima média mensal; e D. Concentração máxima média mensal.....305
- Figura 188** – Avaliação das violações da média diária (A) e da máxima média horária do dia (B) a partir dos resultados das partículas totais em suspensão (PTS) na estação Barra Longa Volta da Capela em relação aos padrões estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990) e CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).306
- Figura 189** – Índice de Qualidade do Ar (IQAr) calculado para os dados obtidos para as partículas totais em suspensão (PTS) na estação Barra Longa Volta da Capela nos anos de 2017 a 2019. Os gráficos A, C e E foram obtidos a partir do IQAr calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 003/1990 (BRASIL, 1990). Nos gráficos B, D e F o IQAr foi calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).307
- Figura 190** – Análise dos dados obtidos para partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Barra Longa Volta da Capela nos anos de 2017 a 2019. A. Variação média diária; B. Concentração média mensal; C. Concentração mínima média mensal; e D. Concentração máxima média mensal.....308
- Figura 191** – Avaliação das violações da média diária (A) e da máxima média horária do dia (B) obtidos para as partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Barra Longa Volta da Capela em relação aos padrões estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990) (C) e CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018) (A e B).....310
- Figura 192** – Índice de Qualidade do Ar (IQAr) calculado para os dados obtidos para partículas respiráveis (PM_{10}) na estação Barra Longa Volta da Capela nos anos de 2017 a 2019. Em A, C e E o IQAr foi calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990); em B, D e F o IQAr foi calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018). ..311
- Figura 193** – Análise dos dados obtidos para partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Paracatu nos anos de 2018 e 2019. A. Variação média diária; B. Concentração média mensal; C. Concentração mínima média mensal; e D. Concentração máxima média mensal.....312

Figura 194 – Avaliação das violações da média diária (A) e da máxima média horária do dia (B) obtidos para as partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Paracatu em relação aos padrões estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 003/1990 (BRASIL, 1990) (C) e CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018) (A e B).	314
Figura 195 – Índice de Qualidade do Ar (IQA _r) calculado para os dados obtidos para partículas respiráveis (PM_{10}) na estação Paracatu nos anos de 2018 e 2019. A e C. IQA _r calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990). B e D. IQA _r calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).	315
Figura 196 – Análise dos dados obtidos para partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Gesteira nos anos de 2018 e 2019. A. Variação média diária; B. Concentração média mensal; C. Concentração mínima média mensal; e D. Concentração máxima média mensal.	316
Figura 197 – Avaliação das violações da média diária (A) e da máxima média horária do dia (B) obtidos para as partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Gesteira em relação aos padrões estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990) (C) e CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018) (A e B).	317
Figura 198 – Índice de Qualidade do Ar (IQA _r) calculado para os dados obtidos para partículas respiráveis (PM_{10}) na estação Gesteira nos anos de 2018 e 2019. A e C IQA _r calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990). B e D IQA _r calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).	318
Figura 199 – Análise dos dados obtidos para partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Santana do Deserto no ano de 2019. A. Variação média diária; e B. Concentração média mensal, concentração mínima média mensal e concentração máxima média mensal.	318
Figura 200 – Avaliação das violações da média diária (A) e da máxima média horária do dia (B) obtidos para as partículas inaláveis (PM_{10}) na estação Santana do Deserto em relação aos padrões estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990) (C) e CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018) (A e B).	320
Figura 201 – Índice de Qualidade do Ar (IQA _r) calculado para os dados obtidos para partículas respiráveis (PM_{10}) na estação Santana do Deserto no ano de 2019. A. IQA _r calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 03/1990 (BRASIL, 1990); e B. IQA _r calculado de acordo com a Resolução CONAMA nº 491/2018 (BRASIL, 2018).	321
Figura 202 – Micrografias de amostras de PM_{10} obtidas na estação Barra Longa Centro em período inicial de operação da estação.	323
Figura 203 – Micrografias de amostras de PM_{10} obtidas na estação Barra Longa Centro em período recente de operação da estação.	323
Figura 204 – Micrografias de amostras de $PM_{2,5}$ obtidas na estação Barra Longa Centro em período inicial de operação da estação.	323
Figura 205 – Micrografias de amostras de $PM_{2,5}$ obtidas na estação Barra Longa Centro em período recente de operação da estação.	323
Figura 206 – Micrografias de amostras de PTS obtidas na estação Barra Longa Centro em período inicial de operação da estação.	324
Figura 207 – Micrografias de amostras de PTS obtidas na estação Barra Longa Centro em período recente de operação da estação.	324
Figura 208 – Micrografias de amostras de PM_{10} obtidas na estação Barra Longa Volta da Capela em período inicial de operação da estação.	324

Figura 209 – Micrografias de amostras de PM_{10} obtidas na estação Barra Longa Volta da Capela em período recente de operação da estação.	324
Figura 210 – Micrografias de amostras de PTS obtidas na estação Barra Longa Volta da Capela em período inicial de operação da estação.	325
Figura 211 – Micrografias de amostras de PTS obtidas na estação Barra Longa Volta da Capela em período recente de operação da estação.	325
Figura 212 – Micrografias de amostras de PM_{10} obtidas na estação Paracatu em período recente de operação da estação.	325
Figura 213 – Micrografias de amostras de PM_{10} obtidas na estação Gesteira em período inicial de operação da estação.	325
Figura 214 – Micrografias de amostras de PM_{10} obtidas na estação Gesteira em período recente de operação da estação.	326
Figura 215 – Gráfico do tipo boxplot com a variação da porcentagem dos elementos identificados nas amostras de partículas totais em suspensão, amostradas nas estações Barra Longa Centro (BLC) e Barra Longa Volta da Capela (BLVC), em dois períodos distintos de monitoramento, início e recente.	327
Figura 216 – Gráfico do tipo boxplot com a variação da porcentagem dos elementos identificados nas amostras de partículas totais em suspensão, amostradas nas estações Barra Longa Centro (BLC) e Barra Longa Volta da Capela (BLVC), em dois períodos distintos de monitoramento, início e recente.	328
Figura 217 – Gráfico do tipo boxplot com a variação da porcentagem dos elementos identificados nas amostras de partículas inaláveis (PM_{10}), amostradas nas estações Barra Longa Centro (BLC), Barra Longa Volta da Capela (BLVC), Gesteira (GES) e Paracatu (PAR), em dois períodos distintos de monitoramento, início e recente.	329
Figura 218 – Gráfico do tipo boxplot com a variação da porcentagem dos elementos identificados nas amostras de partículas inaláveis (PM_{10}), amostradas nas estações Barra Longa Centro (BLC), Barra Longa Volta da Capela (BLVC), Gesteira (GES) e Paracatu (PAR), em dois períodos distintos de monitoramento, início e recente.	330
Figura 219 – Gráfico do tipo boxplot com a variação da porcentagem dos elementos identificados nas amostras de partículas respiráveis ($PM_{2,5}$), amostradas na estação Barra Longa Centro (BLC), em dois períodos distintos de monitoramento, início e recente.	331
Figura 220 – Gráfico do tipo boxplot com a variação da porcentagem dos elementos identificados nas amostras de partículas respiráveis ($PM_{2,5}$), amostradas na estação Barra Longa Centro (BLC), em dois períodos distintos de monitoramento, início e recente.	332
Figura 221 – Resumo gráfico dos danos ambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão ao ambiente terrestre e à atmosfera.	345

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantitativos dos processos minerários atingidos pela lama de rejeito separado pelas respectivas fases com base na APDL de 2016.	49
Tabela 2 – Quantitativos dos processos minerários atingidos pela lama de rejeito separado pelas respectivas substâncias, com base na nova área da APDL.....	49
Tabela 3 – Área de supressão vegetal.	51
Tabela 4 – Estimativa do volume de madeira suprimida e intervalo de confiança para o volume total de madeira suprimido.	51
Tabela 5 - Cálculo da área das edificações atingidas na APDL.	55
Tabela 6 – Cálculo da área das edificações atingidas complementares na APDL.....	55
Tabela 7 – Cálculo da área total das edificações atingidas na APDL.	55
Tabela 8 – Volume de material utilizado para a construção de casa padrão Normal R1 NBR 12721....	56
Tabela 9 – Levantamento da quantidade de RCD esperados para a reconstrução dos municípios estudados.....	57
Tabela 10 – Levantamento estimado do volume de RCD esperado para a reconstrução dos municípios estudados.....	58
Tabela 11 - Estimativa das áreas de remoção e disposição de resíduos sólidos.	59
Tabela 12 – Informações sobre os Setores de disposição de rejeito dragado.	69
Tabela 13 – Linha base para os solos dos Compartimentos 2, 3 e 4, representando a camada 0-40 cm. Fonte: Benedetti et al. (2008); FEAM (2010); Pacheco (2015).....	82
Tabela 14 – Composição da solução nutritiva aplicada aos vasos do tratamento com adição de nutrientes (T2, T4 e T6).	86
Tabela 15 – Teores dissolvidos e totais de elementos potencialmente tóxicos nas diferentes águas de irrigação utilizadas no experimento.....	209
Tabela 16 – Porcentagem de ingestão dos limites diários permitidos de EPTs no cenário de consumo de alface, beterraba (tubérculo e folha) e morango no meio rural (IBGE, 2011; 2020).....	227
Tabela 17 – Porcentagem de ingestão dos limites diários permitidos de EPTs no cenário de aquisição de alface, beterraba (tubérculo e folha) e morango no meio rural (IBGE, 2011; 2020).....	229
Tabela 18 – Porcentagem de ingestão dos limites diários permitidos de EPTs no cenário de aquisição de alface, beterraba (tubérculo e folha) e morango em Minas Gerais (IBGE, 2011; 2020).	231
Tabela 19 – Quantidades (kg) de alface, beterraba (tubérculo e folha) e morango máximos para atingir os limites diários permitidos de ingestão de elementos potencialmente tóxicos.	233
Tabela 20 – Mensuração dos danos às populações de aves no Compartimento 1 a partir dos resultados das modelagens de ocupação. Os valores de linha-base (Ψ_{LB}) foram obtidos pela probabilidade de ocupação de cada espécie na condição nAPDL; os valores pós-desastre (Ψ_p) foram obtidos pela probabilidade de ocupação de cada espécie na condição APDL, das quais se obtiveram médias simples ($\bar{\Psi}$) para quantificar as probabilidades de ocupação de aves florestais e aves não-florestais. O dano é mensurado pela divisão de Ψ_p por Ψ_{LB}	245

Tabela 21 – Distribuição das lesões observadas em quirópteros, comparando-se os sítios Controle e Tratamento em todos os Compartimentos amostrados, consolidando informações de todas as Unidades Amostrais e das sete campanhas de amostragem.	246
Tabela 22 – Comparação do grau de infestação por ectoparasitos observadas em quirópteros nos três compartimentos do rio Doce entre os dois momentos do diagnóstico. Apresenta-se o número de animais parasitados (N) e a prevalência (PREV.) de cada grau de infestação nos sítios tratamento e controle, consolidando as informações dos três compartimentos. A Soma das prevalências de infestação corresponde ao somatório dos graus Médio, Alto e Altíssimo.	246
Tabela 23 – Modificação percentual do índice de conectividade funcional entre os cenários pré-desastre (T0) pós-desastre (T1) e previsões de recuperação vegetal (T2a e T2b). As mudanças percentuais são em relação ao valor de conectividade funciona.	252
Tabela 24 – Número médio de espécies vegetais por pixel previstas pelas modelagens nos cenários temporais pré-desastre (T0), pós-desastre (T1) e nos cenários futuros (T2a e T2b) na APDL e no Compartimento 1. Os valores entre parênteses referem-se à proporção da riqueza de cada cenário em relação à riqueza em T0.	257
Tabela 25 – Riqueza média de espécies vegetais nas diferentes classes de tamanho dos fragmentos florestais dos três subcompartimentos, nos cenários pré-desastre (T0) e pós-desastre (T1), a proporção da riqueza em T1 em relação à riqueza em T0 (T1/T0); e nos cenários de regeneração natural (T2a) e restauração ativa (T2b). As cores das células nos cenários futuros representam perdas de riqueza (vermelho), ganhos de riqueza (azul) ou riqueza similar (amarelo) em relação ao pré-desastre. As classes destacadas como * referem-se a porções de um grande fragmento que ultrapassa os limites dos respectivos subcompartimentos.	258
Tabela 26 – Número médio de espécies de fauna por pixel previstas pelas modelagens nos cenários temporais pré-desastre (T0), pós-desastre (T1) e nos cenários futuros (T2a e T2b) na APDL e no Compartimento 1. Os valores entre parênteses referem-se à proporção da riqueza em T1, T2a e T2b em relação à riqueza em T0.	261
Tabela 27 – Riqueza média de espécies de fauna nas diferentes classes de tamanho dos fragmentos florestais dos três subcompartimentos, nos cenários pré-desastre (T0) e pós-desastre (T1), e proporção da riqueza em T1 em relação à riqueza em T0 (T1/T0); e nos cenários de regeneração natural (T2a) e restauração ativa (T2b). As cores das células nos cenários futuros representam perdas de riqueza (vermelho), ganhos de riqueza (azul) ou riqueza similar (amarelo) em relação ao pré-desastre. As classes destacadas como * referem-se a porções de um grande fragmento que ultrapassa os limites dos respectivos subcompartimentos.	262
Tabela 28 – Área, em hectares, da APDL atualizada em áreas protegidas.	275
Tabela 29 – Coordenadas UTM e data de início da operação das estações de monitoramento da qualidade do ar instaladas pela Fundação Renova nos municípios de Mariana, Barra Longa e Rio Doce.	286
Tabela 30 – Parâmetros monitorados nas estações de monitoramento da qualidade do ar instaladas pela Fundação Renova nos municípios de Mariana, Barra Longa e Rio Doce.	286
Tabela 31 – Resumo dos parâmetros e dos períodos avaliados em cada estação de monitoramento da qualidade do ar da Fundação Renova pela técnica de microscopia eletrônica de varredura.	288
Tabela 32 – Número de violações aos padrões de qualidade do ar estabelecidos, obtidos pelo monitoramento da Fundação Renova nos anos de 2016 a 2019, para as concentrações de partículas em suspensão.	322

LISTA DE ABREVIATURAS

Ag	- Prata
Al	- Alumínio
As	- Arsênio
Au	- Ouro
B	- Boro
Ba	- Bário
C	- Carbono
Cr	- Cromo
Cu	- Cobre
Cd	- Cádmio
Ce	- Cério
Cél.	- Célula
-CH ₃	- Radical metil
Cl ⁻	- Íon cloreto
cm	- Centímetro
Co	- Cobalto
Cr	- Cromo
Cu	- Cobre
e.g.	- Abreviação em latim que significa 'por exemplo'
etc.	- Et cetera
Fe	- Ferro
FeAsS	- Arsenopirita
FeO(OH)	- Goethita
g	- Grama
Gr	- Grave
Gvs	- Gravíssimo
ha	- Hectares
Hg	- Mercúrio
hm ³	- Hectômetros cúbicos
HNO ₃	- Ácido nítrico
Ind.	- Indivíduo
K ⁺	- Íon potássio
kg	- Quilograma
L	- Litro
La	- Lantânio
m	- Metro
M	- Molar
mA	- Miliampère
mg	- Miligrama
Min.	- Minuto
Mg ²⁺	- Íon magnésio
min	- Minuto
mL	- Mililitro

mm	-	Milímetro
Mn	-	Manganês
MN	-	Micronúcleo
Mo	-	Molibdênio
m/v	-	Massa por volume
µg	-	Micrograma
µl	-	Microlitro
µM	-	micrômetro
N	-	Nitrogênio
Na ⁺	-	Íon sódio
NaCl	-	Cloreto de sódio
NaOH	-	Hidróxido de sódio
Ni	-	Níquel
nM	-	Nanômetro
p.	-	Página
p.ex.	-	Por exemplo
Pb	-	Chumbo
PGr	-	Pouco grave
s	-	Segundos
S	-	Enxofre
sb	-	Antimônio
Se	-	Selênio
sn	-	Estanho
Ti	-	Titânio
U	-	Urânio
V	-	Vanádio
Zn	-	Zinco

LISTA DE SIGLAS

AAC	-	Atividade específica da enzima Anidrase Carbônica
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	-	Anidrase Carbônica (do inglês <i>Carbonic Anhydrase</i>)
ACAS	-	Água Central do Atlântico Sul
AChE	-	Acetilcolinesterase (do inglês <i>Acetylcholinesterase</i>)
ADME	-	Área de Disposição de Material Excedente
AET	-	<i>Apparent Effects Threshold</i>
AF	-	Assimetria Flutuante
AGERH	-	Agência Estadual de Recursos Hídricos
AGV	-	Amostrador de Grandes Volumes
AIQ	-	Armadilhas de Intercepção e Queda
AN	-	Anormalidades Nucleares
ANA	-	Agência Nacional de Águas
ANEs	-	Anormalidades Nucleares Eritrocitárias
ANOSIM	-	<i>Analysis of Similarities</i>
APA	-	Área de Proteção Ambiental
APDL	-	Área de Passagem e Deposição da Lama
APE	-	Áreas de Proteção Especial
APP	-	Áreas de Preservação Permanente
ARI	-	Áreas de Reconhecimento Internacional
ASR	-	Amostragem em Sítio Reprodutivo
AvTD	-	Média da Distinção Taxonômica
BA	-	Bahia
BC	-	Bray-Curtis
BHRD	-	Bacia Hidrográfica do rio Doce
BMWP	-	<i>Biological Monitoring Work Party</i>
C	-	Índice de Dominância de Simpson
CAP	-	Circunferência à Altura do Peito
CAR	-	Cadastro Ambiental Rural
CAT	-	Catalase
CBR	-	Índice de Suporte Califórnia
CC	-	Comprimento da Cauda
CEMAVE	-	Centro Nacional de Pesquisa para a Conservação das Aves Silvestres
CENIBRA	-	Celulose Nipo-Brasileira S.A
CES	-	Corrente Equatorial Sul
CFBio	-	Conselho Federal de Biologia
CIF	-	Comitê Interfederativo
CITES	-	Comércio Internacional de Espécies da Fauna e da Flora Selvagem Ameaçadas de Extinção
CN	-	Controle negativo
CNUC	-	Cadastro Nacional de Unidades de Conservação
CO	-	Carbono Orgânico
COD	-	<i>Crystallography Open Data</i>
COM	-	Cometa

CONAMA	- Conselho Nacional de Meio Ambiente
COT	- Carbono Orgânico Total
COVs	- Compostos Orgânicos Voláteis
CP	- Controle positivo
CPRM	- Serviço Geológico do Brasil
CRC	- Comprimento Rostro-Cloacal
CREA	- Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
CRQ	- Comunidade Remanescente Quilombola
CSS	- Concentração de Sedimentos em Suspensão
CTA	- Capacidade de Troca Aniônica
CTBio	- Câmara Técnica de Biodiversidade
CTC	- Capacidade de Troca Catiônica
CTGRSA	- Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental
CVRD	- Complexo de Água Limpa
DA	- Dentro ou adjacente à APDL
DAP	- Diâmetro a Altura do Peito
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DMSO	- Dimetilsulfóxido ou sulfóxido de dimetilo
DNA	- Ácido desoxirribonucleico (do inglês <i>deoxyribonucleic acid</i>)
DRX	- Difratometria de Raios-X
DV	- Direção do Vento
EDS	- Análise Química Elementar
EDTA	- Ácido etilenodiamino tetra-acético (do inglês <i>ethylenediamine tetraacetic acid</i>)
EET	- Estação Ecológica do Tripuí
EO	- Encontros Ocasionais
(US)EPA	- Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês <i>United States Environmental Protection Agency</i>)
EPTs	- Elementos Potencialmente Tóxicos
ERL	- Faixa de Efeito Baixo
ERM	- Efeito Rangemediano
EROD	- Etóxiresorufina – O – deetilase
EROs	- Espécies Reativas de Oxigênio
ES	- Espírito Santo
ESPTs	- Elementos ou Substâncias Potencialmente Tóxicos
ETA	- Estação de Tratamento de Água
ETR	- Elementos Terras Raras
ETRL	- Elementos Terras Raras leves
ETRP	- Elementos Terras Raras Pesados
F.O.	- Frequência de Ocorrência
FAD	- Flotação a Ar Dissolvido
FBDS	- Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável
FC	- Fator de Contaminação
FD	- Índice de Diversidade Funcional
FE	- Fator de Enriquecimento

FEAM	-	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FES	-	Floresta Estacional Semidecidual
FLONA	-	Floresta Nacional
FMRD	-	Faixa Marginal ao Rio Doce
FURG	-	Universidade Federal de Rio Grande
GLIC	-	Glicose
GLICOG	-	Glicogênio muscular
GLM	-	Modelos Lineares Generalizados
GPx	-	Glutathione Peroxidase
GR	-	Glutathione Redutase
GSH	-	Glutathione reduzida
GST	-	Glutathione S – transferase
H'	-	Índice de Diversidade de Shannon-Weaver
Hb	-	Hemoglobina
HE	-	Hematoxilina-Eosina
HPAs	-	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
HSP	-	Proteína de choque térmico (do inglês <i>heat shock protein</i>)
IAi	-	Índice Alimentar
IBAMA	-	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.
IBR	-	Índice integrado de Respostas de Biomarcadores (do inglês <i>Index of Biomarkers Responses</i>)
IC	-	Intervalo de Confiança
ICMBio	-	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
ICP-MS	-	Espectrometria de massa por plasma acoplado indutivamente (do inglês <i>Inductively coupled plasma Mass Spectrometry</i>)
ICP-OES	-	Espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (do inglês <i>Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry</i>)
IDE-Sisema	-	Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IEDE	-	Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais
IEF	-	Instituto Estadual de Florestas
IEMA	-	Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
IGAM	-	Instituto Mineiro de Gestão de Águas
IM	-	Índice Mitótico
IMR	-	Índice de Massa Relativa
INPE	-	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
INRC	-	Inventário Nacional de Referências Culturais
IPA	-	Índice Pontual de Abundância
IPEMA	-	Instituto de Pesquisas da Mata Atlântica
IPHAN	-	Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional
IQAr	-	Índice de Qualidade do Ar
J	-	Índice de Equabilidade de Pielou
LACT	-	Lactato
LAMIR	-	Laboratório de Análise de Minerais e Rochas
LMP	-	Agarose de baixo ponto de fusão

LQ	-	Limite de Quantificação
MBM	-	Museu Botânico de Curitiba
MBR	-	Minerações Brasileiras Reunidas
MDE	-	Modelo Digital de Elevação
MDT	-	Modelo Digital do Terreno
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
MF	-	Marco Fixo
MG	-	Minas Gerais
MMA	-	Ministério do Meio Ambiente
MMG	-	Mamíferos de Médio e Grande porte
MPF	-	Ministério Público Federal
MPMG	-	Ministério Público de Minas Gerais
MPP	-	Mamíferos de Pequeno Porte
MPVC	-	Policloreto de Vinila Modificado
MT	-	Metalotioneína
NBR	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NDVI	-	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NI	-	Não Identificado
NIST	-	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (do inglês <i>National Institute of Standards and Technology</i>)
NKT	-	Nitrogênio Kjeldahl Total
NMDS	-	Escalonamento Multidimensional não-métrico
NMT	-	Sistema Manual de Injeção de Elastômero
Noc	-	Navio oceanográfico
OD	-	Oxigênio Dissolvido
OMS	-	Organização Mundial da Saúde
OSM	-	Osmolalidade
PA	-	Pará
PAIA	-	Parcelas de Amostragem Integrada de Artrópodes
PALT	-	Procura Aleatória Limitada por Tempo
PASEA	-	Plano de Adequação Socioeconômico e Ambiental
PCB	-	Bifenilas Policloradas
PCH	-	Pequena Central Hidrelétrica
PCO	-	Carbonilação proteica (do inglês <i>Protein Carbonyls or carbonylation</i>)
PE	-	Parque Estadual
PEL	-	Nível de Efeitos Prováveis
PERD	-	Parque Estadual do Rio Doce
PF	-	Padrão Final
PGIRS	-	Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos
pH	-	Potencial Hidrogeniônico
PI	-	Proteção Integral
PI1	-	Padrão Intermediário Fase 1
PL	-	Procura Aleatória Livre
PM	-	Material Particulado

PMN	-	Parque Natural Municipal
PMQACH	-	Programa de Monitoramento da Qualidade da Água para Consumo Humano
PMQQS	-	Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos
PMSAA	-	Programa de Melhoria dos Sistemas de Abastecimento de Água
PMSB	-	Plano Municipal da Saneamento Básico
PN	-	Parque Natural
PNAP	-	Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas
PNRS	-	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	-	Precipitação
PPI	-	Proteína Plasmática
PR	-	Paraná
PRI	-	Polígono de Relações Interiônicas
PRIC	-	Polígono de Relações intercatiônicas
PSLT	-	Procura Sistematizada Limitada por Tempo
PT	-	Proteínas Totais
PTS	-	Partículas Totais em Suspensão
PV	-	Procura com Veículo
QF	-	Quadrilátero Ferrífero
QM	-	Quociente de Mistura de Jentsch
R	-	Riqueza de Margalef
RB	-	Reservas da Biosfera
RBMA	-	Reserva da Biosfera da Mata Atlântica
RBSE	-	Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço
RCC	-	Resíduos de Construção Civil
RCD	-	Resíduos de Construção Civil e Demolição
RDDM	-	Rede Rio Doce Mar
ReBio	-	Reserva Biológica
REVIS	-	Refúgio de Vida Silvestre
RG	-	Radiação
RJ	-	Rio de Janeiro
RL	-	Reservas Legais
rpm	-	Rotações por minuto
RPPN	-	Reserva Particular do Patrimônio Natural
RSCD	-	Resíduos Sólidos de Construção Civil e Demolição
RT	-	Relatório Técnico
SAA	-	Sistema de Abastecimento de Água
SAAE	-	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SABESP	-	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SBH	-	Sociedade Brasileira de Herpetologia
SC	-	Santa Catarina
SCOVs	-	Semi-voláteis
SDT	-	Sólidos Dissolvidos Totais
SEMAD	-	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SGR	-	Sistema Geodésico de Referência

SIAGAS	- Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	- Sistema de Informação Geográfica
SIMPROF	- <i>Similarity Profile</i>
SISBIO	- Sistema de Autorização e Informação em Biodiversidade
SNUC	- Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SOD	- Superóxido dismutase
SP	- São Paulo
SST	- Sólidos Suspensos Totais
TA	- Temperatura Ambiente
TBARS	- Substâncias Reagentes ao Ácido Tiobarbitúrico (do inglês <i>Tiobarbituric Acid Reagent Substances</i>)
TC	- Taxa de reação catalisada
TCSA	- Termo de Compromisso Socioambiental
TEL	- Nível de Efeitos de Limiar
TFSA	- Terra Fina Seca ao Ar
TH	- Teor Hídrico
TI	- Terras Indígenas
TMT	- Teor Máximo Tolerável
TNC	- Taxa de reação não catalisada
TTAC	- Termo de Transação e Ajustamento de Conduta
UA	- Unidade Amostral
UC	- Unidade de Conservação
UFES	- Universidade Federal do Espírito Santo
UFMG	- Universidade Federal de Minas Gerais
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UHE	- Usina Hidrelétrica
Unesco	- Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNT	- Unidade Nefelométrica de Turbidez
UR	- Umidade Relativa do Ar
UTC	- Unidades de Triagem e Compostagem de Resíduos
UTM	- Universal Transversa de Mercator
VANT	- Veículo Aéreo Não Tripulado
VIFE	- Implantes Visíveis de Elastômero
VMP	- Valor Máximo Permitido
VRQs	- Valores de Referência de Qualidade
VV	- Velocidade do Vento
ZA	- Zona de Amortecimento

APRESENTAÇÃO

Com o rompimento da barragem de rejeitos minerários de Fundão, pertencente à Samarco Minerações S.A., em 5 de novembro de 2015, foi firmado uma série de acordos judiciais ao longo do tempo. O Termo de Ajustamento Preliminar firmado entre o Ministério Público Federal, Samarco Minerações S.A., Vale S.A. e BHP Billiton Brasil Ltda., instituiu ao Lactec a incumbência de realização do diagnóstico dos danos socioambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, ao longo da bacia do rio Doce e da zona costeira adjacente. As atividades do Lactec incluem assessoria técnica ao Ministério Público, além da realização de coletas, pesquisas e análises de dados de materiais da região, de modo a identificar as alterações nos meios físico, biótico e de bens arqueológicos e culturais para a obtenção de um quadro detalhado dos danos ambientais provocados ou intensificados pelo desastre.

Os serviços iniciaram-se em março de 2017 e, para sua execução, foi criada uma equipe multidisciplinar composta por pesquisadores do Lactec e consultores especialistas em várias áreas do conhecimento. Ao longo do tempo o Lactec já publicou uma série de relatórios e pareceres que estão disponíveis para consulta no site do Ministério Público Federal, no seguinte link: <http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/atuacao-do-mpf/pareceres-e-relatorios>.

As atividades iniciaram-se pelo levantamento de dados dos ambientes afetados antes do desastre, o que culminou no Relatório de Linha-Base (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017a,b,c). Na sequência, realizou-se um levantamento de dados e estudos secundários realizados após o desastre, gerando o Relatório Pós-Desastre (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018a,b). Ambos os documentos formaram a base para o levantamento preliminar de danos ambientais decorrentes do desastre, formalizado no Relatório Metodológico de Valoração Econômica e Identificação de Danos Ambientais (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018e).

Ressalta-se que a área do conhecimento do patrimônio arqueológico e cultural foi tema de um documento separado, denominado Relatório Consolidado de Bens Arqueológicos e Culturais (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018c), no qual estão apresentados o levantamento de linha-base para o patrimônio arqueológico e cultural e uma avaliação das ações desenvolvidas sobre esses patrimônios até maio de 2018.

Na continuidade das atividades, foi emitido o 1º Relatório Parcial de Resultados, com os primeiros resultados parciais do diagnóstico até maio de 2018 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018d). Também, foi emitido um relatório contendo a Caracterização do Rejeito de Mineração do Complexo de Germano (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2018f).

Já em 2019, foi emitido o Relatório de Atualização da Linha-Base (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2019a,b,c,d), readequado dentro da abordagem ecossistêmica e complementado com informações até outubro de 2018. Um 2º Relatório Parcial de Resultados foi emitido com resultados parciais do diagnóstico até janeiro de 2019 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2019e).

No início de 2020 foi emitido o Relatório Parcial de Valoração Econômica dos Danos Sociambientais (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020a) que aborda o detalhamento metodológico utilizado para a valoração econômica dos danos socioambientais do desastre. Na sequência foi lançado o Diagnóstico de Danos, que devido a complexidade e extensão foi dividido em cinco tomos. No TOMO I – Contextualização (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), está apresentada a introdução do estudo, os aspectos metodológicos, os dados base para os danos, a matriz de danos e conclusões. Na sequência estão apresentados os

tomos por ambientes afetados denominados TOMO II – Ambientes Aquáticos Continentais (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c), TOMO III – Ambiente Terrestre e Atmosfera (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d) e TOMO IV – Zona Costeira e Marinha (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e), com os danos por ambientes afetados. No TOMO V – Patrimônio Cultural (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020f, g, h) é apresentado os danos sobre o patrimônio arqueológico, material e imaterial.

Ainda em 2020 foi emitido o 3º Relatório Parcial de Resultados (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i) referente aos dados coletados da cheia de 2020 no rio Doce. No mesmo período foi emitido o Relatório de Valoração Contingente (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020j) e de Diagnóstico dos danos ao patrimônio cultural nas Terras Indígenas (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020k).

Já em 2021 foi emitido o Relatório de Valoração Econômica dos Danos Socioambientais com o resultado final dessa etapa de trabalho (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2021a).

No presente Relatório de Acompanhamento de Danos são apresentados novos resultados e o acompanhamento da evolução dos danos diagnosticados até dezembro 2020. Sua apresentação segue o formato adotado no Diagnóstico de Danos, dividido em quatro tomos, sendo o primeiro de contextualização e os demais referentes aos danos a cada ambiente avaliado. Quanto ao patrimônio cultural, o cenário dos danos e as recomendações de ações de recuperação já foram apresentados em formato de pareceres, respectivamente, BRASIL (MPF)/LACTEC (2021b) e (2020n), por isso essa temática não é tratada nesse relatório.

Cada tomo é constituído por um volume do acompanhamento de danos, contendo capítulos com numeração sequencial, sendo subdivididos em itens, ou tópicos, para a estruturação hierárquica dos textos por assuntos lógicos. Os textos estão complementados e ilustrados por figuras, gráficos, quadros e tabelas, com numeração sequencial. Também, estão apresentados documentos suplementares, que se caracterizam como relatórios técnicos que subsidiam a avaliação e acompanhamento de danos. Ao final de cada volume estão apresentadas suas respectivas referências bibliográficas. Alguns tomos ainda apresentam volumes separados para Apêndices e Anexos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	41
2 AMBIENTE TERRESTRE	43
2.1 Danos à superfície	43
2.1.1 Metodologia	45
2.1.1.1 Alteração da paisagem e danos em áreas de processos de extração de bens minerais	45
2.1.1.2 Resíduos sólidos	46
2.1.2 Alteração da paisagem	48
2.1.3 Danos em áreas de processos de extração de bens minerais	48
2.1.4 Áreas de Geração de Resíduos Sólidos	50
2.1.4.1 Resíduos Florestais	50
2.1.4.2 Resíduo de Construção Civil e Demolição	52
2.1.5 Ampliação de áreas de Disposição de Rejeitos	59
2.1.5.1 Parque de Exposições e Campo de Futebol – Barra Longa/MG	59
2.1.5.2 Fazenda Vista Alegre – Barra Longa/MG	65
2.1.5.3 UHE Risoleta Neves – Rio Doce/MG	67
2.1.6 Conclusões	72
2.1.7 Cenário de danos	73
2.1.7.1 Geração de resíduos sólidos	73
2.1.7.2 Ampliação de áreas de disposição de rejeitos	74
2.2 Danos ao solo	74
2.2.1 Metodologia	75
2.2.1.1 Área de abrangência e coleta de amostras em campo	75
2.2.1.2 Determinações analíticas	80
2.2.1.3 Linha base	81
2.2.1.4 Experimento de casa de vegetação	83
2.2.1.5 Análise de danos ao solo	90
2.2.2 Alteração da composição do solo	90
2.2.3 Alteração da fertilidade e do potencial produtivo do solo nas manchas de inundação à jusante da UHE Risoleta Neves	119
2.2.4 Contaminação do solo por elementos potencialmente tóxicos nas manchas de inundação à jusante da UHE Risoleta Neves	172
2.2.5 Conclusões	235
2.2.6 Cenário de danos	235

2.3 Danos à flora	238
2.3.1 Estudo da contaminação da flora por elementos potencialmente tóxicos.....	239
2.3.2 Cenário de danos	240
2.3.2.1 Supressão da vegetação nativa pela implantação de infraestrutura	240
2.3.2.2 Fragmentação e aumento do efeito de borda	240
2.3.2.3 Introdução e aumento de espécies exóticas invasoras.....	241
2.4 Danos à fauna.....	241
2.4.1 Metodologia	242
2.4.2 Alterações nas populações faunísticas.....	244
2.4.3 Piora nas condições físicas da fauna	245
2.4.4 Perda da conectividade na paisagem.....	248
2.4.5 Perda de adequabilidade ambiental	253
2.4.6 Perda de biodiversidade terrestre	256
2.4.6.1 Diversidade alfa.....	256
2.4.6.2 Diversidade beta	264
2.4.7 Comprometimento à saúde da fauna silvestre e bioacumulação de elementos potencialmente tóxicos (EPTs)	267
2.4.7.1 Herpetofauna	267
2.4.7.2 Avifauna.....	268
2.4.7.3 Mastofauna	269
2.4.8 Conclusões	272
2.4.9 Cenário de danos	273
2.5 Danos em unidades de conservação e outras áreas naturais protegidas	274
2.5.1 Acompanhamento dos danos à Área de Proteção Especial Ouro Preto / Mariana.....	276
2.5.1.1 Introdução.....	276
2.5.1.2 Monitoramento dos danos à paisagem	276
2.5.1.3 Monitoramento dos danos às cavidades naturais	277
2.5.1.4 Monitoramento dos danos ao solo	277
2.5.1.5 Monitoramento dos danos à flora	278
2.5.1.6 Monitoramento dos danos à fauna.....	278
2.5.1.7 Conclusão	279
2.5.2 Acompanhamento dos danos em UCs e outras áreas naturais protegidas dos compartimentos 2, 3 e 4	280
2.5.2.1 Introdução.....	280
2.5.2.2 Monitoramento dos danos à paisagem	280

2.5.2.3	Monitoramento dos danos ao solo	280
2.5.2.4	Monitoramento dos danos à flora	281
2.5.2.5	Monitoramento dos danos à fauna	281
2.5.2.6	Conclusão.....	282
2.5.3	Considerações finais	283
2.5.4	Cenário de danos	283
3	ATMOSFERA	285
3.1	Danos à qualidade do ar	285
3.1.1	Metodologia	285
3.1.2	Alteração da qualidade do ar	289
3.1.2.1	Dados meteorológicos	289
3.1.2.2	Concentração de partículas em suspensão.....	294
3.1.2.3	Avaliação semi-quantitativa da composição elementar de amostras de partículas em suspensão no ar por microscopia eletrônica de varredura com EDS	322
3.1.3	Conclusões	333
3.1.4	Cenário de danos	334
4	RECOMENDAÇÕES DE AÇÕES DE RECUPERAÇÃO.....	335
4.1	Ações de restauração ecológica dos ambientes danificados pelo desastre.....	335
4.2	Ações de apoio à gestão de áreas protegidas	339
4.3	Ações de complementação de nutrientes no solo.....	341
4.4	Ações de gestão dos resíduos sólidos	342
4.5	Ações de acompanhamento da qualidade do ar	343
5	ANÁLISE INTEGRADA	344
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	353
7	GLOSSÁRIO.....	370
	DOCUMENTOS SUPLEMENTARES.....	387
	MANEJO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	387
	ESTUDO DE CONTAMINAÇÃO DA FLORA NATIVA	396
	ENTOMOFAUNA	421
	HERPETOFAUNA	430
	AVIFAUNA.....	467
	ALTERAÇÕES POPULACIONAIS DA AVIFAUNA USANDO MODELOS DE OCUPAÇÃO	555
	PEQUENOS MAMÍFEROS	587
	QUIROPTEROFAUNA	597
	MAMÍFEROS DE MÉDIO E GRANDE PORTE	619

AVALIAÇÃO HIERARQUIZADA ESPACIAL E TEMPORAL DOS DANOS DECORRENTES DO DESASTRE DE ROMPIMENTO DA BARRAGEM DO FUNDÃO SOBRE A BIODIVERSIDADE DE FAUNA E FLORA.....	632
DINÂMICA TEMPORAL DA COMPOSIÇÃO DE ESPÉCIES EM DIFERENTES COMUNIDADES DE FAUNA TERRESTRE NAS PROXIMIDADES DE RIOS AFETADOS, AO LONGO DA BACIA DO RIO DOCE	661
APÊNDICES	676
APÊNDICE A	676
APÊNDICE B	690
APÊNDICE C	721
APÊNDICE D	732
APÊNDICE E	737
APÊNDICE F	753
APÊNDICE G	760
APÊNDICE H.....	767

1 INTRODUÇÃO GERAL

O diagnóstico dos danos socioambientais ao ambiente terrestre e à atmosfera, decorrentes do rompimento da barragem de Fundão ocorrido em 2015, foi executado durante o período de dois anos, a partir de março de 2017. Os resultados na íntegra constam em Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).

A área de estudo do diagnóstico englobou, de maneira especial, as porções extracalha afetadas no Compartimento 1, cuja abrangência se estende desde a barragem de Fundão até a UHE Risoleta Neves, e onde grande parte do volume de rejeitos ficou retido. De forma geral, os temas estudados focaram na avaliação dos danos neste compartimento pelo fato de que, até então, não havia registro de extravasamento da calha do rio Doce para os compartimentos à jusante da UHE Risoleta Neves. Apenas os temas de Paisagem, Flora, Fauna e Unidades de Conservação e Áreas Naturais Protegidas apresentaram o diagnóstico dos danos para todos os compartimentos do rio Doce (com exceção ao Compartimento 5, que se refere apenas ao ambiente marinho).

Ao todo foram identificados 32 danos ao ambiente terrestre, englobando os sete grupos temáticos avaliados (Superfície, Resíduos Sólidos, Solo, Flora, Fauna, Unidades de Conservação e Áreas Naturais Protegidas, e Qualidade do Ar), sendo que os danos foram majoritariamente classificados como graves ou gravíssimos (77%), e boa parte considerado cessado (64%).

Um dos principais efeitos do desastre sobre esse ambiente foi o impacto físico causado pela passagem da onda de lama, que causou alteração drástica na paisagem ao promover a remoção de rochas e solos, a supressão da vegetação ciliar e o abatimento de inúmeras espécies da fauna terrestre, resultando no soterramento de várzeas com uma espessa camada de rejeito de minério de ferro. Posteriormente à ação mecânica, as interações físico-químicas que se estabeleceram entre a nova paisagem e o ecossistema terrestre, forçadas pela composição da camada de rejeitos que prevalece na região até hoje, resultaram em uma nova conjuntura do ambiente, em que é razoável afirmar que o patamar pós-desastre não poderá mais ser integralmente revertido ao cenário prévio ao rompimento da barragem de Fundão em função do estabelecimento de uma nova realidade na região.

Os danos ao ambiente terrestre e à atmosfera levaram à perda de importantes serviços ecossistêmicos, revelando que as alterações provocadas pelo desastre foram de grande magnitude e com repercussões severas. Apesar de a maior parte dos danos já ter cessado, mais de 30% deles ainda continuam a causar prejuízos ambientais – ou seja, embora o dano em si não esteja presente, seus efeitos seguem alterando a dinâmica ambiental da região.

Este volume apresenta o acompanhamento dos danos para o ambiente terrestre e atmosfera, com especial enfoque aos danos que ainda não foram cessados ou com efeitos persistentes. Ainda, no presente relatório, são apresentadas novas abordagens metodológicas para alguns desses danos, bem como a inserção de resultados de novas amostragens em campo que incluem os anos de 2019 e 2020, de modo a identificar eventuais mudanças no comportamento das tendências de evolução e reversibilidade em comparação às classificações apresentadas no diagnóstico. Para os danos que ainda ocorrem é apresentado, ao final de cada área temática, uma discussão acerca do cenário futuro do respectivo tema.

Especialmente para o ambiente terrestre, o acompanhamento de danos permitiu atualizar as áreas afetadas à medida que a área de passagem e deposição da lama (APDL) sofreu alterações de modo a incluir a influência do desastre nas porções extracalha dos Compartimentos 2, 3 e 4. A partir do período chuvoso de 2016 foi possível identificar que o nível do rio Doce extravasou da calha em diversas manchas de inundação na região à jusante da UHE Risoleta Neves, o que resultou na inclusão dessas áreas aos danos previamente diagnosticados, ou mesmo na classificação de danos que, anteriormente, não apresentavam classificação nessas regiões. Maiores detalhes sobre esse tópico, podem ser obtidos em Brasil (MPF)/LACTEC (2020m) e, para fins deste relatório, adotou-se o termo “APDL 2016” para a referida atualização. A área de abrangência do acompanhamento de danos é a mesma do diagnóstico de danos disponível em Brasil (MPF)/LACTEC (2020d), mas alguns mapas e estações amostrais foram inseridos novamente em algumas ocasiões para facilitar a visualização e entendimento dos temas aqui tratados.

O documento inicia com o acompanhamento dos danos para o ambiente terrestre, estando os mesmos agrupados conforme grandes temas que abrangem os componentes desse ecossistema. Na sequência trata-se da atmosfera, com foco na qualidade do ar e, posteriormente, são apresentadas algumas recomendações gerais de ações de recuperação visando ao reestabelecimento desses ambientes. Por fim, apresenta-se a análise integrada, capítulo que objetiva avaliar os danos aos ambientes terrestre e atmosfera de forma conjunta.

Após as Referências Bibliográficas e Glossário são apresentados os Documentos Suplementares e Apêndices do relatório. Em volumes separados, estão os Anexos citados ao longo do documento.

2 AMBIENTE TERRESTRE

O ambiente terrestre corresponde à porção exterior à calha dos rios. Os danos avaliados nesse relatório de acompanhamento referem-se a toda extensão do rio Doce (Compartimentos 1, 2, 3 e 4, à exceção do compartimento 5 que representa apenas a porção marinha) (Figura 1) uma vez que foram incorporadas as áreas da APDL 2016 (Brasil (MPF)/LACTEC, 2020m) ao contexto do diagnóstico.

Figura 1 – Divisão por compartimentos adotada no diagnóstico. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020b).



As amostragens em campo incluíram novas campanhas para **Flora e Fauna**, que foram distribuídas ao longo das margens dos corpos hídricos afetados em toda a extensão do rio Doce, nas mesmas unidades amostrais avaliadas previamente. Para a análise dos danos aos **Solos** foram realizadas novas coletas nas manchas de inundação à jusante da UHE Risoleta Neves, para complementar o diagnóstico de danos ao longo de toda bacia. De forma semelhante, foram atualizadas as áreas relativas aos danos de **Alteração da Paisagem, Processos Minerários e Resíduos Sólidos** (que compõem a avaliação da Superfície) bem como às **Unidades de Conservação e Áreas Naturais Protegidas**, de modo a contemplar a APDL 2016. As avaliações relativas ao tema da **Qualidade do Ar**, único tema abordado para o ambiente da Atmosfera, incluíram novas campanhas de dados bem como amostragens de campo, que se concentraram no Compartimento 1.

2.1 DANOS À SUPERFÍCIE

O diagnóstico de danos à Superfície incluiu avaliações relativas às temáticas específicas de paisagem, processos minerários, feições subterrâneas e resíduos sólidos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Para o presente relatório de acompanhamento, os danos de alteração da paisagem, processos de extração de bens minerários, áreas de geração de resíduos sólidos e ampliação de áreas de disposição de rejeitos são apresentados. O dano em feições subterrâneas, por ter sido classificado como cessado, não teve acompanhamento.

Para a alteração da paisagem houve uma reavaliação de sua classificação, que inicialmente foi considerado como sendo dano com tendência a reduzir com o tempo; após uma revisão, o mesmo foi alterado para cessado, pois a alteração da paisagem relaciona-se estritamente com a força mecânica da passagem da onda de lama, podendo ser entendido que esse efeito ocorreu no momento do desastre e cessou. Por outro lado, a área relativa ao dano de alteração da paisagem, bem como a área e número de processos de bens minerários afetados, foram atualizados com base no novo polígono da APDL (Brasil (MPF)/LACTEC, 2020m), que incluiu novas manchas de inundação nos compartimentos à jusante da UHE Risoleta Neves.

Relativo à temática de resíduos sólidos, foi realizado o monitoramento com a respectiva atualização dos danos abordados em Brasil (MPF)/LACTEC (2020d), provenientes da passagem da lama de rejeitos pelo Compartimento I. Portanto, em relação ao dano “Áreas de Geração de Resíduos Sólidos”, esse relatório abordará uma mudança metodológica para definição do volume de resíduos de construção civil gerados pela passagem da onda de lama, bem como os resíduos que serão produzidos após o processo de reassentamento das edificações atingidas. Em conjunto, também foi atualizado o número de edificações atingidas através da avaliação de dados secundários em conjunto com o referenciamento através de imagens orbitais.

No que concerne ao dano “Ampliação das Áreas de Disposição de Rejeitos”, os polígonos foram refinados e a nomenclatura de algumas áreas foram alteradas após averiguação de alguns documentos técnicos produzidos por órgãos governamentais. Além disso, também foram disponibilizadas novas imagens orbitais para as áreas de acúmulo de rejeitos identificadas anteriormente.

O cenário da gestão dos resíduos sólidos urbanos no Brasil vem se modificando nos últimos anos, sobretudo após a aprovação da Lei Federal nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010), a qual dispõe sobre os princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, às responsabilidades dos geradores e do poder público aos instrumentos econômicos aplicáveis, prevenindo o auxílio da União para sua implementação.

Conforme apresentado no diagnóstico dos danos ambientais referente aos resíduos sólidos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), o dano causado pela geração e deposição dos resíduos sólidos provenientes do desastre, sejam eles diretamente relacionados ao rompimento da barragem, como o rejeito de mineração, ou indiretamente, como a vegetação e as residências que foram soterradas pela ação da onda de lama, causaram um impacto ambiental imensurável por grande parte da extensão das margens dos rios afetados.

Neste âmbito, este documento visa atualizar o estado dos danos referente à disposição dos resíduos sólidos publicados no documento editado por Brasil (MPF)/LACTEC (2020d) relacionados ao rompimento da barragem de Fundão, após 2018. Em adição, uma análise sobre a disposição de resíduos sólidos no aterro de Barra Longa, bem como sobre demais áreas de disposição de rejeitos (como a Fazenda Floresta), encontra-se no Documento Suplementar “Manejo de Resíduos Sólidos”.

2.1.1 METODOLOGIA

As metodologias foram descritas para cada um dos temas estudados, de acordo com os indicadores individualizados de cada dano.

2.1.1.1 Alteração da paisagem e danos em áreas de processos de extração de bens minerais

Ao longo das áreas afetadas pela lama de rejeito, a paisagem foi drasticamente alterada. Ainda, há áreas com processos minerários em diversas fases que vão desde os requerimentos até processos com atividades minerárias com concessões de lavra. Inicialmente todos os processos minerários foram apresentados para a bacia do rio Doce, no relatório de Linha-Base (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017a). A partir dessa base, com a sobreposição do polígono da APDL apresentada no TOMO I (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), o qual considerou apenas a área referente à calha do rio após a UHE Risoleta Neves, foi realizado um cálculo da área sobre a qual houve o dano da passagem da lama. Esse cálculo foi feito tanto para as fases dos processos, como para as substâncias requeridas. Com base nesse cálculo determinou-se que 469 processos haviam sido afetados, com média de 23% de área afetada (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Similarmente, a área da paisagem alterada ao longo dos três compartimentos totalizou, inicialmente, 28.082,34 hectares, de acordo com os dados apresentados no diagnóstico.

Após a conclusão e apresentação do cálculo de áreas afetadas pela lama de rejeito, o Lactec a partir de levantamentos em campo com pontos de pico de onda da lama, fotointerpretação em imagens orbitais, descritas no item 6.3 do TOMO I (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), e geotecnologias associadas, gerou um novo polígono da APDL (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020m). Essa APDL teve alterações principalmente nos compartimentos 2 e 3 e a partir dessa, com base na mesma metodologia de cálculo da paisagem alterada (item 2.1.1.1 do Diagnóstico de Danos) e das áreas com processos minerários afetada pela lama, foi realizado um novo cálculo para obtenção das métricas atualizadas.

O mapeamento dessas áreas, referentes à atualização com a nova área da APDL, teve como objetivo quantificar a alteração de percepção da paisagem nas áreas atingidas pela deposição de rejeito em função das cheias do rio Doce, bem como quantificar os segmentos dos processos minerários e as substâncias requeridas para cada processo e sua respectiva fase à época do desastre. Nessa metodologia foram considerados como a área do processo mineral afetado, apenas a região contida no interior do limite da APDL 2016.

Tal como elaborado no TOMO III (item 2.1.4 Danos em áreas de processos de extração de bens minerais), conforme Brasil (MPF)/LACTEC (2020d), a identificação dos processos minerários atingidos pela passagem e deposição da lama de rejeito, foi realizada com base em duas abordagens. A primeira se refere a proporção de área perdida de acordo com a fase do processo, e a segunda, pela substância, de acordo com a substância requerida.

2.1.1.2 Resíduos sólidos

2.1.1.2.1 Área de Estudo

A área de estudo para avaliação dos danos relacionados aos resíduos sólidos compreendeu os municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce, Ponte Nova e Santa Cruz do Escalvado, mais precisamente nas áreas da APDL nesses municípios e suas regiões adjacentes. Esta área foi determinada pois compreende os municípios atingidos entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves, locais os quais houve a deposição mais intensa de resíduos ao longo da margem dos corpos hídricos afetados. Nas demais localidades, à jusante da barragem da UHE Risoleta Neves, não foi evidenciado, conforme avaliação através de sensoriamento remoto, a disposição de uma quantidade significativa de resíduo oriundo do rompimento da barragem, quando comparado com o que ocorreu à montante da UHE. Além disso, devido à barragem da UHE, boa parte da ação mecânica responsável pela disposição foi reduzida, o que mudou a dinâmica da passagem da lama à jusante da UHE. Desta forma, para consolidar esforços na magnificação do dano nas áreas mais impactadas, foram selecionadas as localidades presentes na APDL compreendida apenas entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves conforme visualizado na Figura 2.

Figura 2 – Localização da Área de Estudo para avaliação de resíduos sólidos. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



2.1.1.2.2 Análise crítica de documentos técnicos

Para o levantamento das informações que orientaram as avaliações do acompanhamento de danos relativos aos resíduos sólidos, foram consultados diversos documentos técnicos produzidos entre os anos de 2016 e 2018, além de documentos recentemente publicados em 2019 e 2020. Na lista atualizada a seguir encontram-se a relação de notas técnicas, relatórios e planilhas consultadas, incluindo os documentos já apresentados em Brasil (MPF)/LACTEC (2020d):

IBAMA, ANA, ICMBio e Órgãos Ambientais do Estado de Minas Gerais e Espírito Santo:

- 1) IBAMA – NOTA TÉCNICA Nº 001/2016 (IBAMA, 2016a);
- 2) IBAMA - NOTA TÉCNICA 02001.000606/2016-36 CGMAM/IBAMA (IBAMA, 2016b);

- 3) IBAMA – NOTA TÉCNICA 02015.000021/2016-67 GABIN/MG/IBAMA (IBAMA, 2016c);
- 4) IBAMA – NOTA TÉCNICA 02015.000028/2016-89 GABIN/MG/IBAMA (IBAMA, 2016d);
- 5) IBAMA/SISEMA – NOTA TÉCNICA Nº 001/2017 (IBAMA, 2017a);
- 6) IBAMA/SISEMA/IEMA – NOTA TÉCNICA Nº 002/2017 (IBAMA, 2017b);
- 7) IBAMA – Relatório Fase Hélios Operação Augias (IBAMA, 2016e);

Câmaras Técnicas do Comitê Interfederativo (CIF):

- 1) NOTA TÉCNICA CT – GRSA Nº 06/2018 (CT-GRSA, 2018a);
- 2) NOTA TÉCNICA CT – GRSA Nº 08/2018 (CT-GRSA, 2018b);
- 3) NOTA TÉCNICA CT – GRSA Nº13/2018 (CT-GRSA, 2018c);
- 4) NOTA TÉCNICA CT – GRSA Nº14/2019 (CT-GRSA, 2019a)

Fornecidos pela Samarco / Fundação Renova:

- 1) Plano de Manejo de Rejeito – Revisão 01 (Fundação Renova, 2017a);
- 2) Volume 3 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos trechos 1 ao 4 (Fundação Renova, 2018a);
- 3) Volume 4 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 09 – Revisão 01 (Fundação Renova, 2018b);
- 4) Anexo II – Plano de Trabalho UHE Risoleta Neves – Candonga (Fundação Renova, 2017b);
- 5) Laudo Técnico sobre a situação atual urbanística da sede do município de Barra Longa e do povoado de Gesteira associada às consequências decorrentes do rompimento da Barragem de Fundão – Inquérito Civil Nº MPMG – 0521.15.000648-9 (INSTITUTO PRÍSTINO, 2016);
- 6) Relatório Técnico Sobre a Construção do Aterro de Rejeito no Município de Barra Longa/MG - Revisão 01 (Fundação Renova, 2017c);
- 7) PG-009 – Recuperação UHE Risoleta Neves – Candonga – Ficha de Indicadores (Fundação Renova, 2017d);
- 8) Volume 8 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 12 (Fundação Renova, 2018c);
- 9) Avaliação dos impactos da ruptura da barragem de rejeitos de Fundão em Mariana nove meses após o desastre. Capítulo 1 - “Avaliação da infraestrutura física atingida pelo acidente” (Fundação Coppetec, 2017)

2.1.1.2.3 *Imagens orbitais e veículos aéreos*

Para a obtenção das imagens utilizadas no monitoramento desse estudo, utilizaram-se ortoimagens orbitais dos satélites referentes aos períodos pós-desastre, conforme descrito a seguir:

2020: ortoimagem pós-desastre do satélite CBERS-4 com resolução espacial de 5m relativa ao mês de setembro de 2020.

O tratamento e análise dos dados foram realizados por meio dos softwares ArcMap 10.6 e QGIS 3.2. Adotou-se como SGR (Sistema Geodésico de Referência) o SIRGAS2000 e a projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator), para o fuso 23 sul.

2.1.2 ALTERAÇÃO DA PAISAGEM

Para o dano da alteração da paisagem, inicialmente foi considerada a área de passagem e deposição da lama do trecho entre a barragem de Fundão e a barragem da UHE Risoleta Neves e, após Risoleta Neves, apenas a área referente à calha do rio Doce. Essa área, apresentada no item do dano à paisagem, conforme Brasil (MPF)/LACTEC (2020d), indicou uma área total de 28.082,34 hectares afetados. Com base nesse novo polígono da APDL, houve um incremento em área e o resultado demonstrou que ocorreu alteração da paisagem no total de 92.311,11 hectares. Esse incremento foi significativo no estado do Espírito Santo, especificamente entre Colatina e a foz do rio Doce, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Área de passagem e deposição da lama atualizada (APDL 2016) realizada com base na modelagem, para a região de Colatina-ES até a foz do rio Doce.



Conforme a metodologia adotada a classificação do dano permanece em gravíssimo, por apresentar área afetada acima de 5.000 hectares, nos compartimentos 1, 2 e 3.

2.1.3 DANOS EM ÁREAS DE PROCESSOS DE EXTRAÇÃO DE BENS MINERAIS

Após as análises e inclusão dos novos polígonos de acordo com a atualização da APDL, identificou-se que houve dano em 612 processos minerários. Desses processos com áreas requeridas, totalizando 200.667,96 ha, 53.441,822 ha estão inseridos dentro da APDL, o que representa 26,63% de área afetada. A maioria desses processos estava em fase de autorização de pesquisa na época do desastre (Tabela 1), que significa a fase de pesquisa para a qualificação e quantificação do bem mineral. Em relação à substância, a maioria dos processos minerários atingidos relacionava-se à extração de areia, seguido de argila, granito, gnaiss e ouro, conforme indicam os valores da Tabela 2.

Tabela 1 – Quantitativos dos processos minerários atingidos pela lama de rejeito separado pelas respectivas fases com base na APDL de 2016.

Fase / Quantitativos	Nº Processos	Área inicialmente requerida (DNPM/ANM) em ha	Área afetada em ha	Área afetada em %
Processos afetados pela lama	612	200.667,96	53.441,82	26,63
Autorização de Pesquisa	398	158.493,90	43.043,25	27,15
Concessão de Lavra	6	933,70	357,06	38,24
Licenciamento	51	1.483,64	617,06	41,59
Requerimento de Lavra	77	14.878,22	3.154,94	21,20
Requerimento de Lavra Garimpeira	2	50,9	12,21	23,98
Requerimento de Licenciamento	21	558,99	342,18	61,21
Requerimento de Pesquisa	57	24.268,63	5.915,09	24,37

Tabela 2 – Quantitativos dos processos minerários atingidos pela lama de rejeito separado pelas respectivas substâncias, com base na nova área da APDL.

Substâncias	Nº processos	Área inicialmente requerida (DNPM/ANM) em ha	Área afetada em ha	Alteração de área em %
Água Mineral	2	78,79	46,96	59,60
Areia / Areia industrial	363	63.203,19	19.431,27	30,74
Argila / Argila refratária / Argila vermelha	85	15.827,93	4.125,74	26,07
Caulim	3	1.017,28	141,85	13,94
Diamante	4	7.988,78	453,99	5,68
Feldspato	1	97,00	3,70	3,81
Minério de Ferro	9	14.107,21	519,87	3,69
Gema	2	50,90	12,21	23,99
Granito / Gnaisse	59	30.101,38	2.081,20	6,91
Ilmenita	7	4.461,79	1.768,61	39,64
Ouro / Minério de ouro	48	34.466,11	13.411,06	38,91
Outras substâncias (quartzo, saprolito, titânio, turfa, terras raras, zircônio e berilo)	29	29.267,60	11.445,35	39,11

A atualização do quantitativo de processos minerários afetados de acordo com a inserção dos novos polígonos da APDL 2016 não alterou a classificação desse dano, que pode ser considerado ainda um dano gravíssimo, cessado e parcialmente reversível.

2.1.4 ÁREAS DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

2.1.4.1 Resíduos Florestais

Conforme detalhado mais profundamente na seção de danos à flora e de resíduos florestais no documento BRASIL (MPF)/LACTEC (2020d), para a estimativa da área devastada pela ação mecânica da lama de rejeitos, entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves, foram utilizadas imagens de satélite e criados vários polígonos no interior da APDL para restringir apenas onde o contato da lama provocou remoção ou soterramento da vegetação ciliar, como demonstrado na Figura 4 e Figura 5.

Figura 4 – Imagem de sensoriamento remoto com a especificação da área da APDL e da Supressão vegetal no período pré-desastre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 5 – Imagem de sensoriamento remoto com a especificação da área da APDL e da Supressão vegetal no período pós-desastre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Desta forma, foram estimadas as áreas para os diversos polígonos onde a vegetação nativa foi removida mecanicamente e onde a lama se depositou sem remover os indivíduos, porém causou sua mortalidade tardia. Para estimar os resíduos florestais, de forma tangível, as diferentes espécies arbóreas presentes ao longo da APDL foram generalizadas como sendo indivíduos. Os valores destas áreas devastadas estão disponíveis na Tabela 3.

Tabela 3 – Área de supressão vegetal.

	Área de vegetação nativa suprimida (ha)
Remoção mecânica	565,67
Mortalidade tardia	212,45
Total	778,12

Para um conhecimento mais realista da vegetação afetada ao longo do compartimento 1 e conseguir determinar o volume estimado de resíduo florestal gerado pelo desastre, houve a necessidade de restringi-lo a material lenhoso, desconsiderando tipologias de características não florestais, como campos rupestres e várzeas. Para obter tais resultados realizou-se um inventário florestal que trabalhou em áreas adjacentes não suprimidas que fazem parte da mesma tipologia florestal afetada e representam ambiente semelhante (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). O estudo foi executado de forma sistemática em remanescentes de mata atlântica ao longo das margens nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, no sentido do curso da lama, onde se realizou um esforço amostral de 18 parcelas de 2.500 m² cada, totalizando uma área inventariada de 45.000 m² de mata atlântica, distribuídas entre a Barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves. Os fragmentos controles foram posicionados estrategicamente em áreas com característica muito semelhantes às áreas suprimidas.

