

Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento
da barragem de Fundão na bacia do rio Doce

1º Relatório Parcial de Resultados

Institutos Lactec
Curitiba – Paraná – Brasil
Maio/2018



Documento:	Diagnóstico Socioambiental – 1º Relatório Parcial de Resultados
Considerações Gerais:	Este documento refere-se ao primeiro relatório parcial de resultados, 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 os primeiros resultados parciais de diagnóstico dos danos do desastre.
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. José Adercio Leite Sampaio
	E-mail: joseadercio@mpf.mp.br
Executante:	Institutos Lactec Rodovia BR-116, km 98, nº 8813 Jardim das Américas Caixa Postal 19067 CEP 81531-980 Curitiba – PR – BR e-mail: leonardo.bastos@lactec.org.br Divisão de Meio Ambiente T + 55 (41) 3361-6882

Autoria: Equipe Técnica dos Institutos 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	
Luiz Fernando Vianna	Diretor Administrativo-Financeiro	
GERÊNCIA DE SEGMENTO		
André Ricardo Capra	MSc., Engenheiro Mecânico	Ensaios e Análises Laboratoriais
Luiz Alkimin de Lacerda	DSc., Engenheiro Civil	Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação
Tania Lucia Graf de Miranda	DSc., 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	DSc., 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	DSc., Engenheiro Civil	Coordenação Técnica
Tania Lucia Graf de Miranda	DSc., Engenheira Agrônoma	Coordenação Técnica
Gleiciane Fernanda de Carvalho Blanc	MSc., Engenheira Ambiental	Coordenação Executiva
GESTÃO E ACOMPANHAMENTO		
Franciele Dãobroski	Esp., Eng. Eletricista	Analista de Projeto
Guilherme de Poli	Administrador de Empresas	Analista de Projeto
EQUIPE EXECUTORA		
Ana Paula Zampieri da Silva	Téc. em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Cesar João Andreazza	Analista de Sistemas	Geoprocessamento
Danielle Drago	Engenheira Cartógrafa	Geoprocessamento
Edson Haruo Yoshizumi	Téc. em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Lázaro Filipe de Souza	Geógrafo	Geoprocessamento
Maricler Toigo	Esp., Analista de Sistemas	Geoprocessamento

Peterson da Silva Beherend	Técnico em Geoprocessamento	Geoprocessamento
Yuri Arnold Gruber	Engenheiro Civil	Geoprocessamento
Fernando Mainardi Fan	Dr., Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Hugo de Oliveira Fagundes	M.Sc., Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Irani dos Santos	Dr., Geógrafo	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Batista Dias de Paiva	Dr., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Paulo Jankowski Saboia	M.Sc., Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Julio Werner Yoshioka Bernardo	M.Sc., Engenheiro Ambiental	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rodrigo Cauduro Dias de Paiva	Dr., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rosana de Fátima Colaço Gibertoni	M.Sc., Engenheira Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Rubem Luiz Daru	D.Sc., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Tobias Bernward Bleninger	Dr., Engenheiro Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Gheysa do Rocio Morais Pires	M.Sc., Química Ambiental	Qualidade dos Sedimentos
Isabella Françoso Rebutini Figueira	Dra., Geóloga	Qualidade dos Sedimentos e Espeleologia
Ernesto Goldfarb Figueira	MSc., Geólogo	Espeleologia e Qualidade dos Sedimentos
Juliano José da Silva Santos	MSc., Biólogo	Bioespeleologia
Ana Carolina Canossa Becker	Engenheira Civil	Águas Superficiais Fluviais
Ana Carolina Wosiack	MSc., Bióloga	Águas Superficiais Fluviais
Marianne Schaefer França Sieciechowicz	MSc., Engenheira Ambiental	Águas Superficiais Fluviais
Nicole Machuca Brassac de Arruda	Dra., Bióloga	Águas Superficiais Fluviais
Alexandre Brandelli	MSc., Oceanólogo	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Emilio Marcelo Dolichney	BSc., Oceanógrafo	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Fernando Luiz Diehl	MSc., Oceanógrafo	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Josiane Rovedder	MSc., Bióloga	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Luciano Hermanns	Dr., Oceanólogo	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Ludmilla Dias Vincula Veadó	Msc., Oceanógrafa	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras e Zooplâncton
Rafaela Michels da Silveira	MSc., Oceanógrafa	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Susan da Silva	Tecnóloga em Gestão Ambiental	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Tomaz Bohrer Brentano	Engenheiro Ambiental	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Priscila Izabel Tremarin	Dra., Bióloga	Fitoplâncton, Águas Superficiais Fluviais, Estuarinas e Costeiras

Patrícia Dammski Borges de Andrade	MSc., Bióloga	Águas Superficiais Fluviais, Zooplâncton e Cetáceos
Rosemary Aparecida Brogim	Dra., Bióloga	Bentos de Fundo Inconsolidados
Matheus Oliveira Freitas	Dr., Biólogo	Ictiofauna e Pesca
Maurício Belézia de Oliveira	Esp., Biólogo	Ictiofauna e Pesca
Vinícius Abilhoa	Dr., Biólogo	Ictiofauna e Pesca
Leonardo Liberali Wedekin	Dr., Biólogo	Cetáceos
Samira Costa da Silva	MSc., Médica Veterinária	Cetáceos
ESTAGIÁRIOS		
Alcides Conte Neto	Estatística	Qualidade de Água e Qualidade de Sedimentos
Angel Aparecida Maia	Geologia	Qualidade dos Sedimentos
Jéssica Cristina Lozovei	Geografia	Qualidade dos Sedimentos
Andressa Muraro	Engenharia Cartográfica	Geoprocessamento
Eliana Vieira de Freitas	Engenharia Cartográfica	Geoprocessamento
Matheus de Andrade Machado	Engenharia Cartográfica	Geoprocessamento
Nilo Kruschelski	Engenharia Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
João Marcos Carvalho	Engenharia Civil	Hidrologia e Hidrossedimentologia
Priscila Brum de Camargo	Engenharia Sanitária e Ambiental	Águas Superficiais Estuarinas e Costeiras
Natália Nadolny Ungaratti	Engenharia Ambiental	Águas Superficiais Fluviais
Jaqueline Schmidt	Ciências Biológicas	Zooplâncton
Isabela Martins Hoff Grando	Ciências Biológicas	Zooplâncton

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Articulação Ortoimagens Orbitais referente ao período pré-desastre (T0).	33
Figura 2 – Articulação Ortoimagens Orbitais referente ao período pós-desastre (T1).	33
Figura 3 – Articulação Ortoimagens Orbitais referente ao período pós-desastre (T2).	34
Figura 4 – Articulação Ortoimagens Aerofotogramétricas.....	35
Figura 5 – Área de abrangência das curvas de nível.....	35
Figura 6 – Distribuição dos Pontos utilizados na validação das ortoimagens orbitais.	36
Figura 7 – Discrepâncias dos pontos avaliados, relativos as ortoimagens orbitais referentes ao período pré-desastre (T0).....	37
Figura 8 – Discrepâncias dos pontos avaliados, relativos as ortoimagens orbitais referentes ao período pós-desastre (T1).....	37
Figura 9 – Discrepâncias dos pontos avaliados, relativos as ortoimagens orbitais referentes ao período pós-desastre (T2).	38
Figura 10 – Uso e ocupação do solo referente ao período pré-desastre (T0).	45
Figura 11 – Distribuição dos pontos de validação em campo do mapeamento de uso e ocupação do solo referente ao período pré-desastre (T0).	46
Figura 12 – Validação em campo em área de Agricultura.....	46
Figura 13 – Validação em campo em área de Campo e Pasto.....	47
Figura 14 – Validação em campo em área de Solo Exposto.	47
Figura 15 – Validação em campo em área de Reflorestamento.....	47
Figura 16 – Validação em campo em área de Vegetação Nativa.....	48
Figura 17 – Validação em campo em área de Vegetação Nativa.....	48
Figura 18 – Validação em campo em área de Vegetação Nativa.....	49
Figura 19 – Área de passagem e deposição da lama - APDL.	52
Figura 20 – Articulação detalhamento da APDL.....	52
Figura 21 – Detalhe 1 - APDL.....	53
Figura 22 – Detalhe 2 - APDL.....	53
Figura 23 – Detalhe 3 - APDL.....	54
Figura 24 – Detalhe 4 - APDL.....	54
Figura 25 – Detalhe 5 - APDL.....	55
Figura 26 – Uso do solo afetado.....	56
Figura 27 – Área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.	57
Figura 28 – Detalhe 01 - área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.	58

Figura 29 – Detalhe 02 - área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.	58
Figura 30 – Detalhe 03 - área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.	59
Figura 31 – Detalhe 04 - área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.	59
Figura 32 – Detalhe 05 - área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.	60
Figura 33 – Localização das cavernas selecionadas para as demais vistorias.....	67
Figura 34 – Localização das cavidades/abrigos elencados como atingidos pelo rejeito – Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico. A localização das cavidades afetadas é o mesmo da mapeada pela Carste e Agroflor.....	68
Figura 35 – Medição da projeção horizontal de acordo com o método da descontinuidade modificado de CARSTE (2013).	69
Figura 36 – Medição do desnível da cavidade, modificado de CARSTE (2013).	70
Figura 37 – Convenção espeleométrica para a diferenciação de abrigo e caverna, segundo Chabert e Watson (1981).....	70
Figura 38 – Parâmetro adotado para a determinação do ponto inicial da cavidade, segundo o CECAV/ICMBio (2009).	71
Figura 39 – Fotos gerais da vistoria espeleológica e a equipe envolvida nesta atividade.	71
Figura 40 – Localização das cavidades cadastradas no entorno da Barragem de Santarém.....	73
Figura 41 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero na escala 1:25.000 com a localização das cavidades cadastradas no entorno da barragem de Santarém. Mapa modificado de CPRM (1994).....	73
Figura 42 – SMD 01. Esta é a única feição que ocorre em canga (crosta ferruginosa). Embora não apresente relevância significativa, foi mantida a classificação original de abrigo. Não apresenta espeleotemas e o desenvolvimento é de apenas 2,5 m. Não foi atingida pela lama de rejeito. 77	
Figura 43 – CA-07. Feição não vistoriada devido a presença de abelhas. Estas fotografias foram fornecidas pela Samarco. Foi mantida a classificação original de abrigo. De acordo com a cota e limites da área afetada, este abrigo foi atingido pela lama de rejeito. 78	
Figura 44 – CA-08. De acordo com as vistorias realizadas pelo Lactec e segundo os critérios espeleométricos, essa feição foi classificada como cavidade. É formada por rochas xistosas e filitos, portanto não apresenta espeleotemas. Foi observada a presença uma plântula (B), provavelmente associada à presença de morcegos, já que deve ter geminado a partir dos excrementos destes animais. Essa cavidade foi atingida pela lama de rejeito.	79
Figura 45 – CA-09. Feição não vistoriada devido à presença de abelhas. Essas fotografias foram fornecidas pela Samarco. Conforme os critérios espeleométricos, foi mantida a classificação original de abrigo. De acordo com a cota e limites da área afetada, este abrigo foi atingido pela lama de rejeito. É formado por rochas xistosas e filitos e, portanto não apresenta espeleotemas.	80
Figura 46 – CA-10. Feição não vistoriada devido à presença de abelhas. Essas fotografias foram fornecidas pela Samarco. Conforme os critérios espeleométricos foi mantida a classificação original de abrigo. De acordo com a cota e limites da área afetada, este abrigo foi atingido pela lama de rejeitos. É formado por rochas xistosas e filitos e, portanto, não apresenta espeleotemas.	81

Figura 47 – CA-11. Trata-se um bloco de rocha abatido (xisto) – não está in situ. Não apresenta espeleotemas e não se enquadra nos critérios para definição de cavidades e abrigos. Embora tenha sido atingido pela lama do rejeito, foi desconsiderado como cavidade ou abrigo.	82
Figura 48 – CA-12. Esta feição atualmente encontra-se alagada, conforme imagem A. As fotografias fornecidas pela Samarco, anteriores a elevação da cota da Barragem de Santarém, permitem identificar uma pequena cavidade formada em rocha xistosa, sem espeleotemas e com grau de relevância baixo. De acordo com as plantas baixas o desenvolvimento dessa cavidade era da ordem de 5,0 m.	83
Figura 49 – CA-13. Trata-se um bloco de rocha abatido (xisto) – não está in situ. Não apresenta espeleotemas e não se enquadra nos critérios para definição de cavidades e abrigos. Embora tenha sido atingido pela lama do rejeito, foi desconsiderado como cavidade ou abrigo.	84
Figura 50 – CA-14. Cavidade com desenvolvimento de 5,0 metros. Formada devido ao desabamento de blocos segundo o plano da foliação em rocha xistosa. Não possui espeleotemas. Embora tenha sido atingida pela lama de rejeito. Apenas nessa cavidade foram registradas espécies cavernícolas. Os registros foram – uma mariposa (Lepidoptera) de espécie não identificada na entrada da cavidade, um sapo (<i>Rhinella sp</i>) próximo a entrada e 6 indivíduos do morcego vampiro (<i>Desmodus rotundus</i>) no interior do salão da cavidade.	85
Figura 51 – CA-15. Trata-se nitidamente de um afloramento rochoso paralelo a drenagem no qual os processos erosivos provocaram o solapamento da base, sobretudo facilitado pelos planos de foliação. Não constitui ambiente espeleológico propriamente dito e não adequa ao conceito do fechamento de um plano 0. Foi classificado apenas como abrigo.	86
Figura 52 – CA-16. Igualmente a anterior, esta feição trata-se de um afloramento rochoso paralelo a drenagem, na qual os processos erosivos provocaram o solapamento da base, sobretudo facilitado pelos planos de foliação, criando assim um abrigo. Não constitui ambiente espeleológico propriamente dito e não se adequa ao conceito do fechamento de um plano 0. Foi classificado apenas como abrigo. Foi notada a presença de arcnídeos.	87
Figura 53 – CA-17. Esta feição, classificada como abrigo, encontra-se atualmente alagada, como pode ser visto pelas imagens C e D. Imagens A e B foram fornecidas pela Samarco e mostram como era a feição anterior ao alteamento da cota da Barragem de Santarém.	88
Figura 54 – CA-18. Esta feição não se caracteriza como cavidade ou abrigo. Não constitui ambiente espeleológico, não atende aos critérios espeleométricos e também não fecha um plano 0. Trata-se apenas de um afloramento rochoso que sofreu erosão na sua base e que devido à foliação marcante cria um plano “negativo”. Esse afloramento foi atingido pela lama de rejeito.	89
Figura 55 – CA-19. Esta feição também não se caracteriza como cavidade ou abrigo. Não constitui ambiente espeleológico e não fecha um plano 0. Igualmente trata-se de um afloramento rochoso que sofreu erosão na sua base e que devido à foliação marcante cria um plano “negativo”. Esse afloramento foi atingido pela lama de rejeito.	90
Figura 56 – CA-20. Para esta feição, de acordo com as vistorias realizadas pelo Lactec, foi mantida a classificação estabelecida pela Carste como abrigo.	91
Figura 57 – Rede de monitoramento selecionada para as análises pluviométricas.	98
Figura 58 – Localização das sub-bacias de interesse.	99
Figura 59 – Polígonos de Thiessen gerados para sub-bacia Risoleta Neves.	100

Figura 60 – Exemplo de grade para geração de chuva média pelo método IDW para sub-bacia Risoleta Neves.	101
Figura 61 – Análise de anomalias de precipitação da Bacia do rio Doce para períodos chuvosos. Fonte – IGAM, 2015.	105
Figura 62 – Aporte de sedimentos gerados na bacia até a rede de drenagem	110
Figura 63 – Resultados da simulação hidrológica com o modelo MGB-IPH – a) Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe calculado entre as vazões observadas para os postos fluviométricos da ANA e as vazões calculadas; b) Comparação dos Hidrogramas calculados e simulados para o posto 56696000, localizado no rio Piracicaba.	116
Figura 64 – Bacia hidrográfica do rio Doce e localização das estações de sedimentos da Agência Nacional de Águas e dos postos virtuais de reflectância de superfície.	117
Figura 65 – Comparação dos resultados de CSS calculados com dados de CSS observados e RefVer para os postos sedimentométricos da ANA – a) Baixo Guandu (56992000); e b) Mario de Carvalho (56696000). Fonte – Fagundes et al. (2017c).	118
Figura 66 – Concentração de Sedimentos em Suspensão (mg/L) simulada e observada nas estações – a) Fazenda Ouro Fino, rio Santo Antônio; b) Vila Matias (56891900), rio Suaçuí Grande; e c) Colatina (56994500), rio Doce. Fonte – Fagundes et al. (2017c).	120
Figura 67 – Coeficiente de correlação (r) calculado entre os dados observados e calculados de CSS e entre os dados observados de RefVer para as estações – Colatina (56994500), Baixo Guandu (56992000), São Sebastião da Encruzilhada (56990000), Tumiritinga (56920000), Vila Matias (56891900), Naque Velho (56825000), Mario de Carvalho (56696000) e Fazenda Cachoeira D’antas (56425000). Fonte – Fagundes et al. (2017c).	120
Figura 68 – Coeficiente de correlação entre os valores de CSS calculados com o modelo MGB-SED e dados observados de RefVer para todos os postos virtuais de reflectância). Fonte – Fagundes et al. (2017c).	121
Figura 69 – Perda de solo específica média (1970-2010), por minibacia, para a bacia do rio Doce calculada a partir da MUSLE. Fonte – Fagundes et al. (2017c).	122
Figura 70 – Descarga sólida média diária total para cada trecho de rio de cada minibacia. Fonte – Fagundes et al. (2017c).	122
Figura 71 – Comparação das reflectâncias ao longo da bacia entre os períodos seco e chuvoso, com média e valores das reflectâncias de superfície para – a) o rio principal; e b) os afluentes. Fonte – Fagundes et al. (2017b).	123
Figura 72 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD019 (rio Doce) no município de Rio Casca (MG). Fonte – Goulart (2017).	126
Figura 73 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD040 (rio Corrente Grande) no município de Periquito (MG). Fonte – Goulart (2017).	127
Figura 74 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena (MG). Fonte – Goulart (2017).	127
Figura 75 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56998300 (rio Doce) no município de Linhares (ES). Fonte – Goulart (2017).	128
Figura 76 – Resultados comparados para a estação RD023 (rio Doce). Fonte – Goulart (2017).	129

Figura 77 – Resultados comparados para a estação RD044 (rio Doce).Fonte – Goulart (2017).	129
Figura 78 – Resultados comparados para a estação RD045 (rio Doce).Fonte – Goulart (2017).	130
Figura 79 – Polutograma simulado para a região de Colatina.	132
Figura 80 – Polutograma simulado para a região de Governador Valadares.	133
Figura 81 – Localização dos pontos de amostragem de sedimento na zona costeira e subdivisão da área aquática nos setores a serem analisados.	138
Figura 82 – Exemplo dos gráficos utilizados para demonstrar o percentual médio das frações granulométricas em cada amostra.	142
Figura 83 – Médias das frações granulométricas dos sedimentos coletados até novembro de 2015 na estação chuvosa a distância de até 4 km da foz do rio Doce.	145
Figura 84 – Médias das frações granulométricas dos sedimentos coletados na estação chuvosa de novembro 2016 a distância até 4 km da foz do rio Doce.	146
Figura 85 – Médias frações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 a distância até 6,5 km da foz do rio Doce.	147
Figura 86 – Médias frações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 e de 2017 a distância entre 4 e 6,5 km da foz do rio Doce.	148
Figura 87 – Médias das frações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 e de 2017 a distância entre 6,5 a 12 km da foz do rio Doce.	149
Figura 88 – Médias das frações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 e de 2017 a distância entre 12 a 22 km da foz do rio Doce.	150
Figura 89 – Médias das rações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 e de 2017 a distância superior a 22 km da foz do rio Doce.	150
Figura 90 – Distribuição espacial dos sedimentos arenosos (GRO), silticos (SI) e argilosos (AR) no período chuvoso de 2015-2016 no entorno da foz do rio Doce e na APA Costa das Algas.	152
Figura 91 – Distribuição espacial dos sedimentos arenosos (GRO), silticos (SI) e argilosos (AR) no período seco de 2016 no entorno da foz do rio Doce e na APA Costa das Algas.	153
Figura 92 – Distribuição espacial dos sedimentos arenosos (GRO), silticos (SI) e argilosos (AR) no período chuvoso de 2016-2017 no entorno da foz do rio Doce e na APA Costa das Algas.	154
Figura 93 – Distribuição espacial dos sedimentos arenosos (GRO), silticos (SI) e argilosos (AR) no período seco de 2017 no entorno da foz do rio Doce e na APA Costa das Algas.	155
Figura 94 – Distribuição dos percentuais das frações granulométricas na estação amostra P5 durante o período chuvoso 2015-2016 e período seco e 2016.	156
Figura 95 – Diagrama de Shepard período chuvoso na estação P5.	157
Figura 96 – Diagrama de Shepard período seco na estação P5.	157
Figura 97 – Diagrama de caixa das concentrações de ferro nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha lilás = nível de efeito aparente (AET).	159
Figura 98 – Concentrações de ferro no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).	160

Figura 99 – Concentrações de Fe no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	160
Figura 100 – Concentrações de Fe em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).	160
Figura 101 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de ferro nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	161
Figura 102 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de ferro na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	162
Figura 103 – Representação espacial das medianas das concentrações de ferro nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	163
Figura 104 – Diagrama de caixa das concentrações de alumínio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha lilás = nível de efeito aparente (AET).	164
Figura 105 – Concentrações de alumínio no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017). ...	165
Figura 106 – Concentrações de alumínio no ambiente estuarino, praia e oceano (GOLDER, 2016). ..	165
Figura 107 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de alumínio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	166
Figura 108 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de alumínio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	167
Figura 109 – Representação espacial das medianas das concentrações de alumínio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	168
Figura 110 – Diagrama de caixa das concentrações de manganês nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha lilás = nível de efeito aparente (AET).	169
Figura 111 – Concentrações de manganês no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017). ...	170
Figura 112 – Concentrações de manganês no ambiente estuarino, praia e oceano (GOLDER, 2016). ..	170
Figura 113 – Concentrações de manganês em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).	170
Figura 114 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de manganês nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	171
Figura 115 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de manganês na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	172
Figura 116 – Representação espacial das medianas das concentrações de manganês nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.	173
Figura 117 – Diagrama de caixa das concentrações de vanádio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha lilás = nível de efeito aparente (AET).	174
Figura 118 – Concentrações de vanádio no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).	175
Figura 119 – Concentrações de vanádio no ambiente estuarino, praia e oceano (GOLDER, 2016).....	175

Figura 120 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de vanádio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	176
Figura 121 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de vanádio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	177
Figura 122 – Representação espacial das medianas das concentrações de vanádio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.	178
Figura 123 – Diagrama de caixa das concentrações de cromo nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.	179
Figura 124 – Concentrações de Cr no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).	180
Figura 125 – Concentrações de cromo no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	181
Figura 126 – Concentrações de cromo em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).	181
Figura 127 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de cromo nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	182
Figura 128 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de cromo na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	183
Figura 129 – Representação espacial das medianas das concentrações de ferro nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	184
Figura 130 – Diagrama de caixa das concentrações de arsênio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.	185
Figura 131 – Concentrações de arsênio no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).	186
Figura 132 – Concentrações de arsênio no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	186
Figura 133 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de arsênio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	187
Figura 134 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de arsênio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	188
Figura 135 – Representação espacial das medianas das concentrações de arsênio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	189
Figura 136 – Diagrama de caixa das concentrações de zinco nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.	190
Figura 137 – Concentrações de zinco no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).	190

Figura 138 – Concentrações de zinco no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	191
Figura 139 – Concentrações de zinco em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).	191
Figura 140 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de zinco nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	192
Figura 141 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de zinco na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	193
Figura 142 – Representação espacial das medianas das concentrações de zinco nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	194
Figura 143 – Diagrama de caixa das concentrações de bário nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL).	195
Figura 144 – Concentrações de bário no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	196
Figura 145 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de bário nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	197
Figura 146 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de bário na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	198
Figura 147 – Representação espacial das medianas das concentrações de bário nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	199
Figura 148 – Diagrama de caixa das concentrações de níquel nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.	200
Figura 149 – Concentrações de níquel no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).	201
Figura 150 – Concentrações de níquel no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	201
Figura 151 – Concentrações de níquel em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).	201
Figura 152 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de níquel nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	202
Figura 153 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de níquel na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	203
Figura 154 – Representação espacial das medianas das concentrações de níquel nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	204
Figura 155 – Diagrama de caixa das concentrações de zinco nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.	205
Figura 156 – Concentrações de chumbo no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	206

Figura 157 – Concentrações de chumbo em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).	206
Figura 158 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de chumbo nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	207
Figura 159 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de chumbo na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	208
Figura 160 – Representação espacial das medianas das concentrações de chumbo nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	209
Figura 161 – Diagrama de caixa das concentrações de cobre nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.	210
Figura 162 – Concentrações de cobre no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).	211
Figura 163 – Concentrações de cobre no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	211
Figura 164 – Concentrações de cobre em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).	211
Figura 165 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de cobre nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	212
Figura 166 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de cobre na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	213
Figura 167 – Representação espacial das medianas das concentrações de cobre nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	214
Figura 168 – Diagrama de caixa das concentrações de cádmio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL).....	215
Figura 169 – Concentrações de cádmio no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).	216
Figura 170 – Concentrações de cádmio no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).	216
Figura 171 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de cádmio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	217
Figura 172 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de cádmio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.....	218
Figura 173 – Representação espacial das medianas das concentrações de cádmio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.....	219
Figura 174 – Diagrama de caixa das concentrações de mercúrio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha azul = nível de efeitos limiares (TEL); linha verde = nível de efeitos baixos (ERL); linha laranja = nível de efeitos prováveis (PEL); linha vermelha = nível de efeitos médios.	220

Figura 175 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de mercúrio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	221
Figura 176 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de mercúrio na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	222
Figura 177 – Representação espacial das medianas das concentrações de mercúrio nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.	223
Figura 178 – Distribuição da frequência de resultados médios de alumínio inferiores e superiores ao AET.	226
Figura 179 – Distribuição da frequência de resultados médios de ferro inferiores e superiores ao AET.	227
Figura 180 – Distribuição da frequência de resultados médios de manganês inferiores e superiores ao AET.	228
Figura 181 – Distribuição da frequência de resultados médios de vanádio inferiores e superiores ao AET.	229
Figura 182 – Distribuição espacial dos resultados do quociente de AET na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	230
Figura 183 – Detalhe da distribuição espacial dos resultados do quociente de AET na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	231
Figura 184 – Distribuição espacial dos resultados do quociente de PEL na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.	233
Figura 185 – Localização das estações de monitoramento na região de estudo.	249
Figura 186 – Representação do gráfico box plot.	254
Figura 187 – Exemplo de gráfico combinado para avaliação temporal e espacial do evento.	256
Figura 188 – Matriz de correlação entre as variáveis de qualidade de água avaliadas.	284
Figura 189 – Escores dos fatores 1 e 2.	287
Figura 190 – Localização dos pontos de amostragem da Fundação Renova na zona costeira e subdivisão da área aquática adotada nos setores a serem analisados.	293
Figura 191 – Interpolação das medianas calculadas a partir dos resultados de turbidez para cada período avaliado pós-desastre.	301
Figura 192 – Distribuição das faixas de valores de temperatura (°C) entre os períodos pré e pós-desastre.	304
Figura 193 – Distribuição das faixas de valores de temperatura (°C) entre os períodos pós-desastre nas diferentes distâncias amostradas.	305
Figura 194 – Interpolação das medianas dos resultados de temperatura de superfície nos períodos chuvosos e secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	306
Figura 195 – Interpolação das medianas dos resultados de temperatura de fundo nos períodos chuvosos e secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	307
Figura 196 – Distribuição das faixas de valores de salinidade entre os períodos pré e pós-desastre.	309

Figura 197 – Distribuição das faixas de valores de salinidade entre os períodos pós-desastre nas diferentes distâncias amostradas.....	310
Figura 198 – Interpolação das medianas dos resultados de salinidade em superfície nos períodos chuvosos e períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	311
Figura 199 – Interpolação das medianas dos resultados de salinidade em profundidade nos períodos chuvosos e secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	312
Figura 200 – Distribuição das faixas de valores de turbidez (UNT) entre os períodos pré e pós-desastre.....	314
Figura 202 – Interpolação das medianas dos resultados de superfície de turbidez em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.....	315
Figura 203 – Interpolação das medianas dos resultados de fundo de turbidez em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.....	316
Figura 205 – Distribuição das faixas de valores de SST (mg/L) entre os períodos pós-desastre nas diferentes distâncias amostradas.....	318
Figura 206 – Medianas dos valores diários de SST (mg/L) registrados nas amostras da camada superficial e profunda dos pontos localizados na seção IA a v. Linha pontilhada vermelha (vertical) indica o dia 27/02/16, quando ocorreram mudanças metodológicas no monitoramento ambiental.....	319
Figura 207 – Resultados de estrôncio dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (Grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados muito abaixo do limite de detecção, ou muito acima da faixa do restante de resultados e que pode significar falha na geração ou no registro no banco de dados.....	321
Figura 208 – Resultados de arsênio trivalente do período de 17/11/15 a 30/08/2017 em todas as regiões monitoradas (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados anômalos que podem significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,036 mg/L.	322
Figura 209 – Resultados de arsênio dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados anômalos que podem significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,05 mg/L.	323
Figura 210 – Resultados de bário dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados anômalos que podem significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,5 mg/L.	324
Figura 211 – Resultados de cádmio dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados anômalos que podem significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,005 mg/L.	325
Figura 212 – Resultados de chumbo dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados anômalos que podem significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,05 mg/L.	326
Figura 213 – Resultados de cobre dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). A linha corresponde à concentração de 0,05 mg/L.....	327

Figura 214 – Resultados de cromo trivalente e hexavalente do período de 17/11/15 a 30/08/2017. A linha corresponde à concentração para proteção da vida marinha – cromo +3 = 0,056 mg/L e cromo +6 = 0,00015 mg/L.....	328
Figura 215 – Resultados de cromo dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados anômalos que podem significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,10 mg/L.....	329
Figura 216 – Resultados de mercúrio dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). A linha corresponde à concentração de 0,0002 mg/L.....	330
Figura 217 – Resultados de níquel dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados anômalos que podem significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,1 mg/L.	331
Figura 218 – Resultados de vanádio dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados anômalos que podem significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,005 mg/L.	332
Figura 219 – Resultados de Zinco dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). O círculo no gráfico do grupo 1 destaca resultados muito abaixo do limite de detecção e pode significar falha na geração ou digitação do banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,02 mg/L.	333
Figura 220 – Resultados de ferro dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). A linha corresponde à concentração de 0,3 mg/L.....	335
Figura 221 – Distribuição de ferro dissolvido nas águas superficiais no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de ferro em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.....	336
Figura 222 – Distribuição de ferro dissolvido nas águas de fundo no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de ferro em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.....	337
Figura 223 – Relação entre os valores de turbidez e as concentrações de ferro nas amostras do monitoramento oceânico, com a equação da reta gerada e coeficiente de determinação.	338
Figura 224 – Distribuição de ferro total nas águas superficiais no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de ferro em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	339
Figura 225 – Distribuição de ferro total nas águas de fundo no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de ferro em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	340
Figura 226 – Distribuição de ferro total nas águas costeiras na região do refúgio da vida silvestre e área de proteção ambiental da costa das algas. Mediana dos resultados de ferro nos períodos chuvosos e secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	341
Figura 227 – Resultados de alumínio dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). A linha corresponde à concentração de 0,1 mg/L.....	343

Figura 228 – Distribuição de alumínio dissolvido nas águas superficiais no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de alumínio em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	344
Figura 229 – Distribuição de alumínio dissolvido nas águas de fundo no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de alumínio em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	345
Figura 230 – Relação entre os valores de turbidez e as concentrações de alumínio nas amostras do monitoramento oceânico, com a equação da reta gerada e coeficiente de determinação.	346
Figura 231 – Distribuição de alumínio total nas águas superficiais no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de alumínio em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	347
Figura 232 – Distribuição de alumínio total nas águas de fundo no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de alumínio em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	348
Figura 233 – Distribuição de alumínio total nas águas costeiras da região da costa das algas. Mediana dos resultados de alumínio em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 e agosto de 2017.	349
Figura 234 – Resultados de manganês dissolvido do período de 17/11/15 a 30/08/2017. Gráficos por região (grupos 1 a 5). Os círculos nos gráficos destacam resultados muito abaixo do limite de detecção, ou muito acima da faixa do restante de resultados e que pode significar falha na geração ou no registro no banco de dados. A linha corresponde à concentração de 0,1 mg/L.	351
Figura 235 – Relação entre os valores de turbidez e as concentrações de manganês nas amostras do monitoramento oceânico, com a equação da reta gerada e coeficiente de determinação.	352
Figura 236 – Distribuição de manganês total nas águas superficiais no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de manganês em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	353
Figura 237 – Distribuição de manganês total nas águas de fundo no entorno da foz do rio Doce. Isolinhas da mediana dos resultados de manganês total em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	354
Figura 238 – Distribuição de manganês nas águas costeiras na região da costa das algas. Mediana dos resultados de manganês em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	355
Figura 239 – Medianas dos valores diários de OD (mg/L) registrados nas amostras da camada superficial e profunda dos pontos localizados na radial leste. Linhas pontilhadas verdes indicam os limites definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, enquanto que linha pontilhada vermelha (vertical) indica a data de 27/02/16, quando ocorreram mudanças metodológicas no monitoramento.	366
Figura 240 – Interpolação das medianas dos resultados de OD (mg/L) em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	367
Figura 241 – Interpolação das medianas dos resultados de OD (mg/L) em dois períodos chuvosos e dois períodos secos entre novembro de 2015 a agosto de 2017.	368
Figura 242 – Distribuição das faixas de valores de pH entre os períodos pré e pós-desastre.	369

Figura 243 – Distribuição das faixas de valores de pH entre os períodos pós-desastre nas diferentes distâncias amostradas.....	371
Figura 244 – Medianas dos valores diários de pH registrados nas amostras da camada superficial e profunda dos pontos localizados na seção IA a v. Linhas pontilhadas verdes indicam os limites definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, enquanto que linha pontilhada vermelha indica a data de 27/02/16, quando ocorreram mudanças metodológicas no monitoramento.....	372
Figura 245 – Abundância de organismos na região do estuário dos rios Piraquê-açu e Piraquê-mirim, previamente ao desastre. Colunas pretas indicam maré vazante e colunas cinzas a maré enchente. As barras indicam o desvio padrão de +1 (adaptado de NUNES, 2010).	378
Figura 246 – Mapa com a localização dos pontos amostrais das quatro expedições para o estudo como um todo. Para o zooplâncton, a amostragem foi realizada nas regiões da foz do rio Doce, Costa das Algas, Barra Nova e Abrolhos, variando de acordo com a expedição.	380
Figura 247 – Abundância e índice de diversidade (H') para as expedições Vital de Oliveira (novembro/2015) e Soloncy Moura I (janeiro/16). (UFES, 2016a).....	381
Figura 248 – Abundância do zooplâncton nas estações amostrais da campanha de abril/2016 (LOUREIRO-FERNANDES; PEREIRA, 2017).	381
Figura 249 – Abundância relativa dos grupos zooplanctônicos na campanha de abril de 2016 para quatro regiões de estudo.	382
Figura 250 – Abundância total de organismos do zooplâncton nas quatro expedições avaliadas (LOUREIRO-FERNANDES; PEREIRA, 2017).	382
Figura 251 – Diversidade (H') para o grupo Copepoda em bits/ind. (LOUREIRO-FERNANDES; PEREIRA, 2017).	382
Figura 252 – Relação entre o número de ordens registradas nas capturas realizadas em 2017 e o número de ordens levantadas por meio de dados secundários.	392
Figura 253 – Relação entre o número de famílias registradas nas capturas realizadas em 2017 e o número de famílias levantadas por meio de dados secundários.	392
Figura 254 – Relação entre o número de espécies registradas nas capturas realizadas em 2017 e o número de espécies levantadas por meio de dados secundários.....	392
Figura 255 – Proporção de espécies (riqueza) e de exemplares (abundância) para cada ordem registrada nas capturas realizadas em 2017. Fonte – FUNDAÇÃO RENOVA 2017.....	393
Figura 256 – Proporção de espécies (riqueza) e de exemplares (abundância) para cada família registrada nas capturas realizadas em 2017. Fonte – FUNDAÇÃO RENOVA 2017.....	393
Figura 257 – Variações na riqueza (S), diversidade (H') e equitabilidade (E) da ictiofauna registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Alto da bacia do rio Doce.	396
Figura 258 – Proporção de espécies de interesse para a pesca registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Alto da bacia do rio Doce.	397
Figura 259 – Proporção de espécies introduzidas (exóticas) registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Alto da bacia do rio Doce.....	397
Figura 260 – Variações na riqueza (S), diversidade (H') e equitabilidade (E) da ictiofauna registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Médio 1 da bacia do rio Doce.....	397
Figura 261 – Proporção de espécies de interesse para a pesca registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Médio 1 da bacia do rio Doce.	398

Figura 262 – Variações na riqueza (S), diversidade (H') e equitabilidade (E) da ictiofauna registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Médio 2 da bacia do rio Doce.....	398
Figura 263 – Proporção de espécies de interesse para a pesca registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Médio 2 da bacia do rio Doce.	398
Figura 264 – Proporção de espécies introduzidas (exóticas) registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Médio 2 da bacia do rio Doce.	399
Figura 265 – Variações na riqueza (S), diversidade (H') e equitabilidade (E) da ictiofauna registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Baixo da bacia do rio Doce.	399
Figura 266 – Proporção de espécies de interesse para a pesca registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Baixo da bacia do rio Doce.....	399
Figura 267 – Proporção de espécies introduzidas (exóticas) registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Baixo da bacia do rio Doce.	400
Figura 268 – Variações na riqueza (S), diversidade (H') e equitabilidade (E) da ictiofauna registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Estuário da bacia do rio Doce.....	400
Figura 269 – Proporção de espécies de interesse para a pesca registrada nas capturas realizadas em 2017 no trecho Estuário da bacia do rio Doce.	400
Figura 270 – Representação gráfica da ordenação multidimensional não métrica (NMDS) baseada na composição e abundância da ictiofauna registrada em 2017 nos pontos amostrais da bacia do rio Doce. Vetores (Pearson >0,5) indicam as espécies mais representativas para a análise de distribuição.....	406
Figura 271 – Representação gráfica da ordenação multidimensional não métrica (NMDS) baseada na composição e abundância da ictiofauna registrada em 2017 na bacia do rio Doce.	408
Figura 272 – Número e proporção de espécies nativas e exóticas.....	412
Figura 273 – Número de indivíduos por espécie coletados no STP.	413
Figura 274 – Riqueza de espécies coletadas no STP entre 2009 e 2017.	413
Figura 275 – Riqueza de espécies coletadas à jusante entre 2007 e 2017.	414
Figura 276 – Resultado consolidado do número de espécies no período entre 2005 e 2017.	414
Figura 278 – Espécies nativas e exóticas da área de influência da UHE Baguari.	420
Figura 279 – Número de indivíduos e espécies coletadas (pós) do início da operação da UHE Risoleta Neves, durante o monitoramento da ictiofauna da Área de Influência de 2006 a 2016.	422
Figura 280 – Percentual de espécies por ordem registradas nas campanhas no período de 2006 a 2016.....	423
Figura 281 – Número total de indivíduos nativos e não-nativos à bacia do rio Doce na área de influência da UHE Risoleta Neves.....	424
Figura 282 – Número de indivíduos coletados por espécies no período de 2006 a 2016.....	424
Figura 283 – Índice de diversidade de Shannon (H') à jusante e à montante da UHE Risoleta Neves.....	425
Figura 284 – Número total de indivíduos capturados por ano de monitoramento da ictiofauna na área de influência da UHE Candonga de 2006 a 2016.	425

Figura 285 – Área de estudo das saídas de amostragem embarcada pós-desastre de cetáceos na região da foz do rio Doce.	429
Figura 286 – Embarcação “Riacruz II”, utilizada na maior parte da amostragem de cetáceos na região da foz do rio Doce. Note o pesquisador de pé na proa da embarcação realizando a foto-identificação de um grupo de botos-cinza.	430
Figura 287 – Distribuição das rotas amostradas e grupos de cetáceos detectados entre dezembro de 2017 e março de 2018 durante amostragem visual embarcada de cetáceos na região da foz do rio Doce.	433
Figura 288 – Frequência absoluta dos registros de grupos de botos-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>) em função da (A) profundidade (m) e (B) distância da costa (km), detectados entre dezembro de 2017 e março de 2018 durante amostragem visual embarcada de cetáceos na região da foz do rio Doce.	433
Figura 289 – Fotos aéreas realizadas com um drone tomadas na região da foz do rio Doce em: (A) 14/12/2017; e (B) 01/03/2018.	434
Figura 290 – Pontos de medição da turbidez (em NTU) da superfície da água durante a Campanha 2 de amostragem visual embarcada de cetáceos na região da foz do rio Doce, em fevereiro e março de 2018.	434

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado da precisão e acurácia das ortoimagens orbitais.	37
Tabela 2 – Classes referentes ao mapeamento de uso e ocupação do solo para o período pré-desastre (T0).	45
Tabela 3 – Matriz de confusão para a classificação da imagem e a validação de campo.....	50
Tabela 4 – Cálculo dos valores de exatidão e do índice Kappa.....	51
Tabela 5 – Qualidade de classificação segundo intervalos do coeficiente de concordância Kappa.....	51
Tabela 6 – Comparação entre os estudos realizados com o objetivo de determinar a área de passagem e deposição da lama - APDL.	55
Tabela 7 – Classes afetadas pela APDL.	57
Tabela 8 – Informações obtidas a partir da vistoria realizada.	75
Tabela 9 – Decrições do meio biótico e físico.....	76
Tabela 10 – Classificação inicial das feições subterrâneas definidas pela Carste (2013) e Agroflor (2013).	92
Tabela 11 – Rede de monitoramento selecionada para as análises pluviométricas.	97
Tabela 12 – Períodos de estudo considerados.	99
Tabela 13 – Períodos de estudo considerados e quantidade de estações pluviométricas.....	99
Tabela 14 – Médias nas sub-bacias de acumulados mensais e acumulados dos períodos seco e úmido, utilizando método de Thiessen e Método IDW.....	102
Tabela 15 – Período T1 – observado, média histórica e diferença.....	102
Tabela 16 – Período T2 – observado, média histórica e diferença.....	103
Tabela 17 – Período T3 – observado, média histórica e diferença.....	103
Tabela 18 – Período T4 – observado, média histórica e diferença.....	103
Tabela 19 – Período T5 – observado, média histórica e diferença.....	104
Tabela 20 – Período T6 – observado, média histórica e diferença.....	104
Tabela 21 – Resumo das estatísticas de erro.....	130
Tabela 22 – Resumo das estatísticas de erro por região da bacia hidrográfica.....	130
Tabela 23 – Tabela comparativa entre os modelos aplicados.	131
Tabela 24 – Valores de concentração coletadas pela CPRM para a região de Colatina.	132
Tabela 25 – Valores de concentração coletadas pela CPRM para a região de Governador Valadares.....	133
Tabela 26 – Divisão do espaço aquático em áreas e pontos amostrais de sedimentos correspondentes.	139
Tabela 27 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.	140

Tabela 28 – Variáveis de qualidade de sedimento avaliadas e respectivos objetivos.	140
Tabela 29 – Classificação granulométrica dos sedimentos*(Resolução CONAMA nº 454/12).	141
Tabela 30 – Valores de referência utilizados para comparação das concentrações dos elementos avaliados no sedimento marinho (BUCHMAN, 2008).	143
Tabela 31 – Diferença do percentual de finos entre os períodos pré e pós chegada da pluma de rejeitos.	147
Tabela 32 – Estações de monitoramento de qualidade de água avaliadas no rio Doce (MG).	247
Tabela 33 – Estações de monitoramento de qualidade de água localizadas em afluentes do rio Doce e em rios que contribuem para sua formação (MG).	248
Tabela 34 – Estações de monitoramento de qualidade de água avaliadas no rio Doce (ES).	248
Tabela 35 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.	250
Tabela 36 – Variáveis de qualidade de água avaliadas e respectivos limites dispostos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2.	251
Tabela 37 – Descrição dos intervalos do box plot.	254
Tabela 38 – Intervalos de não conformidades.	257
Tabela 39 – Estações fluviométricas do rio Doce próximas ou coincidentes com as estações de qualidade de água do IGAM.	259
Tabela 40 – Teste de esfericidade de Bartlett para as 13 variáveis.	282
Tabela 41 – Medida de adequacidade de Kaiser-Meyer-Olkin (MSA) para as 13 variáveis.	282
Tabela 42 – Teste de esfericidade de Bartlett para as 12 variáveis.	282
Tabela 43 – Medida de adequacidade de Kaiser-Meyer-Olkin (MSA) para as 12 variáveis.	282
Tabela 44 – Comunalidades para as 12 variáveis.	283
Tabela 45 – – Peso das variáveis nos fatores.	285
Tabela 46 – Divisão da região costeira em áreas e pontos amostrais de qualidade da água que representam cada área	294
Tabela 47 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.	295
Tabela 48 – Variáveis de qualidade de água avaliadas	296
Tabela 49 – Tipos e características das massas de água.	298
Tabela 50 – Indicadores relacionados à pluma de material em suspensão.	299
Tabela 51 – Limites para proteção da vida aquática.	300
Tabela 52 – Intervalos de não conformidades.	302
Tabela 53 – Concentrações em mg/L de cada parâmetro para os intervalos definidos.	302
Tabela 54 – Estações de coleta do fitoplâncton na costa do estado do Espírito Santo.	374
Tabela 55 – Campanhas realizadas para análises da comunidade zooplânctônica na região da foz do rio Doce e adjacências, entre novembro/15 e novembro/16.	379