Dessa forma, houve a possibilidade de calcular o volume de madeira existente nos 18 fragmentos estudados no inventário onde o intervalo de confiança foi calculado utilizando a média (154,24m³/ha) de volume de madeira com casca obtido, o erro de amostragem (14,13%) e levando em consideração a probabilidade de 90%, conforme detalhado na seção 2.3 do TOMO III, Danos à Flora (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

Assim sendo, através da média de volume de madeira obtido na execução do inventário florestal, realizado pela equipe de flora, juntamente com os dados gerados no mapeamento de uso do solo, correspondente às áreas de vegetação nativa suprimidas pela lama entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves e abrangendo os dois cenários de perda de volume de madeira, um deles considerando apenas a área de remoção mecânica e o outro contemplando as áreas com mortalidade tardia, foram estimados os volumes de madeira suprimidos. Os valores estimados desses volumes estão disponíveis na Tabela 4.

Tabela 4 – Estimativa do volume de madeira suprimida e intervalo de confiança para o volume total de madeira suprimido.

	Área de vegetação nativa suprimida (ha)	Estimativa do Volume de madeira suprimida (m ³)	IC para o volume (m ³)
Remoção mecânica	565,67	87.248,94	74.912,38 < x < 99.571,29
Mortalidade tardia	212,45	32.768,29	28.137,51 < x < 37.399,54
Total	778,12	120.017,23	103.049,90 < x < 136.970,82

2.1.4.2 Resíduo de Construção Civil e Demolição

2.1.4.2.1 Estimativa da quantificação do volume de Resíduo de Construção Civil e Demolição gerado pelo desastre

A passagem da onda de lama de rejeitos causou diversas destruições e soterramentos ao longo da APDL, causando danos ao meio ambiente e às infraestruturas presentes, principalmente, nas comunidades entre a barragem de Fundão e UHE Risoleta Neves. Conforme descrito no documento Brasil (MPF)/LACTEC (2020d), para realizar uma estimativa do que foi impactado pelo desastre, realizou-se uma investigação através de imagens de satélite dos períodos pré e pós rompimento da barragem de Fundão das estruturas existentes no interior da APDL. O trabalho em questão objetivou mapear apenas as edificações encontradas no interior da APDL nas imagens orbitais. Com base nesse mapeamento, as edificações foram vetorizadas utilizando-se a primitiva gráfica polígono e para os casos em que não foi possível a vetorização, pelo fato de estarem parcialmente encobertas por vegetação, foi considerada a média das áreas das demais edificações, conforme exemplificado na Figura 6, Figura 7, Figura 8 e Figura 9.

Figura 6 – Edificações atingidas no município de Mariana/MG (Pré-desastre).

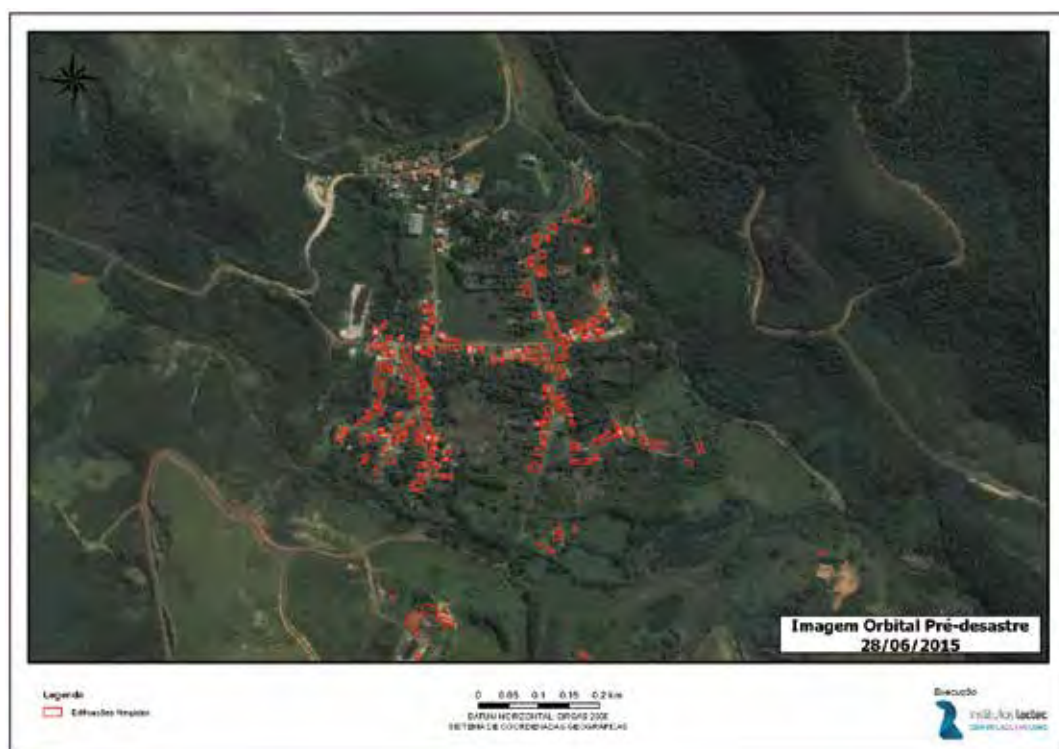


Figura 7 – Edificações atingidas no município de Mariana/MG (Pós-desastre).

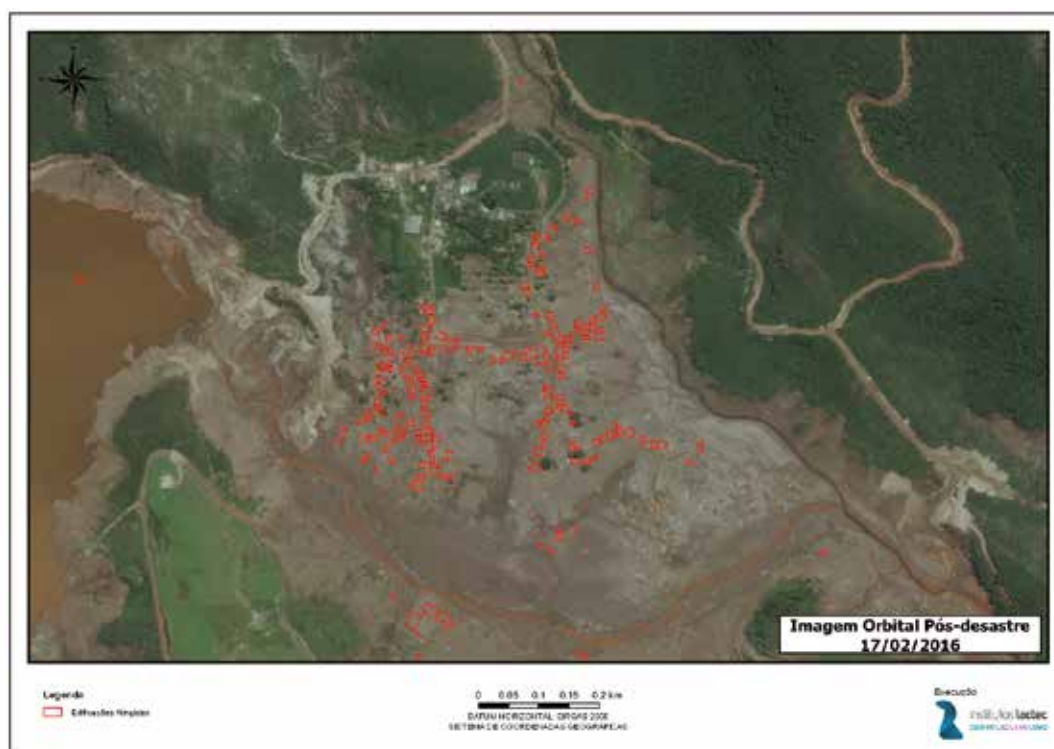


Figura 8 – Edificações atingidas no município de Barra Longa (Pré-desastre).



Figura 9 – Edificações atingidas no município de Barra Longa (Pós-desastre).



Através do mapeamento das ortoimagens, foram vetorizados 317 polígonos de edificações, sendo que, 169 edificações totalmente destruídas e 98 parcialmente destruídas estão localizadas no município de Mariana, e 7 edificações totalmente destruídas e 43 parcialmente destruídas estão localizadas no município de Barra Longa – MG. Apenas 5 edificações relativas à classe totalmente destruída (3 em Mariana e 1 em Barra Longa), não puderam ser vetorizadas. Para estes casos, conforme mencionado anteriormente, de modo a incluí-las no cálculo, foi aplicada a média da área das edificações vetorizadas. Entretanto, para facilitar o entendimento no acompanhamento de danos, os termos: edificações totalmente destruídas e edificações parcialmente destruídas, abordados no diagnóstico de danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), foram substituídos pelo termo edificações atingidas.

Com o intuito de não promover duplicidade de volume de resíduo de construção civil e demolição gerado pelo desastre, as edificações vetorizadas próximas a sede municipal de Barra Longa foram desconsideradas no presente tópico, pois o volume de resíduo gerado por tais edificações atingidas já está contabilizado nos tópicos subsequentes que fazem referência as obras emergenciais realizadas no município de Barra Longa. Dessa forma, foram desconsideradas 6 edificações atingidas em Barra Longa. Assim, dos 317 polígonos vetorizados, somente 311 serão analisados neste tópico de modo que 267 edificações atingidas estão localizadas no município de Mariana, e 44 edificações atingidas estão localizadas no município de Barra Longa. Para os outros municípios pertencentes ao compartimento 1, não foram encontradas, através das ortoimagens, estruturas significativamente danificadas, excluindo aqui a UHE Risoleta Neves, pois, devido a sua magnitude e particularidades, as respectivas ações para a sua recuperação fogem das principais premissas metodológicas propostas por este trabalho. As áreas estimadas para as estruturas impactadas seguem apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Cálculo da área das edificações atingidas na APDL.

Edificações Atingidas		
Município	Quantidade	Área (m ²)
Mariana	267	26.596,50
Barra Longa	44	3.830,70
Total	311	30.427,19

Essas áreas sofreram uma atualização em relação ao apresentado anteriormente em Brasil (MPF)/LACTEC (2020d), pois, após avaliação do documento publicado por COPPE (2016), constatou-se que haviam sido consideradas algumas edificações que não foram impactadas pela onda de lama, e outras em duplicidade em virtude da metodologia utilizada. Além disso, a partir desse mesmo documento, houve também uma complementação na vetorização de polígonos de edificações atingidas. Dessa forma, acrescentou-se 128 estruturas impactadas na APDL, de modo que, 108 edificações atingidas estão localizadas no município de Mariana e 20 edificações atingidas estão localizadas no município de Barra Longa. As áreas estimadas para as estruturas complementares impactadas seguem apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Cálculo da área das edificações atingidas complementares na APDL.

Edificações Atingidas Complementares		
Município	Quantidade	Área (m ²)
Mariana	108	9.093,06
Barra Longa	20	1.291,52
Total	128	10.384,58

Dessa forma, somando os polígonos vetorizados chegou-se ao total de 439 edificações atingidas distribuídas entre os municípios de Mariana, contemplando 375 das edificações contabilizadas, e Barra Longa com 64 edificações atingidas, chegando ao total de 40.811,77 m² de área impactada conforme descrito na Tabela 7.

Tabela 7 – Cálculo da área total das edificações atingidas na APDL.

Edificações Atingidas		
Município	Quantidade	Área (m ²)
Mariana	375	35.689,56
Barra Longa	64	5.122,22
Total	439	40.811,77

Dando continuidade ao acompanhamento de danos, a estimativa da quantificação do volume de resíduo de construção civil e demolição gerado pelo desastre foi realizada pela aferição do volume de material de construção utilizado para cada edificação existente no pré-desastre por meio da aplicação dos valores padronizados apresentados na NBR 12721 (ABNT, 2007). A referida normativa apresenta quantitativos de materiais padronizados para diferentes tipos de edificação: padrão baixo, padrão normal e padrão alto. O tipo de edificação selecionado para o cálculo foi o padrão normal (R1-N), por apresentar área semelhante à média das edificações encontradas na região (aproximadamente 100 m²). Esse tipo de edificação consiste em uma residência unifamiliar composta de três dormitórios,

sendo um suíte, com banheiro, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda (abrigo para automóvel).

A Tabela 8 apresenta a estimativa do volume de material de construção para uma edificação conforme valores apresentados na NBR 12721 (ABNT, 2007), para a área média das edificações vetorizadas pré-desastre que se transformaram em resíduo de construção civil e o volume total estimado para as 439 edificações atingidas. Sendo assim, o volume total de material calculado para uma casa padrão Normal R1 de 106,44 m² resultou em 99,33 m³, conforme detalhado no Apêndice A, e o volume de 86,76 m³ hipotético referente a área média das edificações vetorizadas de 92,97 m² no pré-desastre.

Tabela 8 – Volume de material utilizado para a construção de casa padrão Normal R1 NBR 12721.

	Casa padrão Normal R1 NBR 12721 (m ²)	Área média das edificações atingidas (m ²)	Área total das edificações atingidas (m ²)
	106,44	92,97	40.811,77
Volume de material utilizado (m³)	99,33	86,76	38.085,62

Portanto, extrapolando o resultado do volume de material utilizado para a totalidade das edificações atingidas pelo desastre e vetorizadas no presente relatório obteve-se um volume de material de construção civil de 38.085,62 m³ transformados em resíduo de construção civil e demolição. A área e o volume de material hipoteticamente utilizado para cada polígono vetorizado das edificações atingidas estão detalhados no Apêndice A.

É importante ressaltar que este resultado é apenas para as edificações analisadas, podendo este ser muito superior se incluído todas as demais infraestruturas que foram destruídas pelo desastre.

2.1.4.2.2 Estimativa da quantificação do volume de Resíduo de Construção Civil gerado pelo processo de reassentamento

Toda infraestrutura atingida pelo curso da lama, sejam elas residências, pontes, praças e etc., foram ou ainda serão recuperadas e reconstruídas conforme determinado posteriormente através das deliberações do Comitê Interfederativo (CIF). Estes processos de recuperação estão em andamento pela Fundação Renova e mensalmente são entregues ao CIF (conforme Deliberação nº 23) as prestações de contas em forma de relatórios mensais com os termos de entrega e recebimento de bens dos responsáveis por cada imóvel. Todo processo de reconstrução e recuperação promovido por este programa produzirá uma quantidade considerável de resíduos sólidos de construção civil, tendo em vista que muitas comunidades serão reconstruídas em outras localidades diferentemente da atingida pela lama, como é o caso de Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo e Gesteira.

Infelizmente, devido à morosidade do processo de reconstrução destes locais impactados, não há como mensurar exatamente a quantidade de estruturas e infraestruturas que serão implantadas até o final dos Programas propostos no TTAC. Os programas presentes no TTAC que objetivam o reparo das estruturas atingidas produzirá, durante a sua execução, excessivas quantidades de resíduos

de construção civil, causando diversos danos ambientais, como, por exemplo, a necessidade de uso de novas áreas para a disposição destes resíduos provenientes das ações de recuperação. Assim, é fundamental a estimativa da quantidade de resíduos de construção civil que possivelmente serão gerados em virtude da execução dos programas estruturantes, principalmente os que visam os reassentamentos em novas áreas, pois, além dos resíduos de construção civil gerados pelas novas construções, também existem todas as estruturas atingidas que foram interditadas para uso, e atualmente encontram-se abandonadas e passíveis de demolição ou incorporadas ao resíduos de mineração ainda presentes nas margens dos rios afetados.

Tendo em vista que uma das proposições básicas dos programas de reconstrução, recolocação e recuperação das estruturas atingidas, é de que as mesmas sejam retornadas à situação anterior ao desastre, para efeitos de cálculo dos resíduos de construção civil, foram consideradas que todas as estruturas encontradas através das ortoimagens serão totalmente reconstruídas. Para a estimativa da massa destes resíduos de construção civil e demolição que estão sendo gerados pelos programas de recuperação da infraestrutura, foi utilizado o índice proposto por Pinto (1999), que propôs a seguinte expressão para o cálculo de Resíduos de Construção e Demolição (RCD):

$$RCD = A \cdot CP$$

Onde:

RCD: massa de RCD (t);

A: área da edificação (m²);

CP: coeficiente de Perda (t/m²).

Desta forma, aplicando a metodologia acima para os resultados da Tabela 7 com um CP de 0,15 conforme proposto por Pinto (1999) para uma edificação totalmente danificada, a produção de RCD estimada é apresentada conforme disponível na Tabela 9.

Tabela 9 – Levantamento da quantidade de RCD esperados para a reconstrução dos municípios estudados.

Município	RCD para Edificações Atingidas (t)
Mariana	5.353,43
Barra Longa	768,33
Massa Total de RCD (t)	6.121,77

A metodologia aplicada estima a massa produzida de RCD para os programas de reconstrução e recuperação das estruturas danificadas em 6.121,77 toneladas. Porém, para ter uma estimativa do volume gerado de resíduo de construção civil por tais programas será utilizado o valor da massa unitária no estado solto que segundo Costa, Júnior e Oliveira (2014), é um parâmetro definido como a razão entre sua massa e o correspondente volume ocupado, incluindo os vazios, sugerindo a seguinte expressão para o cálculo da massa unitária de resíduo de construção civil (RCC):

$$M_u = \frac{M}{V}$$

Onde:

M_u : massa unitária do RCC (kg m^{-3});

M: massa de RCC (kg); e

C: volume de RCC (m^3).

Para chegar em um resultado consolidado partiu-se do princípio de que os resíduos de construção civil e demolição (RCD), os resíduos de construção civil (RCC) e os resíduos sólidos de construção civil e demolição (RSCD) possuem as mesmas características e estão classificados na classe A descrita na Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002) como sendo resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.

Segundo levantamento bibliográfico sobre massa unitária de resíduos de construção civil em estado in natura, observou-se que a média da massa unitária encontrada por Carneiro et al. (2001) chegou ao valor de 1.345 kg m^{-3} na cidade de Salvador/BA; ao passo que Rocha (2006) chegou ao valor de 1.326 kg m^{-3} na cidade de Brasília/DF; e Souza (2005) chegou ao valor de 1.288 kg m^{-3} na cidade de Uberlândia/MG, o que demonstra que os valores são bastante próximos mesmo considerando que os respectivos experimentos foram realizados com amostras de diferentes construções e em diferentes anos.

Segundo Rocha (2006) o valor médio da massa unitária permite quantificar, em termos de massa e de volume, a quantidade de RSCD gerada, para que assim se possam estipular a área superficial e a quantidade de locais para disposição final do RSCD. Dessa forma, para estimar o volume gerado de RCD para as edificações atingidas atribui-se o valor de massa unitária (1.345 kg m^{-3}) estipulado pela pesquisa realizada por Carneiro et al. (2001) no projeto Entulho Bom, seguindo as recomendações da NBR 7251 para a determinação da massa unitária no estado solto. Escolheu-se tal pesquisa por se tratar de um estudo realizado no local de descarga do entulho de Salvador proveniente de diferentes áreas de coleta o que, de certa forma, pode-se atribuir a tal resultado um valor generalista. A partir de então, estimou-se o volume gerado de RCD em função do rompimento da barragem de Fundão, conforme disponível na Tabela 10.

Tabela 10 – Levantamento estimado do volume de RCD esperado para a reconstrução dos municípios estudados.

Município	Volume de RCD para Edificações Atingidas (m^3)
Mariana	3.980,25
Barra Longa	571,25
Volume Total de RCD (m^3)	4.551,50

Portanto, o volume estimado de resíduo de construção civil e demolição produzido durante o processo de reconstrução das 439 edificações atingidas será de 4.551,50 m³, necessitando de um espaço de aproximadamente duas piscinas olímpicas para destinação. Dessa forma, nota-se que o volume estimado possui um valor bastante expressivo se considerada a problemática existente no Brasil de modo geral em relação à disposição adequada dos resíduos sólidos da construção civil, ou seja, a necessidade de reconstrução dos reassentamentos potencializa o dano gerado pelo desastre. O volume estimado de resíduo de construção civil e demolição gerado para cada polígono vetorizado das edificações atingidas estão detalhados no Apêndice A.

É importante ressaltar que estes resultados são apenas para as edificações analisadas, podendo este ser muito superior se incluído todas as demais infraestruturas que necessitam estar presentes no caso dos reassentamentos.

2.1.5 AMPLIAÇÃO DE ÁREAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

A deposição da mistura de rejeito de mineração, solo, detritos vegetais e antrópicos geraram uma grande destruição ao longo das planícies de inundação por onde passaram. Partindo do princípio de que todos esses resíduos estão descritos e classificados na Política Nacional de Resíduos Sólidos, a situação pós-desastre por si só se classifica como um dano, pois os resíduos gerados pelo rompimento da barragem de Fundão estão depositados em locais inadequados por toda a trajetória percorrida pela lama, pois segundo a PNRS os rejeitos de mineração devem ser acondicionados em áreas ambientalmente adequadas, sendo proibido o lançamento em quaisquer ambientes terrestres ou corpos hídricos. Entre as áreas afetadas existiam Áreas de Preservação Permanente, planícies com vegetação natural, propriedades rurais com atividades econômicas, cidades e povoados, desencadeando assim, problemas para a população e para o meio ambiente.

Desta forma, o presente estudo estimou, como de maior importância, as seguintes áreas de remoção e disposição de resíduos pelas ações após o desastre (Tabela 11):

Tabela 11 - Estimativa das áreas de remoção e disposição de resíduos sólidos.

Localidade avaliada	Área estimada (ha)
Parque de Exposições - Barra Longa/MG	1,96
Fazenda Vista Alegre - Barra Longa/MG	11,56
UHE Risoleta Neves - Rio Doce/MG	20,63
Área Total	34,15

A área estimada referente ao campo de futebol de Barra Longa/MG descrita no documento BRASIL (MPF)/LACTEC (2020d) estava duplicada, pois a área correspondente ao campo de futebol já estava inserida na área estimada do Parque de Exposições de Barra Longa. Dessa forma, a área total estimada após essa atualização foi de 34,15 ha.

2.1.5.1 Parque de Exposições e Campo de Futebol – Barra Longa/MG

Durante a realização das obras emergenciais na cidade de Barra Longa, conforme descrito no documento BRASIL (MPF)/LACTEC (2020d), estima-se que cerca de 2,3 milhões de metros cúbicos

de rejeitos foram incorporados ao solo natural em caráter emergencial e provisório, como parte das obras de reconformação do terreno do município de Barra Longa e seu entorno. Dessa forma, com a finalidade de visualizar as movimentações do rejeito proveniente do desastre, avaliou-se imagens de satélite em três tempos distintos: uma imagem pré-desastre e duas pós-desastre para evidenciar as mudanças no local referente à movimentação de rejeitos de mineração ou demais resíduos produzidos em virtude do desastre.

As localidades estudadas, no município de Barra Longa foram: Parque de Exposições de Barra Longa, Campo de futebol e a Praça Manoel Limo Mol. Para um maior entendimento, o desastre afetou diretamente dois campos de futebol na cidade de Barra Longa, são eles: Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários e o Campo de Futebol Esporte Clube Barralonguense como pode ser observado na Figura 10 e Figura 13 respectivamente.

Dessa forma, entre as áreas acima citadas, aquelas que foram utilizadas para a disposição de rejeitos durante as obras emergenciais executadas na cidade tratam-se do Parque de Exposições e do Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários conforme observado na Figura 11 e Figura 12. As áreas correspondentes a Praça Manoel Limo Mol e ao Campo de Futebol Esporte Clube Barralonguense foram reformadas durante a execução das obras emergenciais na cidade conforme demonstrado na Figura 14 e Figura 15.

Figura 10 – Imagem T0 Centro de Exposições de Barra Longa e Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 11 – Imagem T2 Centro de Exposições de Barra Longa e Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 12 – Imagem T5 Centro de Exposições de Barra Longa e Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 13 – Imagem T0 Campo de Futebol Esporte Clube Barralonguense e Praça Manoel Lino Mol. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 14 – Imagem T2 Campo de Futebol Esporte Clube Barralonguense e Praça Manoel Lino Mol. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 15 – Imagem T4 Campo de Futebol Esporte Clube Barralonguense e Praça Manoel Lima Mol. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Conforme descrito no Relatório Técnico sobre a Construção do Aterro de Rejeito no município de Barra Longa (Fundação Renova, 2017e), durante a remoção do rejeito e deposição no Parque de Exposições, o volume total de rejeito depositado na área foi de aproximadamente 43.000 m³. Sob essa área de disposição encontra-se soterrado o Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários e o Parque de Exposições. O relatório técnico, acima citado, afirma que foi realizado outro estudo para avaliar a melhor alternativa para destinação final do resíduo, e com base nos estudos do Programa de Caracterização Geoquímica a Fundação Renova apresentou o projeto para a construção do Aterro de Rejeito próximo ao Parque de Exposições, para ser mais exato no antigo Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários, de modo que o rejeito disposto nas duas áreas foi acondicionado somente no aterro de rejeito construído conforme demonstrado na Figura 12.

Para reconstruir o campo de futebol o projeto sugere o alteamento do Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários, ou seja, sobre o aterro de rejeito construído na área. Entretanto, segundo Nota Técnica CT-GRSA nº 14/2019 (Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA), 2019), o projeto não considera a proeminente interface das questões ambientais e sociais da área urbana e não propõe medidas direcionadas para recuperação definitiva do local.

Dessa forma, com a finalidade de acompanhamento do dano referente as áreas de disposição de resíduos pelas ações emergenciais após o desastre, avaliaram-se as novas ortoimagens de satélite após T5, com caráter observatório para possíveis alterações no local analisado. As novas imagens orbitais foram geradas a partir da captura feita pelo sensor WPM do satélite CBERS 4A. É importante ressaltar que tais imagens possuem uma menor qualidade se comparada as imagens anteriores, o que torna complexa a conclusão sobre alguma pequena alteração em relação às áreas analisadas conforme

demonstrado nas Figura 16 e Figura 17. Entretanto, conforme visualizado nessas figuras, é possível inferir que as áreas ainda estão com acúmulo de rejeitos de forma similar à identificada anteriormente, porém, não foram identificadas ampliações nessas áreas, bem como a disposição de uma maior quantidade de rejeitos.

Figura 16 – Imagem após T5 Centro de Exposições de Barra Longa e Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários.



Figura 17 – Imagem após T5 Campo de Futebol Esporte Clube Barralonguense e Praça Manoel Limo Mol.



2.1.5.2 Fazenda Vista Alegre – Barra Longa/MG

O Aterro Fazenda Vista Alegre, segundo Plano de Manejo de Rejeitos (CH2M, 2017), foi mapeado e utilizado para a disposição do resíduo retirado da área urbana de Barra Longa e entorno. O aterro foi executado em três fases, pois não foi possível estimar o volume de material retirado das áreas afetadas, sendo cada fase executada à medida que a demanda para armazenar o material aumentava, de modo que uma das fases poderia não ser executada, reduzindo assim os impactos e riscos ambientais gerados. Segundo o mesmo documento houve uma projeção em relação a área utilizada e ao volume depositado no aterro Fazenda Vista Alegre (121.481,12 m³) conforme descrito em Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).

Com a finalidade de visualizar as movimentações citadas no documento acima foram selecionadas imagens de satélite em três tempos distintos: uma imagem pré-desastre (Figura 18) e duas pós-desastre (Figura 19 e Figura 20). Essas imagens já foram publicadas em Brasil (MPF)/LACTEC (2020d), mas são trazidas novamente para auxiliar no acompanhamento da evolução das áreas.

Figura 18 – Imagem T0 Aterro Fazenda Vista Alegre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).

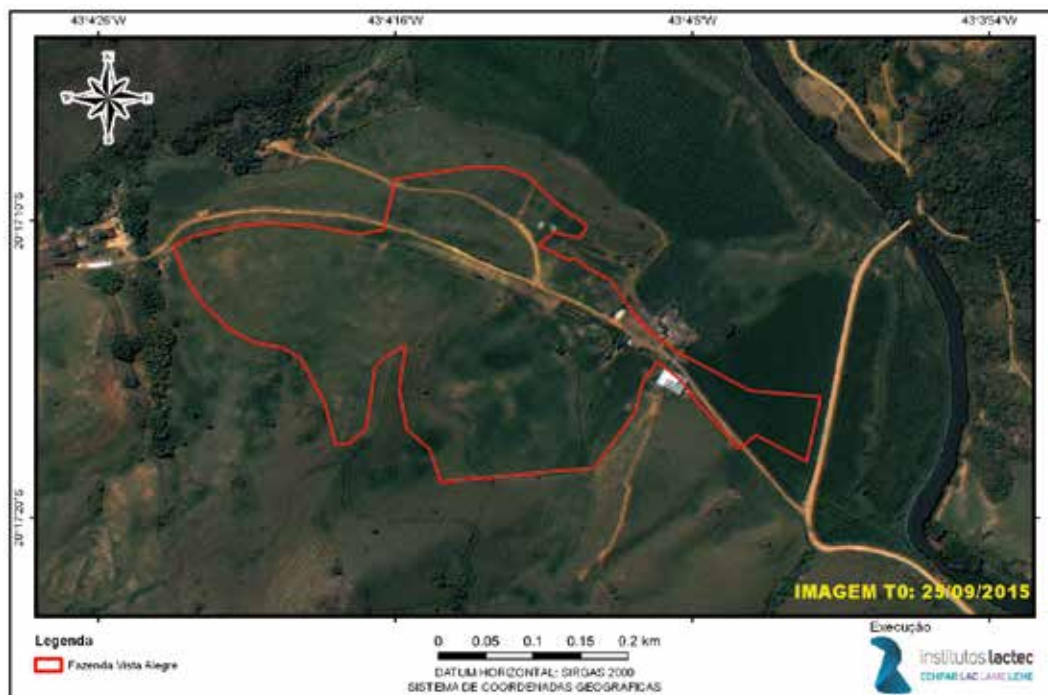


Figura 19 – Imagem T2 Aterro Fazenda Vista Alegre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 20 – Imagem T5 Aterro Fazenda Vista Alegre. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Dessa forma, com a finalidade de acompanhamento do dano referente a área de disposição de resíduos após o desastre, avaliou-se nova imagem de satélite após T5, com caráter observatório para possíveis alterações no local analisado. A nova imagem orbital foi gerada a partir da captura feita pelo sensor WPM do satélite CBERS 4A, e a imagem possui resolução espacial de 2 metros. Entretanto, a imagem possui uma menor qualidade se comparada as imagens anteriores a T5 o que torna complexa a conclusão se houve alguma alteração significativa em relação as áreas analisadas conforme demonstrado na Figura 21.

Figura 21 – Imagem após T5 Aterro Fazenda Vista Alegre.

2.1.5.3 UHE Risoleta Neves – Rio Doce/MG

A revitalização da UHE Risoleta Neves possui grande complexidade em relação ao manejo do rejeito presente no reservatório. O Plano de Trabalho UHE Risoleta Neves – Candonga descreve que uma das principais dificuldades para alcançar os objetivos dos programas em relação ao manejo do rejeito existente no Reservatório UHE Risoleta Neves são as áreas disponíveis para a disposição do rejeito dragado. Segundo o documento Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no trecho 12 (FUNDAÇÃO RENOVA, 2018c) foi adotado como obra emergencial a dragagem imediata do material depositado a montante da barragem, pois era preciso garantir a estabilidade do barramento da UHE.

De acordo com o documento Ficha de Indicadores do PG009, as áreas mapeadas precisavam atender a demanda e o fluxo contínuo de dragagem de sedimentos e considerar as seguintes premissas básicas de projeto:

- Escolha de locais sem a presença de estágios médios e avançados de regeneração, buscando preferencialmente áreas dentro do próprio reservatório da UHE Risoleta Neves;
- Relevo favorável à disposição dos sedimentos de dragagem;
- Facilidade de acesso para a realização da disposição do material dragado;
- Regiões menos cultivadas e pouco habitadas, menos valorizadas e de menor impacto socioeconômico-cultural;
- Minimização dos eventuais impactos e dos custos ambientais advindos da sua mitigação.

Dessa forma, os documentos citados anteriormente explicam que o material dragado foi disposto temporariamente em áreas adjacentes ao reservatório denominadas de “Setores”. A montante do barramento da UHE foram selecionados 6 setores para a disposição do rejeito dragado. Sendo eles o Setor 1, Setor 3, Setor 4, Setor 5, Setor 6 e Setor 8 (Velho Soberbo e Pilha do Velho Soberbo), conforme representados na Figura 22 e Figura 23 e descritos na Tabela 12.

Figura 22 – Localização dos setores utilizados para disposição dos rejeitos (Setores 1 ao 6). Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 23 – Localização dos setores utilizados para disposição dos rejeitos (Setor 8). Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Tabela 12 – Informações sobre os Setores de disposição de rejeito dragado.

Setor	Volume armazenado (m ³)	Descrição	Situação em julho/2018*
1	23.380	O rejeito depositado será removido e encaminhado para a Fazenda Floresta. Volume removido: 2.100 m ³	Descomissionada
2	-	Não há deposição de sedimentos, foi feito somente o retaludamento em função de um processo erosivo, devido ao rápido deplecionamento do reservatório	Concluída
3	70.900	O rejeito depositado será removido e encaminhado para a Fazenda Floresta.	Em descomissionamento
4	414.500	O rejeito depositado será removido e encaminhado para a Fazenda Floresta. Parte será removido de forma mecânica (até mai/19) e o restante será dragado Após o enchimento do reservatório. Volume já removido: 30.000 m ³ .	Remoção em 2 fases -Adequações para próximo período chuvoso e remoção por meio de dragagem após enchimento do reservatório.
5	14.500	O rejeito depositado será removido e encaminhado para a Fazenda Floresta. Volume já removido: 13.700 m ³ .	Remoção mecânica 5B e 5C, adequações, proteção superficial e drenagem 5A e 5D. Em descomissionamento.
6	55.400	“Bota-fora” de material seco. O rejeito depositado será removido e encaminhado para a Fazenda Floresta. Não houve remoção do volume de rejeito armazenado.	Adequações, proteção superficial e drenagem. Em descomissionamento.
8	200.000	O rejeito depositado será mantido no local e serão realizadas obras de drenagem e recuperação da área. Volume já removido: Não Aplicável.	Em descomissionamento.

Fonte: Adaptado de Fundação Renova. (FUNDAÇÃO RENOVA, 2018c).

*Em alguns dos setores foram construídas bacias (5a, 5C e 5D), diques e barramentos para contenção de sedimento proveniente da Barragem de Fundão. O descomissionamento possui o objetivo de impossibilitar o contato do rejeito com a área alagada após o enchimento da barragem.

Entretanto, ao analisar a Figura 24 disponibilizada pela Fundação Renova e a Figura 25 e Figura 26, exemplificando alguns dos setores estudados, nota-se que todos os setores ficam localizados dentro das áreas de influência do rio em período de cheia. Dessa forma, devido à morosidade do processo de recuperação da UHE Risoleta Neves é de grande importância haver um entendimento maior sobre o estágio dos trabalhos realizados nos setores mencionados anteriormente.

Figura 24 – Imagem T0 Setor 4 e 5 e Ecobags. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 25 – Imagem T2 Setor 4 e 5 e Ecobags. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Figura 26 – Imagem T4 Setor 4 e 5 e Ecobags. Fonte: Brasil (MPF)/LACTEC (2020d).



Dessa forma, com a finalidade de acompanhamento do dano referente aos Setores em UHE Risoleta Neves, avaliaram-se novas imagens de satélite após T5 com caráter observatório para possíveis alterações no local analisado (Figura 26, Figura 27 e Figura 28).

Figura 27 – Imagem após T5 Setor 4 e 5 e Ecobags.



Figura 28 – Imagem após T5 Setor 8.



O documento Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no trecho 12 (FUNDAÇÃO RENOVA, 2018c) informa que todos os setores serão descomissionados para retomada do nível d'água operacional do reservatório. Em alguns dos setores haverá a remoção de sedimentos, os quais serão direcionados para as estruturas da Fazenda Floresta. O objetivo é de evitar que grandes volumes de chuvas, causando significativas cheias do rio, remobilizem os rejeitos já consolidados, causando assoreamento e turbidez na UHE ou em pior cenário, a jusante da barragem. Para melhor entendimento, o Setor 11/ Fazenda Floresta será abordado no Documento Suplementar “Manejo de Resíduos Sólidos”.

2.1.6 CONCLUSÕES

Os principais resíduos gerados pela ação mecânica da onda de rejeitos no Compartimento 1 são resíduos da construção civil, provenientes das localidades atingidas, e resíduos florestais do solo e vegetação ripária das áreas de passagem da onda de rejeitos. Estes resíduos ficaram incorporados aos rejeitos de mineração, dificultando a mensuração real de seu volume, razão pela qual este trabalho além de estimar a área onde houve disposição destes resíduos também estimou seu volume. Além disso, também há os danos provenientes das ações emergenciais, causando impactos em outras áreas livres do desastre devido a ações antrópicas de movimentação de resíduos. Estas ações acumularam a mistura de resíduos e rejeitos de mineração em pilhas em algumas áreas de passagem da lama (e.g.: o Parque de Exposições e o Campo de Futebol Esporte Clube Rodoviários, ambos em Barra Longa/MG) ou depositaram a mistura em novas áreas não impactadas pelo desastre, como o caso do Aterro Fazenda Vista Alegre, local que recebeu, emergencialmente, grande volume de resíduos da reconstrução das moradias e infraestruturas de Barra Longa/MG.

Em relação às áreas de movimentação de resíduos sólidos, houve uma alteração na área total de edificações atingidas e, conjuntamente, uma mudança na metodologia de cálculo do volume de resíduos gerados. Essas alterações deixaram o resultado apresentado mais fidedigno e mais próximo da realidade, pois foi incorporado dados de campo em conjunto das imagens orbitais para a quantificação

das edificações atingidas. Entretanto, essas modificações não suscitarão numa alteração da avaliação do dano já apresentado, pois, de maneira geral, esse refinamento não altera significativamente a área impactada, bem como os desdobramentos do dano ao longo dos próximos anos.

As metodologias de monitoramento das áreas de movimentação de resíduos sólidos apresentadas nesse documento, conforme já discutido anteriormente, permitiram avaliar a situação das áreas identificadas com acúmulo ou movimentação de rejeito no ano de 2020. Essas áreas foram identificadas a partir de uma sequência de imagens orbitais, bem como a avaliação de documentos técnicos de algumas instituições governamentais, priorizando as informações posteriores ao desastre, para que assim, possamos ser o mais íntegro possível em nossas análises, tendo em vista a dificuldade de acesso a essas áreas e pelo recobrimento natural da vegetação que dificulta a interpretação no caso das imagens orbitais. Entretanto, em função da baixa qualidade das imagens do satélite utilizadas, não foi possível identificar pequenas movimentações nessas áreas ou o surgimento de novas áreas de disposição adjacentes. Contudo, através da análise dessas imagens orbitais, foi possível perceber que não houve grandes movimentações de resíduos que acarretariam em um aumento do dano ambiental e respectivamente da área total avaliada, bem como a possibilidade de uma reclassificação do dano.

Devido a magnitude desses danos, será muito complexo a realização de ações que promovam a plena recuperação das áreas atingidas. De maneira geral, a avaliação pela ótica dos resíduos sólidos auxilia na visualização do desastre de maneira ampla e traz enfoque, principalmente, nos cuidados que devem ser realizados com os resíduos já depositados pela ação da onda de lama, além de promover a discussão da validade das ações que visam a mitigação completa do dano ambiental.

2.1.7 CENÁRIO DE DANOS

2.1.7.1 Geração de resíduos sólidos

Após desenvolvimento desse relatório, foi estabelecido que esse dano está praticamente cessado no tocante aos resíduos sólidos depositados nas margens dos corpos hídricos afetados, concomitantemente com os demais resíduos gerados pela força mecânica da passagem da lama. Entretanto, não houve a reclassificação da tendência pois, conforme já relatado, ainda está pendente os programas de reassentamentos das comunidades atingidas diretamente pela onda de lama.

A preocupação principal incide nos diversos resíduos formados durante esse processo de reconstrução, pois, em função das cidades impactadas carecerem de áreas disponíveis para a alocação desses resíduos, poderá ocorrer “superlotação” dos aterros disponíveis, como sucedeu no aterro de Barra Longa que, em virtude das diversas obras de reconstrução ocorridas logo após ao desastre, chegou ao seu limite de recepção de resíduos, necessitando buscar auxílio em cidades vizinhas e aterros particulares para a disposição de seus resíduos urbanos.

Desta forma, com a definição do processo de reassentamento e respectiva apresentação e aprovação pelos órgãos competentes do plano de gestão dos resíduos de construção e, na devida ordem, do plano de gestão dos resíduos sólidos urbanos para as novas localidades, esse dano pode vir a ser considerado como cessado no futuro.

2.1.7.2 Ampliação de áreas de disposição de rejeitos

A identificação desse cenário depende fundamentalmente da discussão em relação ao manejo dos rejeitos acumulados nas margens e no fundo dos rios afetados. Dessa forma, há dois cenários prováveis para esse dano:

- 1) Na ocorrência da retirada completa e disposição em outra área, haverá, sem dúvida, a ampliação do dano ambiental, não apenas na nova área atingida, mas em relação a todos os ecossistemas atrelados, como, por exemplo, a ressuspensão do rejeito presente no fundo dos rios que acarreta um aumento da turbidez da água e redução do oxigênio dissolvido;
- 2) Na opção por manter as áreas impactadas pelo rejeito, haverá a possibilidade da contaminação das águas subterrâneas e o transporte contínuo dos sedimentos para o rio. Nesse caso, um programa de isolamento e avaliação contínua dessas áreas, bem como ações para a mitigação, são fundamentais para reduzir a ocorrência de novas contaminações.

Dessa maneira, a definição do manejo desses resíduos é indispensável para vislumbrar um cenário de danos e sua respectiva definição do tempo para recuperação desses ambientes.

2.2 DANOS AO SOLO

Neste item do relatório está apresentado o acompanhamento de danos ocorridos aos solos da bacia hidrográfica do rio Doce (BHRD) após o rompimento da barragem de Fundão em Mariana no ano de 2015, especialmente em relação aos solos de várzea que sofreram influência de deposições de rejeito.

Devido ao maior impacto ocorrido no Compartimento 1 (região entre a barragem de Fundão e a UHE Risoleta Neves), com a deposição de uma camada de rejeito de mineração de ferro que soterrou os solos naturais de várzea, formando um solo antrópico (Tecnossolo) nessa região, os esforços do diagnóstico de danos ao solo foram concentrados, inicialmente, nesse Compartimento.

Para o Compartimento 1 foram identificados 10 danos ao solo (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), a saber: alteração da composição, aumento da densidade, alteração da capacidade de suporte e deformabilidade, alteração da permeabilidade e do fluxo de água, alteração da estabilidade de encostas, aumento dos processos erosivos, alteração da fertilidade e do potencial produtivo, contaminação por elementos potencialmente tóxicos (EPTs), contaminação por EPTs no solo devido às ações emergenciais pós-desastre e formação de Tecnossolo. Dentre os danos citados, dois foram considerados gravíssimos, três foram considerados graves e cinco foram considerados pouco graves. Ainda, oito danos foram classificados como cessados e dois como com tendência a reduzir, sendo sete danos irreversíveis e três danos parcialmente reversíveis.

No ano hidrológico coincidente ao rompimento da barragem (2015), a precipitação na BHRD apresentava-se inferior à média histórica devido a um período de estiagem na região (CPRM, 2019). Dessa maneira, as evidências até aquele momento indicavam que à jusante da UHE Risoleta Neves a passagem da onda de lama não havia promovido o extravasamento do rejeito para fora da calha, sendo este transportado como sedimento de corrente até alcançar a região da foz no Espírito Santo. Assim, os danos à matriz do solo foram inicialmente estudados no Compartimento 1. Esses dados foram amplamente apresentados e discutidos em relatório prévio (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

Portanto, o foco desse relatório de acompanhamento é apresentar, discutir e diagnosticar os dados ocorridos aos solos dos Compartimentos 2, 3 e 4, para complementar o diagnóstico de toda a bacia do Rio Doce afetada pelo desastre.

Na estação chuvosa do ano subsequente ao desastre (2016) e, em especial na estação chuvosa de 2019/2020, o rio Doce se elevou acima da cota de inundação, resultando na ocorrência de manchas de inundação extracalha nos Compartimentos 2, 3 e 4 (Figura 29), com consequente deposição do sedimento suspenso (contendo rejeito remanescente) sobre os solos em áreas rurais e urbanas. Ainda, é importante destacar que, a cada evento de precipitação futura que resulte na elevação da cota do rio Doce para além da cota de inundação, o mesmo processo de deposição tenderá a se repetir (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).

Figura 29 – Registros de manchas de inundação do rio Doce na porção extracalha (Compartimento 2). Fotos: Lactec (2019).



A partir do ano de 2019 a equipe técnica do Lactec iniciou as avaliações de danos aos solos nos Compartimentos 2, 3 e 4, com especial enfoque no estudo das alterações químicas ocorridas nas manchas de inundação extracalha para a área de passagem e deposição da lama (APDL) de 2016 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020m). Os resultados deste tópico se referem ao diagnóstico e acompanhamento dos seguintes danos: alteração da composição do solo, alteração da fertilidade e do potencial produtivo do solo e contaminação por elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no solo. O estudo foi realizado com base em amostras de solo e tecido vegetal coletadas em campo, verificando o efeito *in loco*. Também, foi avaliado o efeito do rejeito em culturas diversas, sob condição controlada de casa de vegetação, a partir do material coletado em campo.

Ainda, no item 2.2.6 é discutido o cenário de danos aos solos para toda a bacia, incluindo os resultados do Compartimento 1 para os danos não cessados, que foram: alteração da permeabilidade e do fluxo de água e aumento dos processos erosivos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

2.2.1 METODOLOGIA

2.2.1.1 Área de abrangência e coleta de amostras em campo

As amostragens de solo e planta ocorreram nos locais onde a simulação hidrodinâmica 1D-2D com o modelo HEC-RAS apresentou a ocorrência de manchas de inundação para o evento de janeiro de 2016 (APDL 2016) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020m). As coletas ocorreram em solos dos Compartimentos

2, 3 e 4, sob uso de pastagens (nativas ou plantadas), entre a UHE Risoleta Neves e a foz do rio Doce no município de Linhares-ES. Destaca-se que o critério de escolha para as coletas em áreas de pastagens foi estabelecido por este ser o uso do solo mais impactado do ambiente terrestre em termos de extensão (10.910 ha), excetuando-se as áreas de mata nativa (12.434 ha) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020m), que serão tratadas em tópico posterior (Item 2.3 deste documento). As coletas na mesma classe de uso do solo permitiram comparações mais assertivas dos indicadores ao longo dos Compartimentos.

Em paralelo, foram realizadas coletas de solo nas áreas de vegetação nativa, para compor o estudo de contaminação da flora nativa, apresentado no item 2.3 subsequente e no Documento Suplementar “Estudo de contaminação da flora nativa”. Tais resultados corroboram com os apresentados nesse tópico, e são apresentados no Apêndice B. No entanto, as amostras específicas das áreas de vegetação nativa foram utilizadas como indicadores para o melhor entendimento sobre a relação solo-plantas, visando avaliar se as espécies nativas desenvolvidas nas áreas afetadas apresentam algum tipo de acometimento. Dessa maneira, tais resultados não foram utilizados diretamente para a interpretação dos danos ao solo, mas ratificam as observações relatadas no presente tópico.

Foram coletados 23 locais (L1 a L23) dentro da área de abrangência da APDL 2016 (Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33) em propriedades agrícolas particulares e áreas devolutas do estado, entre os meses de dezembro de 2019, março e julho de 2020. Em cada local, foram coletados quatro pontos distribuídos longitudinalmente dentro da mancha de inundação (amostras denominadas rejeito/solo) e dois pontos em áreas controle sob o mesmo uso do solo e contíguos às áreas afetadas (solos de porções altas da paisagem, que não foram afetados pela mancha, denominados solos controle).

Figura 30 – Locais de coleta de solos em áreas afetadas e controle no Compartimento 2 (L1 a L3).

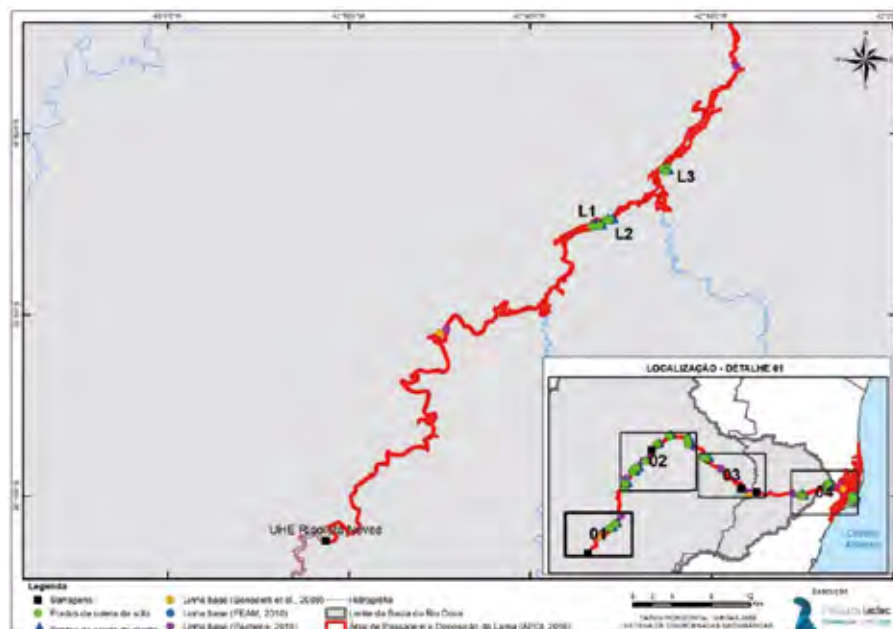


Figura 31 – Locais de coleta de solos em áreas afetadas e controle no Compartimento 2 (L4 a L16).

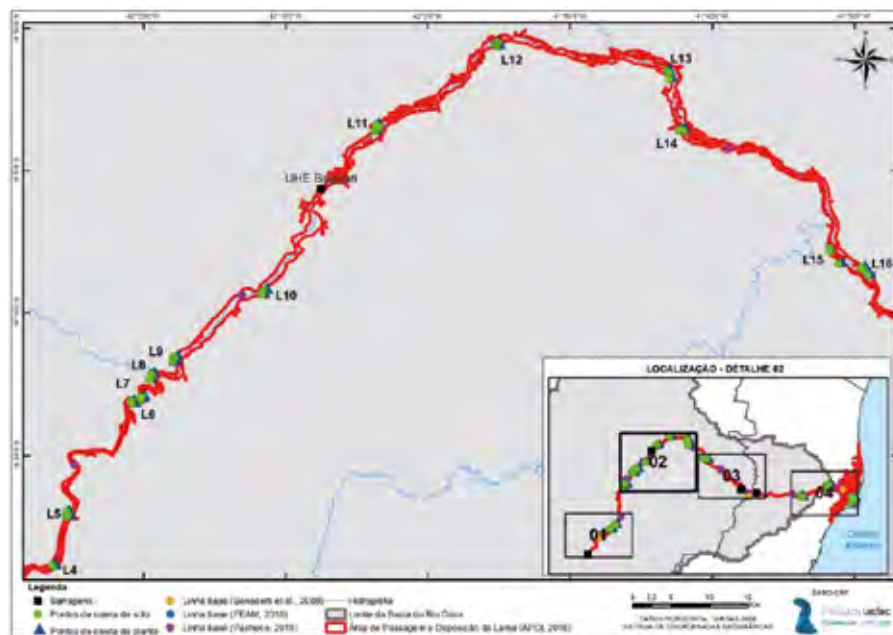


Figura 32 – Locais de coleta de solos em áreas afetadas e controle no Compartimento 2 (L15 a L17).

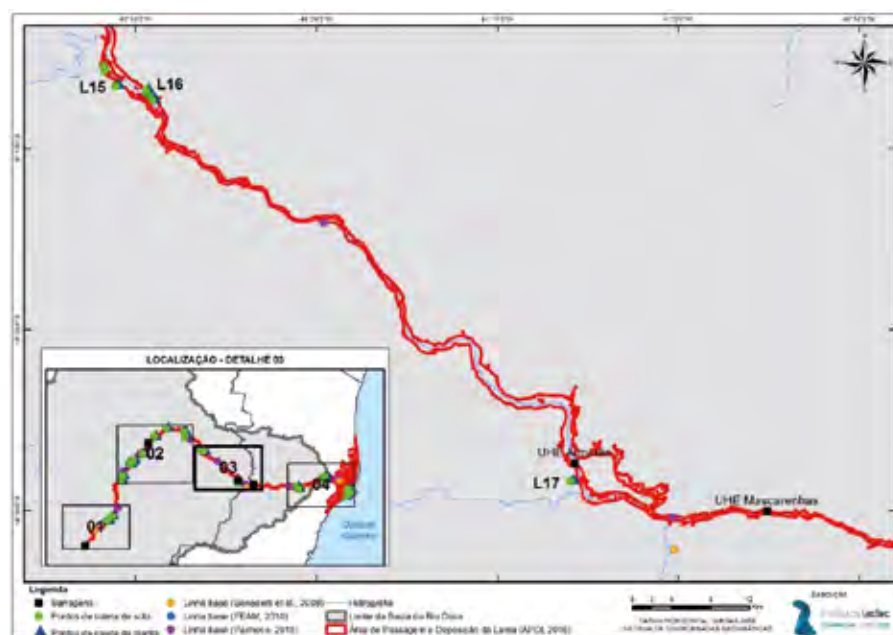
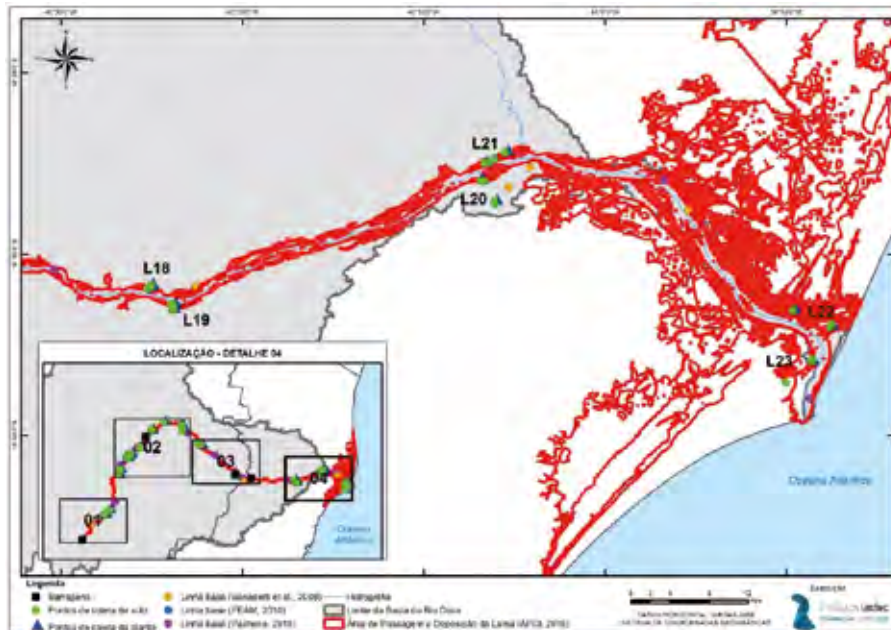


Figura 33 – Locais de coleta de solos em áreas afetadas e controle nos Compartimentos 3 e 4 (L18 a L23).



O procedimento de amostragem de rejeito/solo e solo controle seguiu o mesmo protocolo descrito no item 2.2.1.2.1 do Tomo III (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d) com relação às profundidades (0-20 e 20-40 cm) e ferramenta utilizada (trado holandês). Apenas para os locais L4, L5, L7, L8 e L9 (Figura 31), inicialmente foi realizada uma amostragem mais estratificada entre camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm), com objetivo de identificar possíveis distinções de deposição de rejeito entre as profundidades. No entanto, as variações foram pouco significativas, e optou-se por apresentar a média das três camadas para representar a camada 0-20 cm nesses locais.

Em cada local de amostra de solo foi coletada, também, uma amostra da parte aérea da pastagem predominante. Em todos os pontos foram amostradas plantas da família *Poaceae* (gramíneas) (Figura 34). Os procedimentos de coleta e processamento do material vegetal seguiram os mesmos detalhes descritos no item 2.2.1.2.2 do Tomo III (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), incluindo as comparações dos teores máximos toleráveis (TMT) de EPTs e nutrientes para bovinos (NRC, 2001; 2005).

Figura 34 – Coleta da pastagem em áreas dentro e fora das manchas de inundação. Foto: Lactec (2019).



Ao todo, entre os pontos L1 e L23, foram coletadas 130 amostras de solo no Compartimento 2 e 52 amostras nos Compartimentos 3 e 4. As amostras dos Compartimentos 3 e 4 foram agrupadas para maior representatividade, devido à menor extensão de área. Ainda, na região mais próxima ao litoral, as áreas de pastagens eram mais restritas e, portanto, para os Compartimentos 3 e 4, foram amostrados três locais sob cultivo de cacau (*Theobroma cacao*) em sistema de cabruca (plantio em área de mata raleada), adicionalmente aos três locais de pastagens dessa região (Figura 33). No entanto, devido à proximidade das áreas de cabruca com a planície litorânea do Espírito Santo, foi obtido apenas um local de controle para comparação com as amostras afetadas de solo e planta sob cultivo de cacau, pois praticamente toda a região se encontra na área de abrangência da mancha de inundação da APDL 2016.

A amostragem do tecido vegetal do cacaueiro ocorreu pela coleta de 10 folhas maduras no terço médio de cada indivíduo, utilizando-se tesoura de poda (Figura 35). Assim como para as amostras de gramíneas, as amostras de folhas de cacau foram armazenadas sob refrigeração logo após a coleta, mantendo-se as mesmas condições de campo até o envio aos laboratórios e respeitando-se o *holding time* para os analitos de interesse.

Figura 35 – Coleta de solo e planta em áreas dentro e fora das manchas de inundação sob cultivo de cacau. Foto: Lactec (2020).



2.2.1.2 Determinações analíticas

As análises laboratoriais realizadas nas amostras de rejeito/solo e solo controle foram:

- Caracterização mineralógica: avaliação das fases minerais presentes nas amostras, com base em difratometria de raio X (DRX) em amostras em pó (especificações: amostra peneirada em malha de 100 mesh; fonte de radiação Cu-K α , tensão de 40 kV e corrente de 40 mA, com registro dos graus 2 θ a cada 0,01° e em velocidade de 0,05 p.s⁻¹);
- Caracterização física: distribuição granulométrica das partículas (ABNT NBR 7181:2016) e determinação da massa específica dos grãos (ABNT NBR 6458:2016);
- Caracterização química: determinação dos teores pseudototais (EPA 3051) de EPTs (USEPA, 2007) e avaliação de rotina da fertilidade do solo (EMBRAPA, 2009).

As análises mineralógicas foram realizadas em um ponto afetado e um ponto controle por local, nos dois extremos de profundidade (mais superficial e mais subsuperficial). As demais análises foram realizadas em todas as amostras.

As gramíneas de campo foram analisadas quanto aos teores de EPTs e nutrientes do tecido vegetal, conforme as mesmas premissas apresentadas no item 2.2.1.3.6.1 do Tomo III (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

2.2.1.3 Linha base

Para a escolha dos atributos de linha base, que embasaram as comparações dos efeitos pós-desastre em relação à condição pré-desastre, foram priorizados estudos realizados em solos aluvionares da bacia do rio Doce, caracterizados especificamente na mesma área de abrangência do presente trabalho (Figura 30, Figura 31, Figura 32 e Figura 33). Essa distinção é importante em função da própria diferenciação natural que existe entre classes de solo em diferentes topografias, devido aos processos pedogenéticos predominantes em função da posição do solo na paisagem.

Foram selecionados 11 perfis de solos aluvionares para representar o Compartimento 2 e sete perfis para representar os Compartimentos 3 e 4, que tem menor extensão (BENEDETTI et al., 2008; FEAM, 2010; PACHECO, 2015), buscando selecionar amostras em profundidades compatíveis às profundidades amostradas na condição pós-desastre. Os solos foram classificados pelos autores como sendo Neossolos Flúvicos, variando entre solos distróficos e eutróficos, e foram caracterizados por metodologias compatíveis com as metodologias utilizadas para avaliar as amostras pós-desastre, em datas prévias ao rompimento da barragem.

Os teores pseudo totais de EPTs, caracterização da rotina de fertilidade do solo e distribuição granulométrica dos solos de linha base foram analisados por estatística descritiva para representar a camada 0-40 cm, sendo agrupados de acordo com as variações em quartis (Q25, Q50 e Q75) (Tabela 13) e representados graficamente, em conjunto com os resultados pós-desastre.

Tabela 13 – Linha base para os solos dos Compartimentos 2, 3 e 4, representando a camada 0-40 cm. Fonte: Benedetti et al. (2008); FEAM (2010); Pacheco (2015).

Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn	ARG	SIL	AF	AG	AT	D _p		
----- mg kg ⁻¹ -----																			g cm ⁻³		
Compartimento 2																					
Q25	83.279	4,1	471	2,4	12,0	59,2	14,6	41.866	504	1,6	40	22	43	54	13	9	24	4		39	2,5
Q50	119.387	8,6	563	2,7	14,7	86,2	22,0	52.080	698	2,2	58	30	65	68	17	14	56	13		71	2,5
Q75	134.963	20,6	637	2,9	25,4	108,3	37,6	67.638	1.073	2,8	68	37	92	89	32	27	60	24	78	2,7	
Compartimentos 3 e 4																					
Q25	80.900	5,7	442	2,4	11,0	60,7	11,9	33.450	357	1,6	42	18	23	35	7	5	16	8	37	2,7	
Q50	97.521	8,3	508	2,5	13,0	76,2	15,7	64.110	499	2,1	57	24	37	46	16	12	47	21	70	2,8	
Q75	134.741	10,4	557	2,8	17,5	86,8	29,5	71.531	989	18,7	64	42	101	92	37	27	60	29	90	2,9	
pH H ₂ O	Al ³⁺	m%	Ca	Mg	Ca/Mg	K	SB	H+Al	t	T	V%	P disp.	C.O.								
-	cmol _c dm ⁻³	%	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	-	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	%	mg dm ⁻³	dag dm ⁻³								
Compartimento 2																					
Q25	5,75	0,00	0,00	1,42	0,37	2,58	0,06	1,81	1,55	1,75	4,08	50,13	2,50	0,44							
Q50	6,10	0,00	0,00	1,86	0,63	3,01	0,10	2,63	1,90	2,54	4,76	59,45	4,70	0,75							
Q75	6,35	0,00	0,00	2,49	0,84	3,76	0,17	3,68	2,88	3,26	7,18	66,30	6,10	0,99							
Compartimentos 3 e 4																					
Q25	5,42	0,00	0,00	0,91	0,27	2,39	0,06	1,18	1,30	1,18	2,52	44,40	1,40	0,30							
Q50	5,82	0,00	0,00	2,08	0,76	3,00	0,08	2,73	1,60	1,81	4,76	50,20	2,20	1,13							
Q75	6,09	0,10	2,90	4,84	1,53	3,52	0,15	4,21	2,70	3,16	7,59	66,40	3,20	1,57							

ARG: argila; SIL: silte; AF: areia fina; AG: areia grossa; AT: areia total. D_p: densidade de partículas; m%: saturação por Al; SB: soma de bases; t: CTC efetiva; T: CTC potencial; V%: saturação de bases; C.O: carbono orgânico.

2.2.1.4 Experimento de casa de vegetação

O diagnóstico dos danos que ocorreram nos solos das manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4, à jusante da UHE Risoleta Neves, foi complementado com dados obtidos de avaliações em condições controladas, em adição às coletas de campo. Como a deposição de rejeito nos solos desses Compartimentos ocorreu de forma difusa e em camadas menos espessas quando comparadas à deposição ocorrida no Compartimento 1, onde em média foi constatado um metro de rejeito (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), o presente experimento foi delineado de forma a isolar os fatores de variação, de difícil controle em campo, para promover um melhor entendimento sobre os possíveis danos à composição, fertilidade e contaminação do solo nas regiões à jusante da UHE Risoleta Neves.

Considerou-se que, além da possibilidade de aportes de sedimentos suspensos através dos eventos de cheia do rio Doce, com acúmulos de rejeito residual sobre o solo, existe também a possibilidade de que os solos possam ser alterados pelo contato com a própria água durante esses eventos, culminando em uma eventual contaminação por EPTs provenientes da água ou pelo uso da água do rio para irrigação, fato comum em toda a bacia. O presente experimento foi esquematizado de maneira a buscar elucidar, também, esses questionamentos.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no campus de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba. Para a execução desse trabalho foram coletadas três matrizes de substratos distintos na BHRD entre 2019 e 2020, a saber: “solo controle”, em área que não foi influenciada pelo rejeito, localizada entre os municípios de Barra Longa e Mariana (ponto STS 6.1) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d); “rejeito depositado” no Compartimento 1, denominado Tecno solo (ponto STS 4.3); e sedimento acumulado no município de Governador Valadares/MG em janeiro de 2020, denominado “material da cheia de 2020” (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).

Os dois primeiros substratos (solo controle e rejeito depositado) foram amplamente caracterizados no Tomo III (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), e representam um solo natural da região e o solo antrópico formado em consequência do desastre no Compartimento 1. O material coletado em Governador Valadares foi escolhido para representar o material que influenciou os solos dentro das manchas de inundação avaliadas e que os influenciará todas as vezes que ocorrerem deposições nas planícies aluvionares dos Compartimentos 2, 3 e 4, devido à dinâmica do rio Doce. Esse substrato foi coletado no dia 12 de fevereiro de 2020 na Ilha do Araújo (coordenadas: fuso 24, long. 190.072, lat. 7.911.114) logo após sua deposição (Figura 36), possibilitando a retirada de material inalterado em volume suficiente para ser utilizado no experimento. A caracterização completa do material coletado em Governador Valadares pode ser encontrada em Brasil (MPF)/LACTEC (2020i).

Figura 36 – Material coletado em Governador Valadares (MG), em decorrência das inundações ocorridas nos meses de janeiro e fevereiro de 2020, para utilização no experimento. Fotos: BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020i).



Após a coleta dos substratos em Minas Gerais, os mesmos foram transportados para Curitiba onde foram submetidos ao processo de secagem ao ar, moagem, peneiramento (em peneira com malha de 4 mm) e homogeneização, separadamente. Os substratos foram caracterizados quanto à rotina de fertilidade do solo, distribuição granulométrica e presença de EPTs na fração pseudo total, de acordo com as mesmas metodologias descritas no item 2.2.1.2. Para o solo controle, a análise química de caracterização indicou a necessidade de correção da acidez por meio de calagem, que ocorreu aplicando-se a dose de $4,67 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico, com posterior incubação do material. Uma vez finalizado o processo de preparação das matrizes, as mesmas foram adicionadas a vasos plásticos de 3 e 5 L, tomando-se como base a densidade dos materiais para a padronização dos volumes. Os vasos foram mantidos úmidos até o plantio das culturas, para a reativação da microbiota do solo.

Os vasos foram organizados em delineamento experimental totalmente ao acaso, tendo sido avaliados seis tratamentos em esquema fatorial: três matrizes (solo controle, rejeito depositado e material cheia 2020) e dois níveis de nutrientes (matrizes naturais, ou seja, sem adição de nutrientes; e matrizes com adição de solução nutritiva contendo macro e micronutrientes de planta). Dessa maneira, os tratamentos consistiram em: T1 – solo controle, sem adição de nutrientes; T2 – solo controle, com adição de nutrientes; T3 – rejeito depositado, sem adição de nutrientes; T4 – rejeito depositado, com adição de nutrientes; T5 – material da cheia de 2020, sem adição de nutrientes; T6 – material da cheia de 2020, com adição de nutrientes (Figura 37).

Cada um dos seis tratamentos citados foram, ainda, submetidos a dois tipos de água de irrigação, a saber: 1) água deionizada; e 2) mistura de água deionizada + rejeito depositado (para os vasos do T1 a T4) ou mistura de água deionizada + material da cheia de 2020 (para os vasos do T5 e T6). Essa distinção buscou representar a condição de campo, ou seja, os vasos contendo solo controle e rejeito depositado representam os efeitos potenciais da água de irrigação (contendo rejeito depositado) para o Compartimento 1, enquanto que os vasos contendo o material coletado após a cheia de 2020 receberam água de irrigação misturada ao mesmo material, para representarem os efeitos potenciais aos solos dos Compartimentos 2, 3 e 4. Com relação à água deionizada, essa foi estudada para representar uma condição de irrigação com água livre de qualquer tipo de contaminante.

Foram utilizadas três caixas d'água distintas, em que as matrizes “rejeito depositado” e “material cheia 2020” foram misturadas com a água, de forma a simular a condição de máxima turbidez do rio Doce. Cada caixa d'água contendo as respectivas águas de irrigação foi dimensionada de modo a suprir todos os vasos durante o período de condução do experimento. Periodicamente, as amostras das caixas d'água foram coletadas para análise de EPTs nas frações total e dissolvida (Figura 37).

Figura 37 – Vasos organizados para início do experimento na casa de vegetação e amostras das águas de irrigação para envio ao laboratório. Fotos: Lactec (2020).



Em cada arranjo de tratamentos (T1 a T6), irrigados com água deionizada e água em mistura com as matrizes contendo rejeito (para simular a irrigação com o rio Doce), foram cultivadas cinco espécies de interesse agrícola (alface – *Lactuca sativa* - folhosa de consumo in natura; beterraba – *Beta vulgaris* - tubérculo¹ de consumo; feijão – *Phaseolus vulgaris* - *Fabacea* com produção de vagens e grãos; milho – *Zea mays* L. - *Poacea* para produção de grãos; e morango – *Fragaria x ananassa* Duch. - fruto² de consumo in natura) em quadruplicata. Ao total, o experimento contou com a condução de 240 vasos, sendo 192 vasos de 3 L para alface, beterraba, feijão e morango, e 48 vasos de 5 L para promover o pleno desenvolvimento da planta de milho.

No dia 03/03/20, nos vasos correspondentes aos tratamentos com adição de nutrientes (T2, T4 e T6), foi aplicada solução nutritiva (Tabela 14) na dosagem de 400 mL (200 mL de solução nutritiva + 200 mL de água) para os vasos de 3 L, e 660 mL (330 mL de solução nutritiva + 330 mL de água) nos vasos de 5 L. Após 20 dias, foi realizada uma cobertura com ureia para o fornecimento de nitrogênio às plantas. Por fim, fez-se uma terceira aplicação de fosfato monoamônico (MAP) nos vasos dos tratamentos T2, T4 e T6. Sempre quando realizada a aplicação de solução nutritiva, os vasos dos tratamentos sem nutrientes (T1, T3 e T5) eram irrigados na mesma proporção com água deionizada.

1 Botanicamente, a parte comestível da beterraba é chamada de raiz tuberosa; porém, neste relatório, o termo adotado será “tubérculo” para facilitar o entendimento.

2 Da mesma maneira, o termo botânico correto para a parte comestível do morango é infrutescência. Neste trabalho, no entanto, trataremos pelo termo “fruto”, que é de senso comum.

Tabela 14 – Composição da solução nutritiva aplicada aos vasos do tratamento com adição de nutrientes (T2, T4 e T6).

Elemento fornecido	Produto utilizado	Vaso de 3 L	Vaso de 5 L
		----- mg/vaso -----	
S	Sulfato de amônio	620	1033
		131	219
N	Ureia	479	799
		103	171
P	Fosfato monoamônico	853	1421
		365	608
K	Fosfato monopotássico	1607	2679
B	Ácido bórico	17	28
Cu	Sulfato de cobre	12	20
Zn	Sulfato de zinco	25	41
Mo	Molibdato de amônio	4	12

Os plantios de alface (crespa verde, plantio por muda), beterraba (plantio por muda), feijão (cultivar IPR Tuiuiu®, plantio por semente) e milho (híbrido 30R50VYH da Pioneer®, plantio por semente) ocorreram no dia 04/03/2020. O transplante das mudas de morango (estolão) foi realizado cinco dias depois, em 09/03/2020, devido à falta de oferta de mudas no período. Após o pegamento das mudas e germinação das sementes, todas as plantas foram raleadas de maneira a permitir o desenvolvimento e condução de um indivíduo por vaso.

Durante o experimento, a umidade dos vasos foi mantida de acordo com as demandas de evapotranspiração, aplicando-se diariamente as devidas águas de irrigação em cada caso. Pratos coletores foram utilizados em cada vaso com a finalidade de reter a água da drenagem, evitando a perda dos nutrientes aplicados. Foram instaladas armadilhas de atração por cor para controle de mosca branca (*Bemisia tabaci*), mas ressalta-se que não foram utilizados produtos químicos durante a execução do ensaio. Apenas para a cultura do milho, as sementes foram adquiridas com tratamento industrial prévio, contendo Derosal Plus® (2,0 mL kg⁻¹), Maxim XL® (1,5 mL kg⁻¹), K-Obiol® 25 EC (0,08 mL kg⁻¹) e Actellic 500 EC® (0,016 mL kg⁻¹). No decorrer do desenvolvimento das plantas os vasos foram fotografados periodicamente, para acompanhamento do crescimento e realização de diagnose visual de eventuais sintomas.

Após 30 dias do plantio, em 03/04/2020, as plantas de alface foram colhidas rente ao solo e as plantas de beterraba foram coletadas em duas partes: folhas (folhas e talos) e raiz tuberosa. Destaca-se que nos vasos sem adição de nutrientes (T1, T3 e T6), independentemente da água de irrigação utilizada, a parte comestível da beterraba (raiz tuberosa) não se desenvolveu em tamanho suficiente para colheita e, portanto, só foram coletadas as folhas nestes casos. Na data de 09/04/2020 ocorreram as coletas das plantas de feijão e milho, tendo sido realizado o corte de toda a parte aérea de ambas as espécies (incluindo folhas e talos para o feijão, e folhas e caule para o milho). É importante ressaltar que as plantas se encontravam em diferentes estádios fenológicos de acordo com os tratamentos nos momentos de coleta (por exemplo, nos vasos sem adição de nutrientes, as plantas ainda estavam em fases iniciais de emissão de folhas; enquanto que nos vasos com adição de nutrientes, via de regra,

as plantas apresentavam desenvolvimento mais avançado). Devido a esse fator, a coleta das plantas foi necessária nas datas indicadas, para evitar a senescência de alguns indivíduos e a consequente inviabilização da análise do tecido vegetal. Assim, para milho e feijão, ambos se encontravam em fase vegetativa no momento da coleta, não tendo sido possível amostrar as respectivas partes comestíveis (vagens e espigas).

Foram obtidas as massas frescas das amostras colhidas, com posterior lavagem dos tecidos vegetais com água tratada e deionizada, e secagem em estufa de circulação forçada a 47 °C. Após obtenção de massa constante, as massas secas foram mensuradas em balança de precisão e as amostras foram enviadas para laboratório para dosagem de EPTs e nutrientes, cuja metodologia seguiu a apresentada no item 2.2.1.3.6.1 do Tomo III (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

Os teores de EPTs e nutrientes dos tecidos vegetais (em base seca) foram ponderados para as respectivas massas produzidas em cada tratamento, obtendo-se os conteúdos dos elementos extraídos em cada caso. Esse cálculo é feito multiplicando-se os teores (em mg kg⁻¹) pela massa seca produzida, e é importante para o entendimento da ocorrência de diluições e/ou concentrações devido a maior ou menor produção de biomassa em função dos tratamentos.

Por fim, o morangueiro foi conduzido até a data de 02/06/2020 para possibilitar a máxima produção de frutos. Como o processo de frutificação é contínuo, foi realizado um acompanhamento diário, com a coleta de cada fruto maduro por planta, mensuração de massa fresca e massa seca. Na data mencionada, a parte aérea de todas as plantas de morango foi coletada rente ao solo (folíolos, pecíolos e estolhos) e os frutos foram coletados separadamente (maduros e verdes), repetindo-se os procedimentos já descritos (mensuração de massa fresca, lavagem com água tratada e deionizada, secagem em estufa de circulação forçada a 47 °C, mensuração de massa seca, extração e determinação dos teores de EPTs e nutrientes e, por fim, cálculo dos conteúdos dos mesmos).

Ao final do experimento, os substratos dos vasos foram separados das raízes e uma amostra de cada unidade experimental foi destinada à avaliação de rotina da fertilidade do solo e quantificação da fração pseudo total de EPTs, seguindo-se as mesmas metodologias para as amostras de campo (EMBRAPA, 2009; USEPA, 2007). Ainda, uma repetição de cada tratamento (60 amostras) foi enviada para análise da distribuição granulométrica, pois esse é um parâmetro do solo em que se espera menor variabilidade.

Foram feitos testes de Kruskal-Wallis para cada variável analisada considerando os seis tratamentos sob estudo, tanto sob irrigação com água deionizada quanto com irrigação com a água que simula as condições de turbidez do rio Doce. As comparações múltiplas foram feitas pelo teste de Diferença Mínima Significativa (LSD de Fisher), juntamente ao procedimento de correção do p-valor pelo método de Holm-Bonferroni. Como resultado das comparações duas a duas, interpretando-se os p-valores a 5% de significância, foi obtida uma tabela com os tratamentos agrupados pelos seus respectivos postos médios.

Para facilitar a interpretação e a visualização de quais tratamentos apresentam maiores valores em cada uma das variáveis, foi proposto um índice, cujos valores variam de 0 a 1, sendo mais próximos de 1 à medida que os grupos com maiores valores de postos são formados por um único tratamento. O escore de cada tratamento é dado pelo grupo ao qual ele pertence, de acordo com a equação (1).

$$P_i = 1 - \frac{(\sum_{g=1}^i k_g) - 1}{k - 1} \quad (1)$$

em que:

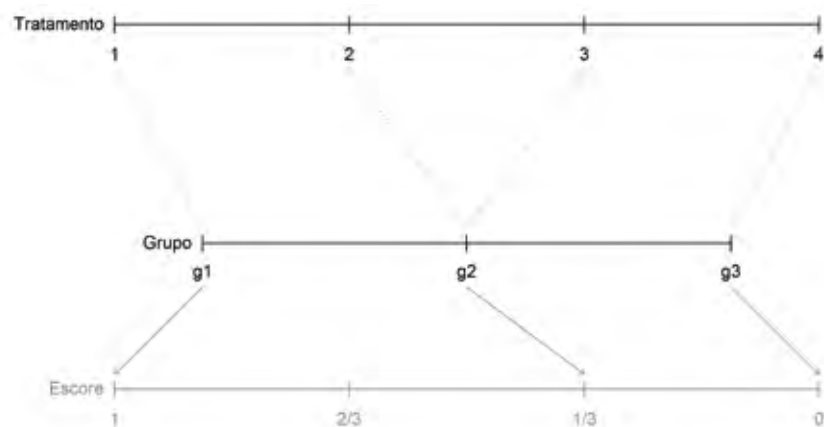
k é o número total de tratamentos;

$i = 1$, indexa os grupos ordenados pela maior média dos postos;

k_g é o número de tratamentos dentro do grupo.

O diagrama da Figura 38 exemplifica um caso em que há quatro tratamentos, que após a execução do teste, foram separados em três grupos. Como o primeiro e último tratamento aparecem sozinhos nos seus referentes grupos, eles recebem os escores de 1 e 0, respectivamente. Já os tratamentos 2 e 3 recebem o escore de um terço, pois ambos fazem parte do segundo grupo. Sendo assim, tratamentos com maiores escores possuem maiores médias de postos. Quando não há diferença entre os tratamentos, todos recebem escores 0.

Figura 38 – Diagrama exemplificando a criação de escores que separam os tratamentos em grupos de acordo com as médias de postos.



A partir dos escores obtidos, foram elaboradas figuras aplicando-se o índice por meio de um mapa de calor (*heatmap*), no qual as cores frias representam os menores valores do índice enquanto que as cores quentes representam os maiores valores. Em cada linha e para cada variável do gráfico, foi feito o teste de Kruskal-Wallis e calculado o índice, controlando o erro para as comparações múltiplas. A ordenação, tanto dos tratamentos, quanto das culturas, foi feita com base na média dos valores de .

As análises e gráficos foram feitas no ambiente estatístico R (R Core Team, 2018), utilizando os pacotes que formam a base de linguagem, juntamente aos seguintes pacotes adicionais: *readxl* (WICKHAM; BRYAN, 2018): leitura das tabelas de dados no formato Excel; *ggplot2* (WICKHAM, 2016): construção de gráficos; *tidyr* (WICKHAM; HENRY, 2018): manipulação do formato da tabela de dados com as funções *gather* e *spread*; *dplyr* (WICKHAM et al. 2018): transformações na tabela de dados e cálculo de sumários a partir de agrupamentos; *agricolae* (MENDIBURU, 2017): execução dos testes de Kruskal-Wallis e as respectivas comparações múltiplas (função *kruskal*).

Apesar de existirem métodos para tratar de dados intervalares, os resultados destes dependem da distribuição de probabilidades escolhida para modelar o problema. As estratégias mais comuns incluem utilizar o valor do limite, ou parcelas deste, como dado pontual. Isso torna importante a

avaliação do montante de dados no limite de quantificação (LQ) ou de detecção (LD), pois quanto maior a quantidade, mais enviesados serão os valores de estatísticas como média, mediana e desvio-padrão.

Vale destacar que variáveis com todos os dados no limite não trazem informações adicionais às análises estatísticas, uma vez que, até mesmo utilizando métodos para dados intervalares, não é possível estimar os parâmetros da distribuição de probabilidade.

Feitas estas ponderações, na avaliação estatística do experimento, os valores de LQ foram mantidos como o próprio valor do limite, enquanto os valores de LD foram substituídos pelo valor de um terço do valor de LQ. Variáveis com todos os dados nos limites foram removidas das análises com base no Kruskal-Wallis, já que não possuem variação para realização do teste, mas foram mantidas para as representações gráficas descritivas.

Os teores de EPTs quantificados nos tecidos frescos das partes comestíveis avaliadas (alface, beterraba e morango) foram analisados para três cenários de consumo ou aquisição de alimentos, de acordo com classificação dos alimentos descrita em IBGE (2011) e conforme dados obtidos em IBGE (2020) para os cenários de consumo no meio rural, aquisição no meio rural e aquisição no estado de Minas Gerais. Os limites de ingestão de EPTs diários foram obtidos das doses de referência (mg de EPT por kg de peso corpóreo por dia) estipuladas por órgãos ambientais do Brasil e do exterior (CETESB, 2020; CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION, 2016; CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION, 2019; USEPA, 2020), sempre escolhendo a dose mais restritiva, e considerando um indivíduo adulto de peso corpóreo médio de 70 kg. Os limites finais de ingestão diária obtidos foram (mg/adulto de 70kg): Al: 20 mg; Ag: 0,35 mg; As: 0,021 mg; Ba: 14 mg; Cd: 0,06 mg; Co: 0,021 mg; Cr: 0,21 mg; Cu: 2,8 mg; Fe: 49 mg; Hg: 0,04 mg; Mn: 9,8 mg; Mo: 0,35 mg; Pb: 0,25 mg; Sb: 0,028 mg; Se: 0,35 mg; Sn: 42 mg; e Zn: 21 mg. Utilizou-se a representação das porcentagens de ingestão a partir de três faixas de valores: até 50% do limite de ingestão diária: cor verde; entre 50 e 100% do limite de ingestão diária: cor amarela; e acima de 100% do limite de ingestão diária: cor vermelha. A proposição dessa faixa de cores busca apresentar, de forma visual, o maior ou menor potencial de dano de acordo com cada situação.

Para a beterraba, em função da possibilidade de ingestão tanto do tubérculo quanto das folhas, os cenários foram criados para ambas as partes da planta. Para alface e morango, os cenários foram criados apenas para as partes comestíveis (folhas e frutos, respectivamente). Por fim, em função da impossibilidade de obtenção de vagens e espigas das plantas de feijão e milho, para essas duas culturas, não foram criados cenários de consumo.

Adicionalmente à análise de cenários de consumo dos vegetais cultivados no experimento foi realizada uma avaliação do ponto de vista da toxicidade às plantas. Para tanto, foram levantadas informações na literatura sobre faixas de teores máximos e mínimos de EPTs e nutrientes normalmente encontrados no tecido vegetal das culturas selecionadas, além daqueles reportados como teores tóxicos para as plantas (ANTUNES; JÚNIOR; SCHWENGBER, 2016; BONNE; VARNER, 1965; RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999; COMISSÃO, 2004; COSTA, 2014; FAQUIN, 2005; FLORES et al., 2019; HOCHMUTH et al., 2018; IPNI, 1998; JONES, 1998; KERBAUY, 2019; MALAVOLTA, 2006; MARSCHNER, 1997; MOCELLIN, 2004; NAEEM; ANSARI; GILL, 2020; OGUNDELE; ADIO; OLUDELE, 2015; PAULETTI, 2011; RAIJ, 2011; ROHDE, 2013; SBCS, 2017, 2018, 2019; VIECELLI, 2017). Quando da impossibilidade de obtenção de referências específicas para a espécie, foram utilizadas referências para tecidos vegetais

em geral, sempre dando preferência para a representação do teor mínimo e tóxico de cada EPT para comparação com a fisiologia vegetal.

Tanto a avaliação de cenários de consumo dos vegetais quanto as comparações com a literatura para interpretação de teores eventualmente tóxicos às plantas foram realizadas para auxiliar na interpretação do dano pela contaminação do solo por elementos potencialmente tóxicos.

2.2.1.5 Análise de danos ao solo

A interpretação dos três danos foi realizada conforme os mesmos critérios de gravidade e nos mesmos indicadores estabelecidos no item 2.2.1.5 do relatório de danos aos solos do Compartimento 1 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Apenas para a avaliação do dano à alteração da composição do solo os indicadores morfológicos (cor e pegajosidade) não foram avaliados, tendo sido incorporados os dados de distribuição granulométrica para auxiliar no diagnóstico desse dano. Essa alteração nos indicadores foi baseada no fato de que os depósitos de rejeitos ocorreram de forma difusa nas áreas afetadas dos Compartimentos à jusante da UHE Risoleta Neves. Assim, a avaliação morfológica não contribuiria de forma significativa para a identificação dos rejeitos, diferentemente do ocorrido para o Tecnossolo depositado no Compartimento 1, que apresentou critérios de cor e pegajosidade distintos de solos não impactados.

Importante ressaltar que os atributos avaliados foram prioritariamente comparados com a linha base, com posteriores interpretações adicionais com base em referências da literatura. Para os indicadores que não possuem linha base, a interpretação se baseou em comparações com o solo controle ou ainda na análise crítica do atributo, sob a perspectiva técnico-científica. O diagnóstico de cada um dos danos levou em consideração a verificação de todos os indicadores mensurados em conjunto.

2.2.2 ALTERAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO SOLO

Na Figura 39 a Figura 60 estão apresentados os difratogramas de raios X (DRX) das amostras superficiais (0-5 cm para L4, L5, L7, L8 e L9; 0-20 cm para os demais) e subsuperficiais (20-40 cm para todos os locais), comparando-se os pontos amostrados dentro da mancha de inundação e fora dela (controle) com um difratograma típico do rejeito remanescente na barragem de Fundão. No Apêndice B, encontram-se, também os resultados das amostras de solo coletadas nas áreas de mata nativa.

Os difratogramas individuais das amostras podem ser encontrados no Anexo A.

Verificou-se nos padrões de DRX que as amostras dos solos afetados nos Compartimentos 2, 3 e 4 (amostra L-1 afetada de cada ponto) apresentam assembléia mineralógica similar às amostras de solo controle (amostras PC de cada ponto) das mesmas localidades, e essas duas amostras se diferenciam do rejeito barrado de Fundão: amostras L e PC – maior ocorrência de quartzo nas frações areia e silte e

fração argila essencialmente caulínica, com ocorrência de gibbsita; rejeito barrado de Fundão - picos de alta intensidade de hematita e apenas resíduo de caulinita.

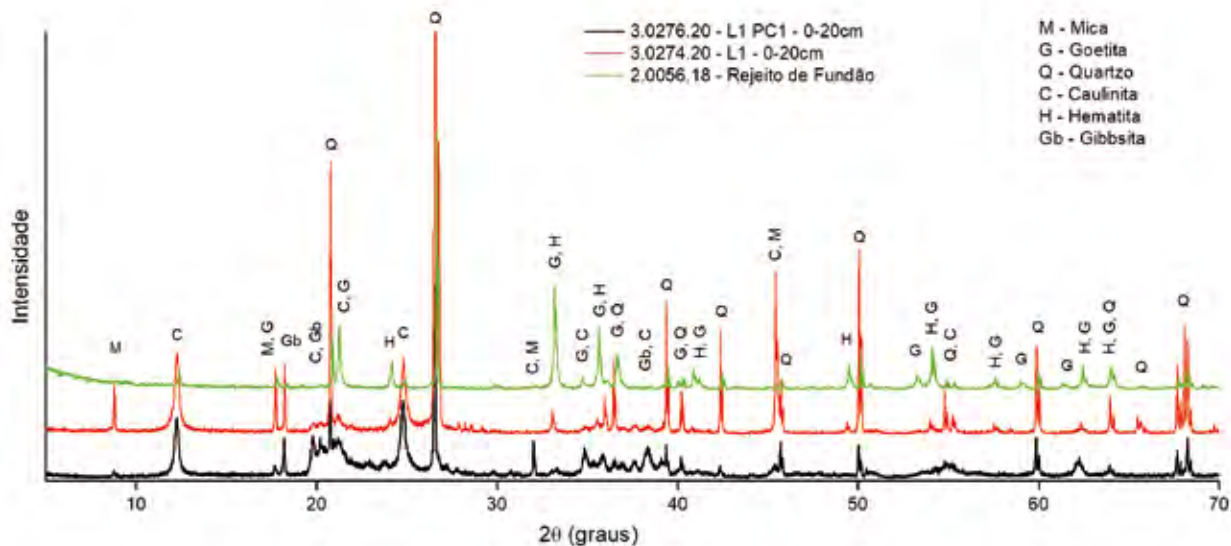
Em uma amostra de solo com todas as suas frações a posição para melhor identificar a hematita, onde não há sobreposições com a difração de outros minerais, é em $33,3^\circ 2\theta$ (radiação $\text{CuK}\alpha$). Em todos os DRX do rejeito de Fundão, verifica-se uma difração intensa identificada como hematita e goethita. Verdadeiramente, apesar da proximidade de difração nessa posição (hematita (104) em $33,3^\circ$ e goethita (130) em $33,6^\circ 2\theta$), o pico é majoritariamente devido à presença de hematita; para hematita essa difração apresenta intensidade de 100% e para a goethita apenas 30% (CHEN, 1977). A mineralogia hematítica do rejeito de Fundão é compatível com a rocha de origem (Itabirito), de onde se extrai o minério de ferro (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b).

Durante a dinâmica do rio Doce houve intensa diluição do rejeito extravasado do Compartimento 1 em direção à foz do rio. O material sedimentar que passou pela barragem de Risoleta Neves nos eventos de cheia foi sendo misturado com os solos e sedimentos à jusante da barragem (Compartimentos 2, 3 e 4) e foi perdendo sua identidade mineralógica hematítica em relação à sua origem, identidade esta que ainda se observa nas áreas de Tecnossolo formadas à montante (Compartimento 1) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Essa diluição é extremamente importante para reduzir os efeitos deletérios do desastre nos ambientes em direção à foz do rio. A matriz hematítica do rejeito de Fundão torna esse material um substrato de alta fragilidade ambiental. Os óxidos de ferro apresentam baixa formação de cargas superficiais negativas (CTC) devido à baixa acidez dos grupos $-\text{FeOH}$ na superfície do mineral, associado ao seu elevado valor de ponto de carga zero (PCZ) (MELO; ALLEONI, 2009). Isso faz com que predominem cargas positivas de superfície (CTA), tornando o mineral de baixo potencial de adsorção de nutrientes e EPTs catiônicos, como Pb^{2+} . Por outro lado, a matriz caulínica observada nas amostras das manchas de extravasamento das áreas a jusante de Risoleta Neves garante o predomínio de CTC sobre CTA e amplia a resiliência ambiental desse material (maior capacidade filtrante de nutrientes e EPTs).

Em relação às duas profundidades estudadas, verifica-se ligeiramente maior ocorrência de hematita na camada mais superficial do material das áreas afetadas. Já nos padrões de DRX da camada de 20 a 40 cm a difração da hematita em $33,3^\circ 2\theta$ não é tão perceptível. Isso é uma evidência de maior mistura da base do material proveniente das cheias com os solos e sedimentos naturais da calha do rio Doce.

Figura 39 – Difratoograma de raios X da amostra L1 (afetada) em comparação à amostra L1 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

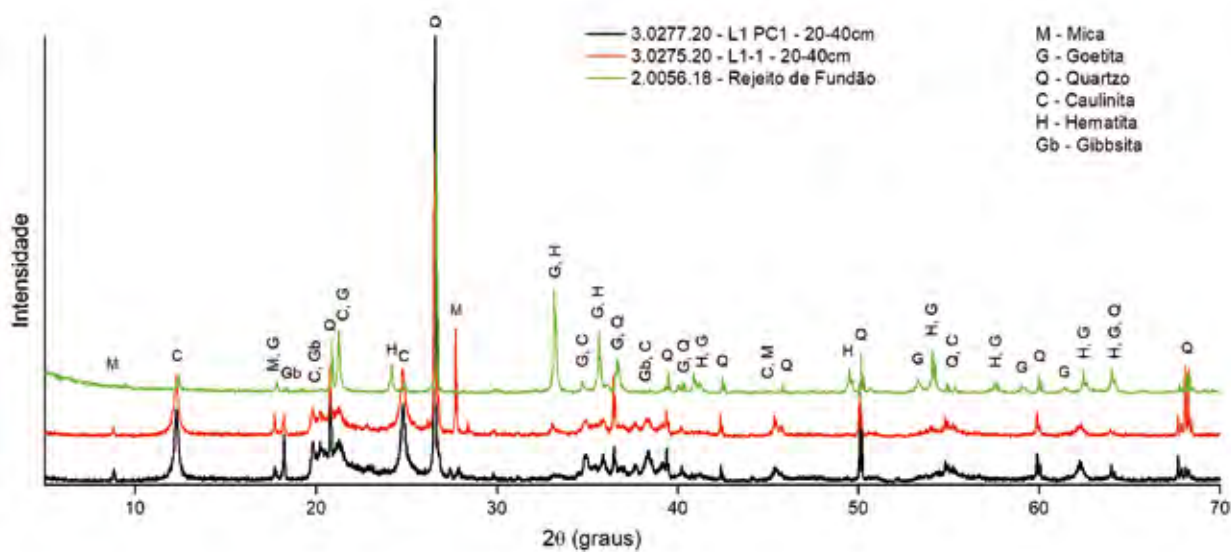
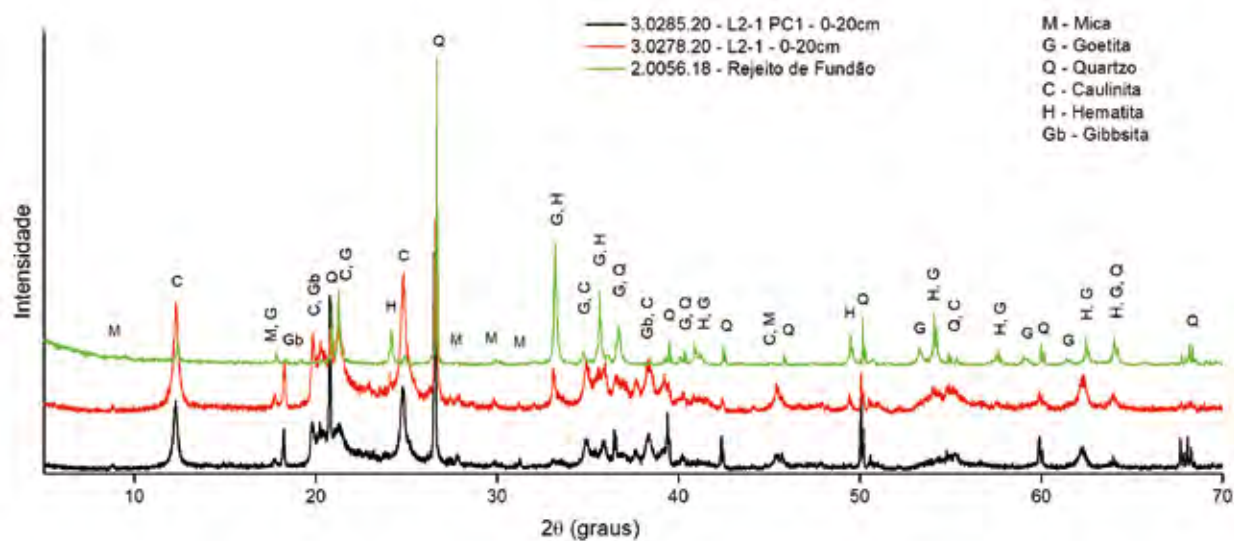


Figura 40 – Difratoograma de raios X da amostra L2 (afetada) em comparação à amostra L2 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

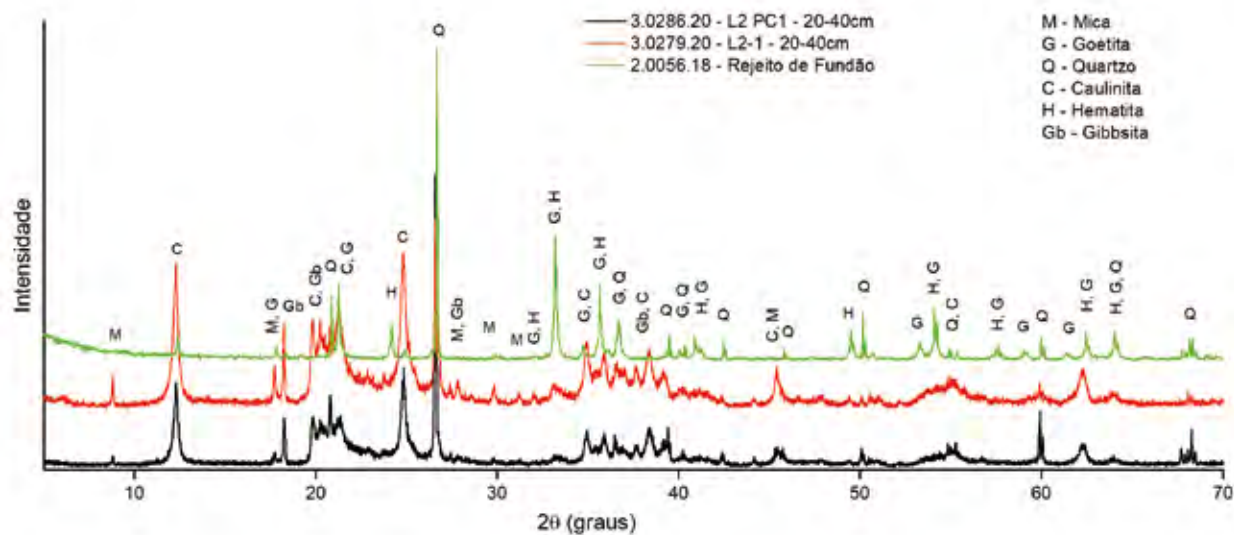
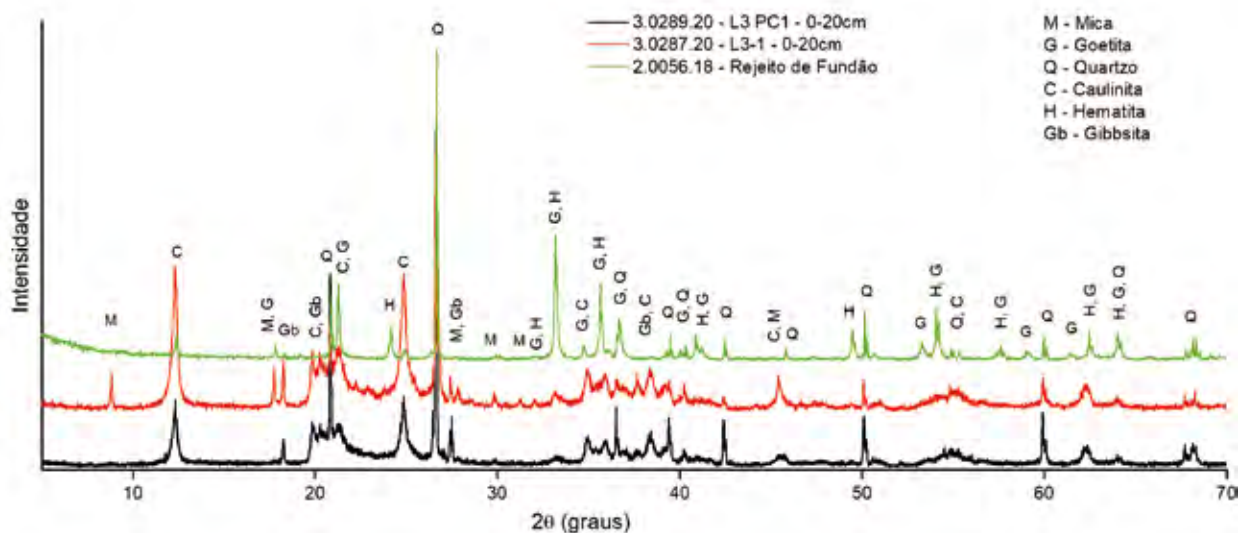


Figura 41 – Difratoograma de raios X da amostra L3 (afetada) em comparação à amostra L3 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

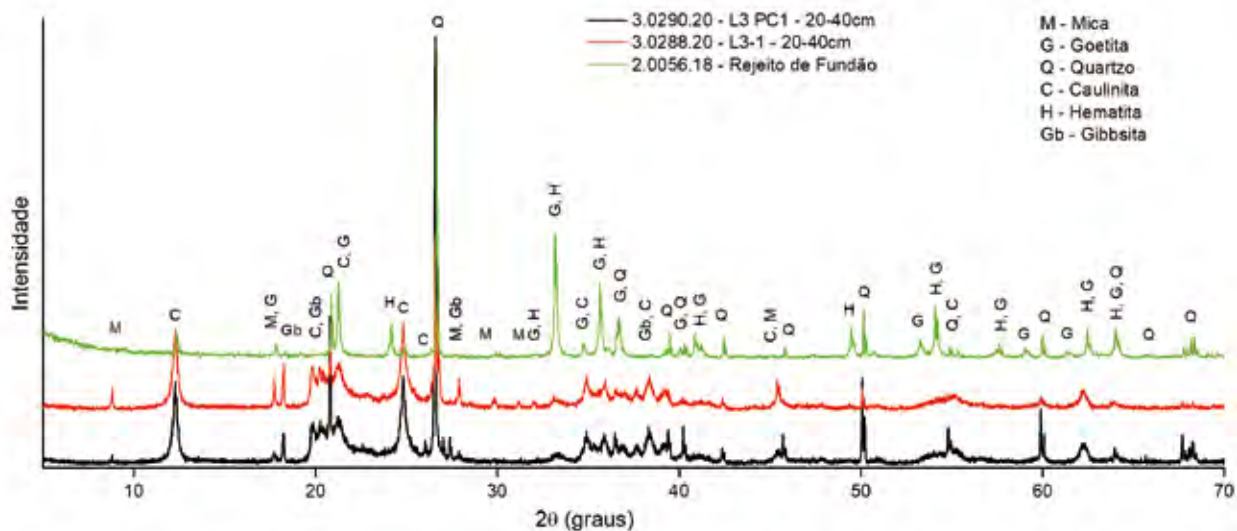
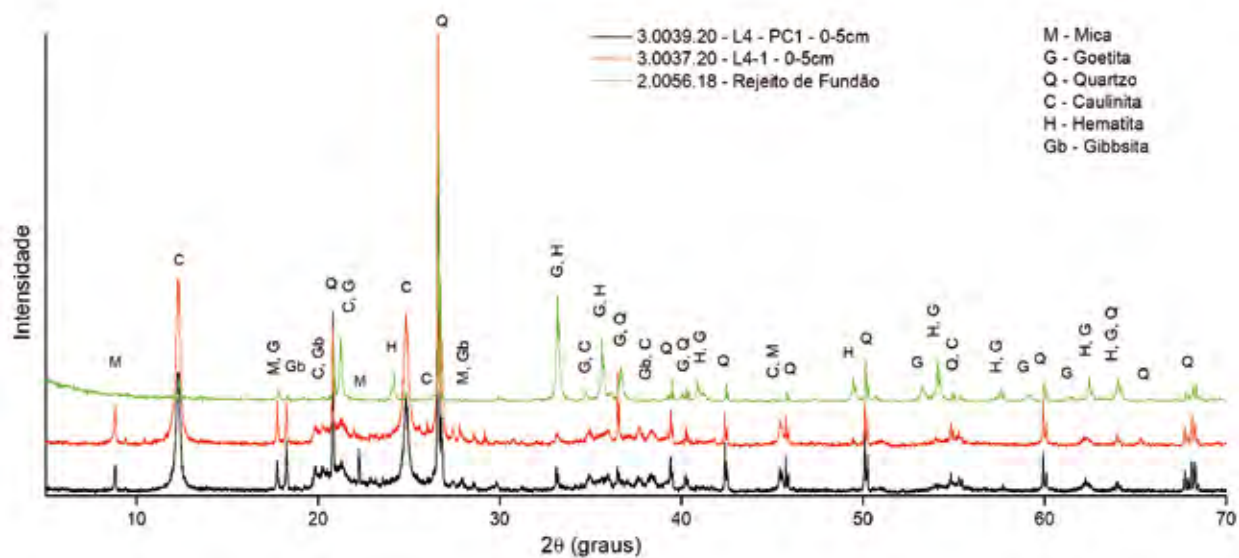


Figura 42 – Difratoograma de raios X da amostra L4 (afetada) em comparação à amostra L4 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

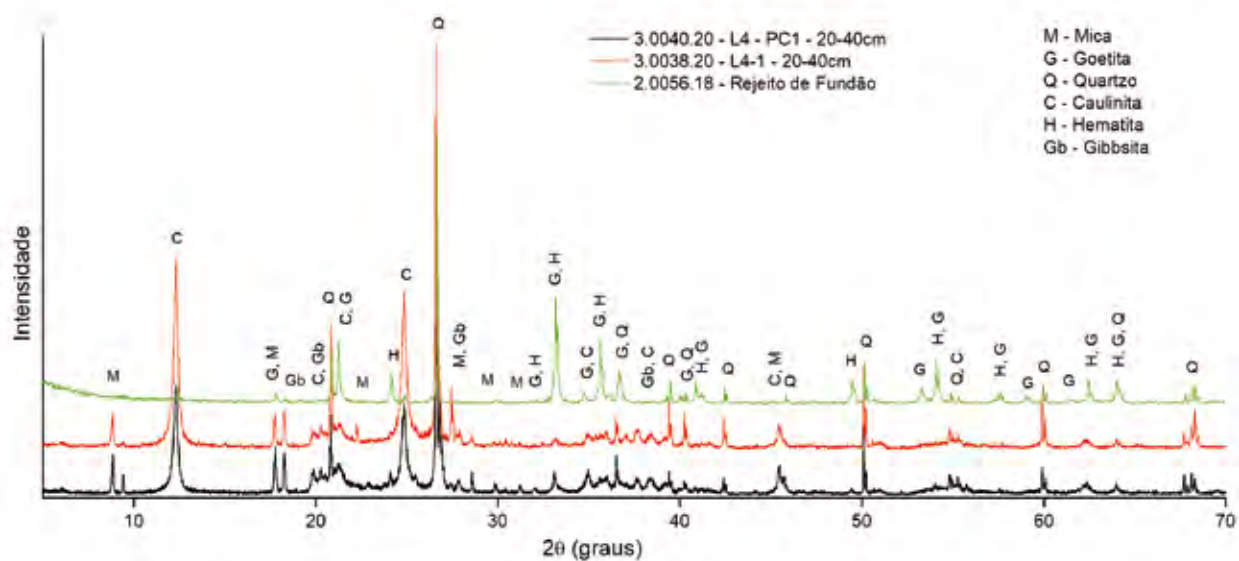
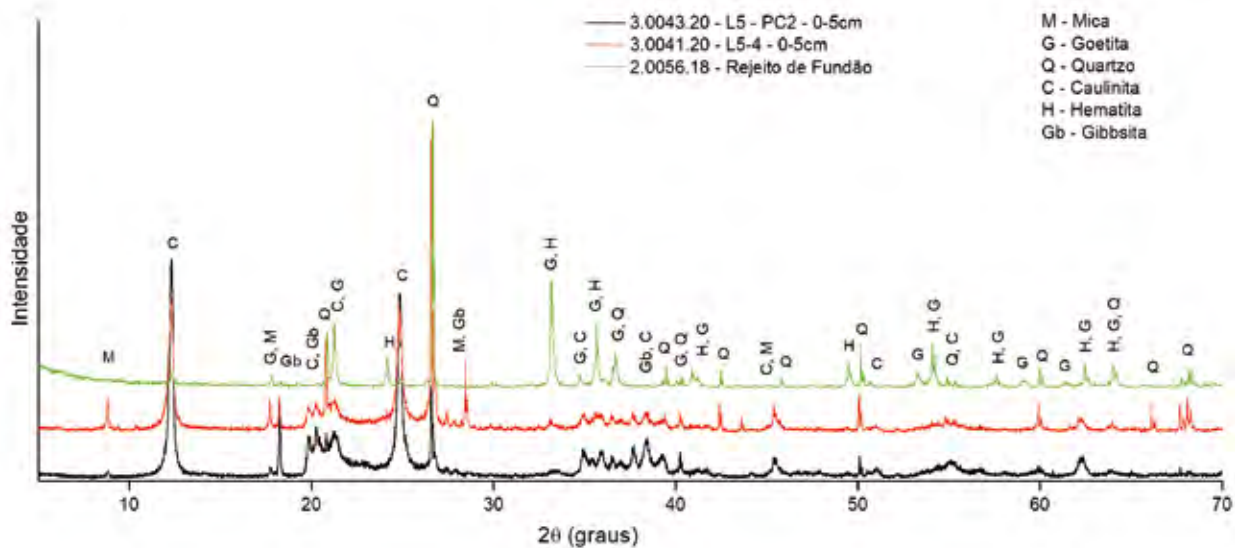


Figura 43 – Difratoograma de raios X da amostra L5 (afetada) em comparação à amostra L5 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

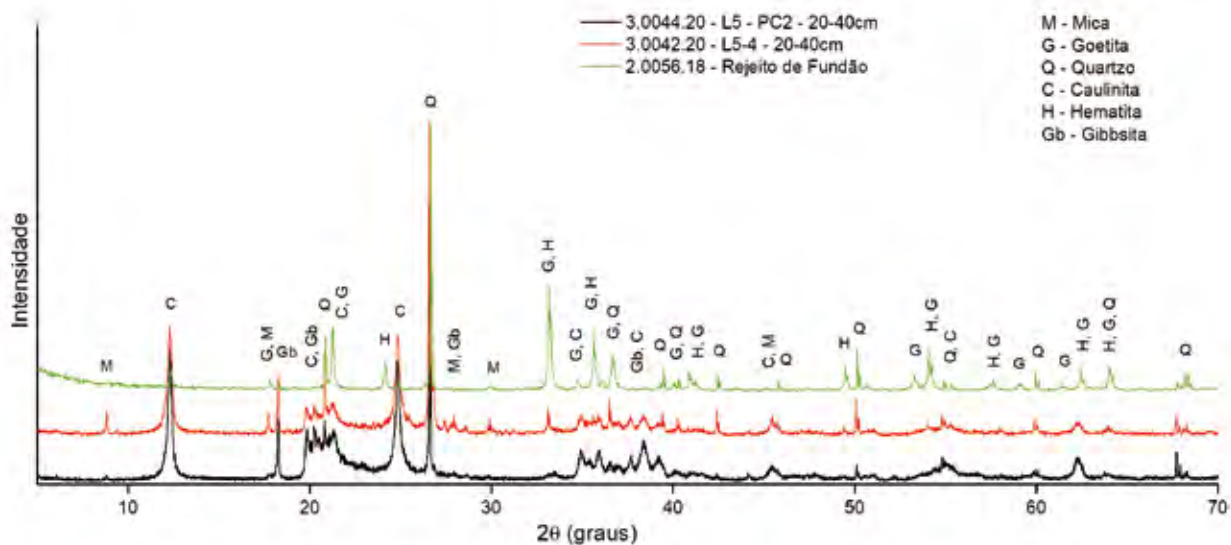
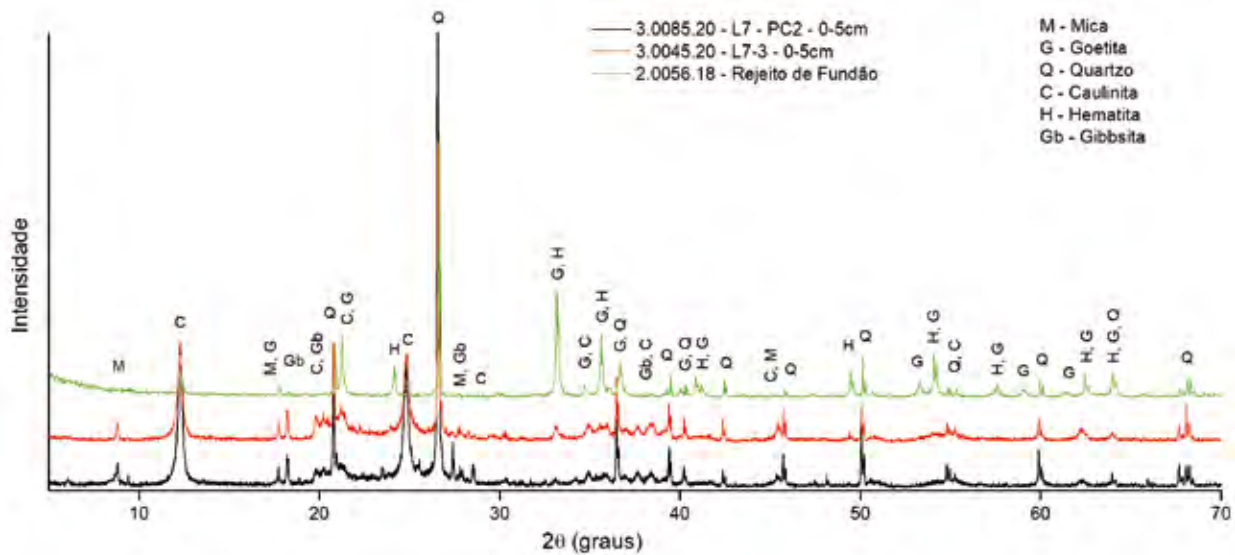


Figura 45 – Difratoograma de raios X da amostra L7 (afetada) em comparação à amostra L7 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

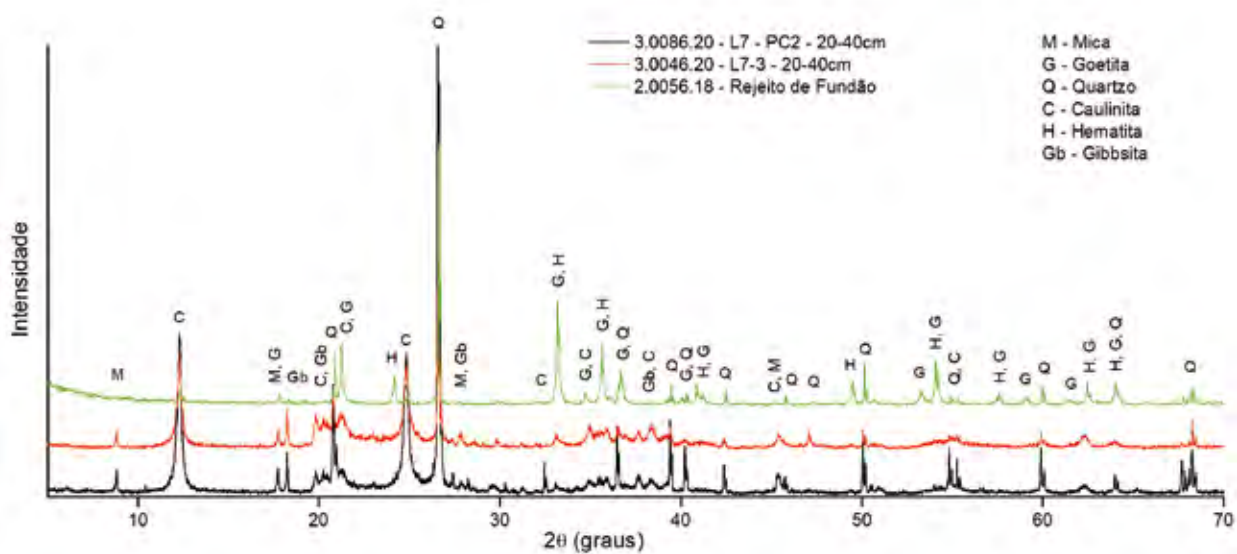
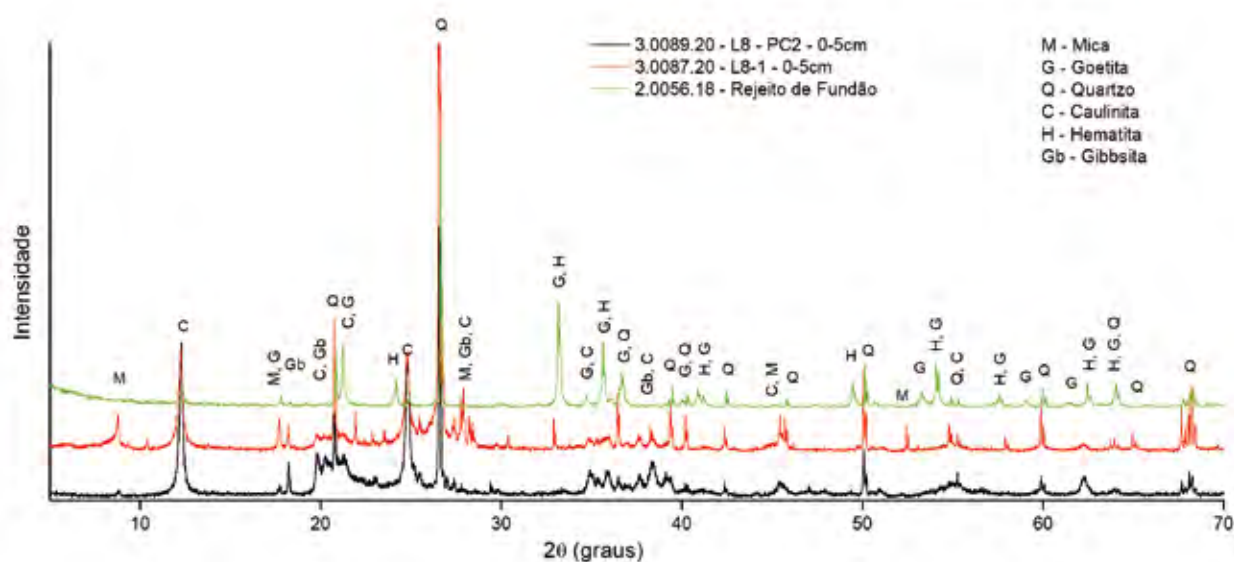


Figura 46 – Difratoograma de raios X da amostra L8 (afetada) em comparação à amostra L8 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

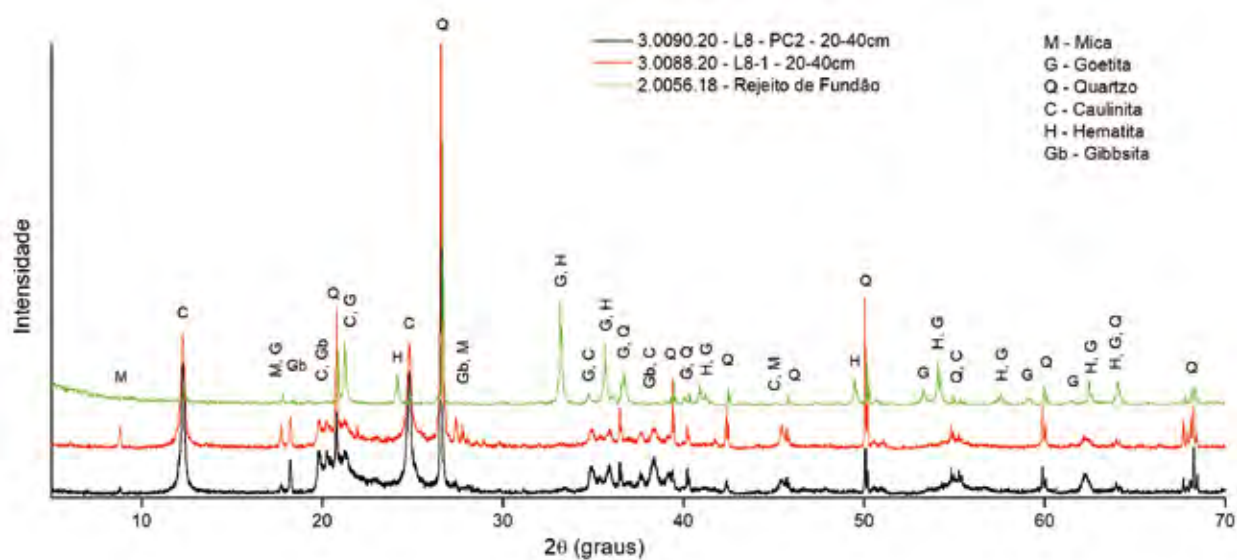
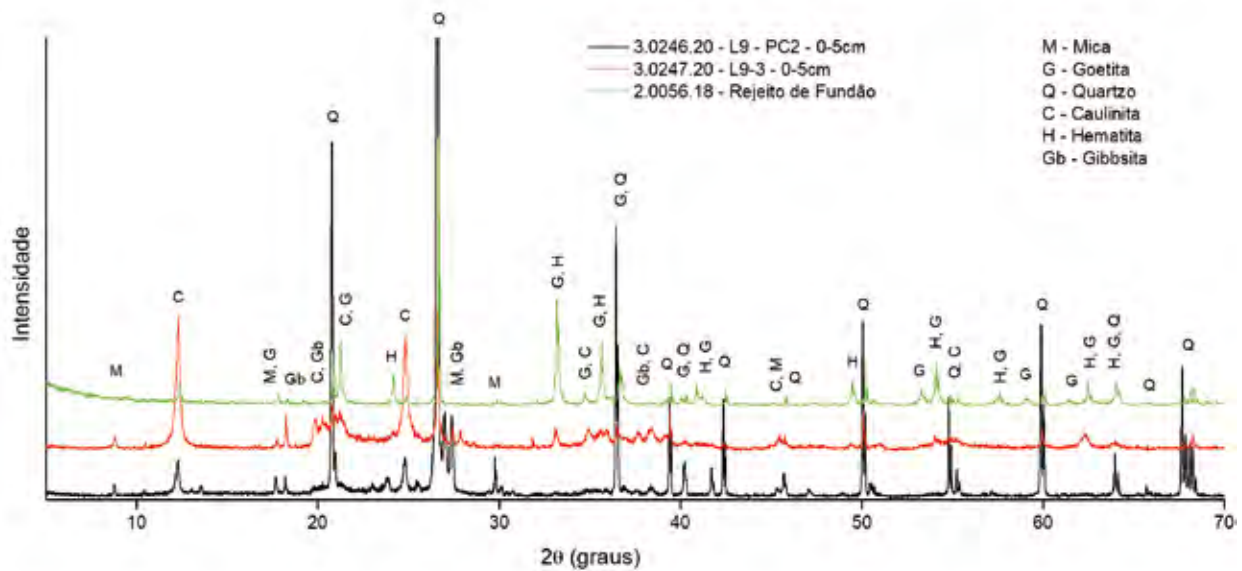


Figura 47 – Difratoograma de raios X da amostra L9 (afetada) em comparação à amostra L9 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-5 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