Tabela 56 – Coordenadas e descrição dos pontos de amostragem da ictiofauna.....	390
Tabela 57 – Ordens, famílias e espécies de peixes marinhos, estuarinos e de água doce registrados nas coletas da Renova na bacia do rio Doce. Fonte – FUNDAÇÃO RENOVA, 2017.	394
Tabela 58 – Abundância total e relativa (%) da ictiofauna registrada nas coletas realizadas no ano de 2017 na bacia hidrográfica do rio Doce.....	402
Tabela 59 – PERMANOVA calculada a partir da matriz de similaridade de Bray-Curtis para a ictiofauna registrada em 2017 na bacia do rio Doce. Itens em negrito representam diferenças significativas. GL – Graus de liberdade, SQ – Soma dos quadrados, QM – Quadrados médios.....	406
Tabela 60 – PERMANOVA calculada a partir de comparações em pares entre os trechos amostrados da bacia do rio Doce em 2017. Itens em negrito representam diferenças significativas. PU – Permutações únicas.	407
Tabela 61 – Resultados da análise de SIMPER para as espécies com maior contribuição percentual nas similaridades registradas para cada trecho.	407
Tabela 62 – PERMANOVA calculada a partir da matriz de similaridade de Bray-Curtis para a ictiofauna registrada em 2017 na bacia do rio Doce. GL – Graus de liberdade, SQ – Soma dos quadrados, QM – Quadrados médios.	408
Tabela 63 – Espécies levantadas durante a realização do estudo entre 1997 e 2007	410
Tabela 64 – Espécies coletadas no STP.	412
Tabela 65 – Espécies coletadas durante as 12 campanhas de campo.....	415
Tabela 66 – Espécies coletadas durante o levantamento na UHE Baguari no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2017 . Fonte – Relatórios de Monitoramento de Ictiofauna da UHE Barigui.	418
Tabela 67 – Total de espécies coletadas na UHE Risoleta Neves – Candonga.....	420
Tabela 68 – Esforço amostral e número de grupos de cetáceos observados durante as Campanhas 1 e 2 de avistagem na região marinho-costeira da foz do rio Doce.	432

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	31
2 USO DO SOLO	32
2.1 Materiais e Métodos	32
2.1.1 Materiais	32
2.1.1.1 Ortoimagens Orbitais	32
2.1.1.2 Ortoimagens Aerofotogramétricas	34
2.1.1.3 Curvas de Nível.....	35
2.1.2 Metodologia.....	36
2.1.2.1 Validação geométrica das ortimagens orbitais	36
2.1.2.2 Definição das classes.....	38
2.1.2.3 Características do mapeamento de uso e ocupação do solo.....	44
2.2 Resultados.....	44
2.2.1 Mapeamento de Uso e Ocupação do Solo para o período pré-desastre (T0)..	44
2.2.2 Validação e avaliação do Mapeamento de Uso e Ocupação do Solo para o período pré-desastre (T0).....	46
2.2.3 Mapeamento da Área de Passagem e Deposição da Lama - APDL	51
2.2.4 Determinação das áreas das classes mapeadas afetadas pela APDL	57
2.3 Próximas atividades	60
2.4 Referências bibliográficas	60
3 ESPELEOLOGIA.....	62
3.1 Contexto Espeológico Regional	62
3.2 Contextualização Bioespeológica.....	63
3.3 Metodologia.....	65
3.3.1 Legislações	65
3.3.2 Metodologia.....	67
3.4 Resultados.....	72
3.4.1 Histórico dos levantamentos espeológicos na área	92
3.5 Considerações finais	92
3.6 Referências bibliográficas	94
4 HIDROLOGIA.....	97
4.1 Análise de chuva média na bacia após o desastre	97
4.1.1 Dados utilizados, períodos e áreas de estudo	97
4.1.2 Metodologia.....	100
4.1.3 Resultados.....	102

4.1.4	Considerações finais.....	104
4.2	Modelagem Hidrossedimentológica no rio Doce.....	105
4.2.1	Desenvolvimento de modelos e compreensão de processos de grande escala	106
4.2.1.1	Modelo MGB-SED.....	106
4.2.1.2	Resultados hidrossedimentológicos.....	116
4.2.2	Estudos de comparação de modelagens de turbidez	124
4.2.2.1	O modelo Tucci (2016).....	124
4.2.2.2	O modelo de Castilho et al. (2017)	125
4.2.2.3	Adaptações realizadas no modelo de Fagundes et al. (2017c)	126
4.2.2.4	Resultados da comparação dos modelos.....	128
4.2.3	Avaliação de modelos simplificados de propagação de ondas de sedimento	131
4.2.4	Considerações finais	134
4.3	Referências bibliográficas	134
5	SEDIMENTO MARINHO	137
5.1	Metodologia.....	137
5.1.1	Abrangência da região avaliada	137
5.1.2	Período avaliado.....	140
5.1.3	Variáveis físicas e químicas dos sedimentos marinhos	140
5.1.4	Avaliação dos dados de qualidade do sedimento e granulometria.....	141
5.1.4.1	Granulometria	141
5.1.4.2	Parâmetros de qualidade do sedimento	143
5.2	Resultados.....	145
5.2.1	Granulometria.....	145
5.2.1.1	Dados provenientes dos monitoramentos realizado pela Fundação Renova.....	145
5.2.1.2	Dados provenientes do monitoramento do IEMA	156
5.2.2	Qualidade do sedimento.....	158
5.2.2.1	Qualidade do sedimento por parâmetro físico-químico	158
5.2.2.2	Abordagem integrada dos resultados de AET e PEL	224
5.2.3	Bentos de fundos inconsolidados	234
5.3	Considerações finais	240
5.4	Referências bibliográficas	243

6 QUALIDADE DAS ÁGUAS FLUVIAIS	246
6.1 Metodologia.....	246
6.1.1 Abrangência da região de estudo.....	246
6.1.2 Período avaliado.....	249
6.1.3 Variáveis de qualidade de água.....	250
6.1.4 Avaliação dos dados de qualidade de água.....	253
6.1.4.1 Avaliação espacial e temporal dos dados de qualidade de água	253
6.1.4.2 Avaliação de não conformidade dos parâmetros de qualidade da água.....	257
6.1.4.3 Análise estatística multivariada	258
6.1.4.4 Avaliação de vazões referentes à série histórica do IGAM	259
6.2 Resultados.....	260
6.2.1 Resultados das variáveis de qualidade da água	260
6.2.1.1 Alcalinidade total	260
6.2.1.2 Alumínio dissolvido	260
6.2.1.3 Arsênio total	261
6.2.1.4 Bário total	262
6.2.1.5 Cádmio total.....	262
6.2.1.6 Cálcio total	263
6.2.1.7 Chumbo total	263
6.2.1.8 Cianeto livre	264
6.2.1.9 Cloreto total	264
6.2.1.10 Cobre dissolvido	265
6.2.1.11 Coliformes termotolerantes.....	266
6.2.1.12 Condutividade elétrica in loco	266
6.2.1.13 Cor verdadeira.....	267
6.2.1.14 Cromo total	267
6.2.1.15 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	268
6.2.1.16 Demanda Química de Oxigênio (DQO)	268
6.2.1.17 Dureza total.....	269
6.2.1.18 Fenóis totais	269
6.2.1.19 Ferro dissolvido.....	270
6.2.1.20 Fósforo total.....	270
6.2.1.21 Magnésio total	271

6.2.1.22	Manganês total	271
6.2.1.23	Mercúrio total	272
6.2.1.24	Níquel total	272
6.2.1.25	Nitrato	273
6.2.1.26	Nitrito	274
6.2.1.27	Nitrogênio amoniacal	274
6.2.1.28	Nitrogênio orgânico	275
6.2.1.29	Oxigênio dissolvido (OD)	275
6.2.1.30	pH in loco	276
6.2.1.31	Potássio dissolvido	276
6.2.1.32	Sódio dissolvido	277
6.2.1.33	Sólidos totais	277
6.2.1.34	Sólidos dissolvidos totais	278
6.2.1.35	Sólidos suspensos totais	278
6.2.1.36	Sulfato total	279
6.2.1.37	Turbidez	280
6.2.1.38	Zinco total	281
6.2.2	Análise estatística multivariada	281
6.3	Considerações finais	288
6.4	Referências bibliográficas	290
7	QUALIDADE DAS ÁGUAS COSTEIRAS	292
7.1	Análises físico-químicas das águas costeiras	292
7.1.1	Metodologia	292
7.1.1.1	Abrangência da região avaliada	292
7.1.1.2	Período avaliado	295
7.1.1.3	Seleção e avaliação das variáveis físicas e químicas de qualidade de água	296
7.1.2	Resultados	303
7.1.2.1	Avaliação para caracterização das massas d'água (Temperatura, Salinidade e Massas d'água)	303
7.1.2.2	Indicadores da Pluma de Sólidos em Suspensão	313
7.1.2.3	Avaliação de metais com vistas à proteção da vida aquática marinha ..	320
7.1.2.4	Avaliação de não conformidade dos parâmetros de qualidade das águas	356

7.2 Comunidade fitoplanctônica de ambientes costeiros	373
7.2.1 Metodologia	373
7.2.1.1 Abrangência da região avaliada.....	373
7.2.1.2 Período avaliado.....	374
7.2.1.3 Parâmetros avaliados	374
7.2.1.4 Tratamento e avaliação dos dados	375
7.2.2 Resultados	375
7.2.2.1 Clorofila-a e feopigmentos	375
7.2.2.2 Densidade do fitoplâncton.....	375
7.2.2.3 Riqueza.....	376
7.3 Comunidade zooplanctônica de ambientes costeiros	376
7.3.1 Metodologia	376
7.3.1.1 Abrangência da região avaliada.....	377
7.3.1.2 Período avaliado.....	377
7.3.1.3 Parâmetros avaliados	377
7.3.1.4 Tratamento e avaliação dos dados	377
7.3.2 Resultados	378
7.3.2.1 Análise comparativa: pós-desastre e pré-desastre	378
7.3.2.2 Avaliação pré e pós-desastre	378
7.3.2.3 Avaliação pós-desastre	379
7.4 Considerações finais.....	383
7.5 Referências bibliográficas.....	386
8 ICTIOFAUNA	389
8.1 Metodologia.....	389
8.1.1 Área de estudo	389
8.1.2 Materiais e métodos	389
8.2 Resultados – Fundação Renova.....	391
8.2.1 Composição da ictiofauna.....	391
8.2.2 Riqueza, diversidade e equitabilidade	396
8.2.3 Abundância	401
8.2.4 Similaridade e Distribuição	406
8.3 Resultados da síntese de estudos das usinas hidrelétricas da bacia do rio doce	409
8.3.1 Síntese dos estudos sobre a ictiofauna na área de influência da UHE Aimorés no período de 1997 a 2017	409

8.3.2 Usina Hidrelétrica Baguari	417
8.3.3 Usina Hidrelétrica Risoleta Neves	420
8.4 Considerações finais	426
8.5 Referências bibliográficas	427
9 CETÁCEOS	428
9.1 Metodologia	428
9.1.1 Área de estudo	428
9.1.2 Coleta de dados primários	429
9.2 Resultados	431
9.3 Considerações finais	435
9.4 Referências bibliográficas	436
APÊNDICES	438
APÊNDICE A - Limites de quantificação dos métodos	438
APÊNDICE B - Número de observações	441
APÊNDICE C - Gráficos combinados de box plot e dispersão	490
APÊNDICE D - Percentis referentes aos períodos pré-desastre e pós-desastre	525
APÊNDICE E - Valores mínimos e máximos referentes aos períodos pré-desastre e pós-desastre	545
APÊNDICE F - Gráficos para avaliação de não conformidade dos parâmetros de qualidade de água com os limites da resolução CONAMA nº 357/2005 para rios de classe 2.	651
APÊNDICE G - Vazões referentes às datas de campanhas do IGAM entre 1998 e 2017	711
APÊNDICE H - Gráficos para avaliação de não conformidade dos parâmetros de qualidade das águas costeiras	713

1 INTRODUÇÃO

Conforme o Termo de Ajustamento Preliminar firmado entre o Ministério Público Federal, Samarco Mineração S.A., Vale S.A. e BHP Billiton Brasil Ltda., cabe ao Lactec a 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 MPF-MG, 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 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, como engenharia ambiental e civil, geologia, geofísica, química aplicada, geomática, espeleologia, hidráulica, hidrologia, oceanografia, agronomia, botânica, biologia, arqueologia, história, entre outras.

As atividades iniciaram-se pela caracterização dos ambientes afetados antes do desastre, o que culminou no Relatório de Linha-Base. Na sequência realizou-se um levantamento de dados e estudos secundários realizados após o desastre, gerando o Relatório Pós-Desastre. Ambos 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.

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.

Na continuidade das atividades, o presente documento apresenta os primeiros resultados parciais do diagnóstico de danos socioambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente. Ressalta-se o caráter preliminar desse documento cujo objetivo é apresentar os resultados obtidos até o momento da emissão do mesmo. O levantamento e análise de dados é contínuo até a finalização do diagnóstico.

Este documento está organizado em capítulos temáticos, iniciando com o uso do solo seguido por espeleologia, hidrologia, sedimento marinho, qualidade das águas fluviais, qualidade das águas costeiras, ictiologia e cetáceos. Outras áreas temáticas que integram o diagnóstico socioambiental e que não foram abrangidas nesse relatório ainda encontram-se em processo de levantamento e consistência de dados.

2 USO DO SOLO

Neste relatório pretende-se esclarecer, de modo geral, os procedimentos, métodos e técnicas adotadas durante a execução do mapeamento de uso e ocupação do solo referente ao período pré-desastre, e do mapeamento da área de passagem e deposição da lama – APDL, em virtude do rompimento da Barragem de Fundão, assim como os resultados obtidos.

Ressalta-se que neste relatório, a APDL refere-se às áreas por onde a onda de rejeitos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão passou e a lama ficou depositada, considerando o trecho entre a barragem de Fundão no município de Mariana até a UHE Risoleta Neves (Candonga), no município de Rio Doce.

2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

A área referente aos trabalhos desenvolvidos neste relatório, compreendeu o trecho das cabeceiras do rio Doce e entorno, desde a barragem de Fundão, no município de Mariana em Minas Gerais, até a foz do rio Doce, em Regência no Estado do Espírito Santo. A partir da análise de imagens de satélite da região afetada, identificou-se visualmente a área máxima de deposição da lama a partir da calha do rio. Tomando isso como base, adotou-se um raio de 500 metros a partir do eixo principal dos corpos d'água afetados, considerando uma aproximação preliminar da área potencialmente afetada pelo desastre. A partir da UHE Risoleta Neves, foi adotado o raio de 500 metros a partir das margens da calha do rio Doce até sua foz. Foram considerados também os limites de algumas Unidades de Conservação de grande importância próximas ao Rio Doce como, a Área de Proteção Ambiental Serra do Timóteo, o Parque Estadual do Rio Doce, o Monumento Natural Estadual Pico do Bituruna, o Parque Estadual Sete Salões, a Floresta Nacional de Goytacazes e a Reserva Biológica de Comboios. Em alguns casos, o mapeamento foi feito apenas em parte destas Unidades de Conservação, devido à indisponibilidade de dados cartográficos (ortoimagens orbitais).

2.1.1 MATERIAIS

Como insumos para o mapeamento quanto ao uso e ocupação do solo e delimitação do polígono da APDL, foram utilizadas ortoimagens referentes aos períodos pré e pós-desastre, as quais foram disponibilizadas pela Fundação Renova. Os softwares utilizados para visualização dessas ortoimagens e geração da base cartográfica seguem especificados a seguir:

- Microstation e Autocad Map 3D 2010: utilizado para a vetorização e edição dos dados vetoriais;
- ArcMap 10.2: utilizado para rodar rotinas de consistência topológica dos dados vetoriais e fechamento de polígonos.

2.1.1.1 Ortoimagens Orbitais

As ortoimagens orbitais estão classificadas em três grupos conforme a descrição a seguir:

- T0: imagens pré-desastre, relativas ao período de 21/01/2015 a 05/11/2015;
- T1: imagens pós-desastre, no período de 06/11/2015 e 08/01/2016;

- T2: imagens pós-desastre, relativas ao período de 05/02/2016 e 10/03/2016.

Estas ortoimagens estão referenciadas ao datum SIRGAS 2000 e ao sistema de projeção UTM, fusos 23 e 24 sul.

Para obtenção das imagens orbitais de alta resolução de toda a área de interesse, foram utilizados diferentes sensores com diferentes resoluções espaciais. Os mesmos estão apresentados nas Figura 1, Figura 2 e Figura 3.

Figura 1 – Articulação Ortoimagens Orbitais referente ao período pré-desastre (T0).

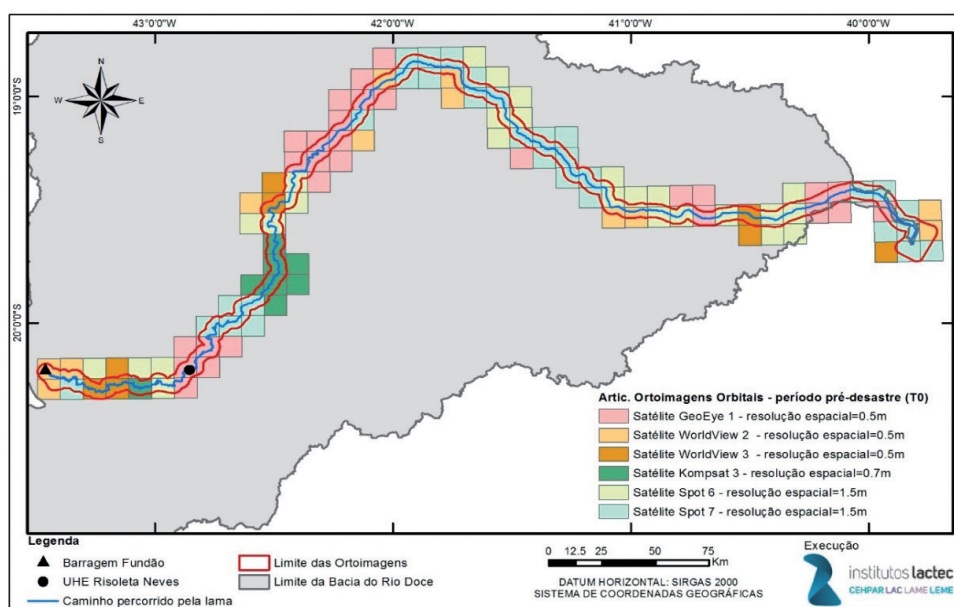


Figura 2 – Articulação Ortoimagens Orbitais referente ao período pós-desastre (T1).

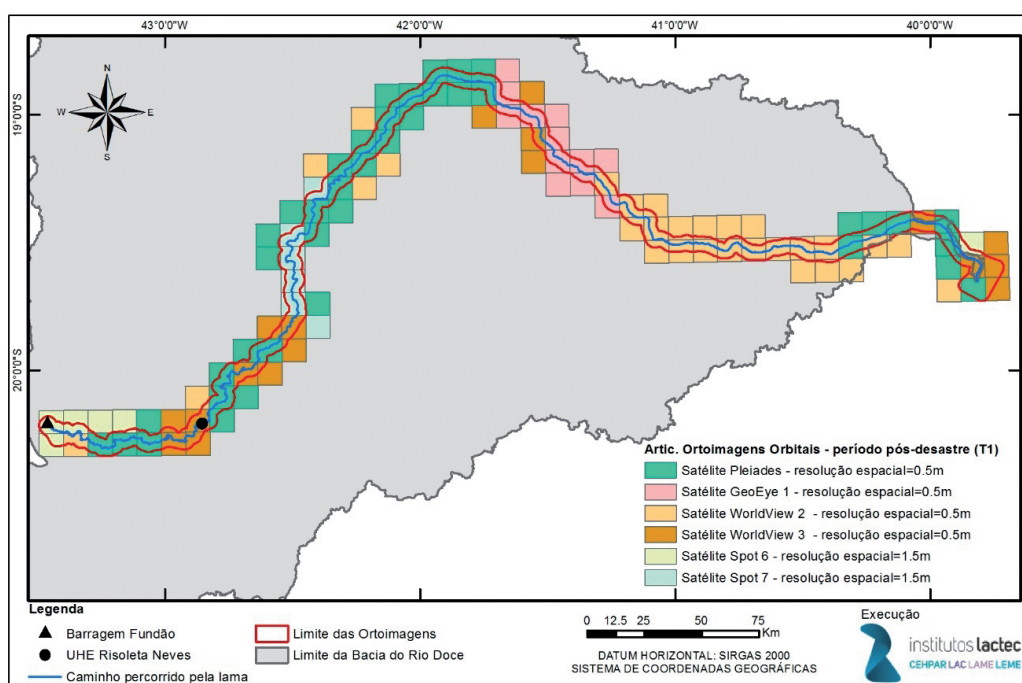
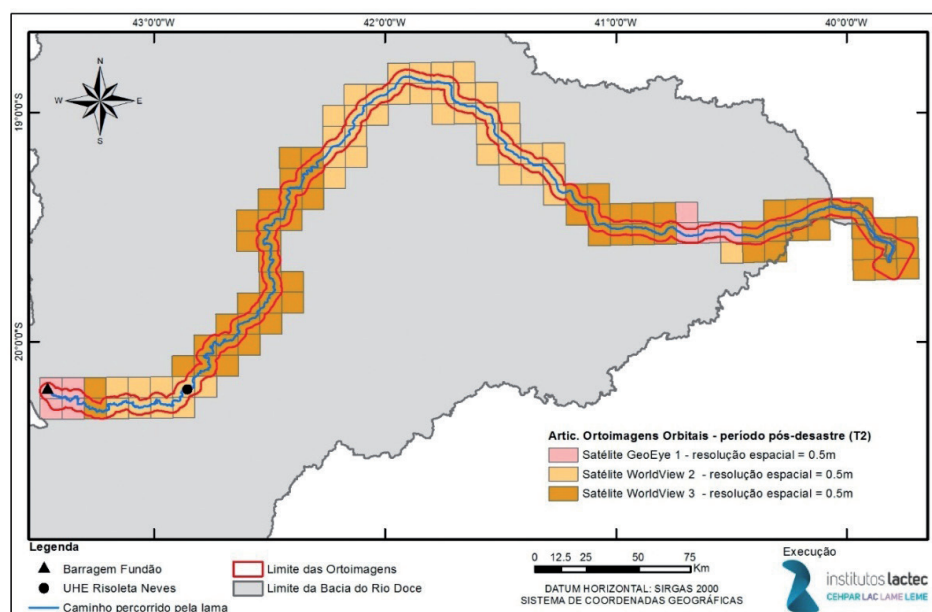


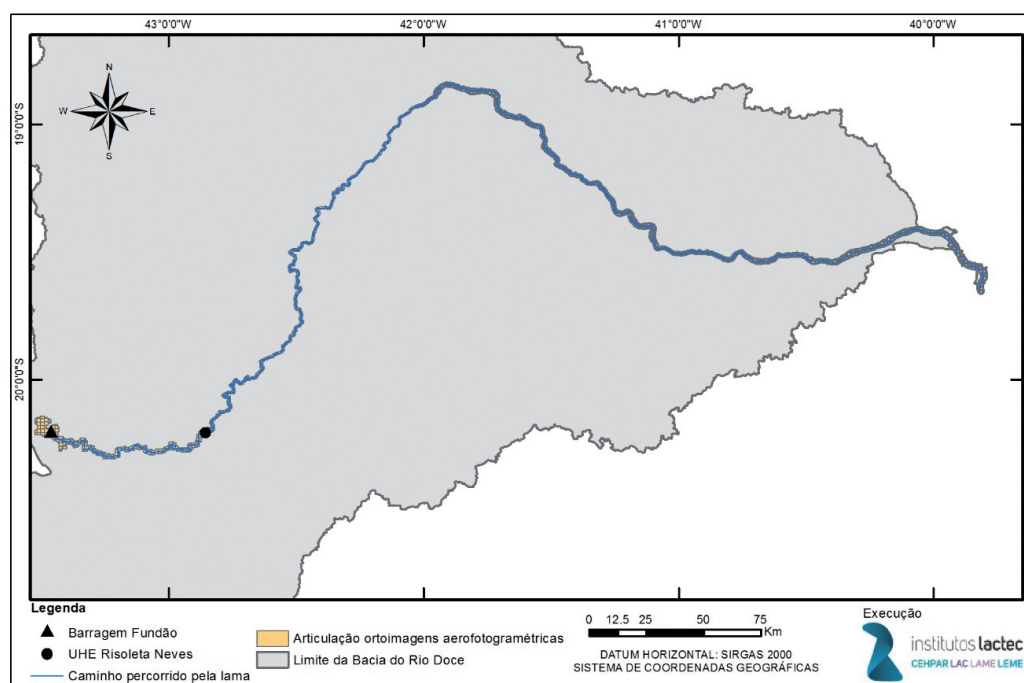
Figura 3 – Articulação Ortoimagens Orbitais referente ao período pós-desastre (T2).



Subsidiando o trabalho desenvolvido pelas equipes multidisciplinares, a análise temporal através de ortomagens permite estudar as condições do ambiente anteriores ao evento em questão, fornecendo elementos para a Linha Base, e posterior ao evento, contribuindo com informações importantes para o diagnóstico ambiental e avaliação de danos.

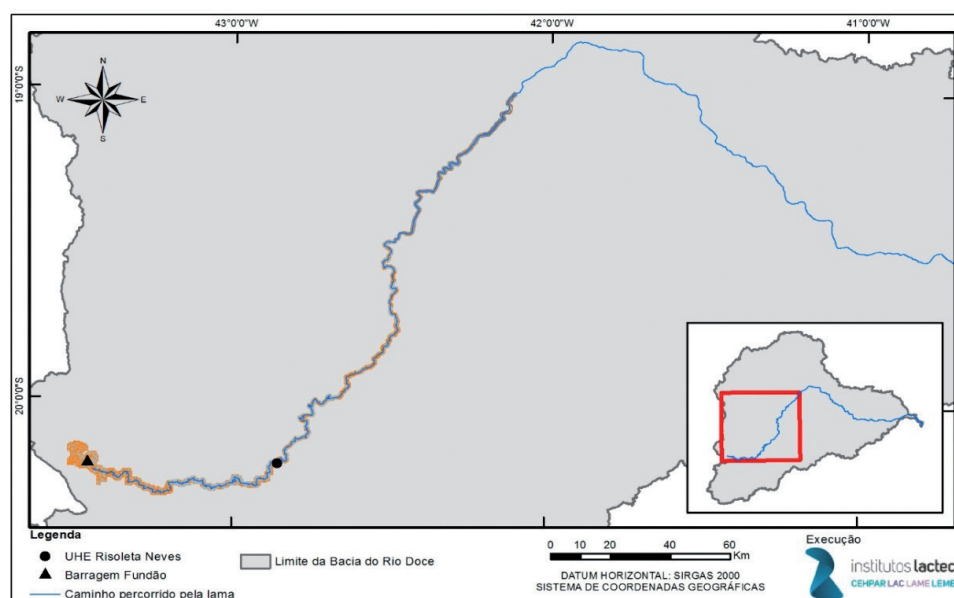
2.1.1.2 Ortoimagens Aerofotogramétricas

As ortomagens aerofotogramétricas disponibilizadas pela Fundação Renova, referem-se ao período pós-desastre e os aerolevantamentos ocorreram entre os dias 06/11/2015 a 29/11/2015. Estas ortomagens possuem resolução espacial de 5 cm (cinco centímetros) e precisões conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), classe A para a escala 1:1.000, bem como foi adotado o sistema de projeção UTM, fusos 23 e 24 sul e o datum SIRGAS 2000, quando da geração destes produtos. A área de abrangência destas ortomagens pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Articulação Ortoimagens Aerofotogramétricas.

2.1.1.3 Curvas de Nível

As curvas de nível disponibilizadas pela Fundação Renova possuem equidistância vertical de 1 m (um metro) e referem-se ao período pós-desastre. Na geração destes produtos foram adotados o sistema de projeção UTM, fuso 23 sul e o datum SIRGAS 2000, com referência altimétrica ao Marégrafo de Imbituba – SC. A área de abrangência destas curvas de nível pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 – Área de abrangência das curvas de nível.

2.1.2 METODOLOGIA

2.1.2.1 Validação geométrica das ortoimagens orbitais

As ortoimagens orbitais relativas aos períodos pré e pós-desastre (T0, T1 e T2), passaram por uma avaliação quanto a precisão e acurácia a fim de determinar a escala dos produtos cartográficos a serem obtidos a partir das mesmas. Concluiu-se que, todos os produtos cartográficos gerados por meio destes insumos deverão se limitar a escala 1:20.000. Com base na classificação do Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, da Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) e da escala definida (1:20.000), os produtos cartográficos apresentarão Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), classe A.

Tendo em vista a melhor escala e maior precisão das imagens aerofotogramétricas, foram obtidas coordenadas planimétricas de 70 pontos fotoidentificáveis nas mesmas. Tais pontos estavam bem distribuídos (Figura 6) ao longo de toda a área de estudo e tiveram como finalidade validar a geometria das ortoimagens orbitais. Os resultados de precisão e acurácia das ortoimagens orbitais são apresentados na Tabela 1 e nas Figura 7, Figura 8 e Figura 9.

Figura 6 – Distribuição dos Pontos utilizados na validação das ortoimagens orbitais.

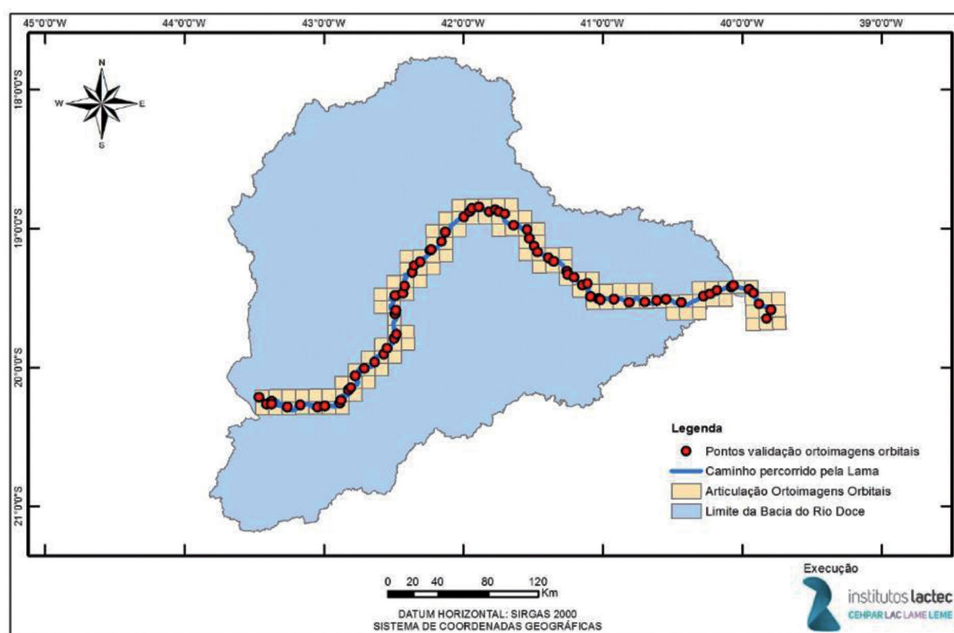


Tabela 1 – Resultado da precisão e acurácia das ortoimagens orbitais.

	Ortoimagens Orbitais Período Pré-Desastre (T0)			Ortoimagens Orbitais Período Pós-Desastre (T1)			Ortoimagens Orbitais Período Pós-Desastre (T2)		
	ΔE (m)	ΔN (m)	Discrepância	ΔE (m)	ΔN (m)	Discrepância	ΔE (m)	ΔN (m)	Discrepância
MÉDIA	1.13	1.23	1,67	0.20	-2.02	2,03	-0.40	0.11	0,42
DESVIO PADRÃO	3.53	3.51	4,98	5.47	4.54	7,12	4.16	2.45	4,83
REMQ	3.68	3.69	5,21	5.44	4.94	7,35	4.15	2.43	4,81
	TOTAL DE AMOSTRAS		70	TOTAL DE AMOSTRAS		68	TOTAL DE AMOSTRAS		67
	QUANT. AMOSTRAS EXTRAPOLAM LIMITE		3	QUANT. AMOSTRAS EXTRAPOLAM LIMITE		7	QUANT. AMOSTRAS EXTRAPOLAM LIMITE		2
	% DE AMOSTRAS OK (ESCALA 1:20.000)		96%	% DE AMOSTRAS OK (ESCALA 1:20.000)		90%	% DE AMOSTRAS OK (ESCALA 1:20.000)		97%

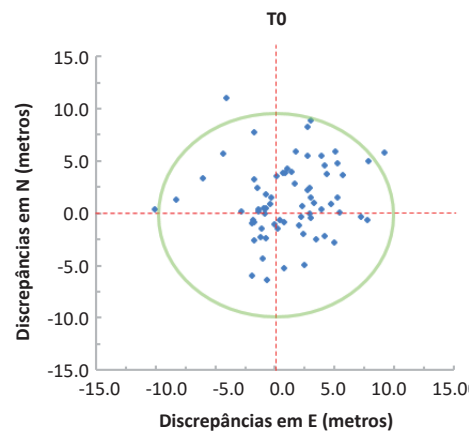
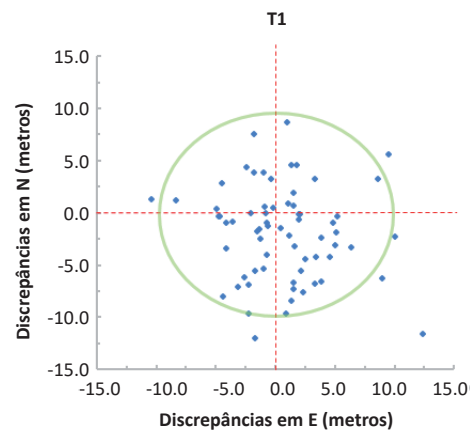
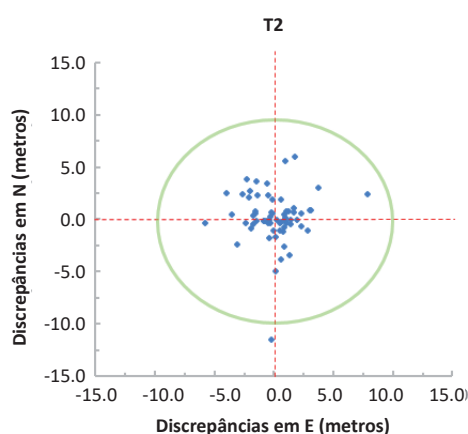
Figura 7 – Discrepâncias dos pontos avaliados, relativos as ortoimagens orbitais referentes ao período pré-desastre (T0).**Figura 8** – Discrepâncias dos pontos avaliados, relativos as ortoimagens orbitais referentes ao período pós-desastre (T1).

Figura 9 – Discrepâncias dos pontos avaliados, relativos as ortoimagens orbitais referentes ao período pós-desastre (T2).



2.1.2.2 Definição das classes

Para o mapeamento do uso e ocupação do solo foram definidas as seguintes classes: Afloramento Rochoso, Agricultura, Área construída, Área urbanizada, Banco de Areia, Campo e Pasto, Corpos d'água, Ilha, Linha da Praia, Mineração, Reflorestamento, Restinga, Solo Exposto e Vegetação Nativa.

Abaixo seguem descritas as classes mapeadas:

1) **Afloramento Rochoso**

São afloramentos de materiais rochosos ou mineral na superfície do solo.

2) **Agricultura**

As áreas agrícolas podem ser definidas como as áreas utilizadas para a produção de alimentos. Inclui nesta classe todas as terras cultivadas, caracterizadas pelo delineamento de áreas cultivadas ou em descanso. Pode se constituir em zonas agrícolas heterogêneas ou representar extensas áreas de plantações. Encontram-se inseridas nesta categoria as lavouras temporárias e lavouras permanentes (IBGE, 2006).

3) **Área construída**

Classe que engloba as áreas ocupadas por construções com dimensões maiores que a área mínima mapeável, normalmente usinas, diques, barragens, marinas, silos, grandes galpões, indústrias, pátios de manobras de sistemas de transportes, portos, aeroportos e demais estruturas de tamanhos consideráveis e isolados da mancha urbana.

4) **Área urbanizada**

Classe que compreende áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não agrícolas. Estão incluídas nesta categoria as metrópoles, cidades, vilas, áreas de rodovias, serviços e transporte, energia, comunicações e terrenos associados.

5) **Banco de Areia**

São áreas sem vegetação que acumularam sedimentos (areia ou cascalho) depositados no leito de um rio.

6) Campo e Pasto

Campo é uma formação campestre entremeada de plantas lenhosas de pequeno porte, mas sem cobertura arbórea. Pastagens são áreas destinadas ao pastoreio do gado, formadas mediante plantio de forragens perenes. Nessas áreas o solo está coberto por vegetação de gramíneas ou leguminosas, cuja altura pode variar de alguns decímetros a alguns metros.

7) Corps d'água

Áreas compostas por rios de margem dupla, lagos, lagoas, barragens, represas, canais naturais ou artificiais, tanques d'água, com área igual ou superior a 1 hectare ou 10.000m².

8) Ilha

Porção de terra firme situada no mar, lago ou rio, e cercada de água por todos os lados.

9) Linha da Praia

Classe de ambientes costeiros definidos pela faixa de areia sem vegetação, próxima ao oceano. Normalmente está localizada entre o limítrofe das áreas de restinga até o mar, porção de areia sem vegetação.

10) Mineração

Classe que inclui áreas sem vegetação, ocupada por atividades de mineração, exploração de jazidas, lavras, extração de areia, etc.

11) Reflorestamento

O IBGE (2006) classifica reflorestamento como plantio ou formação de maciços com espécies florestais nativas ou exóticas. Nessa definição não se considera se o plantio é realizado em áreas anteriormente povoadas com espécies florestais ou não, pois reflorestamento abrange todas as áreas povoadas com essências florestais, independentemente do ambiente. Os plantios podem ser homogêneos, heterogêneos ou consorciados. O plantio heterogêneo é utilizado para enriquecimento de florestas e na recuperação das florestas nas margens dos rios. O homogêneo refere-se a plantios puros, normalmente feitos com espécies exóticas, como Pinus e Eucalipto. O consorciado utiliza-se de espécies florestais entremeadas de espécies agrícolas de ciclo curto.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2013), O Brasil possui 7,2 milhões de hectares de florestas plantadas, principalmente com espécies dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, que representam 92,8% do total. Isso corresponde a 0,84% da área do país e 1,55% da área total de florestas. No Estado de Minas Gerais são cerca de 1.491.681 hectares distribuídos entre os dois gêneros.

Nas escalas regional e exploratória, com auxílio de imagens de satélites, é possível separar perfeitamente as áreas reflorestadas das florestas naturais e secundárias, mas é quase impossível afirmar qual é a espécie utilizada no reflorestamento, mesmo em se tratando de grupos bem diferentes, como, por exemplo: *Eucalyptus* e *Pinus*, ou mesmo Coniferales em geral. Contudo, nas escalas de semidetalhe e detalhe, com auxílio de fotografias aéreas convencionais, podem-se separar os tipos de reflorestamento (IBGE, 2012).

12) Restinga

De acordo com o Manual Técnico da Vegetação Brasileira (IBGE, 2012):

“As comunidades vegetais que recém-influência direta das águas do mar apresentam gêneros característicos das praias: *Remirea* e *Salicornia*. Seguem-se, em áreas mais altas, afetadas pelas marés equinociais, as conhecidas *Ipomea pes-caprae* (L.) R. Br e *Canavalia rosea* (Sw) DC., além dos gêneros *Paspalum* e *Hidrocotyle*. Outros gêneros associados ao plano mais alto das praias contribuem para caracterizar esta comunidade pioneira: *Acicarpa*, *Achyrocline*, *Polygala*, *Spartina*, *Vigna* e outros de menor importância caracterizadora”.

Áreas com vegetação sob influência marinha são consideradas como prioritárias para conservação da vegetação estuarina, abrangendo grande parte do litoral do Espírito Santo, como na Foz do Rio Doce, no município de Linhares, Conceição da Barra, Praia das Neves, Setiba, Guanandy e Anchieta. Saiter e colaboradores (2015) apresentam as seguintes espécies como indicadoras das formações pioneiras da foz do Rio Doce: *Abarema filamentosa*, *Aspidosperma pyricollum*, *Calyptanthus brasiliensis*, *C. hilariana*, *C. spiritu-sanctensis*, *Eugenia astringens*, *Leptolobium bijugum*, *Maytenus obtusifolia*, *Myrsine parvifolia*, *Ocotea cernua* e *Protium icariba*.

13) Solo Exposto

Áreas sem vegetação no qual o solo fica aparente podendo ocasionar processos erosivos.

14) Vegetação Nativa

A classe de vegetação nativa agrupou quatro diferentes tipos de formação vegetal, sendo elas: Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Ombrófila Densa, Vegetação Secundária Inicial, Campos Rupestres e Várzeas.

- Floresta Estacional Semidecidual

As Florestas Estacionais Semidecíduais constituem-se, geralmente, de indivíduos arbóreos perenifólios e decíduos, com até 30 m de altura, sem formar cobertura superior contínua. Também existem os elementos arbustivos, lianas e epífitas, sendo estas em menor quantidade, quando comparada às florestas ombrófilas (LEITE & KLEIN, 1990). A Floresta Estacional Semidecidual é um exemplo claro do processo de degradação e fragmentação de ecossistemas tropicais. Os poucos remanescentes preservados desta formação florestal são de grande valor ecológico e taxonômico, funcionando como uma coleção viva de espécies representantes da flora local e de sua diversidade genética, bem como banco de informações acerca da estrutura e funcionamento desse tipo de ecossistema (ORTEGA & ENGEL, 1992). São reconhecidas quatro formações pelo IBGE (2102): Aluvial, Terras Baixas, Submontana e Montana.

No presente estudo, o principal tipo de floresta estacional semidecidual que ocorre na área de investigação corresponde a submontana. A composição florística e a estrutura destas florestas diferem significativamente das demais formações florestais. Segundo pesquisas, esta diferença é em função dos gradientes térmicos associados às altitudes (OLIVEIRA-FILHO et al., 2005, SAITHER et al., 2015). SAITHER e colaboradores (2015) apresentam as espécies arbóreas indicadoras para tais florestas: *Carpotroche brasiliensis*, *Casearia guianensis*, *Gallesia integrifolia*, *Joannesia princeps*, *Machaerium incorruptibile*,

Machaerium pedicellatum, *Miconia calvescens*, *Pseudopiptadenia contorta* e *Sparattosperma leucanthum*.

Segundo o conceito de VELOSO et al. (1992), a fisionomia está relacionada ao clima com duas estações, uma chuvosa e outra seca, que condicionam uma caducifolia dos elementos arbóreos dominantes durante o período de estiagem. Considerando o conjunto florestal, a percentagem de árvores caducifólias está situada entre 20 e 50 %. A fitofisionomia tem sua distribuição desde o estado do Espírito Santo e sul do Estado da Bahia até os Estados do Rio de Janeiro, de Minas Gerais, de São Paulo, norte e sudoeste do estado do Paraná, sul de Mato Grosso do Sul, adentrando pelo sul de Goiás através do Rio Paranaíba, bem como nos estados de Mato Grosso e Rondônia. A floresta estacional semidecidual ocorre ainda no Centro-Oeste de forma disjunta e entremeada com formações savânicas (IBGE, 2012).

Essa formação se caracteriza por apresentar um dossel não perfeitamente contínuo (irregular), entre 15 e 20 m de altura, com presença de árvores emergentes de até 25-30 m de altura. Nesses estratos superiores pode ser observada a predominância de algumas famílias como Anacardiaceae, Malvaceae, Apocynaceae, Fabaceae, Lecythidaceae, Lauraceae e outras. Já no estrato superior, as condições de subdossel e sub-bosque são caracterizadas pela presença marcante das famílias Meliaceae, Rutaceae, Rubiaceae, Euphorbiaceae, Sapindaceae e Myrtaceae (IBGE, 2012).