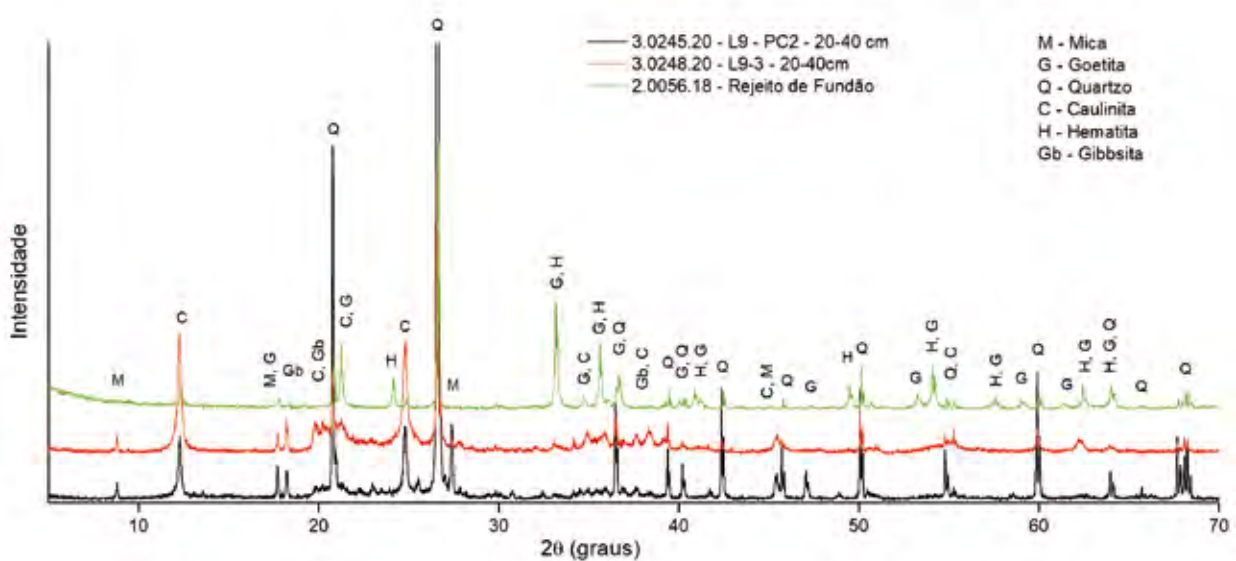
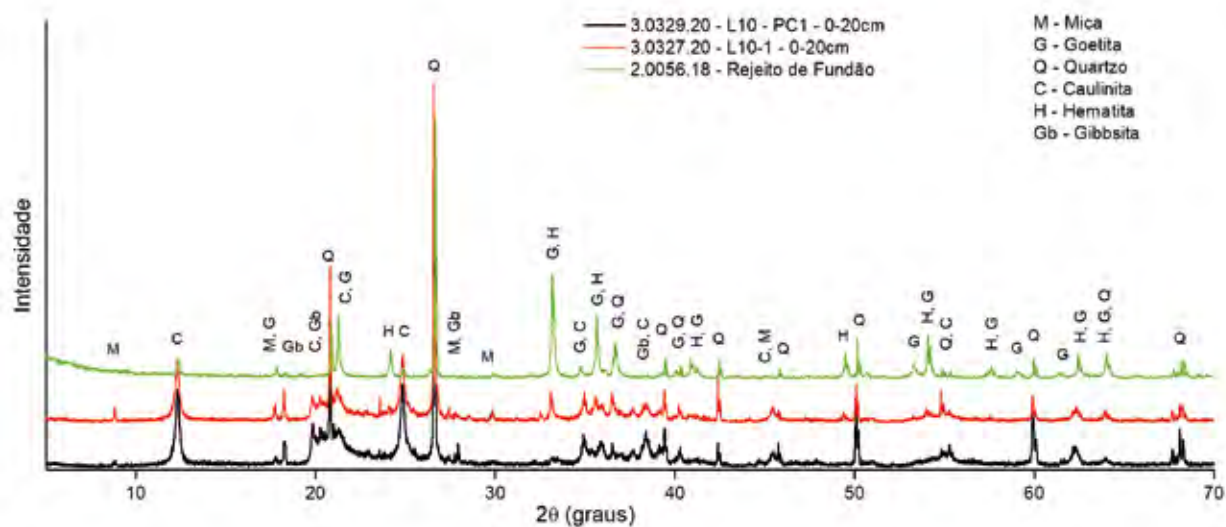


Figura 48 – Difratoograma de raios X da amostra L10 (afetada) em comparação à amostra L10 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

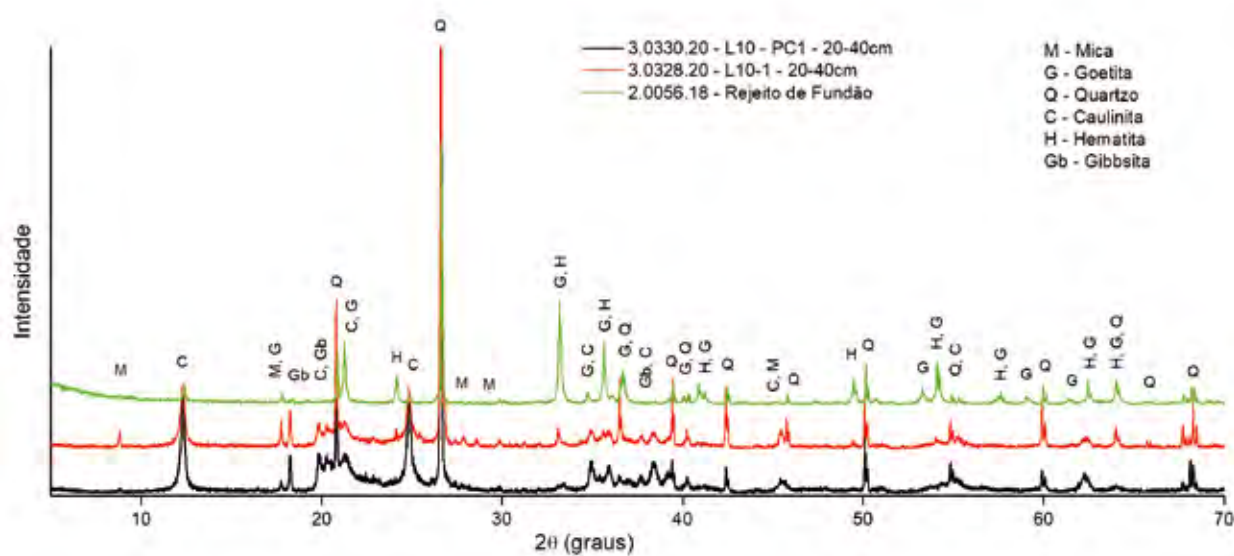
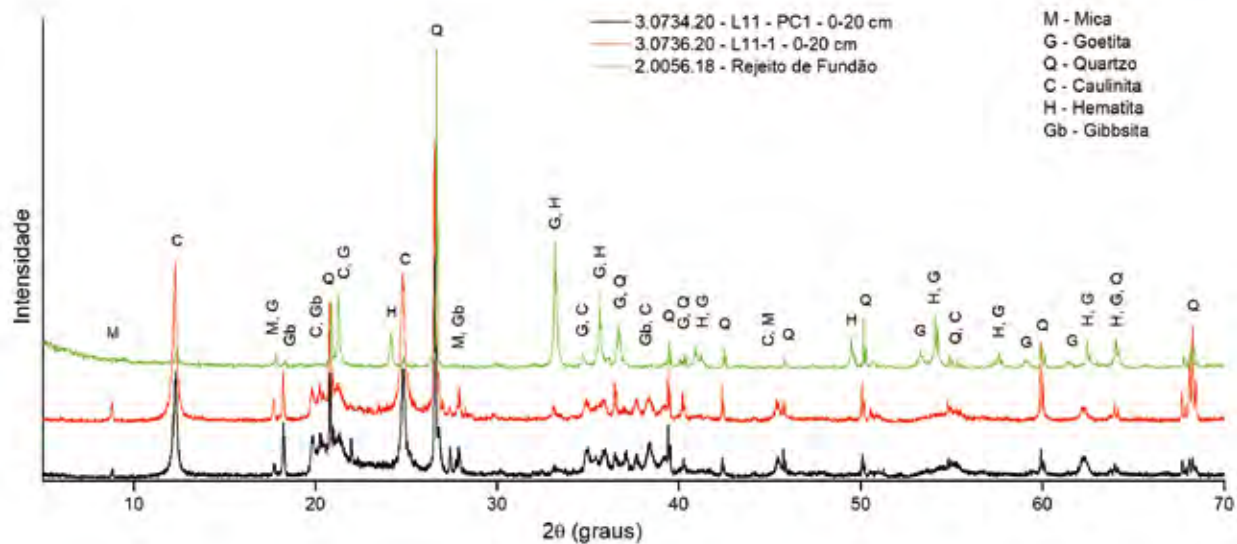


Figura 49 – Difratoograma de raios X da amostra L11 (afetada) em comparação à amostra L11 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

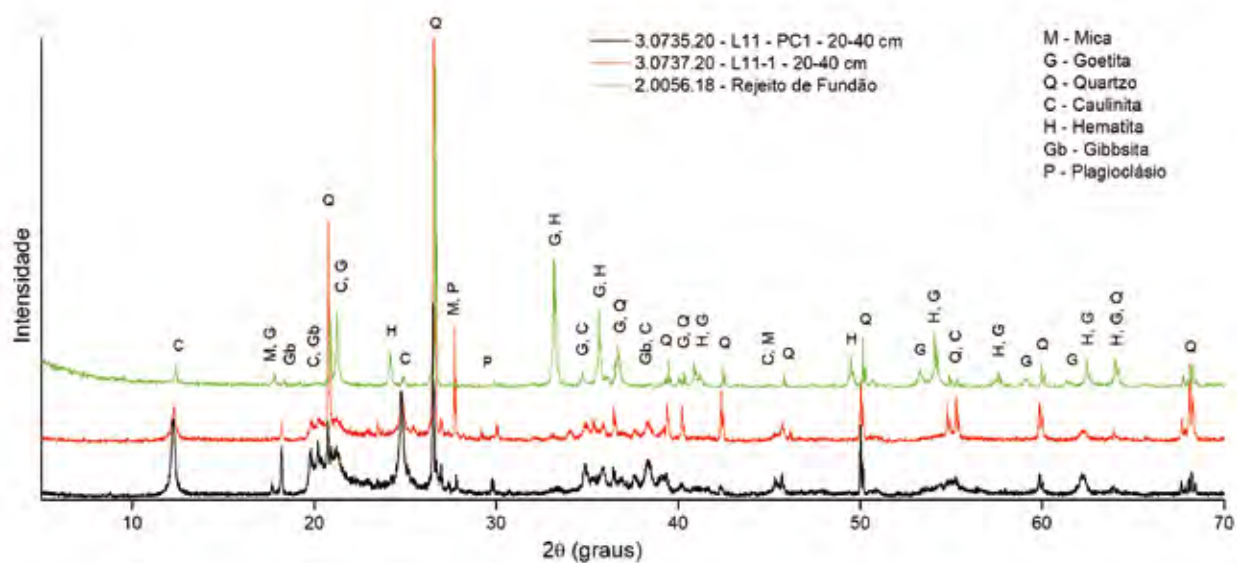
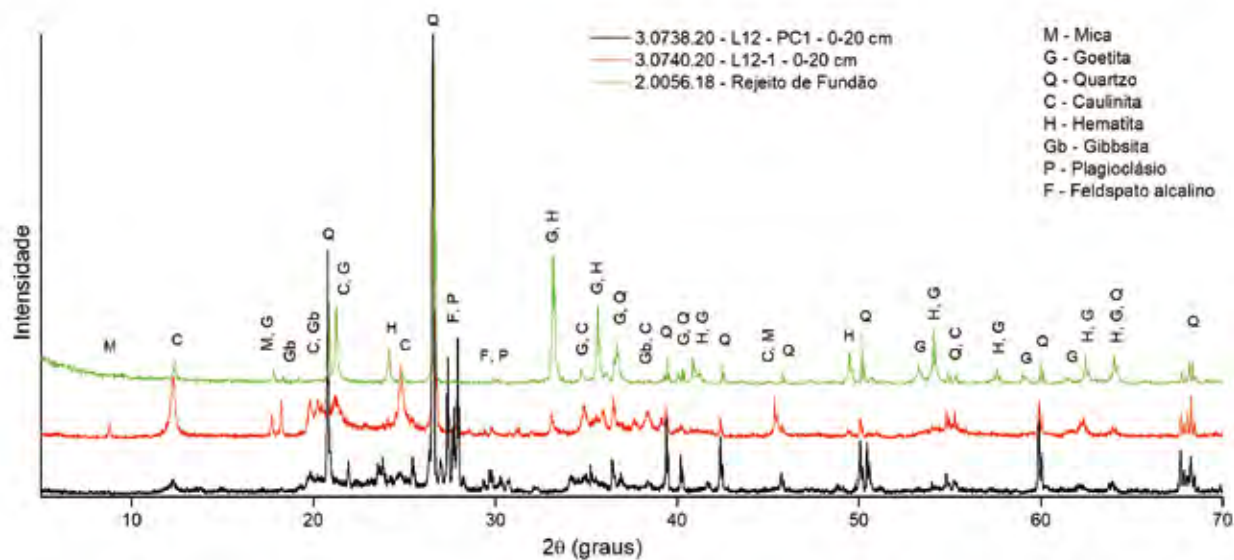


Figura 50 – Difratoograma de raios X da amostra L12 (afetada) em comparação à amostra L12 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

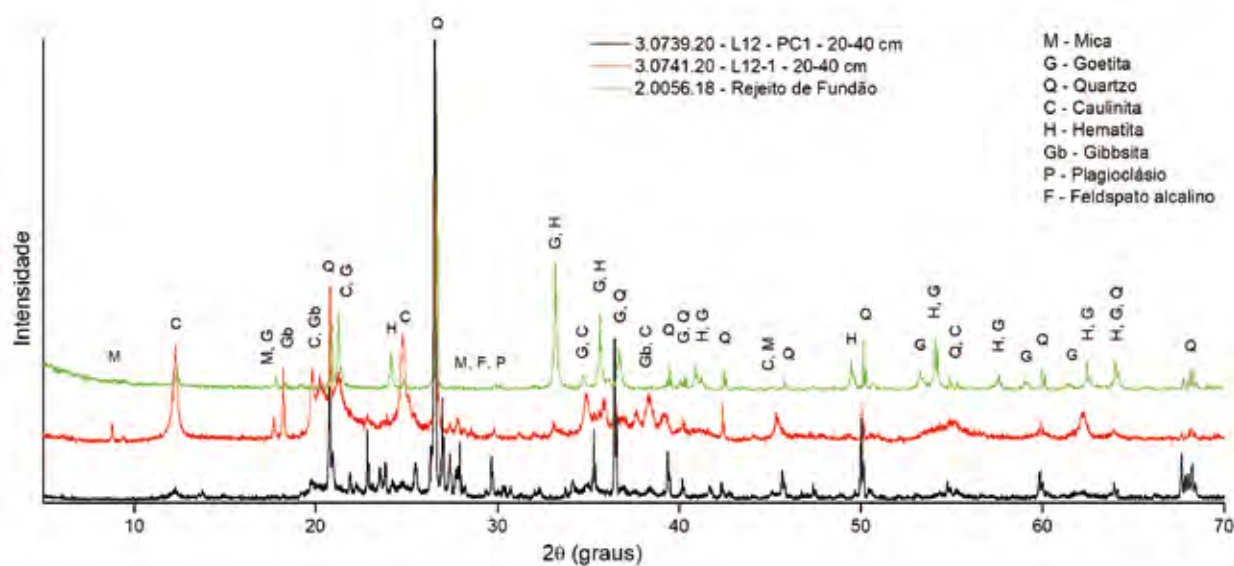
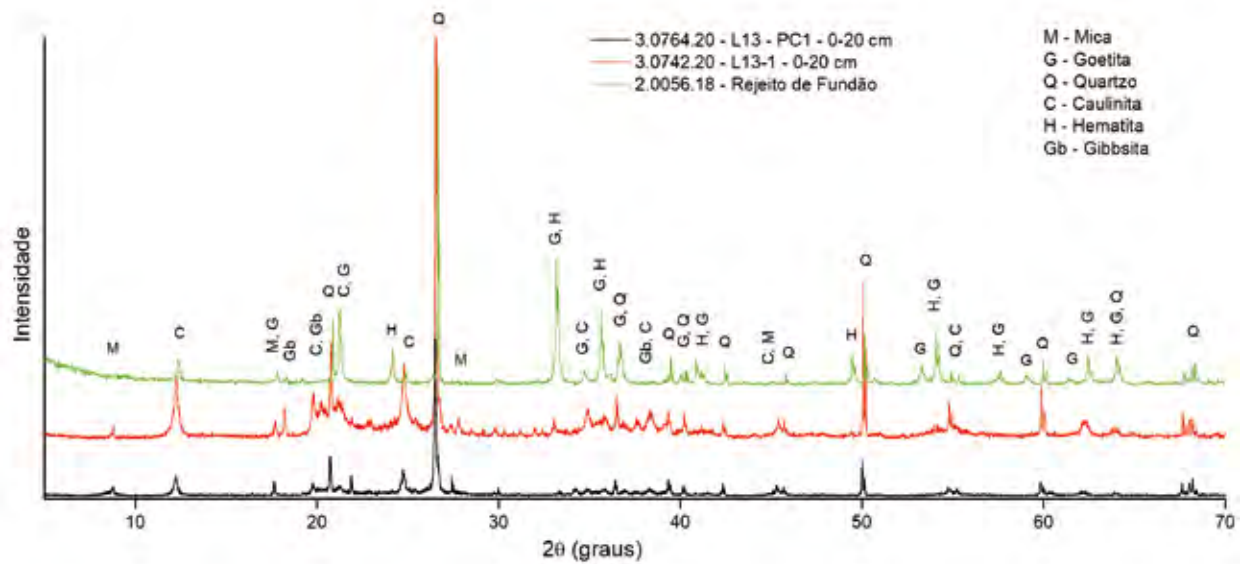


Figura 51 – Difratoograma de raios X da amostra L13 (afetada) em comparação à amostra L13 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

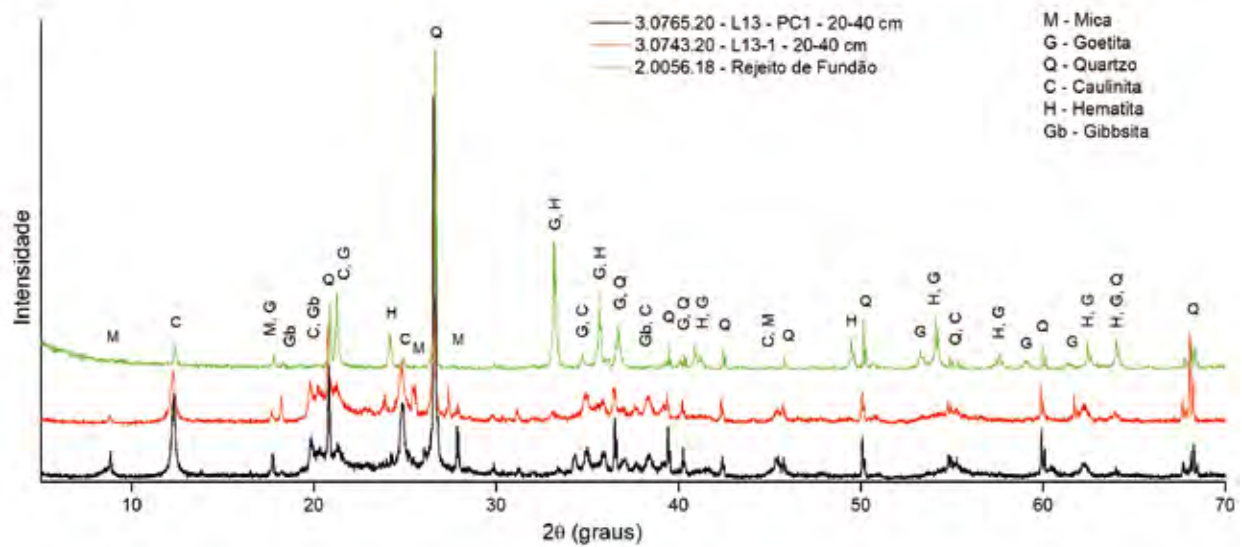
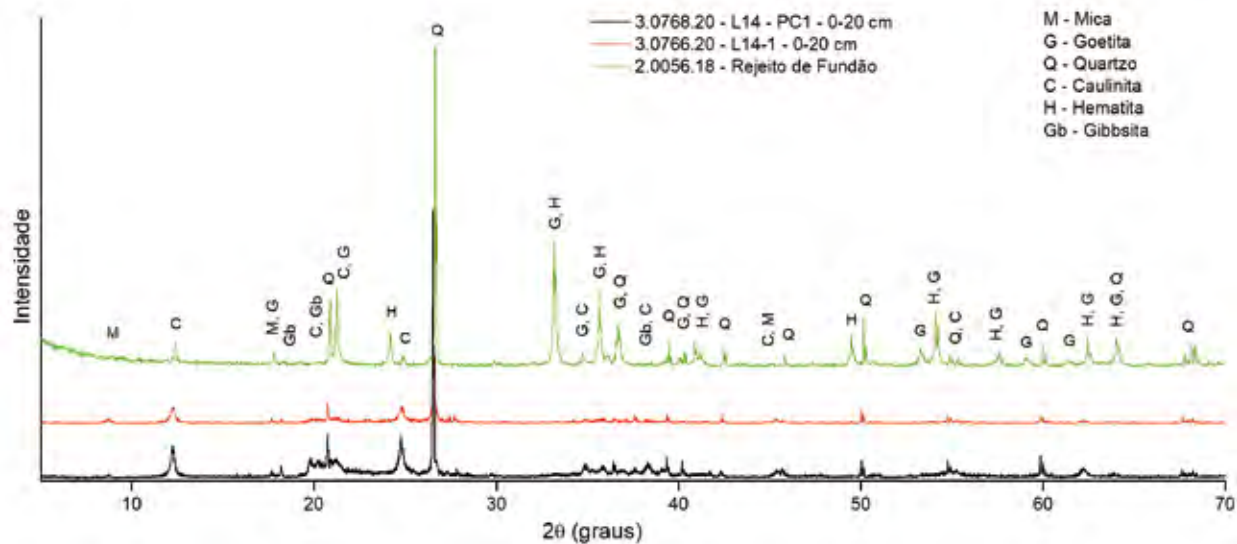


Figura 52 – Difratoograma de raios X da amostra L14 (afetada) em comparação à amostra L14 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

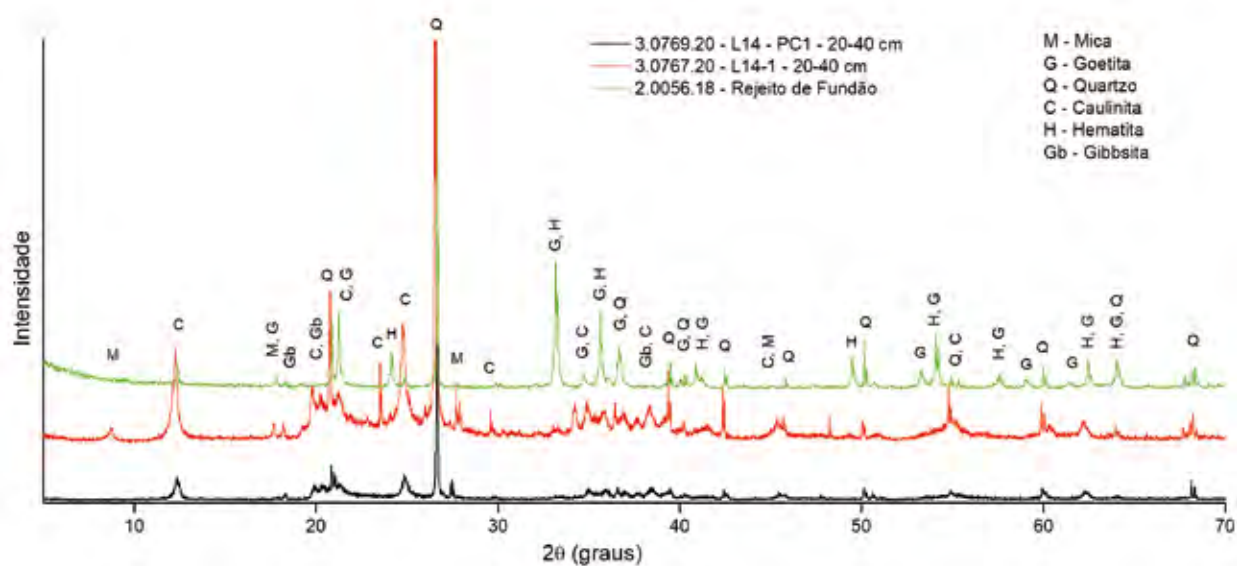
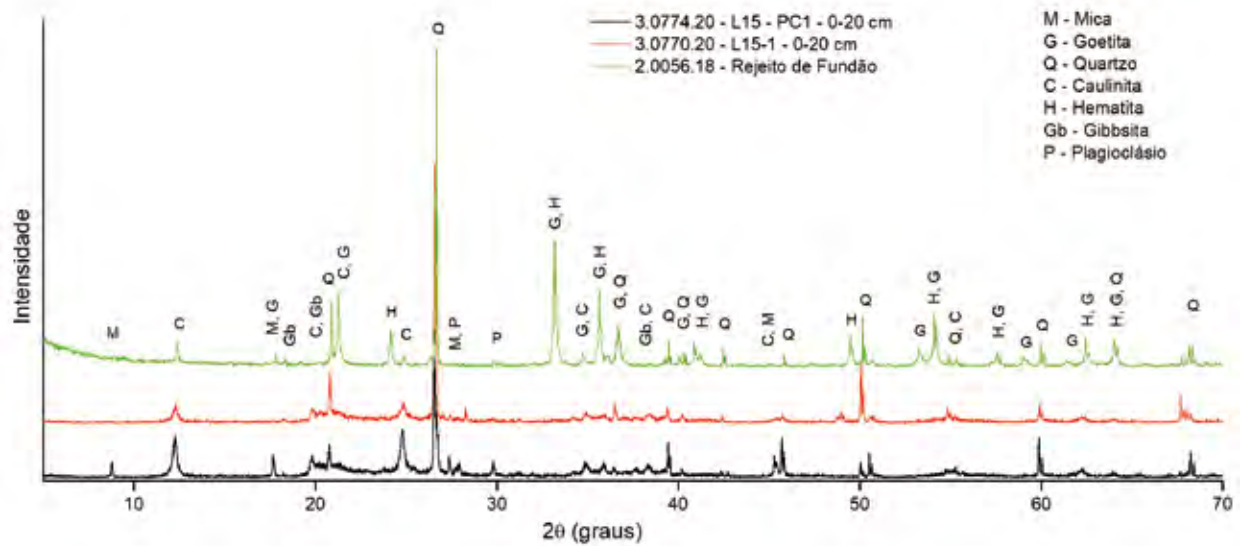


Figura 53 – Difratoograma de raios X da amostra L15 (afetada) em comparação à amostra L15 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

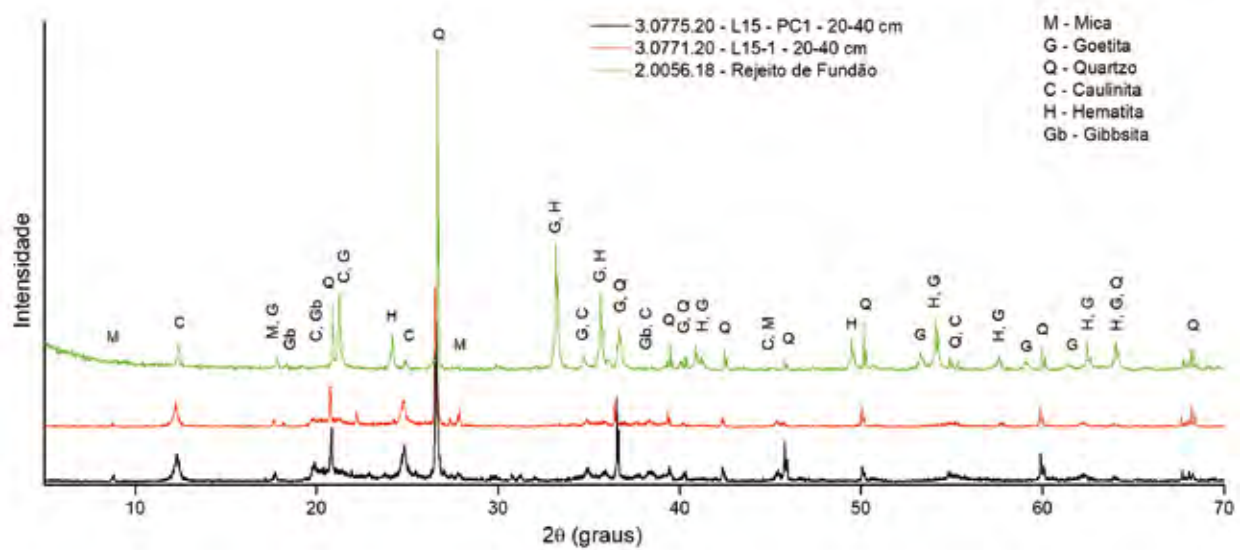
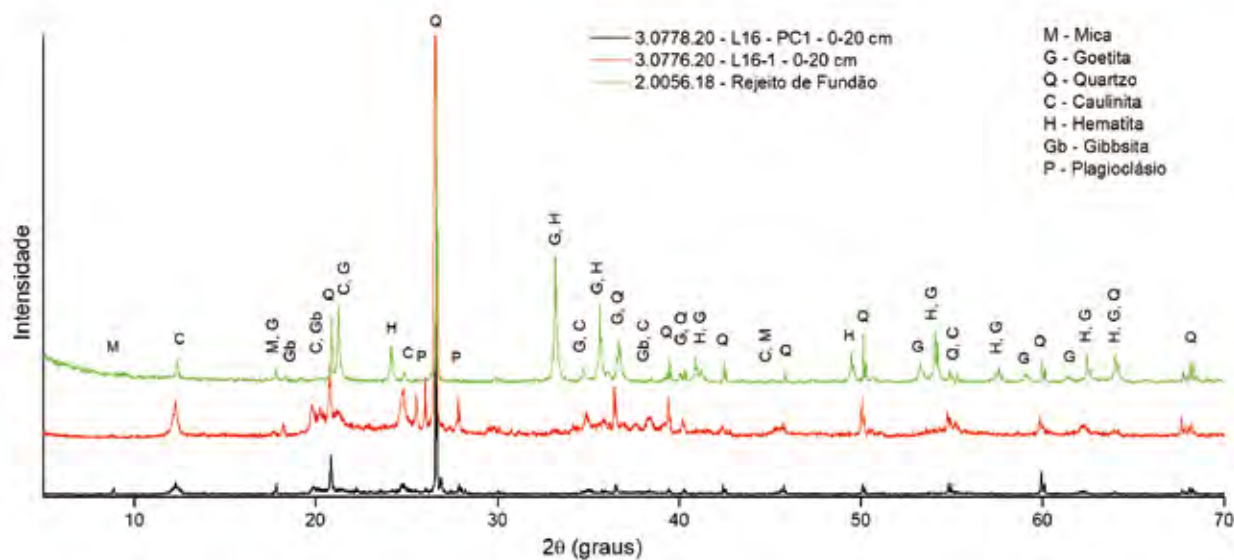


Figura 54 – Difratoograma de raios X da amostra L16 (afetada) em comparação à amostra L16 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

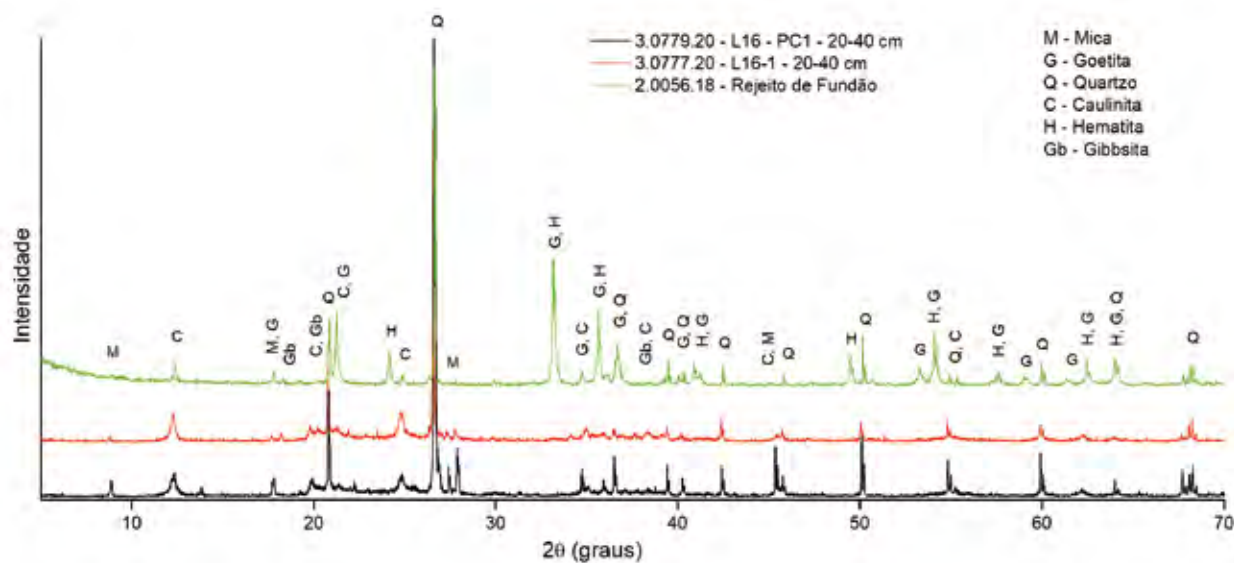
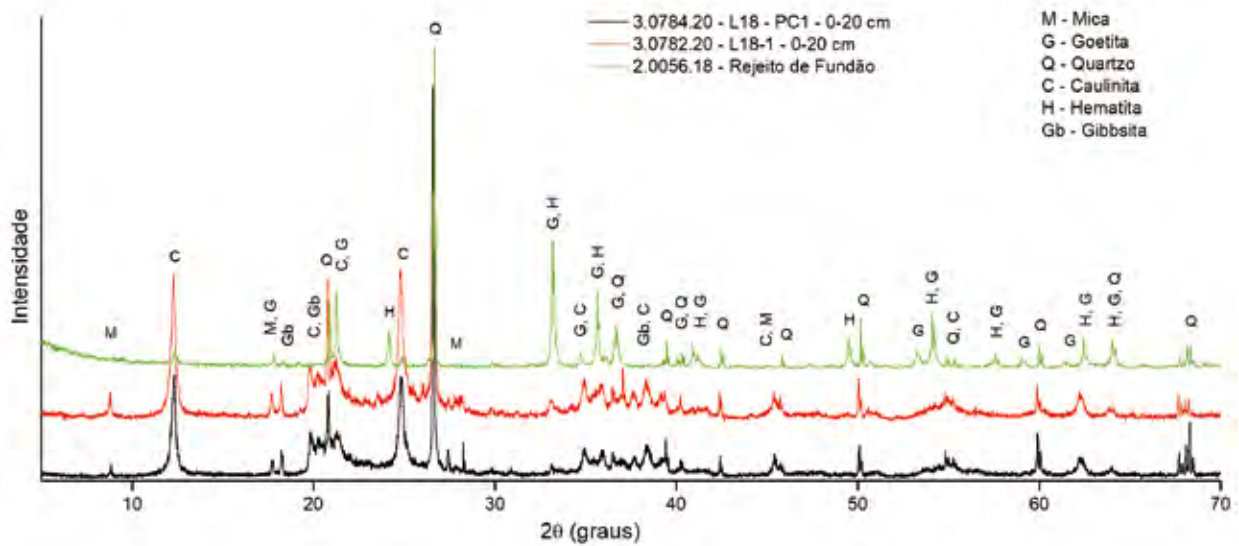


Figura 55 – Difratoograma de raios X da amostra L18 (afetada) em comparação à amostra L18 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

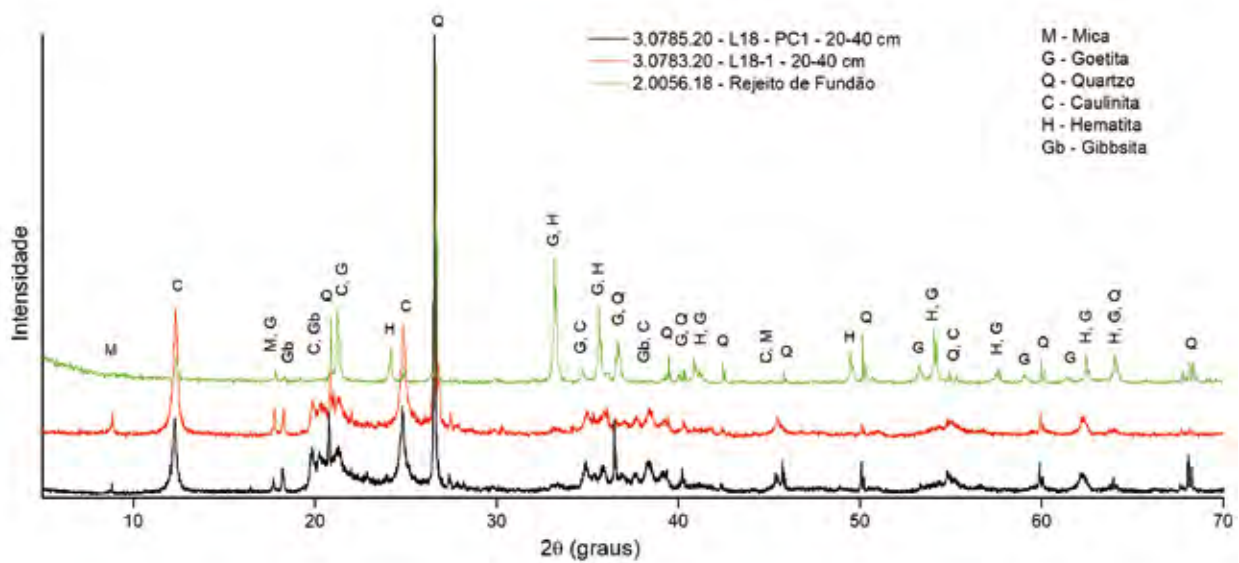
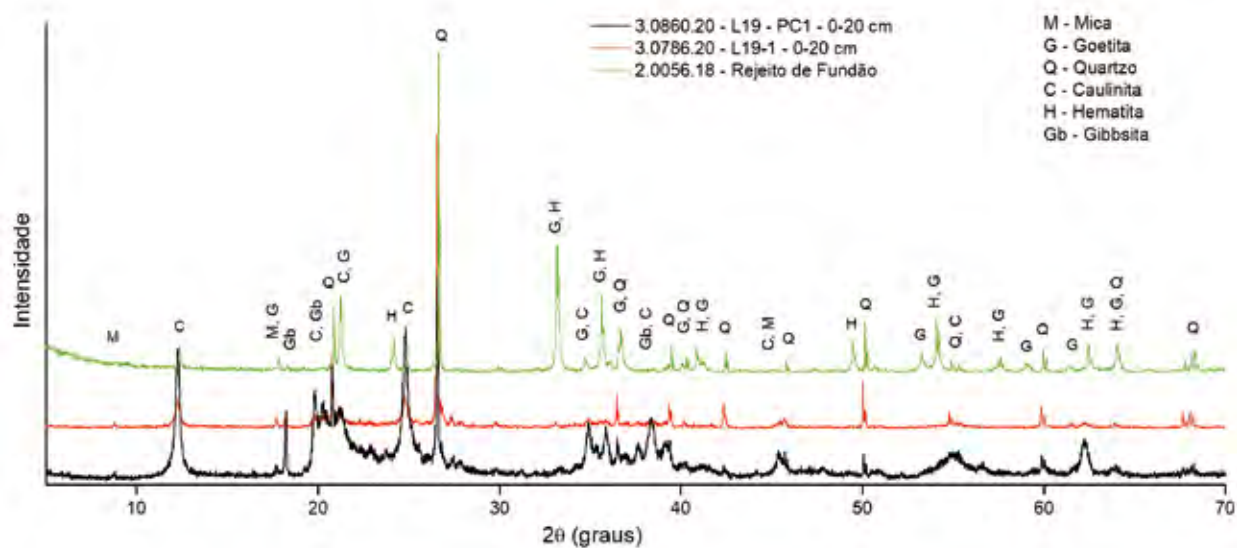


Figura 56 – Difratoograma de raios X da amostra L19 (afetada) em comparação à amostra L19 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

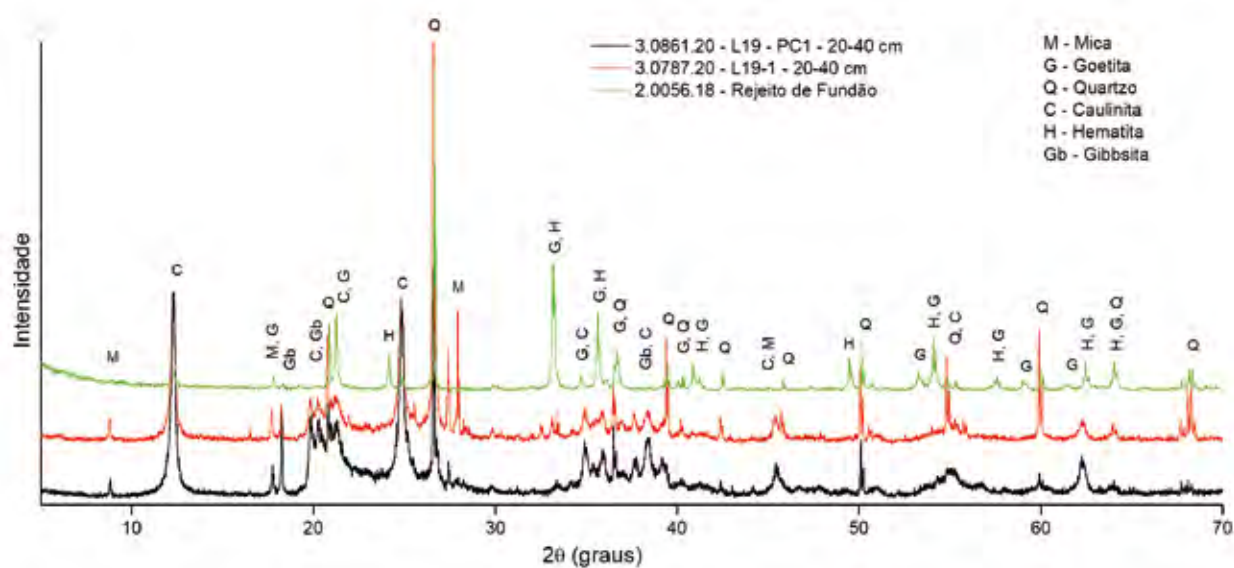
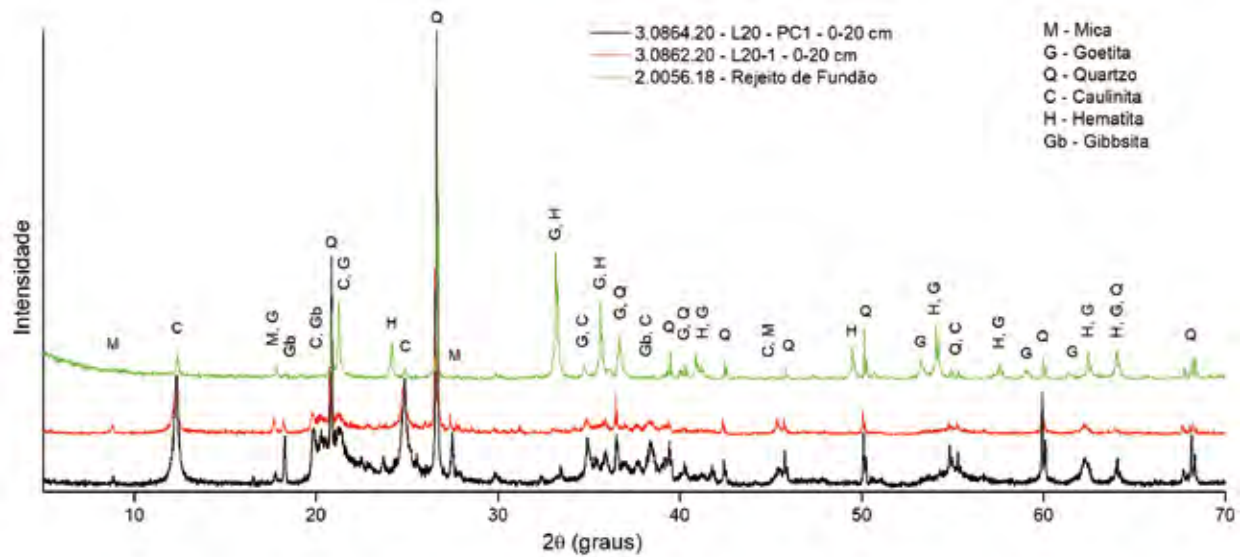


Figura 57 – Difratoograma de raios X da amostra L20 (afetada) em comparação à amostra L20 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

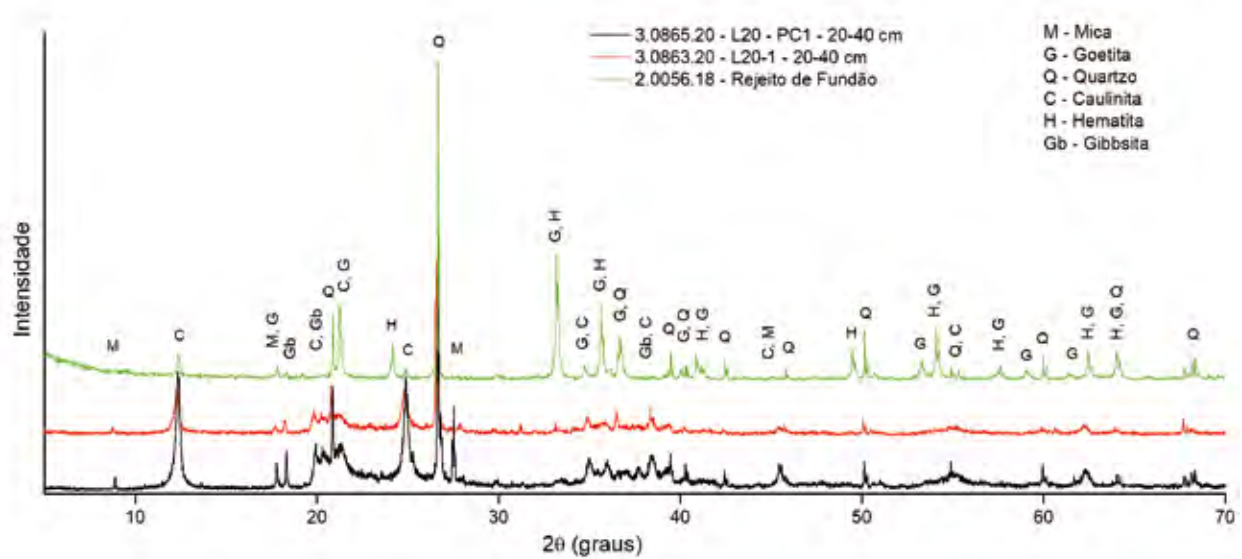
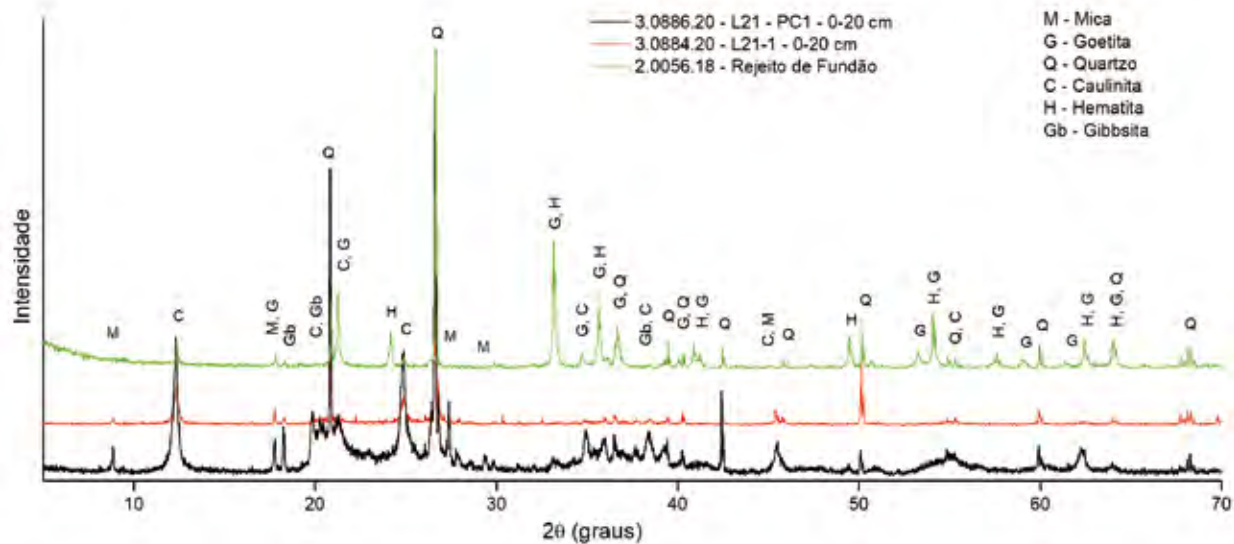


Figura 58 – Difratoograma de raios X da amostra L21 (afetada) em comparação à amostra L21 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



B)

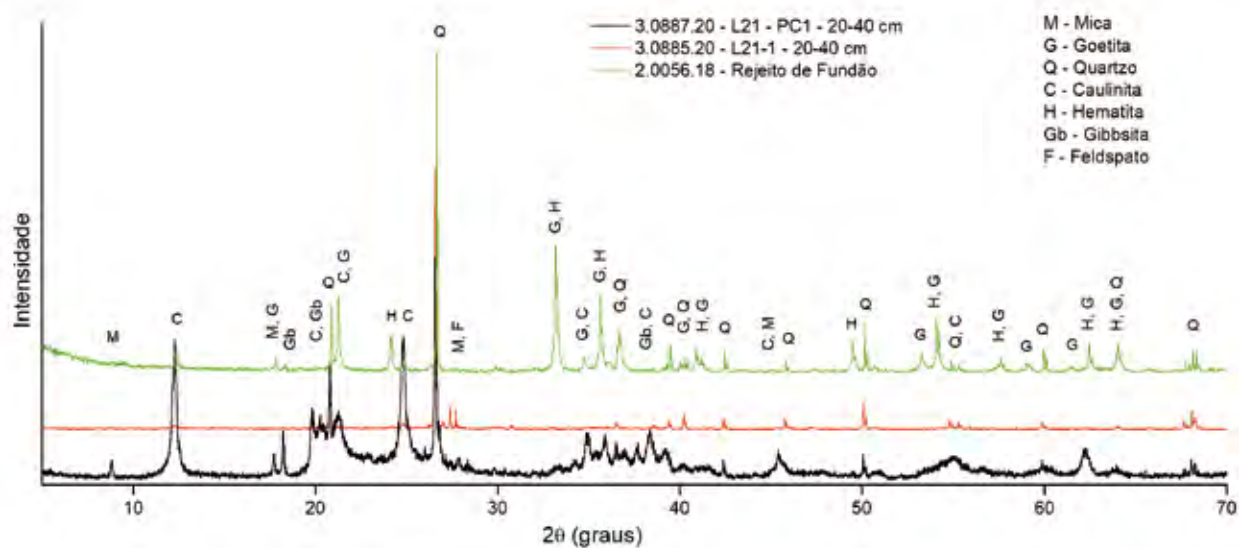
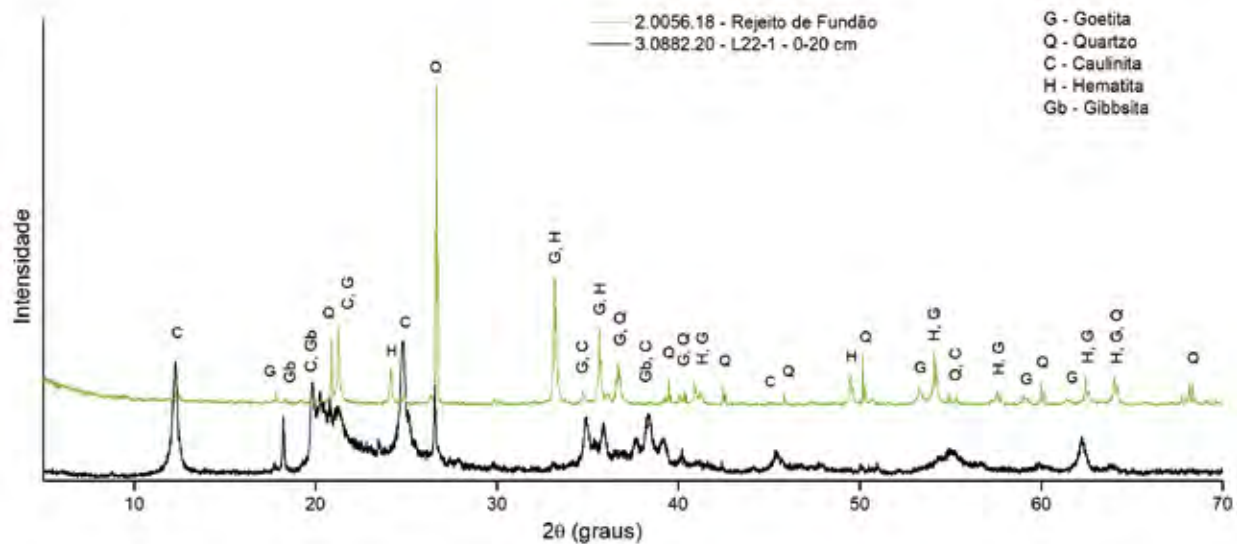


Figura 59 – Difratoograma de raios X da amostra L22 (afetada) em comparação à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)). O local 22 não apresenta área controle.

A)



B)

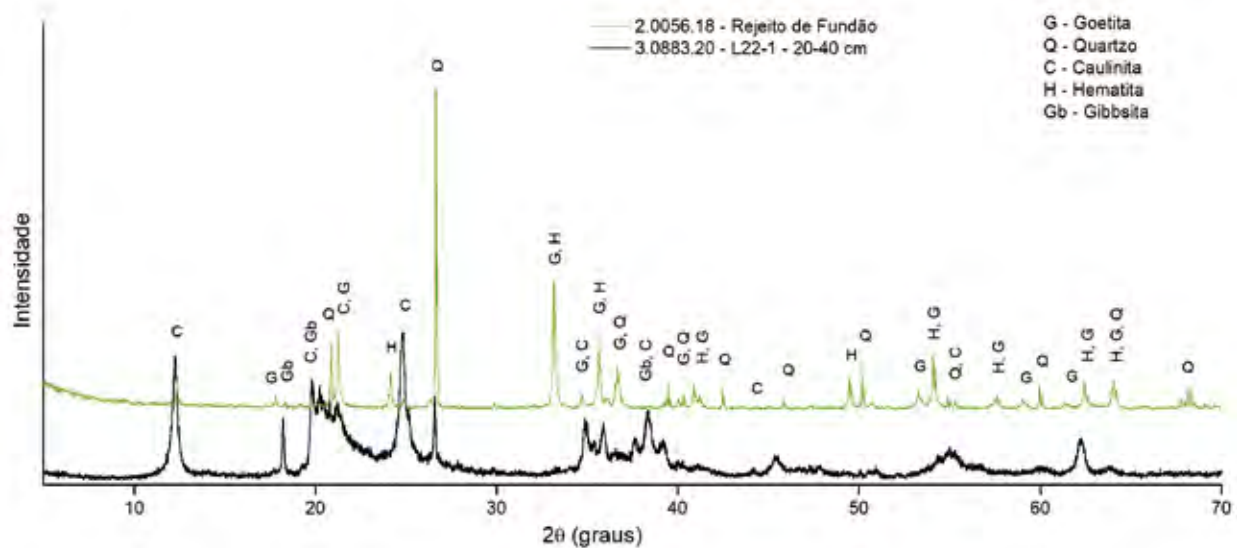
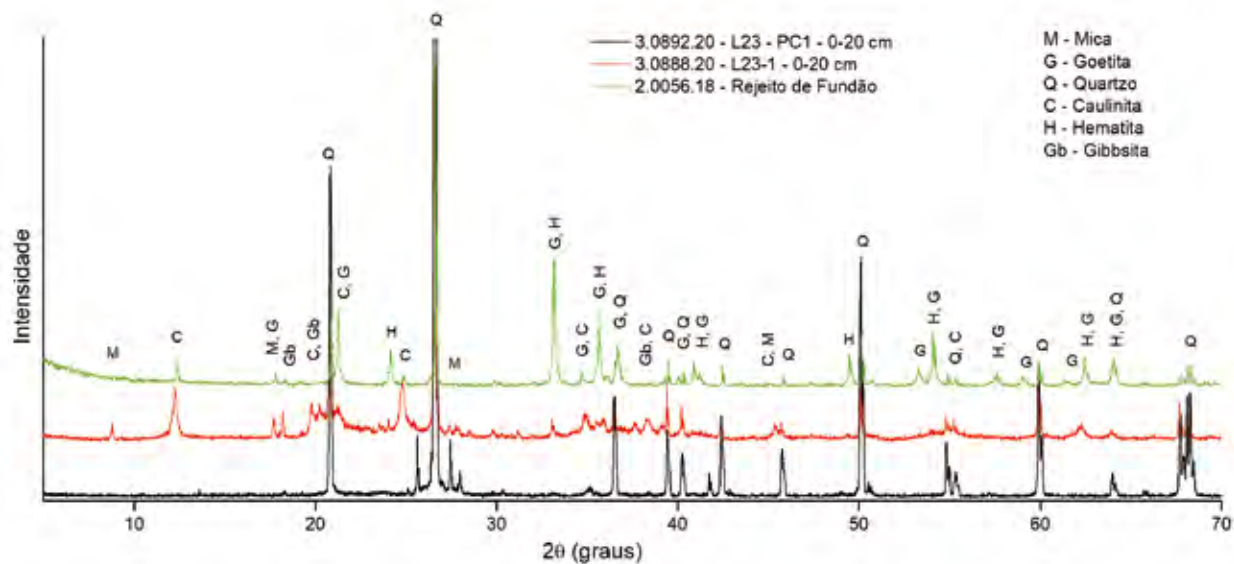
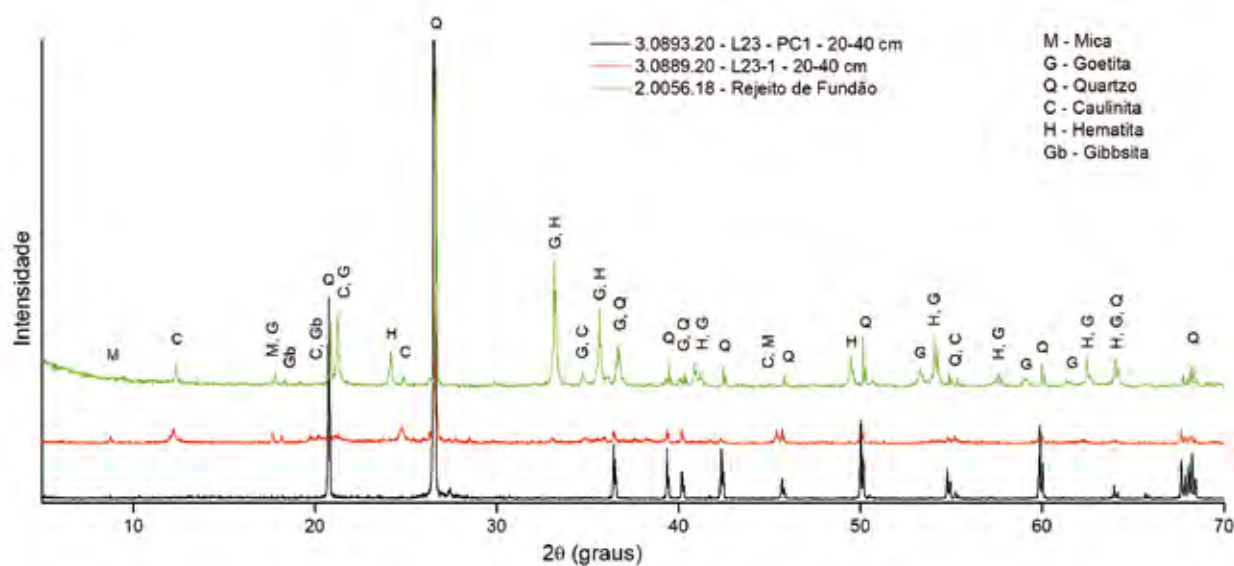


Figura 60 – Difratoograma de raios X da amostra L23 (afetada) em comparação à amostra L23 PC (controle) e à amostra do rejeito remanescente em Fundão (0-20 cm (A) e 20-40 cm (B)).