- Floresta Ombrófila Densa

De acordo com a classificação do IBGE (2012), as florestas ombrófilas densas correspondem a:

“Este tipo de vegetação é caracterizado por fanerófitos - subformas de vida macro e meso-fanerófitos, além de lianas lenhosas e epífitas em abundância, que o diferenciam das outras classes de formações. Porém, sua característica ecológica principal reside nos ambientes ombrófilos que marcam muito a “região florística florestal”. Assim, a característica ombrotérmica da Floresta Ombrófila Densa está presa a fatores climáticos tropicais de elevadas temperaturas (médias de 25 °C) e de alta precipitação, bem-distribuída durante o ano (de 0 a 60 dias secos), o que determina uma situação bioecológica praticamente sem período biologicamente seco”.

A Floresta Ombrófila Densa está subdividida em formações que variam de Alto-Montana, Montana, Submontana, Terras Baixas e Aluvial conforme as variações altitudinais e de temperaturas. Na Bacia do Rio Doce, há somente as florestas ombrófilas densas das terras baixas situadas na faixa litorânea (50 a 200 m de altitude; IBGE, 2012).

As Florestas Ombrófilas Densas da faixa litorânea ocorrem em planícies costeiras, ocupadas por tabuleiros pliopleistocênicos do Grupo Barreiras, localizadas desde a Amazônia passando por toda região do nordeste até o estado do Rio de Janeiro (IBGE, 2012). São reconhecidas, por diversos autores, como Mata Atlântica propriamente dita, onde a vegetação é mais exuberante e concentra-se o maior número de táxons endêmicos.

No presente estudo, foi dada uma ênfase diferenciada à floresta de tabuleiros, que a princípio estava inserida como Floresta Ombrófila Densa de Terras Baixas, conforme o sistema

de classificação apresentado por VELOSO et al. (1991), mas diferentes autores estão classificando como Floresta Estacional Semidecídua de Terras Baixas.

Cabe destacar que a classificação “floresta de tabuleiro” não faz parte do sistema Fisiológico adotado por IBGE (2012). O termo tabuleiro refere-se a uma unidade geomorfológica de relevo, assim como as chapadas ou as depressões. De acordo com o Manual Técnico de Geomorfologia (IBGE, 2009):

“Tabuleiros e chapadas são conjuntos de formas de relevo de topo plano, elaboradas em rochas sedimentares, em geral limitadas por escarpas; os tabuleiros apresentam altitudes relativamente baixas, enquanto as chapadas situam-se em altitudes mais elevadas.” (IBGE, 2009).

As florestas sobre os tabuleiros caracterizam-se por uma vegetação densa, com árvores de altura média acima de 30m. A flora, rica e diversificada, apresenta várias espécies arbóreas endêmicas. Algumas de suas formações destacam-se por apresentar indivíduos de maior porte e sombreamento mais intenso do sub-bosque, que é ralo e facilmente penetrável, tendo como característica sua semelhança fisionômica e florística com a floresta amazônica (PEIXOTO et al., 1995; AMORIM, 1984). Segundo uma análise da composição da flora realizada por Rolim et al. (2006) que contou com a identificação de mais de 408 espécies em uma planície aluvial do Rio Doce, as famílias mais ricas foram Leguminosae, Myrtaceae, Sapotaceae, Lauraceae. Saiter e colaboradores (2015) apresentam as seguintes espécies arbóreas como indicadoras das matas de tabuleiro: *Amphirrhex longifolia*, *Annona acutiflora*, *Aspidosperma camporum*, *Aspidosperma discolor*, *Byrsonima cacaophila*, *Campomanesia espiritosantensis*, *Couepia carautae*, *Couepia schottii*, *Diplotropis incaxis*, *Eugenia copacabanensis*, *Exellodendron gracile*, *Exostyles venusta*, *Glycydendron espiritosantense*, *Guazuma crinita*, *Henriettea succosa*, *Hirtella bahiensis*, *Inga tripa*, *Licania salzmännii*, *Manilkara salzmännii*, *Marlierea strigipes*, *Marlierea suaveolens*, *Maytenus samydaeformis*, *Miconia mirabilis*, *Micropholis guyanensis*, *Myrcia isaiana*, *Neomitranthes obtusa*, *Ocotea aniboides*, *Ocotea confertiflora*, *Ormosia nitida*, *Parkia pendula*, *Pilocarpus grandiflorus*, *Plinia stictophylla*, *Pouteria bapeba*, *Simira grazielae*, *Tabernaemontana salzmännii*, *Tovomita brevistaminea* e *Xylopia ochrantha*. Este autores tomaram com base o levantamento florístico em três áreas de mata de tabuleiro, situadas no município de Linhares, Floresta Nacional dos Goytacazes e em Sooretama.

- Vegetação Secundária Inicial

De acordo com a resolução nº 392 do CONAMA, o estágio inicial de regeneração natural é definido por:

- 1) Ausência de estratificação definida;
- 2) Predominância de indivíduos jovens de espécies arbóreas, arbustivas e cipós, formando um adensamento (paliteiro) de até 5m de altura;
- 3) Espécies lenhosas com distribuição diamétrica de pequena amplitude com DAP médio de até 10 centímetros;

- 4) Espécies pioneiras abundantes;
 - 5) Dominância de poucas espécies indicadoras;
 - 6) Epífitas, se existentes, são representadas principalmente por líquens, briófitas e pteridófitas com baixa diversidade;
 - 7) Serrapilheira, quando existente, forma uma fina camada, pouco decomposta, contínua ou não;
 - 8) Trepadeiras, se presentes, geralmente herbáceas;
 - 9) Espécies indicadoras: Árbóreas *Cecropia spp.* (embaúba), *Vismia spp.* (ruão), *Solanum granulosoleprosum*, *Piptadenia gonoacantha*, *Mabea fistulifera*, *Trema micrantha*, *Lithrae molleoides*, *Schinus terebinthifolius*, *Guazuma ulmifolia*, *Xilopia sericea*, *Miconia spp.*, *Tibouchina spp.*, *Croton florinbundus*, *Acacia spp.*, *Anadenanthera colubrina*, *Acrocomia aculeata*, *Luehea spp.* Arbustivas - *Celtis iguanaea* (esporão-de-galo), *Aloysia virgata* (lixinha), *Baccharis spp.*, *Vernonanthura spp.* (assapeixe, cambará), *Cassia spp.*, *Senna spp.*, *Lantana spp.* (camará), *Pteridium arachnoideum* (samambaião). Cipós - *Banisteriopsis spp.*, *Heteropteris spp.*, *Mascagnia spp.*, *Peixotoa spp.*, *Machaerium spp.*, *Smilax spp.*, *Acacia spp.*, *Bauhinia spp.*, *Cissus spp.*, *Dasyphyllum spp.*, *Serjania spp.*, *Paulinia spp.*, *Macfadyenia spp.*, *Arrabidaea spp.*, *Pyrostegia venusta*, *Bignonia spp.*
- Refúgios vegetacionais

De acordo com a classificação do IBGE (2012), os refúgios vegetacionais correspondem a:

“Toda e qualquer vegetação diferenciada nos aspectos florístico e fisionômico- ecológico da flora dominante na região fitoecológica foi considerada como um “refúgio ecológico”. Este, muitas vezes, constitui uma “vegetação relíquia”, com espécies endêmicas, que persiste em situações especialíssimas...”.

...

“Os refúgios ecológicos, condicionados por parâmetros ambientais muito específicos, apresentam, via de regra, alta sensibilidade a qualquer tipo de intervenção. Áreas turfosas, em diferentes altitudes e os cumes litólicos das serras, normalmente, suportam relictos vegetacionais.” (IBGE, 2012).

Em locais restritos, onde afloram as rochas - principalmente os quartzitos e formações ferríferas/cangas - do Domínio das Sequências Vulcanossedimentares Proterozóicas dobradas e as metamorfizadas do Domínio dos Complexos Granito-gnaiss (CPRM, 2010), ocorre um tipo vegetacional caracterizado pelo elevado índice de espécies endêmicas e ameaçadas de extinção (CARMO & JACOBI, 2016). Esse tipo vegetacional, quando desenvolvido sobre os quartzitos é conhecido como campos rupestres. Quando desenvolve sobre as formações ferríferas/cangas, denomina-se campos ferruginosos ou campos rupestres ferruginosos. Os campos de altitude identificam as vegetações sobre os granitos das Serras do Mar e da Mantiqueira e a vegetação sobre *inselbergs* as comunidades que ocorrem associadas aos grandes monólitos “pães-de-açúcar” inseridos geralmente em relevos de superfícies aplainadas (Porembski & Barthlott, 2000; Scarano, 2007; Vasconcelos, 2011; Carmo & Jacobi, 2013).

Na área de estudo os refúgios vegetacionais foram os campos rupestres localizados próximo ao Distrito Bento Rodrigues.

- Várzeas (Vegetação com influência fluvial)

A lei 12.651/12 (Código Florestal Brasileiro) define várzea como:

“Áreas marginais a cursos d’água sujeitas a enchentes e inundações periódicas.”

Trata-se de comunidades vegetais das planícies aluviais que refletem os efeitos das cheias dos rios nas épocas chuvosas, ou então, das depressões alagáveis todos os anos (IBGE, 2012).

Segundo classificação proposta por Rodrigues & Filho (2000) formações ribeirinhas com influência fluvial permanente são aquelas cujas características vegetacionais apesar de estarem claramente relacionadas com a região fitoecológica, apresentam particularidades em função de estarem sobre solo permanentemente encharcado, com água superficial geralmente em movimento. Já as formações ribeirinhas com influência fluvial sazonal são aquelas diretamente influenciadas pela água, mas de forma claramente sazonal, sendo que a influência da água pode ser através da elevação do rio ou do lençol freático, proporcionando, por exemplo, o soterramento ou retirada da serapilheira e do banco de sementes do solo nos terraços fluviais, formação dos lagos sazonais nos trechos de embaçamento, etc.

2.1.2.3 Características do mapeamento de uso e ocupação do solo

Para o mapeamento de uso e ocupação do solo, referente ao período pré-desastre (T0), e delimitação da APDL, adotou-se a técnica de vetorização digital através da fotointerpretação das ortomagens orbitais descritas no item 2.1.1.1 deste relatório. O processo de fotointerpretação, análise e delimitação das feições foi realizado em tela, na escala aproximada de 1:8.000, com objetivo de obter produtos compatíveis com a escala de mapeamento 1:20.000.

Adotou-se como SGR (Sistema Geodésico de Referência) o SIRGAS2000 e projeção cartográfica UTM (Universal Transversa de Mercator) para os fusos 23 e 24 sul. A área mínima mapeada correspondeu a 1 (um) hectare.

2.2 RESULTADOS

2.2.1 MAPEAMENTO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA O PERÍODO PRÉ-DESASTRE (T0)

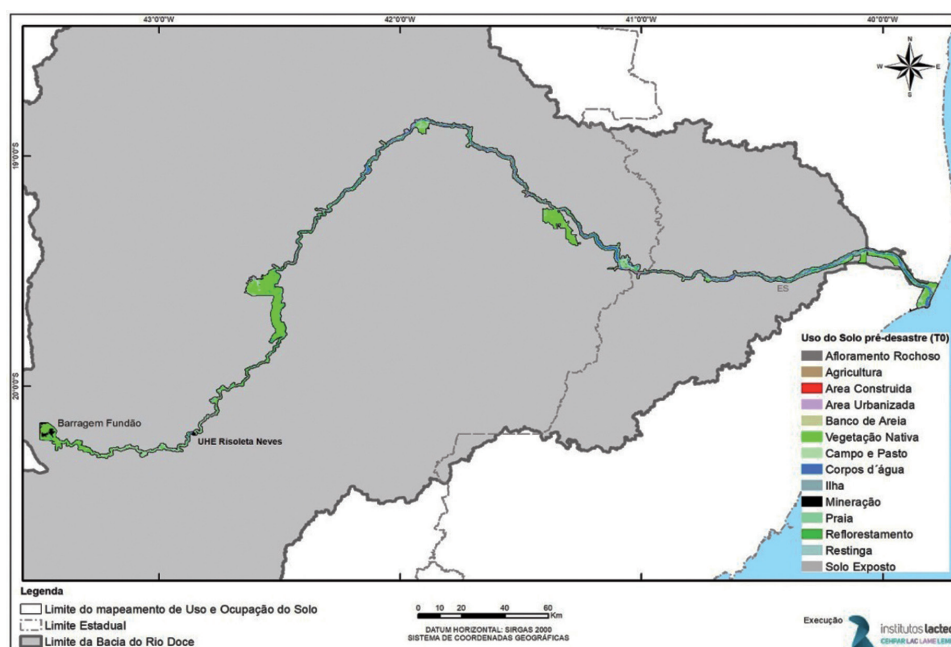
Com base nas imagens orbitais (T0) descritas no item 2.1.1.1, foi realizado o mapeamento quanto ao uso e ocupação do solo para o período pré-desastre, o qual compreende a área descrita no item 2.1, totalizando 146.029,98 ha.

Na Tabela 2 seguem apresentadas as áreas em ha (hectares) de cada classe mapeada no uso e ocupação do solo do período pré-desastre (T0), e a Figura 10 apresenta a área referente a este mapeamento.

Tabela 2 – Classes referentes ao mapeamento de uso e ocupação do solo para o período pré-desastre (T0).

Classes referente ao Mapeamento de uso e ocupação do Solo (T0)	Área (ha)	% área do Uso e Ocupação do Solo
Afloramento Rochoso	565,29	0,39
Agricultura	5.951,86	4,08
Área Construída	626,89	0,43
Área Urbanizada	4.397,57	3,01
Banco de Areia	2.496,92	1,71
Campo e Pasto	32.766,13	22,44
Corpos d'água	22.881,61	15,67
Ilha	4.765,95	3,26
Vegetação Nativa	63.011,34	43,15
Mineração	1.577,63	1,08
Praia	164,95	0,11
Reflorestamento	4.715,34	3,23
Restinga	782,04	0,54
Solo Exposto	1.326,45	0,91
TOTAL	146.029,98	100,00

Figura 10 – Uso e ocupação do solo referente ao período pré-desastre (T0).

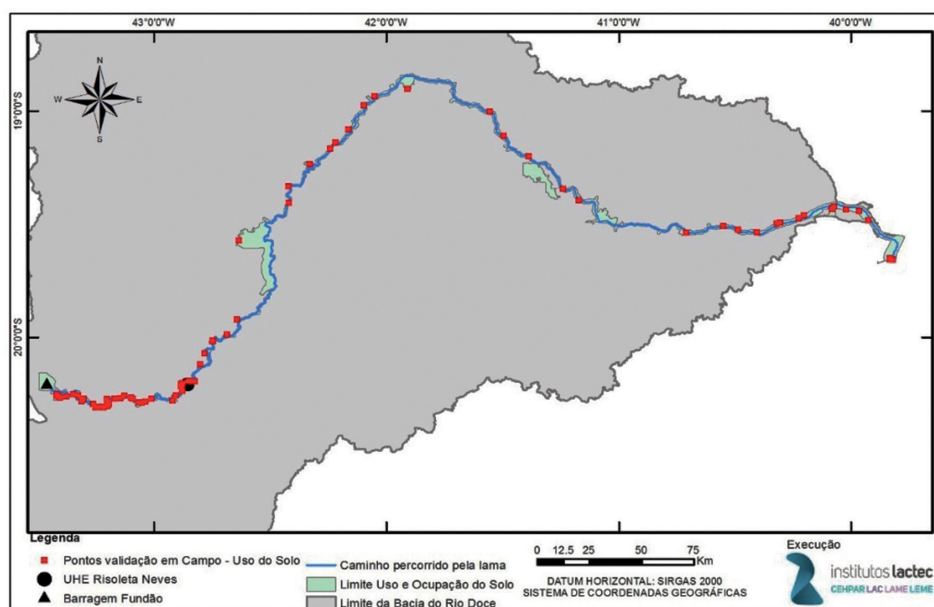


2.2.2 VALIDAÇÃO E AVALIAÇÃO DO MAPEAMENTO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO PARA O PERÍODO PRÉ-DESASTRE (T0)

Como forma de avaliar a qualidade e confiabilidade do mapeamento de uso e ocupação do solo para o período pré-desastre (T0), foram levantados e validados em campo 82 pontos amostrais ao longo de todo o trecho mapeado.

A distribuição espacial dos pontos validados em campo segue apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Distribuição dos pontos de validação em campo do mapeamento de uso e ocupação do solo referente ao período pré-desastre (T0).



Abaixo são apresentadas as Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17, Figura 18 com algumas fotos tomadas durante os trabalhos de validação do mapeamento de uso e classificação do solo em campo.

Figura 12 – Validação em campo em área de Agricultura.



Figura 13 – Validação em campo em área de Campo e Pasto.



Figura 14 – Validação em campo em área de Solo Exposto.



Figura 15 – Validação em campo em área de Reflorestamento.



Figura 16 – Validação em campo em área de Vegetação Nativa.



Figura 17 – Validação em campo em área de Vegetação Nativa.



Figura 18 – Validação em campo em área de Vegetação Nativa.



A fim de avaliar a qualidade do mapeamento de uso e ocupação do solo foi obtida uma matriz de confusão a partir das amostras levantadas em campo. Essa matriz tem por finalidade detalhar a qualidade da classificação apresentando as classes que possuem maior correlação entre si.

Segundo ANTUNES e LINGNAU (1997, apud SPIEGEL, 1993) a matriz de erros ou confusão apresenta de forma resumida os resultados da classificação digital ou fotointerpretação em relação à imagem referência, onde tem-se então uma distribuição binomial. Cada frequência observada na matriz corresponderá também a uma frequência esperada, a qual é calculada sob uma determinada hipótese de acordo com as regras da probabilidade.

A frequência observada na diagonal (Xii) apresenta a concordância entre o esperado e observado em cada categoria, ou seja, aqueles corretamente classificados. A coluna marginal é o número total de elementos de imagem para cada classe (Xi+). A linha marginal o número de pontos atribuídos a cada classe (X+i).

O resultado da classificação da imagem com a verdade de campo está expresso na matriz de confusão apresentada a seguir (Tabela 3).

Tabela 3 – Matriz de confusão para a classificação da imagem e a validação de campo.

VALIDAÇÃO DE CAMPO												
CLASSIFICAÇÃO DA IMAGEM												
	Afloramento rochoso	Agricultura	Área construída	Área urbanizada	Campo e pasto	Faixa de Praia	Ilha	Reflorestamento	Restinga	Solo Exposto	Vegetação nativa	TOTAL
Afloramento rochoso	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Agricultura	0	2	0	0	0	0	0	2	0	0	0	4
Área construída	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Área urbanizada	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	3
Campo e pasto	0	6	0	0	19	0	0	0	0	1	5	31
Faixa de Praia	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Ilha	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Reflorestamento	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1	4
Restinga	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Solo Exposto	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3
Vegetação nativa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	31
Total	1	9	3	2	19	1	1	5	1	2	38	82

Com base na matriz de confusão da Tabela 3, foi possível calcular os valores de exatidão e do índice Kappa conforme seguem apresentados na Tabela 4. Segundo ROVEDDER (2007, apud CONGALTON e GREEN, 1999), o coeficiente Kappa (k) é baseado na diferença entre concordância observada (diagonal principal da matriz de confusão com a concordância entre a classificação da imagem e os dados de validação de campo) e a chance de concordância entre os dados de referência e uma classificação aleatória (produto entre os totais marginais da matriz).

Tabela 4 – Cálculo dos valores de exatidão e do índice Kappa.

Kappa (k)	0,68
Exatidão Global (G)	0,77

Para a avaliação do índice Kappa foi adotada a Tabela 5, adaptada de LANDIS e KOCH (1977).

Tabela 5 – Qualidade de classificação segundo intervalos do coeficiente de concordância Kappa.

Valor do Kappa	Qualidade da Classificação
<0	Péssimo
0,00 - 0,20	Ruim
0,20 - 0,40	Razoável
0,40 - 0,60	Boa
0,60 - 0,80	Muito Boa
0,80 - 1,00	Excelente

Fonte: adaptado de LANDIS e KOCH (1977).

2.2.3 MAPEAMENTO DA ÁREA DE PASSAGEM E DEPOSIÇÃO DA LAMA - APDL

Para a delimitação da área de passagem e deposição da lama - APDL, optou-se por utilizar as ortoimagens orbitais referentes ao período pós-desastre (T2). A justificativa se dá pelo fato das mesmas terem apresentado melhor qualidade geométrica quando comparadas às ortoimagens (T1), conforme os resultados apresentados no item 2.1.2.1 deste relatório. A fim de se esclarecer dúvidas na fase de fotorinterpretação, quando se julgou necessário, foram utilizados os materiais abaixo relacionados como apoio:

- ortoimagens (T1) descritas no item 2.1.1.1;
- ortoimagens aerofotogramétricas descritas no item 2.1.1.2, e;
- curvas de nível descritas no item 2.1.1.3.

A APDL corresponde a 2.247,06 ha e envolve o trecho desde a barragem de Fundão no município de Mariana até a UHE Risoleta Neves (Candonga), no município de Rio Doce, conforme pode-se observar na Figura 19. Para melhor visualização, são apresentados mais detalhes nas Figura 20 à Figura 25.

Faz-se apenas a ressalva que o polígono da APDL foi obtido a partir de ortoimagens orbitais e, por consequência, áreas afetadas, porém não visíveis nessas imagens como, por exemplo, áreas de floresta estabelecida, eventualmente podem não terem sido delimitadas.

Figura 19 – Área de passagem e deposição da lama- APDL.

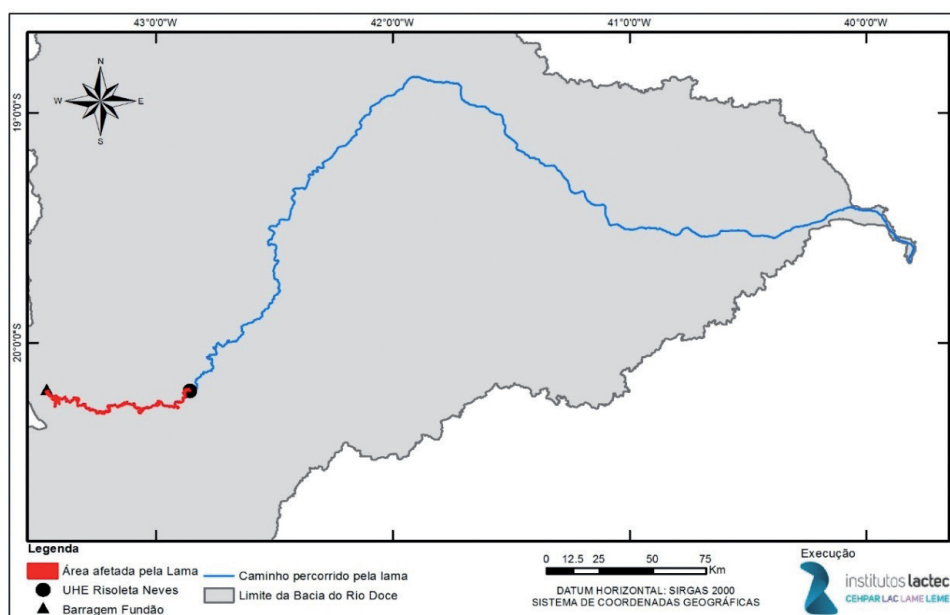


Figura 20 – Articulação detalhamento da APDL.

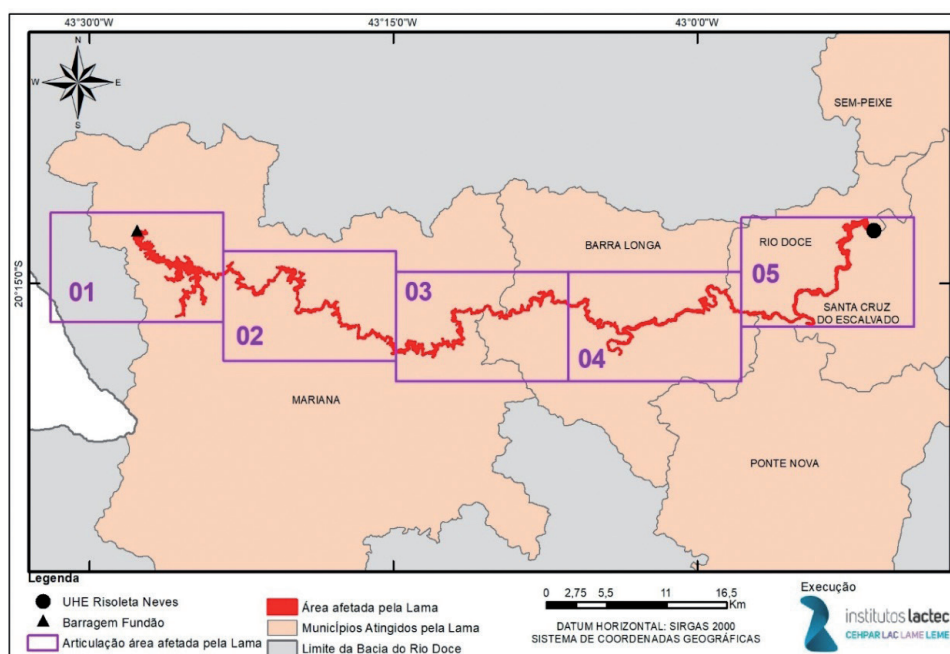


Figura 21 – Detalhe 1- APDL.

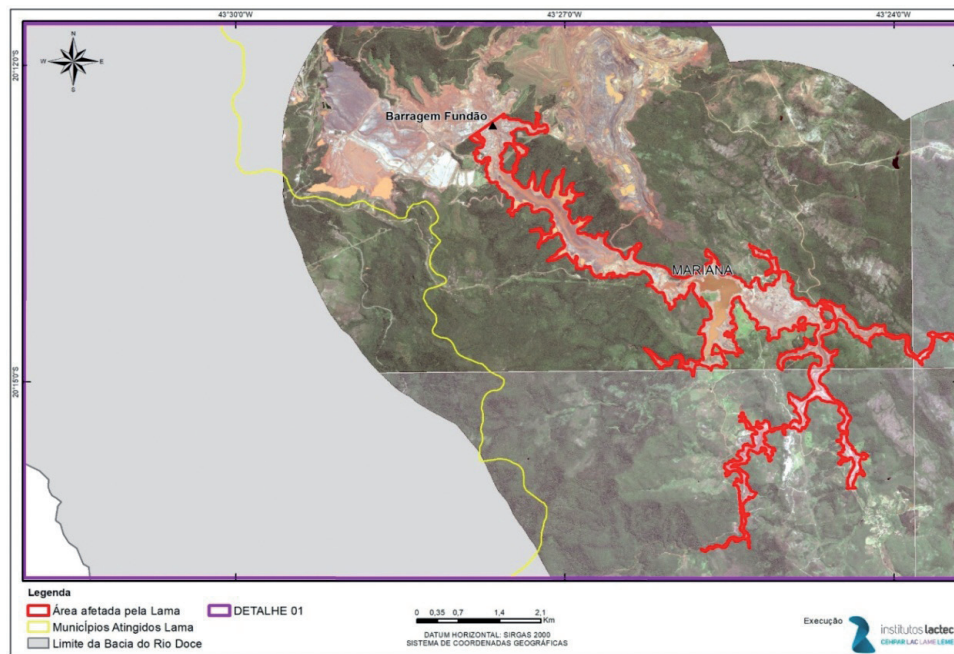


Figura 22 – Detalhe 2- APDL.

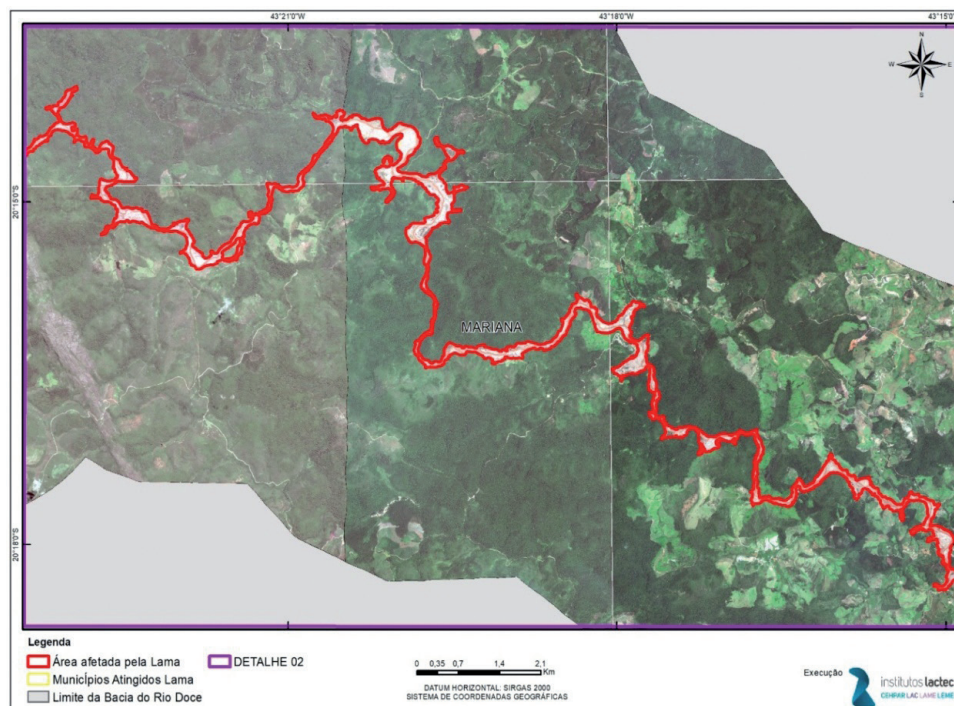


Figura 23 – Detalhe 3- APDL.

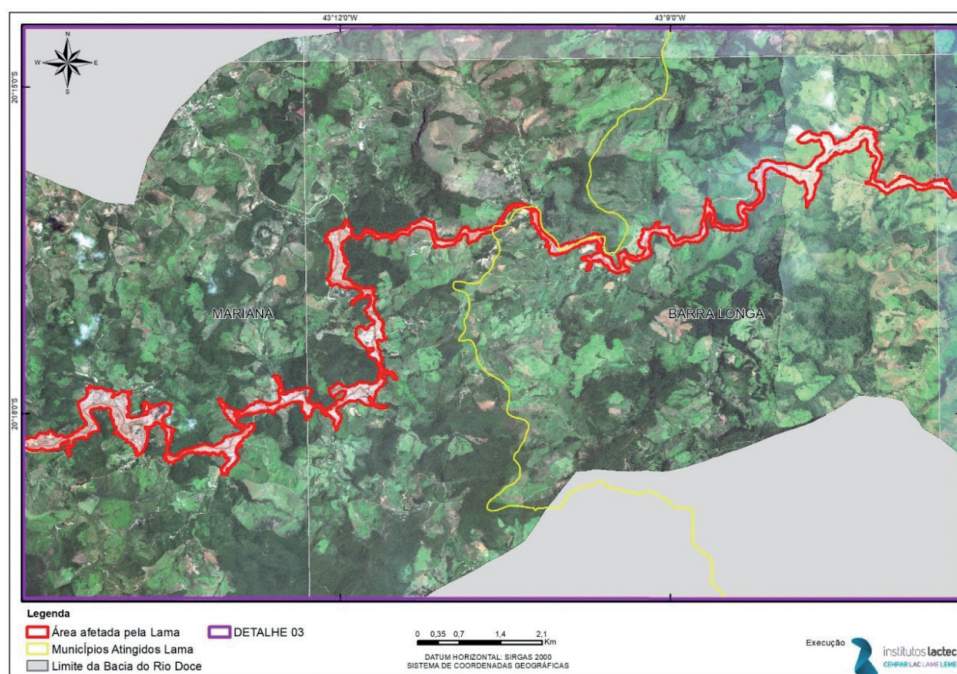


Figura 24 – Detalhe 4- APDL.

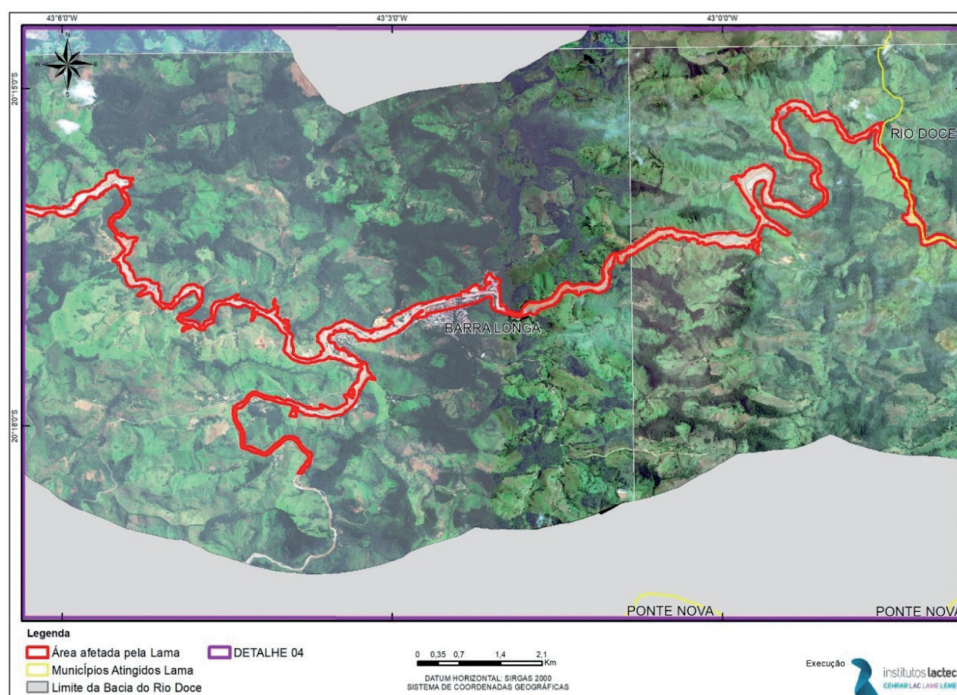
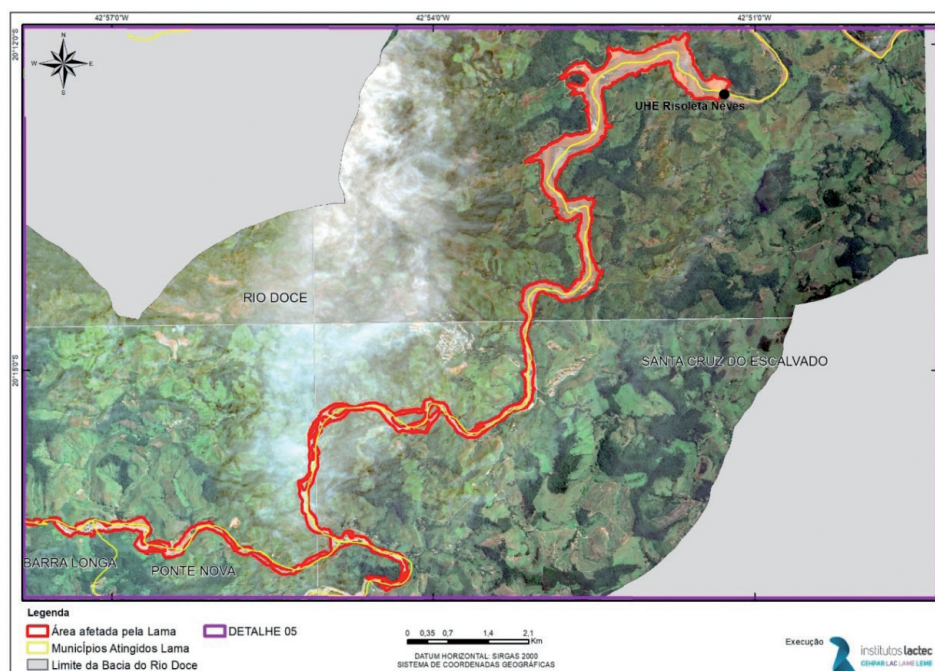


Figura 25 – Detalhe 5- APDL.



Na Tabela 6, além dos valores obtidos pelos Institutos Lactec, seguem apresentados os valores referentes a outros três estudos realizados, que também tiveram como objetivo a determinação da área de passagem e deposição da lama em virtude do rompimento da Barragem de Fundão.

Tabela 6 – Comparação entre os estudos realizados com o objetivo de determinar a área de passagem e deposição da lama - APDL.

Empresa	Área total do polígono da APDL (ha)	APDL (ha), descontando os Corpos Hídricos	Área de perda de vegetação nativa
INSTITUTOS LACTEC	2.247,06	1.551,28	754,14
IBAMA	1.656,16	1.469,16	Não informou
COPPETEC	1.839,50	1.176,60	457,60
GOLDER	2.185,00	1.644,00	Ver Figura 26.

Figura 26 – Uso do solo afetado.

Categoria de uso do solo	Área afetada (ha)
Área alagada/brejo	115
Área antropizada	37
Área urbana	66
Bando de areia	35
Campo ruprestre	45
Cultura de eucalipto	55
Cultura de eucalipto recém-colhida	3
Floresta	565
Floresta misturada com eucalipto	12
Lago	52
Mosaico de florestas degradadas/ em regeneração/ pasto sujo	20
Pastagem/cultivo	456
Reservatório	75
Rio	105
TOTAL	1.644

Fonte – Golder Associates – Relatório Técnico número RT-023_159-515-2282_00-J
- Avaliação dos impactos no meio físico resultantes do rompimento da Barragem de Fundão.

As diferenças observadas na Tabela 6 se devem as metodologias e escalas de mapeamento utilizadas por cada empresa, conforme os relatórios abaixo:

- COPPETEC FUNDAÇÃO – Relatório Técnico número COPPE-20275 - Avaliação dos impactos da ruptura da Barragem de rejeitos de Fundão em Mariana nove meses após o desastre. Capítulo 5 - Avaliação dos Danos Ambientais Decorrentes do Rompimento das Barragens ao Longo da Bacia do Rio Doce e Zona Costeira Adjacente – Biodiversidade;
- IBAMA – Nota Técnica 02001.002155/2015-91 CSR/IBAMA, disponível no Laudo Técnico Preliminar - Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais;
- Golder Associates – Relatório Técnico número RT-023_159-515-2282_00-J - Avaliação dos impactos no meio físico resultantes do rompimento da Barragem de Fundão.

Além dos valores apresentados na Tabela 6, existem estudos similares elaborados pelo Consórcio: INPE, Arcplan e Fundação SOS Mata Atlântica e pela SEMAD/IEF, no entanto não tivemos acesso a estes relatórios.

2.2.4 DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DAS CLASSES MAPEADAS AFETADAS PELA APDL

A partir dos dados de uso e ocupação do solo do período pré-desastre (T0) e dos limites da APDL, foi realizado o geoprocessamento dessas informações a fim de quantificar as áreas por classes afetadas pela área de passagem e deposição da lama.

Na Tabela 7 seguem apresentadas as classes atingidas pela APDL com suas respectivas áreas calculadas. A Figura 27, bem como os detalhes das Figura 28 a Figura 32 mostram o resultado da análise geoespacial entre o polígono da APDL e o mapeamento de uso e ocupação do solo.

Tabela 7 – Classes afetadas pela APDL.

Classe afetada pela APDL	Área (ha)	% da área afetada pela APDL
Afloramento Rochoso	16,39	0,73
Área Construída	3,12	0,14
Área Urbanizada	39,46	1,76
Banco de Areia	35,81	1,59
Campo e Pasto	664,58	29,58
Corpos d'água	695,78	30,96
Ilha	6,29	0,28
Vegetação nativa	754,14	33,56
Mineração	9,34	0,42
Reflorestamento	11,27	0,50
Solo Exposto	10,88	0,48
TOTAL	2.247,06	100,00

Figura 27 – Área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.

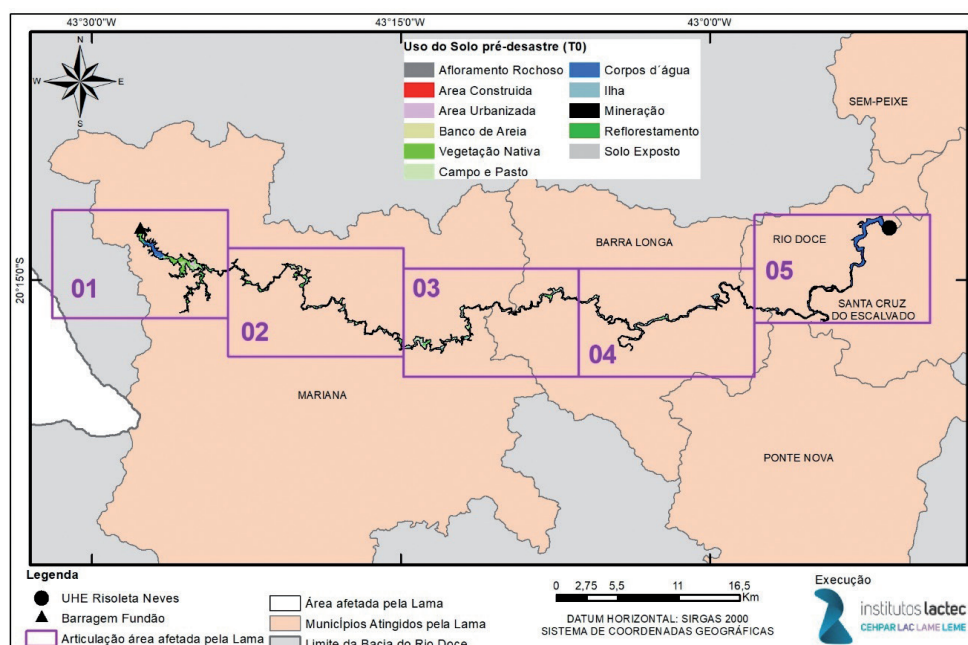


Figura 28 – Detalhe 01- área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.

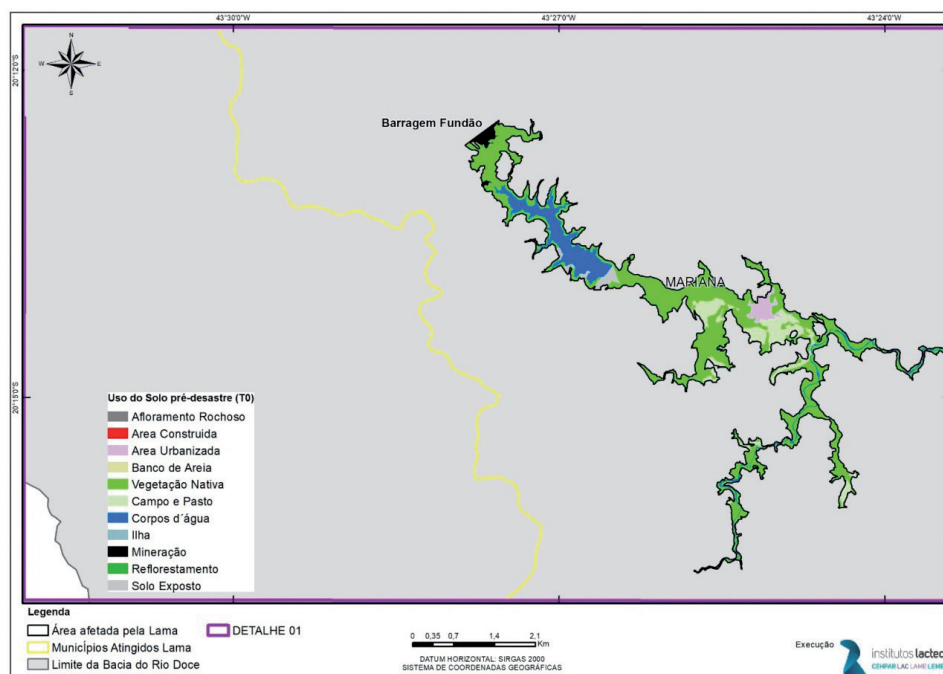


Figura 29 – Detalhe 02- área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.

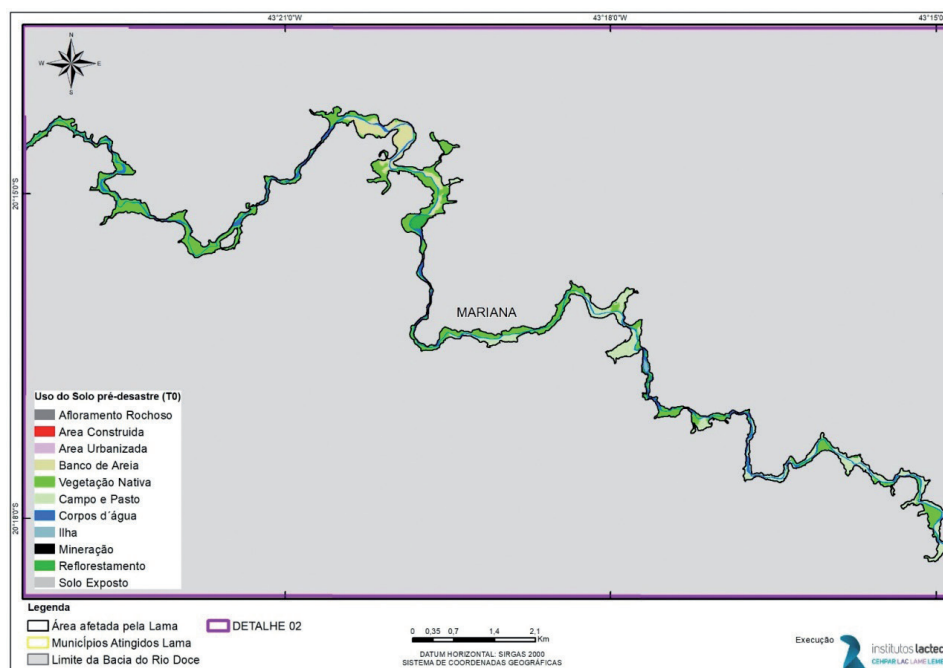


Figura 30 – Detalhe 03- área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.

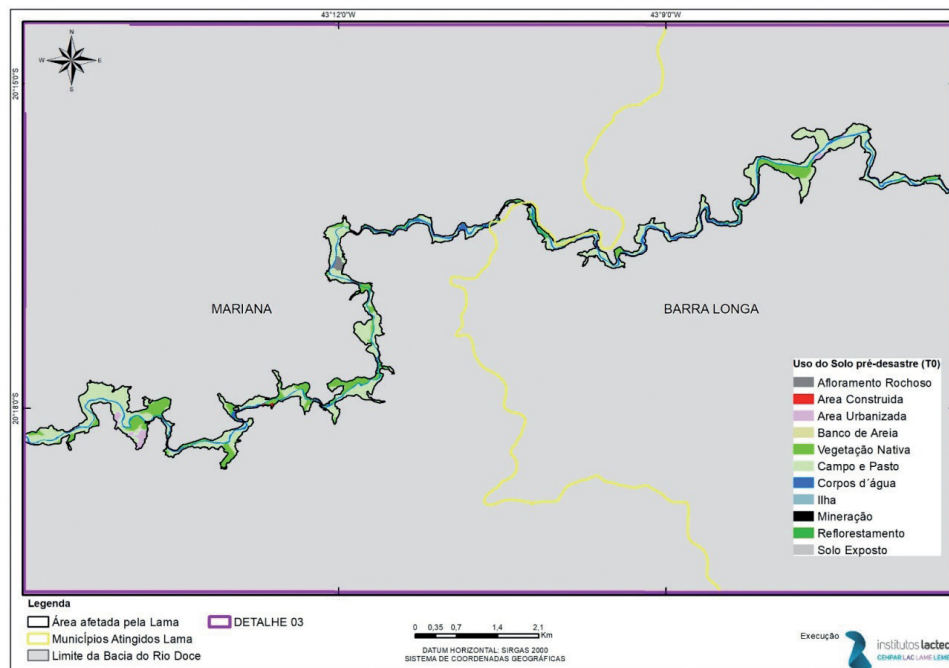


Figura 31 – Detalhe 04- área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.

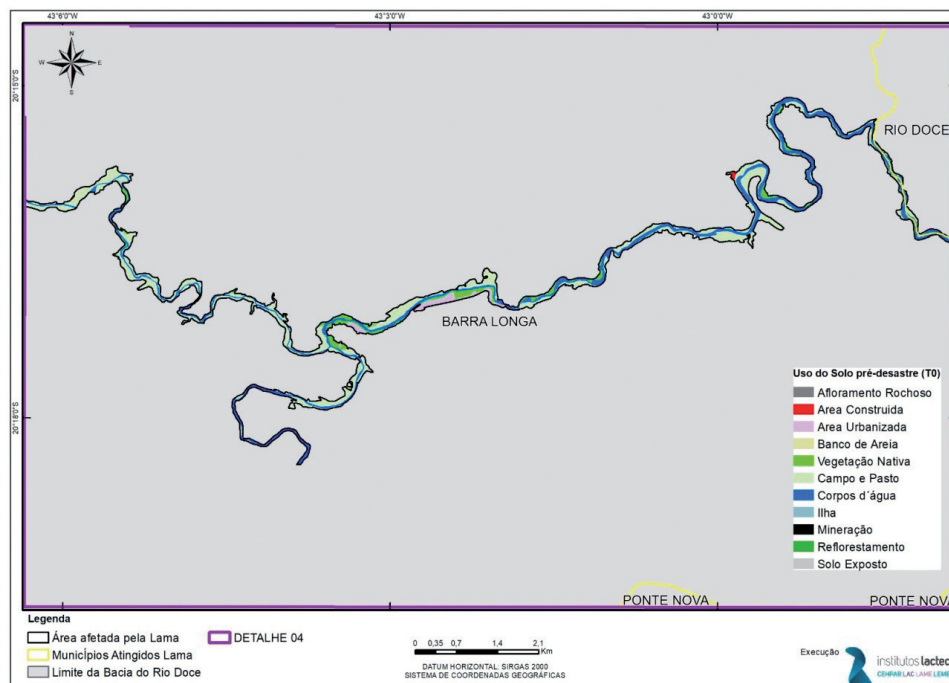
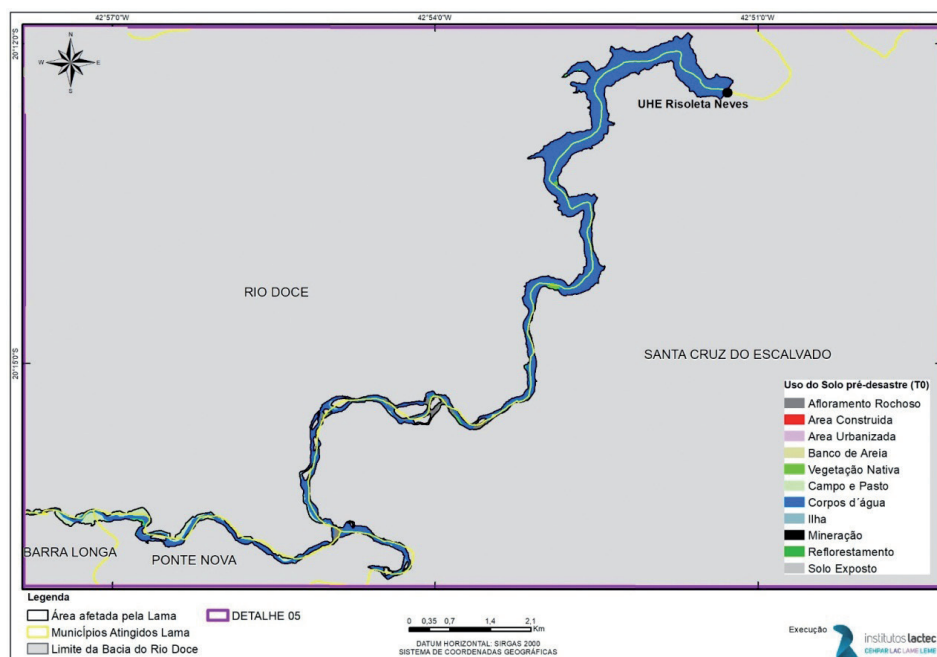


Figura 32 – Detalhe 05- área atingida pela APDL e uso e ocupação do solo afetados.



2.3 PRÓXIMAS ATIVIDADES

A próxima atividade refere-se ao refinamento da área de passagem e deposição da lama - APDL. Para isto, estão sendo levantados em campo, pontos onde é possível visualizar a marca deixada pela passagem da onda de lama (casas, postes, árvores). Estes pontos estão sendo georreferenciados e a altura da marca da lama está sendo medida. Pretende-se após a conclusão deste levantamento, comparar o polígono da lama traçado a partir das ortoimagens orbitais, com estes pontos de campo, a fim de que, onde houver necessidade, o polígono da lama possa ser ajustado.

2.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTUNES, A.F.; LINGNAU, C. **Uso de índices de acurácia para avaliação de mapas temáticos obtidos por meio de classificação digital**. Anais GIS Brasil, Curitiba. CD-ROM. 1997.
- AMORIM, H. B. Florestas nativas dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. Inventário Florestal Nacional. Brasília, Instituto Brasileiro do Desenvolvimento Florestal – IBDF, 1984.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de Maio de 2012. **Institui o Novo Código Florestal Brasileiro**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília. 25 de Maio de 2012.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas do Brasil Em Resumo**. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2013.
- BRASIL. Resolução/CONAMA nº 392, de 25 de junho de 2007. **Define vegetação primária e secundária de regeneração de Mata Atlântica no Estado de Minas Gerais**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília. 26 de Junho de 2017.
- CARMO, F. F.; JACOBI, C. M. Diversity and plant trait-soil relationships among rock outcrops in the Brazilian Atlantic rainforest. **Plant and soil**, v. 40 3, n. 1-2, p. 7-20, 2016.
- CONGALTON, R. & GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. CRC Press, Danvers, EUA. 1999.

- COPPETEC FUNDAÇÃO. **Relatório Técnico número COPPE-20275 - Avaliação dos impactos da ruptura da Barragem de rejeitos de Fundão em Mariana nove meses após o desastre – Capítulo 5, Avaliação dos Danos Ambientais Decorrentes do Rompimento das Barragens ao Longo da Bacia do Rio Doce e Zona Costeira Adjacente – Biodiversidade.** 06 de janeiro de 2017.
- CPRM SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Geodiversidade do Estado de Minas Gerais. Programa Geologia do Brasil - Levantamentos da Geodiversidade. Disponível em <http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1339&sid=9>. Data de Acesso: 10/08/2017.
- Golder Associates. **Relatório Técnico número RT-023_159-515-2282_00-J - Avaliação dos impactos no meio físico resultantes do rompimento da Barragem de Fundão.** Julho de 2016.
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Laudo Técnico Preliminar dos impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais.** 2015. Disponível em: http://www.ibama.gov.br/phocadownload/noticias_ambientais/laudo_tecnico_preliminar.pdf. Acesso em: 11 de janeiro de 2016.
- IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira.** IBGE, Rio de Janeiro, 92 p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, n.1). 1992.
- IBGE. **Manual técnico de uso da terra.** IBGE, Rio de Janeiro, 91 p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, n.7). 2006.
- LEITE, P.; KLEIN, R. M. **Vegetação.** In: IBGE. Geografia do Brasil: região Sul. v. 2. Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, p. 113-150. 1990.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. **The measurement of observer agreement for categorical data.** Biometrics, v. 33, n. 1, p. 159-174. 1977.
- OLIVEIRA-FILHO, A.T. et al. Análise florística do compartimento arbóreo de áreas de Floresta Atlântica sensu lato na região das Bacias do Leste (Bahia, Minas Gerais, Espírito Santo e Rio de Janeiro). **Rodriguésia**, p. 185-235, 2005.
- ORTEGA, V.; ENGEL V. Conservação da Biodiversidade em Remanescentes de Mata Atlântica na Região de Botucatu, SP. **Revista do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 4, n. 3, p.839-852, 1992.
- PEIXOTO, A.; ROSA, M.; JOELS, L. Diagramas de perfil e de cobertura de um trecho de floresta de tabuleiro na floresta de Linhares (Espírito Santo, Brasil). **Acta Botânica Brasilica**. Belo Horizonte, V.9, n.2, p.177-193, 1995.
- RODRIGUES, R. R. Uma discussão nomenclatural das formações ciliares. *In* **Matas Ciliares: Conservação e Recuperação** (R. R. Rodrigues & H. F. Leitão Filho, eds.). Edusp, São Paulo, p. 91-99. 2000.
- ROLIM, S.; IVANAUSKAS, N.; RODRIGUES, R.; NASCIMENTO, M.; GOMES, J.; FOLLI, D.; COUTO, H. Composição Florística do estrato arbóreo da Floresta Estacional Semidecidual na Planície Aluvial do Rio Doce, Linhares, ES, Brasil. **Acta Botânica Brasilica**. Belo Horizonte, V.20, n.3, p. 549-561, 2006.
- ROVEDDER, J.; **Validação da classificação orientada a objetos em imagens de satélite Ibonos II e elaboração de indicadores ambientais georreferenciados no município de Torres, Planície Costeira do Rio Grande do Sul, Brasil.** Porto Alegre. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 18 e 19p. 2007.
- SAITER, F. Z. et al. Floristic units and their predictors unveiled in part of the Atlantic Forest hotspot: implications for conservation planning. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 87, n. 4, p. 2031-2046, 2015.
- SPIEGEL, M. R. Estatística. McGrawhill, 3ªedição, 1993.
- VELOSO, H.P.; RANGEL-FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. 1991. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal.** Rio de Janeiro: IBGE.
- VELOSO, H.P.; OLIVEIRA FILHO, L.C.; VAZ, A. M. S. F.; LIMA, M. P. M.; MARQUETE, R.; BRAZÃO, J. E. M. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira.** Rio de Janeiro: IBGE. 1992.

3 ESPELEOLOGIA

Este capítulo refere-se às vistorias espeleológicas realizadas nas áreas situadas no entorno da barragem de Santarém, na área da Samarco, município de Mariana – MG. Estas vistorias foram realizadas em duas etapas, sendo a primeira apenas para reconhecimento preliminar, realizada em julho de 2017 e a segunda, consistindo de análises das características do meio físico e biótico, realizada no período de 18 a 21 de março de 2018.

Para fins do diagnóstico ambiental, as vistorias espeleológicas foram divididas entre as cavidades / abrigos situados no interior da área da Samarco e as demais, situadas nas adjacências do rio Doce e afluentes. Desta forma procurou-se priorizar inicialmente estas cavidades / abrigos situados nas áreas da Samarco, pois foram as mais afetadas devido ao rompimento da barragem de Fundão.

No escopo das atividades do diagnóstico realizadas pelo Lactec, estas vistorias tiveram como objetivos principais identificar quais destas cavidades e abrigos foram de fato afetadas e quais os danos ambientais identificados.

Cabe-se ressaltar que não foi realizada uma nova prospecção espeleológica dado que as cavidades e abrigos, escopo desta vistoria, já haviam sido mapeadas e devido às exigências do licenciamento ambiental para as obras de alteamento da barragem de Santarém, mais especificamente em atendimento ao Auto de Fiscalização nº 85694/2012, conforme o Relatório para Atendimento ao Auto de Fiscalização – Prospecção Espeleológica – Alteamento da Barragem de Santarém – Mina Germano (AGROFLOR, 2013). Para fins de classificação estes estudos foram complementados pelo relatório de Topografia de Cavidades e Abrigos (CARSTE, 2013).

Em função do desastre, recentemente estas cavidades foram também citadas em documento do Ministério Público de Minas Gerais, referente à Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico Patrimônio Histórico Cultural, emitido pelo NUGEO em março de 2016.

3.1 CONTEXTO ESPEOLÓGICO REGIONAL

A existência de cavernas no Quadrilátero Ferrífero é reportada desde meados do século XIX, sendo o primeiro trabalho de cunho científico publicado por Simmons em 1963 (AULER e PILÓ, 2005). Poucas cavernas eram conhecidas até o início do século XXI, mas a partir de 2003, com o advento da expansão da exploração mineral, principalmente devido a maior exigência dos órgãos ambientais no que se refere aos estudos espeleológicos, este cenário mudou significativamente. Atualmente centenas de cavernas em minério de ferro estão catalogadas no Quadrilátero Ferrífero (AULER e PILÓ, 2005).

Estas cavernas se desenvolvem, sobretudo, nos itabiritos da Formação Cauê, Grupo Itabira e em cangas superficiais formadas durante o Terciário e o Quaternário, devido ao intemperismo e lixiviação das rochas ricas em hematita. Geralmente estas cavernas estão associadas ao contato do Itabirito com a canga, mas eventualmente ocorrem também cavernas desenvolvidas totalmente na canga ou no itabirito.

As cavernas ferríferas eram desconsideradas pela comunidade espeleológica nacional, pois sempre foram priorizadas as cavernas calcárias, maiores e com mais ornamentações. Acreditava-se que as rochas ferríferas tinham baixo potencial para ocorrência de cavernas. Entretanto, estudos realizados

por Auler e Piló, (2005), indicam uma significativa importância com relação à atributos geoespeleológicos e bioespeleológicos (FERREIRA, 2005) e arqueológicos (AULER e PILÓ, 2005). Os mecanismos de sua formação são ainda pouco conhecidos e os aspectos mineralógicos e químicos pouco estudados. Segundo Auler e Piló (2005), há um grande controle estrutural no desenvolvimento destas cavernas em minério de ferro. Simmons (1963), descreve a ocorrência de um mineral raro, a leucofosfita, um fosfato formado com a ação de soluções derivadas de guano de morcegos.

Além das cavernas em minério de ferro, o Quadrilátero Ferrífero guarda ainda importantes registros de cavernas desenvolvidas em quartzitos. As cavernas que merecem maior destaque, nesta litologia, se desenvolvem em quartzitos da Formação Moeda e estão situadas, no Pico do Inficionado da Serra do Caraça, ao norte do Complexo de Germano, onde localizava-se a barragem de Fundão.

As cavidades/abrigos, anteriormente cadastrados no banco de dados do CECAV, objeto destas vistorias, nas adjacências da barragem de Santarém, desenvolvem-se em filitos, xistos e apenas uma em canga.

3.2 CONTEXTUALIZAÇÃO BIOESPEOLÓGICA

As cavernas constituem-se, do ponto de vista biológico, um ambiente extremamente diferente, quando comparado com o meio externo. Os principais fatores são a ausência de produção primária de nutrientes (organismos fotossintetizantes) e as condições ambientais únicas, causada principalmente pela ausência de fotoperíodos (ciclos biológicos regidos pela alternância de períodos claros e escuros).

Essa ausência de luz em algumas zonas das cavernas faz com que organismos fotossintetizantes não se estabeleçam nesses locais (GOMES et al., 2000). Dessa forma, a fonte de recursos na maioria dos sistemas cavernícolas é quase exclusivamente importada do meio externo (BARR, 1968; 1967; MOHR e POULSON, 1966). Esses recursos podem chegar ao meio cavernícola por três vias principais: (i) pela água, através de chuvas que escorrem pelas fendas, clarabóias, rios subterrâneos ou mesmo pela inclinação da porta de entrada; (ii) pelo vento, através das fendas, clarabóias ou porta de entrada; e (iii) carreado por animais, na forma de fezes ou cadáveres que servirão de base para teias alimentares de muitos organismos cavernícolas (CULVER, 1982).

Particularmente nas cavidades estudadas a maior parte dos nutrientes é importada do meio externo, chegando ao ambiente cavernícola (hipógeo) através do vento e chuva. Outra fonte de alimento a fauna espeleológica é a matéria orgânica presente nas fezes (guano) de espécies que habitam as cavernas, como os morcegos.

Quando abordamos o tema sobre animais de caverna devemos primeiramente conhecer as particularidades deste ambiente. O interior das cavernas pode ser dividido em três zonas. Primeiro, a *zona de entrada*, situada próxima à abertura da caverna, na qual as características climáticas são semelhantes às do meio externo e onde os raios de luz incidem diretamente. Depois, a *zona de penumbra*, que corresponde à região na qual a luz incide de forma indireta e as temperaturas começam a se tornar mais amenas, ao mesmo tempo em que a umidade aumenta. Por último, temos a *zona afótica*, caracterizada pela ausência de luz, temperaturas baixas e constantes e umidade relativa do ar próxima de 100%. Nas cavidades estudadas, por possuírem pouco desenvolvimento,

não foram observadas zonas totalmente afóticas. Organismos que possuem maior tolerância à luz podem ser mais encontrados nas zonas próximas à entrada, já organismos com maior sensibilidade à luz podem ser encontrados em locais mais profundos (CULVER e PIPAN, 2009).

Além da luminosidade, a distribuição dos organismos no interior das cavernas pode ser influenciada por outros fatores, dentre os principais, recursos alimentares, umidade e temperatura (POULSON e WHITE, 1969). Além disso, os recursos alimentares provenientes do meio externo mantêm populações de organismos de todos os níveis tróficos presentes nas cavernas (FERREIRA e MARTINS, 1999).

Uma ampla variedade de organismos pode ser encontrada em ambientes subterrâneos por diversas razões, inclusive por acaso ou por acidente. Existem os organismos que utilizam esse ambiente temporariamente, considerados visitantes temporários, e os que utilizam permanentemente, considerados residentes. Assim, um dos principais interesses no estudo da fauna cavernícola é verificar se existem espécies que dependem exclusivamente desse ambiente e possuam características como ausência e/ou redução dos olhos, despigmentação e apêndices alongados que indiquem essa especialização. Como organismos que não habitam o ambiente subterrâneo compartilham essas características por convergência adaptativa, foi proposto um sistema de classificação (Sistema Schiner-Racovitza), adaptado por Sket (2008), que considera além dessas características, a distribuição do organismo limitada a cavernas.

De acordo com o sistema de classificação citado, a fauna pode apresentar organismos residentes ou visitantes do ambiente cavernícola. Sabendo disto podemos considerar que as espécies que ocorrem nestes ambientes apresentam uma história e relações com o meio bastante diverso. Para tentar exprimir melhor estas interações existe um sistema para enquadrá-los. Esse sistema exprime a relação dos organismos com o ambiente cavernícola. Os animais são classificados como troglóbios, troglófilos e troglófenos. Troglóbios são as espécies restritas às cavernas e que normalmente apresentam certas especializações (ausência de olhos, despigmentação) que são denominadas como troglomorismos. Os troglóbios são espécies notadamente importantes, pois possuem áreas de distribuição geográfica bastante restrita (uma ou mais cavernas próximas, sempre na mesma lente calcária, no caso de cavernas carbonáticas). Portanto, são espécies potencialmente ameaçadas de extinção. Dentre estes, podemos citar algumas espécies de peixes como os lambaris, anelídeos, insetos, crustáceos e aracnídeos. Os troglóbios mostram uma tendência para apresentarem estratégias reprodutivas do tipo K (POULSON e WHITE, 1969; CULVER, 1982): ovos maiores e em menor quantidade, crescimento individual lento e maturidade retardada, maior longevidade e baixa taxa de mortalidade dos adultos. Os troglófilos são as espécies cujos indivíduos são capazes de realizar todo seu ciclo vital tanto dentro (hipógeo) como fora (epígeo) da caverna. Entre estes animais podemos citar alguns moluscos gastrópodes, insetos e pequenos crustáceos. Os troglófenos são as espécies que utilizam a caverna para abrigo ou reprodução e necessitam sair ao meio externo a fim de completar seu ciclo vital. Exemplos de troglófenos são os morcegos, algumas espécies de roedores e serpentes.

Um histórico detalhado sobre as explorações bioespeleológicas no Brasil pode ser obtido em Trajano (1991), levantamentos sobre as publicações a respeito do assunto estão disponíveis em SÁNCHEZ (1986), Trajano (1996) e a listagem com toda a fauna cavernícola ocorrente no Brasil, encontra-se em Pinto-da-Rocha (1995).

Um dos principais grupos que ocupam as cavidades naturais são os morcegos. Cavernas são refúgios essenciais para muitas espécies de morcegos, pois oferecem um ambiente para a reprodução,

criação dos filhotes, interações sociais e a proteção contra adversidades climáticas ou contra predadores. Os habitantes das mesmas podem formar numerosos grupos, também chamadas de colônias ou co-habitarem com outras espécies (PERACCHI et al., 2006). Mais de vinte espécies podem ser registradas em amostragens em cavernas (BREDET et al., 1999) e 25% das espécies brasileiras já foram coletadas em cavernas (TRAJANO, 1996).

Assim, as condições de um abrigo influenciam diretamente nas taxas de natalidade e mortalidade, tornando-o especialmente importante para a sobrevivência de uma espécie e influenciando assim a distribuição e abundância de muitas espécies (KUNZ, 1982).

A importância das cavernas para a manutenção da diversidade de morcegos, aliada aos impactos sofridos por esse ecossistema, tem levado alguns cientistas a investigar o grupo no contexto (GREGORIN e MENDES 1999; ESBÉRARD et al., 2005). Embora a bibliografia especializada tenha disponibilizado importantes dados corológicos e, mais recentemente, ecológicos para diversas espécies, o uso desse material como ferramenta para conservação não tem sido explorado de forma satisfatória.

3.3 METODOLOGIA

3.3.1 LEGISLAÇÕES

As legislações, procedimentos e instruções acerca do tema espeleologia são bastante amplas e muitas vezes divergentes ou contraditórias, motivo pelo qual ocorrem interpretações equivocadas e/ou tendenciosas. Na sequência, com intuito de balizar os critérios adotados na análise destas cavidades, apresenta-se àquelas atualmente vigentes.

Segundo o Decreto Federal nº 99.556, de 1º de outubro de 1990, com nova redação dada pelo Decreto Federal nº 6.640, de 07 de novembro de 2008:

Cavidade natural subterrânea é todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecida como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, fuma ou buraco, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante (BRASIL, 1990).

O decreto Federal e a Instrução Normativa nº 02 de 2009 define quatro níveis de relevância de cavernas: i) Máxima – Deve ser preservada em caráter permanente; ii) Alta – Pode ser impactada, mas há necessidade de se preservar duas outras cavernas de igual relevância; iii) Média – Pode ser impactada, mas medidas compensatórias relacionadas a espeleologia devem ser aplicadas e iv) Baixa – Pode ser impactada, sem necessidade de compensação ambiental.

Segundo a Instrução de Serviço SEMAD nº 03/2014 - Procedimentos a serem adotados para instrução dos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos considerados efetiva ou potencialmente poluidores ou degradadores de cavidades naturais subterrâneas, a fim de compatibilizar as fases de licenciamento ambiental com os estudos de prospecção, relevância e áreas de influência e definição de compensações.

Cabe-se ressaltar que no Brasil existem diversas normativas acerca do tema espeleologia. Abaixo segue listadas as portarias e resoluções consideradas importantes e relevantes:

- Portaria MMA nº 358 de 30/09/2009: Institui o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico
- Portaria ICMBio nº 078 de 03/09/2009: Cria o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – Cecav
- Portaria IBAMA nº 34 de 18/04/2006: Constitui Grupo de Trabalho – CavLegis
- Portaria IBAMA nº 089 de 13/08/2001: Regulamenta o mergulho em cavernas (revogada pela IN nº100 de 05/06/2006)
- Portaria IBAMA nº 015 de 23/02/2001: Disciplina o acesso e uso de cavernas turísticas na Chapada Diamantina/BA
- Portaria IBAMA nº 014 de 23/02/2001: Interdita o uso turístico na Gruta dos Ecos – Goiás
- Portaria IBAMA nº 887 de 15/06/1990: Dispõe sobre o uso das cavidades subterrâneas, entre outros
- Resolução CONAMA nº 347/04 de 10/09/2004: Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 347/04 de 10/09/2004:

Cavidade natural subterrânea relevante para fins de anuência pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis-IBAMA no processo de licenciamento - aquela que apresente significativos atributos ecológicos, ambientais, cênicos, científicos, culturais ou socioeconômicos, no contexto local ou regional em razão, entre outras, das seguintes características (CONAMA, 2004).

- a) dimensão, morfologia ou valores paisagísticos;
- b) peculiaridades geológicas, geomorfológicas ou mineralógicas;
- c) vestígios arqueológicos ou paleontológicos;
- d) recursos hídricos significativos;
- e) ecossistemas frágeis; espécies endêmicas, raras ou ameaçadas de extinção;
- f) diversidade biológica; ou
- g) relevância histórico-cultural ou socioeconômica na região.

Os procedimentos para os levantamentos seguiram as orientações padronizadas estabelecidas pelo ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade) e CECav – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Adicionalmente, utilizou-se também a Instrução de Serviço – IS 08/2017 - MG - Procedimentos para análise dos processos de licenciamento ambiental de empreendimentos e de atividades efetiva ou potencialmente causadoras de impactos sobre cavidades naturais subterrâneas.

3.3.2 METODOLOGIA

Conforme descrito no relatório de Linha Base (INSTITUTOS LACTEC, 2017) inicialmente foram selecionadas todas as cavidades situadas nas proximidades da calha do rio Doce e demais drenagens afluentes, a partir do Complexo de Germano com a intenção de identificar eventuais danos ocorridos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão. Os dados referentes a estas cavidades foram obtidos junto ao CECAV (Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas). Estas informações foram inseridas em softwares de geoprocessamento para seleção das cavidades a serem vistoriadas, devido a sua proximidade com os limites da área afetada, conforme Figura 33.

Posteriormente, com base em documento emitido pela Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico, foram selecionadas as cavidades objeto deste relatório, situadas nas adjacências da barragem de Santarém. De acordo com o referido documento, cinco cavidades haviam sido afetadas pela lama de rejeito, a saber: CA – 11, CA – 12, CA - 13, CA – 14 e CA – 15, conforme apresenta a Figura 34.

A nomenclatura das cavidades / abrigos, adotada pelos relatórios apresentados pela Carste (2013) e pela Agroflor (2013), foi mantida nesse documento.

Figura 33 – Localização das cavernas selecionadas para as demais vistorias.

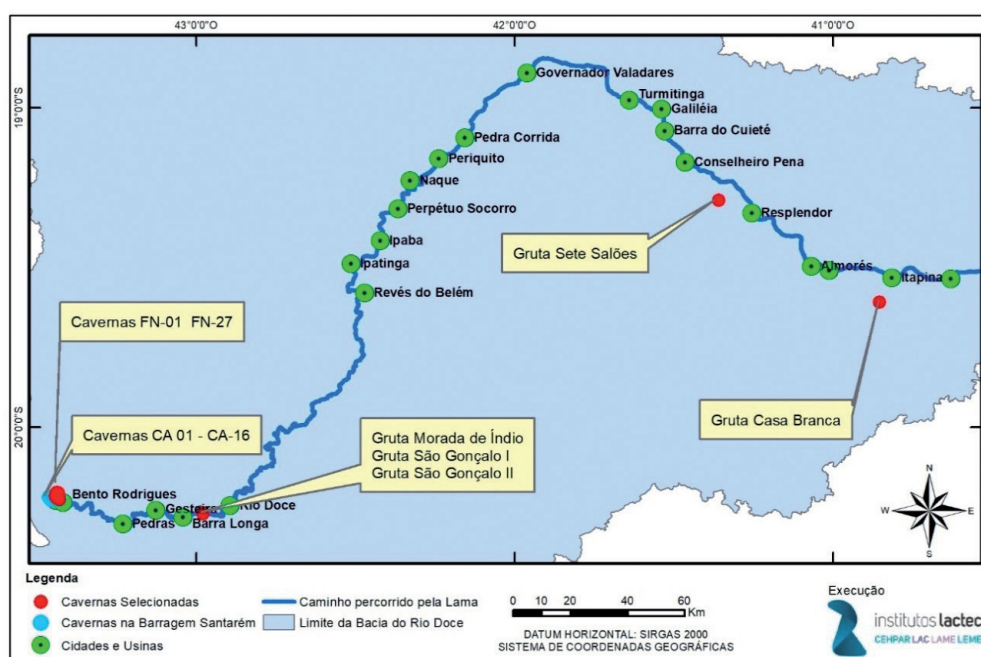
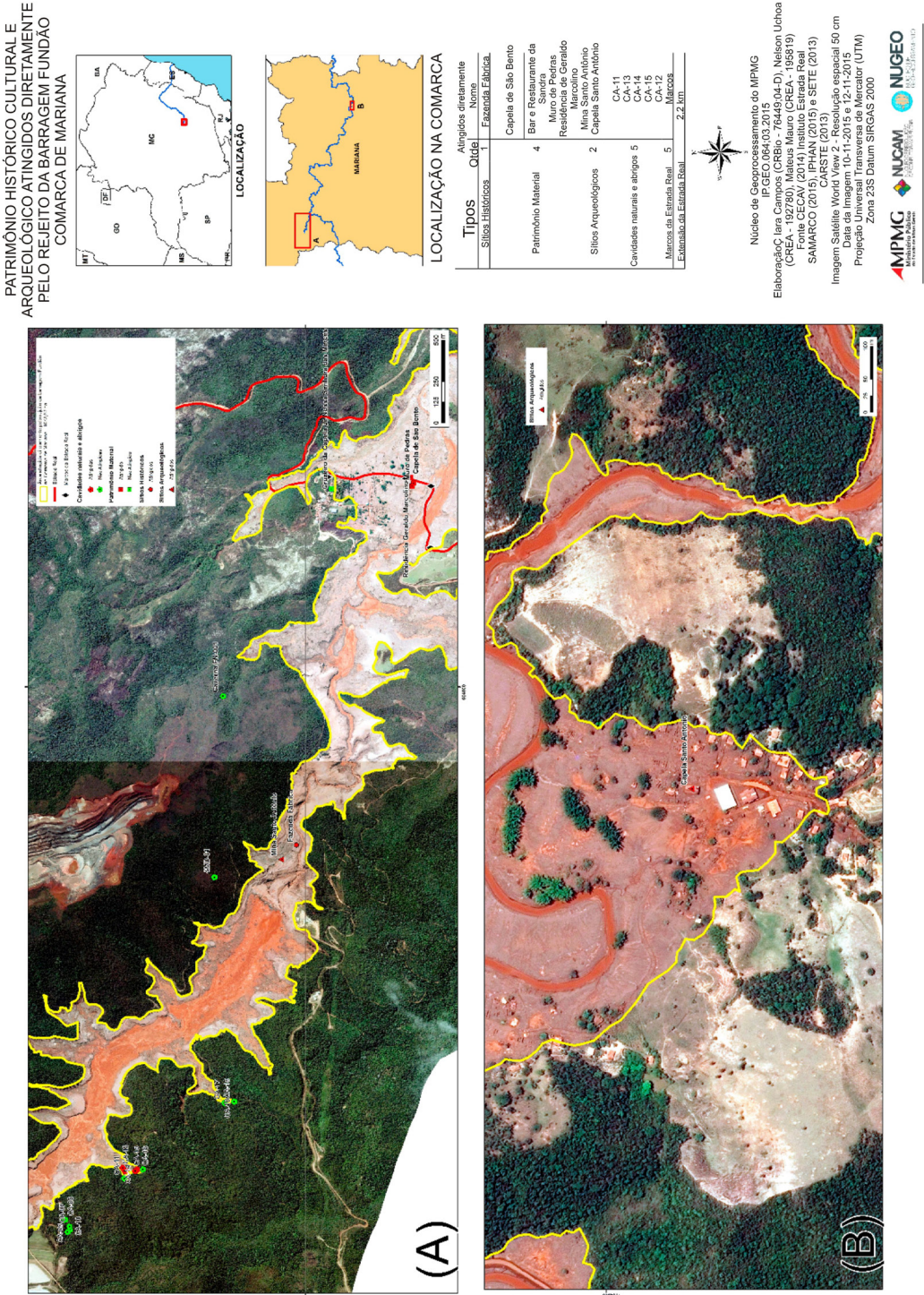


Figura 34 – Localização das cavidades/abrigos elencados como atingidos pelo rejeito – Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico. A localização das cavidades afetadas é o mesmo da mapeada pela Carste e Agroflor.



Nota: A imagem está em baixa resolução conforme obtida na fonte.

Com o intuito de fazer um reconhecimento preliminar destas cavidades, conforme mencionado no relatório de Linha Base (INSTITUTOS LACTEC, 2017) foi realizada uma primeira vistoria preliminar pela equipe do Lactec, em julho de 2017. Nesta vistoria foram identificadas previamente as cavidades CA-14, CA-15 e CA-16, entretanto devido às dificuldades de acesso e localização, não foi possível vistoriar todas as cavidades indicadas nesta ocasião.

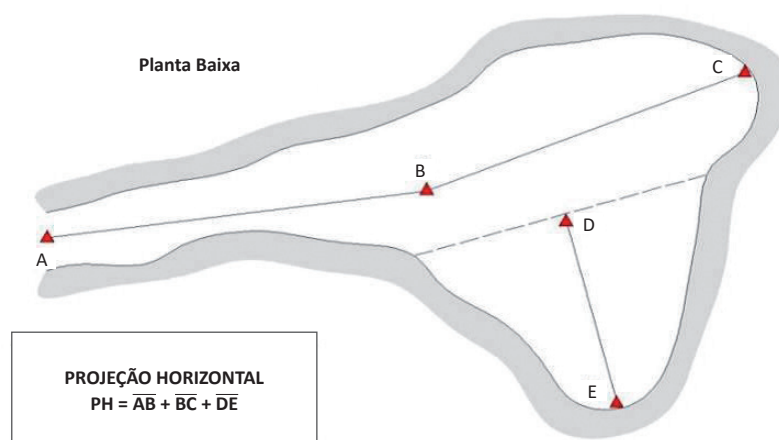
A partir de imagens orbitais foi possível identificar que algumas destas cavidades de fato haviam sido atingidas, dado que estavam localizadas dentro dos limites da área afetada pela lama.

Para a segunda vistoria, foram realizadas programações detalhadas das atividades, as quais foram repassadas com antecedência à Samarco para as devidas providências de autorização e localização das cavidades em questão. As atividades de campo propriamente ditas contaram com apoio de técnicos da Samarco e da Carste, empresa responsável pelos levantamentos espeleológicos na área. Cabe ressaltar que como estas cavidades já eram mapeadas e cadastradas, não foram realizados novos caminhamentos de prospecção espeleológica. Conforme mencionado, as atividades tinham como objetivo identificar eventuais danos ocorridos a estas cavidades devido ao desastre.

Os equipamentos utilizados nestes estudos consistiram do uso de GPS de navegação, trenas digitais a laser, clinômetro, bússola, martelo de geólogo, câmeras fotográficas com GPS integrado e tablets com a localização prévia das cavidades e demais níveis de informação de interesse para o projeto, como os mapas geológicos e as redes de drenagens.

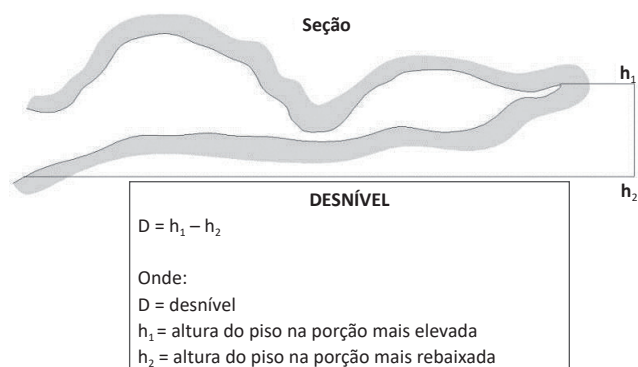
Embora não fosse objeto dos levantamentos realizados, foram realizadas medidas para o cálculo espeleométrico, sobretudo para definições da projeção horizontal e desnível. Para o cálculo da projeção horizontal, utilizou-se o princípio da descontinuidade (RUBBIOLI e MOURA, 2005), que desconsidera a largura dos condutos no cálculo final. Deste modo, a soma do comprimento de um conduto é feita em seu eixo central. No cruzamento entre dois condutos esta medição é interrompida de modo a não incluir o comprimento lateral do novo conduto (Figura 35).

Figura 35 – Medição da projeção horizontal de acordo com o método da descontinuidade modificado de CARSTE (2013).



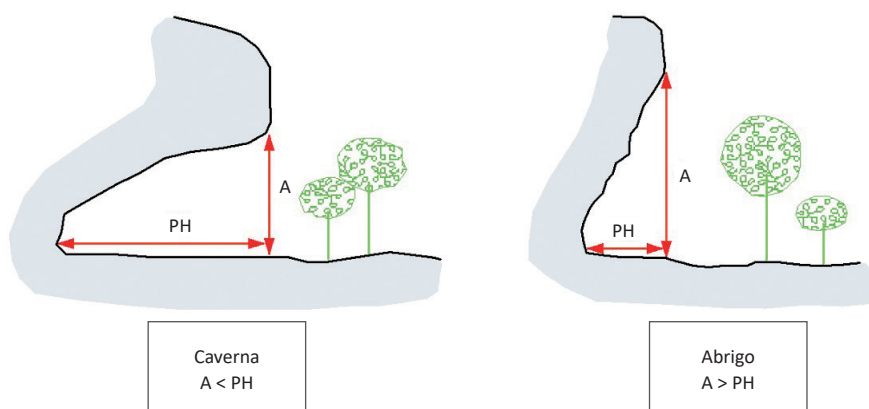
O desnível foi obtido através do resultado da diferença altimétrica (Figura 36). Importante salientar que, na etapa de campo, a altura das bases visadas acima do nível dos pisos e/ou patamares teve sua altura registrada de forma relativa, dado que nestes estudos não foram realizados nivelamentos topográficos.

Figura 36 – Medição do desnível da cavidade, modificado de CARSTE (2013).



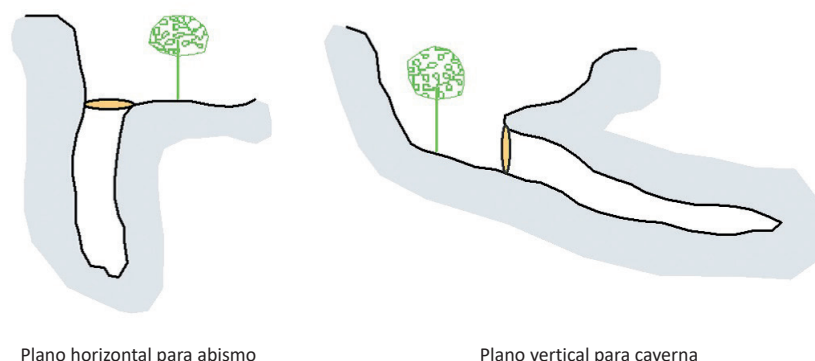
Para a diferenciação entre cavernas e abrigos rochosos foram utilizados ao longo dos trabalhos de campo os parâmetros adotados pelo Centro Nacional de Pesquisas e Conservação de Cavernas (CECAV/ICMBio), com base em conceitos estabelecidos por Chabert e Watson, (1981). Segundo estes autores, a classificação de uma cavidade em abrigo ou caverna é fundamentada na relação “altura da entrada” versus “projeção horizontal”. Ou seja, caso a altura (A) seja inferior à projeção horizontal (PH), tem-se uma caverna. Caso contrário, a feição é considerada um abrigo (Figura 37).

Figura 37 – Convenção espeleométrica para a diferenciação de abrigo e caverna, segundo Chabert e Watson (1981).



A indicação do ponto inicial da caverna (plano 0), é fundamental para sua mensuração, quando aplicável. Esta metodologia tem como base as convenções estabelecidas pelo CECAV/ICMBio, que determinam o início da cavidade a partir do ponto mais externo onde seja possível o fechamento de um plano vertical, sempre perpendicular ao eixo do conduto, que toque a rocha ou solo em todo o seu perímetro, ou seja, paredes, teto e piso (Figura 38). Desse modo um plano vertical será mais inclinado na medida em que o conduto assim o faz, até tornar-se horizontal em condutos verticais ou abismos.

Figura 38 – Parâmetro adotado para a determinação do ponto inicial da cavidade, segundo o CECAV/ICMBio (2009).



O recorte amostral de 5 m, estabelecido no termo de referência do CECAV-IBAMA para elaboração de estudos espeleológicos vinculados a EIA/RIMAs, (CECAV, 2009), para litotipos não carbonáticos, embora não adotado em sua totalidade, foi considerado neste estudo.

A Figura 39, apresenta de forma geral, a atividade de mapeamento realizada pela equipe do Lactec, com apoio logístico da Carste e Samarco, devido às exigências de segurança para as áreas industriais e das barragens.

Figura 39 – Fotos gerais da vistoria espeleológica e a equipe envolvida nesta atividade.



Além dos critérios segundo os decretos e normas e procedimentos mencionados, estas vistorias basearam-se também nos conceitos indicados por Gillieson (1996), para determinação de sua relevância e consequente proteção. Algumas destes conceitos para proteção incluem:

- como habitat de espécies ameaçadas de flora e fauna;
- como locais contendo minerais raros ou formas únicas de terra;
- como locais importantes para o estudo da geologia, geomorfologia, paleontologia e outras disciplinas;
- como locais culturalmente importantes, históricos e pré-históricos;
- como características espirituais ou religiosas;
- para agricultura e indústrias especializadas;
- como “janelas” para entender a hidrologia regional;
- como fontes de materiais economicamente importantes, especialmente águas subterrâneas;
- para o turismo e seus benefícios econômicos associados;
- como áreas puramente recreativas, tanto cênicas quanto desafiadoras.

No que se refere à bioespeleologia, durante a investigação de campo procurou-se observar a ocorrência das espécies no ambiente sem realizar coleta. Foram utilizadas luvas, lupa, máquina fotográfica e lanternas para a busca ativa.

Para o levantamento bioespeleológico de invertebrados, as cavidades foram divididas em três zonas: eufótica, disfótica e afótica. Foram consideradas como eufótica, zonas onde havia incidência direta de luz, disfótica onde ainda havia claridade, mas apenas indireta, e afótica, onde não havia presença alguma de luz. Esta diferenciação teve como objetivo qualificar e quantificar possíveis preferências dos invertebrados por determinadas regiões dentro das cavidades.