A)



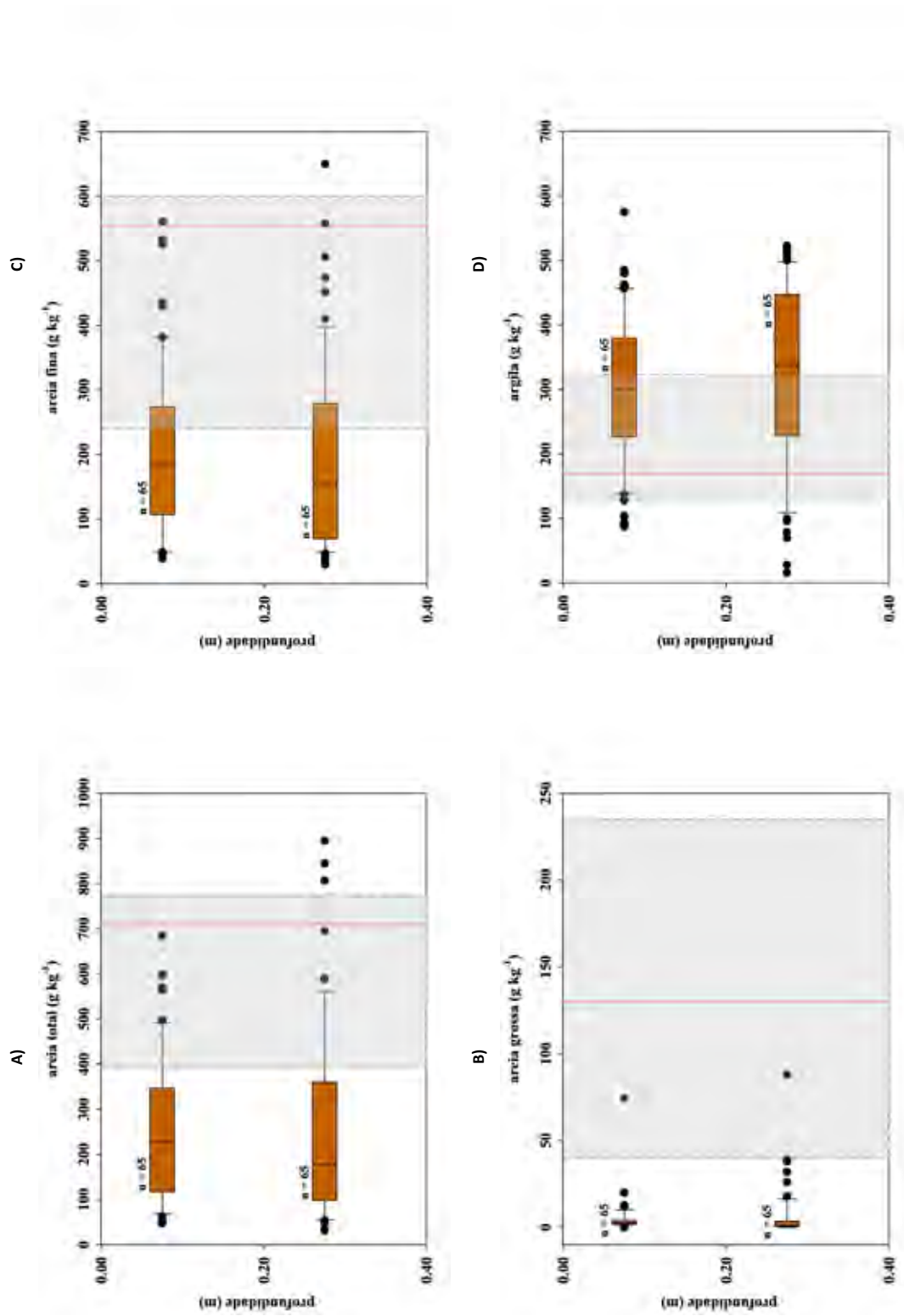
B)



De forma a melhor compreender a alteração da composição dos solos nas manchas de inundação, a Figura 61 a Figura 64 apresentam a distribuição granulométrica e massa específica dos grãos (densidade de partículas) das amostras coletadas nas manchas de inundação, além dos teores de carbono orgânico, comparativamente aos solos de linha base. Os laudos laboratoriais das amostras estão apresentados no Anexo B.

Verifica-se comportamento consistente de redução dos teores de areia (Figura 61 e Figura 63 - A, B e C) e aumento nos teores de argila (Figura 61 e Figura 63 - D) e silte (Figura 62 e Figura 64 - A) nas amostras das áreas impactadas pela mancha de inundação em relação aos solos da linha de base nos Compartimentos 2, 3 e 4. Considerando apenas o parâmetro granulometria, pode-se considerar que o extravasamento do material não impactou negativamente na qualidade ambiental das várzeas do rio Doce à jusante da represa de Risoleta Neves.

Figura 61 – Distribuição granulométrica: areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C) e argila (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.

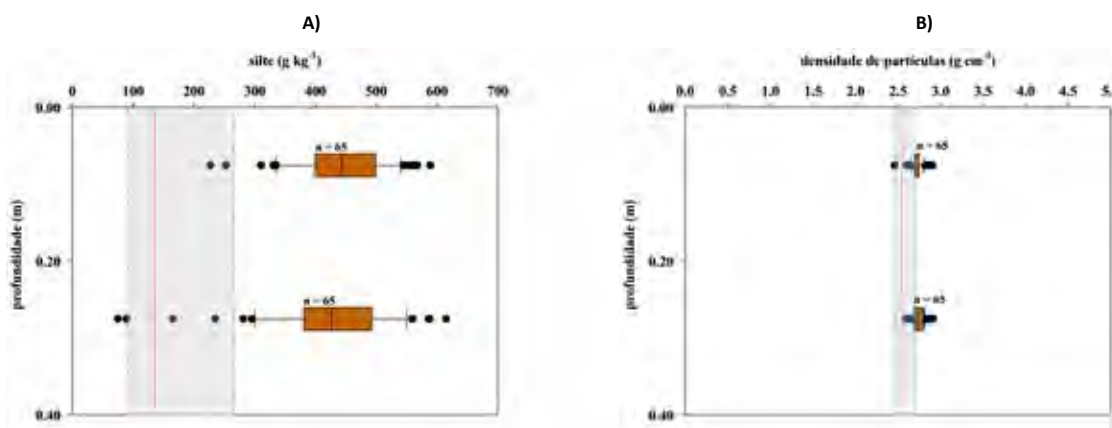


As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

Os minerais da fração argila apresentam elevada área superficial específica (ASE) e cargas elétricas de superfície (CTC e CTA) (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001). A combinação dessas duas características é, em grande parte, responsável pela qualidade física e pela qualidade química dos solos. Aliado ao aumento do teor de argila, a mineralogia da argila se distanciou da matriz hematítica do rejeito barrado de Fundão, conforme observado nos difratogramas anteriores, aumentando também a qualidade dessa fração.

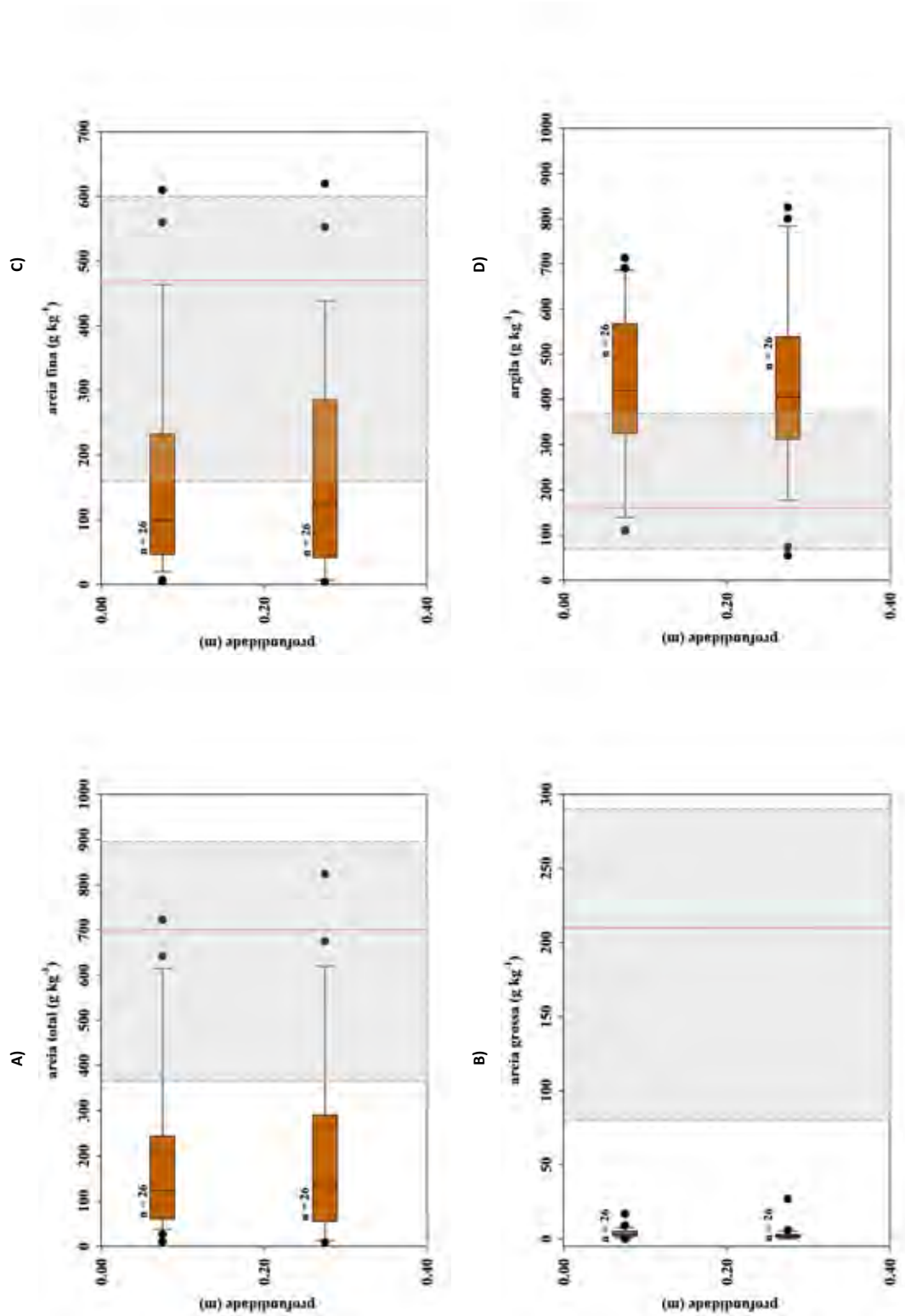
A densidade de partículas mediana observada nas amostras de superfície e subsuperfície do Compartimento 2 foi superior à mediana da linha base (Figura 62 - B), mas não foi observada diferença entre as amostras das áreas impactadas e os solos de linha base nos Compartimentos 3 e 4 (Figura 64 - B). É importante ressaltar, ainda, que a densidade de partículas dos solos das manchas de inundação à jusante de Risoleta Neves foi sempre inferior à do rejeito depositado no Compartimento 1 (valores entre 2,97 e 3,01 g cm⁻³) e do rejeito barrado (valores entre 2,98 e 3,89 g cm⁻³) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b, d). A maior parte dos solos minerais apresenta densidade de partícula variando entre 2,60 e 2,75 g cm⁻³, por essa ser a variação geralmente encontrada em minerais como quartzo, feldspatos, micas e filossilicatos 1:1 e 2:1 (BRADY; WEIL, 2010). A elevação na densidade de partículas para valores acima dessa faixa reflete a presença de elementos mais pesados (como o Fe) nos minerais do solo, embora o aumento desse parâmetro por si só não represente prejuízos diretos para as características físicas do solo uma vez que a densidade de partículas não é afetada pelo espaço poroso e não é relacionada à estrutura do solo (BRADY; WEIL, 2010). Os valores de densidade de partículas mais próximos ao de minerais aluminossilicatos reforça a discussão de que houve diluição do rejeito em direção à foz, com maior contribuição de substratos naturais nos solos afetados dos Compartimentos 2, 3 e 4.

Figura 62 – Distribuição granulométrica: silte(A); e densidade de partículas (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



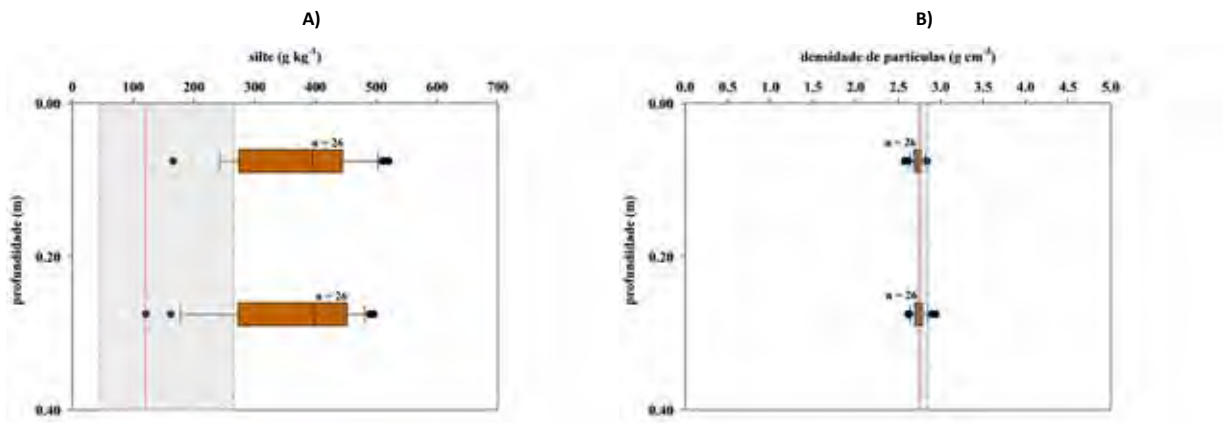
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

Figura 63 – Distribuição granulométrica: areia total (A), areia grossa (B), areia fina (C) e argila (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

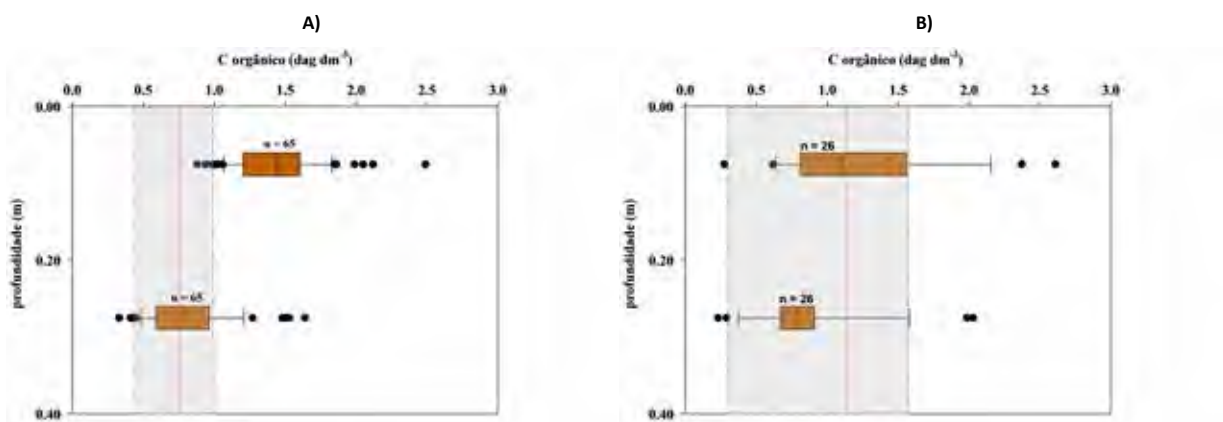
Figura 64 – Distribuição granulométrica: silte(A); e densidade de partículas (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

Outro componente extremamente importante da fase sólida do solo são os compostos orgânicos humificados (TAN, 2003), representados pelo carbono, e que fazem parte da constituição da matéria orgânica do solo. Os teores medianos de carbono orgânico aumentaram em ambas as profundidades em relação a linha base do Compartimento 2 (Figura 65 - A). Já nos Compartimentos 3 e 4 houve manutenção dos teores de carbono orgânico na camada de 0 a 20 cm e ligeira redução na camada mais profunda (Figura 65 - B). Ainda, os teores de carbono nas amostras dos Compartimentos 2, 3 e 4 foram cerca de cinco a nove vezes superiores aos teores de carbono do rejeito depositado no Compartimento 1 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), o que denota um cenário muito mais positivo em comparação ao Tecnossolo formado na região à montante da bacia. Os compostos orgânicos humificados apresentam elevada área superficial específica e CTC (podendo chegar a valores em torno de 400-800 cmolc kg⁻¹) (BAYER; MIELNICZUK, 2008), e contribuem em grande parte para a formação de cargas do solo, especialmente em solos intemperizados.

Figura 65 – Teores de carbono orgânico de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 2 (A) e 3 e 4 (B).



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

De forma consolidada em relação à composição do solo, o material extravasado nas várzeas à jusante da represa de Risoleta Neves, em direção à foz do rio Doce, não afetou negativamente o ambiente, pois resultou em aumento dos teores de finos (argila e silte) e de matéria orgânica (representada pelo carbono orgânico), com manutenção da mineralogia caulínica em relação aos solos e sedimentos naturais dessas porções. Dessa maneira, considerou-se que não houve prejuízo à composição dos solos presentes nas manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4, diferentemente do dano gravíssimo ocorrido no Compartimento 1 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Assim, para esse dano, permanecem as classificações de gravidade, tendência e reversibilidade anteriormente diagnosticadas para o Tecnossolo (dano gravíssimo, cessado e irreversível), e a constatação da não ocorrência desse dano para os demais solos aluvionares da bacia do rio Doce.

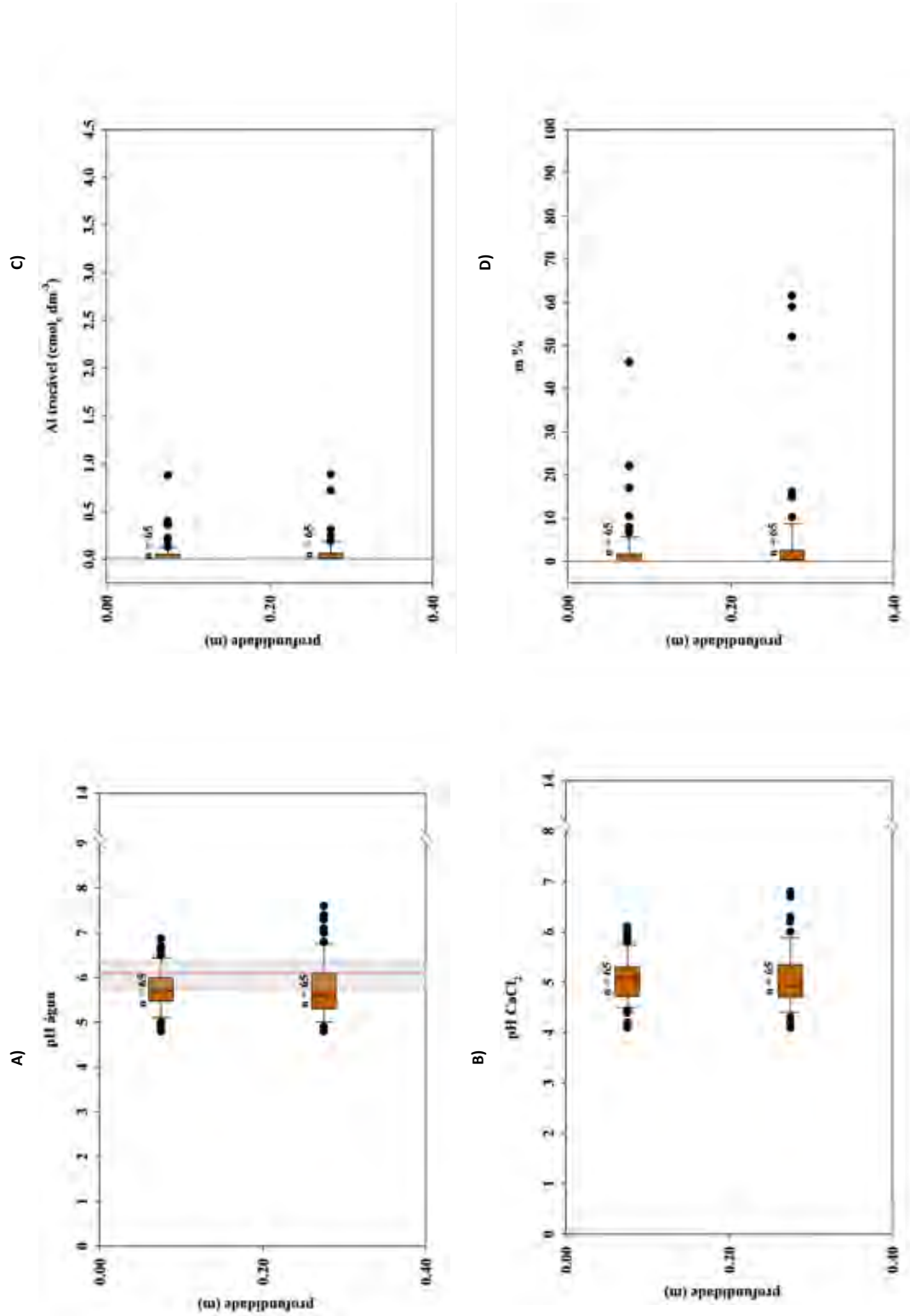
2.2.3 ALTERAÇÃO DA FERTILIDADE E DO POTENCIAL PRODUTIVO DO SOLO NAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO À JUSANTE DA UHE RISOLETA NEVES

A avaliação da alteração da fertilidade e potencial produtivo dos solos nas áreas à jusante da UHE Risoleta Neves foi realizada com base no estudo dos atributos químicos das amostras de solo dentro das manchas de inundação (Figura 66 a Figura 75), de amostras de plantas coletadas em campo (Figura 76 a Figura 78) e das informações obtidas durante o plantio de espécies agrícolas no experimento de casa de vegetação (Figura 79 a Figura 112). Corroborando os resultados, no Apêndice B são apresentados os dados das amostras de solo coletadas nas áreas de mata nativa.

Os laudos laboratoriais das amostras individuais apresentadas estão dispostos nos Anexos C e D. Adicionalmente, as massas frescas e secas das culturas de alface, beterraba (folhas e tubérculos), milho, feijão e morango (folhas e frutos), cultivados no experimento, estão apresentadas na Figura 87 a Figura 89. O desenvolvimento dessas culturas ao final do experimento pode ser observado pelas fotografias apresentadas na Figura 90 a Figura 99.

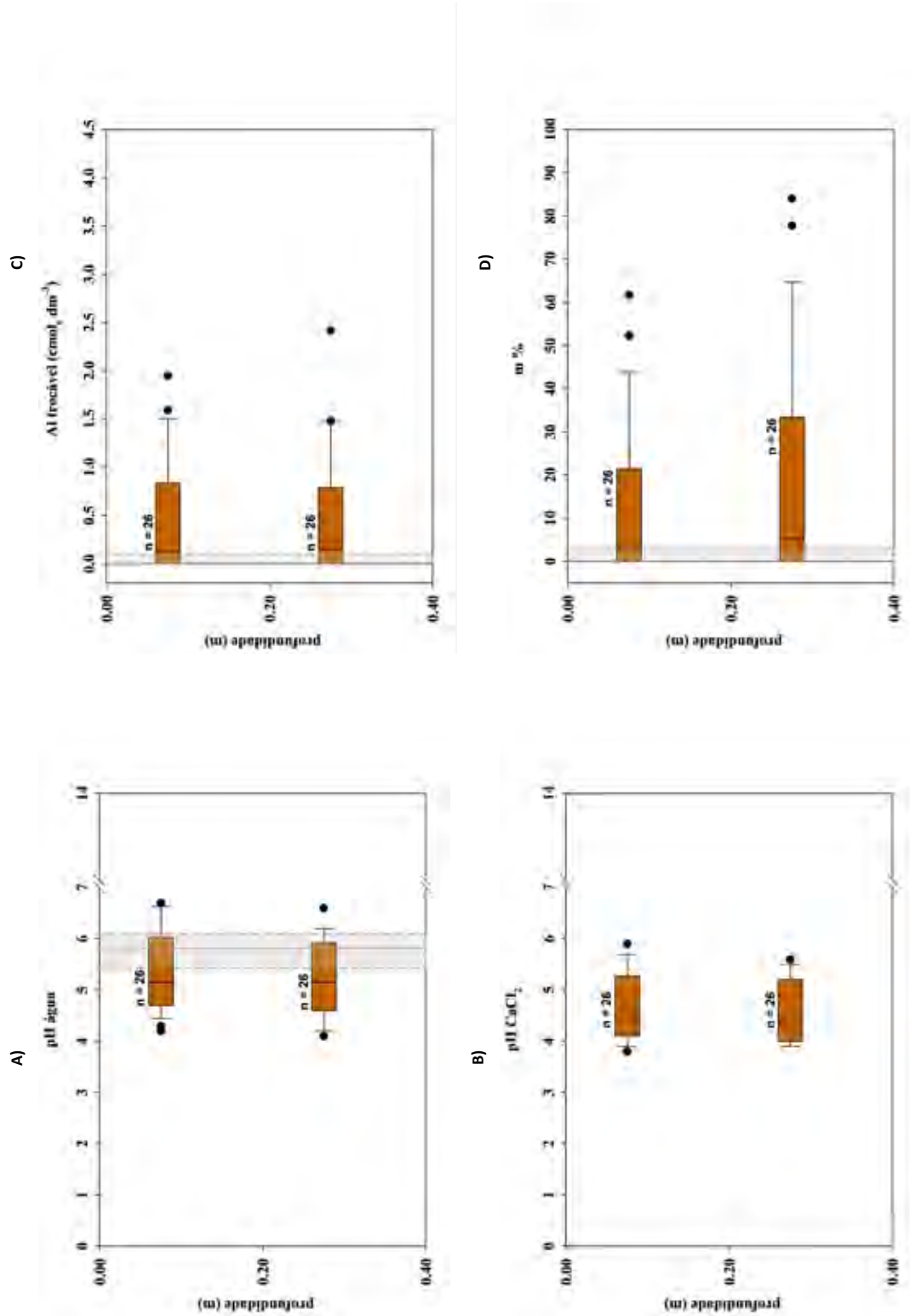
Em relação à linha base, o material depositado nas manchas de inundação promoveu ligeira redução nos valores de pH em água nas camadas 0-20 e 20-40 cm e nos três Compartimentos avaliados (2, 3 e 4) (Figura 66 - A). O pH próximo a neutralidade do rejeito barrado (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b) foi sendo reduzido ao longo do transporte dos sedimentos em direção à foz do rio Doce. Contudo, mesmo menores, os valores de pH em água das amostras de áreas impactadas foram superiores a 5,5 no Compartimento 2, além de o pH CaCl_2 mediano se apresentar em valores superiores a 5 (Figura 66 - B). Esse valor é considerado limite para a precipitação do Al tóxico às plantas (ROSSIELLO; NETTO, 2006). Por isso, no Compartimento 2, os teores de Al trocável e a saturação por Al (m%) ficaram próximos a zero, à exceção de alguns *outliers* (Figura 66 – C e D). Já nos Compartimentos 3 e 4, o aumento da distância percorrida pelo material reduziu os valores de pH em água para níveis inferiores à linha base e inferiores a 5,5 (com pH CaCl_2 mediano próximo a 4,5) (Figura 67 – A e B).

Figura 66 – Valores de pH em água (A), pH em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} (B), teores de alumínio trocável (C) e saturação por alumínio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. O pH CaCl_2 não foi avaliado nas referências de linha base.

Figura 67 – Valores de pH em água (A), pH em CaCl_2 0,01 mol L^{-1} (B), teores de alumínio trocável (C) e saturação por alumínio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



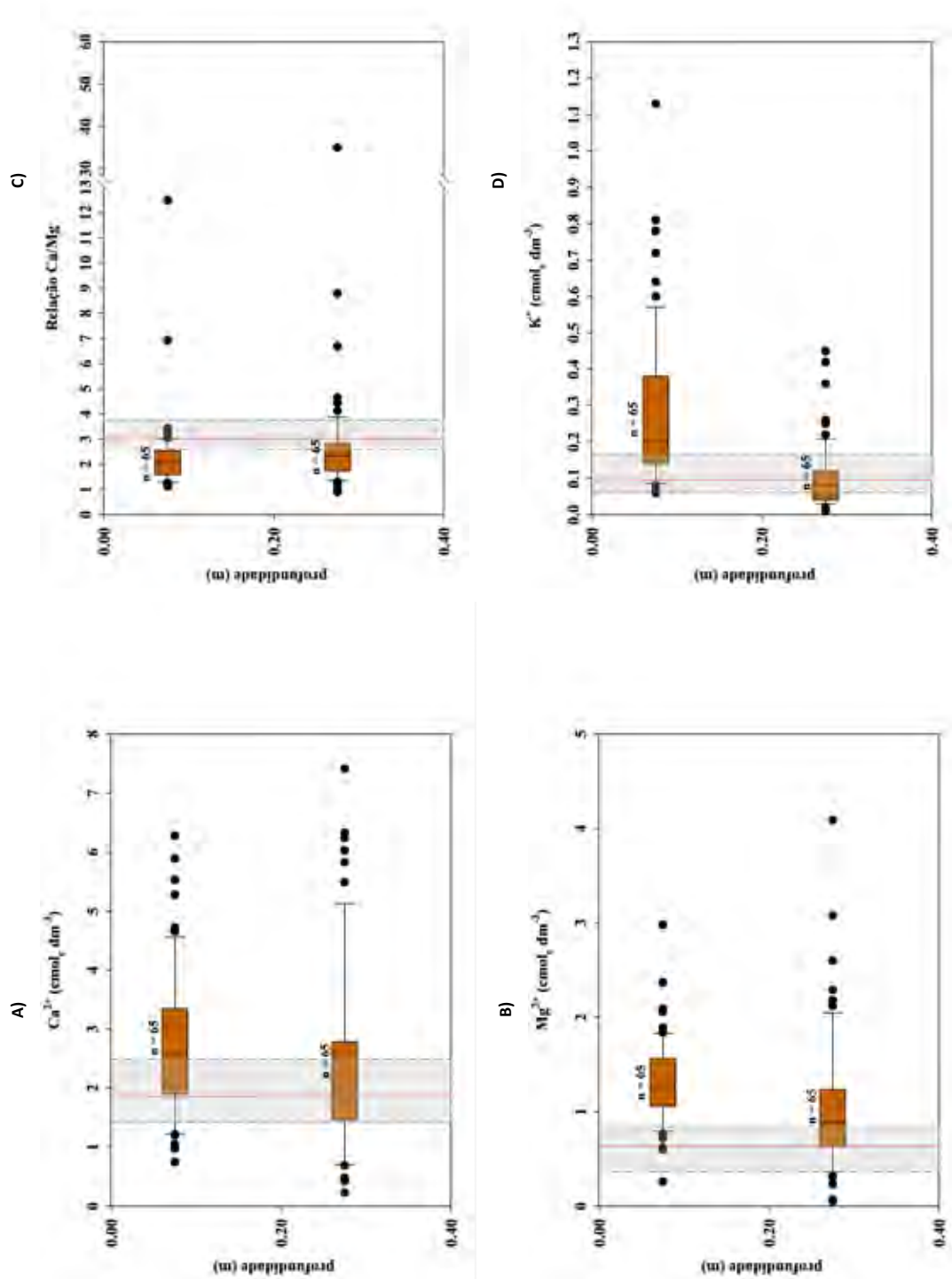
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. O pH CaCl_2 não foi avaliado nas referências de linha base.

Os valores de pH abaixo de 5,5 nos solos afetados dos Compartimentos 3 e 4 promoveram a solubilização de pequena parcela de Al tóxico às plantas (Figura 67 – C e D). Mesmo com esse comportamento de aparente acidificação do solo nas porções mais baixas do rio Doce, os teores medianos de Al trocável foram inferiores a $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (teor muito baixo), o que ainda permite adequado crescimento das plantas (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999).

A deposição do material nas manchas de inundação não resultou em efeitos negativos para a fertilidade dos solos das várzeas do rio Doce, principalmente no Compartimento 2 e na camada mais superficial dos Compartimentos 3 e 4. Nessas porções, os teores medianos de bases trocáveis do solo (Ca, Mg e K) e os valores medianos de soma de bases e capacidade de troca catiônica (efetiva e potencial) foram superiores aos encontrados na linha base (Figura 68 a Figura 71), sendo classificados como níveis variando de médios a altos (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999). A única exceção foi o K, cujos níveis foram interpretados como variando de baixo a bom (de acordo com as profundidades e Compartimentos). A relação Ca/Mg mediana das amostras das áreas afetadas foi inferior à linha base e variou entre 1,5/1 e 2,5/1 (Figura 68 e Figura 69- C). Embora os valores de relação Ca/Mg considerados ideais estejam na faixa de variação entre 3/1 e 6/1 (MOTTA; LIMA, 2006), Kopittke e Menzies (2007) afirmam que ao invés de buscar razões ideais de bases no solo, é mais importante que os teores estejam em níveis satisfatórios, o que foi observado nas amostras.

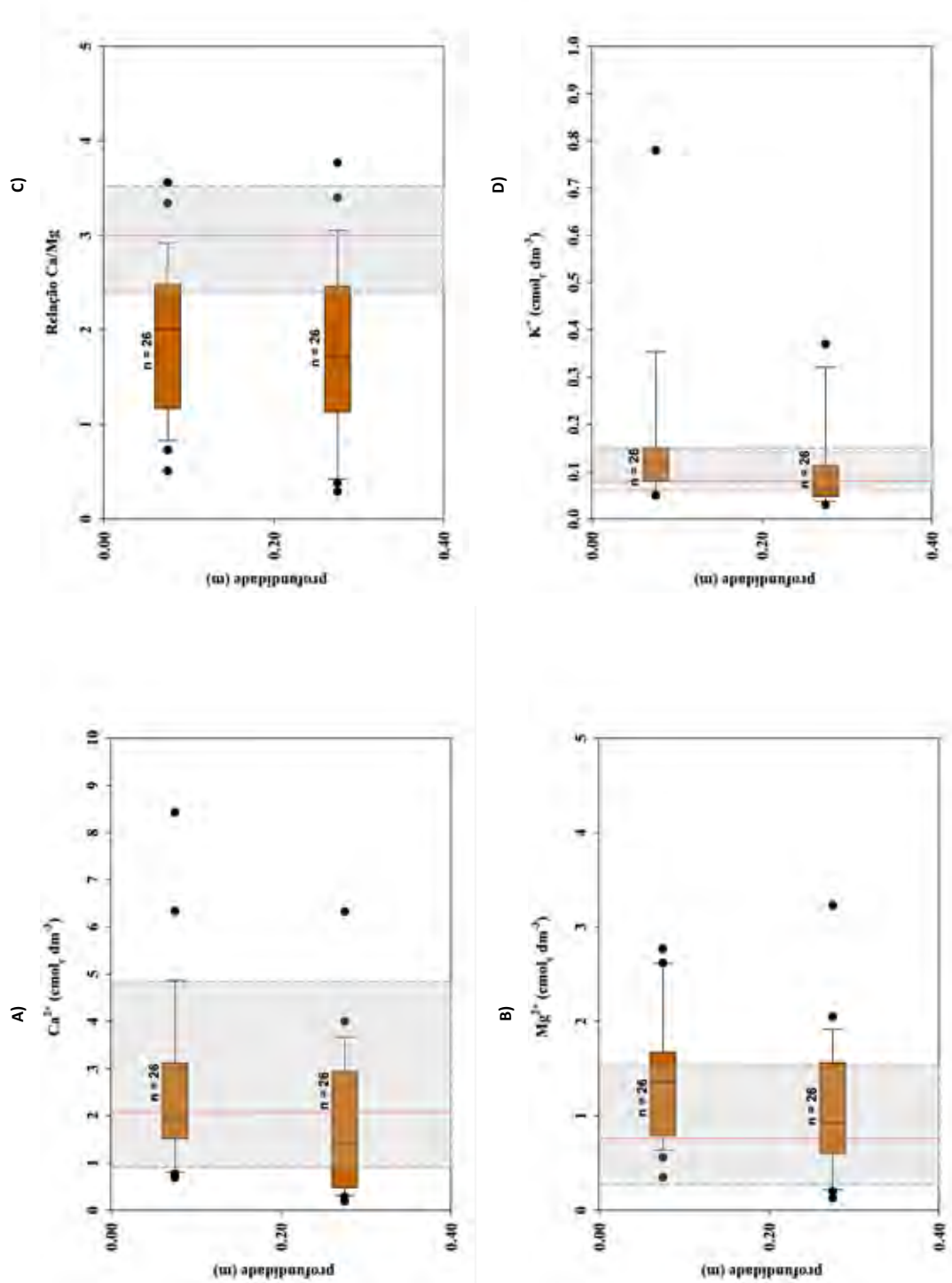
A maior CTC efetiva e potencial do material das manchas de inundação em relação à linha base reflete seu maior teor de argila e carbono orgânico (Figura 61 e Figura 63 (D) e Figura 65). Mesmo com aumento da acidez potencial (H+Al) (Figura 70 e Figura 71 - B) e ligeira diminuição da saturação por bases no complexo de troca (V%) (Figura 72 e Figura 73 - A), observados nos solos afetados em comparação à linha base, constatou-se que o extravasamento do material para as porções extracalha promoveu uma composição dos solos mais favorável do ponto de vista da fertilidade, uma vez que aumentou o teor de argila e de matéria orgânica dos Compartimentos 2, 3 e 4. Esses componentes da fração coloidal do solo permitem ao mesmo um maior potencial tampão, e refletem o incremento de fertilidade em comparação à linha base.

Figura 68 – Teores de cálcio (A), magnésio (B), relação cálcio:magnésio (C) e teores de potássio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



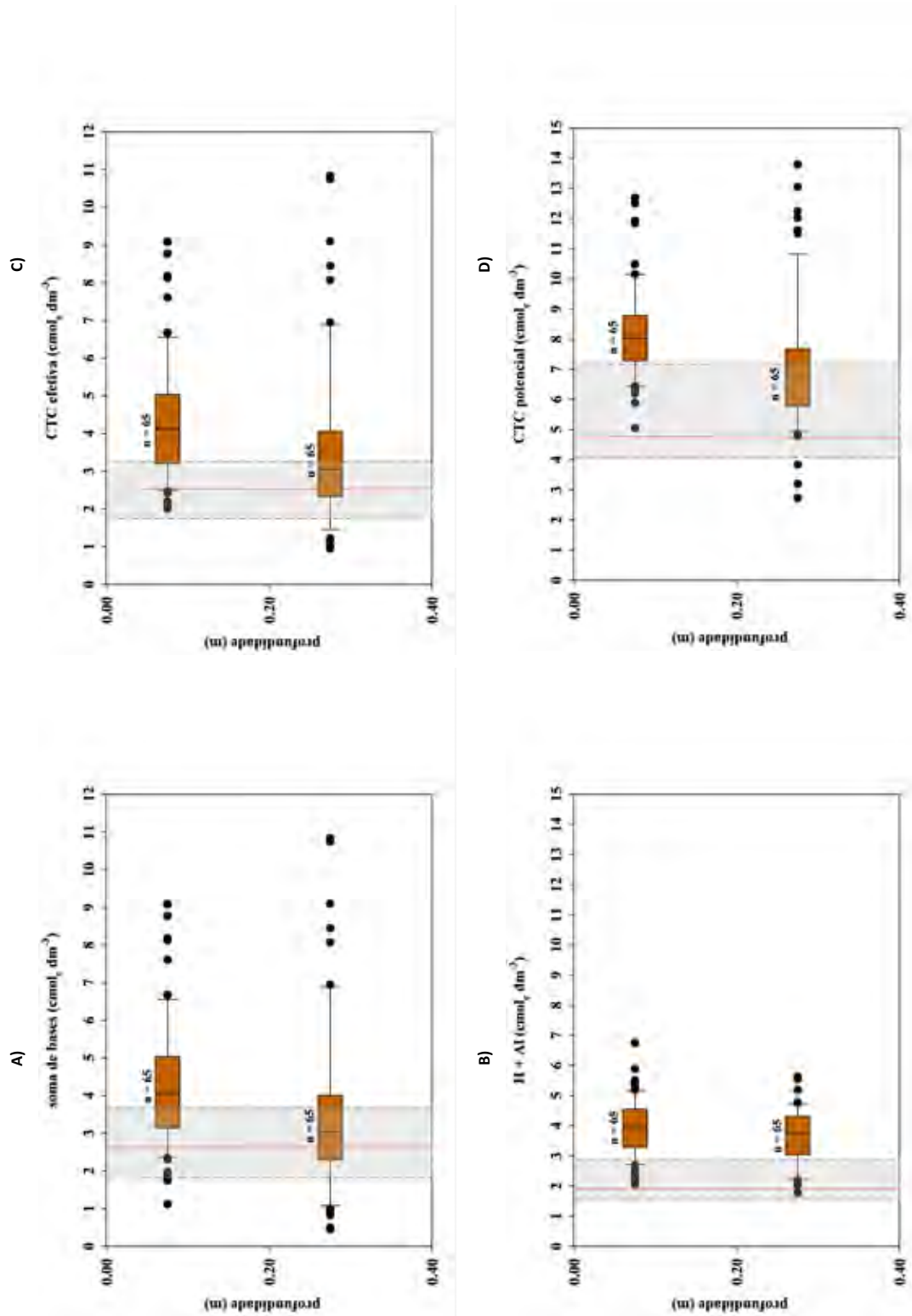
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

Figura 69 – Teores de cálcio (A), magnésio (B), relação cálcio:magnésio (C) e teores de potássio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



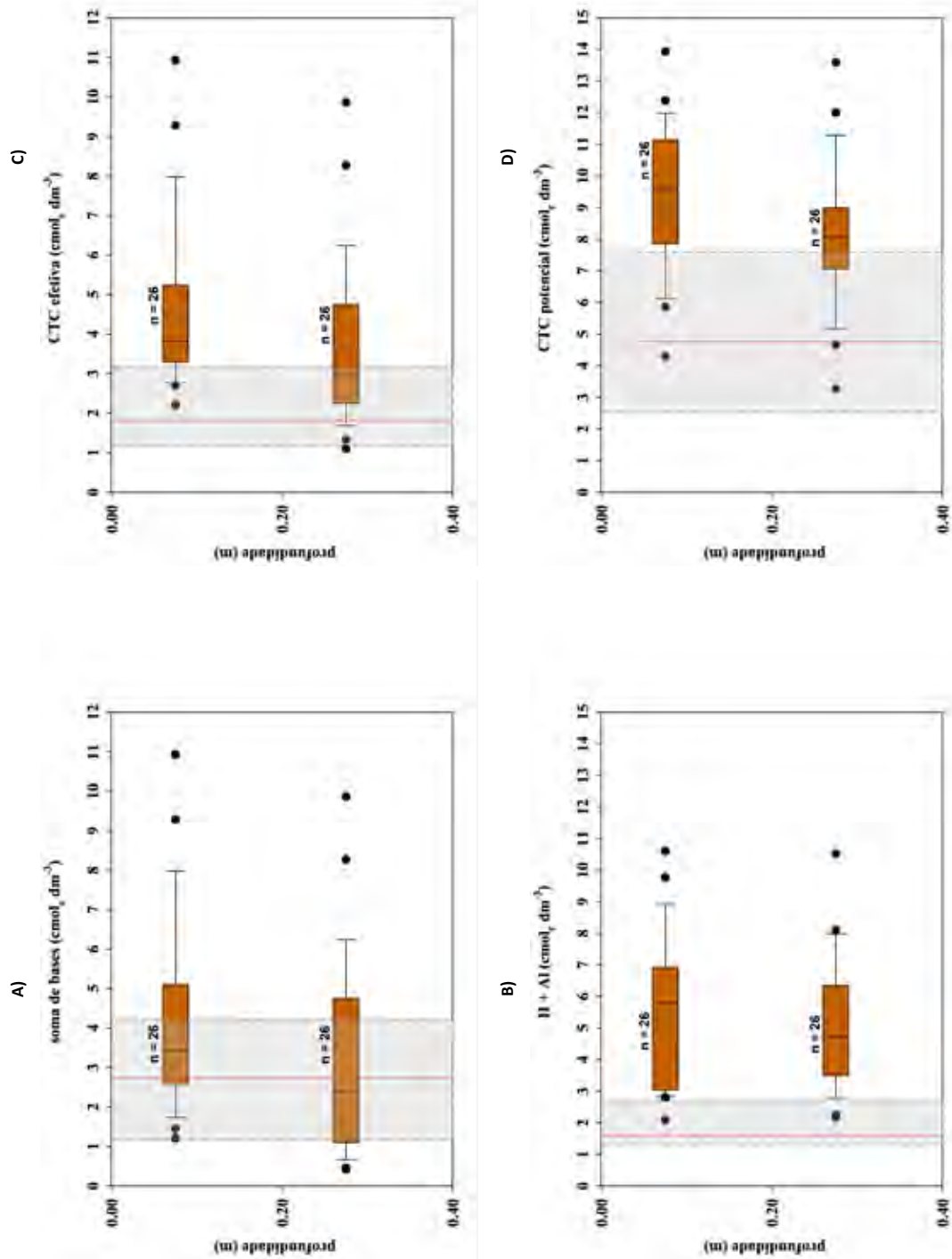
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

Figura 70 – Soma de bases (A), acidez potencial (B), capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (C) e CTC potencial (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

Figura 71 – Soma de bases (A), acidez potencial (B), capacidade de troca catiônica (CTC) efetiva (C) e CTC potencial (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



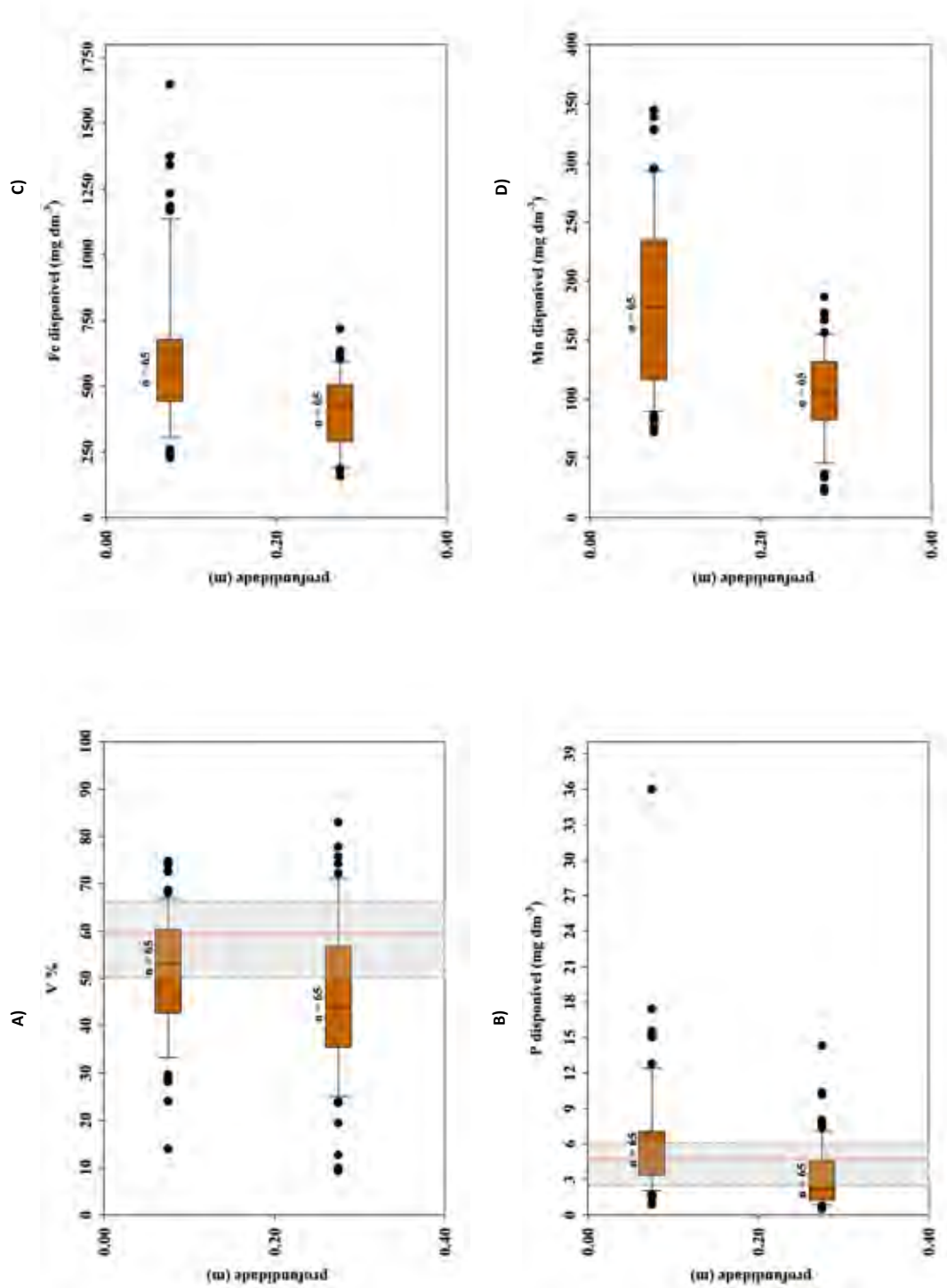
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base.

Com relação aos teores de P disponível, houve efeito inverso no que diz respeito aos Compartimentos. A deposição do material nas manchas de inundação promoveu aumento nos teores medianos do nutriente em relação à linha base apenas nos Compartimentos 3 e 4, não havendo diferença para as amostras superficiais do Compartimento 2, ou ainda resultando em diminuição na camada 0,2-0,4 m (Figura 72 e Figura 73 - B). Possivelmente, nas posições mais baixas do rio Doce pode ter ocorrido concentração do P a partir de fontes antrópicas diversas, uma vez que se trata do estuário de toda a bacia. Ainda que os teores medianos de P mensurados em ambas as camadas dos Compartimentos sejam classificados como muito baixos (normalizados ao teor de argila) (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999), esse nutriente também já era baixo nos solos de linha base, o que indica não ter havido prejuízo sob o ponto de vista do P.

Os micronutrientes Fe, Mn, Zn e Cu, extraídos por solução de Mehlich I, não foram quantificados por Pacheco (2015) e dessa forma os dados relativos a esses elementos nas amostras das áreas impactadas serão discutidos apenas de forma crítica quanto aos seus teores. O teor mediano de Fe disponível na camada 0-20 cm das amostras das manchas de inundação do Compartimento 2 (520 mg dm⁻³) apresentou-se em níveis cerca de 11 vezes superiores ao limite da classificação de teor alto, de acordo com o manual de adubação e calagem de Minas Gerais (Figura 72 e Figura 73 - C) (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999). Da mesma maneira, para os Compartimentos 3 e 4, esses teores ficaram próximos a 300 mg dm⁻³. Esses níveis de Fe disponível são muito superiores ao teor mediano de Fe disponível do rejeito do Compartimento 1 (75 mg dm⁻³) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). O enriquecimento de Fe disponível é uma evidência das condições de maior solubilização dos óxidos de Fe do rejeito em direção à foz do rio. Um dos principais mecanismos de solubilização do Fe é o excesso de água, que promove a redução do elemento ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) (LEPSCH, 2011). O Fe na forma reduzida é mais móvel (mais fracamente retido pela matéria orgânica do solo e pelos minerais de argila) e tende a se translocar e se concentrar nas posições mais baixas da bacia.

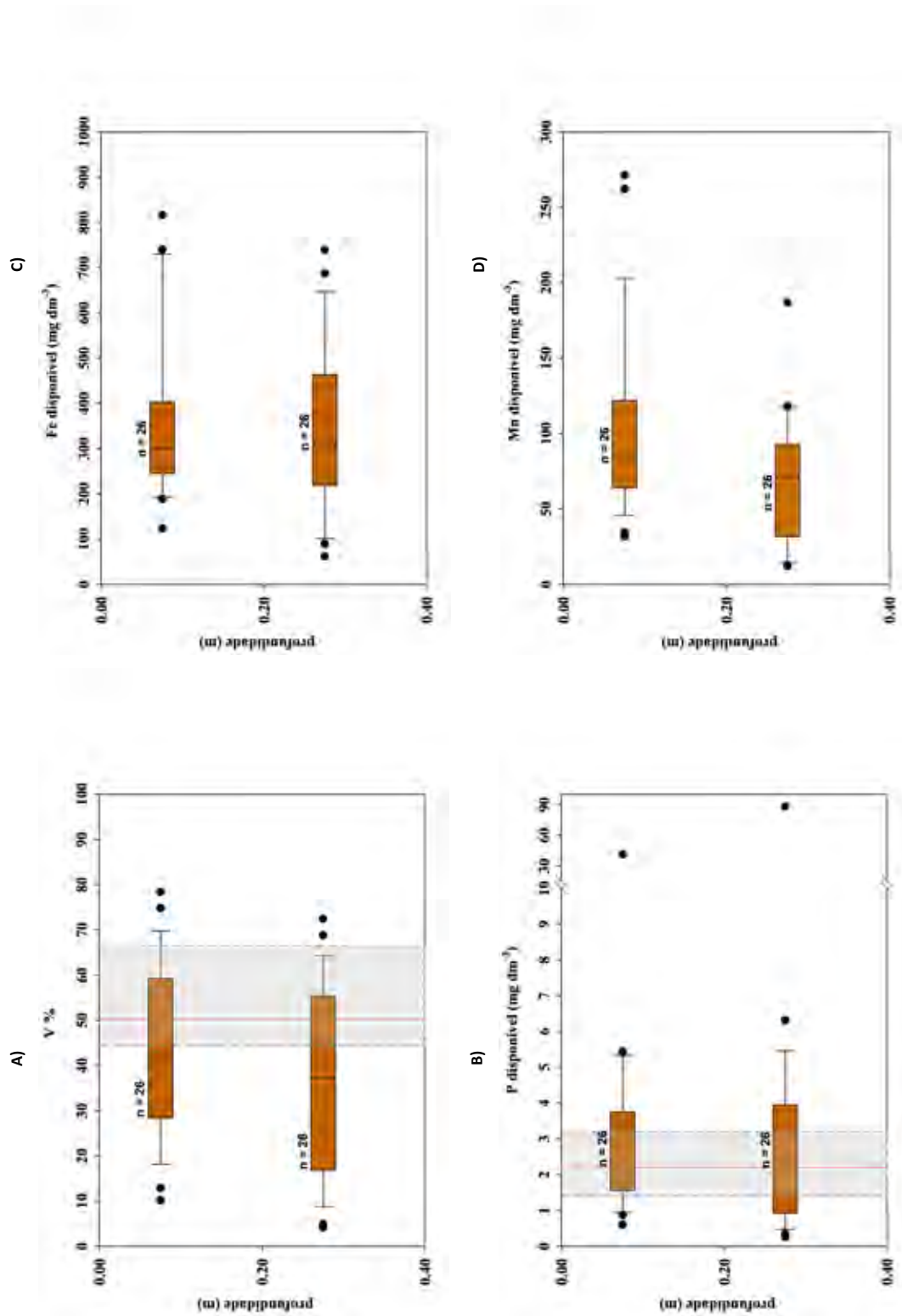
Os teores medianos disponíveis do micronutriente Mn também foram elevados no material depositado nos Compartimentos 2, 3 e 4 (acima de 50 mg dm⁻³) (Figura 72 e Figura 73 - D). A região de Mariana tem a exploração de Mn como uma de suas atividades econômicas (RODRIGUES, 2012). O Mn está sujeito às mesmas condições de redução e concentração discutidas para o Fe, embora o Mn seja mais ainda móvel do que o Fe no solo (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). Elevados teores de Mn disponível podem, em algumas situações, indicar a possibilidade de toxidez às plantas e organismos edáficos (BROADLEY et al., 2012).

Figura 72 – Saturação por bases (A), teores de P disponível (B), teores de ferro disponível (C) e manganês disponível (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Os teores de Fe e Mn não foram avaliados nas referências de linha base.

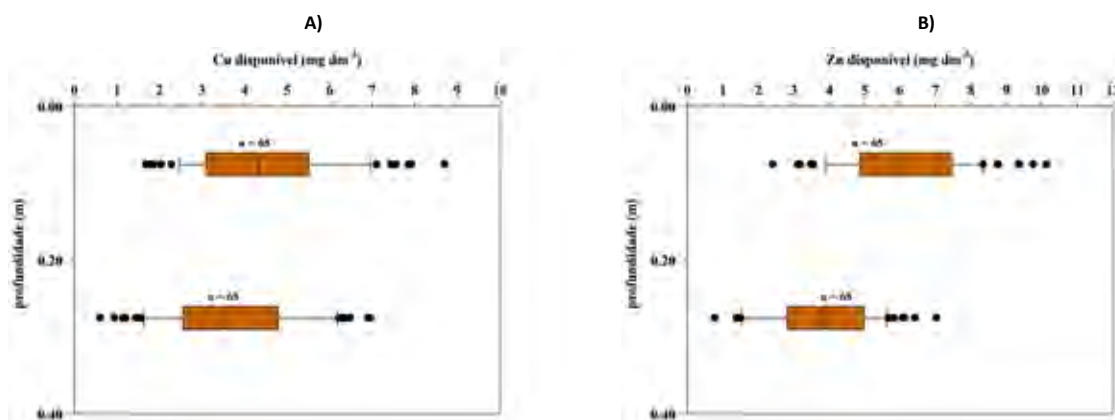
Figura 73 – Saturação de bases (A), teores de P disponível (B), teores de ferro disponível (C) e manganês disponível (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Os teores de Fe e Mn não foram avaliados nas referências de linha base.

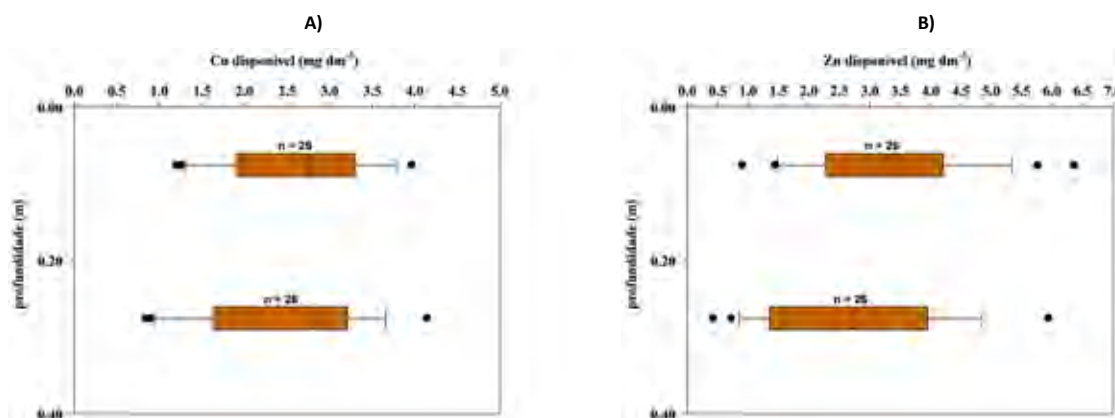
Por fim, os teores medianos de Cu disponível recuperados nas amostras das áreas impactadas são considerados adequados para o crescimento das plantas (variação entre 2,7 e 4,2 mg dm⁻³ para as camadas 0-20 e 20-40 cm e para ambos os Compartimentos) (Figura 74 e Figura 75 - A). Para o Zn, foi observada a mesma situação, ou seja, os teores medianos das amostras dos Compartimentos 2, 3 e 4 são considerados altos (RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ, 1999). De acordo com Goedert (1986), esse teor limite é de 1,0 mg kg⁻¹. Os teores medianos de Zn nas duas profundidades e nos dois Compartimentos, por sua vez, variaram de 2,7 a 5,9 mg dm⁻³ (Figura 74 e Figura 75 - B).

Figura 74 – Teores de cobre disponível (A) e zinco disponível (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Os teores de Cu e Zn não foram avaliados nas referências de linha base.

Figura 75 – Teores de cobre disponível (A) e zinco disponível (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Os teores de Cu e Zn não foram avaliados nas referências de linha base.

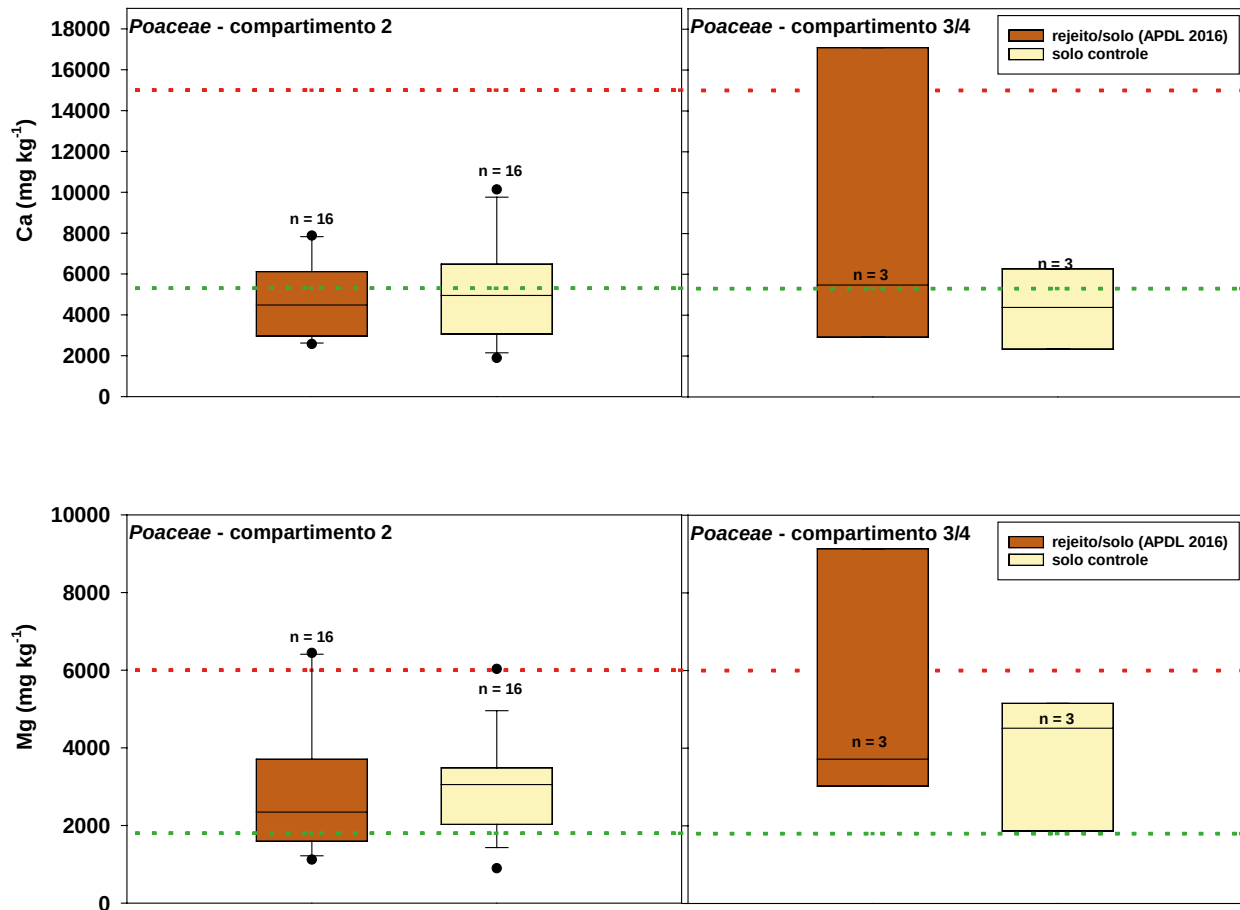
Os teores disponíveis de Cu e Zn dos solos afetados a jusante da UHE Risoleta Neves foram superiores aos encontrados no rejeito depositado no Compartimento 1 (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d) (cerca de 3 a 7 vezes superior para o Cu e 13 a 27 vezes superior para o Zn), reforçando as diferentes características entre as matrizes. No Tecnossolo, esses elementos estiveram em níveis considerados insuficientes para o crescimento de plantas, enquanto que a mesma situação não foi verificada para os solos das manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4.