3.4 RESULTADOS

Na área situada no entorno da barragem de Santarém existem 15 feições subterrâneas cadastradas, subdivididas em agrupamentos de acordo com sua posição, a saber: Norte, Centro, Central e Isoladas, conforme Figura 40. Durante as atividades de levantamentos descritas neste relatório, foram vistoriadas 12 cavidades / abrigos. Três não puderam ser vistoriadas devido a presença de abelhas. Todas essas feições ocorrem predominantemente em rochas xistosas. Apenas o abrigo SMD-01 ocorre em canga (crosta ferrugionosa), como pode ser verificado na Figura 41. Dado que não ocorrem rochas carbonáticas, em nenhuma das cavidades foram observados espeleotemas ou feições típicas de dissolução da rocha, caracterizando assim ausência de feições cársticas.

Figura 40 – Localização das cavidades cadastradas no entorno da Barragem de Santarém.

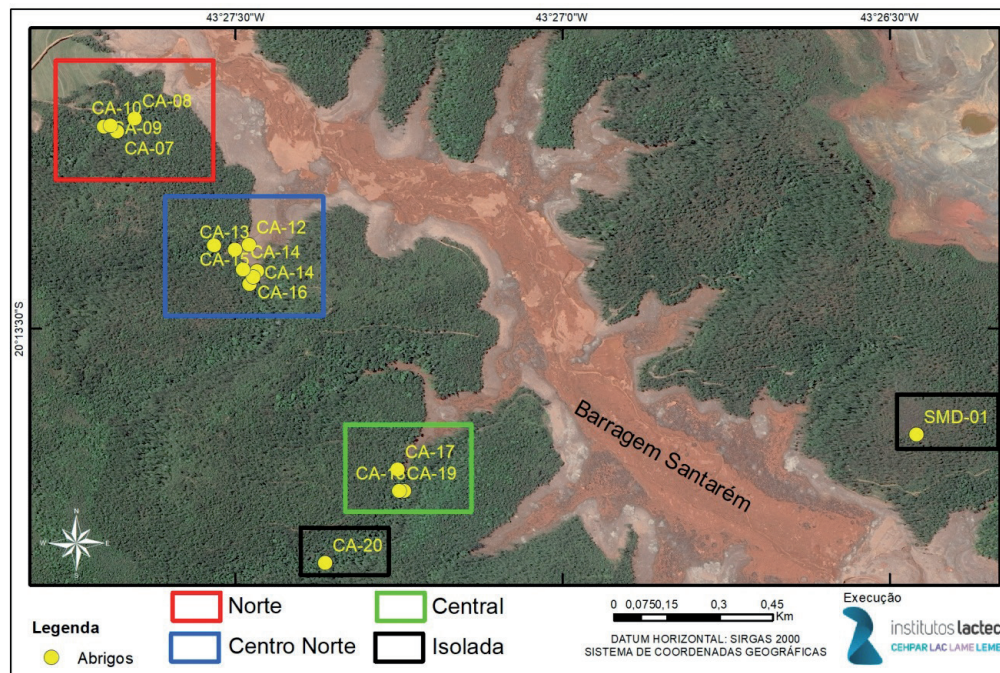
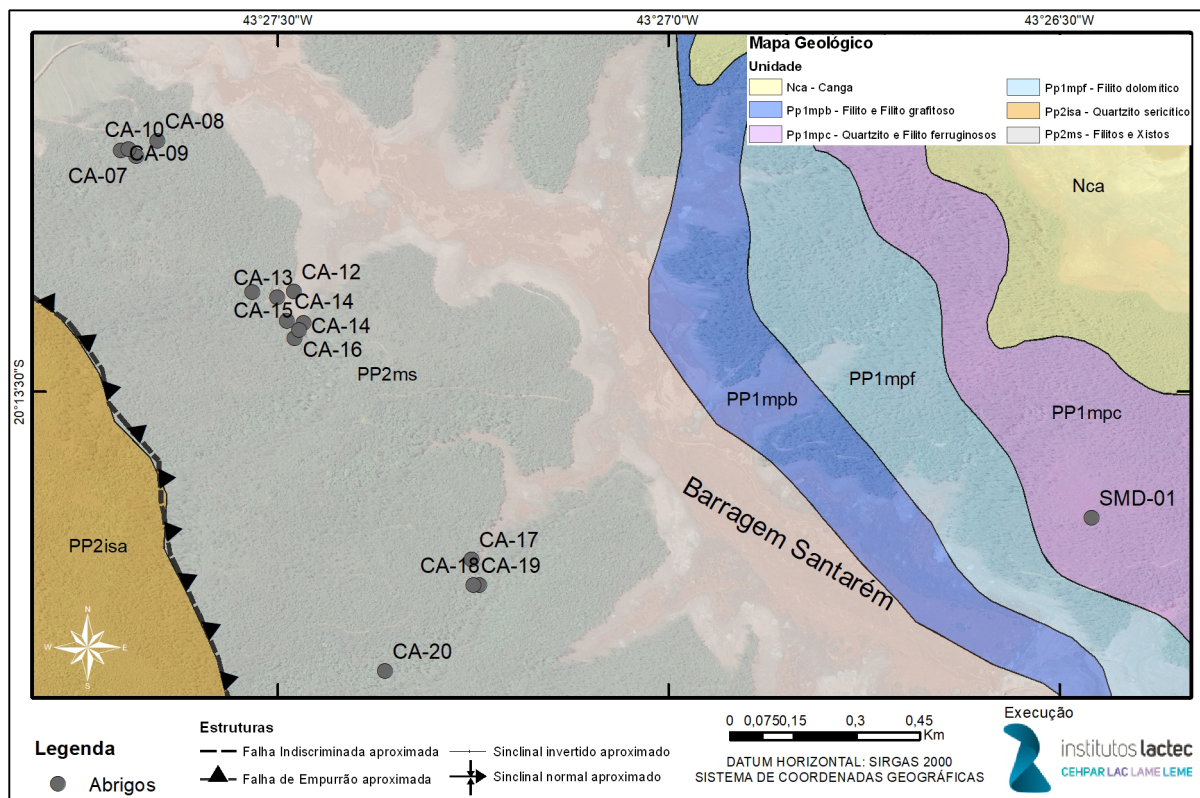


Figura 41 – Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero na escala 1:25.000 com a localização das cavidades cadastradas no entorno da barragem de Santarém. Mapa modificado de CPRM (1994).



Embora os estudos anteriores, realizados pela Agroflor, tenham classificado estas cavidades e abrigos como de origem antrópica, ao que tudo indica estas feições foram originadas por processos erosivos, ocorridos devido à ação da água, que ao longo do tempo causou o solapamento da base dos afloramentos rochosos. Este processo foi favorecido devido ao alto mergulho da foliação que as rochas desta região apresentam, em média 30° a 40°, variando entre os quadrantes NW e SE. Cabe-se ressaltar que na grande maioria destas feições a drenagem encontra-se exatamente paralela a cavidade / abrigo.

Das cavidades vistoriadas, apenas a CA-14 possui desenvolvimento (projeção horizontal), maior que 5,0 metros. De acordo com as medidas realizadas nestes levantamentos verificou-se que esta cavidade apresenta 8,5 metros.

As demais cavidades possuem dimensões bastante reduzidas e muitas delas sequer atendem critérios do fechamento do plano 0 ou mesmo apresentam desenvolvimento superior a 5,0 metros, que é o valor de corte adotado para estudos de relevância de cavernas de formações ferríferas, em concordância com o Termo de Referência para Elaboração de Estudos Espeleológicos Vinculados a EIA / RIMA (CECAV). Igualmente no que se refere aos conceitos de proteção, dado que as cavidades / abrigos vistoriados possuem baixa relevância.

Em função das características mencionadas, muitas destas feições, de acordo com os levantamentos de campo, foram desconsideradas, ou seja, tratam-se apenas de afloramentos rochosos sem relevância e que não atendem aos critérios de classificação como cavidade ou abrigo. Cabe-se ressaltar que, de acordo com informações repassadas pela Samarco e pela Carste, algumas destas cavidades e abrigos já foram desconsideradas e nova classificação já foi submetida aos órgãos ambientais competentes. A Tabela 8 e a Tabela 9 resumem as principais informações obtidas de cada uma destas feições, bem como as novas classificações correspondentes.

As vistorias realizadas pelo Lactec permitiram identificar que:

Atingidas / Não Atingidas pela lama de rejeito

CA-07, CA-08, CA-09, CA-10, CA-11, CA-13, CA-14, CA-15, CA-16, CA-18, CA-19, foram atingidas pela lama de rejeito.

CA-12 e CA-17 foram atingidas pela passagem da lama de rejeitos e atualmente encontram-se alagadas devido à elevação da cota do nível d'água, face ao alteamento da barragem de Santarém.

CA-20 e SMD-01 – Somente estas não foram atingidas pela lama de rejeitos.

Classificação espeleométrica

Conforme a convenção espeleométrica de Chabert e Watson (1981) e convenções estabelecidas pelo CECAV/ICMBio, as feições foram classificadas conforme:

CA-11, CA-13, CA-18, CA-19, foram desconsideradas como abrigo e/ou cavidade, dado que não atendem as convenções e não permitem o fechamento de um plano 0. Essas feições podem ser classificadas apenas como afloramentos rochosos e/ou blocos de rocha.

CA-07, CA-09, CA-10, CA-15, CA-16, CA-20 e SMD – 01, foram classificadas como abrigos de acordo com as convenções espeleométricas, dado que apresentam abertura maior que seu desenvolvimento.

Conforme mencionado, cabe-se ressaltar que devido à presença de abelhas, os abrigos CA-07, CA-09 e CA-10 não puderam ser vistoriados. Suas classificações foram estabelecidas com base em fotografias e em plantas baixas fornecidas pela Samarco.

CA-12 e CA-17, conforme mencionado, essas feições encontram-se alagadas. De todo modo, apesar desta condição, com base em fotografias e plantas baixas fornecidas pela Samarco, foram também classificadas como abrigos.

CA-08 e CA-14, embora com desenvolvimentos reduzidos, essa foram as únicas feições classificadas como cavidades de acordo com as convenções espeleométricas mencionadas.

Tabela 8 – Informações obtidas a partir da vistoria realizada.

ÁREA	GRUPO	DENOMINAÇÃO	UTM N - LACTEC	DESENVOLVIMENTO H (M)	ABERTURA (M)	AValiação	CONSIDERAÇÃO FINAL LACTEC
Norte	CA-07	Não vistoriada - abelhas	Não vistoriada - abelhas			Atingida	Abrigo
	CA-08	660788	7763464	4,15	2,2	Atingida	Cavidade
	CA-09	Não vistoriada - abelhas	Não vistoriada - abelhas			Atingida	Abrigo
	CA-10	Não vistoriada - abelhas	Não vistoriada - abelhas			Atingida	Abrigo
Centro norte	CA-11	660996	7763105	4,8	0,5	Atingida	Desconsiderada
	CA-12	661089	7763106	Afogada	Afogada	Atingida	Cavidade alagada
	CA-13	661052	7763092	2,1	0,9	Atingida	Desconsiderada
	CA-14	661110	7763031	8,5	6,6	Atingida	Cavidade
	CA-15	661110	7763015	2	1,9	Atingida	Abrigo
	CA-16	661090	7762996	3	3	Atingida	Abrigo
Central	CA-17	661479	7762470	Afogada	Afogada	Atingida	Abrigo alagado
	CA-18	661495	7762909	Não se aplica	Não se aplica	Atingida	Desconsiderada
	CA-19	661482	7762409	Não se aplica	Não se aplica	Atingida	Desconsiderada
Isolada	CA-20	661283	7762209	2,8	2,4	Não atingida	Abrigo
Isolada	SMD-01	662860	7762556	2,5	1,6	Não atingida	Abrigo

Tabela 9 – Decrições do meio biótico e físico.

DESCRIÇÃO GERAL - M. BIÓTICO	DESCRIÇÃO GERAL - M. FÍSICO
Não vistoriada - abelhas	Não vistoriada devido a presença de abelhas, mas mapeada pela Carste como atingida pela lama
Presença de vegetação de ambiente cavernícola	
Não vistoriada - abelhas	Não vistoriada devido a presença de abelhas
Não vistoriada - abelhas	Não vistoriada devido a presença de abelhas
	Escorregamento na vertente da margem esquerda
	Atingida pela lama. Atual nível d'água de Santarém não permite visualizar
Presença de morcegos (<i>desmodus rotundos</i>) - 7 indivíduos; anfíbios (<i>leptodactylus?</i>), rastros de mão peladas e mariposa na área da entrada	Abertura segundo plano 0=5,20/ Pode ser classificada como Reentrância
	Não caracteriza plano 0 -medidasd da frente do afloramento. Não atendem convenções espeleométricas
	Não caracteriza plano 0 -medidasd da frente do afloramento. Não atendem convenções espeleométricas
	Atingida pela lama. Atual nível d'água de Santarém não permite visualizar
	Não configura cavidade/ abrigo - Não caracteriza plano 0 - Afloramento rochoso paralelo a drenagem
	Pelo plano 0 abertura = 1,80
	Considerada cpomo abrigo e não foi atingida pela lama

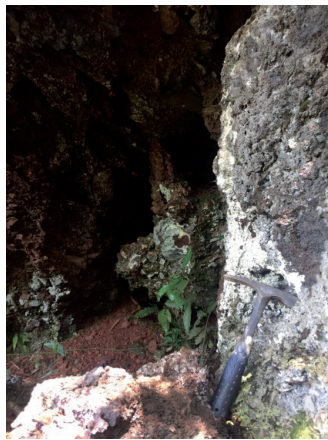
Figura 42 – SMD 01. Esta é a única feição que ocorre em canga (crosta ferruginosa). Embora não apresente relevância significativa, foi mantida a classificação original de abrigo. Não apresenta espeleotemas e o desenvolvimento é de apenas 2,5 m. Não foi atingida pela lama de rejeito.



A – Abrigo em canga



B – Abrigo em canga



C – Abrigo em canga



D – Detalhe da canga

Figura 43 – CA-07. Feição não vistoriada devido a presença de abelhas. Estas fotografias foram fornecidas pela Samarco. Foi mantida a classificação original de abrigo. De acordo com a cota e limites da área afetada, este abrigo foi atingido pela lama de rejeito.



A – Visão geral do abrigo



B – Detalhe do abrigo



C – Detalhe do abrigo



D – Identificação do abrigo

Figura 44 – CA-08. De acordo com as vistorias realizadas pelo Lactec e segundo os critérios espeleométricos, essa feição foi classificada como cavidade. É formada por rochas xistosas e filitos, portanto não apresenta espeleotemas. Foi observada a presença uma plântula (B), provavelmente associada à presença de morcegos, já que deve ter geminado a partir dos excrementos destes animais. Essa cavidade foi atingida pela lama de rejeito.



A – Visão geral da cavidade



B – Plântula no interior da cavidade



C – Visão geral. Desenvolvimento maior que abertura



D – Visão geral da cavidade

Figura 45 – CA-09. Feição não vistoriada devido à presença de abelhas. Essas fotografias foram fornecidas pela Samarco. Conforme os critérios espeleométricos, foi mantida a classificação original de abrigo. De acordo com a cota e limites da área afetada, este abrigo foi atingido pela lama de rejeito. É formado por rochas xistosas e filitos e, portanto não apresenta espeleotemas.



A – Visão geral do abrigo

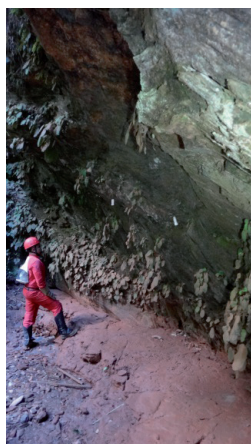


B – Formado por rochas xistosas e filitos.
Não possui espeleotemas

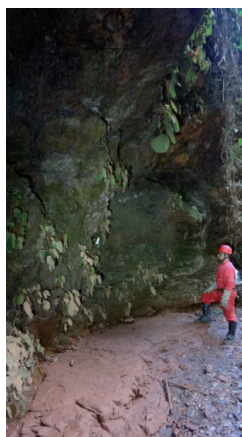


C – Visão geral do abrigo

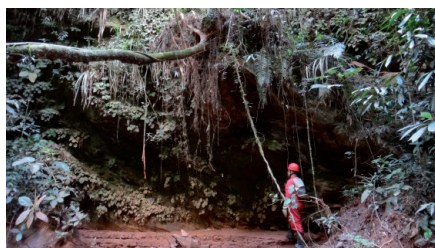
Figura 46 – CA-10. Feição não vistoriada devido à presença de abelhas. Essas fotografias foram fornecidas pela Samarco. Conforme os critérios espeleométricos foi mantida a classificação original de abrigo. De acordo com a cota e limites da área afetada, este abrigo foi atingido pela lama de rejeitos. É formado por rochas xistosas e filitos e, portanto, não apresenta espeleotemas.



A – Visão geral do abrigo



B – Notar a presença de lama de rejeito na base



C – Visão geral do abrigo



D – Detalhe da presença de lama de rejeito

Figura 47 – CA-11. Trata-se um bloco de rocha abatido (xisto) – não está in situ. Não apresenta espeleotemas e não se enquadra nos critérios para definição de cavidades e abrigos. Embora tenha sido atingido pela lama do rejeito, foi desconsiderado como cavidade ou abrigo.



A – Detalhe da presença de rejeito



B – Detalhe da parte inferior do bloco



C – Bloco de rocha sobre a drenagem.
Não está in situ



D – Visão geral da parte inferior do bloco

Figura 48 – CA-12. Esta feição atualmente encontra-se alagada, conforme imagem A. As fotografias fornecidas pela Samarco, anteriores a elevação da cota da Barragem de Santarém, permitem identificar uma pequena cavidade formada em rocha xistosa, sem espeleotemas e com grau de relevância baixo. De acordo com as plantas baixas o desenvolvimento dessa cavidade era da ordem de 5,0 m.



A – Fotografia atual, obtida pela equipe do Lactec, na posição onde encontra-se a cavidade CA-12



B – Samarco (26/02/2015). Visão geral. Cavidade atualmente alagada



C - Samarco (26/02/2015). Visão geral. Cavidade atualmente alagada



D - Samarco (26/02/2015). Visão geral do interior da cavidade. Atualmente alagada



E - Samarco (26/02/2015). Visão da abertura da cavidade. Atualmente alagada

Figura 49 – CA-13. Trata-se um bloco de rocha abatido (xisto) – não está in situ. Não apresenta espeleotemas e não se enquadra nos critérios para definição de cavidades e abrigos. Embora tenha sido atingido pela lama do rejeito, foi desconsiderado como cavidade ou abrigo.



A – Visão geral do bloco de rocha



B – Bloco de rocha abatido



C – Visão da parte inferior do bloco de rocha

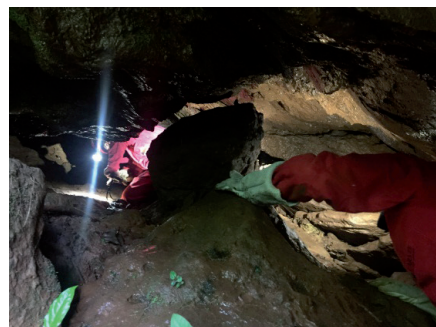


D – Visão geral. Bloco de rocha,
não está in situ

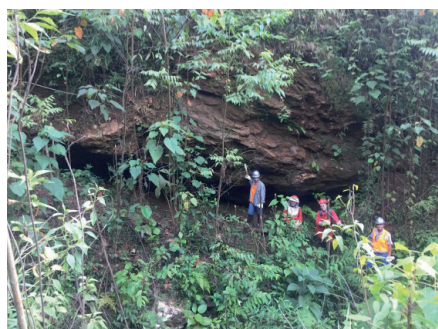
Figura 50 – CA-14. Caverna com desenvolvimento de 5,0 metros. Formada devido ao desabamento de blocos segundo o plano da foliação em rocha xistosa. Não possui espeleotemas. Embora tenha sido atingida pela lama de rejeito. Apenas nessa caverna foram registradas espécies cavernícolas. Os registros foram – uma mariposa (Lepidoptera) de espécie não identificada na entrada da caverna, um sapo (*Rhinella sp*) próximo a entrada e 6 indivíduos do morcego vampiro (*Desmodus rotundus*) no interior do salão da caverna.



A – Visão geral da abertura



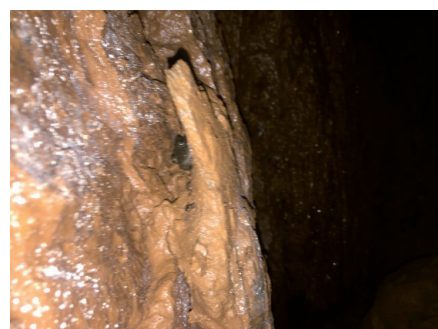
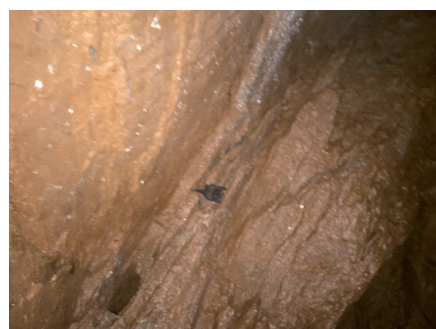
B – Pequeno "salão" no interior



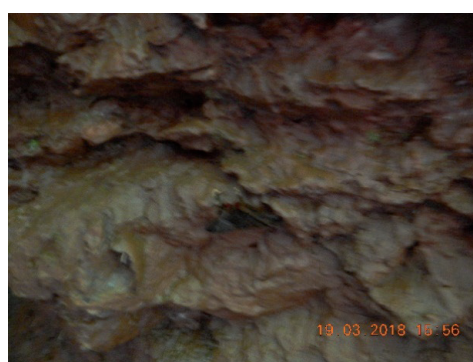
C – Visão geral da abertura



D – Detalhe do interior

E – Presença de anfíbio (*Rhinella sp*)

F – Presença de morcego



G – Presença de mariposa

Figura 51 – CA-15. Trata-se nitidamente de um afloramento rochoso paralelo a drenagem no qual os processos erosivos provocaram o solapamento da base, sobretudo facilitado pelos planos de foliação. Não constitui ambiente espeleológico propriamente dito e não adequa ao conceito do fechamento de um plano 0. Foi classificado apenas como abrigo.



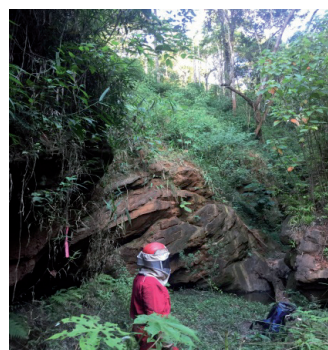
A – Visão geral do abrigo



B – Detalhe do abrigo



C – Identificação do abrigo



D – Visão geral

Figura 52 – CA-16. Igualmente a anterior, esta feição trata-se de um afloramento rochoso paralelo a drenagem, na qual os processos erosivos provocaram o solapamento da base, sobretudo facilitado pelos planos de foliação, criando assim um abrigo. Não constitui ambiente espeleológico propriamente dito e não se adequa ao conceito do fechamento de um plano 0. Foi classificado apenas como abrigo. Foi notada a presença de aracnídeos.



A – Visão geral do abrigo



B – Detalhe do abrigo



C – Detalhe do abrigo



D – Presença de aracnídeos

Figura 53 – CA-17. Esta feição, classificada como abrigo, encontra-se atualmente alagada, como pode ser visto pelas imagens C e D. Imagens A e B foram fornecidas pela Samarco e mostram como era a feição anterior ao alteamento da cota da Barragem de Santarém.



A- Fotografia fornecida pela Samarco (26/02/2015), anterior ao alteamento da Barragem de Santarém



B - Fotografia fornecida pela Samarco (26/02/2015), anterior ao alteamento da Barragem de Santarém



C – Imagem atual obtida pela equipe do Lactec na posição onde se encontrava o abrigo



D– Imagem atual obtida pela equipe do Lactec na posição onde se encontrava o abrigo

Figura 54 – CA-18. Esta feição não se caracteriza como cavidade ou abrigo. Não constitui ambiente espeleológico, não atende aos critérios espeleométricos e também não fecha um plano 0. Trata-se apenas de um afloramento rochoso que sofreu erosão na sua base e que devido à foliação marcante cria um plano “negativo”. Esse afloramento foi atingido pela lama de rejeito.



A – Afloramento rochoso (xistos / filitos).
Não se caracteriza como cavidade e ou abrigo



B - Afloramento rochoso. Não se caracteriza como cavidade e ou abrigo



C – Visão geral do afloramento rochoso



D – Detalhe do afloramento rochoso

Figura 55 – CA-19. Esta feição também não se caracteriza como cavidade ou abrigo. Não constitui ambiente espeleológico e não fecha um plano 0. Igualmente trata-se de um afloramento rochoso que sofreu erosão na sua base e que devido à foliação marcante cria um plano “negativo”. Esse afloramento foi atingido pela lama de rejeito.



A – Visão geral do afloramento rochoso
(xistos / filitos)



B – Visão geral do afloramento rochoso
(xistos / filitos)



C – Detalhe da presença de lama de rejeito



D - Detalhe da presença de lama de rejeito

Figura 56 – CA-20. Para esta feição, de acordo com as vistorias realizadas pelo Lactec, foi mantida a classificação estabelecida pela Carste como abrigo.



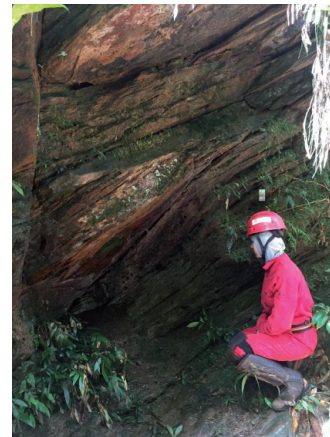
A – Visão geral do abrigo



B – Detalhe da foliação marcante em rochas xistosas



C – Visão geral do abrigo



D – Detalhe do abrigo

3.4.1 HISTÓRICO DOS LEVANTAMENTOS ESPEOLÓGICOS NA ÁREA

Conforme mencionado, em função das necessidades de licenças ambientais tanto para as áreas de lavra, quanto para alteamento da barragem de Santarém, a área da Samarco foi objeto de alguns levantamentos espeleológicos, dentre os quais cabe-se destacar o Relatório para atendimento ao auto de fiscalização – prospecção espeleológica, realizado pela Agroflor Engenharia e Meio Ambiente e o relatório de Topografia de cavidades e abrigos, realizado pela CARSTE, ambos executados em 2013.

De acordo com os referidos documentos é possível perceber divergências quanto a gênese adotada. Segundo a classificação apresentada pela Agroflor, as cavidades e abrigos cadastrados eram de origem antrópicas, associadas a antigas escavações. O relatório elaborado pela Carste trata apenas como feições subterrâneas, conforme Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação inicial das feições subterrâneas definidas pela Carste (2013) e Agroflor (2013).

DENOMINAÇÃO	AGROFLOR 2013	CLASSIFICAÇÃO AGROFLOR 2013	CARSTE 2013	CLASSIFICAÇÃO CARSTE 2013
CA-07	ABRIGO	ESCAVAÇÃO ANTIGA	ABRIGO	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-08	CAVIDADE	ESCAVAÇÃO ANTIGA	CAVIDADE	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-09	ABRIGO	ESCAVAÇÃO ANTIGA	ABRIGO	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-10	ABRIGO	ESCAVAÇÃO ANTIGA	ABRIGO	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-11	CAVIDADE	ESCAVAÇÃO ANTIGA	CAVIDADE	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-12	CAVIDADE	ESCAVAÇÃO ANTIGA	CAVIDADE	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-13	CAVIDADE	ESCAVAÇÃO ANTIGA	CAVIDADE	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-14	CAVIDADE	ESCAVAÇÃO ANTIGA	CAVIDADE	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-15	CAVIDADE	ESCAVAÇÃO ANTIGA	CAVIDADE	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-16	CAVIDADE	ESCAVAÇÃO ANTIGA	CAVIDADE	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-17	ABRIGO	ESCAVAÇÃO ANTIGA	ABRIGO	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-18	CAVIDADE	ESCAVAÇÃO ANTIGA	CAVIDADE	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-19	ABRIGO	ESCAVAÇÃO ANTIGA	ABRIGO	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
CA-20	ABRIGO	ESCAVAÇÃO ANTIGA	ABRIGO	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA
SMD-01	ABRIGO	ESCAVAÇÃO ANTIGA	ABRIGO	FEIÇÃO SUBTERRÂNEA

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As vistorias realizadas pela equipe do Lactec permitiram verificar que das 15 feições vistoriadas no entorno da barragem de Santarém, de acordo com as convenções espeleométricas, apenas 03 (CA-08, CA-12 e CA-14), foram classificadas como cavidades, 07 como abrigo (CA-07, CA-09, CA-10, CA-15, CA-16, CA-17, CA-20 e SMD-01), e 04 foram desconsideradas (CA-11, CA-13, CA-18 e CA-19), pois tratam-se apenas de afloramentos rochosos.

Destaca-se que destas feições, 13 foram atingidas pela passagem e deposição da lama de rejeitos (CA-07 a CA-19). Dentre estas 02 (CA-12 e CA-17), encontram-se permanentemente alagadas devido ao nível da nova cota do reservatório de Santarém.

Cabe-se ressaltar que 03 feições não puderam ser vistoriadas in loco devido a presença de abelhas (CA-07, CA-09 e CA-10). A classificação destas feições foi realizada com base em imagens e dados fornecidos pela Samarco.

Dentre as cavidades vistoriadas, na CA-14, foi realizado registro do maior número de espécies cavernícolas.

As espécies encontradas na Zona de entrada são visitantes ocasionais que oportunamente utilizam o salão (zona de entrada) como abrigo e em parte de seu ciclo de vida. Se incluem nesta situação algumas espécies de aranhas, grilos e mariposas. O anfíbio (*Rhinella* sp) encontrado deve utilizar o local como abrigo eventual, uma vez que a cavidade está próxima a corpo hídrico.

Na cavidade CA-08 foi registrada uma plântula, possivelmente oriunda da dispersão de morcegos frugívoros, indicando o uso do abrigo pela mastofauna.

A maioria dos registros são relacionados aos morcegos. Os morcegos são animais de hábito noturno e compõem a ordem Chiroptera, que é a segunda maior ordem em riqueza de espécies de mamíferos. A ordem Chiroptera possui dezoito famílias, duzentos e dois gêneros e mil cento e vinte espécies (SIMMONS, 2005) distribuídas em praticamente todos os ambientes, exceto nos pólos e em algumas ilhas do Pacífico (HILL e SMITH, 1988). No Brasil são conhecidas nove famílias, sessenta e quatro gêneros e cento e sessenta e sete espécies (REIS et al., 2007).

A principal espécie encontrada foi do morcego vampiro. *Desmodus rotundus* (E. GEOFFROY, 1810) é a espécie mais comum e abundante de morcego vampiro. A pelagem é bastante macia, geralmente cinza brilhante, podendo apresentar também tons avermelhados, dourados ou alaranjados.

D. rotundus é frequentemente encontrado em área de criação de animais como gado, por preferirem o sangue de mamíferos de grande porte. Com isso áreas de pastagem, além de reduzirem a variedade das fontes de alimento de outras espécies de morcegos, como néctar, frutos e insetos, ainda favorecem o aumento no número de morcegos hematófagos, fato esse negativo tanto pelo desequilíbrio provocado, quanto pelo risco de contaminação pelo vírus da raiva, já que estes morcegos são potenciais transmissores da doença (BERNARD, 2005). É freqüentemente capturado em áreas abertas, floresta fragmentada ou contínua (SIMMONS e VOSS 1998). Estrada e Coates-Estrada (2002), sugerem que a espécie utiliza áreas florestais como abrigo e/ou *stepping stones* quando da busca por alimento em áreas de pastagens. Bianconi et al., (2006) corroboram essa idéia com dados de marcação-recaptura obtidos para fragmentos florestais no noroeste do Paraná. Sua associação com ambientes antropizados deve-se ao fato dessas áreas disponibilizarem estoques vivos para a alimentação, como criações de caprinos, suínos e bovinos (AGUILAR, 2007). É considerado um dos principais vetores de transmissão do vírus rábico, sendo, por este motivo, alvo de campanhas intensas de extermínio para o controle da zoonose (BREDT, 1996). Pode também causar grandes prejuízos econômicos, oriundos principalmente da mortandade de animais de criação. Abriga-se em cavidades de árvores, mas preferem utilizar cavernas, onde chegam a formar colônias grandes, com dezenas de indivíduos (GREENHALL et al., 1983).

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGROFLOR – ENGENHARIA E ASSESSORIA EM GESTÃO EMPRESARIAL LTDA. Relatório para atendimento ao auto de fiscalização prospecção espeleológica: alteamento da barragem de Santarém Mina do Germano. 2013.
- AGUILAR, L.M.S. 2007. Subfamília Desmodontinae. p. 39-43, In: Reis, N.R.; Peracchi, A.L.; Pedro, W.A.; Lima, I.P. (Eds.). Morcegos do Brasil. 1 ed. Londrina. Arnone, I.S.; Passos, F.C. 2007.
- AULER, A.S.; PILÓ L.B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. O carste, v. 17, nº 3, 70-72p.
- BARR, T. C. JR. 1967. Observations on the Ecology of caves. The American Naturalist 101 (922): 475-491.
- BARR, T. C. JR., 1968. Cave ecology and evolution of troglobites. Evolutionary Biology 2: 35-102.
- BERNARD, E., 2005 Morcegos hematófagos: sangue, raiva e preconceito. Ciência Hoje, v.36, n.214. p.44-49.
- BIANCONI, G.V.; Mikich, S.B.; Pedro, W.A. 2006. Movements of bats (Mammalia, Chiroptera) in Atlantic Forest remnants in southern Brazil. Revista Brasileira de Zoologia 23(4): 1199-1206.
- BRASIL. Decreto Federal nº 99.556, de 1º de outubro de 1990. Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no Território Nacional. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 1 out. 1990.
- _____. Decreto nº 6.640, de 07 de novembro de 2008. Dispõe sobre nova redação para o Decreto no 99.556, de 01 de outubro de 1990. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 nov. 2008.
- BREDT, A. 1996. Morcegos em áreas urbanas e rurais: manual de manejo e controle. Ministério da Saúde, Fundação Nacional da Saúde, 117p.
- BREDT, A.; Uieda, W.; Magalhães, E.D. 1999. Cave bats from the Distrito Federal area in Mid-Western Brazil (Mammalia, Chiroptera). Revista Brasileira de Zoologia 16(3): 731-770.
- CARSTE. Topografia de cavidades e abrigos: alteamento Barragem Santarém. 2013. Relatório Interno.
- CAVERNAS - CECAV. Rotina de procedimentos associados à coleta de dados relativos à localização de cavidades. Brasília: CECAV, 2009.
- CHABERT, C.; WATSON, R. A. 1981. Mapping and Measuring Caves: A conceptual Analysis. NSS Bulletin, 43: 3-11.
- COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). Mapeamento do supergrupo Rio das Velhas na região do Quadrilátero Ferrífero em escala 1:25.000. Belo Horizonte: 1994.
- CONAMA. Resolução nº 347, de 10 de setembro de 2004. Dispõe sobre a proteção do Patrimônio Espeleológico. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 13 set. 2004.
- Coordenadoria das Promotorias de Justiça de Defesa do Patrimônio Cultural e Turístico Patrimônio Histórico Cultural. Disponível em < http://patrimoniocultural.blog.br/wp-content/uploads/2017/03/Patrimonio-historico-cultural-e-arqueologico-atingidos-diretamente-pelo-rejeito-da-Barragem-Fundao_Comarca-de-Mariana.png >. Acesso em 02 de junho de 2017.
- CULVER, D. C.; PIPAN, T. The biology of caves and other subterranean habitats.
- CULVER, D. C., 1982. Cave Life, Evolution and Ecology. Cambridge, Massachusetts and London, England, Harvard University Press. 189p.
- ESBERARD, C.E.L.; MOTTA, J.A.; PERIGO, C. 2005. Morcegos cavernícolas da Área de Proteção Ambiental (APA) Nascentes do Rio Vermelho, Goiás. Revista Brasileira de Zootecias 7(2): 311-325.
- Estrada, A.; Coates-Estrada, R. 2002. Bats in continuous forest, forest fragments and in a agricultural mosaic habitat-island at Los Tuxtlas, Mexico. Biological Conservation 103: 237-245.
- ESTRADA, A. & COATES-ESTRADA, R. 2001. Species composition and reproductive phenology of bats in a tropical landscape at Los Tuxtlas, México. J. Trop. Ecol. 17:672-646.

- FERREIRA, R. L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. *Revista O Carste*, v.3, n.17, p106-115, 2005.
- FERREIRA, R.L. & MARTINS, R.P. 1999b. Trophic Structure and Natural History of Bat Guano Invertebrate Communities with Special Reference to Brazilian Caves. *Tropical Zoology*. 12 (2): 231-59
- FERREIRA, R.L. A vida subterrânea nos campos ferruginosos. *O Carste*, Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, Belo Horizonte, julho/2005, v. 17, nº3. 106-115p.
- FERREIRA, R.L., & MARTINS, R.P. 1999a. Guano de morcegos: fonte de vida em cavernas: *Ciência Hoje*. 25 (146): 34-40.
- GILLIESON, D. *Caves: Processes, Development, Management*. Oxford: Blackwell Publishers. 1996. 324 p.
- GREENHALL, A.M.; JOERMANN, G.; SCHMIDT, U.; SEIDEL, M.R. 1983. *Desmodus rotundus*. *Mammalian Species* 202: 1-6.
- GREGORIN, R.; MENDES, L.F. 1999. On Chiroptera (Emballonuridae, Phyllostomidae, Natalidae) of two caves at Chapada Diamantina, Bahia, Brazil. *Iheringia (Serie Zoologia)* 86: 121-124.
- INSTITUTOS LACTEC. Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. Relatório de linha-base: volume I – meio físico. Curitiba: Institutos Lactec, 2017.
- KALKO, E.K.V.; HANDLEY JR., C.O. 2001. Neotropical bats in the canopy: diversity, community structure, and implications for conservation. *Plant Ecology* 153: 319-333.
- KUNZ AND M. B. FENTON (EDS.). *BAT ECOLOGY*. CHICAGO: UNIVERSITY OF CHICAGO PRESS. LEÃO, T.C.C.; LÔBO, D.; DA SILVA, E.J. 2003. Conservação, geologia e levantamento da fauna de invertebrados associados ao guano da caverna do Urubu (SE10), Riachuelo, Sergipe. p. 135-139, In: *Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Ecologia*.
- KUNZ, T.H. 1982. Roosting ecology of bats. p 1-55, In: Kunz T. H. (Ed.). *Ecology of bats*. New York: Plenum Press.
- KUNZ, T.H.; LUMSDEN, L.F. 2003. Ecology of cavity and foliage roosting bats. p. 3-89, In T. H.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. 2009. Gabinete do Ministro. Portaria nº 358, de 30 de setembro de 2009. Institui o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico. *Diário Oficial da União*, Brasília, 1 de outubro de 2009, Seção 1, n. 188, p.63-64.
- MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Instrução Normativa Nr. 02 de 20 de agosto de 2009. Disciplina o Decreto 6.640/08 e estabelece a metodologia para a análise de relevância das cavidades naturais subterrâneas.
- MOHR, C. E. e POULSON, T. L.; 1966- *The Life of the Cave*. Mc. Graw-Hill Book Co., N. Y., 232 pp.
- New York: Oxford University Press, 2009. 254p.
- PINTO-DA-ROCHA, R. 1995. Sinopse da fauna cavernícola do Brasil (1907-1994). *Papéis Avulsos de Zoologia*, 39 (6): 61 - 173.
- POULSON. T.L. & WHITE, W.B. *The cave environment*. 1969. Science
- REIS, N.R.; MULLER, M.F. 1995. Bat diversity of forests and open areas in a subtropical region of South Brazil. *Ecologia Austral* 5: 31-36.
- REIS, N.R.; PERACCHI, A.L.; PEDRO, W.A.; Lima. *MORCEGOS DO BRASIL*. 1 ed. Londrina, 2007.
- RUBBIOLI, E.; MOURA, v. 2005. *Mapeamento de Cavernas: Guia Prático*. São Paulo: Redespeleo Brasil. 92p.
- SANCHEZ, L.E. 1986. *Bibliografia espeleológica brasileira*. Ciência e Cultura.
- SBE. Sociedade Brasileira de Espeleologia (www.sbe.com.br)
- SILVEIRA NETO, S., NAKANO, O., BARBIN, D. & VILLA NOVA, N. A., 1976. *Manual de Ecologia dos insetos*. Ed. Agr. Ceres, Piracicaba, SP, 418pp.

- Simmons N.B. 2005. Order Chiroptera; p. 312-529 In D.E. Wilson and D.M. Reeder (ed.) Mammals species of the world: a taxonomic and geographic reference. Baltimore: The John Hopkins University Press.
- SIMMONS, G.C. Canga Caves in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. The National Speleological Society Bulletin 25: 66-72. Traduzido por Augusto Auler: Cavernas em canga no Quadrilátero Ferrífero. In: O Carste, Grupo Bambuí de Pesquisas Espeleológicas, Belo Horizonte, julho/2005, v. 17, nº3. 74-77p.
- SIMMONS, N.B.; VOSS, R.S. 1998. The mammals of Paracou, French Guiana: a neotropical lowland rainforest fauna. part 1. Bats. Bulletin of the American Museum of Natural History 237: 1-219.
- TRAJANO, E. & P. GNASPINI-NETTO. 1991. Composição da fauna cavernícola brasileira, com uma análise da distribuição dos taxons. Revista Brasileira de Zoologia, 7 (3): 383 - 407.
- TRAJANO, E. 1996. Movements of cave bats in southeastern Brazil, with emphasis on the population ecology of the common vampire bat, *Desmodus rotundus*. Biotropica 28(1): 121-129.
- TRAJANO, E.; GIMENEZ, E.A. 1998. Bat community in a cave from eastern Brazil, including a new record of *Lionycteris* (Phyllostomidae, Glossophaginae). Studies on Neotropical Fauna and Environment 33: 69-75.

4 HIDROLOGIA

Neste capítulo são apresentados dois temas referentes a hidrologia. O primeiro tema se refere a comparação da intensidade da chuva entre o período anterior ao desastre e após o desastre. O objetivo dessa análise é avaliar quão severo está sendo o regime de chuva na região no período após o desastre. Estas informações são úteis para outras análises, já que a intensidade de muitos fenômenos podem estar associados com a chuva. O segundo tema se refere a avaliação das modelagens hidrosedimentológicas já realizadas no rio Doce.

4.1 ANÁLISE DE CHUVA MÉDIA NA BACIA APÓS O DESASTRE

Na caracterização da linha base foram apresentados mapas de isoietas utilizando 69 estações pluviométricas localizadas na bacia do rio Doce, obtidas junto à Agência Nacional de Águas do Brasil (ANA). No presente relatório, será apresentada uma análise da chuva média na bacia no período pós-desastre, comparando com os valores da média histórica antes do evento.

A avaliação da chuva não se dá no sentido de verificar alterações provocadas na precipitação em virtude do desastre, pois as alterações na bacia (do ponto de vista climático) foram muito pequenas e, ainda que fossem significativas, pouco provavelmente seriam perceptíveis em curto prazo.

Portanto, esta análise aqui apresentada tem o intuito de mostrar variações naturais da chuva na região ocorridas após o evento e que podem eventualmente explicar alterações em parâmetros da qualidade da água ou outros elementos estudados no pós-desastre.

4.1.1 DADOS UTILIZADOS, PERÍODOS E ÁREAS DE ESTUDO

Durante a etapa de estudos da Linha Base, foram selecionadas 69 estações pluviométricas da bacia do rio Doce. Estas mesmas estações (apresentadas aqui na Tabela 11 e na Figura 57) foram utilizadas na análise atual, possibilitando uma comparação adequada entre período pré e pós-desastre.

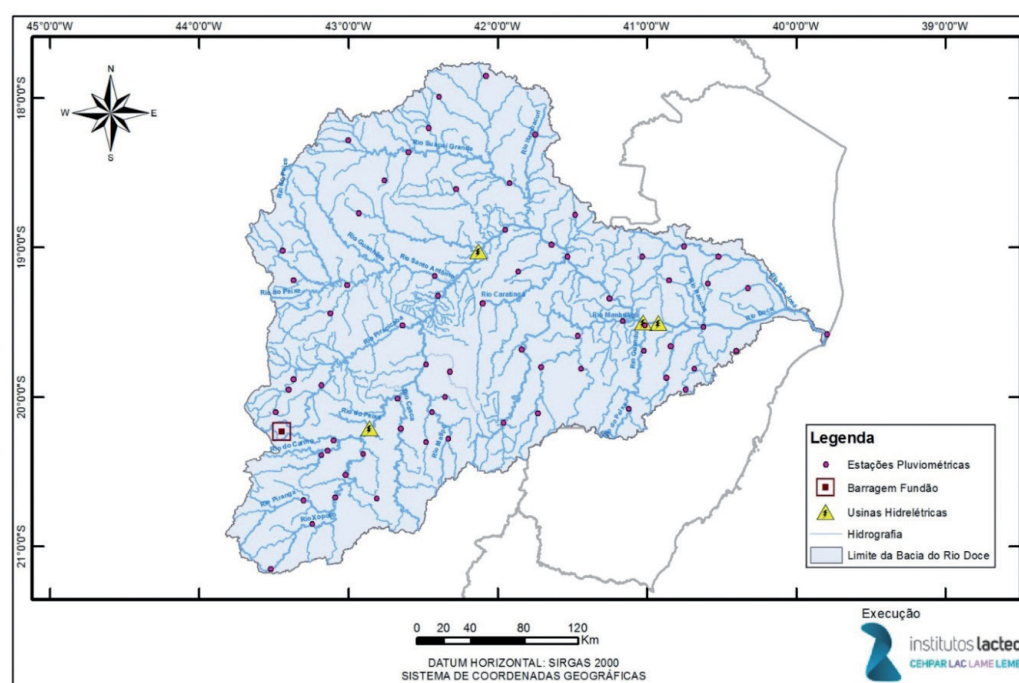
As séries das estações consistem em acumulados diários de precipitação e foram obtidos junto à ANA, utilizando a plataforma *Hidroweb*.

Tabela 11 – Rede de monitoramento selecionada para as análises pluviométricas.

Código	Latitude	Longitude	Código	Latitude	Longitude	Código	Latitude	Longitude
1742017	-17,8456	-42,0756	1940020	-19,955	-40,7417	1943007	-19,9453	-43,4011
1742019	-17,9922	-42,3939	1940023	-19,2742	-40,3208	1943008	-19,4403	-43,1186
1840000	-18,9856	-40,7461	1941000	-19,7989	-41,7061	1943025	-19,2175	-43,3742
1841001	-18,5747	-41,9178	1941003	-19,5236	-41,0142	1943027	-19,8808	-43,3675
1841003	-18,2386	-41,7486	1941004	-19,3431	-41,2461	2041008	-20,1081	-41,7283
1841011	-18,9764	-41,6403	1941005	-19,0617	-41,5328	2041023	-20,0786	-41,1214
1841019	-18,7769	-41,4828	1941006	-19,5947	-41,4581	2041048	-20,1706	-41,9611
1841020	-18,8831	-41,9503	1941009	-19,6911	-41,02	2042008	-20,1036	-42,44
1842004	-18,3631	-42,6022	1941010	-19,4925	-41,1617	2042010	-20,2989	-42,4781
1842005	-18,6119	-42,2786	1941011	-19,6783	-41,8361	2042011	-20,2147	-42,6522

Código	Latitude	Longitude	Código	Latitude	Longitude	Código	Latitude	Longitude
1842007	-18,7722	-42,9311	1941012	-19,0592	-41,0275	2042016	-20,6825	-42,8067
1842008	-18,2011	-42,4553	1941018	-19,1617	-41,8622	2042017	-20,2772	-42,3256
1842020	-18,5528	-42,7642	1941019	-19,8111	-41,4378	2042018	-20,3847	-42,9028
1843012	-18,2797	-43,0006	1942002	-19,8336	-42,3178	2042031	-20,0114	-42,6742
1939002	-19,5775	-39,7944	1942006	-19,9989	-42,3475	2043009	-20,3625	-43,1439
1940000	-19,8744	-40,8744	1942008	-19,3736	-42,105	2043010	-20,6906	-43,2994
1940001	-19,8053	-40,6789	1942029	-19,5247	-42,6442	2043011	-20,39	-43,1803
1940005	-19,6922	-40,3981	1942030	-19,3164	-42,3961	2043014	-20,6703	-43,0881
1940006	-19,5308	-40,6231	1942031	-19,7769	-42,4769	2043025	-20,5167	-43,0167
1940009	-19,2203	-40,8533	1942032	-19,1886	-42,4228	2043026	-20,8475	-43,2419
1940012	-19,6636	-40,8353	1943001	-19,9228	-43,1778	2043027	-20,2856	-43,0989
1940013	-19,2375	-40,5914	1943002	-19,0167	-43,4442	2043059	-20,0969	-43,4881
1940016	-19,0578	-40,5164	1943003	-19,2503	-43,0144	2143003	-21,1492	-43,52

Figura 57 – Rede de monitoramento selecionada para as análises pluviométricas.

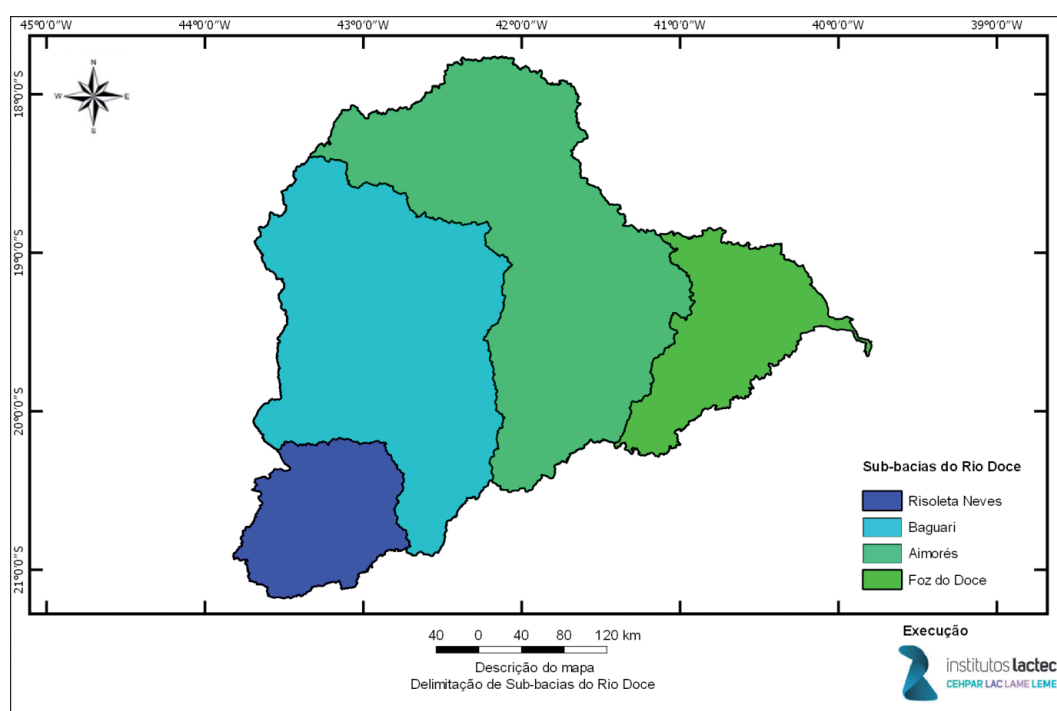


Na determinação da linha base, foi escolhido o período de 1985 a 2015, e é a média neste período que será utilizada para comparar com os períodos de interesse no pós-desastre. Tais períodos foram definidos com base nos dados das estações de qualidade da água, uma vez que esta análise da precipitação subsidiará estudos de parâmetros de qualidade da água. A Tabela 12 mostra os períodos selecionados.

Tabela 12 – Períodos de estudo considerados.

Nome	Início	Final	Observação
T0	Linha base		-
T1	Novembro/2015		Mês de ocorrência do evento
T2	Dezembro/2015	Março/2016	Mês após o evento até final do período úmido
T3	Abril/2016	Setembro/2016	Período seco
T4	Outubro/2016	Março/2017	Período úmido
T5	Julho/2016	Setembro/2017	Parte do período seco com dados de qualidade da água
T6	Outubro/2016	Dezembro/2017	Início do período úmido e limite da disponibilidade de dados

Também considerando os estudos de qualidade da água, foram definidas quatro sub-bacias, divididas pelos 3 maiores reservatórios da região, de montante para jusante da bacia: Risoleta Neves, Baguari, Aimorés e Foz do Doce. A localização destas áreas é apresentada na Figura 58.

Figura 58 – Localização das sub-bacias de interesse.

Na Figura 58 as bacias estão sobrepostas, mas cada sub-bacia a jusante contém, além da área indicada, também as áreas das sub-bacias a montante delas. A Tabela 13 mostra as áreas de drenagem de cada bacia indicada e o número de estações pluviométricas em cada uma.

Tabela 13 – Períodos de estudo considerados e quantidade de estações pluviométricas.

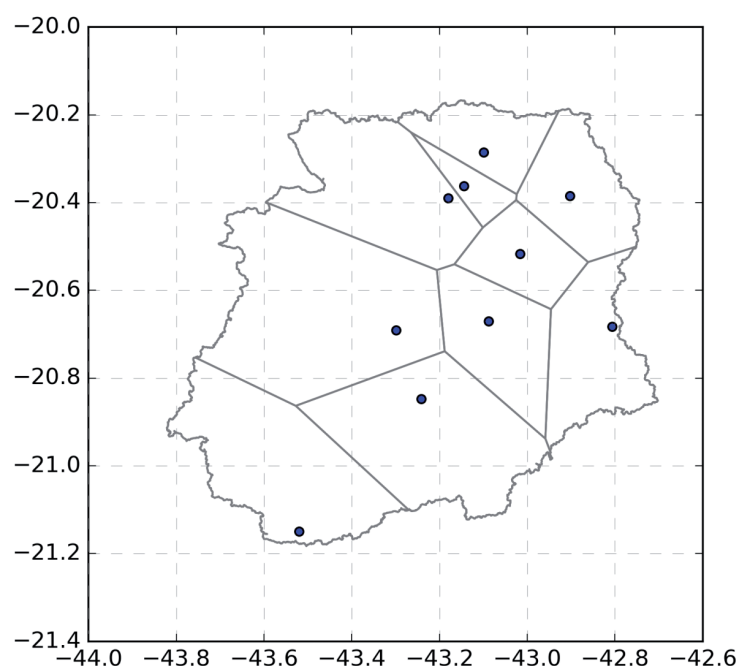
Sub-bacia	Área de drenagem (km ²)	Quantidade de estações
Risoleta Neves	9.141	10
Baguari	38.961	30
Aimorés	72.648	53
Foz do Doce	83.862	69

4.1.2 METODOLOGIA

De posse dos dados das estações, inicialmente foi calculada a precipitação média diária nas quatro sub-bacias apresentadas na Tabela 13. Esta estimativa foi realizada com dois métodos de interpolação amplamente utilizados em estudos climáticos: método de Thiessen (Thiessen, 1911), e o IDW - *Inverse Distance Weighted* – (Watson e Phillips, 1985).

No método de Thiessen, polígonos são desenhados a partir de segmentos de reta traçados entre as coordenadas das estações e segmentos perpendiculares passando pelo ponto médio dos primeiros. A Figura 59 mostra um exemplo de polígonos gerados para a sub-bacia Risoleta Neves.

Figura 59 – Polígonos de Thiessen gerados para sub-bacia Risoleta Neves.



Determinados os polígonos e calculadas as áreas de cada um deles, a precipitação média na sub-bacia é dada pela equação:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i P_i}{A}$$

onde $\bar{P}$ é a precipitação média, A_i é a área do polígono da estação i , P_i é a precipitação da estação i , n é o número de estações e A é a área total da sub-bacia.

Na estimativa da precipitação pelo método IDW, é construída uma grade de pontos para a bacia e a precipitação em cada ponto de grade é estimada pela equação:

$$P_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

onde P_{xy} é a precipitação no ponto de grade de coordenadas x e y , P_i é a precipitação na estação i , d é a distância do ponto de coordenadas x e y até a estação i , n é o número de estações e p é a potência escolhida para determinar o peso da distância.

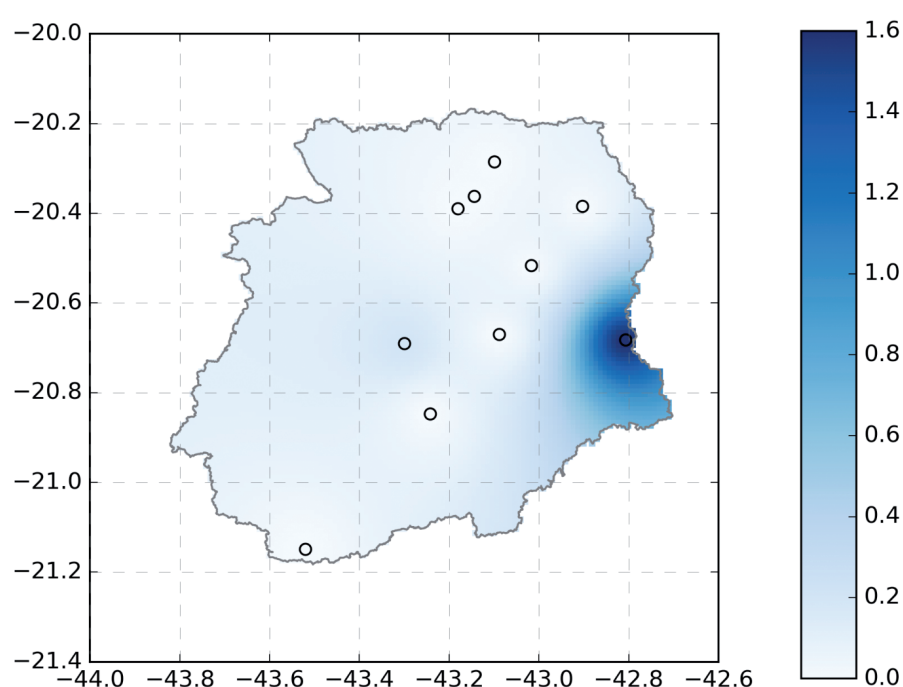
A média da sub-bacia é então calculada por:

$$\bar{P} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^n P_{xy_i}$$

onde $\bar{P}$ é a precipitação média, k é o número de pontos de grade, P_{xy_i} é a precipitação do ponto de grade de coordenadas x e y enquanto i é um índice para cada ponto de grade.

A Figura 60 mostra um exemplo de estimativa de precipitação utilizando o método IDW para a sub-bacia Risoleta Neves.

Figura 60 – Exemplo de grade para geração de chuva média pelo método IDW para sub-bacia Risoleta Neves.



Com a média diária de precipitação para cada sub-bacia, foram calculadas as climatologias mensais (janeiro a dezembro) e a climatologia dos períodos seco (acumulado de abril a setembro) e úmido (acumulado de outubro a março), para o período de 1985 a 2015.

O mesmo procedimento foi adotado aos dados disponíveis para o período pós-desastre. Assim foi possível comparar o acumulado de precipitação de cada um dos períodos descritos na Tabela 2 (T1 a T6) com o período da linha base.

Foram preparadas tabelas indicando a diferença entre os períodos de estudo do pós-desastre com o período pré-desastre de modo a entender o quão seco ou o quão chuvoso foi um determinado período em relação à média histórica. Essas diferenças são apresentadas tanto em valores absolutos como em valores percentuais.

4.1.3 RESULTADOS

A Tabela 14 mostra as médias dos acumulados mensais e dos períodos seco e úmido para cada sub-bacia.

Tabela 14 – Médias nas sub-bacias de acumulados mensais e acumulados dos períodos seco e úmido, utilizando método de Thiessen e Método IDW.

Mês/Período	Risoleta Neves		Baguari		Aimorés		Foz do Doce	
	Thiessen	IDW	Thiessen	IDW	Thiessen	IDW	Thiessen	IDW
Janeiro	275,14	267,73	243,39	245,95	213,31	214,27	205,24	204,40
Fevereiro	150,58	144,98	132,3	131,24	113,83	113,01	110,08	108,61
Março	166,03	162,95	160,8	160,18	142,6	142,05	141,04	140
Abril	71,79	71,19	70,28	69,87	63,45	63,36	63,6	63,37
Maio	35,67	35,61	34,46	34,68	32,72	32,72	33,12	33,23
Junho	13,12	12,93	15,12	14,36	14,42	14,13	15,96	15,94
Julho	10,73	10,6	9,52	9,36	10,05	9,82	11,94	11,96
Agosto	14,95	15,02	14,5	14,52	14,6	14,56	16,66	16,77
Setembro	57,28	56,22	45,45	45,86	40,08	40,19	39,41	39,29
Outubro	104,65	102,31	97,95	97,66	91,46	91,29	90,96	90,57
Novembro	220,09	217,78	223,01	222,87	211,25	210,96	207,89	206,97
Dezembro	284,27	281,48	297,12	296,25	274,48	273,69	266,51	264,7
Seco (abril a setembro)	203,53	201,59	189,31	188,64	175,32	174,77	180,69	180,56
Úmido (outubro a março)	1200,75	1177,25	1154,57	1154,15	1046,93	1045,29	1021,72	1015,25

Como as diferenças entre os valores obtidos pelos métodos foram pequenas (abaixo de 1% na média) serão apresentados apenas os resultados referentes ao método IDW, por ser um método mais recente e mais utilizado.

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos para o período T1, novembro de 2015.

Tabela 15 – Período T1 – observado, média histórica e diferença.

Sub-bacia	Observado (mm)	Média histórica (mm)	Diferença (mm)	Diferença (%)
Risoleta Neves	180,49	217,78	-37,29	-17,12
Baguari	160,46	222,87	-62,41	-28,00
Aimorés	133,64	210,96	-77,32	-36,65
Foz do Doce	121,04	206,97	-85,93	-41,52

O mês de ocorrência do evento apresentou acumulados de precipitação menores do que média histórica em todas as bacias, sobretudo na Foz do Doce, chegando a atingir um valor menor do que 40% do esperado para o mês.

A Tabela 16 mostra os resultados obtidos para o período T2, entre dezembro e março de 2016.

Tabela 16 – Período T2 – observado, média histórica e diferença.

Sub-bacia	Observado (mm)	Média histórica (mm)	Diferença (mm)	Diferença (%)
Risoleta Neves	825,94	857,14	-31,2	-3,64
Baguari	762,57	833,62	-71,05	-8,52
Aimorés	660,71	743,02	-82,31	-11,08
Foz do Doce	612,42	717,71	-105,29	-14,67

Os valores obtidos para o período T2 indicam, assim como para o período T1, menos chuva do que o indicado pela média histórica, mas, principalmente nas duas primeiras bacias mais à montante, os acumulados não foram tão diferentes do esperado para aqueles meses, com o maior percentual de diferença inferior a 15%.

Este comportamento é semelhante ao resultado obtido para o T3 (Tabela 17).

Tabela 17 – Período T3 – observado, média histórica e diferença.

Sub-bacia	Observado (mm)	Média histórica (mm)	Diferença (mm)	Diferença (%)
Risoleta Neves	195,68	201,59	-5,91	-2,93
Baguari	192,18	188,64	3,54	1,88
Aimorés	168,71	174,77	-6,06	-3,47
Foz do Doce	159,6	180,56	-20,96	-11,61

Neste que foi o primeiro período seco completo analisado (abril a setembro de 2016), as diferenças em relação à média foram as menores considerando todos os períodos de estudo, e Baguari foi a primeira sub-bacia que indicou precipitação mais alta quando comparada à média histórica.

O primeiro período úmido (outubro de 2016 a março de 2017) não foi diferente dos demais e teve chuvas abaixo da média, como mostra a Tabela 18.

Tabela 18 – Período T4 – observado, média histórica e diferença.

Sub-bacia	Observado (mm)	Média histórica (mm)	Diferença (mm)	Diferença (%)
Risoleta Neves	884,73	1177,25	-292,52	-24,85
Baguari	957,52	1154,15	-196,63	-17,04
Aimorés	880,14	1045,29	-165,15	-15,80
Foz do Doce	852,76	1015,25	-162,49	-16,00

Diferenças consideráveis foram percebidas no T4, principalmente em Risoleta Neves. A precipitação naquela sub-bacia atingiu um valor mais de 290 mm abaixo da climatologia, o que é mais do que o esperado para o mês de dezembro (281,48 mm, como indicado na Tabela 14).

A Tabela 19, por sua vez, mostra a situação da chuva para o T5.

Tabela 19 – Período T5 – observado, média histórica e diferença.

Sub-bacia	Observado (mm)	Média histórica (mm)	Diferença (mm)	Diferença (%)
Risoleta Neves	4,89	81,84	-76,96	-94,03
Baguari	6,88	69,74	-62,85	-90,13
Aimorés	12,38	64,57	-52,19	-80,83
Foz do Doce	23,50	68,02	-44,52	-65,45

Valores muito abaixo do esperado foram observados neste que é parte do período seco do ano de 2017 (julho a setembro). As diferenças chegaram a mais de 94% em Risoleta Neves.

A última tabela (Tabela 20) aborda os três últimos meses de 2017 (outubro a dezembro).

Tabela 20 – Período T6 – observado, média histórica e diferença.

Sub-bacia	Observado (mm)	Média histórica (mm)	Diferença (mm)	Diferença (%)
Risoleta Neves	452,30	601,57	-149,28	-24,81
Baguari	505,78	616,78	-111,01	-18,00
Aimorés	460,15	575,94	-115,8	-20,11
Foz do Doce	454,70	562,24	-107,54	-19,13

A chuva também foi abaixo do esperado no T6, com diferenças expressivas. Como comparação, os 149,28 mm abaixo da média histórica para Risoleta Neves representam mais do que o esperado para todo o mês de outubro desta sub-bacia (102,31 mm).

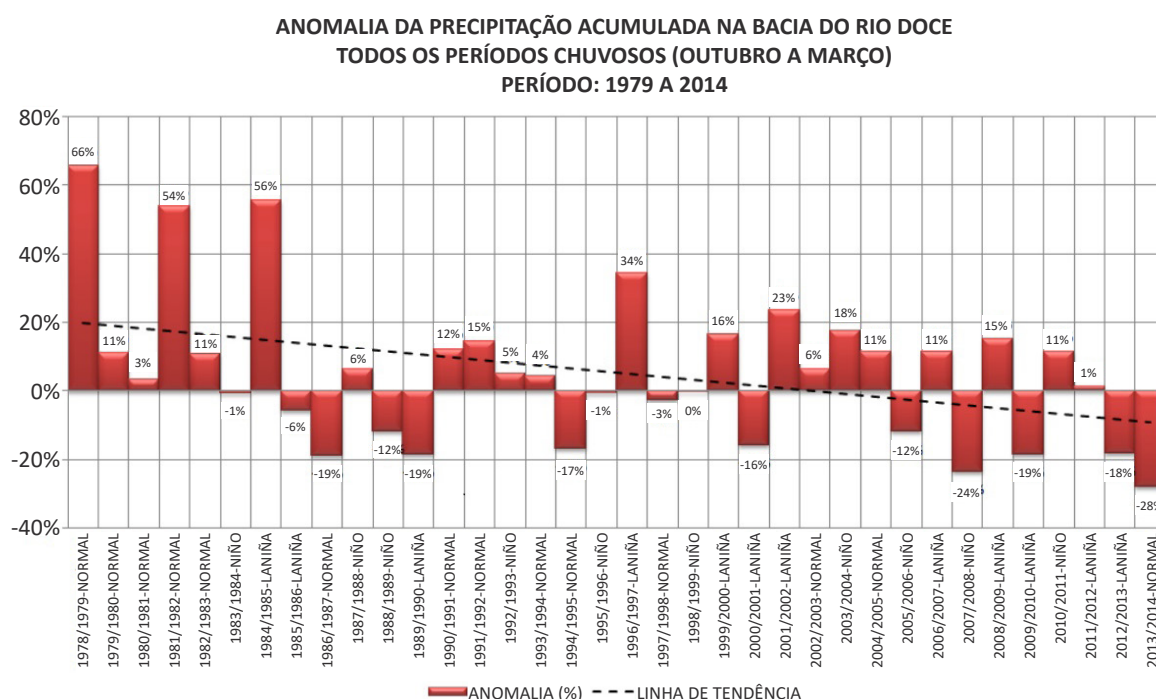
4.1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As diferenças de precipitação mais significativas encontradas foram nos períodos T4 a T6, sobretudo no T5. Neste último (período seco do ano de 2017 - julho a setembro), os valores foram cerca de 90% mais baixos em Risoleta Neves e Baguari, quando comparados com a climatologia. Esta variação na chuva implica em vazões mais baixas nestas regiões e, consequentemente, pode ter um papel relevante na qualidade da água da região.

Principalmente por se tratar de um período curto, as demais variações de precipitação obtidas são bastante razoáveis.

A Figura 61 mostra uma análise da precipitação na estação úmida da bacia do rio Doce, apresentada pelo Instituto Mineiro de Gestão de Águas (IGAM).

Figura 61 – Análise de anomalias de precipitação da Bacia do rio Doce para períodos chuvosos.
Fonte – IGAM, 2015.



O gráfico da Figura 61 mostra valores mais baixos de precipitação ocorrendo nos anos mais recentes. Os resultados obtidos em nosso estudo estão coerentes com esta tendência.

A diferença de cerca de -16% obtida para a sub-bacia Foz do Doce (que na prática é a bacia do rio Doce) no único período úmido completo de nossa análise (T4) está numa faixa bastante recorrente de variação de precipitação, o que também fica evidenciado pela Figura 61.

Conforme mais dados de precipitação estejam disponíveis, esta análise pode ser ampliada a mais períodos, auxiliando os estudos de qualidade da água, entre outros.

4.2 MODELAGEM HIDROSSEDIMENTOLÓGICA NO RIO DOCE

Algumas pesquisas relacionadas com a modelagem e a compreensão dos processos hidrossedimentológicos do rio Doce foram desenvolvidas por pesquisadores do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) em períodos recentes.

A modelagem hidrossedimentológica é analisada porque será uma ferramenta utilizada para quantificar os danos ocorridos na Bacia do Rio Doce. Assim, os resultados aqui compilados definirão quais as melhores abordagens para avaliar os danos referentes ao transporte de sedimentos na bacia.

A seguir são apresentados os contextos e os principais resultados obtidos com estas pesquisas, divididos em trabalhos de: (i) desenvolvimento de modelos e compreensão de processos de grande escala; (ii) estudos de comparação de modelagens de turbidez; (iii) avaliação de modelos simplificados de propagação de ondas de sedimentos.

4.2.1 DESENVOLVIMENTO DE MODELOS E COMPREENSÃO DE PROCESSOS DE GRANDE ESCALA

Em relação a modelagem hidrossedimentológica na bacia, destacam-se os trabalhos apresentados por Fagundes et al. (2017a, 2017b, 2017c) que buscaram desenvolver um modelo hidrossedimentológico completo de toda a grande bacia hidrográfica do Rio Doce, bem como validar e entender os processos que ocorrem nela através de dados observados em campo disponíveis para acesso e de imagens de sensoriamento remoto.

O modelo utilizado por Fagundes et al. (2017a, 2017c) foi o MGB-SED, uma versão do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) capaz de simular os processos hidrossedimentológicos. A seguir, o modelo MGB-SED é detalhado. Posteriormente são revisados os principais resultados das modelagens.

4.2.1.1 Modelo MGB-SED

O modelo hidrológico MGB-IPH, foi desenvolvido por Collischonn (2001) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Desde então, vem sendo aprimorado e validado em diversos estudos como nos trabalhos realizados por Paiva (2009), Fan & Collischonn (2014), Pontes, et al. (2015), Fan (2015), Fleischmann, et al. (2017) e Lopes (2017).

Modelos hidrológicos, como o MGB-IPH, realizam uma transformação chuva-vazão, simulando a descarga fluvial gerada por um evento de precipitação e suas interações com os aspectos bióticos e abióticos da bacia hidrográfica (LOPES, 2017). Preliminarmente, a estrutura do modelo foi baseado no modelo LARSIM (BREMICKER, 1998), com simplificação do seu módulo de balanço de água no solo, o módulo de evapotranspiração seguiu o modelo de Shuttleworth (1993) e Wigmosta, *et al* (1994) e o módulo de escoamento foi desenvolvido a partir da metodologia de Muskingum-Cunge, descrita por Tucci (1998), que segundo Paiva (2009), é muito eficiente em casos onde os efeitos de jusante e de armazenamento nas planícies de inundação não são importantes. A bacia hidrográfica é representada por uma subdivisão em minibacias, ligadas entre si por canais de drenagem. A simulação inclui os processos de balanço de água no solo, precipitação, interceptação, evapotranspiração, infiltração, escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos, além de armazenamento de água no solo, que fazem parte do ciclo hidrológico (LOPES, 2017).

Além disso, as minibacias são subdivididas em Unidades de Respostas Hidrológicas (URH ou HRU – *Hydrological Response Unit*), isto é, áreas que possuem comportamento hidrológico similar, devido a características físicas relacionadas ao solo e à cobertura vegetal (FAN & COLLISCHONN, 2014). Assim, os processos hidrológicos verticais são simulados em níveis de URH, os volumes gerados são somados e propagados pelas minibacias e, posteriormente, propagados pela rede de drenagem (PAIVA, 2009).

O modelo MGB-IPH é o modelo hidrológico que deu origem ao modelo hidrossedimentológico MGB-SED.

O modelo MGB-SED, desenvolvido por Buarque (2015), é um módulo de sedimentos acoplado ao modelo hidrológico de grandes bacias, o MGB-IPH (COLLISCHONN, 2001; COLLISCHONN, et al., 2007), que foi aplicado pela primeira vez na bacia do Rio Madeira com versão de propagação de vazões desenvolvida por Paiva (2009).

Segundo Buarque (2015), um dos grandes desafios encontrados na simulação hidrossedimentológica de grandes bacias é devido ao fato de haver um grande percurso entre a geração de sedimentos e sua chegada ao exutório, de forma que parte desses sedimentos são depositados ao longo do curso d'água. Assim, é necessário haver uma integração entre os processos de erosão e de transporte dos sedimentos adequadamente (BUARQUE, 2015). A seguir, são apresentados resumidamente os processos matemáticos que envolvem o modelo MGB-SED, mais detalhes podem ser encontrados em Buarque (2015) e Buarque, et al. (2016).

4.2.1.1.1 Módulo bacia

Segundo Buarque (2015), é nessa etapa que ocorre a estimativa da geração e o aporte de sedimentos da camada superficial do solo das minibacias para a rede de drenagem. A erosão, calculada por minibacia para cada URH, é estimada através da equação MUSLE (WILLIAMS & BERNDT, 1972), que utiliza o volume de escoamento superficial e a taxa de pico de escoamento, a partir do módulo hidrológico MGB-IPH. Ainda, é utilizado o conceito de reservatório linear simples, para simular o retardo dos sedimentos, gerados nas minibacias, para a rede de drenagem.

A equação MUSLE (WILLIAMS, 1975) é aplicada a cada pixel que compõe as URHs de uma minibacia, de acordo com Buarque (2015). Assim, são calculados parâmetros diretamente do MDE, que traz informações topográficas em formato raster, uma vez que sua representação espacial é dada na forma de uma matriz com l linhas e c colunas, onde as $l \times c$ posições são definidas como pixels (BUARQUE, 2015). A equação é dada por:

$$SED_{i,j}^k = 11,8 \cdot (Dsup_{i,j}^k \cdot qpico_{i,j}^k \cdot Apm_{i,j}^k)^{0,56} \cdot K_j \cdot C_j \cdot P_j \cdot LS_{i,j}^k \cdot FG_j \quad (1)$$

em que, SED [t] é a carga de sedimentos resultante da erosão do solo; $Dsup$ [mm/ha] é o volume de escoamento superficial; $qpico$ [m³/s] é a taxa de pico do escoamento superficial; Apm [ha] é a área do pixel; K [0,013.t.m².h/(m³.t.cm)] é o fator de erodibilidade do solo; C [-] é o fator de cobertura e manejo do solo; P [-] é o fator de práticas conservacionistas; LS [-] é o fator topográfico; FG [-] é o fator que considera a existência de fragmentos grosseiros ou rochas; i e j [-] são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente; k [-] é o pixel ao qual a equação está sendo aplicada.

A taxa de pico do escoamento superficial, em cada pixel, é dada considerando um volume de escoamento uniforme diário e o volume de escoamento é fornecido pelo módulo hidrológico MGB-IPH (BUARQUE, 2015), como é apresentado a seguir:

$$qpico_{i,j}^k = \frac{Dsup_{i,j}^k \cdot A_{i,j}^k}{86,4} \quad (2)$$

em que, $qpico$ [m³/s] é a taxa de pico do escoamento superficial; $Dsup$ [mm/ha] é o volume de escoamento superficial; A [ha] é a área de cada pixel para cada minibacia em uma URH.

Segundo Buarque (2015), o fator de erodibilidade do solo (K) é calculado a partir da Equação 3, originalmente implementada no modelo EPIC (WILLIAMS, 1995) e, também, utilizada no modelo SWAT (ARNOLD, et al., 1998). Para utilizar essa equação, são necessárias informações sobre porcentagens de silte, de argila, de areia e de matéria orgânica em cada tipo de solo da bacia, como é apresentado a seguir:

$$K_j = Fag_j \cdot Fcs_j \cdot Forg_j \cdot Fa_{jj} \quad (3)$$

em que, $K [-]$ é o fator de erodibilidade do solo; $Fag [-]$ é o fator de areia grossa, que fornece baixos valores de K para solos com grande quantidade de areia grossa e altos valores para solos com pouca areia; $Fcs [-]$ é o fator argila-silte, ele reduz o valor de K para solos com grandes quantidades de silte; $Forg [-]$ é o fator carbono orgânico, que reduz o valor de K para elevadas quantidades elevadas de carbono orgânico; $Fa [-]$ é o fator areia, que reduz o valor de K para grandes quantidades de areia; $j [-]$ é o índice que indica a URH. As equações de Williams (1995) que calculam esses fatores são descritas por Buarque (2015) e apresentadas a seguir, através das Equações 4, 5, 6 e 7:

$$Fag_j = 0,2 + 0,3 \cdot \exp \left[-0,256 \cdot SAN_j \cdot \left(1 - \frac{SIL_j}{100} \right) \right] \quad (4)$$

$$Fcs_j = \left(\frac{SIL_j}{ARG_j + SIL_j} \right)^{0,3} \quad (5)$$

$$Forg_j = 1 - \frac{0,25 \cdot orgC_j}{orgC_j + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC_j)} \quad (6)$$

$$Fa_j = 1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right)}{\left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right) + \exp \left[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{SAN_j}{100} \right) \right]} \quad (7)$$

em que, $SAN [\%]$ é a porcentagem de areia presente na camada superior do solo; $SIL [\%]$ é a porcentagem de silte presente na camada superior do solo; $ARG [\%]$ é a porcentagem de argila presente na camada superior do solo; $orgC [\%]$ é a porcentagem de carbono orgânico presente na camada superior do solo; $j [-]$ é o índice que indica a URH.

O fator de cobertura e manejo do solo (C) é utilizado na equação MUSLE para expressar o ciclo de manejo de determinado uso do solo, como o preparo do solo, a cobertura vegetal e a sequência de plantios a serem feitos, apresentando uma relação entre as perdas de solo que ocorrem em determinadas condições e as perdas de solo que ocorrem quando o mesmo solo permanece continuamente sem cobertura vegetal (CARVALHO, 2008). De acordo com Carvalho (2008), o fator C não possui um valor único, ele pode variar de 1,0 (áreas sem nenhuma vegetação) até 0,0001 (áreas de florestas virgens). O ciclo de determinada planta e a geração de resíduos causada por ela determinam a proteção que determinada cultura apresentará no solo, assim, o valor deve ser estimado a partir do uso e cobertura vegetal do solo da região (BUARQUE, 2015). No modelo, o valor C deve ser estimado de acordo com as classes de URHs.

O fator de práticas conservacionistas (P) determina como o plantio foi realizado, mostrando uma relação entre plantios com práticas conservacionistas e plantios em encostas íngremes. Plantio morro abaixo apresenta o valor de P igual a 1,0, plantio em contorno é 0,5, alternância de capinas em conjunto com plantio de contorno é igual a 0,4, cordões de vegetação permanente apresenta o valor 0,2 e terraço apresenta o valor 0,1 (CARVALHO, 2008). Para áreas onde não há praticas conservacionistas, pode-se utilizar o parâmetro P igual a 1,0 (BESKOW, et al., 2009).

O fator topográfico (LS) é a combinação do fator comprimento de rampa (L) com a declividade do terreno (S) (BUARQUE, 2015). Segundo Minella, *et al.* (2010), quando se utiliza o fator LS , na equação MUSLE, ele se torna uma unidade hidrológica representativa da bacia, apresentando uma dimensão de área, isto é, onde ocorre o escoamento superficial da água. Essa característica torna mais difícil de calcular o fator L , quanto mais complexo for o relevo de uma bacia. Assim, determinar o parâmetro LS apresenta limitações em áreas de relevo complexo ou em grandes extensões (MINELLA, *et al.*, 2010).

Para o modelo MGB-SED, como apresentado em Buarque (2015), foram acopladas equações para determinar automaticamente o fator LS , em cada pixel do MDE. Assim, o fator L é calculado como Desmet & Govers (1996) e sua aplicação é realizada em um terreno bidimensional para área de contribuição acumulada por unidade de comprimento, conceito de área de contribuição unitária de Kirkby & Chorley (1967). Já o fator declividade (S) é calculado a partir da equação de Wischmeier & Smith (1978). Segundo Buarque (2015), as informações obtidas na etapa de discretização das minibacias são utilizadas para o cálculo do fator LS , como o Modelo Digital de Elevação, o Plano de Direções de Escoamento, o Plano das Minibacias e o Plano de URHs, como é apresentado nas equações a seguir:

$$L_k = \frac{(Am_k + Lp_k^2)^{m+1} - Am_k^{m+1}}{Lp^{m+2} \cdot Xdir_k^m \cdot (22,13)^m} \quad (8)$$

em que, L [-] é o fator de comprimento do pixel; Am [m²] é a área de drenagem acumulada na entrada do pixel; Lp [m] é a largura do pixel; $Xdir$ [-] é um fator de direção de aspecto para o pixel; m [-] é o expoente do comprimento do declive; k [-] é o índice de identificação de qual pixel a equação está sendo aplicada. O expoente m é obtido a partir da expressão:

$$m = \begin{cases} 0,2 & \text{se } Sf < 1 \\ 0,3 & \text{se } 1 \leq Sf < 3 \\ 0,4 & \text{se } 3 \leq Sf < 5 \\ 0,5 & \text{se } Sf \geq 5 \end{cases} \quad (9)$$

onde, Sf [%] é a declividade do pixel, que mede a taxa de elevação na direção do maior declive, sendo obtido para cada pixel, e é dada pela expressão de Wilson & Gallant (2000):

$$Sf = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (10)$$

onde, Sf [%] é a declividade do pixel; z [m] é a elevação dos seus quatro vizinhos nas direções ortogonais; $\partial z/\partial x$ e $\partial z/\partial y$ [-] são as derivadas parciais de primeira ordem que representam a taxa de variação da elevação z em relação às distâncias ortogonais x e y . De acordo com Buarque (2015), elas são calculadas a partir do método de diferenças finitas:

$$\frac{\partial z}{\partial x} \approx \frac{Z_{i+1}^c - Z_{i-1}^c}{2 \cdot Lp} \quad (11)$$

$$\frac{\partial z}{\partial y} \approx \frac{Z_{i+1}^c - Z_{i-1}^c}{2 \cdot Lp} \quad (12)$$

onde, l e c [-] são representadas pela linha e pela coluna na qual se encontra o pixel.

Já o fator de declividade (S) pode ser obtido através da equação de Wischmeier & Smith (1978), como apresentado por Buarque (2015):

$$S_k = 65,41 \cdot \sin^2(\theta_k) + 4,53 \cdot \sin^2(\theta_k) + 0,065 \quad (13)$$

onde, θ [°] é o valor de S_f .

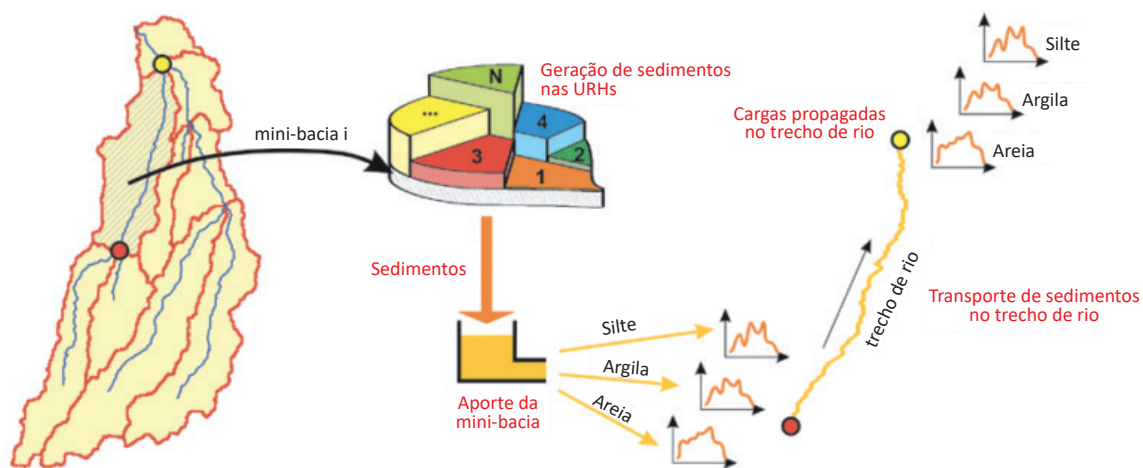
O fator de fragmentação grosseira esparsa (FG) é utilizado para considerar se há possibilidade da existência de rochas na camada superior do solo, que afetariam a erosão. Segundo Buarque (2015), é calculado pela Equação 14:

$$FG = \exp(-0,053 \cdot frocha) \quad (14)$$

em que, $frocha$ [%] é a porcentagem de rocha na camada superior do solo.

Os sedimentos que chegam à rede de drenagem não acompanham o intervalo de tempo de geração do sedimento, isto é, em cada passo de tempo é gerada uma quantidade estimada de sedimentos, contudo eles sofrem um retardo do escoamento superficial até chegarem à rede de drenagem (BUARQUE, 2015). Dessa forma, para considerar esse retardo, o modelo utiliza um reservatório linear, semelhante ao modelo hidrológico, como pode ser observado na Figura 62.

Figura 62 – Aporte de sedimentos gerados na bacia até a rede de drenagem



(Fonte – BUARQUE, 2015).

Assim, o volume total de sedimentos gerados ($VSED$) em cada URH de cada minibacia e armazenado no reservatório é calculado a partir da Equação 15, enquanto a descarga sólida total (QS) de saída do reservatório linear é função da carga armazenada e do tempo de retardo do reservatório superficial (BUARQUE, 2015), expressa pela Equação 16, e representa a quantidade de sedimentos que está sendo liberada para a rede de drenagem.

$$VSED_{i,j}^t = VSED_{i,j}^{t-1} + \sum_{k=1}^{NP_j} SED_{i,j}^{t-1} \quad (15)$$

em que, $VSED$ [t] é o volume de sedimentos no reservatório linear; NP [-] é o número de pixels da URH; i e j [-] são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente; t e $t-1$ [s] indicam os passos de tempo atual e anterior.

$$QSt_{i,j} = \frac{1}{TKS_i} \cdot SED_{i,j}^t \quad (16)$$

em que, QS [t/s] é a descarga sólida total de saída do reservatório linear; $VSED$ [t] é o volume de sedimentos no reservatório linear; TKS [s] é o tempo de retardo do reservatório superficial; i e j [-] são índices que indicam a minibacia e a URH, respectivamente.

O modelo calcula o aporte de sedimentos de cada minibacia para argila, silte e areia, de acordo com sua porcentagem na camada de solo superficial. De acordo com Buarque (2015), o aporte pode ser calculado, para cada classe, de acordo com as Equações 17, 18 e 19.

$$SED_{sil_i}^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t \cdot FRAC_{i,j}^t \cdot SIL_j) \cdot \Delta t \quad (17)$$

$$VSarg_i^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t \cdot FRAC_{i,j}^t \cdot ARG_j) \cdot \Delta t \quad (18)$$

$$VSED_{i,j}^t = \sum_{j=1}^{N_{URH}} (QS_{i,j}^t \cdot FRAC_{i,j}^t \cdot SAN_j) \cdot \Delta t \quad (19)$$

onde, SED_{sil} [t], SED_{arg} [t] e SED_{san} [t] são as cargas de silte, argila e areia, respectivamente, que migram do reservatório de sedimentos e chegam à rede de drenagem; Δt [s] é o passo de tempo; SIL , ARG e SAN [%] são as porcentagens de silte, argila e areia, respectivamente, na camada superior do solo; QS [t/s] é a descarga sólida total; $FRAC$ [-] é a fração do volume de sedimentos existente no reservatório; i e j [-] são índices que representam a minibacia e a URH, respectivamente. O modelo calcula a fração do volume ($FRAC$), de acordo com a seguinte equação:

$$VSED_{i,j}^t = VSED_{i,j}^{t-1} + \sum_{k=1}^{NP_j} SED_{i,j}^{t-1} \quad (20)$$

4.2.1.1.2 Módulo rio

O transporte de sedimentos no rio, do modelo MGB-SED ocorre através da propagação da carga de sedimentos por trecho de rio em cada minibacia. Nas minibacias de cabeceira, não há propagação de sedimentos no trecho de rio, uma vez que a carga do reservatório linear é direcionada diretamente para o exutório da minibacia, enquanto as minibacias de jusante, a propagação de sedimentos é dada a partir do somatório da carga de sedimentos gerada na minibacia com a carga de montante do rio. O modelo apresenta duas formas de transporte: para o material fino (silte e argila), o material é transportado em suspensão, de forma contínua ou intermitente, pelo escoamento, sem que haja deposição ou erosão dessas partículas no leito do rio; para o material grosso (areia), o material é transportado como carga de fundo, isto é, através da interação entre as partículas de fundo do leito e o escoamento (BUARQUE, 2015).