De maneira geral, os teores dos macronutrientes Ca, Mg e K na parte aérea das *Poaceae* desenvolvidas sobre o material das manchas de inundação estiveram dentro da faixa de limite máximo (toxidez) e mínimo (deficiência) para alimentação adequada de bovinos (NRC, 2001; 2005) (Figura 76 e Figura 77). Não houveram diferenças expressivas entre os teores medianos desses nutrientes nas *Poaceae* desenvolvidas nas amostras das áreas afetadas e nos solos controle. A absorção pelas plantas nas várzeas não necessariamente respondeu ao aumento nos teores de bases com a deposição do material na porção extracalha na mesma proporção. Contudo, deve-se salientar que as referências usadas nessas duas situações são diferentes: linha base, para os teores de bases nos solos – BENEDETTI et al., 2008; FEAM, 2010; PACHECO, 2015; e teores de bases na parte aérea das plantas – limites com base na nutrição de bovinos (NRC, 2001; 2005).

Nos Compartimentos 3 e 4 a dispersão dos teores de Ca, Mg e K na parte aérea das plantas desenvolvidas no material depositado sobre os solos afetados foi superior à dispersão desses mesmos elementos no Compartimento 2 e nas plantas desenvolvidas no solo controle. No trecho final do rio Doce, a deposição de material foi mais heterogênea devido a maior possibilidade de mistura com solos e sedimentos originais e maior aporte de outras fontes antrópicas de Ca, Mg e K. Essa maior heterogeneidade do substrato refletiu na maior dispersão de absorção desses nutrientes pelas *Poaceae*. Além disso, a aparente superioridade de teores nas plantas dos Compartimentos 3 e 4 pode ser atribuída, também, a maior variabilidade em função do baixo número de amostras, uma vez que existem poucas áreas de pastagens mais próximas ao litoral do Espírito Santo.

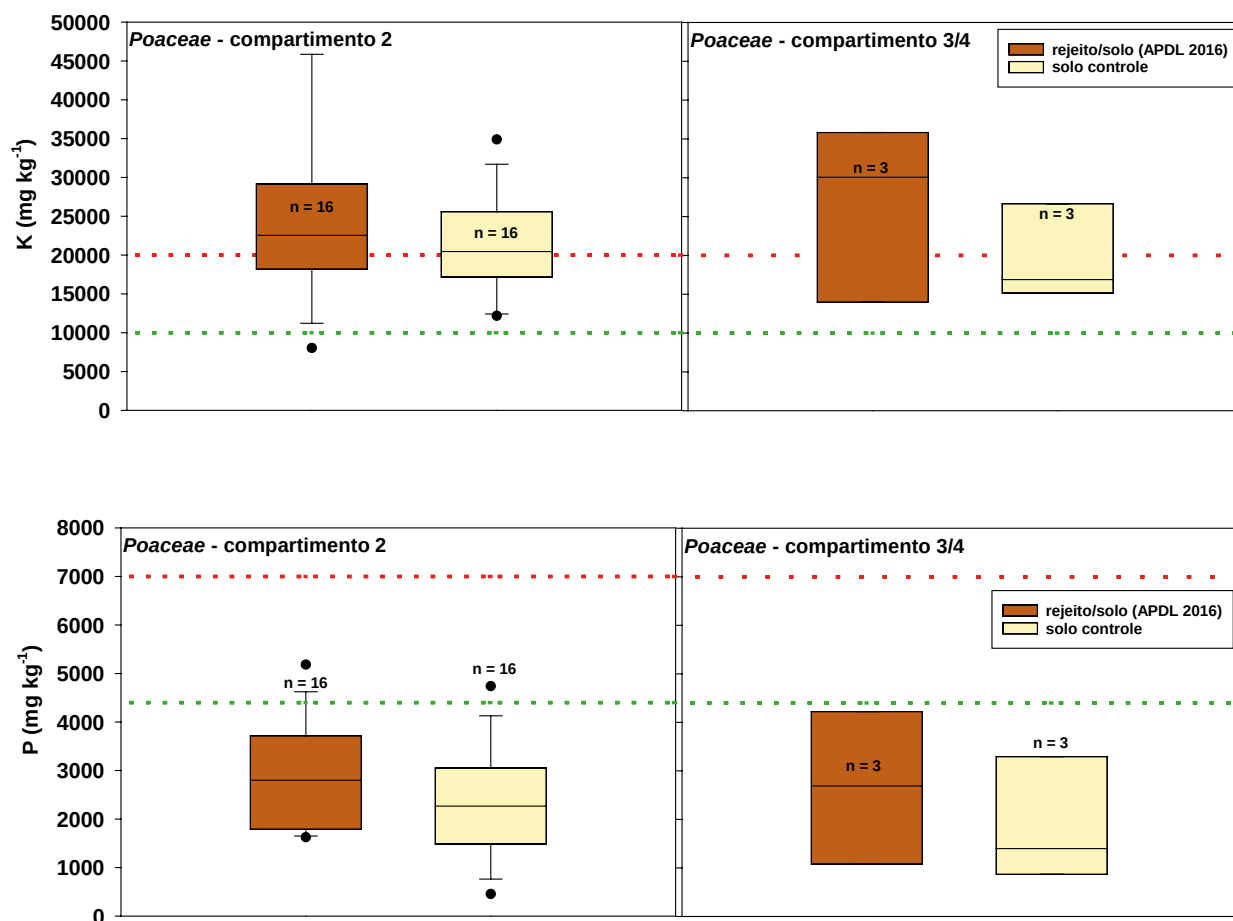
O enriquecimento de K nas plantas desenvolvidas sobre os solos das áreas afetadas em relação ao solo controle é compatível com a maior abundância de mica (reflexão em $8,9^\circ 2\theta$) nos padrões de DRX desse material (Figura 39 a Figura 60). As partículas de mica nesse ambiente sedimentar com alta energia de intemperismo se encontram parcialmente degradadas (mica se transforma em ilita) e com maior liberação de formas estruturais de K.

Figura 76 – Teores de cálcio e magnésio na biomassa aérea de pastagens (*Poaceae*) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.



Linhas horizontais vermelhas representam os teores máximos toleráveis no pasto para alimentação de bovinos de acordo com a NRC (2005) e linhas horizontais verdes representam a exigência mínima do elemento para bovinos de leite em lactação de acordo com a NRC (2001).

Figura 77 – Teores de potássio e fósforo na biomassa aérea de pastagens (*Poaceae*) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.



Linhas horizontais vermelhas representam os teores máximos toleráveis no pasto para alimentação de bovinos de acordo com a NRC (2005) e linhas horizontais verdes representam a exigência mínima do elemento para bovinos de leite em lactação de acordo com a NRC (2001).

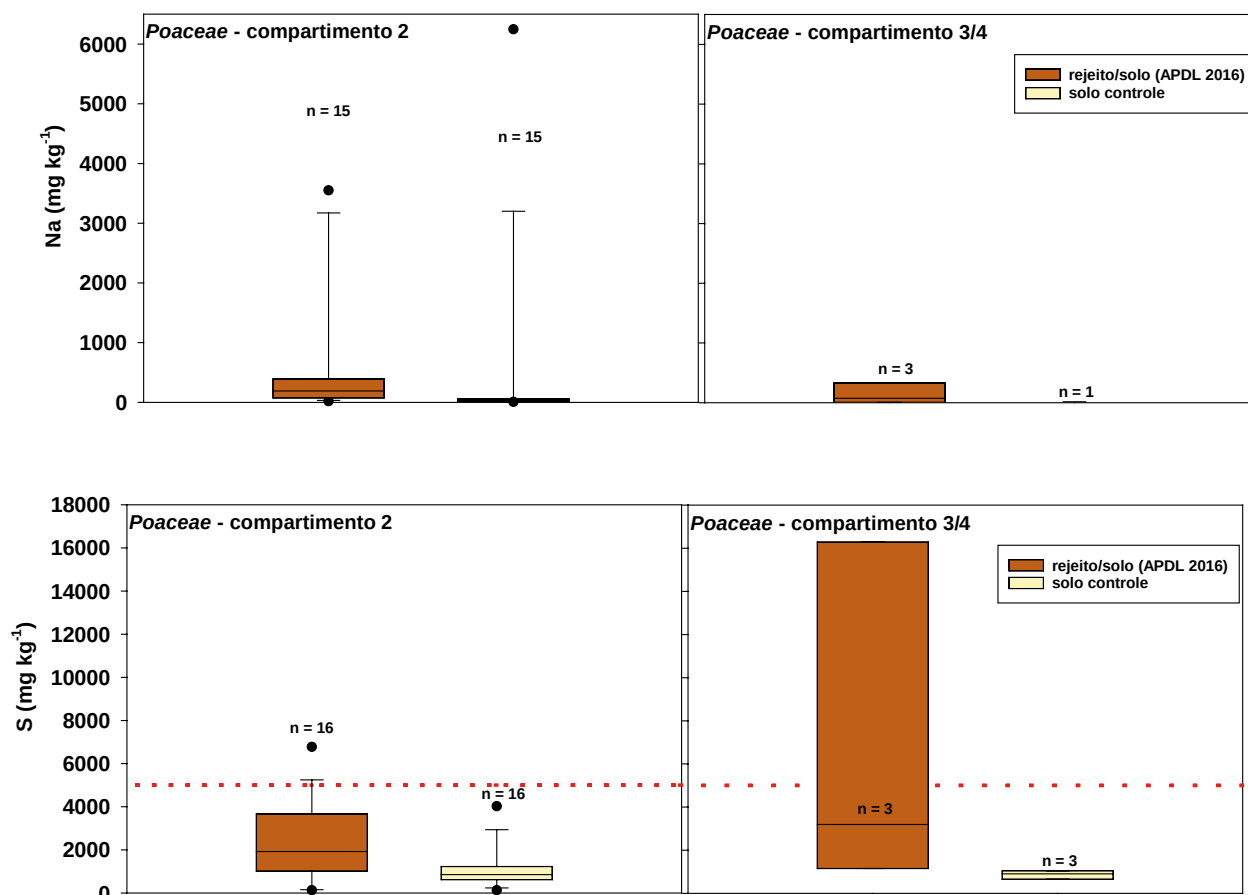
Com relação aos teores de P, tanto das plantas desenvolvidas sobre o material das manchas de inundação quanto no solo controle, foram detectados teores de P abaixo do limite mínimo para adequada nutrição de bovinos (Figura 77). Ou seja, o ambiente de deposição da bacia do rio Doce é naturalmente pobre em P e, para um adequado crescimento de pastagens nessas áreas é necessário a fertilização dos solos com P. Embora os teores medianos de P nos solos das áreas afetadas dos Compartimentos 3 e 4 terem sido superiores à linha base (Figura 73), esse elemento ainda foi classificado como muito baixo em todos os solos avaliados (afetados e não afetados), não tendo sido suficiente para uma absorção satisfatória pelas *Poaceae*.

Os teores de Na nas gramíneas desenvolvidas sobre as áreas afetadas foram superiores aos das pastagens desenvolvidas no solo controle (Figura 78). Os teores medianos de Na variaram entre 16,1-35,1 mg kg⁻¹ (solo controle) e 72,9-189,6 mg kg⁻¹ (solos afetados). Porém, variações entre 99 e 924 mg kg⁻¹ de Na em pastagens foram reportadas na literatura como sendo naturais (GIOSTRI et al., 2009; LEBDOSOEKOJO et al., 1980; SENGGER et al., 1997). Além disso, a exigência animal com relação aos minerais (como Na, Ca, Mg, P e micronutrientes) geralmente são superiores à disponibilidade de oferta via consumo de pastagens, uma vez que é comum (senão mandatória) a complementação com sal mineral na dieta de bovinos em sistema de criação extensiva (LEBDOSOEKOJO et al., 1980).

Com relação aos teores de S, os mesmos foram superiores nas plantas crescidas sobre as áreas afetadas, especialmente na porção mais próxima ao litoral. O material que se depositou nas várzeas promoveu aumento nos teores de carbono orgânico no Compartimento 2 (Figura 65). É bem estabelecido na literatura que a principal fonte de S no solo são os compostos orgânicos em decomposição, que podem representar até 90% do S total em solos de regiões úmidas e subúmidas (ALVAREZ et al., 2007; SILVA; MENDONÇA, 2007). Além disso, o acúmulo de enxofre em formas reduzidas (sulfeto) é comum em ambientes estuarinos, o que pode explicar a maior absorção desse elemento pelas plantas quanto mais próximo à foz do rio, no Espírito Santo.

Com relação às amostras de tecido foliar dos cacaueiros dos Compartimentos 3 e 4, os seguintes teores de nutrientes foram quantificados nas amostras das áreas sob influência das manchas de inundação (em g kg⁻¹): Ca: 18,9; Mg: 9,1; K: 11,8; P: 1,3; e S: 2,2. Para essas amostras, o teor de Na quantificado foi de 0,5 g kg⁻¹. Os teores quantificados na única amostra representante do solo controle (uma vez que praticamente toda a área de cabruca da região de Linhares se encontra na APDL), foram: Ca: 16,9; Mg: 7,1; K: 21,4; P: 1,9; S: 2,9; e Na: 0,2 g kg⁻¹. Mesmo com a baixa representatividade para o solo controle, é possível verificar que houve semelhança entre os teores quantificados nas amostras de dentro e fora da APDL, além de a faixa de teores corresponder à variação reportada na literatura (BRAGA, 2015; HUAMANÍ-YUPANQUI et al., 2012; SANTANA; IGUE, 1979).

Figura 78 – Teores de sódio e enxofre na biomassa aérea de pastagens (*Poaceae*) desenvolvidas em solos sob influência das manchas de inundação (APDL 2016) e sobre solos controle nos Compartimentos 2, 3 e 4.



Linha horizontal vermelha representa o teor máximo tolerável no pasto para alimentação de bovinos de acordo com a NRC (2005).

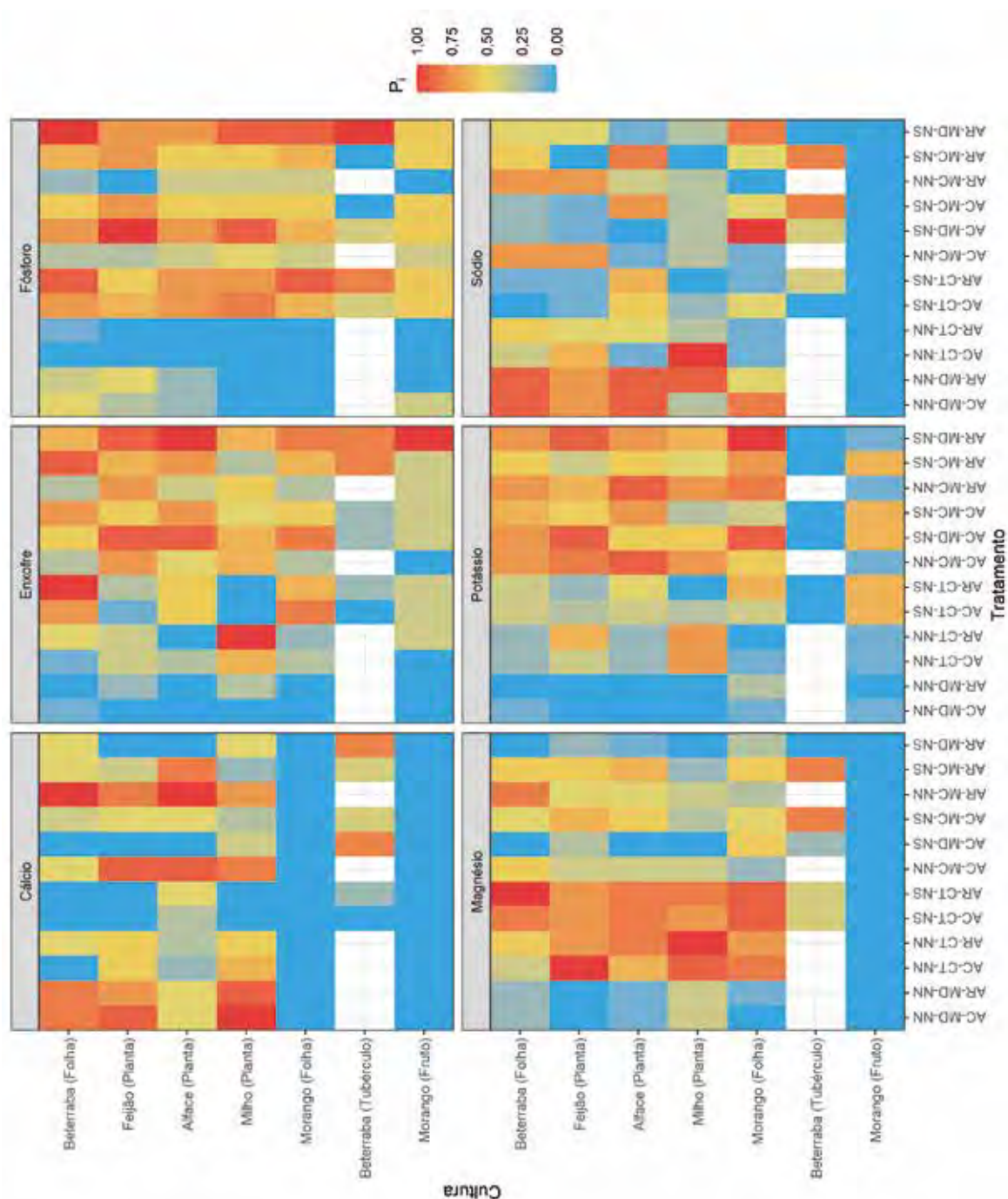
Para complementar as observações de campo apresentadas anteriormente, idealizou-se um experimento em casa de vegetação, em que foi possível isolar os fatores de variação de difícil controle em campo. A partir desse experimento foi possível comparar a absorção de nutrientes e produção de biomassa por espécies de interesse agrícola em diferentes matrizes ("solo controle – CT", "material depositado – MD" (Tecnossolo) e "material da cheia – MC" (representando os solos afetados dos Compartimentos 2, 3 e 4)), permitindo ainda a comparação de respostas de diferentes vegetais de consumo humano (uma vez que no campo só foram amostradas gramíneas) e o uso de água pura (AC) e água misturada com rejeito (AR) para inferências com relação à prática de irrigação. Além disso, o experimento permitiu o controle da correção dos teores de nutrientes do substrato (NN – sem nutrientes; NS – com nutrientes), para observar a expressão do máximo potencial produtivo de cada cultura.

A Figura 79 resume os efeitos de cada tratamento (substrato, água de irrigação e adição de nutrientes) em relação aos teores de nutrientes de planta determinados na parte aérea (base em massa seca) de beterraba (folha e tubérculo), feijão (parte aérea), alface (parte aérea), milho (parte aérea) e morango (folha e fruto). Embora verifiquem-se respostas inter-específicas, é possível identificar

padrões, como o fato de a absorção de nutrientes pelo fruto do morangueiro praticamente não ter variado em função dos tratamentos.

A condição para menor absorção de Ca pela beterraba (folha e tubérculo), milho, feijão, alface e morango (folha e fruto) foi no tratamento com solo controle com adição de nutrientes aos vasos, independentemente na água de irrigação (Figura 79). Já o tratamento mais favorável à absorção de Ca foi, de maneira geral, o MC (material que representa os solos das manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4), irrigação com mistura de rejeito sob adição de nutrientes, bem como o MD (rejeito depositado no Compartimento 1).

Os teores de S, P e K tenderam a ser mais expressivos nas espécies cultivadas tanto no MD quanto no MC, especialmente quando houve complementação de nutrientes por meio de solução nutritiva (NS) (Figura 79). Para os teores de Mg, houve efeito contrário, ou seja, a concentração desse elemento nos tecidos vegetais tendeu a ocorrer de forma mais expressiva quando cultivados no CT. As culturas desenvolvidas no MD sem nutrientes (NN), de forma geral apresentaram maiores teores de Na. Por fim, não foi possível identificar efeito nítido das águas de irrigação sobre o *status* nutricional das culturas, pois não foi identificado padrão de resposta entre as espécies.



Em cada linha e para cada variável, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis e calculado o escore, controlando o erro para as comparações múltiplas. A ordenação, tanto dos tratamentos, quanto das culturas, foi feita com base na média dos valores de . AC: água controle; AR: água rejeito; MD: material depositado; MC: material cheia; CT: solo controle; NN: nutrientes – não; NS: nutrientes – sim. Para beterraba tubérculo, as comparações ocorreram apenas para os tratamentos que apresentaram raiz tuberosa.

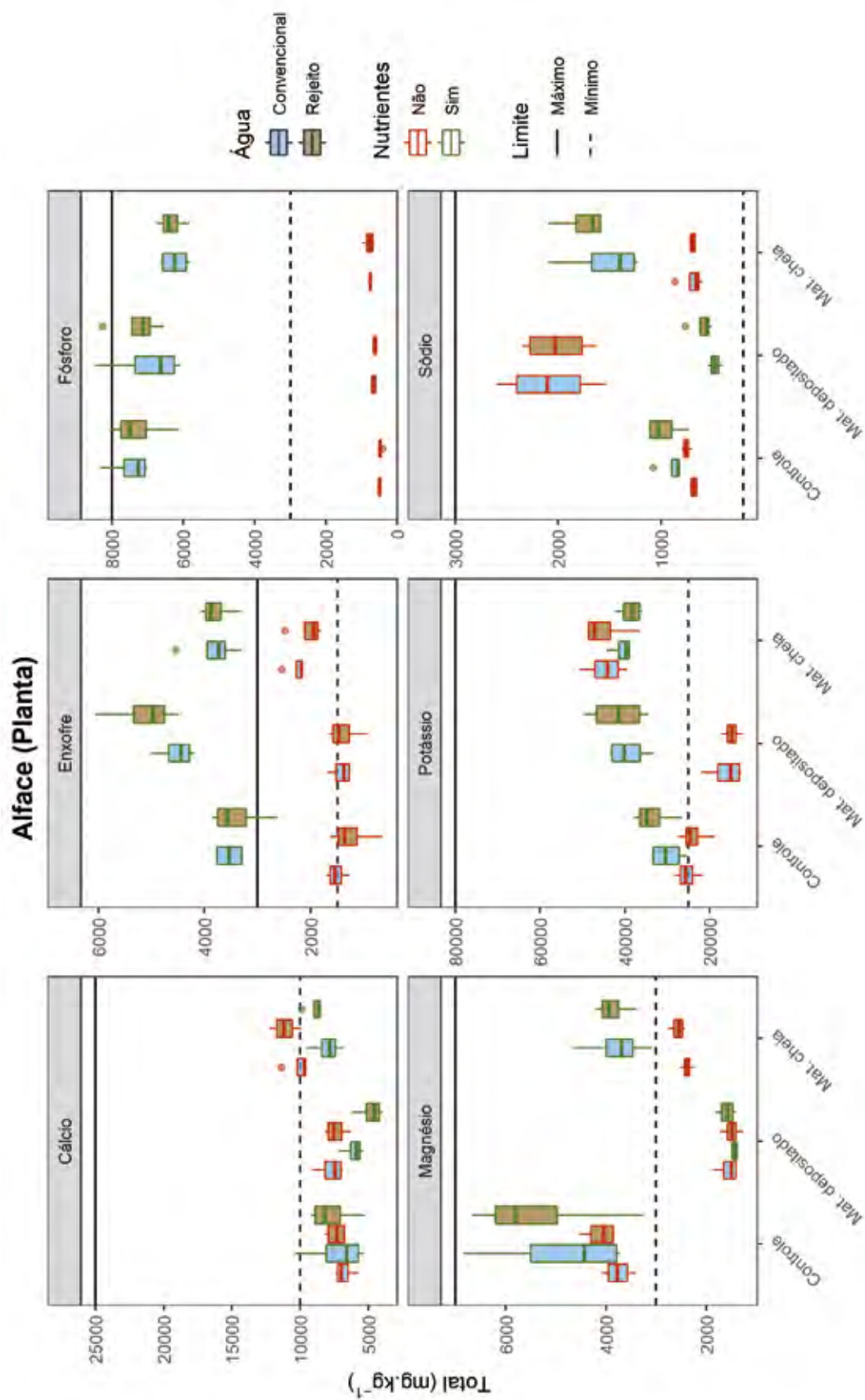
De forma geral, os teores de nutrientes observados nos tecidos vegetais do experimento corroboraram as observações de campo com relação às pastagens: a absorção de Mg pelas diferentes espécies foi favorecida no solo controle, da mesma maneira que os teores medianos de Mg foram superiores no tecido das *Poaceae* avaliadas nesse mesmo substrato (Figura 76); a absorção de K, por sua vez, foi favorecida no MC (material que apresenta maior contribuição de micas em sua composição mineralógica (mineral fonte de K)), também corroborando os resultados obtidos nas gramíneas (Figura 77). Já os teores de Na foram mais elevados nas plantas desenvolvidas no MD, condição mais próxima à fonte do rejeito extravasado. A rocha (Itabirito) passa pelos processos de moagem, deslamagem e flotação e, para realização deste processo, são utilizados amido de milho, CaO, NaOH e etermonoamina (pH 10,5) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Nesse caso, o uso de NaOH favoreceu a absorção de Na pelas plantas neste material.

Em resumo, o MC apresentou o maior potencial de fornecer nutrientes para as plantas em relação ao MD, e mesmo em relação aos solos naturalmente presentes nas cotas mais altas próximas às margens do rio Doce que não foram afetados pelo desastre (CT). Outra observação importante é que a irrigação com água rica em sedimentos do rio Doce não reduziu a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a absorção de nutrientes foi aumentada quando os substratos foram suplementados por solução nutritiva.

O comportamento de absorção de nutrientes também pode ser verificado a partir dos gráficos individuais de cada cultura, que comparam, ainda, os teores recuperados em cada tratamento com os limites mínimo e máximo reportados nos tecidos vegetais das respectivas espécies, do ponto de vista da nutrição da planta (Figura 80 a Figura 86). Essa comparação permite interpretar se os teores quantificados estão dentro de uma variação considerada normal, a partir de comparação com dados da literatura. As diferenças refletem a fisiologia de cada espécie, bem como os diferentes tecidos amostrados (folha, fruto, tubérculo, parte aérea total, etc.), translocação e remobilização dos nutrientes.

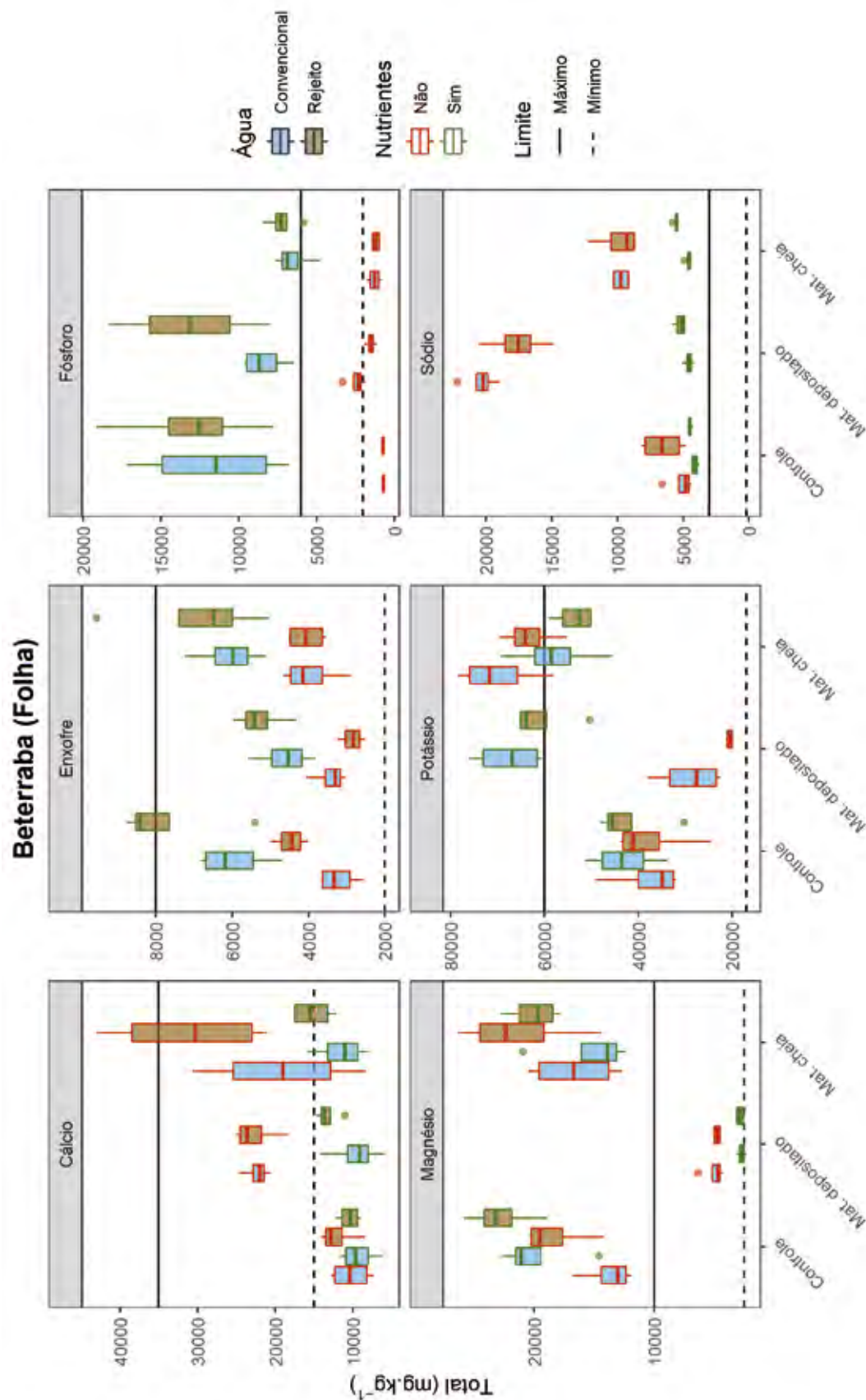
Para a alface, observa-se que houve deficiência de Ca em todos os tratamentos, deficiência de P em todos os vasos que não receberam nutrientes e deficiência de Mg e K para as plantas desenvolvidas no MD (rejeito depositado no Compartimento 1) (Figura 80). A alface é uma cultura exigente em Ca, que frequentemente desenvolve um distúrbio fisiológico conhecido como *tipburn* ou “queima dos bordos” (deficiência localizada de Ca), mesmo quando esse elemento se encontra em níveis adequados no solo ou na solução nutritiva (BENINNI; TAKAHASHI; NEVES, 2003). Com exceção ao tubérculo de beterraba, para as demais culturas não foi evidente a deficiência de Ca, podendo-se concluir que esse comportamento deve ser resultante da fisiologia da alface, uma vez que foi observado em todos os tratamentos indistintamente.

Figura 80 – Teores de nutrientes quantificados no tecido vegetal da alfaca (*Lactuca sativa*) cultivada no experimento.



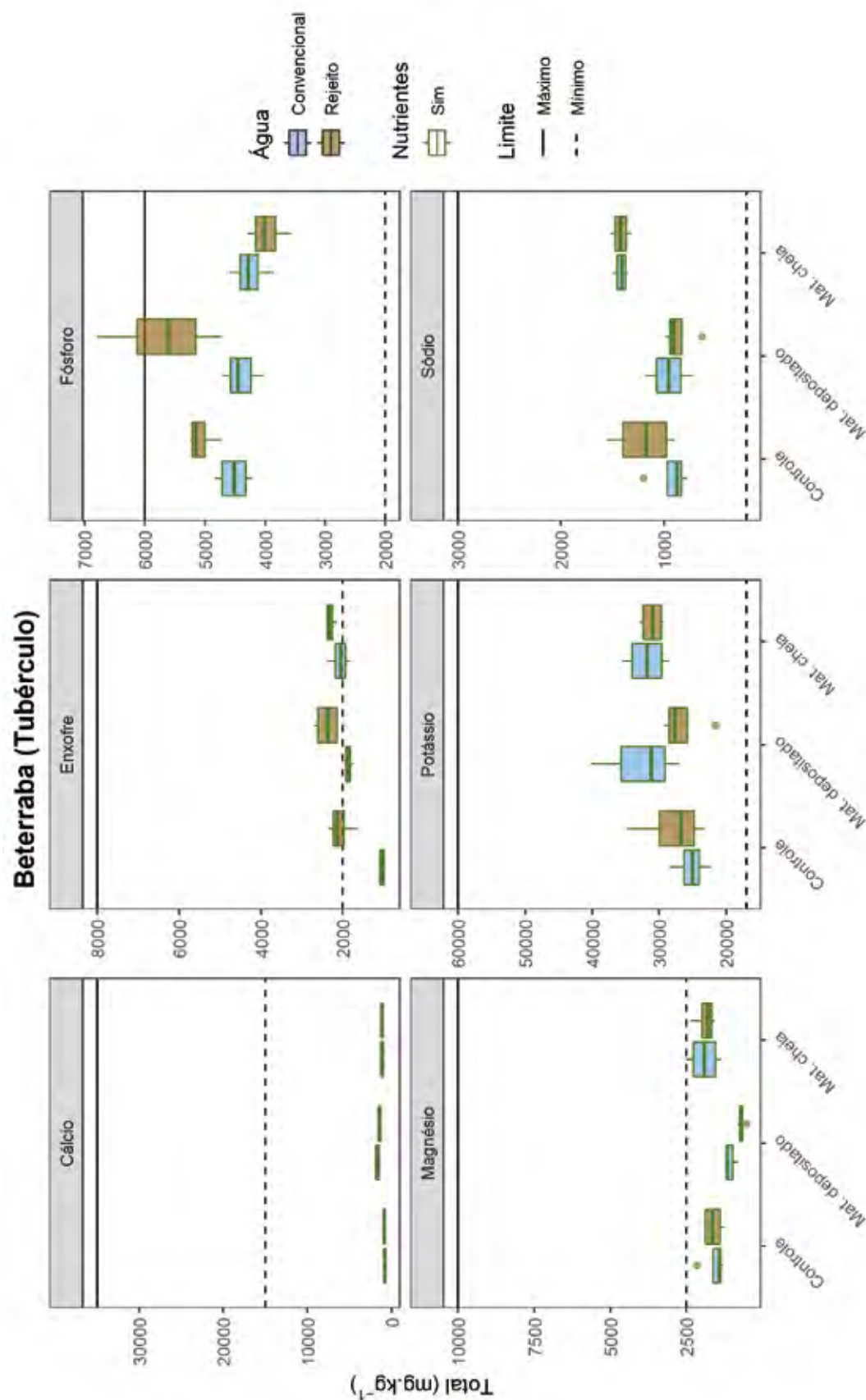
As linhas de limites máximo e mínimo representam teores reportados previamente na literatura, conforme descrito no item 2.2.1.4.

Figura 81 – Teores de nutrientes quantificados no tecido foliar da beterraba (*Beta vulgaris*) cultivada no experimento.



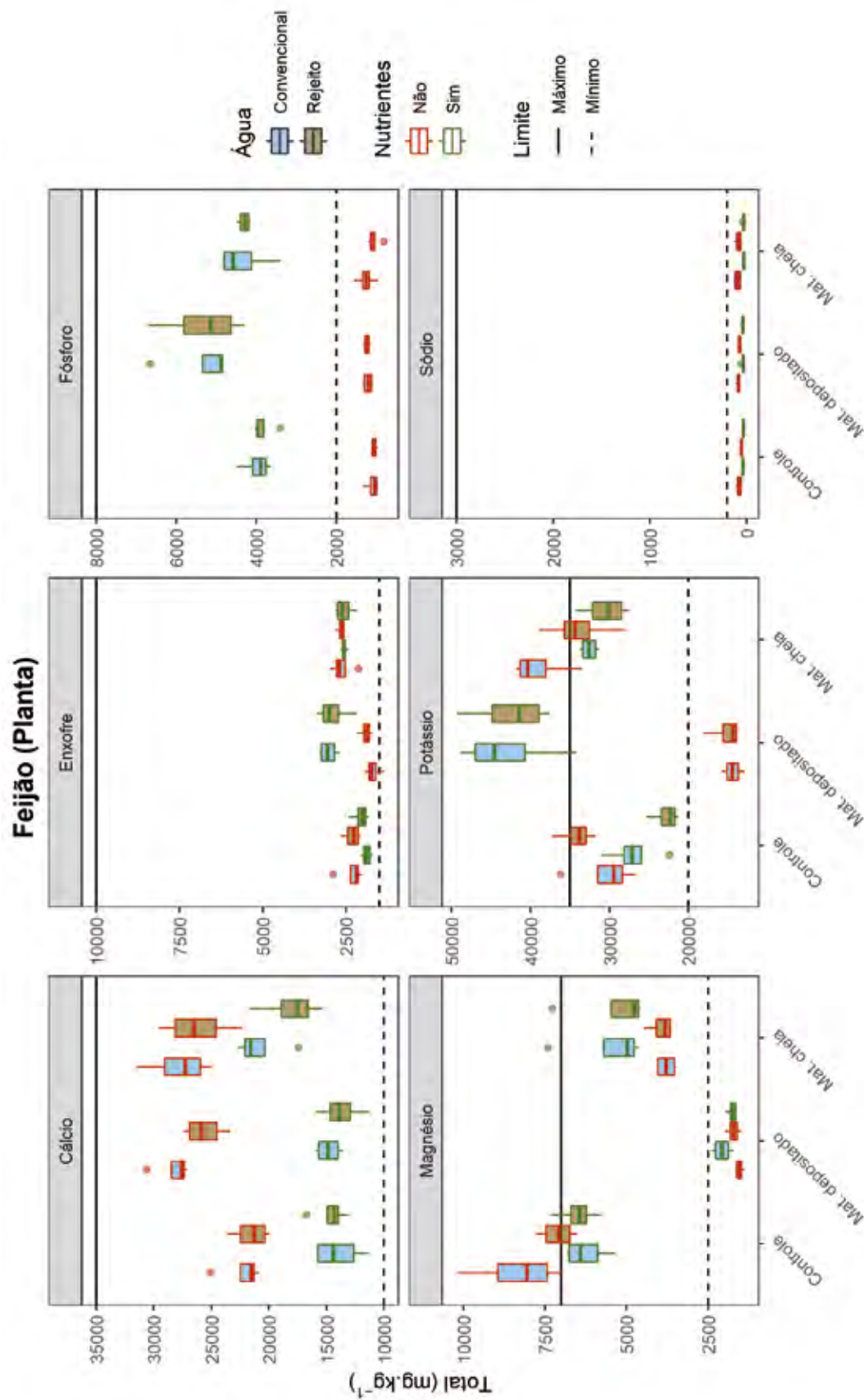
As linhas de limites máximo e mínimo representam teores reportados previamente na literatura, conforme descrito no item 2.2.1.4.

Figura 82 – Teores de nutrientes quantificados na raiz tuberosa da beterraba (*Beta vulgaris*) cultivada no experimento.



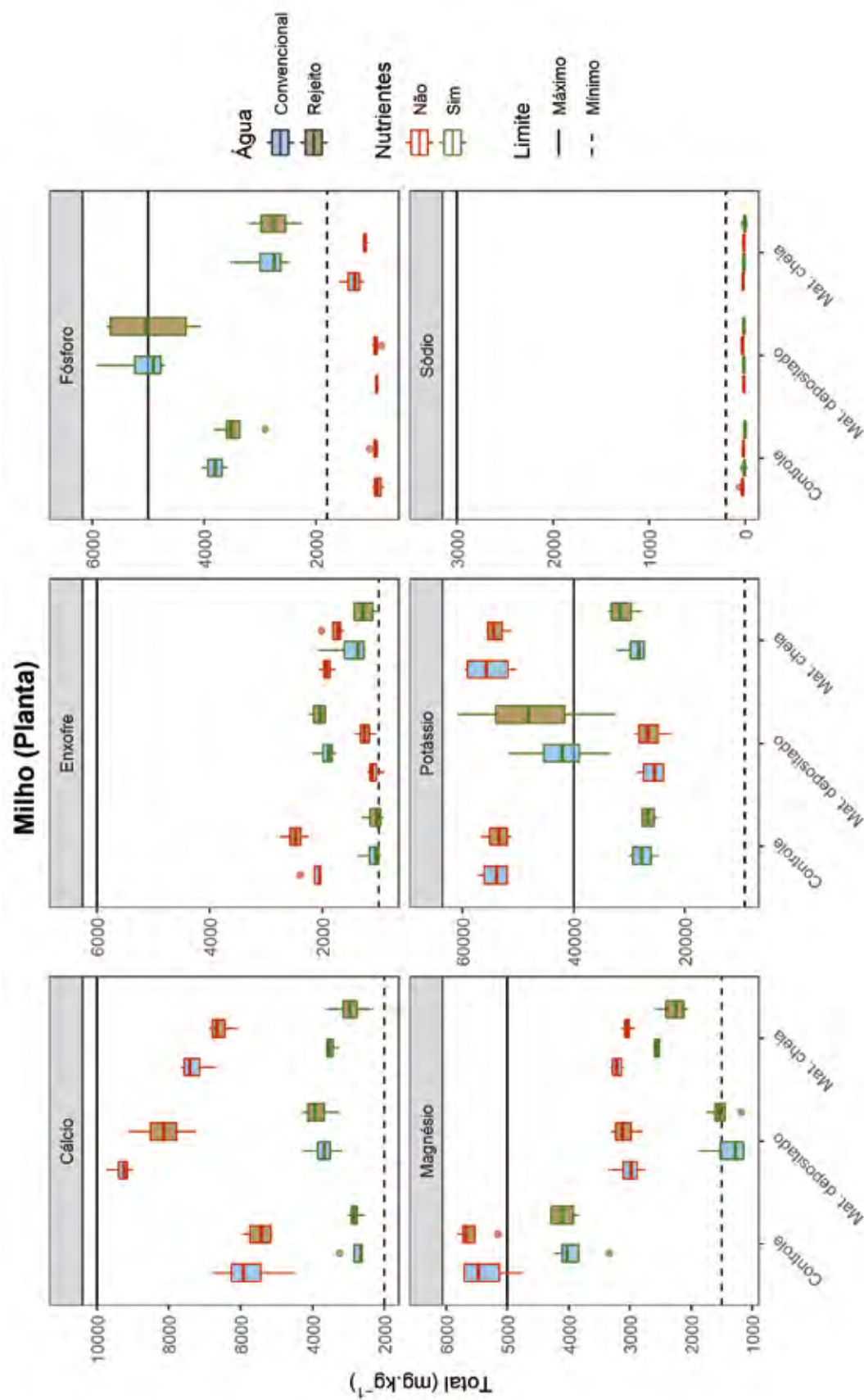
As linhas de limites máximo e mínimo representam teores reportados previamente na literatura, conforme descrito no item 2.2.1.4.

Figura 83 – Teores de nutrientes quantificados no tecido vegetal do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) cultivado no experimento.



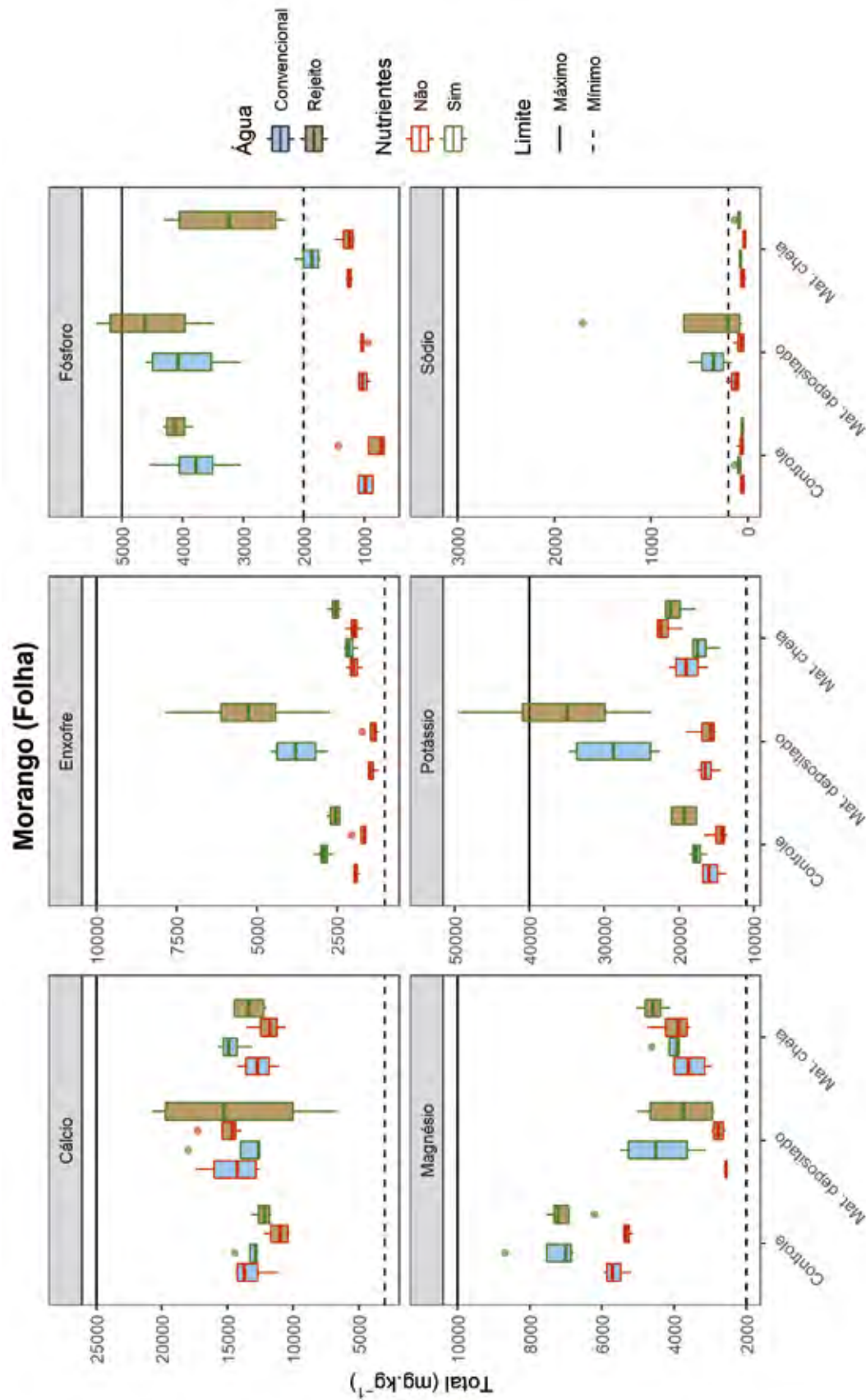
As linhas de limites máximo e mínimo representam teores reportados previamente na literatura, conforme descrito no item 2.2.1.4.

Figura 84 – Teores de nutrientes quantificados no tecido vegetal do milho (*Zea mays* L.) cultivado no experimento.



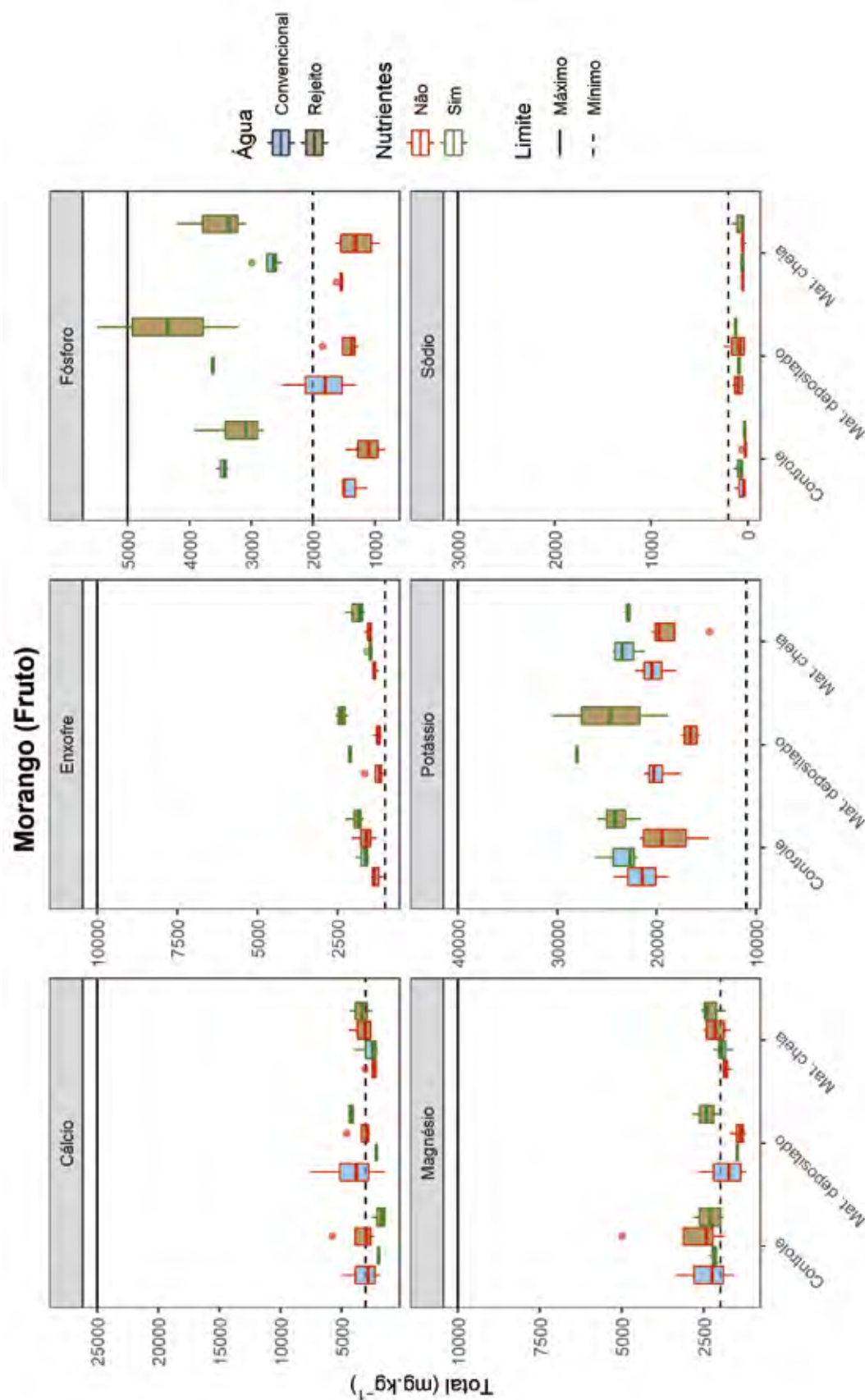
As linhas de limites máximo e mínimo representam teores reportados previamente na literatura, conforme descrito no item 2.2.1.4.

Figura 85 – Teores de nutrientes quantificados no tecido foliar do morangueiro (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivado no experimento.



As linhas de limites máximo e mínimo representam teores reportados previamente na literatura, conforme descrito no item 2.2.1.4.

Figura 86 – Teores de nutrientes quantificados nas infrutescências do morangueiro (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivado no experimento.

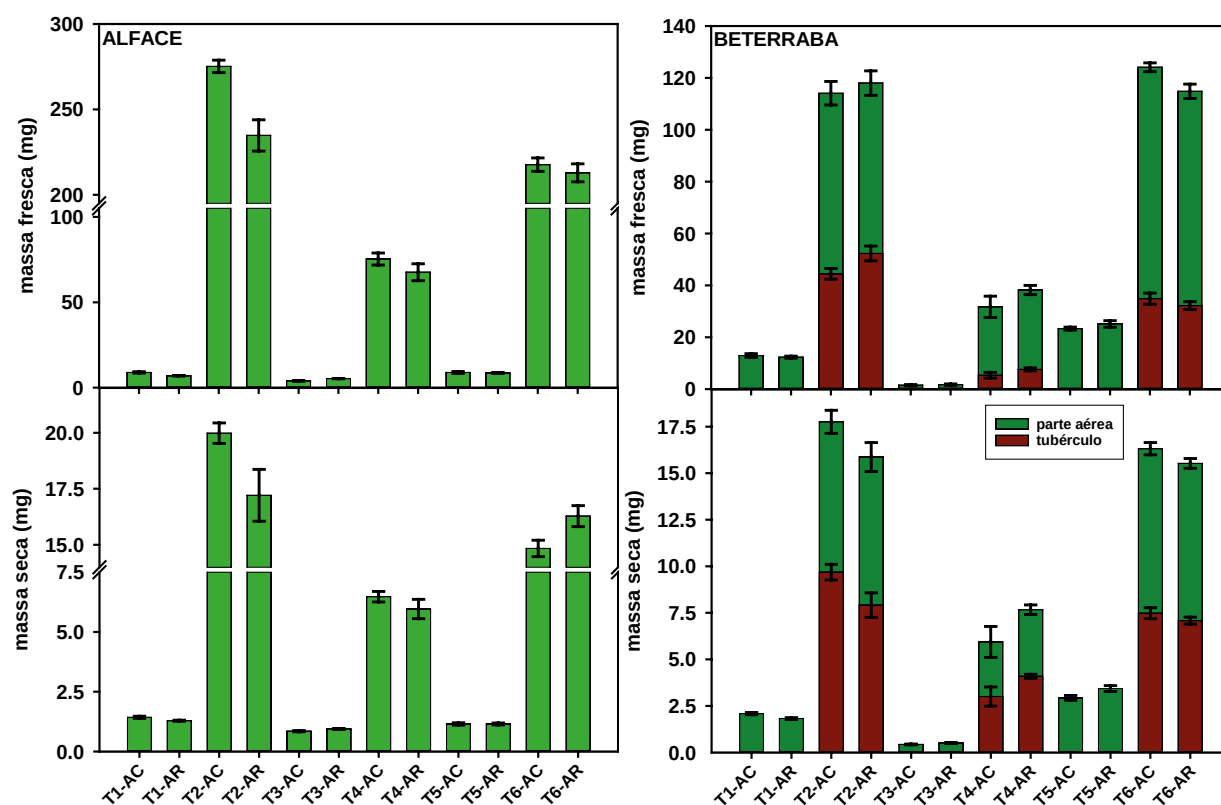


As linhas de limites máximo e mínimo representam teores reportados previamente na literatura, conforme descrito no item 2.2.1.4.

O P, por sua vez, é um elemento de baixa mobilidade no solo (BRADY; WEIL, 2010; LEPSCH, 2011), e por ter sido detectado em níveis muito baixos tanto nos solos das manchas de inundação (MC) (Figura 72 e Figura 73) quanto nos solos controle (CT) e no rejeito depositado (MD) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), sua adição via solução nutritiva foi determinante para a nutrição das plantas, já que todos os tratamentos sem nutrientes (NN) de todas as espécies cultivadas apresentaram-se em níveis abaixo do limite mínimo reportado na literatura (Figura 80 a Figura 86). Também de forma bastante consistente, as plantas apresentaram teores de Mg na faixa de deficiência quando cultivadas no MD (rejeito do Compartimento 1), corroborando os baixos teores desse elemento no Tecnossolo (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d) e indicando não haver problemas relacionado a esse nutriente nos solos das manchas de inundação dos Compartimentos à jusante da UHE Risoleta Neves. Para o K, comportamento semelhante foi observado, ou seja, a maior frequência de detecção de teores de K abaixo da faixa de suficiência foram detectados para plantas desenvolvidas no MD sem nutrientes (NN), enquanto que as plantas que se desenvolveram nos solos representados pelo MC (solos das manchas de inundação dos Compartimentos 2 e 3) apresentaram teores de K mesmo acima do limite máximo reportado na literatura (a exemplo da beterraba folha (Figura 81). Todas as plantas apresentaram teores de S adequados (com teores acima do limite máximo na alface suprida com solução nutritiva) e com relação ao Na, parece ter havido resposta de acordo com cada espécie (independentemente do tratamento): teores de Na abaixo da faixa de suficiência reportada na literatura para feijão, milho e morango (folha e fruto), teores acima do limite máximo para beterraba (folha) e teores dentro da faixa de variação normal para alface e beterraba (tubérculo). É importante ressaltar, no entanto, que o Na não é classificado como nutriente de plantas (elemento essencial), mas sim como elemento benéfico em baixas concentrações.

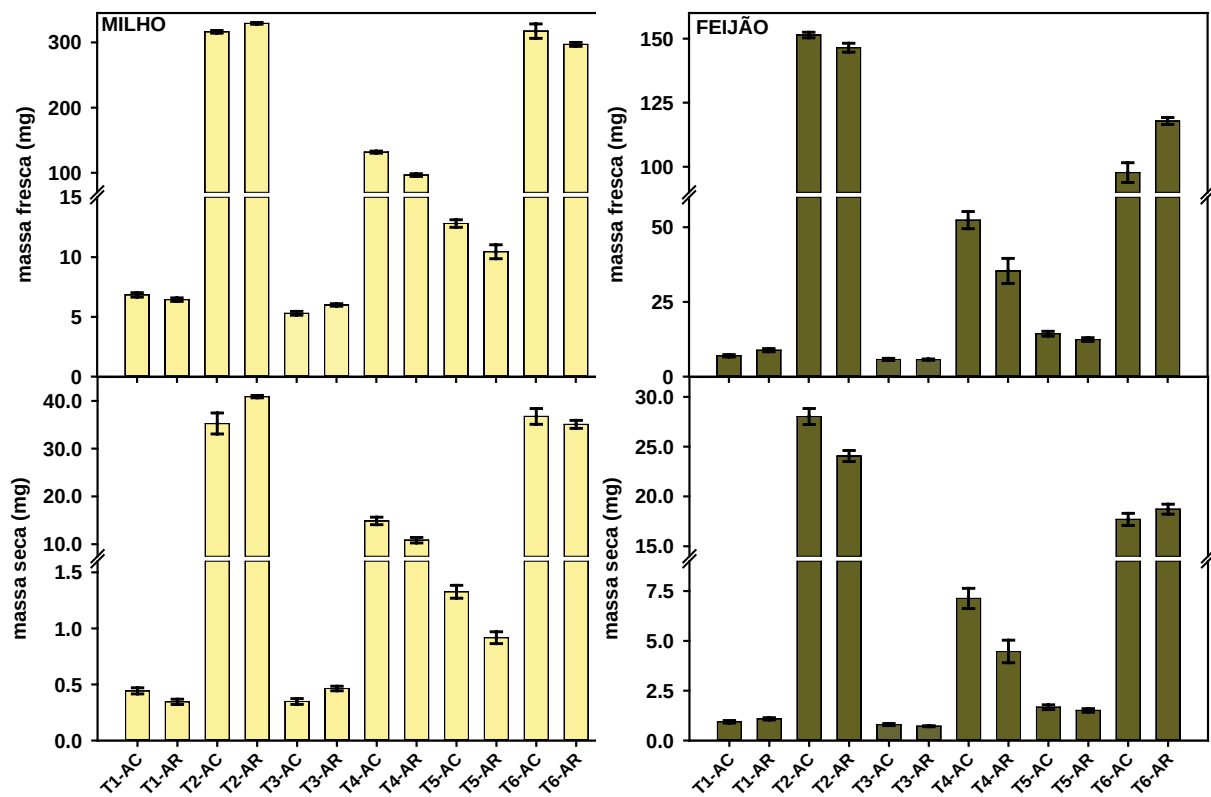
De maneira geral, o *status* nutricional das espécies cultivadas no experimento, conforme descrição acima, refletiu as produtividades de massa fresca e seca das plantas, com resultados bastante consistentes entre os tratamentos avaliados (Figura 87, Figura 88 e Figura 89).

Figura 87 – Massa fresca e massa seca produzida pelas culturas da alface e beterraba no experimento de casa de vegetação.



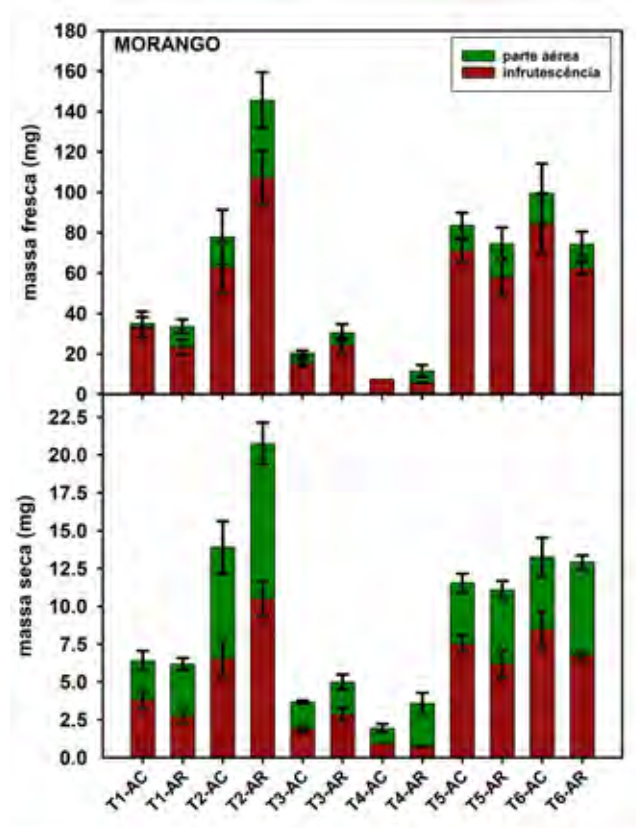
T1: solo controle – natural; **T2:** solo controle – com nutrientes; **T3:** rejeito depositado – natural; **T4:** rejeito depositado – com nutrientes; **T5:** Material cheia Gov. Valadares (2020) – natural; **T6:** Material cheia Gov. Valadares (2020) – com nutrientes; **AC:** rega com água deionizada; **AR:** rega com água simulando turbidez do rio Doce (rejeito do Compartimento 1 para T1, T2, T3 e T4; material da cheia de 2020 para T5 e T6). Colunas representam a média de quatro repetições; barras representam o erro padrão da média para cada tratamento.

Figura 88 – Massa fresca e massa seca produzida pelas culturas do milho e feijão no experimento de casa de vegetação.



T1: solo controle – natural; **T2:** solo controle – com nutrientes; **T3:** rejeito depositado – natural; **T4:** rejeito depositado – com nutrientes; **T5:** Material cheia Gov. Valadares (2020) – natural; **T6:** Material cheia Gov. Valadares (2020) – com nutrientes; **AC:** rega com água deionizada; **AR:** rega com água simulando turbidez do rio Doce (rejeito do Compartimento 1 para T1, T2, T3 e T4; material da cheia de 2020 para T5 e T6). Colunas representam a média de quatro repetições; barras representam o erro padrão da média para cada tratamento.

Figura 89 – Massa fresca e massa seca produzida pela cultura do morango no experimento de casa de vegetação.