O transporte em suspensão, de acordo com Buarque (2015), ocorre para as partículas finas, através de um modelo de escoamento não-permanente, no qual a velocidade de escoamento e os

processos advectivos são predominantes. A equação que simula os processos de transporte de sedimentos em cada trecho de rio é representada pela Equação 21, que é resolvida numericamente para cada classe de partícula em suspensão (argila e silte) em cada trecho, de montante para jusante, seguindo progressivamente no tempo e no espaço. A Equação 22 apresenta essa resolução numérica. Das variáveis obtidas pela Equação 22, em todas as seções e intervalos de tempos, as vazões Q são conhecidas, e são provenientes do módulo hidráulico; as áreas molhadas (A) são calculadas para um canal retangular, estimando o h através de Manning ou estimado pelo modelo de propagação de vazões hidrodinâmico; a concentração C é conhecida no tempo inicial em todas as seções e no tempo final apenas na seção de montante. Dessa forma, a concentração, ou seja, a concentração na seção de jusante no tempo final é o único termo desconhecido da equação. Assim, isolando-se a concentração C , como na Equação 23, é possível se obter a resolução da equação.

$$\frac{\partial AC}{\partial t} + \frac{\partial AUC}{\partial x} = q_{sm} - q_{sfl} \quad (21)$$

em que, A [m^2] é a área molhada da seção, que é obtida para um canal retangular multiplicando a largura B do rio por uma profundidade h , estimada pela equação de Manning com raio hidráulico $Rh = h$, nos trechos de rio, os quais a propagação de vazões é dada pelo modelo hidrodinâmico (PAIVA, 2009), a profundidade média h do escoamento é estimada pelo modelo e a área A pode ser obtida diretamente pela equação de Manning; C [t/m^3] é a concentração média de sedimento; U [m/s] é a velocidade média do escoamento na seção; x [m] é a distância na direção do escoamento; t [s] é o tempo; q_{sm} [$t/(m.s)$] é a contribuição lateral dos sedimentos da minibacia; q_{sfl} [$t/(m.s)$] é a descarga de troca de sedimentos entre o rio e a planície de inundação por unidade de comprimento, considerada diferente de zero apenas nos trechos com propagação de vazões pelo modelo hidrodinâmico (PAIVA, 2009), isto é, quando a propagação é dada pelo modelo original de Muskingun-Cunge (COLLISCHONN, 2001) esse parâmetro é igual a zero.

$$\frac{A_i^t \cdot C_i^t - A_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1}}{\Delta t} + \theta \cdot \frac{Q_i^t \cdot C_i^t - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1}}{\Delta x} + (1-\theta) \cdot \frac{Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1} - Q_{i-2}^{t-2} \cdot C_{i-2}^{t-2}}{\Delta x} = q_{sm}^t - q_{sfl}^t \quad (22)$$

em que, Q [m^3/s] é a vazão líquida; $i-1$ e i [-] são índices que representam as seções transversais do rio a montante e a jusante do trecho, respectivamente; $t-1$ e t [-] são índices que representam o início e o final do intervalo de tempo; Δt [s] é o intervalo de tempo de cálculo; Δx [m] é o comprimento do trecho de rio da minibacia; θ [-] é o ponderador dos termos temporais, cujo valor varia entre 0 até 1.

$$C_i^t = \frac{\theta \cdot Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1} - (1-\theta) \cdot (Q_i^{t-1} \cdot C_i^{t-1} - Q_{i-1}^{t-2} \cdot C_{i-1}^{t-2})}{\frac{Vol_t}{\Delta t} + \theta \cdot Q_i^t} + \frac{\frac{Vol^{t-1}}{\Delta t} C_{i-1}^{t-1} + QS_m^t - QS_{fl}^t}{\frac{Vol_t}{\Delta t} + \theta \cdot Q_i^t} \quad (23)$$

em que, C_i^t [t/m^3] é a concentração média de sedimento do rio a jusante no final do intervalo de tempo; Vol [m^3] é o volume médio de água no trecho e é calculado por $Vol = A \cdot \Delta x$; QS_m [t/s] é a descarga sólida (silte ou argila) proveniente da minibacia associada ao trecho de rio, pode se calcular a partir de $QS_m = q_{sm} \cdot \Delta x$; QS_{fl} [t/s] é a descarga sólida entre o rio e a planície de inundação, sendo calculada por $QS_{fl} = q_{sfl} \cdot \Delta x$.

O transporte de carga de fundo, segundo Buarque (2015), é calculado a partir da equação da continuidade dos sedimentos representada pela Equação 24, conhecida como Exner (CHANG, 1988), para as partículas de areia. Com o objetivo de determinar o volume erodido ou depositado no intervalo de tempo determinado, é necessário isolar a variação da área (ΔA_b) que corresponde a esse volume, como é apresentado na Equação 25. Essa equação é resolvida implicitamente, obtendo-se a Equação 26. A Equação 26 considera que inicialmente, para o intervalo de tempo correspondente (Δt), a concentração (C_i^t) de sedimentos de fundo, na seção de jusante, corresponde à Capacidade de Transporte (CT_i^t) do escoamento nessa seção (BUARQUE, 2015), isto é, $C_i^t = CT_i^t$. A Capacidade de Transporte (CT) do rio é a capacidade do escoamento de transportar o material; assim, quando a descarga sólida do escoamento é maior do que a Capacidade de Transporte (CT), o escoamento é limitado e o excedente dos sedimentos tendem a se depositar; quando a descarga sólida é menor do que a Capacidade de Transporte (CT), há um déficit de sedimentos no escoamento e o leito do rio, conseqüentemente, tende a erodir. Dessa forma, a equação de continuidade dos sedimentos, representado pela Equação 26, compara a Capacidade de Transporte do escoamento (CT_i^t) à carga que chega da seção de montante (CT_{i-1}^{t-1}) em cada passo de tempo. Considerando que a variação da área (ΔA_b) representa a área do volume erodido ou depositado, uma variação positiva da área indica tendência à deposição no trecho, enquanto uma variação negativa da área indica tendência à erosão no trecho (BUARQUE, 2015).

$$(1 - \lambda) \frac{\partial A_b}{\partial t} + \frac{\partial QS}{\partial x} - q_{sm} = 0 \quad (24)$$

$$\Delta A_b = - \frac{\Delta t}{1 - \lambda} \cdot \left(\frac{\partial QS}{\partial x} - q_{sm} \right) \quad (25)$$

$$A_{bi}^t = - \frac{\Delta t}{1 - \lambda} \cdot \left[\theta \cdot \frac{Q_i^t \cdot CT_i^t - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1}}{\Delta x} + (1 - \theta) \cdot \frac{Q_i^{t-1} \cdot C_i^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1}}{\Delta x} - \frac{QS_m^t + QS_m^{t-1}}{2 \cdot \Delta x} \right] \quad (26)$$

em que, λ [-] é a porosidade do depósito; A_b [m²] é a área transversal de um “reservatório de sedimentos de fundo”, que corresponde ao volume depositado ou erodido no trecho; QS [t/d] é a descarga sólida de sedimento do leito; q_{sm} [t/(m.s)] é a contribuição lateral de sedimentos da minibacia; θ [-] é o ponderador dos termos temporais, variando de 0 a 1; Q [m³/s] é a vazão do trecho; CT [ppm] é a concentração de sedimentos correspondente à Capacidade de Transporte do escoamento na seção i de interesse; C [ppm] é a concentração de sedimentos no trecho de rio; $i-1$ e i [-] índices que representam a seção do rio, a montante e a jusante, respectivamente; $t-1$ e t [-] são índices que representam o início e o final do intervalo de tempo, respectivamente.

Além disso, o modelo possui um limitador para deposição e erosão, que impede que todo excesso ou déficit de sedimentos no escoamento seja convertido em erosão ou deposição, isto é, ele representa a porcentagem do excesso de sedimentos no escoamento que consegue depositar (BUARQUE, 2015). Assim, ao considerar que tanto a deposição, quanto a erosão ocorrem de forma uniforme no trecho de rio, o volume de sedimentos erodido ou depositado é calculado pelas Equações 27 e 28.

$$DEP^t = (\Delta A_b^t \cdot \alpha_d) \cdot \Delta x = \Delta A_b^t \cdot \Delta x \quad \text{se } \Delta A_b^t > 0 \quad (27)$$

$$EROS^t = -(\Delta A_b^t \cdot \alpha_e) \cdot \Delta x = -\Delta A_b^t \cdot \Delta x \quad \text{se } \Delta A_b^t < 0 \quad (28)$$

em que, b [m^2] é a variação real da área transversal do reservatório de sedimentos de fundo, ao final do intervalo de tempo t ; α_d [-] é o coeficiente de eficiência da deposição; α_e [-] é o coeficiente de eficiência para erosão. Ambos limitadores são formulações empíricas que buscam se aproximar do processo real. Para mais detalhes, pode-se encontrar em Buarque (2015).

Dessa forma, a concentração de sedimentos efetivamente propagada para jusante, no final do intervalo de tempo, é dada pela Equação 29.

$$C_i^t = \frac{\left(\frac{QS_m^t + QS_m^{t-1}}{\Delta s} \right) + \theta \cdot Q \cdot C - (1 - \lambda) \cdot \Delta x \cdot \left(\frac{\Delta A_b^t}{\Delta t} \right)}{\theta Q_i^t} - \frac{(1 - \theta) \cdot (Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1} - Q_{i-1}^{t-1} \cdot C_{i-1}^{t-1})}{\theta Q_i^t} \quad (29)$$

em que, λ [-] é a porosidade do depósito; ΔA_b [m^2] é a variação real da área transversal do reservatório de sedimentos de fundo; QS_m [$t/(m.s)$] é a contribuição lateral de sedimentos da minibacia; θ [-] é o ponderador dos termos temporais, variando de 0 a 1; Q [m^3/s] é a vazão do trecho; C [ppm] é a concentração de sedimentos no trecho de rio; $i-1$ e i [-] índices que representam a seção do rio, a montante e a jusante, respectivamente; $t-1$ e t [-] são índices que representam o início e o final do intervalo de tempo, respectivamente.

A Capacidade de Transporte é a máxima carga que o escoamento pode transportar de sedimentos. O modelo calcula a capacidade de transporte para cada classe de partícula a partir da Equação 30 de Yang (1973; 1984).

$$\log CT_i^t = M_i^t + N_i^t \cdot \log \left(\frac{U_i^t \cdot S_f}{\omega_s} - \frac{U_{c_i}^t \cdot S_f}{\omega_s} \right) \quad (30)$$

em que, CT [ppm] é a concentração por peso em partes por milhão; U [m/s] é a velocidade média na seção; U_c [m/s] é a velocidade média crítica do escoamento; S_f [-] é a declividade de atrito; ω_s [m/s] é a velocidade de queda da partícula; M e N [-] coeficientes calculados para os sedimentos de acordo com o diâmetro.

Os parâmetros U_c , ω_s , M e N são calculadas diretamente a partir das equações do modelo, que podem ser encontradas com mais detalhes em Buarque (2015). Contudo, a determinação dos parâmetros de velocidade de cisalhamento (U^*), raio hidráulico (Rh), profundidade (h) e declividade de atrito (S_f), utilizados direta ou indiretamente para calcular o CT, dependem do método adotado para propagação das vazões em cada trecho do rio e suas equações também podem ser encontradas com mais detalhes em Buarque (2015).

4.2.1.1.3 Módulo planície

O modelo permite a troca de sedimentos entre os rios e as planícies de inundação, nos trechos onde o método de propagação adotado é o hidrodinâmico (PAIVA, 2009), assumindo uma mistura completa de sedimentos nas planícies. Além disso, nas planícies só é permitida a deposição de sedimentos finos, funcionando como área de armazenamento desses sedimentos. A descarga sólida de troca entre o rio e a planície ao final do intervalo de tempo é estimada pela Equação 31 ou Equação 32.

$$QS_{fi}^t = q_{sfi}^t \cdot \Delta x = q_{fi}^t \cdot \left(\frac{C_i^t + C_{i-1}^t}{2} \right) \cdot \Delta x \quad (31)$$

em que, QS_{fi} [t/s] é a descarga sólida de troca entre o rio e a planície de inundação; q_{fi} [m³/s] é a vazão líquida de troca rio-planície positiva, onde haverá fuga de água do rio para a planície; C [t/m³] é a concentração de sedimentos no trecho de rio; $i-1$ e i [-] índices que representam a seção do rio, a montante e a jusante, respectivamente; t [-] é o índice que representa o final do intervalo de tempo.

$$QS_{fi}^t = q_{sfi}^t \cdot \Delta x = q_{fi}^t \cdot C_{fi}^t \cdot \Delta x \quad (32)$$

em que, QS_{fi} [t/s] é a descarga sólida de troca entre o rio e a planície de inundação; q_{fi} [m³/s] é a vazão líquida de troca rio-planície negativa, onde haverá fuga de água da planície para o rio; C_{fi} [t/m³] é a concentração de sedimentos existente na planície; t [-] é o índice que representa o final do intervalo de tempo.

Assim, a concentração de sedimentos na planície é estimada através da Equação 33. Contudo, para cada classe de partícula em cada intervalo de tempo, parte da carga em suspensão pode depositar, reduzindo a concentração. Assim, o volume depositado é determinado pela Equação 34 e a concentração final, no final do intervalo de tempo, é dada pela Equação 35. Mais detalhes podem ser encontrados em Buarque (2015).

$$C_{fi}^{*t} = \frac{C_{fi}^{t-1} \cdot V_{fi}^{t-1} + \left(\frac{q_{fi}^{t-1} + q_{fi}^t}{2} \right) \cdot \Delta x \cdot \Delta t}{V_{fi}^t} \quad (33)$$

em que, C_{fi} [t/m³] é a concentração de sedimentos existente na planície; q_{fi} [m³/s] é a vazão líquida de troca rio-planície; V_{fi} [m³] é o volume d'água existente na planície de inundação; $t-1$ e t [-] são índices que representam o início e o final do intervalo de tempo, respectivamente.

$$DEP_{fi}^t = C_{fi}^t \cdot V_{fi}^t \cdot \left(\frac{\omega_s \cdot \Delta t}{H_{fi}} \right) \quad (34)$$

em que, DEP_{fi} [m³] é o volume depositado ao final do passo de tempo; C_{fi} [t/m³] é a concentração de sedimentos existente na planície; V_{fi} [m³] é o volume d'água existente na planície de inundação; ω_s [m/s] é a velocidade de queda da partícula; H_{fi} [m] é a profundidade média da planície estimada pelo modelo hidrodinâmico.

$$C_{fi}^t = C_{fi}^{*t} - \frac{DEP_{fi}^t}{V_{fi}^t} \quad (35)$$

Estes equacionamentos do módulo de planície, embora descritos, não foram aplicados nos trabalhos de Fagundes et al. (2017a, 2017b, 2017c), sendo desnecessários para a boa simulação hidrológica, já que a bacia hidrográfica do Rio Doce não possui grandes planícies de inundação. O que é comprovado pelos resultados de modelagem hidrológica obtidos pelo autor.

4.2.1.2 Resultados hidrossedimentológicos

A seguir são apresentados os principais resultados de simulações obtidas por Fagundes et al. (2017a, 2017b, 2017c). Primeiramente são comentados os resultados apenas hidrológicos (que são a base para as simulações de sedimentos) e posteriormente são revisados os resultados hidrossedimentológicos.

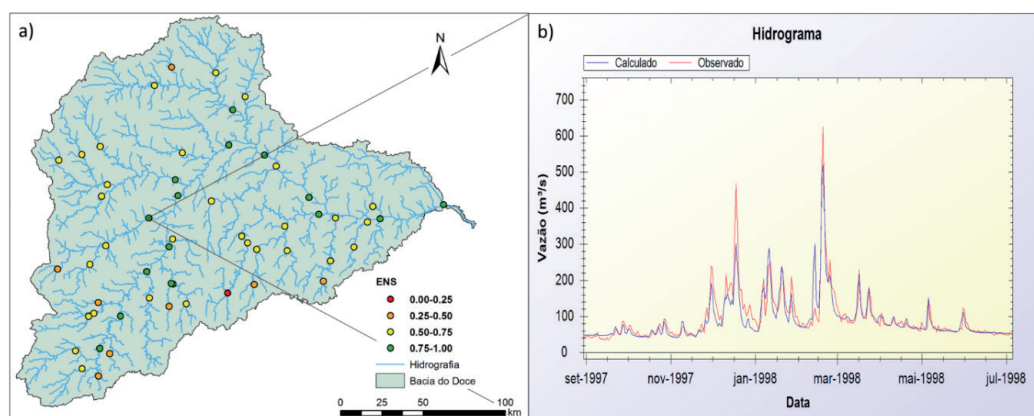
4.2.1.2.1 Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Doce

Embora a bacia hidrográfica do Rio Doce já tenha sido simulada em outras oportunidades na literatura (Fan et al., 2015), os trabalhos de Fagundes et al. (2017a, 2017b, 2017c) propuseram uma versão completamente nova do modelo.

A simulação hidrossedimentológica requer dados observados de chuva e vazão para a calibração e validação do módulo hidrológico e dados relativos aos sedimentos para calibração e validação do módulo de sedimentos. No trabalho de Fagundes et al. (2017c) detalha-se que foram utilizados dados de chuva da base *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation* - MSWEP (Beck et al., 2016) para o período de simulação (1980-2015). O MSWEP é uma base de dados de precipitação com cobertura global com informações disponíveis desde 1979 até 2015, com resolução temporal de 3 horas e espacial de 0,25° (25 km) que mescla informações de redes pluviométricas, produtos de satélite e de reanálise.

A calibração e a validação da modelagem hidrológica foram realizadas com base em dados de observados de estações fluviométricas existentes na bacia. Dos 55 postos analisados na bacia (Figura 63 – retirada de Fagundes et al., 2017c), cerca de 84% deles apresentaram valores do coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (ENS) superiores a 0,50, considerados por Moriasi et al. (2007) como satisfatórios e 30% apresentaram resultados muito bons, com valores de ENS acima de 0,75.

Figura 63 – Resultados da simulação hidrológica com o modelo MGB-IPH – a) Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe calculado entre as vazões observadas para os postos fluviométricos da ANA e as vazões calculadas; b) Comparação dos Hidrogramas calculados e simulados para o posto 56696000, localizado no rio Piracicaba.



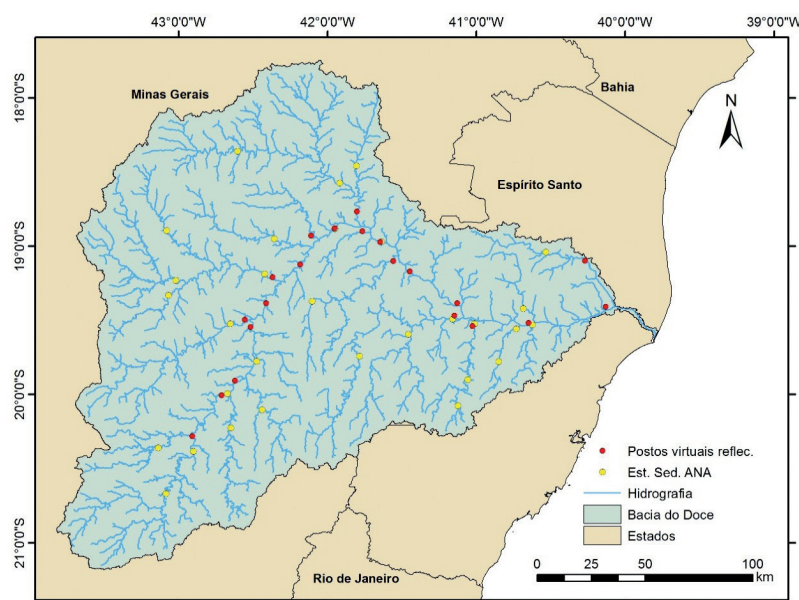
Fonte – retirada de Fagundes et al. (2017c).

A boa qualidade dos resultados pode ser notada, graficamente, a partir da comparação dos hidrogramas observados e calculados presentes na Figura 63. Os resultados obtidos também evidenciam o bom desempenho do modelo em representar os processos hidrológicos que ocorrem na bacia usando o produto de chuva MSWEP.

4.2.1.2.2 Modelagem Hidrossedimentológica da Bacia do Rio Doce

A modelagem hidrossedimentológica do Rio Doce de Fagundes et al. (2017c) foi realizada para o mesmo período da modelagem hidrológica. Para calibrar e validar o modelo foram usados dados observados de CSS (Concentração de Sedimentos em Suspensão) para o mesmo período, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) no Sistema de Informações hidrológicas (<http://hidroweb.ana.gov.br/>); e dados de reflectância espectral de superfície na faixa do vermelho (0,64-0,67 mm) extraídos em 21 postos virtuais, abrangendo um período de 2013-2015. A Figura 64 mostra a localização dos pontos onde o modelo foi calibrado e validado no Rio Doce.

Figura 64 – Bacia hidrográfica do rio Doce e localização das estações de sedimentos da Agência Nacional de Águas e dos postos virtuais de reflectância de superfície.



Fonte – Fagundes et al. (2017c).

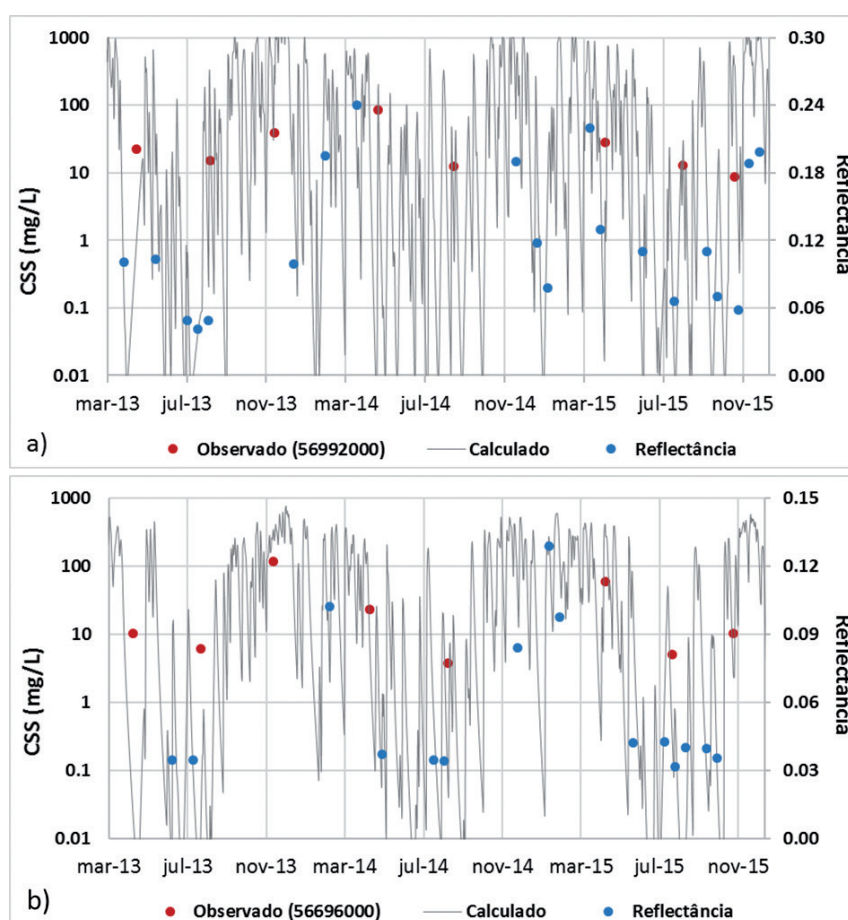
As reflectâncias foram extraídas de imagens do satélite Landsat 8/OLI, que possui resolução espacial de 30 m. As imagens adquiridas já possuíam correções atmosféricas satisfatórias (Vermote et al., 2016) e foram fornecidas pelo *United States Geological Survey* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Foram adquiridas imagens que correspondem a quatro localizações do tipo órbita/ponto: 216/073, 216/074, 217/073 e 217/074.

Conforme comenta o autor, a extração da reflectância foi realizada parcialmente de forma manual e automática. Para os seis postos virtuais localizados mais a jusante da bacia, adotou-se a extração manual, selecionando-se os pixels localizados nos locais mais adequados. A extração automática consistiu no uso de um algoritmo que seleciona os pixels dentro de um polígono com largura inferior ao do rio, comprimento de no máximo 20 km e que não fossem identificados como nuvens ou sombra de nuvens. A partir da amostra de pixels válidos, calculou-se a mediana dos valores encontrados. Isso foi feito para evitar que interferências de *outliers*, como o não reconhecimento de um pixel de nuvem que possui alta reflectância, contaminassem o resultado final.

Especialmente em Fagundes et al. (2017c) o foco do trabalho foi comparar os resultados calculados pelo modelo, os dados de CSS medidos *in situ* e dados de reflectância espectral de superfície obtidos na faixa do vermelho (RefVer).

Assim, na Figura 65 são apresentados a comparação dessas variáveis para dois postos sedimentométricos: o posto Baixo Guandu (Figura 65a), que apresentou baixo valor do coeficiente de correlação ($r=0.54$) para a reflectância e o posto Mário de Carvalho (Figura 65b), que apresentou um valor de $r=0,78$. Ressalta-se que, tanto a série de RefVer quanto a série de CSS observada não apresentam dados com alta frequência temporal. Observa-se que os resultados calculados apresentam comportamento semelhante aos dados observados de CSS, tendendo a aumentar no período chuvoso e diminuir no período seco, o que é coerente com a realidade da bacia. Além disso, os resultados observados de reflectância espectral de superfície também apresentam essa tendência, mostrando concordância entre esse tipo de dado e os demais.

Figura 65 – Comparação dos resultados de CSS calculados com dados de CSS observados e RefVer para os postos sedimentométricos da ANA – a) Baixo Guandu (56992000); e b) Mario de Carvalho (56696000). Fonte – Fagundes et al. (2017c).



Na Figura 66 são apresentados os valores observados e simulados de concentração de sedimentos em suspensão (frações de argila e silte) para algumas estações de monitoramento de sedimentos da bacia, buscando representar a variabilidade espacial e temporal das CSS. Em todos os gráficos dessas figuras, observa-se comportamentos com alta variabilidade, com muitos picos e vales. Apesar da baixa quantidade de dados observados, nota-se que os resultados simulados tendem a acompanhar o comportamento dos dados observados em relação a ocorrência dos períodos com baixa e/ou elevada concentração de sedimentos. Mostra-se que o modelo é capaz de representar a variabilidade espacial e temporal da geração de sedimentos na bacia, ao representar a dinâmica em vários locais.

Na Figura 67 são apresentados os valores calculados de r entre os dados observados e calculados de CSS e os dados observados de RefVer. Esses resultados mostram que as correlações existentes entre os dados de CSS calculados e de RefVer, para todas estações analisadas, foram superiores às correlações entre os dados observados e calculados de CSS. A maior diferença é observada na estação Naque Velho em que r aumentou de 0,08 para 0,70 e a menor na estação Baixo Guandu que aumentou de 0,49 para 0,54.

Analisando os valores de r apenas para os postos virtuais de reflectância, na Figura 68 se observa que os valores variaram entre 0,38 (Governador Valadares) e 0,83 (Linhares), ambos localizados no rio principal. Quanto aos afluentes o menor valor encontrado foi de 0,44 (rio Ribeirão Traíra) e o maior 0,78 (rio Piracicaba).

Nota-se, portanto, que os valores de reflectância de superfície na faixa do vermelho, além de apresentaram boa correlação com os dados de CSS, o que tem sido amplamente observado na literatura (Munday Jr. e Alfoldi, 1979; Lodhi et al., 1998, Long e Pavelsky, 2012; Espinoza et al., 2012), também podem ser utilizados para a melhoria de modelos hidrossedimentológicos de grande escala, como é o caso do MGB-SED. Tal melhoria se dá ao ser possível ter uma nova fonte de dados durante as etapas de calibração e validação desses modelos, visto a baixa disponibilidade de dados de CSS medidos *in situ* (Pandey et al., 2016).

Como principais conclusões das modelagens da representação da bacia pelo modelo usado nos trabalhos de Fagundes et al. (2017a, 2017b, 2017c), é possível dizer que as correlações foram correspondentes entre os dados de CSS medidos e calculados. E que as reflectâncias espectrais de superfície (RES) na faixa do vermelho apresentaram boas correlações ($r > 0,5$) com os dados de CSS calculados pelo modelo MGB-SED, inclusive melhores do que em comparação com os dados de CSS.

A partir disso, o modelo MGB-SED preparado para a bacia hidrográfica do rio Doce mostra-se como uma ferramenta potencial para a representação de processos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica em condições naturais.

Apesar dos bons resultados, é importante ressaltar que como todo modelo, o MGB-SED aplicado possui incertezas e simplificações nesta aplicação.

Figura 66 – Concentração de Sedimentos em Suspensão (mg/L) simulada e observada nas estações – a) Fazenda Ouro Fino, rio Santo Antônio; b) Vila Matias (56891900), rio Suaçuí Grande; e c) Colatina (56994500), rio Doce. Fonte – Fagundes et al. (2017c).

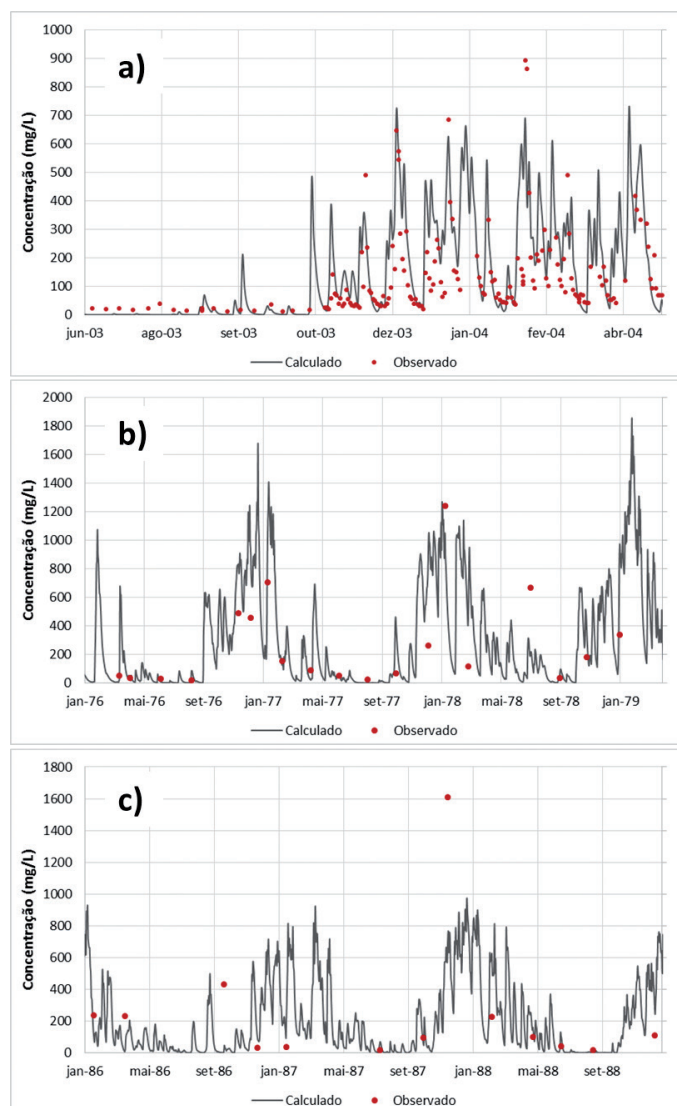


Figura 67 – Coeficiente de correlação (r) calculado entre os dados observados e calculados de CSS e entre os dados observados de RefVer para as estações – Colatina (56994500), Baixo Guandu (56992000), São Sebastião da Encruzilhada (56990000), Tumiritinga (56920000), Vila Matias (56891900), Naque Velho (56825000), Mario de Carvalho (56696000) e Fazenda Cachoeira D'antas (56425000). Fonte – Fagundes et al. (2017c).

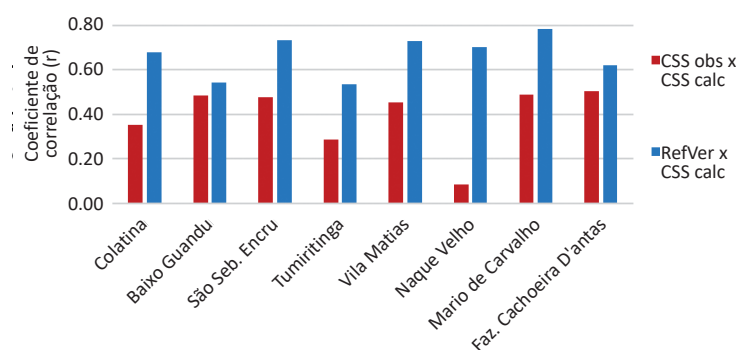
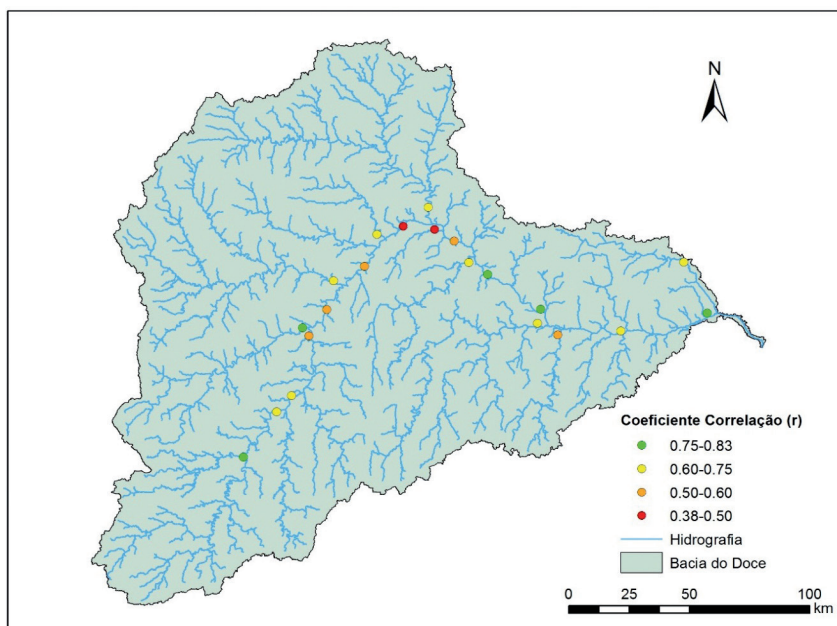


Figura 68 – Coeficiente de correlação entre os valores de CSS calculados com o modelo MGB-SED e dados observados de RefVer para todos os postos virtuais de reflectância). Fonte – Fagundes et al. (2017c).

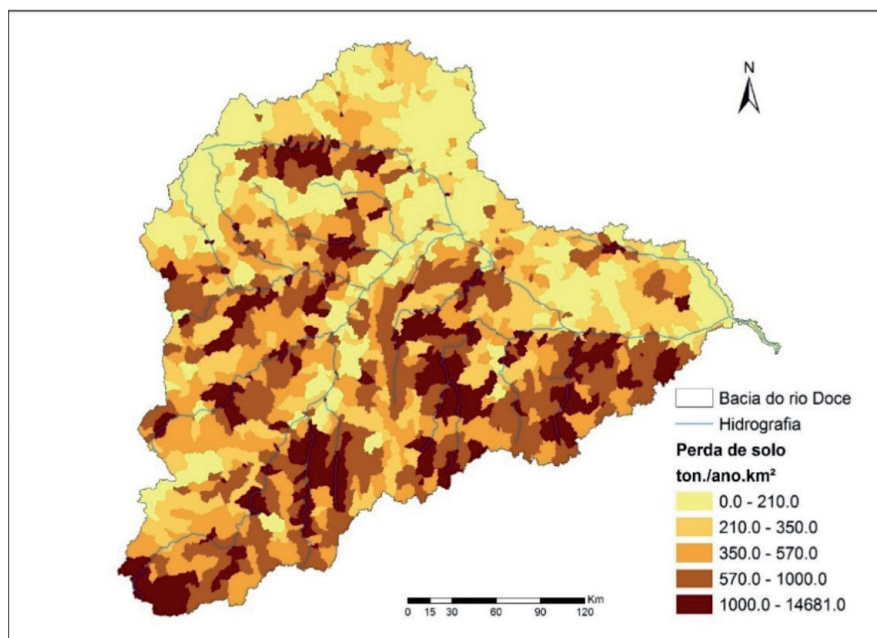


4.2.1.2.3 Informações sobre a bacia a partir da modelagem e dos dados observados

Dados os resultados de aplicação e avaliação do modelo MGB-SED para a bacia do rio Doce, a modelagem permitiu a estimativa aproximada de diversas informações da bacia, como as regiões que mais produzem sedimentos (a partir de estimativas usando a MUSLE), carga de sedimentos transportada em suspensão (silte e argila) e de fundo (areia) para cada trecho de rio, concentração de sedimentos em suspensão, entre outros. Alguns desses resultados são apresentados no trabalho de Fagundes et al. (2017a) e a seguir são reproduzidos.

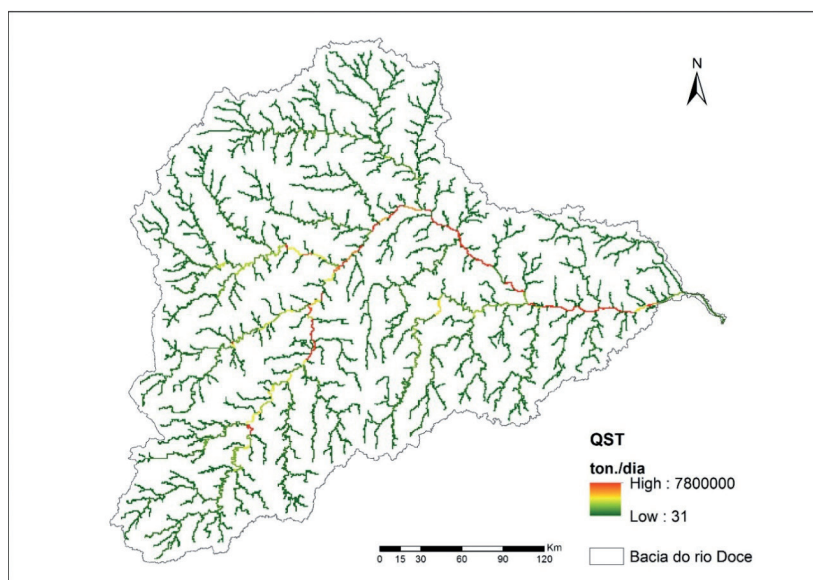
Primeiramente são apresentados os valores da carga total de sedimentos (toneladas por dia) gerada pela MUSLE para cada minibacia que depois são propagados e aportados nos trechos de rio. Esses resultados são apresentados na Figura 69 por unidade de área. Observa-se a partir da figura alta variabilidade na quantidade média de sedimentos produzida na bacia ao longo dos anos (1970-2010), podendo variar de valores inferiores a 10,0 t/ano.km² à valores próximos de 14.680,0. Nota-se ainda maiores valores de perda de solo predominantemente nas regiões ao sul do rio Doce. O padrão espacial de produção apresentado na Figura 69 parece estar diretamente relacionado com o relevo da bacia.

Figura 69 – Perda de solo específica média (1970-2010), por minibacia, para a bacia do rio Doce calculada a partir da MUSLE. Fonte – Fagundes et al. (2017c).



Por fim, apresenta-se a descarga sólida total (silte + argila + areia), em termos de valores médios diários, para cada trecho de rio (Figura 70).

Figura 70 – Descarga sólida média diária total para cada trecho de rio de cada minibacia. Fonte – Fagundes et al. (2017c).



Na Figura 70, observa-se que a descarga sólida tende a aumentar conforme aumenta a área de drenagem da bacia, pois maior é a vazão do rio. Nesta aplicação destacam-se os valores elevados de descarga encontrados nos rios Piracicaba, Santo Antônio e Manhauçu.

Além dos resultados de modelagem, apenas com os resultados de reflectância a partir do sensoriamento remoto o trabalho de Fagundes et al. (2017b) observou alguns padrões no Rio Doce.

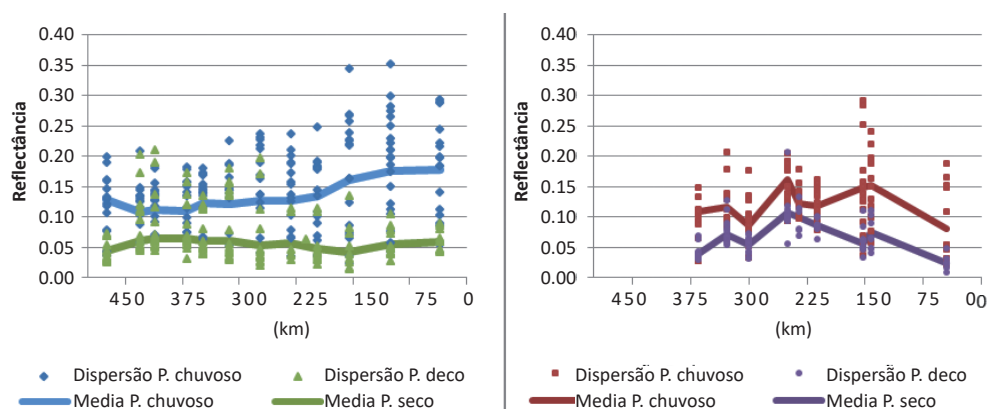
As respostas da reflectância encontradas nos diversos locais da bacia foram diferentes, mostrando grande heterogeneidade na produção de sedimentos em suspensão. A Figura 71 mostra os perfis da reflectância para o rio principal e para os afluentes em termos dos valores médios. Para essa análise, desconsideraram-se os dados obtidos após o rompimento da barragem de Fundão (nov/15).

Observa-se que no período seco o rio principal tende a apresentar um valor de reflectância próximo a 0,05 ao longo da bacia, aumentando inicialmente após a confluência do rio do Carmo com o Doce (460 km), diminuindo próximo ao Reservatório de Aimorés (150 km) e aumentando novamente após esse local. No período chuvoso, ocorre uma diminuição da reflectância do primeiro para o segundo local de análise e a partir daí a tendência é que os valores cresçam até o ponto mais a jusante.

Os trabalhos de Espinoza et al. (2012), que utilizaram imagens do satélite MODIS e Fleifle (2013), que usou imagens do satélite Landsat TM e ETM+, observaram padrões diferentes para as bacias dos rios Madeira e Mekong, respectivamente, onde a partir de um perfil longitudinal do rio principal, os valores de CSS, estimados a partir de valores de reflectância, diminuam de montante para jusante, não necessariamente de forma linear. Já o trabalho de Silva et al. (2016), mostrou que os valores de Sólidos Totais, estimados a partir da reflectância do infravermelho do sensor MODIS, em sete estações virtuais localizadas no rio principal, não apresentaram comportamento único, ou seja, só acréscimo ou decréscimo, de montante para jusante.

Já para os afluentes, os comportamentos desses no período seco e chuvoso são bem similares em sua forma (perfil das reflectâncias média), mas com intensidades diferentes. As principais distinções dos perfis ocorrem nas distâncias de 212km (rio Caratinga) e 153km (rio Manhuaçu). O rio Manhuaçu que apresentou baixa reflectância média (0,056) no período seco, quase triplicou seu valor no período chuvoso (0,148), mostrando que esse afluente contribui de forma significativa para o rio principal durante a estação chuvosa.

Figura 71 – Comparação das reflectâncias ao longo da bacia entre os períodos seco e chuvoso, com média e valores das reflectâncias de superfície para – a) o rio principal; e b) os afluentes. Fonte – Fagundes et al. (2017b).



A análise comparativa entre o rio Doce e os afluentes nos mostra que no período seco a maioria dos afluentes apresentam valores médios de reflectância superiores ao rio principal e que no período chuvoso os que se sobressaem em relação ao rio Doce são os rios Suaçuí Grande (250km), Manhuaçu (153km) e Guandu (143km). Destaca-se que tanto no período seco quanto chuvoso a reflectância após o rio Manhuaçu cresce.

4.2.2 ESTUDOS DE COMPARAÇÃO DE MODELAGENS DE TURBIDEZ

A bacia hidrográfica do Rio Doce historicamente é uma bacia reconhecida pela elevada produção de sedimentos. Todavia, logo após o evento de rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, em novembro de 2015, mais atenção foi dada para a questão da turbidez no Rio Doce em termos de desenvolvimento de modelos de turbidez.

Isto aconteceu porque o evento aumentou durante a propagação da pluma de sedimentos os níveis de turbidez da bacia, impossibilitando a captação de sua água para abastecimento em municípios da região.