T1: solo controle – natural; **T2:** solo controle – com nutrientes; **T3:** rejeito depositado – natural; **T4:** rejeito depositado – com nutrientes; **T5:** Material cheia Gov. Valadares (2020) – natural; **T6:** Material cheia Gov. Valadares (2020) – com nutrientes; **AC:** rega com água deionizada; **AR:** rega com água simulando turbidez do rio Doce (rejeito do Compartimento 1 para T1, T2, T3 e T4; material da cheia de 2020 para T5 e T6). Colunas representam a média de quatro repetições; barras representam o erro padrão da média para cada tratamento.

Todas as culturas produziram mais biomassa quando os nutrientes foram supridos por meio da solução nutritiva (NS) (com exceção aos frutos do morango), sendo que os substratos CT (solo controle) e MC (material que representa os depósitos de rejeito à jusante da UHE Risoleta Neves) apresentaram maior potencial produtivo em relação ao MD (rejeito depositado no Compartimento 1). O MC se mostrou a matriz de maior potencial produtivo natural (sem adição de nutrientes), e a irrigação não resultou em padrões de resposta com relação às biomassas: enquanto houve diminuição de produção de biomassa quando utilizada água com rejeito em alguns casos (milho e feijão), a mesma situação pareceu refletir em maiores produções em outros casos (morango). Os resultados mencionados puderam ser visualmente confirmados a partir do acompanhamento durante o desenvolvimento vegetal ao longo do experimento (Figura 90 a Figura 99).

Figura 90 – Fotos do experimento (alface). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6; D: água com rejeito, T2, T4 e T6.

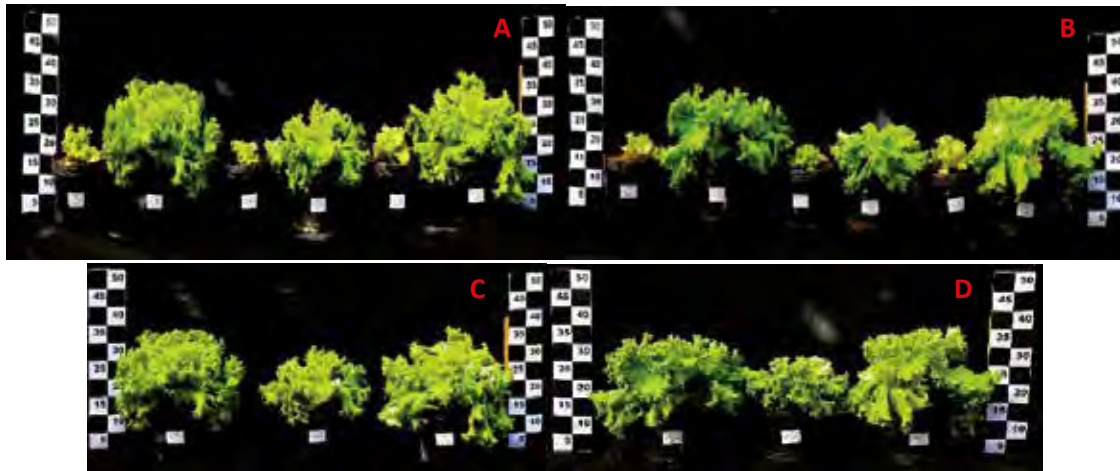


Figura 91 – Fotos do experimento (alface). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.

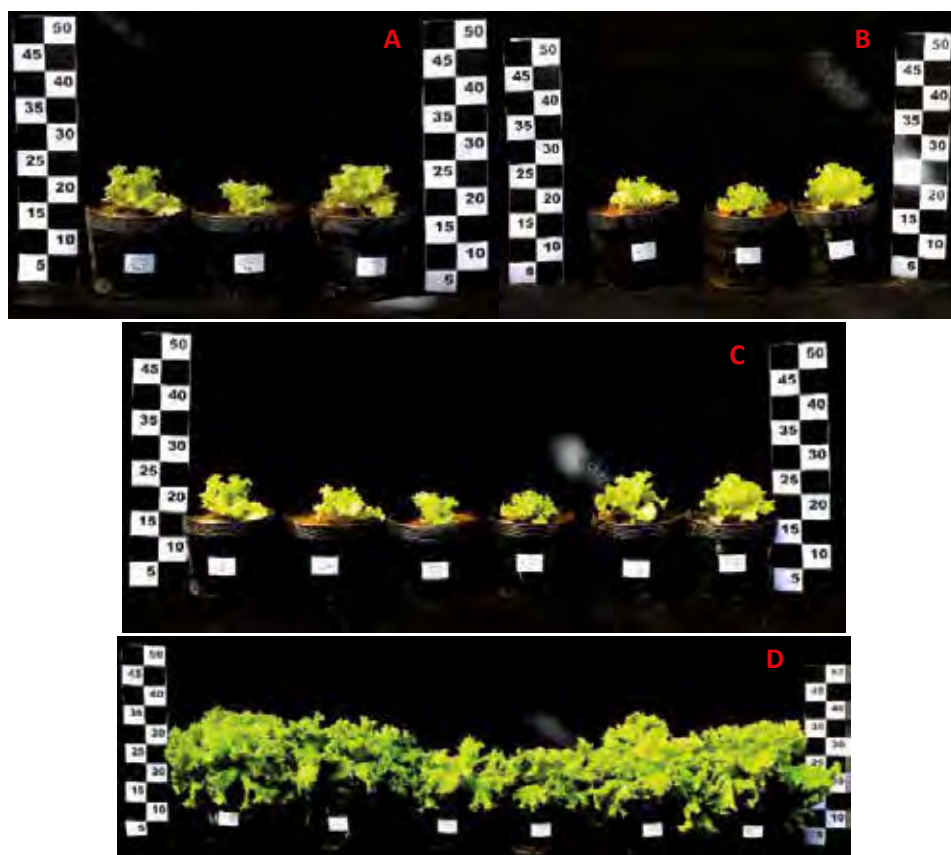


Figura 92 – Fotos do experimento (beterraba). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6; D: água com rejeito, T2, T4 e T6.

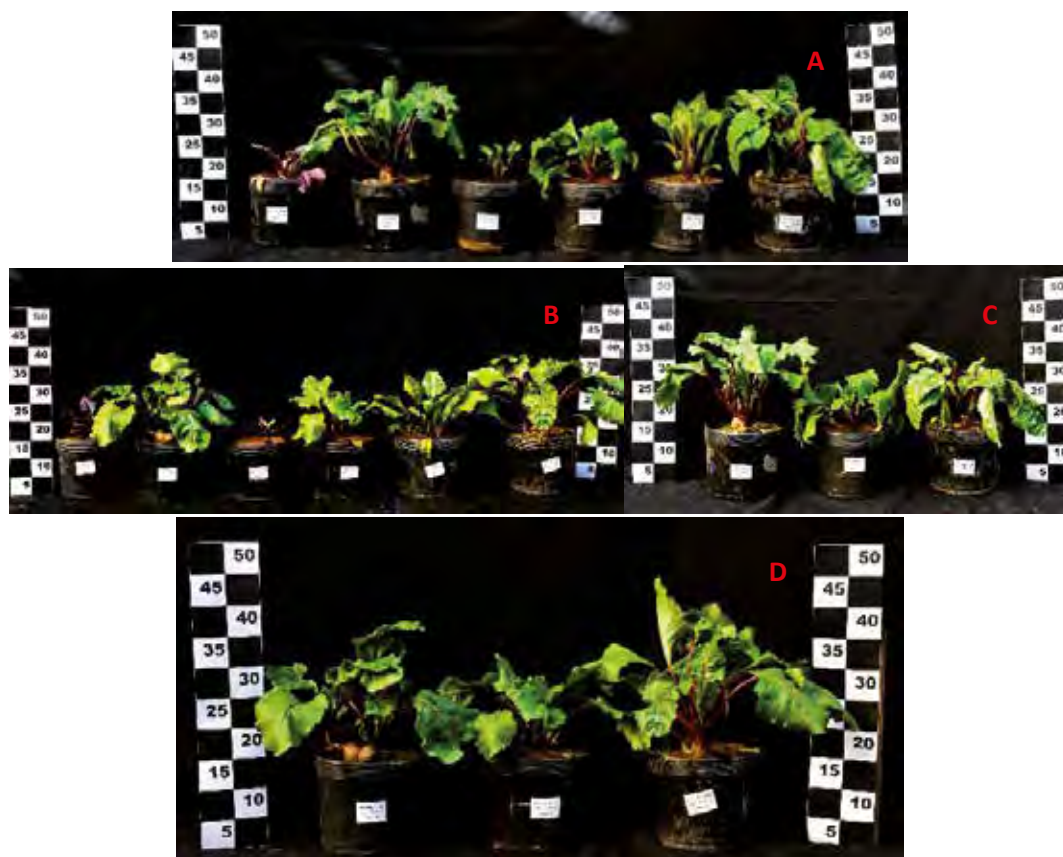


Figura 93 – Fotos do experimento (beterraba). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.

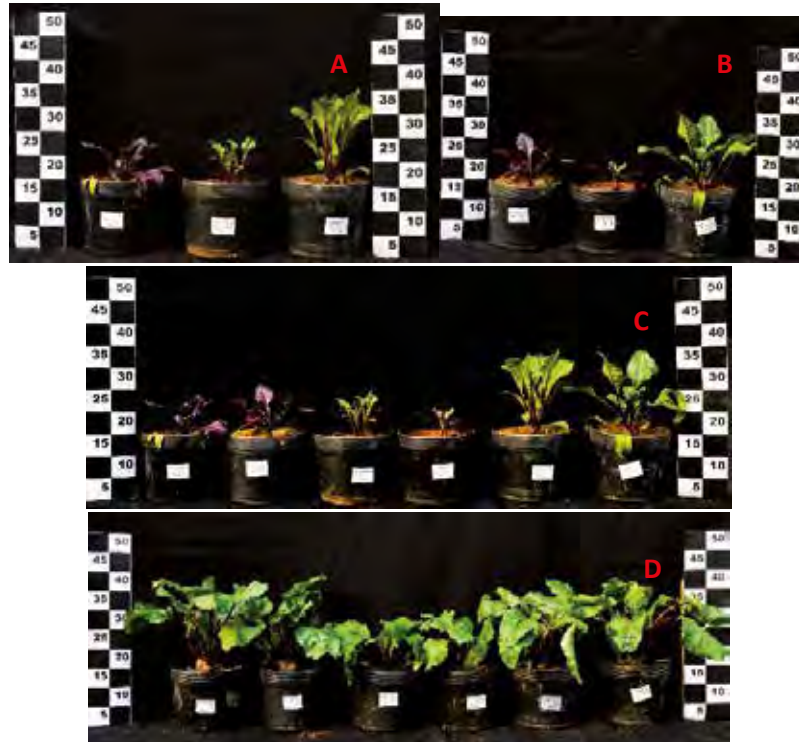


Figura 94 – Fotos do experimento (milho). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6; D: água com rejeito, T2, T4 e T6.

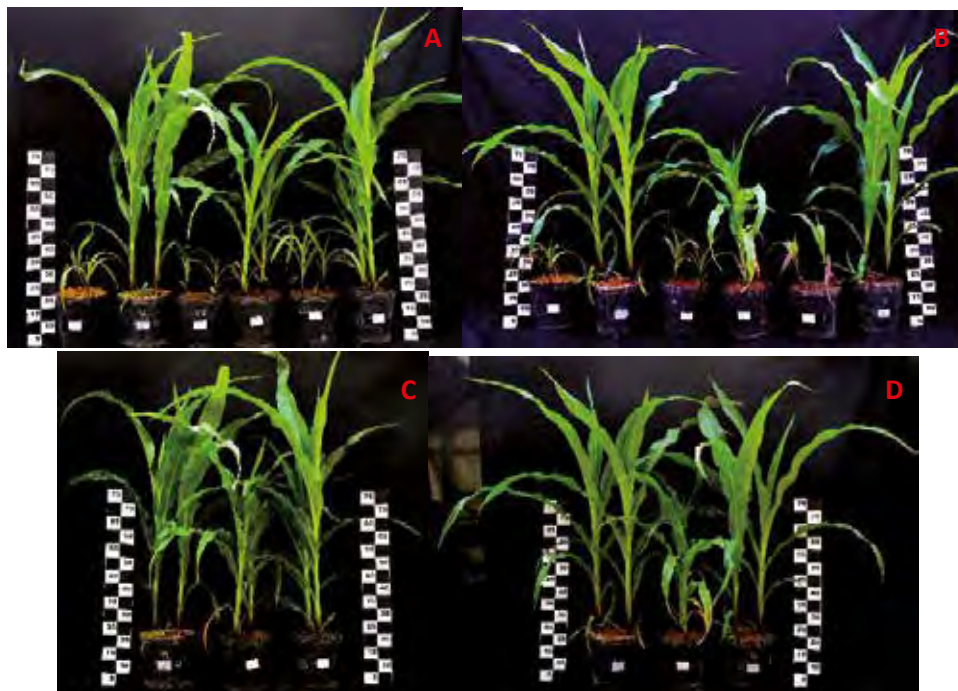


Figura 95 – Fotos do experimento (milho). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.

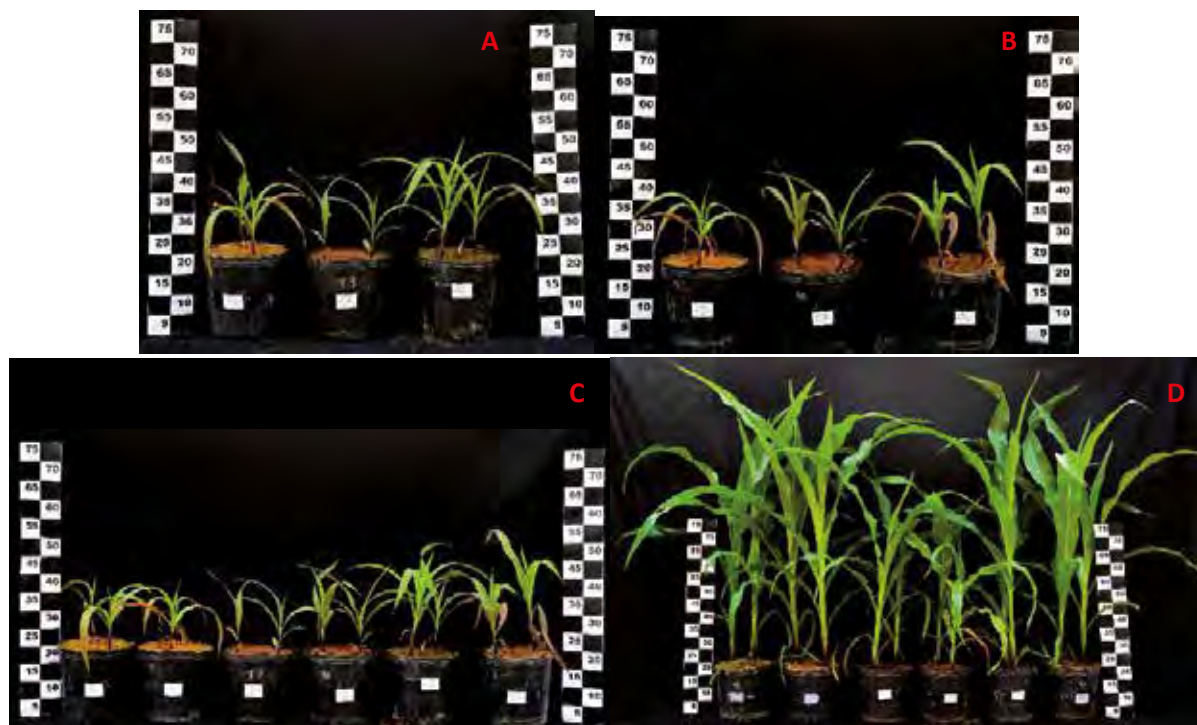


Figura 96 – Fotos do experimento (feijão). A: água convencional, T1 a T6; B: água com rejeito, T1 a T6; C: água convencional, T2, T4 e T6; D: água com rejeito, T2, T4 e T6.

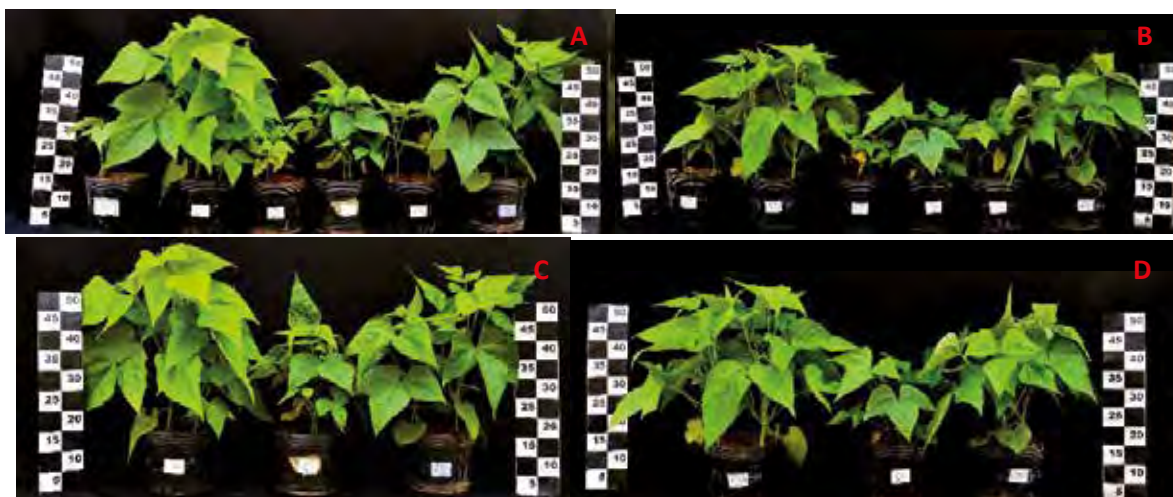


Figura 97 – Fotos do experimento (feijão). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.



Figura 98 - Fotos do experimento (morango). **A:** água convencional, T1 a T6; **B:** água com rejeito, T1 a T6; **C:** água convencional, T2, T4 e T6; **D:** água com rejeito, T2, T4 e T6.



Figura 99 – Fotos do experimento (morango). A: água convencional, T1, T3 e T5; B: água com rejeito, T1, T3 e T5; C: água convencional T1, água com rejeito T1, água convencional T3, água com rejeito T3, água convencional T5, água com rejeito T5; D: água convencional T2, água com rejeito T2, água convencional T4, água com rejeito T4, água convencional T6, água com rejeito T6.



Os teores de nutrientes apresentados na Figura 80 a Figura 86 são influenciados em grande parte pela biomassa acumulada em cada tratamento. Para uma mesma espécie, a produção de biomassa chegou a variar 118 vezes entre os tratamentos (Figura 87 a Figura 89), o que está de acordo com o potencial produtivo de cada substrato. Nesse sentido, o cálculo dos conteúdos de nutrientes é importante para a interpretação de eventuais diluições e/ou concentrações dos elementos, resultantes da maior ou menor biomassa produzida pela planta.

Na Figura 100 a Figura 106 estão apresentados os conteúdos (teores multiplicados pela biomassa) de Ca, Mg, P, K, S e Na extraídos pelas plantas cultivadas no experimento. É nítido observar que todos os tratamentos que receberam adição de nutrientes via solução nutritiva (NS) acumularam as maiores quantidades de nutrientes, ou seja, independentemente do substrato e da qualidade da água de irrigação, é importante complementar a fertilidade natural das matrizes com fontes externas de nutrientes quando o objetivo é o cultivo de espécies agrícolas.

Houve maior acúmulo (mg vaso^{-1}) de P pelas plantas na condição de adição de solução nutritiva para todas as espécies e partes das plantas (Figura 100 a Figura 106). Mesmo aplicando a mesma dose de P nos três substratos, o nutriente ficou mais disponível no solo controle, que é menos hematítico (Figura 39 a Figura 60). Os óxidos de Fe são os mais importantes drenos do P disponível no solo. Devido a grande afinidade do P aos óxidos de ferro, o nutriente adsorvido por esfera externa (CTA), ao entrar em contato com as partículas minerais, promove a troca com íons hidroxilas de superfície ($-\text{FeOH}$) e passam a formar ligação covalente com o ferro (FINK et al., 2016). Como resultado dessa adsorção por esfera interna, o nutriente se torna pouco disponível para as plantas. Em termos práticos, para cultivar espécies agrícolas no rejeito do Compartimento 1 (MD) e no material que se depositou nas manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4, deve-se aumentar a dose de P no momento do plantio, uma vez que esse é um dos nutrientes mais limitantes na agricultura. A água de irrigação com rejeito não reduziu a absorção de P pelas plantas, ou seja, a entrada de hematita via água de irrigação parece não ter interferido na disponibilidade do nutriente.

A partir da avaliação dos conteúdos de nutrientes foi possível observar que as extrações em todas as espécies avaliadas foram menores no MD (rejeito do Compartimento 1), o que é consequência da menor produção de biomassa nesse substrato (Figura 87 a Figura 89), e que o MC em condição natural (sem adição de nutrientes (NN)) apresentou potencial semelhante a outras matrizes que receberam solução nutritiva (NS) (especialmente para a beterraba, Figura 101). Isso confirma, novamente, que a fertilidade e o potencial produtivo do MC (que representa os solos afetados nas manchas de inundação à jusante da UHE Risoleta Neves) não foram prejudicados.

Figura 100 – Conteúdo de nutrientes extraídos pela alface (*Lactuca sativa*) cultivada no experimento.

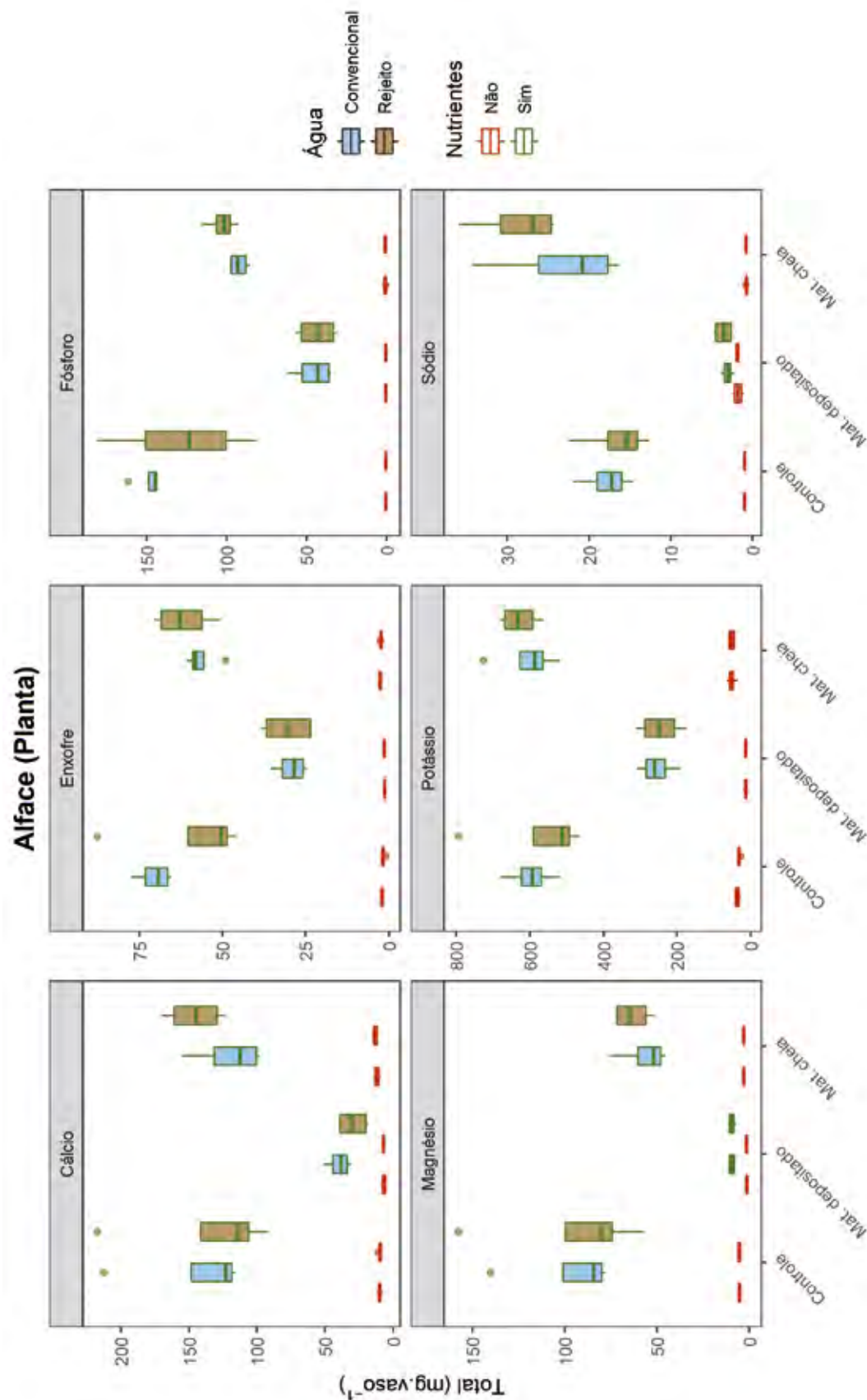


Figura 101 – Conteúdo de nutrientes extraídos pelas folhas da beterraba (*Beta vulgaris*) cultivada no experimento.

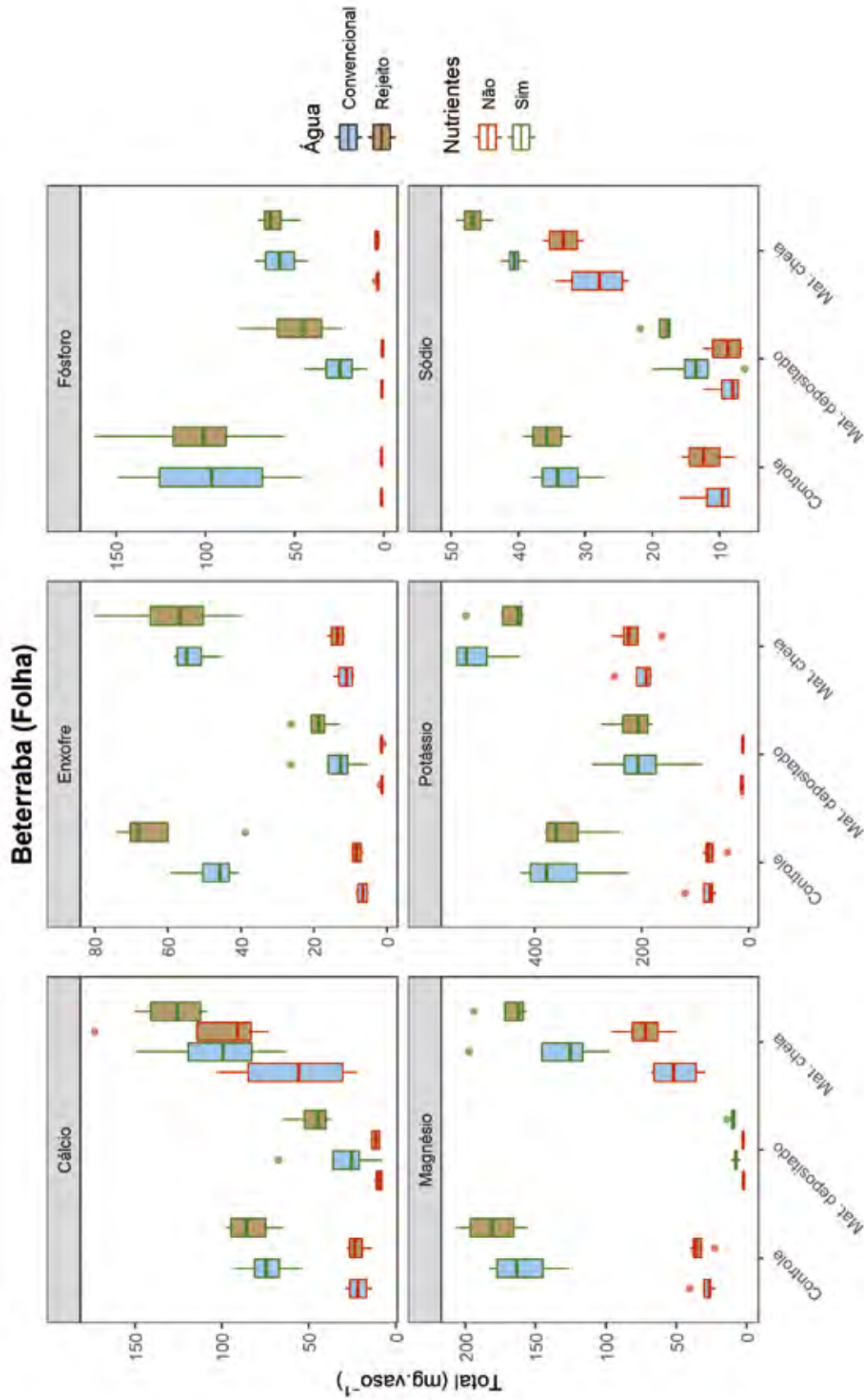


Figura 102 – Conteúdo de nutrientes extraídos pela raiz tuberosa da beterraba (*Beta vulgaris*) cultivada no experimento.

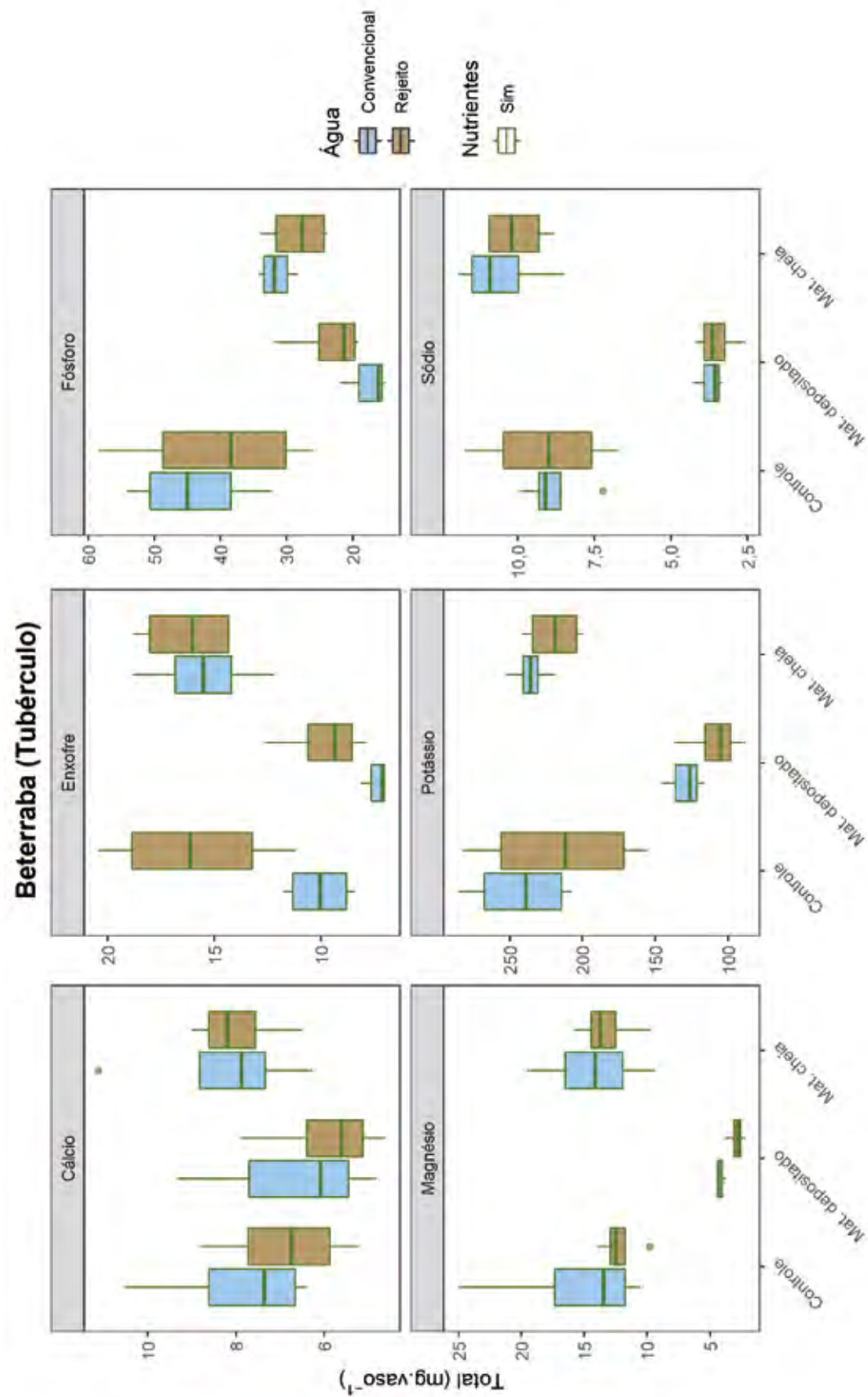


Figura 103 – Conteúdo de nutrientes extraídos pelo feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) cultivado no experimento.

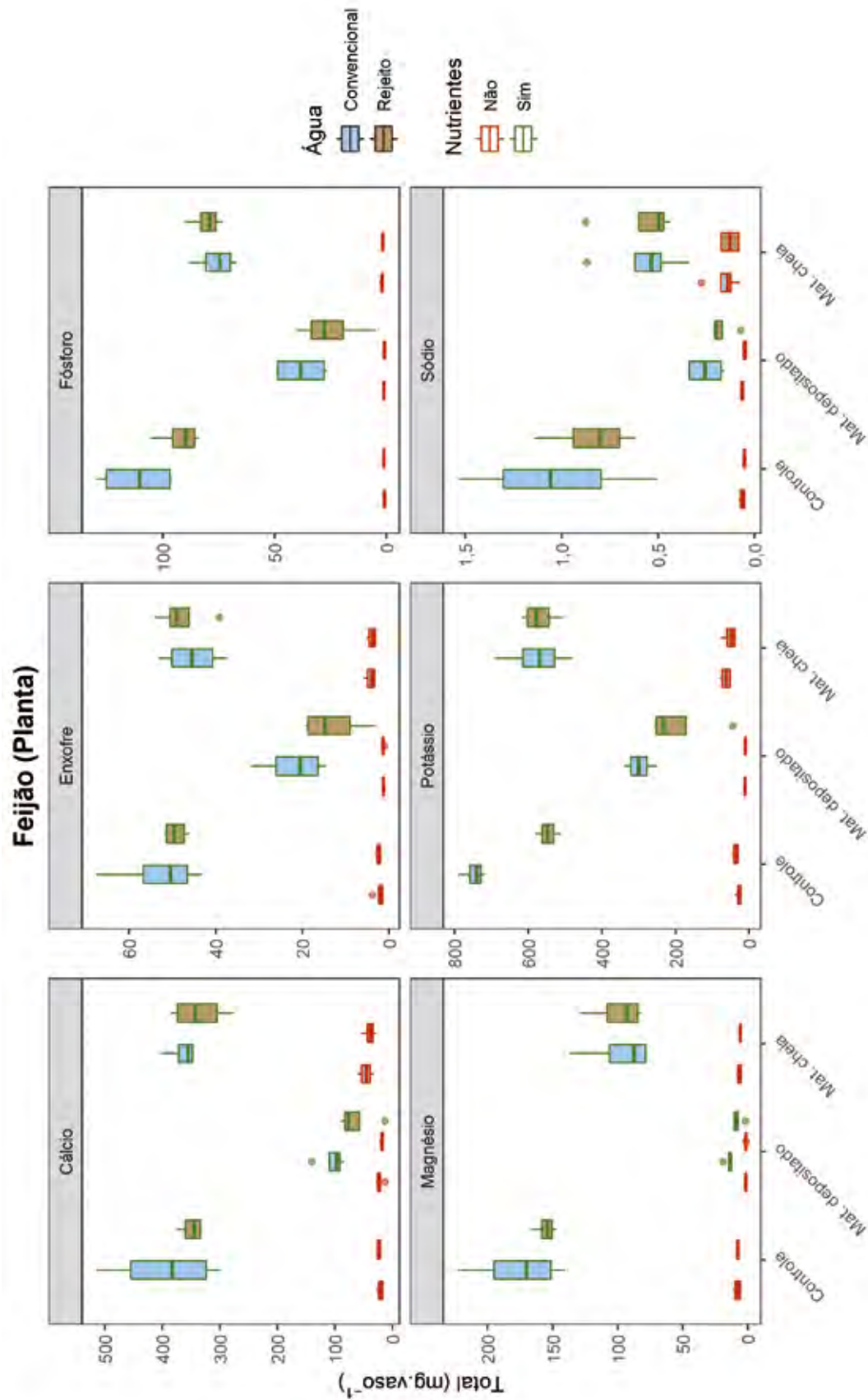


Figura 104 – Conteúdo de nutrientes extraídos pelo milho (*Zea mays* L.) cultivado no experimento.

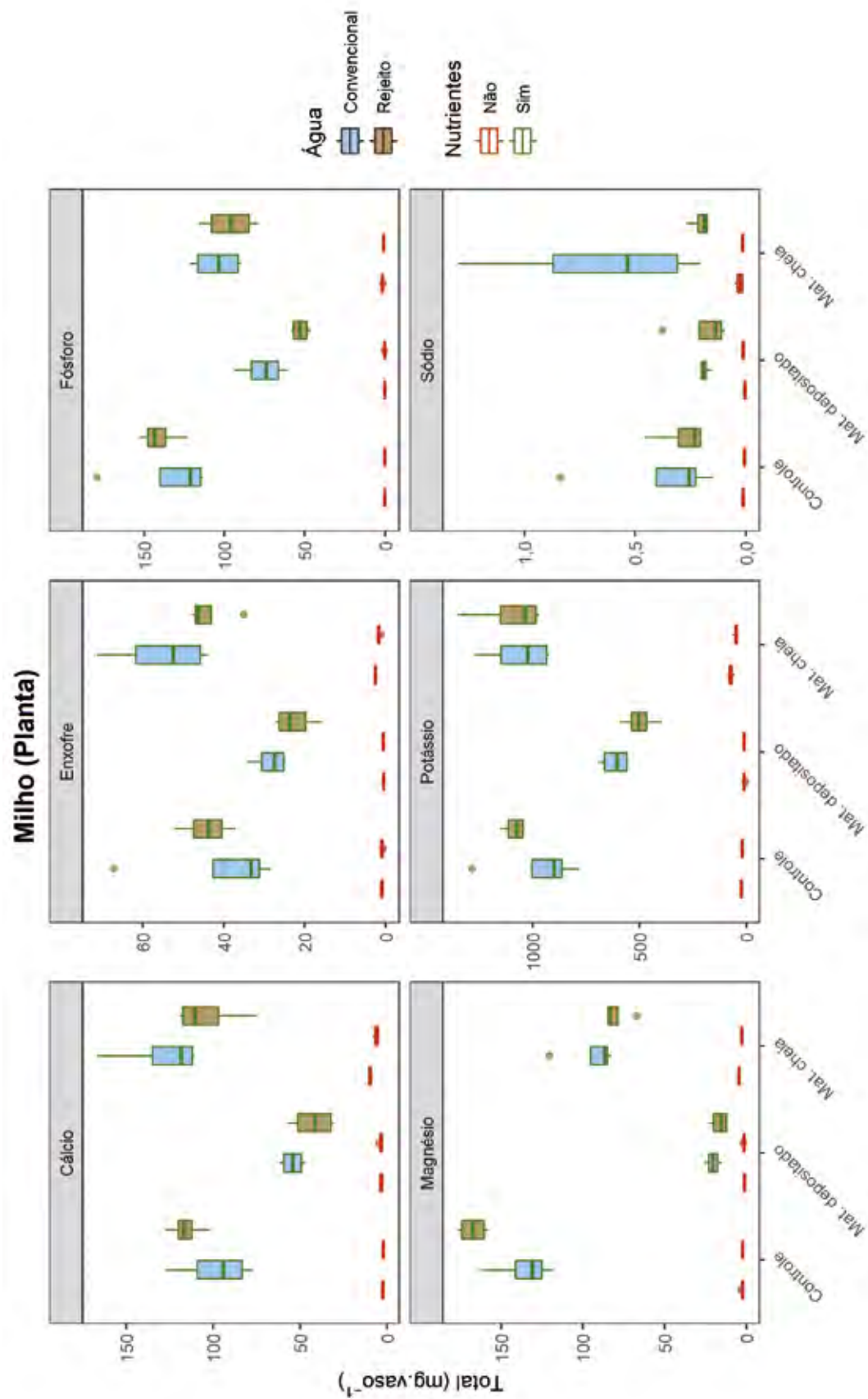


Figura 105 – Conteúdo de nutrientes extraídos pela parte aérea do morangueiro (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivado no experimento.

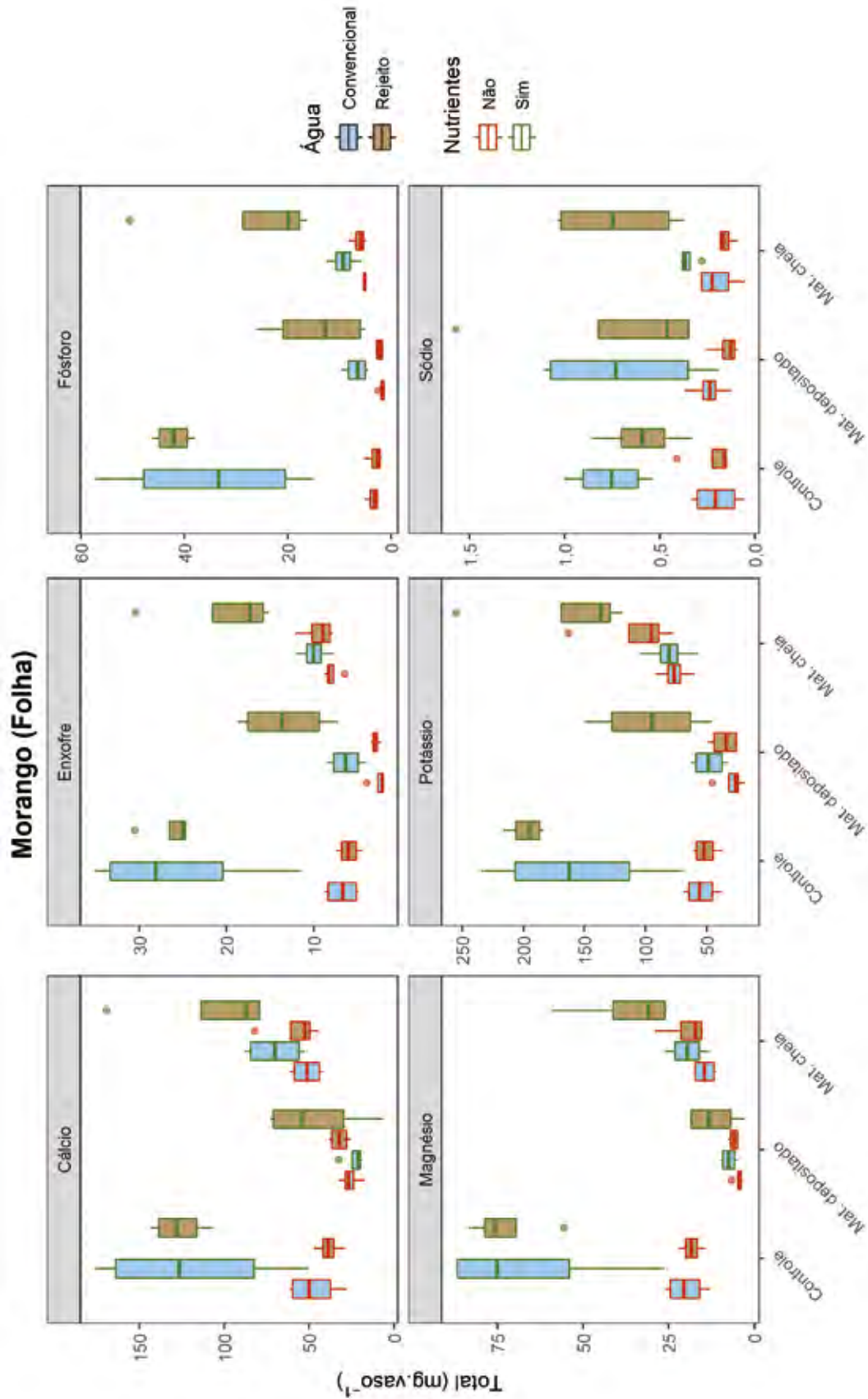
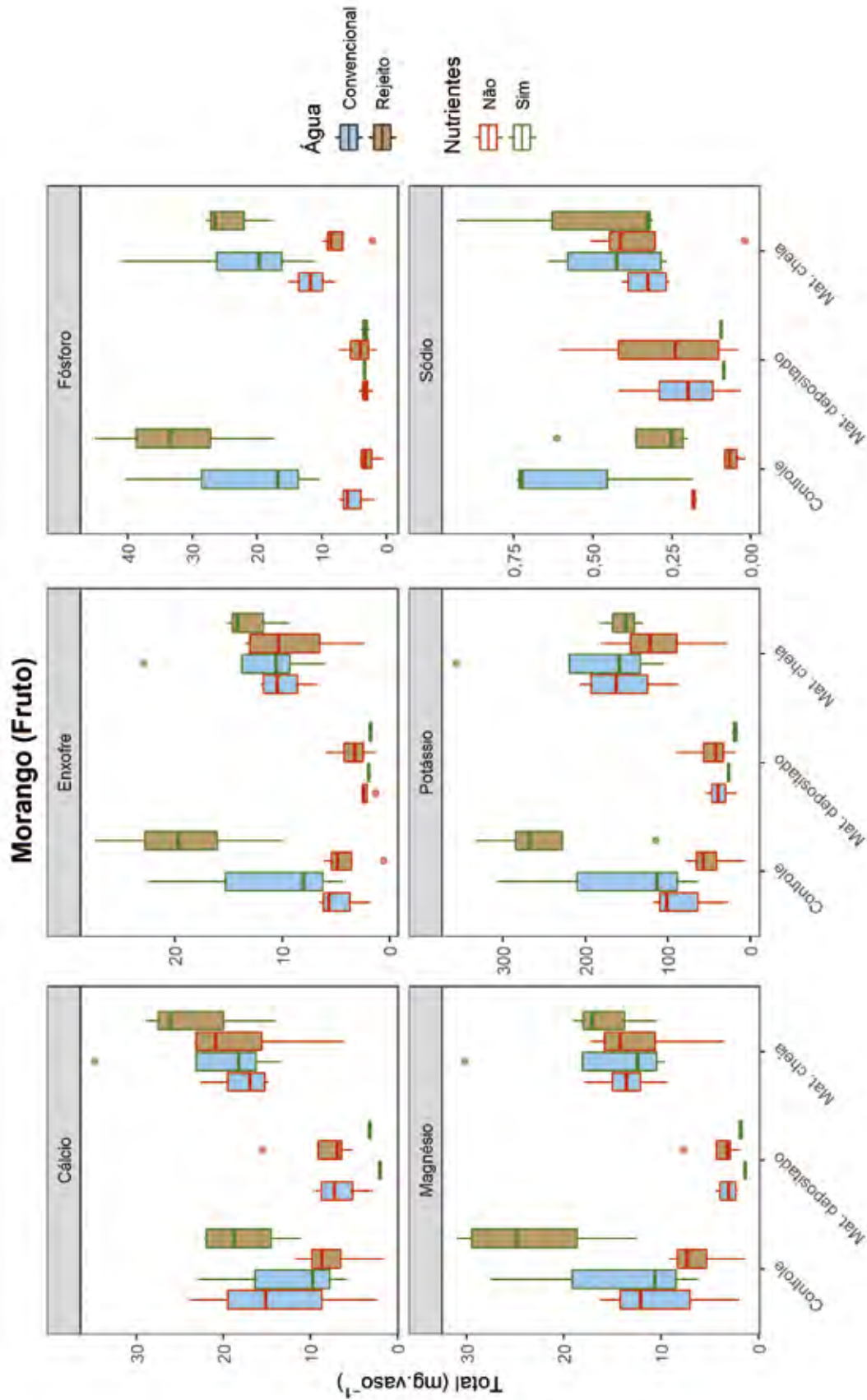


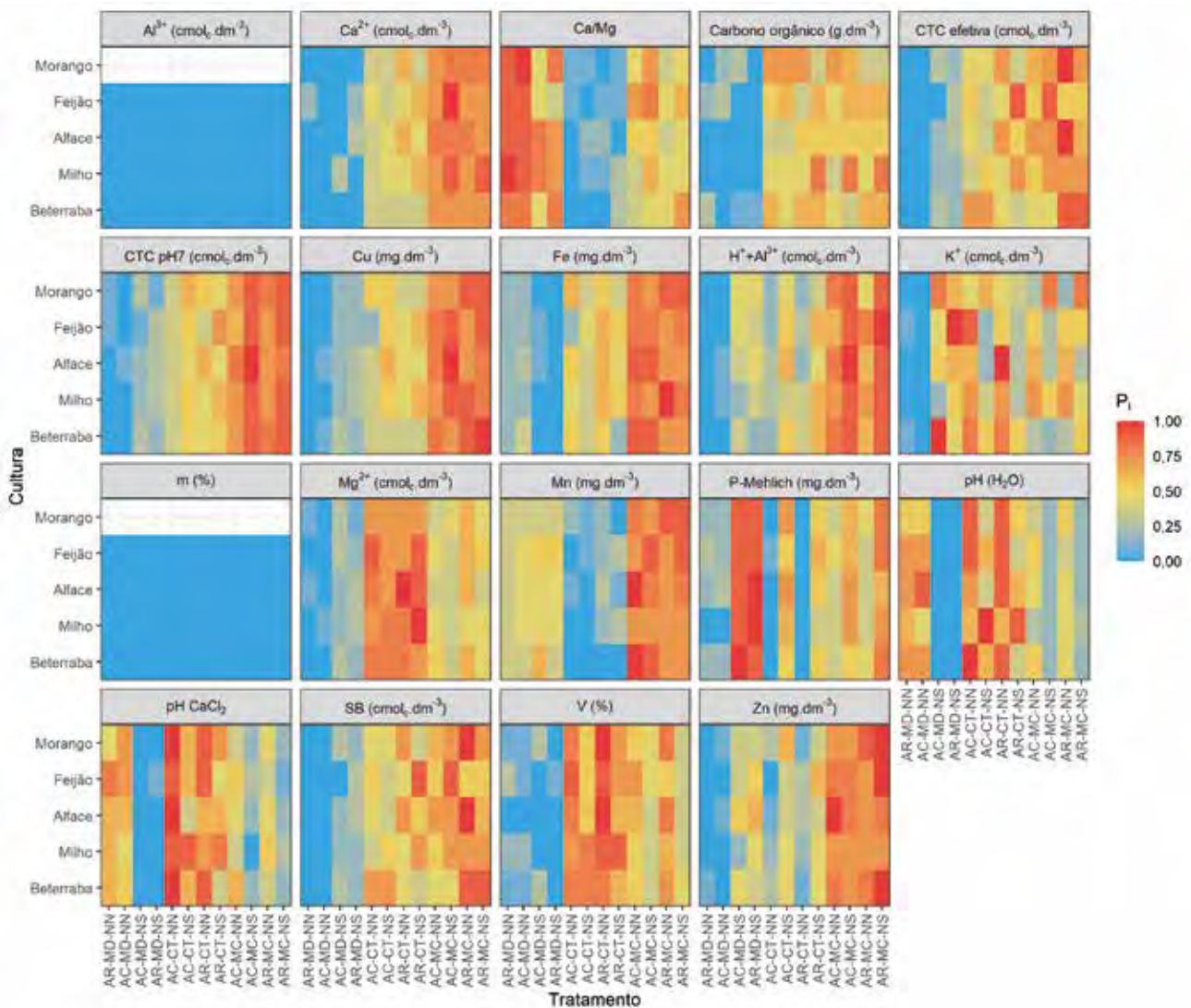
Figura 106 – Conteúdo de nutrientes extraídos pelas infrutescências do morangueiro (*Fragaria x ananassa* Duch.) cultivado no experimento.



Por fim, a fertilidade das matrizes foi avaliada ao final do experimento, individualmente para cada unidade experimental (vaso). De maneira geral, após o cultivo das plantas em casa de vegetação, os teores de Ca, Cu, Fe, Zn e K disponíveis, teores de carbono orgânico e valores de CTC efetiva e total determinados nos substratos foram menores no rejeito do Compartimento 1 (MD) em comparação aos demais (Figura 107 a Figura 112). Por outro lado, os teores de Ca, Cu, Fe, Mn e Zn disponíveis foram superiores no material depositado nas manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4 (MC) relativo às outras matrizes, e os parâmetros de C orgânico, CTC (efetiva e potencial), soma e saturação de bases (SB e V%) nesse material foram equiparáveis aos determinados nos solos controle (Figura 108 a Figura 112).

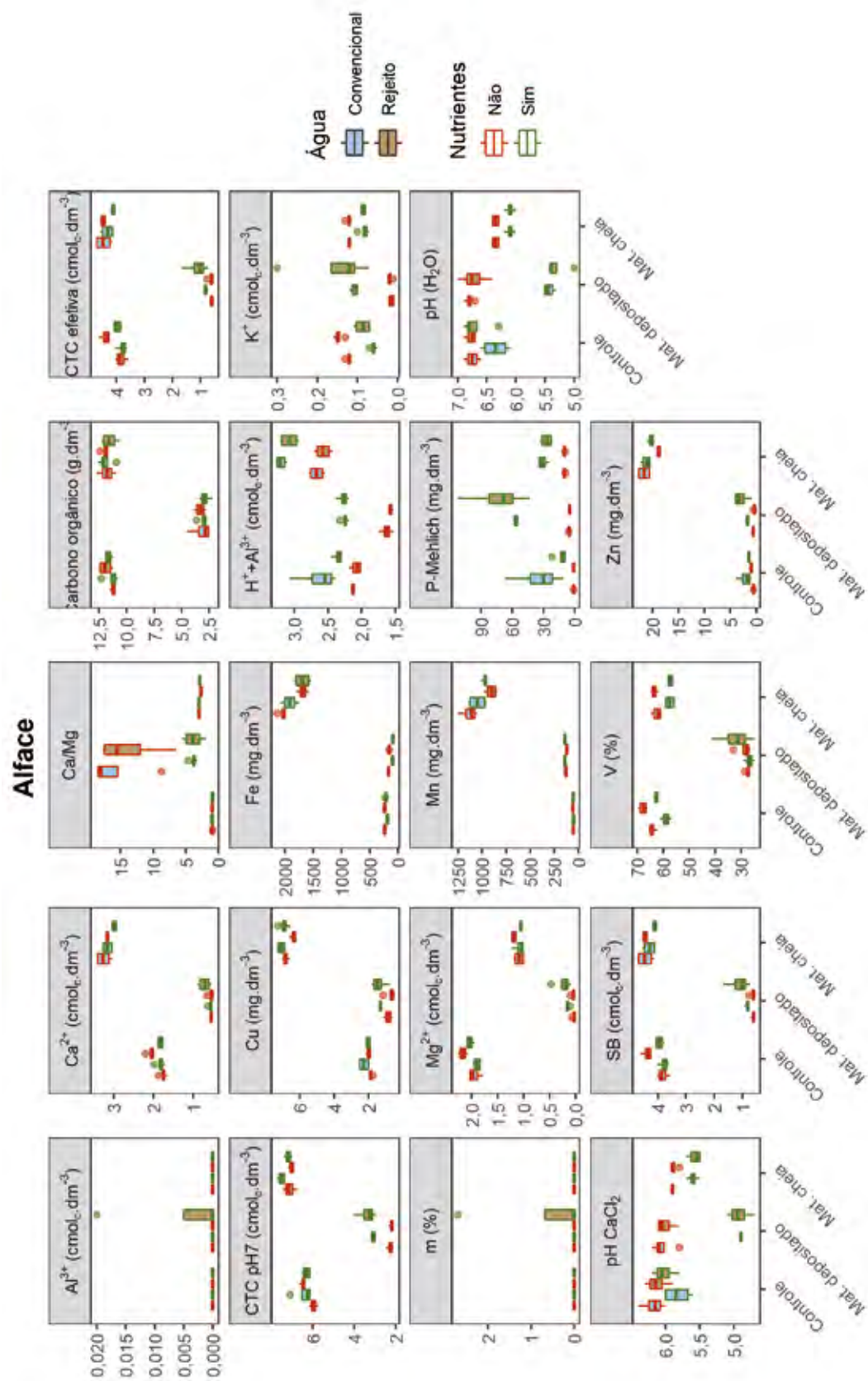
Os resultados são concordantes com as determinações feitas nas amostras de campo, tanto para o material da cheia, representando os solos afetados nas porções extracalha dos Compartimentos 2, 3 e 4 (Figura 66 a Figura 75), quanto para o rejeito depositado no Compartimento 1 (Tecnossolo) e para o solo controle (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). É importante destacar que o período de tempo em que o experimento foi executado permitiu observar mudança na fertilidade dos substratos apenas com relação à adição de solução nutritiva, que acarretou em incremento nos teores de P e K disponíveis, bem como aumentou levemente a acidez potencial das matrizes (Figura 108 a Figura 112). A adição de nutrientes via solução nutritiva acidificou, em especial, o MD (Tecnossolo), ao diminuir os valores de pH em CaCl_2 e em água em comparação aos vasos que não receberam solução nutritiva (NN), o que reforça o baixo poder tampão (e elevada fragilidade) dessa matriz em função dos baixos teores de matéria orgânica e argila (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). Não foi verificado enriquecimento dos substratos a partir da irrigação dos vasos com água contendo rejeito diluído, nem mesmo com relação aos teores de Fe e Mn.

Figura 107 – *Heatmap* para os parâmetros de rotina de fertilidade do solo analisados nos substratos dos vasos ao final do experimento de casa de vegetação. Cores iguais (em cada linha) indicam que os tratamentos pertencem ao mesmo grupo e não diferem entre si.



Em cada linha e para cada variável, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis e calculado o escore, controlando o erro para as comparações múltiplas. A ordenação, tanto dos tratamentos, quanto das culturas, foi feita com base na média dos valores de . AC: água controle; AR: água rejeito; MD; material depositado; MC: material cheia; CT: solo controle; NN: nutrientes – não; NS: nutrientes – sim.

Figura 108 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos da alfaca ao final do experimento.



Beterraba



Figura 110 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos do feijoeiro ao final do experimento.

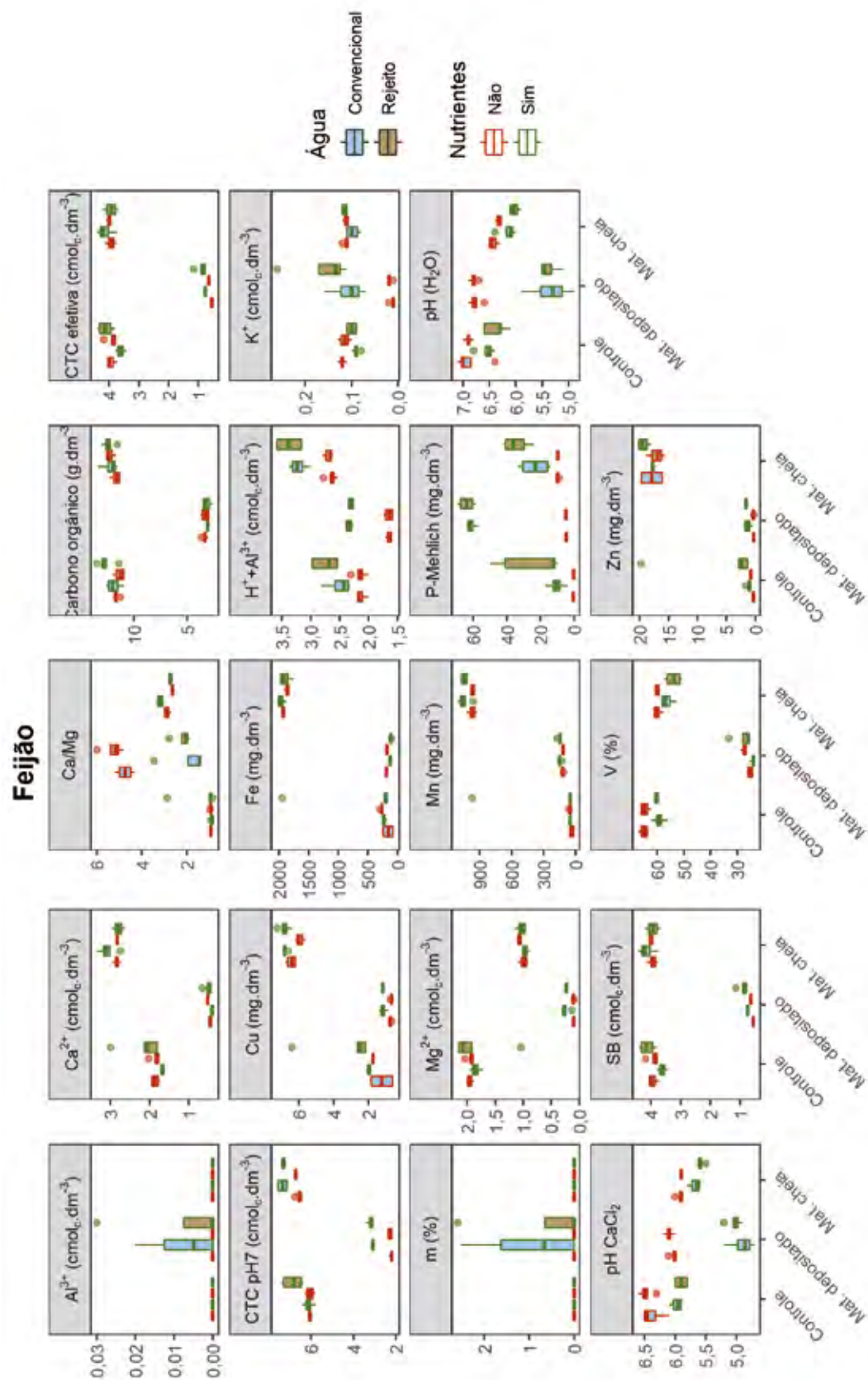


Figura 111 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos do milho ao final do experimento.

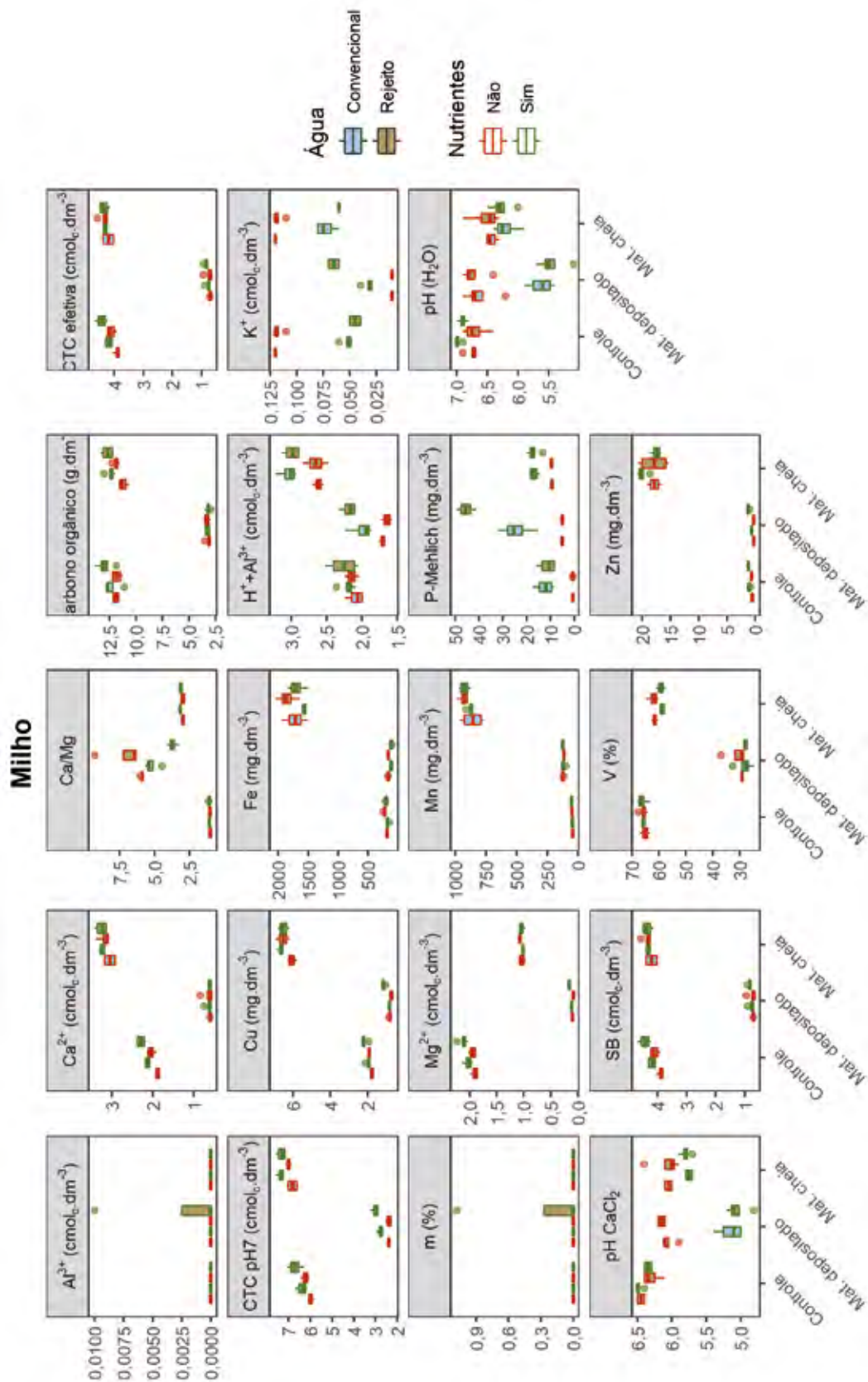
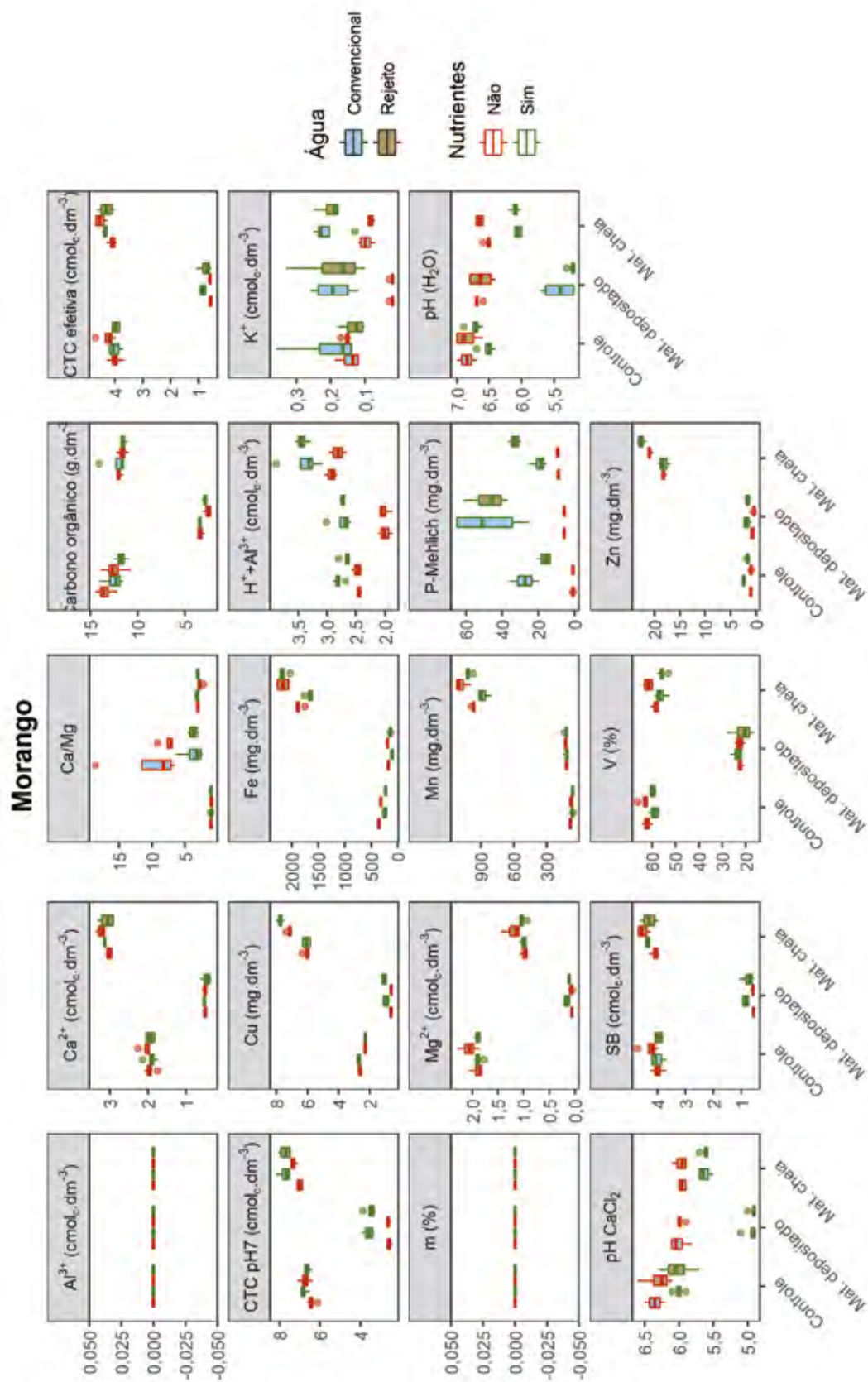


Figura 112 – Parâmetros da rotina de fertilidade do solo nos substratos dos vasos do morangueiro ao final do experimento.



Todos os resultados obtidos para a avaliação da fertilidade dos solos nas várzeas à jusante de Risoleta Neves foram analisados de maneira integrada. Os dados de campo e de condições controladas (experimento) são sinérgicos, e corroboram que a fertilidade e o potencial produtivo dos solos nas manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4 não foram prejudicados e, portanto, esse dano ambiental não foi detectado para os solos dessas porções da bacia. É importante destacar, no entanto, que essa afirmação pode não se aplicar a propriedades agrícolas pontuais, de médio a alto nível tecnológico, e que apresentavam solos agrícolas quimicamente corrigidos previamente ao rompimento da barragem. A avaliação de danos aos solos da bacia como um todo, leva em consideração solos de linha base de baixa a média fertilidade, especialmente solos com teores muito baixos de fósforo disponível (Tabela 13). Porém, alguns agricultores ribeirinhos podem ter sofrido prejuízos em função de perda de sistemas de irrigação, indisponibilidade de água para irrigação e deposição dos sedimentos contendo rejeito sobre solos de várzea com fertilidade construída (solos de alta produtividade). Essas perdas econômicas em propriedades agrícolas individuais não estão contempladas nos danos ambientais, que são objeto deste diagnóstico.

O diagnóstico de danos ambientais aos solos, portanto, apontou que o Tecnosolo formado na região de montante da UHE Risoleta Neves (Compartimento 1) possuía menor fertilidade em comparação aos solos naturais, o que foi corroborado a partir das novas avaliações apresentadas nesse relatório, com verificação adicional da não ocorrência de dano ambiental de perda de fertilidade para os solos dos Compartimentos 2, 3 e 4. Portanto, as classificações (pouco grave, cessado e parcialmente reversível) não sofreram alteração e podem ser mantidas, de acordo com as evidências apresentadas para os demais Compartimentos.

2.2.4 CONTAMINAÇÃO DO SOLO POR ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS NAS MANCHAS DE INUNDAÇÃO À JUSANTE DA UHE RISOLETA NEVES

De forma semelhante ao tópico anterior, a avaliação da contaminação por EPTs nos solos das manchas de inundação das áreas à jusante da UHE Risoleta Neves foi embasada na avaliação conjunta das amostras coletadas em campo (solo – Figura 113 a Figura 123 - e *Poaceae* - Figura 124 a Figura 132) e das amostras de plantas (Figura 133 a Figura 148) e de solo (Figura 149 a Figura 154), bem como dos teores de EPTs quantificados nas águas de irrigação (Tabela 15) do experimento de casa de vegetação. Ainda, os dados do experimento possibilitaram os cálculos de ingestão potencial de EPTs a partir de cenários de consumo dos vegetais cultivados, que se encontram apresentados na Tabela 16 a Tabela 19.

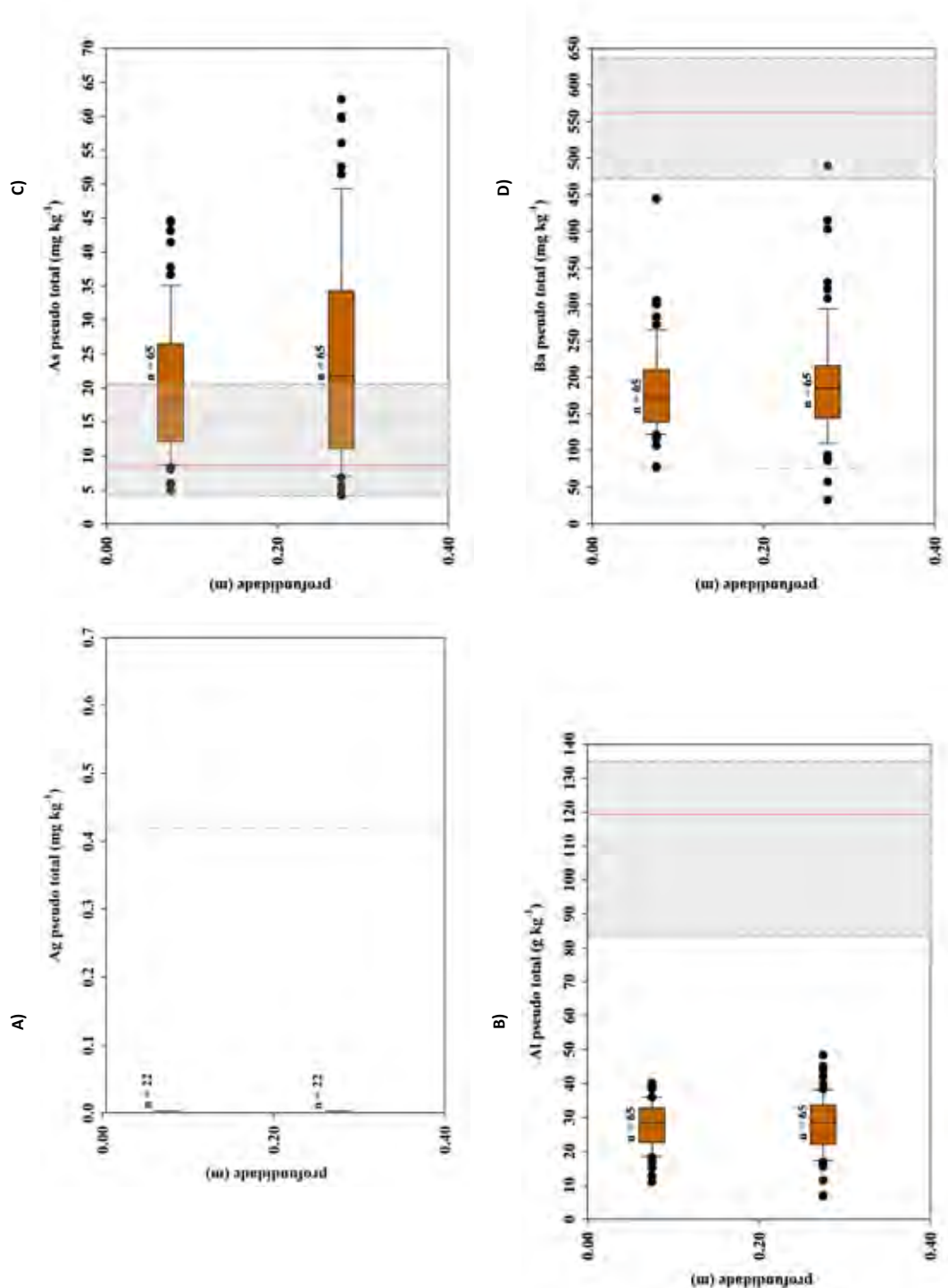
Todos os resultados individuais que embasaram a construção das tabelas e figuras apresentadas podem ser encontrados nos Anexos E, F, G, H e I. Em adição, os resultados específicos das amostras de solo coletadas nas áreas de mata nativa encontram-se no Apêndice B. Embora não utilizadas diretamente para as discussões a seguir, tais dados ratificam as observações apresentadas.

Dentre os EPTs nos solos (Figura 113 a Figura 123), observa-se que os teores pseudo totais de Ag, Al, Cd, Mo e Ni quantificados nas amostras das manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4 estiveram abaixo da linha base e dos valores de referência de qualidade (VRQs) para os solos, o que asseguram o baixo risco ambiental com relação a esses elementos. Para os Compartimentos 3 e 4, os teores de Ag de todas as amostras estiveram abaixo do limite de detecção do ICP-MS, o que justifica a

ausência de dados com relação a esse EPT. Com relação ao Ba, Co, Pb e Zn, embora as amostras de ambos os Compartimentos apresentem teores acima dos VRQs (Figura 113 - D e Figura 114 - C; Figura 115 - B e Figura 116 - A; Figura 119 - B e Figura 120 - A; Figura 121 - B e C), os mesmos encontram-se abaixo ou dentro da mesma variação das respectivas linhas base, e os próprios solos de linha base já apresentavam teores desses elementos acima dos VRQs, indicando que os solos de várzea desses locais já estavam contaminados com Ba, Co, Pb e Zn previamente ao desastre. Com relação ao Cr e Cu, os teores medianos das amostras afetadas foram levemente superiores ao teor mediano da linha base, mas a variação das amostras está dentro da variação dos solos de linha base, e ambos se encontram abaixo dos VRQs (Figura 115-C e D e Figura 116- B e C). Para os elementos Hg e Sb, não existe linha base para comparação, mas ambos encontram-se abaixo dos VRQs e em grande parte das amostras os teores de Sb estiveram abaixo do limite de detecção do ICP-MS (menor número de leituras - n), enquanto que todas as amostras analisadas apresentaram teores de Hg abaixo do limite de quantificação do aparelho (Figura 117- B, Figura 118- A, Figura 119- C e Figura 120- B). A mesma situação se repetiu para o Sn, pois apesar de não haver referência de comparação para esse elemento no solo, a baixa detecção de Sn reflete o baixo risco ambiental desse elemento.

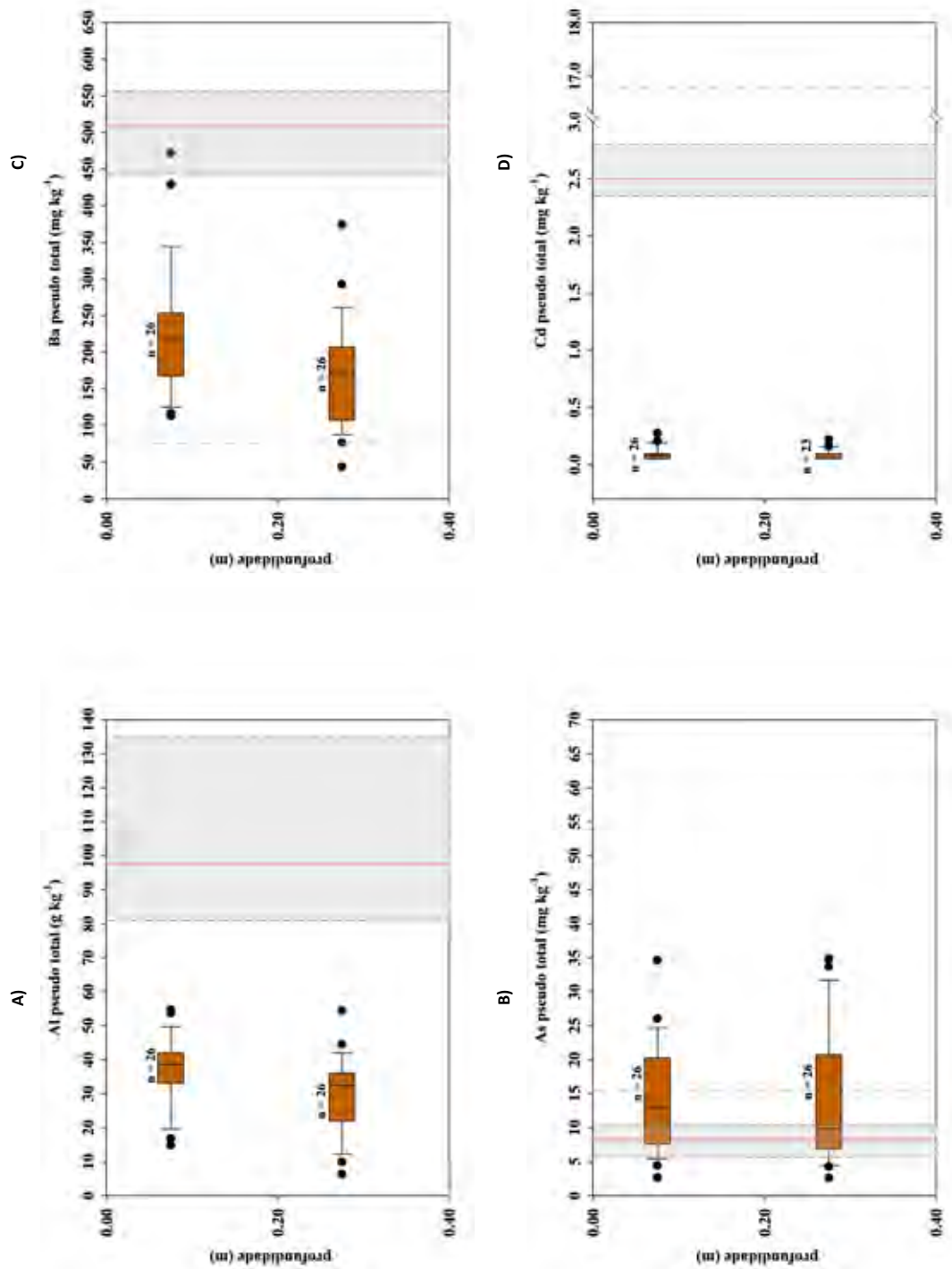
As amostras das áreas das manchas apresentaram teores de Se acima dos VRQs para ambos os Compartimentos (Figura 119- D e Figura 120- C), o que pode indicar risco ambiental. No entanto, não é possível afirmar com certeza se esses teores foram decorrentes da influência da deposição de rejeito ou se os mesmos já eram naturalmente elevados nesses solos, uma vez que não há linha base para comparação com os teores de Se.

Figura 113 – Teores pseudo totais de prata (A), alumínio (B), arsênio (C) e bário de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



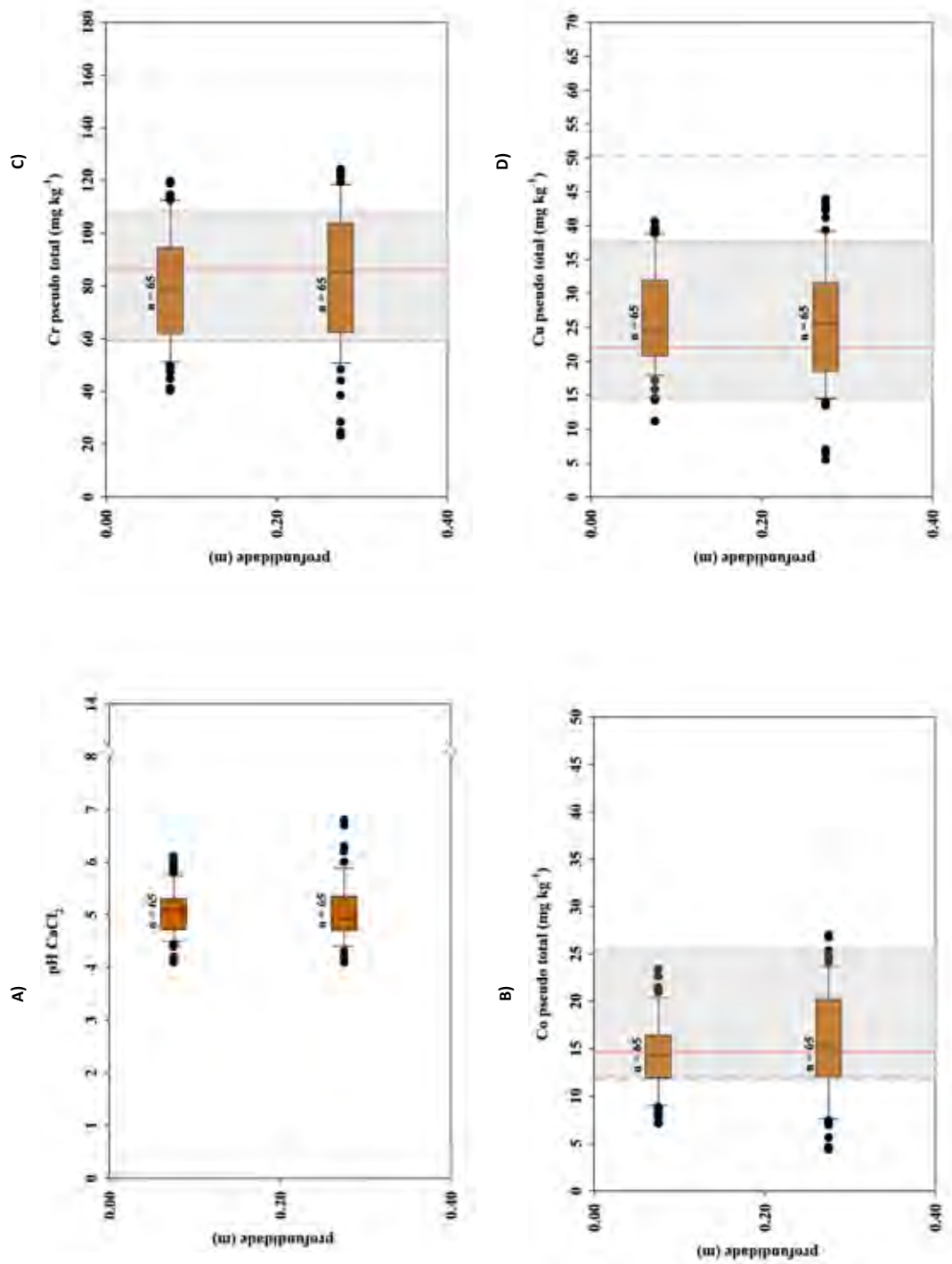
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (..... MINAS GERAIS, 2011) e para o rio Doce (--- Guevara et al., 2018) são representados por limites verticais. O teor de Ag não foi avaliado nas referências de linha base; não existem valores de referência de qualidade para Al em solos.

Figura 114 – Teores pseudo totais de alumínio (A), arsênio (B), bário (C) e cádmio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



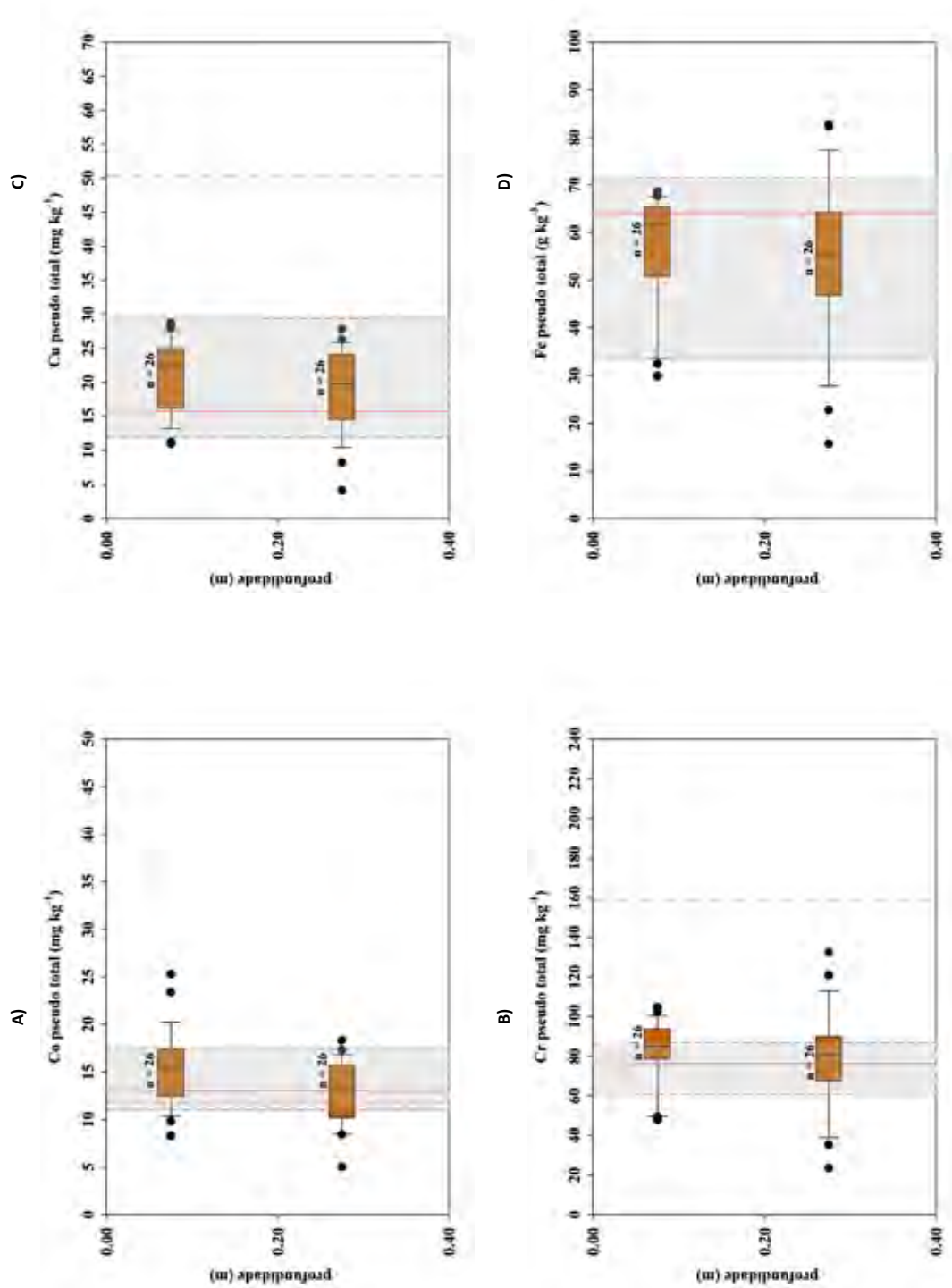
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (..... MINAS GERAIS, 2011) e para o rio Doce (----- Guevara et al., 2018) são representados por limites verticais. Não existem valores de referência de qualidade para Al em solos.

Figura 115 – Teores pseudo totais de cádmio (A), cobalto (B), cromo (C) e cobre de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



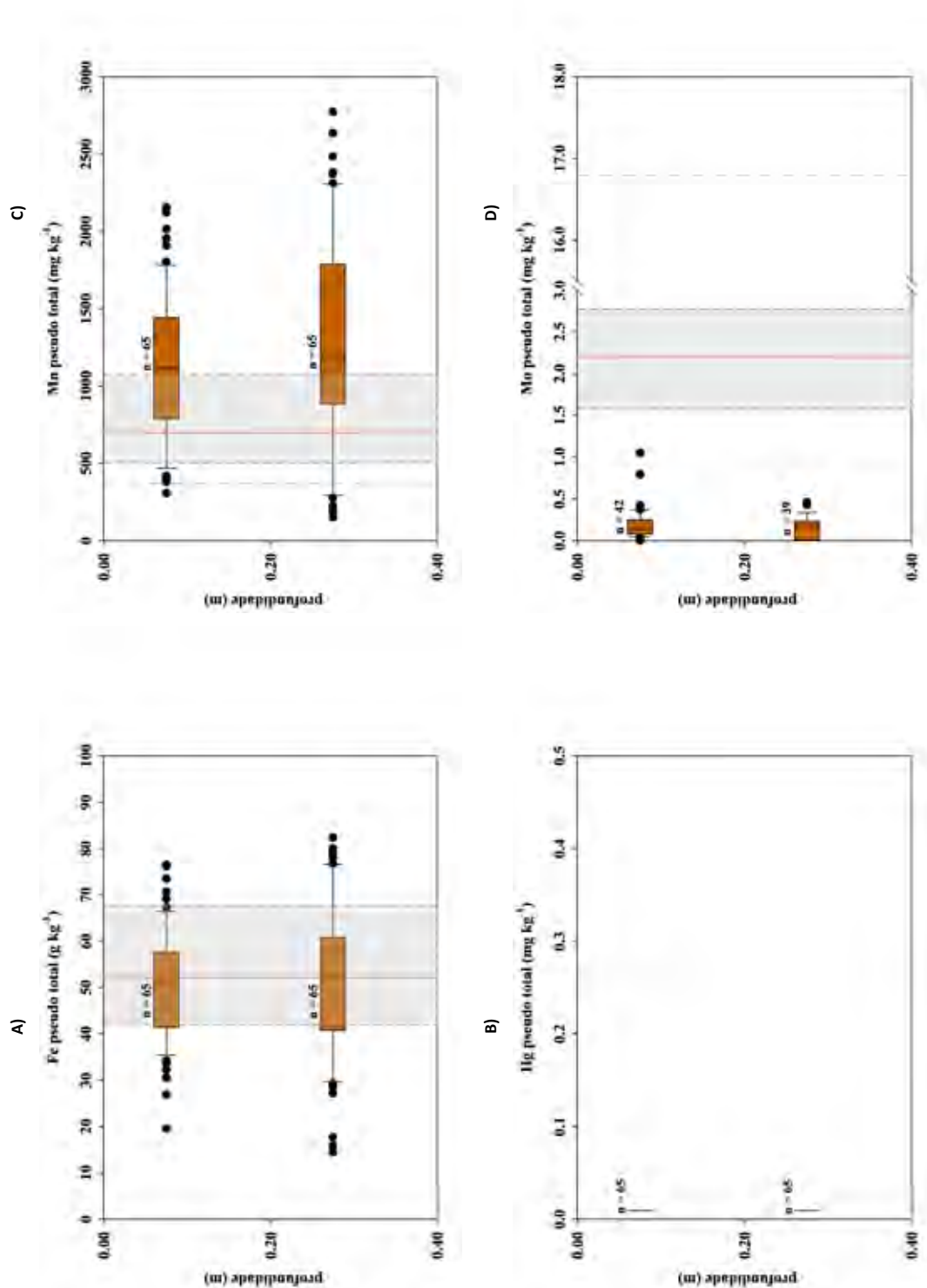
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (.....) e para o rio Doce (.....) são representados por limites verticais.

Figura 116 – Teores pseudo totais de cobalto (A), cromo (B), cobre (C) e ferro (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



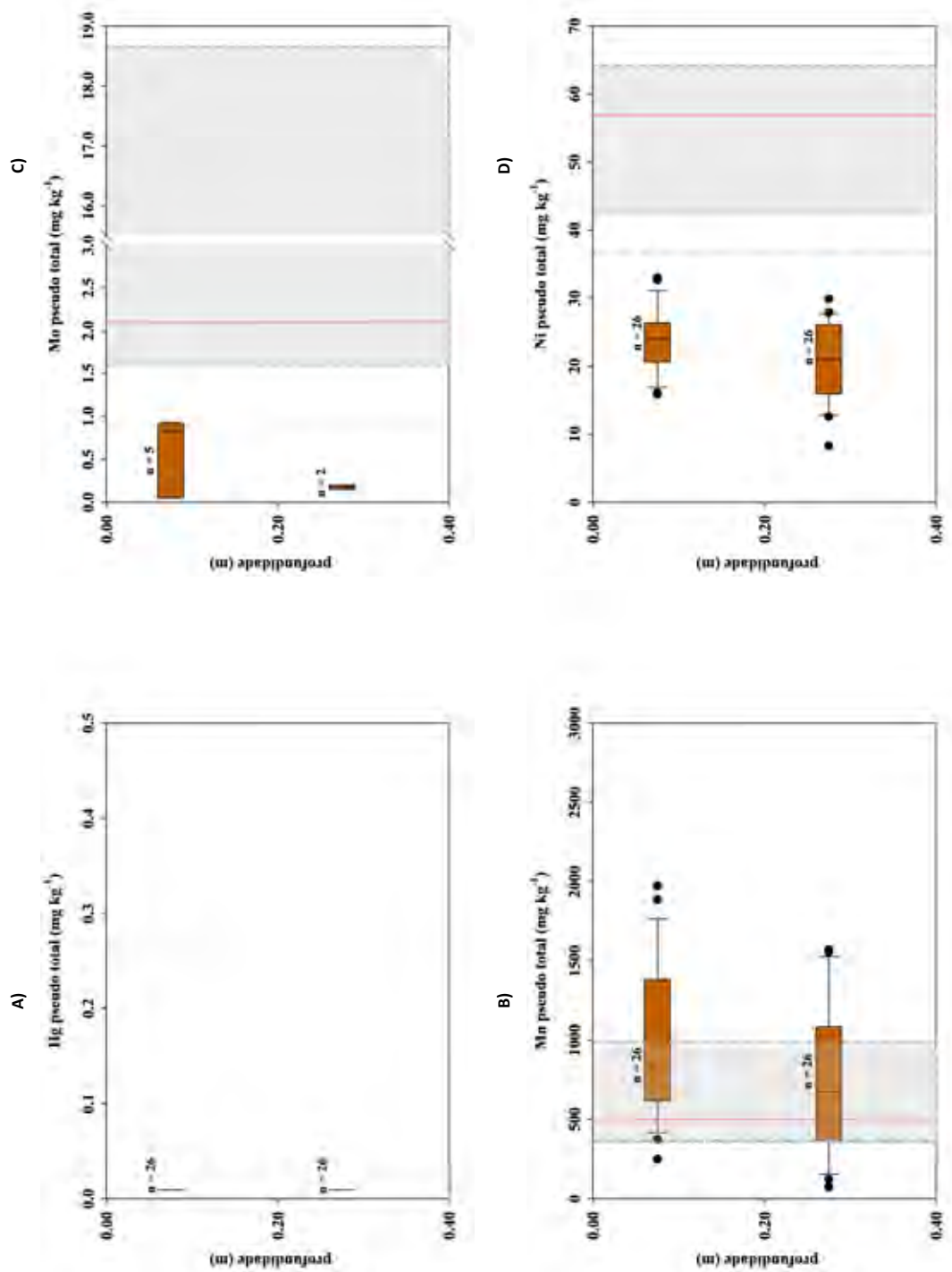
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (..... MINAS GERAIS, 2011) e para o rio Doce (----- Guevara et al., 2018) são representados por limites verticais. Não existem valores de referência de qualidade para Fe em solos.

Figura 117 – Teores pseudo totais de ferro (A), mercúrio (B), manganês (C) e molibdênio de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



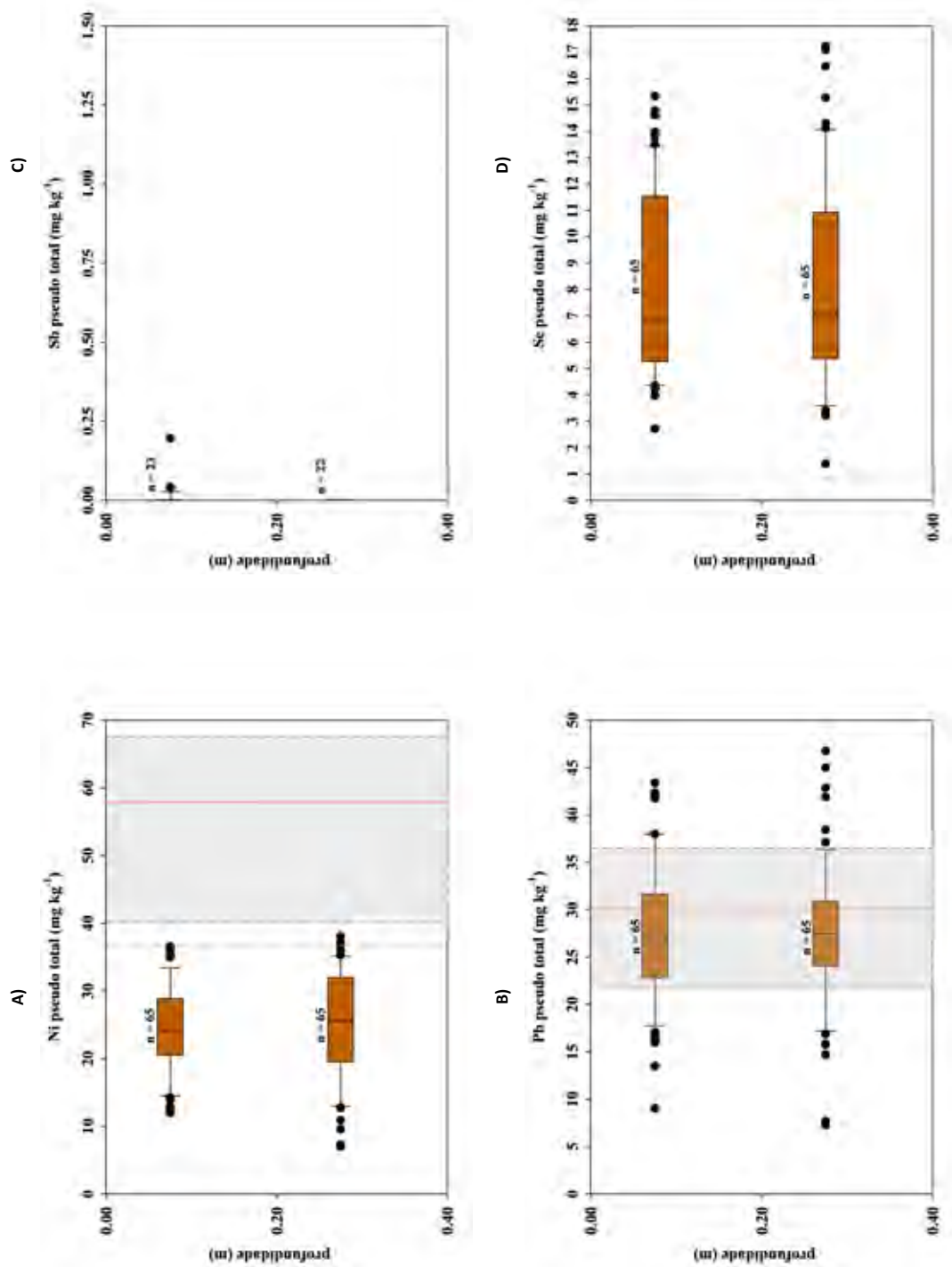
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (.....) MINAS GERAIS, 2011) e para o rio Doce (----- Guevara et al., 2018) são representados por limites verticais. O teor de Hg não foi avaliado nas referências de linha base; não existem valores de referência de qualidade para Fe em solos.

Figura 118 – Teores pseudo totais de mercúrio (A), manganês (B), molibdênio (C) e níquel (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



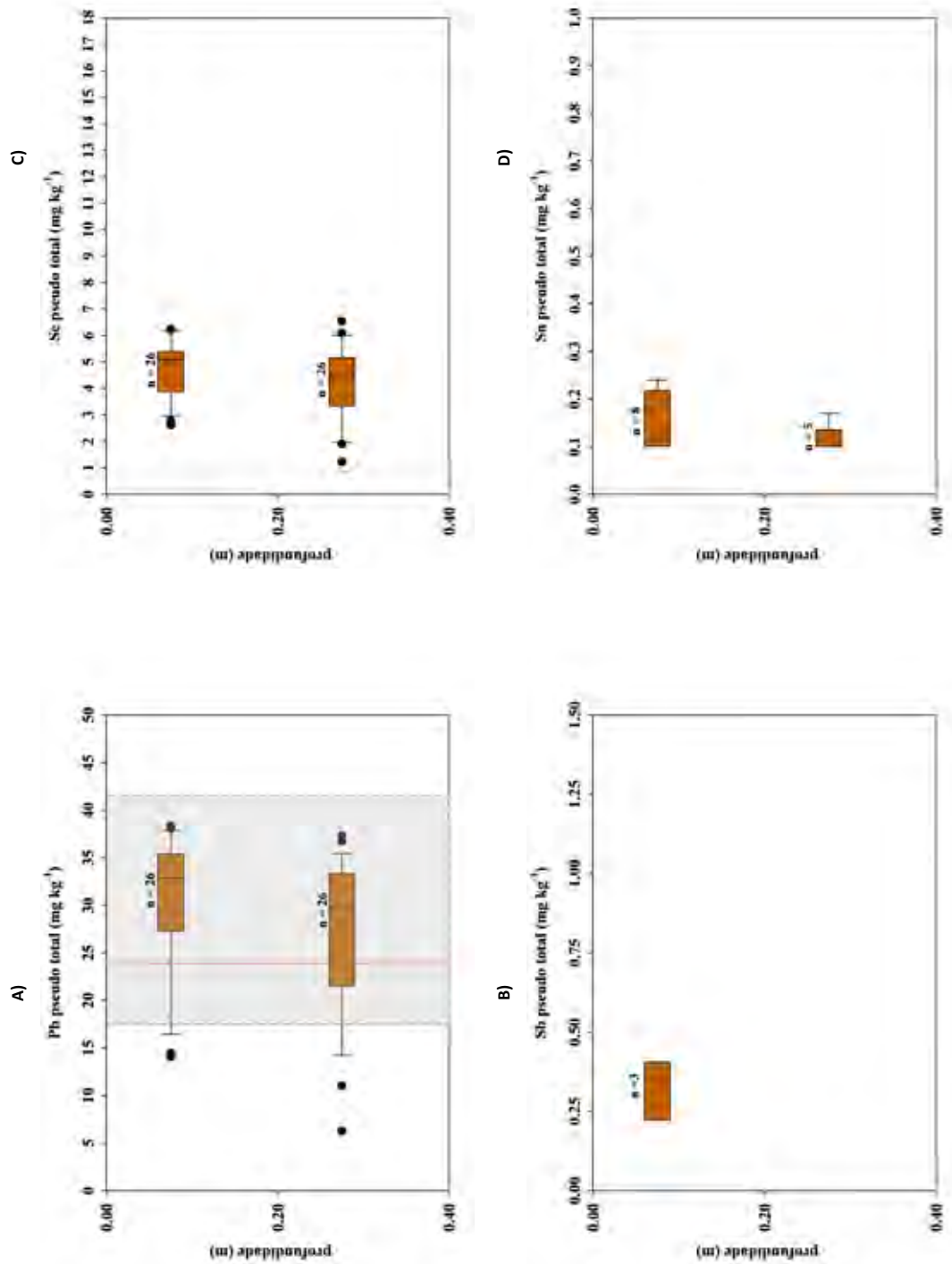
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (.....) MINAS GERAIS, 2011) e para o rio Doce (----- Guevara et al., 2018) são representados por limites verticais. O teor de Hg não foi avaliado nas referências de linha base.

Figura 119 – Teores pseudo totais de níquel (A), chumbo (B), antimônio (C) e selênio (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2.



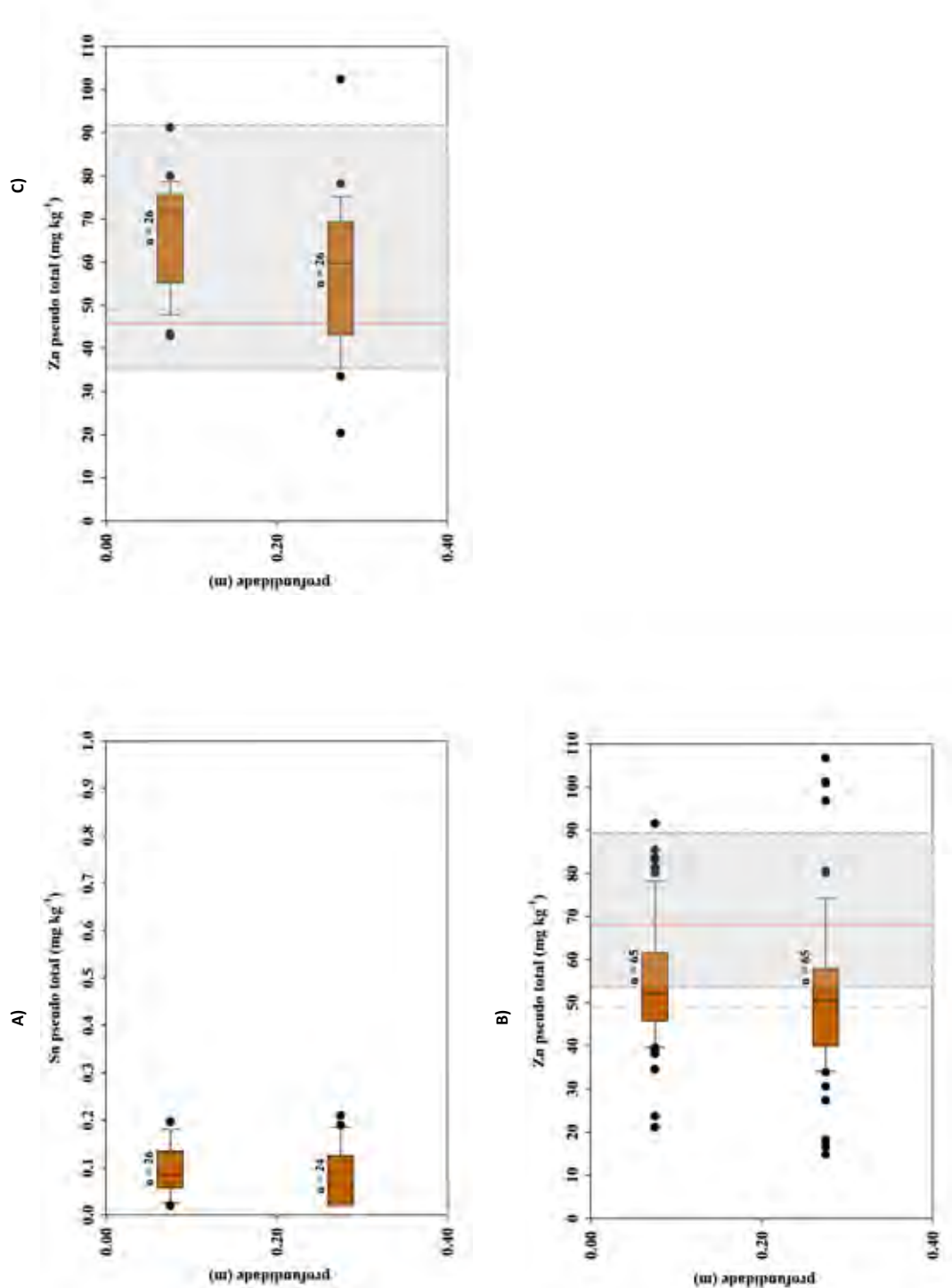
As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (.....) e para o rio Doce (..... Guevara et al., 2018) são representados por limites verticais. Os teores de Sb e Se não foram avaliados nas referências de linha base.

Figura 120 – Teores pseudo totais de chumbo (A), antimônio (B), selênio (C) e estanho (D) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (..... MINAS GERAIS, 2011) e para o rio Doce (----- Guevara et al., 2018) são representados por limites verticais. Os teores de Sb, Se e Sn não foram avaliados nas referências de linha base; não existem valores de referência de qualidade para Sn em solos.

Figura 121 – Teores pseudo totais de estanho (A) e zinco (B) de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2 e de zinco (C) nas amostras dos Compartimentos 3 e 4.



As linhas verticais separadas por área hachurada representam os limites do primeiro e terceiro quartis da linha base e a linha vertical vermelha representa a mediana da linha base. Valores de referência de qualidade para o estado de Minas Gerais (COPAM) (..... MINAS GERAIS, 2011) e para o rio Doce (--- Guevara et al., 2018) são representados por limites verticais. O teor de Sn não foi avaliado nas referências de linha base e não existe valor de referência de qualidade para esse elemento em solos.

Para os teores de Fe, não existem valores de referência de qualidade para o solo, pois esse elemento é o mais abundante da Terra e um dos mais abundantes em solos de forma geral (ALBARÈDE, 2011); no entanto, os teores quantificados nas amostras dos Compartimentos estiveram dentro da variação reportada nos solos de linha base (Figura 116- D e Figura 117- A). Diferentemente dos altos teores de Fe quantificados no rejeito barrado e no Tecnosolo do Compartimento 1 (que variaram na faixa de 10 a 24%) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b, d), os resultados dos Compartimentos 2, 3 e 4 demonstram ter havido diluição do rejeito nos depósitos dos solos afetados nas áreas afetadas pela mancha de inundação.

Dentre todos os EPTs analisados nas amostras coletadas em campo, destacam-se os teores de As e Mn, que foram superiores aos teores de linha base nos Compartimentos 2, 3 e 4 (Figura 113- C e Figura 114- B), além de os teores de Mn ultrapassarem o VRQ da bacia do rio Doce em ambos os Compartimentos, assim como para os teores de As para o Compartimento 2. Já para os solos afetados dos Compartimentos 3 e 4, os teores medianos de As não ultrapassaram o VRQ local estabelecido por Guevara et al. (2018) para a bacia do rio Doce (que considera as influências do Quadrilátero Ferrífero).

O material geológico da região de montante da bacia do rio Doce é conhecido por apresentar uma rica composição química natural de elementos (COSTA et al., 2015), principalmente em Fe e Mn (GUERRA et al., 2017), além de a região de Mariana ser frequentemente associada à histórica exploração do ouro, que é encontrado nas rochas associado ao As (na forma de arsenopirita) (BORBA; FIGUEIREDO; MATSCHULLAT, 2003; BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017a; COSTA et al., 2015). Esses teores naturalmente altos de As da bacia justificam o VRQ local (GUEVARA et al., 2018) ser superior ao VRQ para o estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2011).

Comparando-se as magnitudes dos teores de As das amostras coletadas nas áreas afetadas dos Compartimentos 2 (18 a 22 mg kg⁻¹), e 3/4 (10 a 13 mg kg⁻¹) com os teores reportados no rejeito depositado no Compartimento 1 (7,8 a 8,3 mg kg⁻¹) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d) e no rejeito barrado (variação de 2,4 a 27 mg kg⁻¹) (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b), observa-se que o material que se depositou na região de montante não apresentou incremento de As, pois os teores detectados nessa matriz foram inferiores à linha base (30,8 mg kg⁻¹) (cuja influência do Quadrilátero Ferrífero para a formação dos solos é maior, comparativamente aos solos que se distanciam em direção à foz). Para a região de jusante da UHE Risoleta Neves, no entanto, os solos de linha base eram menos enriquecidos em As (8,6 e 8,3 mg kg⁻¹, para os Compartimentos 2 e 3/4, respectivamente). Ainda, o Tecnosolo do Compartimento 1 possui predomínio de minerais de tamanho silte e areia fina (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d), enquanto que os solos afetados nas manchas de inundação dos Compartimentos 2, 3 e 4 foram enriquecidos com argila em decorrência das deposições (Figura 61 e Figura 63). Em função da elevada reatividade da fração argila, essa fração pode adsorver e carrear uma maior quantidade de EPTs associados, incluindo o arsenato (As(V)), que possui elevada afinidade de adsorção às superfícies dos óxidos do solo (ALMEIDA et al., 2021).

Assim, fazendo a combinação entre teor no material depositado nas várzeas afetadas e em relação a cada linha base (camada 0-20 cm) tem-se: Compartimento 1 – $8,3/30,8 = 0,27$; Compartimento 2 – $18/8,6 = 2,1$; Compartimentos 3 e 4 – $13/8,3 = 1,56$. Nesse cenário, a maior contaminação por As (relação de 2,1) ocorreu no Compartimento 2 (Figura 113- C). Isso foi confirmado a partir dos cálculos

dos fatores de contaminação (relativos à linha base), que indicaram que no Compartimento 2 a contaminação por As nos solos afetados foi classificada como “considerável” (HAKANSON, 1980) em até 75% (Q75) das amostras (Figura 122). Para os Compartimentos 3 e 4, essa classificação foi de “contaminação moderada” para As (Figura 123).

Borba, Figueiredo e Matschullat (2003) estimam que cerca de 390.000 toneladas de As foram despejadas no sistema de drenagem da região do Quadrilátero Ferrífero em três séculos de exploração de ouro. Com relação ao rompimento da barragem de Fundão, estima-se que cerca de 922 toneladas de As foram despejadas no ambiente durante o evento de forma instantânea (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020b). Ainda, uma questão importante a ser levada em consideração é o fato de que há intensa atividade antrópica nas áreas de várzea do rio Doce, especialmente na região de abrangência do Compartimento 2, que inclui a presença do município de Governador Valadares às margens do rio. Esse Compartimento (em especial a partir de Governador Valadares – Compartimento 2B) já foi identificado como apresentando anomalias para diversos EPTs em outras matrizes ambientais, como para os sedimentos fluviais por exemplo (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020c). Portanto, é razoável considerar que a maior contaminação ambiental pelo As nos solos dos Compartimentos inferiores do rio Doce pode estar associada a três fatores, não excludentes: 1) a força mecânica da onda de rejeitos revolveu o fundo do leito do rio Doce e seus afluentes, disponibilizando o As que estava depositado nos sedimentos, originário da exploração de ouro na região do Quadrilátero Ferrífero; 2) o rejeito mais fino (fração argila) que extravasou da barragem e que foi transportado para a região à jusante da UHE Risoleta Neves, depositando-se nas manchas de inundação, pode estar mais concentrado em As em relação ao rejeito depositado no Compartimento 1; 3) pode ter havido contribuições de atividades antrópicas pós-desastre para a contaminação dos solos, como aporte de insumos agrícolas ou emissão de lodo de esgoto no rio Doce.

Figura 122 – Fatores de contaminação para EPTs de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) no Compartimento 2 em comparação com a linha base.

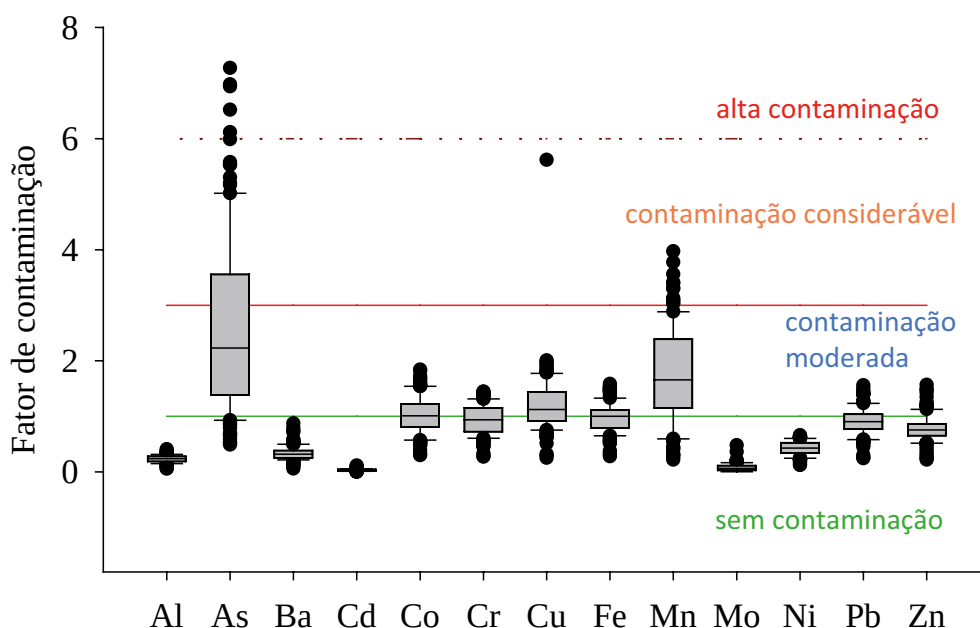
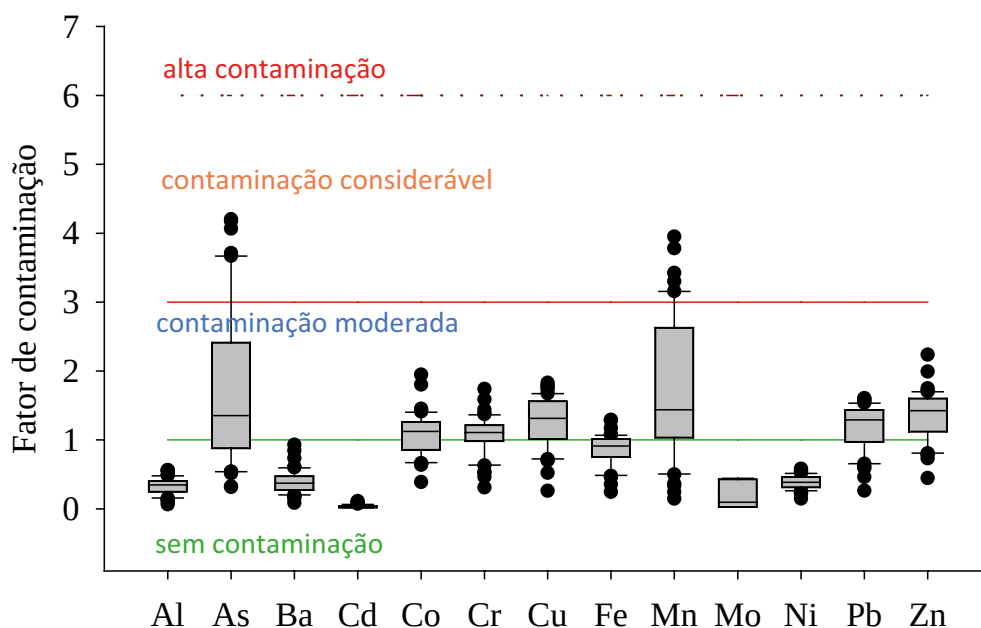


Figura 123 – Fatores de contaminação para EPTs de amostras de solos afetados pela mancha de inundação (APDL 2016) nos Compartimentos 3 e 4 em comparação com a linha base.



O Mn também foi detectado em teores acima da linha base e ao VRQ da bacia do rio Doce (Figura 117-C e Figura 118- B), em que o Q75 das amostras esteve dentro da classificação de “contaminação moderada” para ambos os Compartimentos (Figura 122 e Figura 123), podendo representar risco ambiental para os solos aluvionares desses locais.

A região de Mariana tem a exploração de Mn como uma de suas atividades econômicas (RODRIGUES, 2012). Ainda, elevados teores de Mn em solos na região do Quadrilátero Ferrífero estão associados com os elevados teores naturais do material de origem da região (CARVALHO FILHO et al., 2011; CARVALHO FILHO et al., 2015). De forma consistente, elevados teores de Mn nas rochas, solos, sedimentos, água e no rejeito de mineração do Fe são reportados na literatura ao longo de toda a bacia (GOMES, 2009; GREEN PEACE, 2017; GUERRA et al., 2017; MAIA, 2017; RODRIGUES, 2012; SILVA et al., 2016; WOLFF, 2009). No Compartimento 1 os teores pseudo totais de Mn ficaram abaixo dos teores da linha base e variaram entre 661,6 a 710,4 mg kg⁻¹, enquanto que os teores medianos quantificados nas amostras dos Compartimentos 2, 3 e 4 chegaram a valores de até 1.113 mg kg⁻¹ (Figura 117- C). Esse enriquecimento do Mn em direção a foz do rio Doce pode ser explicado por processos de redução do Mn⁴⁺ nas partes mais altas e transporte e concentração do Mn²⁺, que é mais móvel, para as partes mais baixas do rio. Em um solo de várzea submetido à condição de alagamento (anoxia) por vários meses do ano e por um longo período de tempo (décadas), a baixa pressão de O₂ promove a redução dos compostos nitrogenados (oxidados), minerais de Mn (oxidado, Mn⁺⁴) e por fim, minerais de Fe (oxidado, Fe⁺³). Os teores de Mn extraídos por Mehlich (mais biodisponíveis) reforçam essa observação, uma vez que para as amostras das áreas afetadas nas manchas de inundação a jusante da UHE Risoleta Neves (Figura 72- D) os teores foram cerca de 2 vezes maiores em comparação ao Mn disponível quantificado no rejeito do Compartimento 1, que já era alto (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d).

Uma resposta importante é se as anomalias ambientais detectadas para As e Mn nos solos das manchas de inundação estão sendo transferidas para a cadeia trófica, ou seja, se ocorre acúmulo desses elementos nas plantas da região. Ou ainda, se mesmo não tendo ultrapassado os valores de linha base e VRQs, outros EPTs possam estar sendo absorvidos em quantidades elevadas pelas plantas. Neste caso, as pastagens coletadas nos mesmos locais de amostragem de solo foram analisadas e comparadas com plantas desenvolvidas sobre os solos controle de cada ponto (Figura 124 a Figura 132). Ainda, como as pastagens tem por principal finalidade econômica a alimentação bovina, os teores foram comparados com os teores máximos toleráveis (TMT) de EPTs para bovinos, de acordo com NRC (2005).