Nesta linha de trabalho, modelos de previsão de turbidez foram desenvolvidos, a fim de poder estimar a turbidez em pontos de interesse antes e/ou depois do evento. Citam-se especialmente os modelos de Tucci (2016) e Castilho (2016).

A pesquisa realizada por Goulart (2017) teve como objetivo comparar quantitativamente e qualitativamente estes dois modelos. Além disso, a autora também processou os dados do modelo de Fagundes et al. (2017c) para estimar a turbidez do rio, e incluiu esta versão processada dos dados de Fagundes et al. na comparação.

Assim o trabalho de Goulart (2017) teve como objetivo analisar e comparar o desempenho de três modelos prognósticos no rio Doce e em seus principais afluentes: Tucci (2016), Fagundes et al. (2017c) e Castilho (2016).

A seguir são dados alguns detalhes sobre estes modelos. E posteriormente os resultados de comparação de Goulart (2017) são explicitados.

4.2.2.1 O modelo Tucci (2016)

Tucci (2016) desenvolveu um modelo prognóstico de turbidez para o rio Doce. Utilizou-se a relação entre vazão e turbidez para desenvolver um modelo empírico de previsão, uma vez que a vazão influencia diretamente o transporte de sedimentos e, em consequência, a turbidez. Considerando, também, que dados de vazão podem ser obtidos de postos fluviométricos e modelos que transformam precipitação em vazão.

No desenvolvimento do modelo, foram analisados quatro postos de monitoramento selecionados, dividindo-se os dados em dois períodos: período chuvoso (dezembro de 2015 a fevereiro de 2016) e o período após fevereiro de 2016. A metodologia de análise é descrita abaixo:

- classificam-se as vazões em 10 intervalos de vazões, obtidas em 10 intervalos iguais, em escala logarítmica;
- determina-se a média da turbidez, para cada classe, dos dias com as vazões nesta classe;
- ajusta-se uma função que relaciona turbidez e vazão para os valores dos intervalos de classe e verifica-se a correlação;
- com base nas vazões, determinam-se os valores calculados de turbidez.
- devido a possíveis incertezas do modelo, citadas a seguir, é aceita uma margem de 30% acima ou abaixo do valor obtido;
- são desprezadas outras variáveis explicativas para turbidez;

- na amostragem da turbidez, a coleta é realizada como uma amostragem da seção do rio, podendo ter grande variabilidade;
- erros de amostragem podem ocorrer;
- muitas vezes, os pontos de dados de vazão e turbidez não estão exatamente no mesmo local, podendo afetar os resultados;
- efeito dos reservatórios.

Para os postos analisados, distribuídos ao longo do rio Doce, os resultados obtidos por Tucci (2016) foram considerados satisfatórios, apontando a conveniência de se usar esta relação como preditor de turbidez. Em todos os postos, a regressão apresentou coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,8 (TUCCI, 2016).

4.2.2.2 O modelo de Castilho et al. (2017)

Após a ruptura da barragem de Fundão, a CPRM – Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) deu início a operação de um sistema de alerta, monitorando a passagem da onda de cheia devido ao desastre e informando as comunidades. A ruptura ocorreu no final do período de estiagem, de modo que, após a passagem da onda de cheia, os valores de turbidez e de concentração de sólidos em suspensão aumentaram novamente, pois o aumento da vazão nos cursos d'água movimentou os sedimentos presentes no leito e nas margens.

Segundo Castilho et al. (2016) muitas cidades e comunidades ribeirinhas tinham no rio Doce a sua fonte de captação de água para abastecimento, que ficou comprometida devido aos elevados índices de turbidez apresentados. Por este motivo, a CPRM desenvolveu um modelo prognóstico de turbidez, a fim de alertar os usuários caso fosse necessária a interrupção do abastecimento (CASTILHO et al., 2016).

O modelo desenvolvido tem como base o conceito de diluição e de retenção de sedimentos em reservatórios. Assim, a turbidez é calculada por uma equação similar à da mistura (36), apresentada a seguir.

$$T_m = \frac{T_1 Q_1 + T_2 Q_2 + \dots + T_n Q_n}{(Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n)} \quad (36)$$

em que T_1 , T_2 e T_n são valores de turbidez nos pontos a montante; Q_1 , Q_2 e Q_n são as vazões nos pontos a montante; T_m é a turbidez no ponto a jusante.

A retenção de sedimentos nos reservatórios é calculada por meio das curvas de Churchill e Brune, apresentadas em Carvalho (2008), e adota-se como premissa que o percentual de retenção de sedimentos é equivalente a diminuição da turbidez nos reservatórios (CASTILHO et al., 2016).

Os dados necessários para a utilização do modelo são:

- volume dos reservatórios selecionados;
- vazão do rio Doce e dos principais afluentes;
- distância, velocidade e tempo de viagem entre os pontos de interesse;
- turbidez nos principais afluentes;
- turbidez nos pontos de monitoramento após a ruptura.

Este modelo foi aplicado por Castilho et al. (2016), utilizando postos de monitoramento do IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) e da CPRM, tendo sido calibrado logo após a ruptura da barragem de rejeitos. Os resultados obtidos foram satisfatórios para faixas de turbidez de até 10.000 NTU.

4.2.2.3 Adaptações realizadas no modelo de Fagundes et al. (2017c)

Para comparar o modelo de Fagundes et al. (2017c) com os demais modelos, foi necessário fazer algum tipo de relação que permita extrair a informação de turbidez dos rios a partir dos resultados do modelo MGB-SED.

A partir da aplicação realizada por Fagundes et al. (2017c), foram obtidas correlações entre turbidez e concentração de sólidos suspensos (CSS) para a bacia do rio Doce. Dos dados gerados pelo MGB-SED, somaram-se as concentrações de argila e silte diárias das minibacias e, com essas concentrações, foram feitas as correlações com a turbidez observada nas estações mais próximas, para o período entre os anos 1997 a 2000.

Nesta aplicação, 22 dos 30 postos analisados obtiveram fator R^2 superior a 0,5, indicando correlações consideradas satisfatórias entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão. Na Figura 72 até a Figura 75 estão apresentadas as correlações obtidas para alguns postos ao longo da bacia, no período de calibração.

Figura 72 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD019 (rio Doce) no município de Rio Casca (MG). Fonte – Goulart (2017).

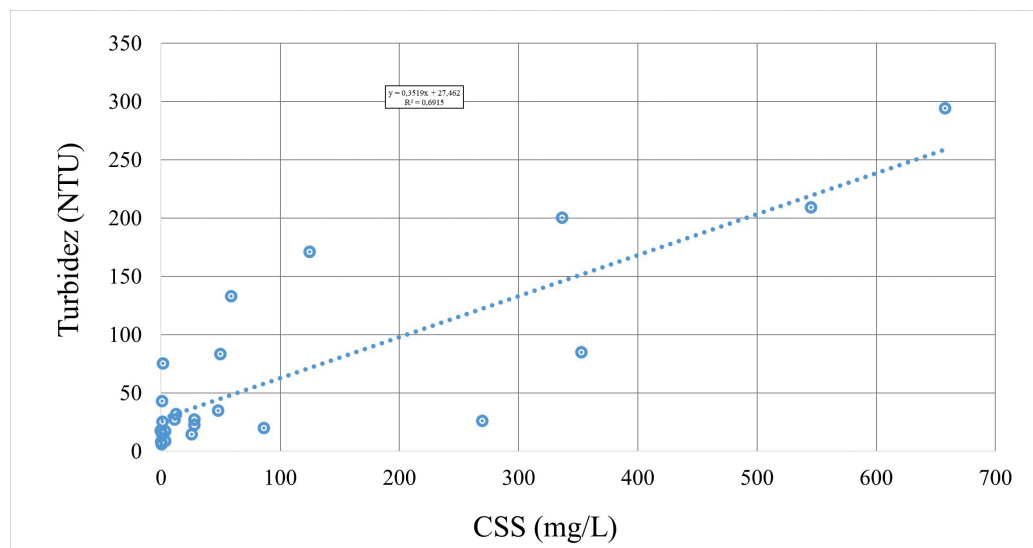


Figura 73 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD040 (rio Corrente Grande) no município de Periquito (MG). Fonte – Goulart (2017).

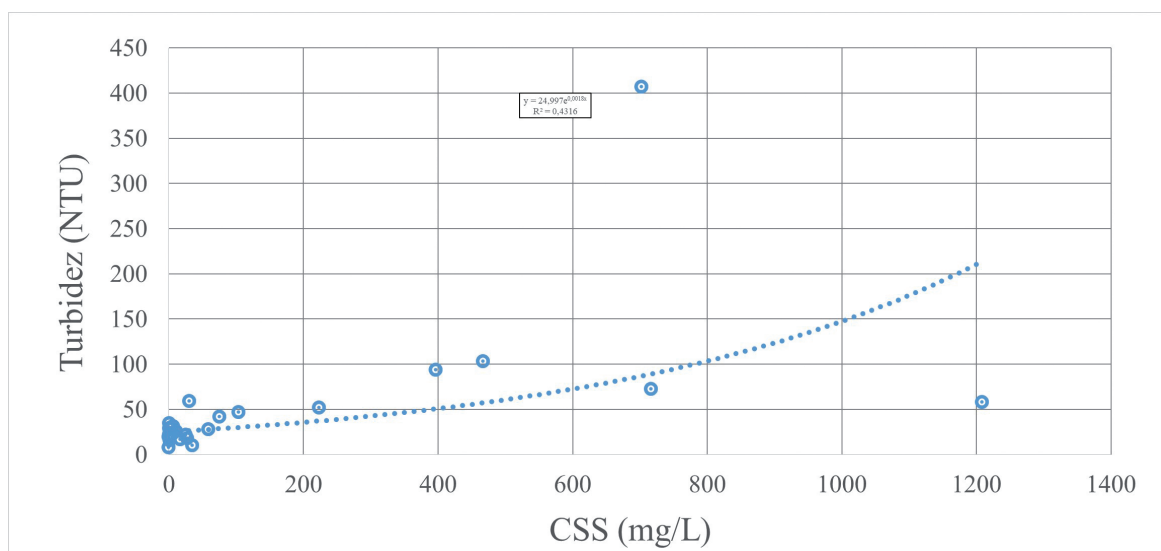


Figura 74 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto RD058 (rio Doce) no município de Conselheiro Pena (MG). Fonte – Goulart (2017).

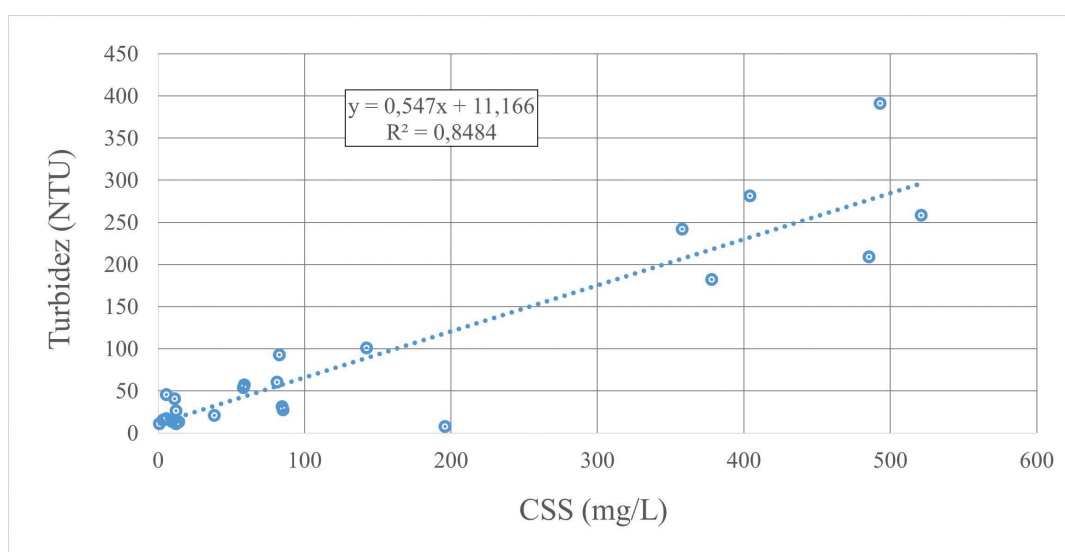
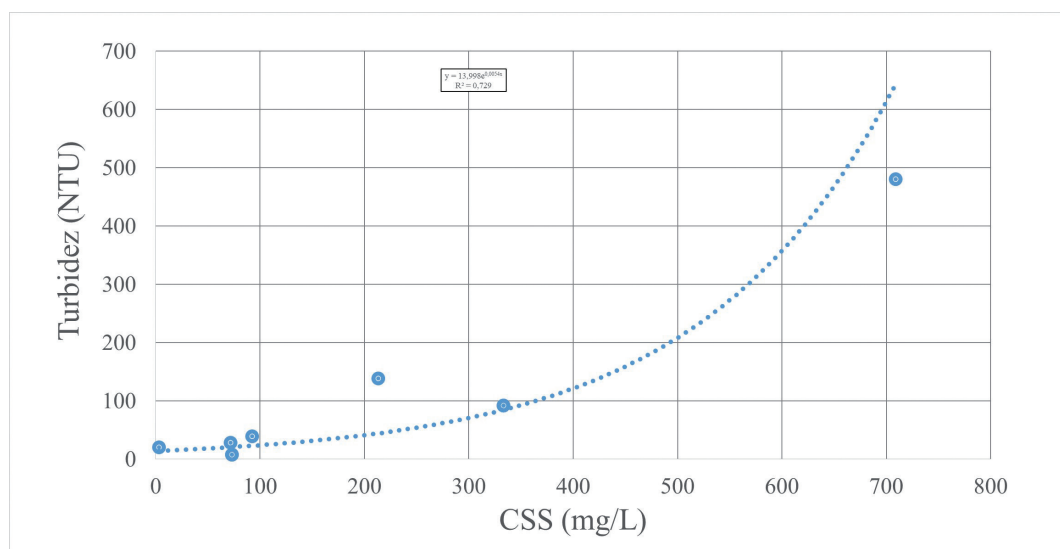


Figura 75 – Relação entre turbidez e CSS dos dados do posto 56998300 (rio Doce) no município de Linhares (ES). Fonte – Goulart (2017).



4.2.2.4 Resultados da comparação dos modelos

Para a comparação foram selecionados dados de turbidez em estações de medição ao longo da bacia, no período entre 1997 a 2010, abrangendo o período de calibração e o de validação para os modelos. Goulart (2017) fez a aplicação dos modelos, e depois empreendeu uma análise comparativa, com base em estatísticas de erro, para avaliar o desempenho dos modelos na simulação de turbidez no rio Doce.

A Figura 76 até a Figura 78 mostram exemplos de comparações feitas entre os modelos para a simulação de turbidez no Rio Doce. Em geral os modelos apresentaram resultados ligeiramente diferentes entre diferentes locais, com um ou outro modelo tendo melhor desempenho dependendo do local, mas sempre com valores de correlação com as observações na mesma ordem de grandeza.

Figura 76 – Resultados comparados para a estação RD023 (rio Doce).
Fonte – Goulart (2017).

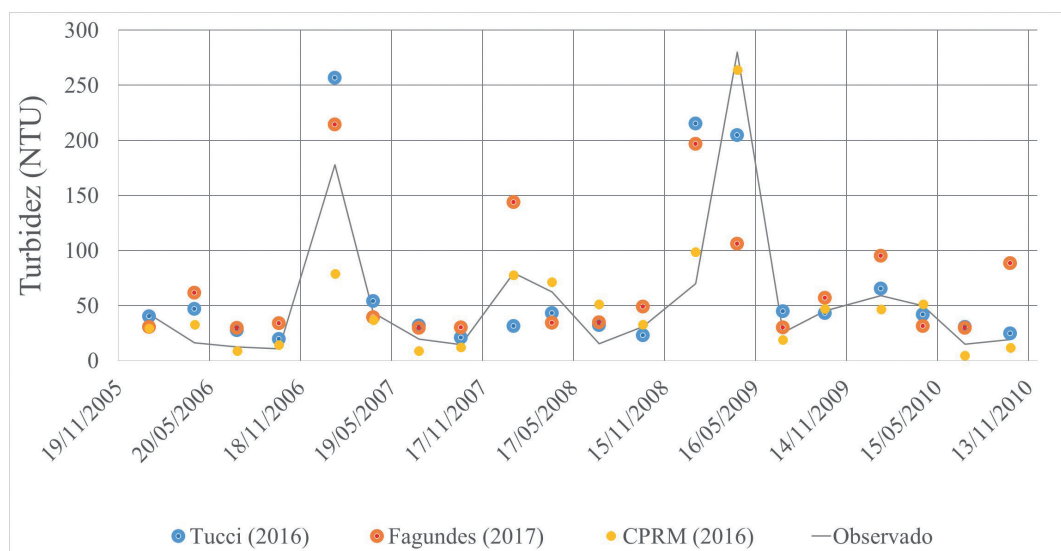


Figura 77 – Resultados comparados para a estação RD044 (rio Doce).
Fonte – Goulart (2017).

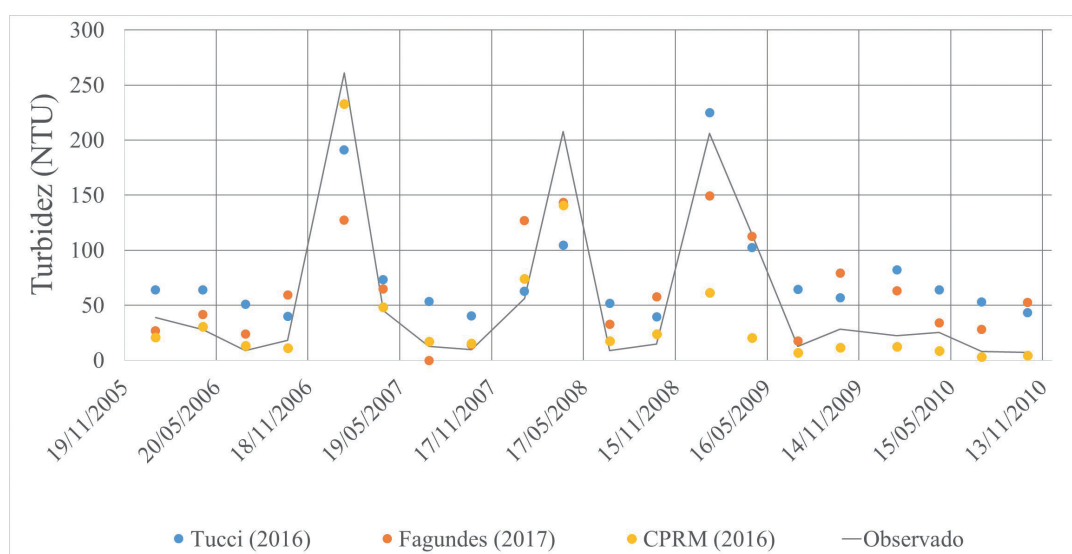
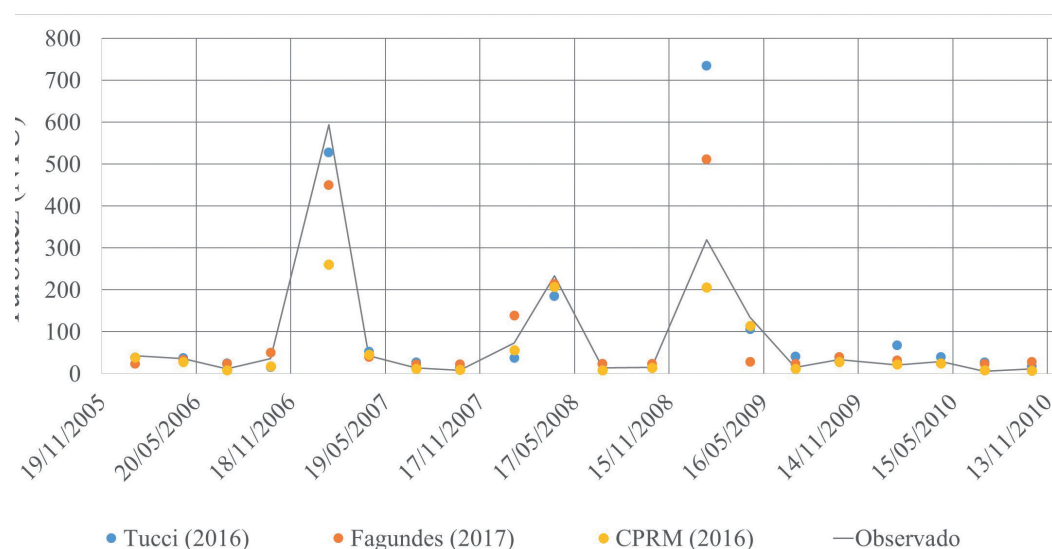


Figura 78 – Resultados comparados para a estação RD045 (rio Doce).
Fonte – Goulart (2017).



As Tabela 21, Tabela 22 e Tabela 23 mostram, na ótica de Goulart (2017), um sumário da comparação entre os modelos. A Tabela 21 mostra um resumo das estatísticas de erro resultantes da aplicação dos modelos de forma geral, enquanto a Tabela 22 os mostra por região da bacia. A Tabela 23 apresenta uma relação de vantagens e desvantagens de cada modelo prognóstico.

Tabela 21 – Resumo das estatísticas de erro.

PARÂMETRO	TUCCI (2016)	FAGUNDES (2017)	CPRM (2016)
Correlação linear média (r)	0,76	0,78	0,79
Amplitude de erro média (NTU)	97	97	45
Viés	Subestima	Subestima	Subestima
Região da bacia com melhor desempenho	Alto Doce	Médio e Baixo Médio	Alto e Médio Doce

Fonte – Goulart (2017).

Tabela 22 – Resumo das estatísticas de erro por região da bacia hidrográfica.

Região da bacia	PARÂMETRO	TUCCI (2016)	FAGUNDES (2017)	CPRM (2016)
Alto Doce	Correlação linear média (r)	0,80	0,73	0,84
	Amplitude de erro média	44,6	60,5	42,8
	Viés	Subestima	Superestima	Subestima
Médio Doce	Correlação linear média (r)	0,81	0,86	0,95
	Amplitude de erro média	153,5	138,6	43,8
	Viés	Superestima	Superestima	Subestima
Baixo Doce	Correlação linear média (r)	0,60	0,70	0,47
	Amplitude de erro média	87,5	85,5	62,2
	Viés	Subestima	Superestima	Subestima

Fonte – Goulart (2017).

Tabela 23 – Tabela comparativa entre os modelos aplicados.

MODELO		PRECISÃO DOS RESULTADOS	APLICAÇÃO DO MODELO
FAGUNDES (2017)	VANTAGEM	Boa precisão para valores baixo	Necessita de poucos dados, em geral de fácil obtenção; gera dados em qualquer ponto da bacia
	DESVANTAGEM	Baixa precisão nos picos	Necessário o conhecimento do software (MGB-SED)
TUCCI (2016)	VANTAGEM	Boa precisão para valores baixo	Modelo empírico de fácil aplicação
	DESVANTAGEM	Baixa precisão nos picos	Necessidade de dados de turbidez, que são de difícil obtenção
CPRM MODIFICADO (2016)	VANTAGEM	Boa precisão para quaisquer faixas de turbidez; menor amplitude de erro que os demais modelos	Fácil aplicação, utiliza apenas o princípio de diluição e retenção dos reservatórios
	DESVANTAGEM	Pequena quantidade de dados afeta o modelo, como no Baixado rio Doce	Necessidade de dados de turbidez, que são de difícil obtenção

Fonte – Goulart (2017).

Assim, concluiu-se que os três modelos possuem desempenho adequado em toda a bacia, cada qual destacando-se em relação aos demais conforme a região de aplicação (Alto, Médio e Baixo rio Doce). A definição de sua utilização dependerá da possibilidade de aquisição de dados, bem como da área de interesse dentro da bacia.

4.2.3 AVALIAÇÃO DE MODELOS SIMPLIFICADOS DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE SEDIMENTO

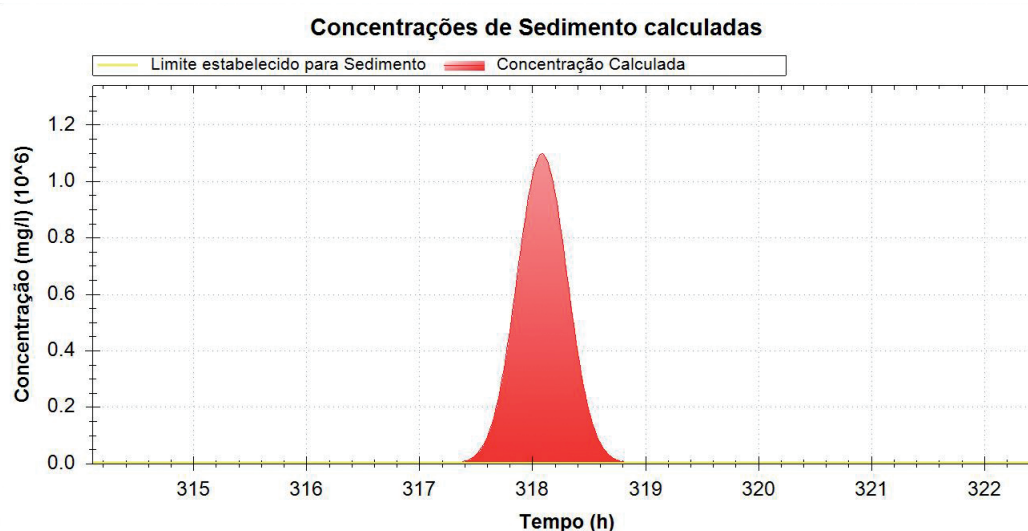
Logo após o rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, em novembro de 2015, evidenciou-se a importância do entendimento do tempo de viagem e das concentrações da pluma de sedimentos para este tipo de evento.

Nessa linha, visando avaliar se seria possível utilizar um modelo simplificado de propagação de constituintes em corpos hídricos de grande extensão para este tipo de evento, o trabalho de Quintela e Fan (2017) analisou a validade de aplicação do modelo de qualidade de água SIAQUA-IPH em estudos de dispersão de sedimentos resultantes de rompimentos de barragem de rejeitos. O caso estudado foi o próprio rompimento da barragem de Fundão e os resultados calculados pelo modelo foram contrapostos com os dados divulgados pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM).

O modelo SIAQUA-IPH é um modelo de qualidade da água acoplado com um software livre de Sistema de Informação Geográfica (SIG) para representação de impactos causados por lançamentos de poluentes em grande escala, com uma visão sistêmica de toda a bacia hidrográfica e com ferramentas simplificadas para lidar com as condições típicas de baixa disponibilidade de dados (Fan et al., 2013). No modelo é adotada uma metodologia baseada na solução analítica da equação de transporte de poluentes por meio de um esquema de sobreposição linear.

A Figura 79 apresenta um resultado obtido com o modelo antes da calibrado para a região de Colatina. A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos pela CPRM para a mesma região.

Figura 79 – Polutograma simulado para a região de Colatina.



Fonte – Quintela e Fan (2017).

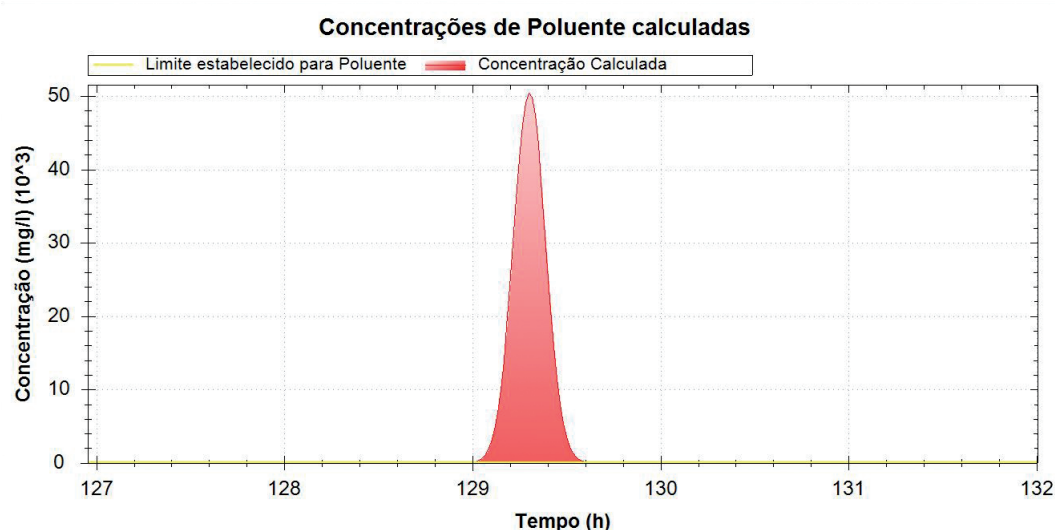
Tabela 24 – Valores de concentração coletadas pela CPRM para a região de Colatina.

Cidade	Data da Medição	Tempo pós-rompimento (h)	CSS (mg/L)
Colatina	19/11/2015	329	1208
Colatina	19/11/2015	330	1266
Colatina	19/11/2015	331	1556
Colatina	19/11/2015	334	1704
Colatina	19/11/2015	335	1726
Colatina	19/11/2015	336	1730
Colatina	19/11/2015	337	1726
Colatina	19/11/2015	338	1834
Colatina	19/11/2015	342	2044
Colatina	19/11/2015	354	2226

Fonte – Quintela e Fan (2017).

Percebe-se que tanto a magnitude da concentração quanto o período de passagem da pluma estão distantes da realidade, dessa forma a simulação não pode ser considerada satisfatória. A diferença na concentração dos sedimentos ocorre em virtude de algumas simplificações do modelo, como o fato dele não considerar o efeito da retenção de sedimentos à jusante de algumas barragens presentes ao longo do Rio Doce, como Aimorés e Mascarenhas. Assim, é preciso realizar a calibração do modelo.

Já na Figura 80, é possível observar o resultado gerado utilizando-se os parâmetros calibrados para a região de Governador Valadares. Dessa vez tanto o período de passagem da onda de cheia calculada quanto os valores de concentração calculados estão muito próximos dos valores divulgados pela CPRM (Tabela 25).

Figura 80 – Polutograma simulado para a região de Governador Valadares.

Fonte – Quintela e Fan (2017).

Tabela 25 – Valores de concentração coletadas pela CPRM para a região de Governador Valadares.

Cidade	Data da Medição	Tempo pós-rompimento (h)	CSS (mg/L)
Governador Valadares	10/11/2015	112	36240
Governador Valadares	10/11/2015	113	33728
Governador Valadares	10/11/2015	114	39040
Governador Valadares	10/11/2015	115	47582
Governador Valadares	10/11/2015	116	50942
Governador Valadares	10/11/2015	118	49372
Governador Valadares	10/11/2015	119	49490
Governador Valadares	10/11/2015	120	32442
Governador Valadares	10/11/2015	121	46700
Governador Valadares	10/11/2015	122	46718
Governador Valadares	10/11/2015	159	12422

Fonte – Quintela e Fan (2017).

Como conclusão deste estudo, Quintela e Fan (2017) relatam que os resultados atingidos pelo estudo demonstram que, embora o SIAQUA-IPH possua simplificações na sua formulação, ele pode ser útil no auxílio em estudos de prevenção e ações emergenciais para análise da dispersão dos sedimentos em pontos específicos da bacia hidrográfica, basta que seus parâmetros sejam calibrados.

Todavia, este tipo de calibração não foi trivial. Alguns dos parâmetros usados como entrada no modelo ficaram acima da faixa considerada normal de ocorrência dos valores. Significando que estes parâmetros podem ter sido “forçados” para compensar outros fenômenos que não são representados pela abordagem simplificada.

Ou seja, a abordagem simplificada pode ser útil, mas a sua representatividade física é comprometida, e dada a necessidade de dados e de calibrações, ela pode não ser a melhor escolha para estes casos, em comparação com modelos mais complexos.

4.2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Simulações hidrossedimentológicas foram comparadas usando modelos simplificados e um modelo distribuído. Não houve diferenças significativas entre as modelagens, sendo que em certos locais e tempos uma ou outra modelagem têm um melhor desempenho. A maior desvantagem da modelagem simplificada é a calibração, já que em alguns casos, os parâmetros podem assumir valores não realísticos. Nestes casos, apesar de a modelagem apresentar bons resultados é incerto se a calibração continuará válida para outros cenários. Dessa forma, o modelo distribuído será utilizado para realizar o diagnóstico dos danos.

4.3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal American Water Works Association*, v. 34, p. 73-89, 1998.
- BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; DE ROO, A. (2016). MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 21, pp. 589-615.
- BESKOW, S.; MELLO, C. R.; NORTON, L. D.; CURI, N.; VIOLA, M. R.; AVANZI, J.C. Soil prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. *Catena*, v. 79, p. 49-59, 2009, doi:10.1016/j.catena.2009.05.010.
- BREMICKER, M. Aufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells. *Dissertation Doktorgrad, Geowissenschaftlicher Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg*, 1998.
- BUARQUE, D. C. Simulação da geração e do transporte de sedimentos em grandes bacias: Estudo de caso do Rio Madeira. *Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS*, 2012, 224p.
- BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; GUYOT, J. L. Modelagem computacional da dinâmica de sedimentos em suspensão na bacia do Rio Madeira. In: *ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS*, 12. Anais... [S.l]: ABRH, 2016, ISSN 2359-2141.
- CARVALHO, N. O. *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- CASTILHO, A. S.; MOTTA, B. G.; MARTINS, L. K. L. A. (2016). Modelo de previsão de turbidez do rio Doce após a ruptura da barragem de rejeitos. *Anais do XII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH – Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Velho (RO)*, 2016.
- COLLISCHONN, W. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas*, 2001.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, p. 878-895, 2007, doi:10.1623/hysj.52.5.878.
- DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS-procedure for automatically calculating the USLE LS-factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 51, p. 427-433, 1996.
- Espinoza Villar, R.; Martinez, J. M., Le Texier, M.; Guyot, J. L.; Fraizy, P.; Meneses, P. R.; De Oliveira, E.; 2013. A study of sediment transport in the Madeira River, Brazil, using MODIS remote-sensing images. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 44, p. 45-54.
- ESPINOZA VILLAR, R.; MARTINEZ, J. M.; GUYOT, J. L.; FRAIZY, P.; ARMIJOS, E.; CRAVE, A; LAVADO, W. The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *Journal of hydrology*, v. 444, p. 221-228, 2012.

- FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. . Simulação Hidrossedimentológica Preliminar na Bacia do Rio Doce com o Modelo MGB-SED. In: II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2017, Foz do Iguaçu. II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2017a.
- FAGUNDES, H. O.; FASSONI-ANDRADE, A. C. ; PAIVA, R. C. D. . Análise dos Sedimentos em Suspensão na Bacia Hidrográfica do Rio Doce com Imagens de Satélite. In: II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2017, Foz do Iguaçu. II Congresso Internacional de Hidrossedimentologia, 2017b.
- FAGUNDES, H. O.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M. . Sedimentos em suspensão observados com imagens Landsat para modelagem de grandes bacias. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017c, Florianópolis. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017.
- FAN, F. M. Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015, 384 p.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 19, p. 243-254, 2014.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; RIGO, D. . Modelo analítico de qualidade da água acoplado com Sistema de Informação Geográfica para simulação de lançamentos com duração variada. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 18, p. 359-370, 2013.
- FAN, F. M.; SCHWANENBERG, D. ; COLLISCHONN, W. ; WEERTS, A. . Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecasts of the TIGGE database for large scale basins in Brazil. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 4, p. 196-227, 2015.
- Fleifle, A. E.; 2013. Suspended Sediment Load Monitoring Along the Mekong River from Satellite Images. Journal of Earth Science & Climatic Change, v. 2013.
- FLEISCHMANN, A.; SIQUEIRA, V.; PARIS, A.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.; GOSSETT, M.; PONTES, P.; CALMANT, S.; BIANCAMARIA, S.; CRÉTAUX, J. F.; TANIMOUNE, B. Coupled hydrologic and hydraulic modeling of Upper Niger River Basin. Geophysical Research Abstracts, v. 19, 2017.
- Goulart, C. B. 2017. MODELAGEM DE TURBIDEZ NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 109pg.
- HIDROWEB. www.snirh.gov.br/hidroweb. Acesso em 14 de abril de 2018.
- IGAM. Informativo – Bacia do Rio Doce: Março/2015. 2015.
- KIRKBY, M. J.; CHORLEY, R. J. Throughflow, overland flow and erosion. Bulletin Int. Ass. of Hydrol. Sci. v. 12, p. 5-21, 1967.
- LODHI, M. A.; RUNDQUIST, D. C.; HAN, L.; KUZILA, M. S. (1998). Estimation of suspended sediment concentration in water using integrated surface reflectance. Geocarto International 13 (2), pp. 11-15.
- LONG, C. M.; PAVELSKY, T. M. (2013). Remote sensing of suspended sediment concentration and hydrologic connectivity in a complex wetland environment. Remote Sensing of Environment 129, pp. 197-209.
- LOPES, v. A. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2017.
- MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; RUHOFF, A. L. Utilização de métodos de representação especial para cálculo do fator topográfico na Equação Universal de Perda de Solo revisada em bacias hidrográficas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 34, p. 1455-1462, 2010.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. Asabe 50 (3), pp. 885-900.

- MUNDAY JR., J. C.; ALFÖLDI, T. T. (1979). Landsat test of diffuse reflectance models for aquatic suspended solids measurement. *Remote Sensing of Environment* 8 (2), pp. 169-183.
- PAIVA, R. C. D. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias. Estudo de caso: bacia do Rio Solimões. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre, 2009, 168p.
- PANDEY, A.; HIMANSHU, S. K.; MISHRA, S. K.; SINGH, v. P. (2016). Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena* 147, pp. 595–620.
- PONTES, P. R.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C.; BUARQUE, D. C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015, ISSN 2318-0331.
- QUINTELA, R. S. ; FAN, F. M. . ESTUDO DE APLICAÇÃO PRELIMINAR DO MODELO SIAQUA-IPH PARA DISPERSÃO LONGITUDINAL DE SEDIMENTOS EM RIOS RESULTANTES DE ROMPIMENTOS DE BARRAGENS DE REJEITOS. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis - SC. Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre - RS: ABRH, 2017. v. I. p. PAP023142.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. Handbook of hydrology. [S.l.]: McGraw-Hill, 1993, 1424p.
- THIESSEN, A. H. Precipitation averages for large áreas. *Monthly Weather Review*. v. 39, n. 7, p. 1082-1084, 1911.
- TUCCI, C. E. M. (2016). Prognóstico de turbidez no rio Doce. Rhama Consultoria, Pesquisa e Treinamento Ambiental. Porto Alegre, novembro de 2016.
- TUCCI, C. E. M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS; ABRH, 1998, 669p.
- VERMOTE, E.; JUSTICE, C.; CLAVERIE, M.; FRANCH, B (2016). Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment* 185, pp.46-56.
- WATSON, D. F., PHILIP, G. M. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing*, 2 315-237, 1985.
- WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 1994.
- WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: U.S. Department of Agriculture. Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. Washington: Publication ARS-S-40, p. 244-252, 1975.
- WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Terrain analysis: principles and applications. [S.l.]: John Wiley and Sons, 2000, 479p.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook nº 537. Washington: U.S. Gov. Print. Office, 1978.
- YANG, C. T. Incipient motion and sediment transport. *Journal Hydr. Div.*, v. 99, n. 10, p. 1679-1704, 1973.
- YANG, C. T. Unit stream power equation for gravel. *Journal Hydraulic Eng.*, ASCE, v. 110, n. 12, 1984.

5 SEDIMENTO MARINHO

No presente capítulo são apresentados resultados da avaliação de dados sedimentológicos e de características químicas dos sedimentos marinhos junto à foz do rio Doce, relativos ao período posterior ao desastre de Mariana. Estudos sobre os bentos de fundos inconsolidados na região também são apresentados, considerando sua representatividade e interação com a qualidade do sedimento. A apresentação de tais resultados visa subsidiar a compreensão do evento ocorrido, em termos da magnitude e da área sujeita as alterações nos sedimentos marinhos, para fins do diagnóstico ambiental.

O presente estudo teve como objetivo avaliar as características dos sedimentos marinhos adjacentes à foz do rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, comparando dados sedimentológicos e respectivos dados químicos de potencial interesse ecológico com as condições anteriores ao rompimento e com os valores de concentrações consideradas limiares em modelos de avaliação da qualidade de sedimentos.

O estudo dos bentos de fundos inconsolidados tem como objetivo sintetizar e consolidar informações dos estudos realizados com a comunidade benthica após o rompimento da Barragem de Fundão, no município de Marina (MG), na região da foz do rio Doce e Zona Litorânea do Espírito Santo.

5.1 METODOLOGIA

Para a avaliação das características dos sedimentos marinhos na região adjacente a foz do rio Doce, após a chegada de rejeitos originários do rompimento da barragem de Fundão no oceano, foi necessária o cumprimento de diversas etapas metodológicas descritas nos itens a seguir.

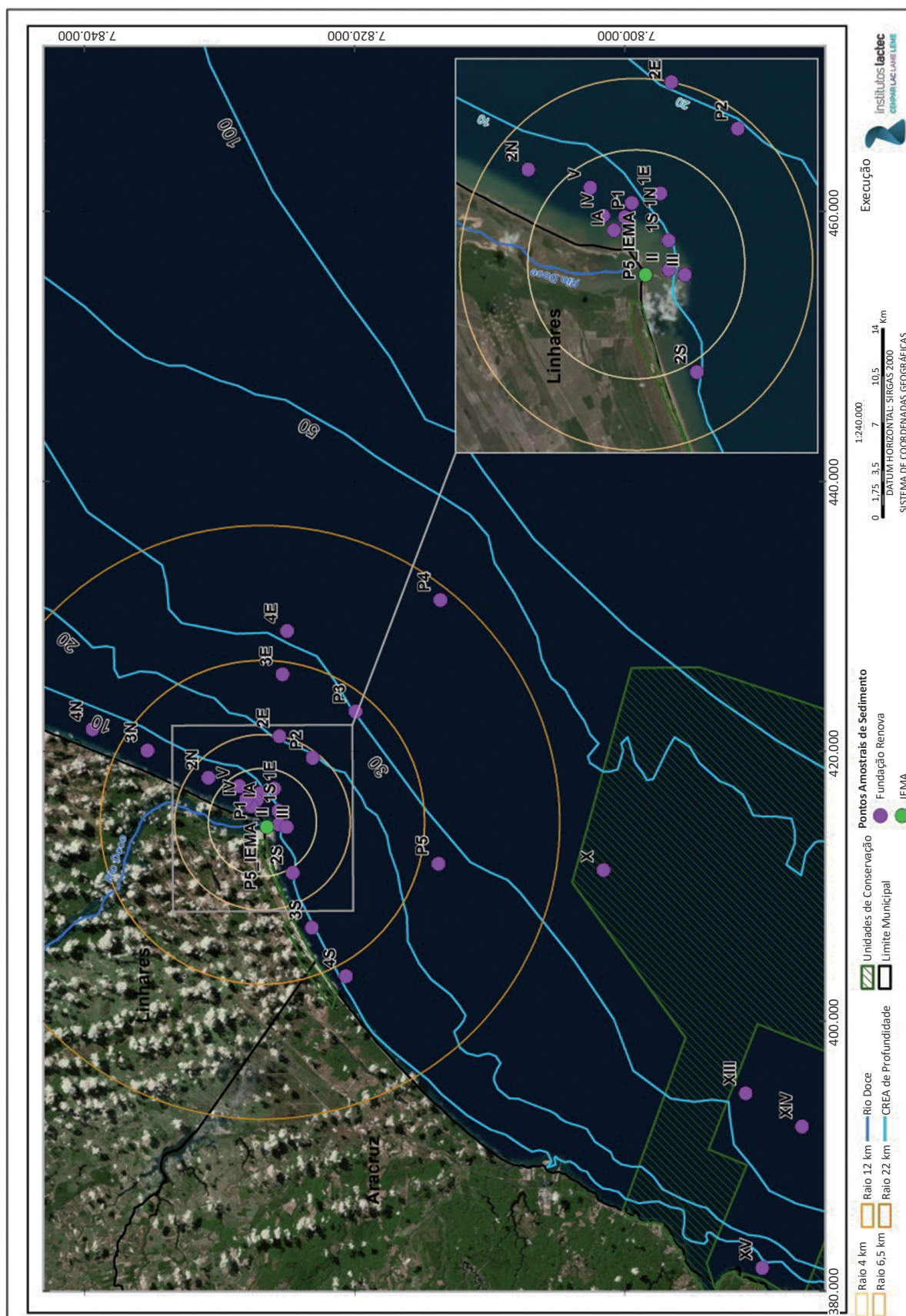
Para os bentos de fundos inconsolidados foi realizado extenso levantamento bibliográfico de estudos realizados na zona litorânea do Espírito Santo após o rompimento da barragem de fundão.

5.1.1 ABRANGÊNCIA DA REGIÃO AVALIADA

Os primeiros levantamentos de dados sobre os sedimentos na região costeira foram realizados em novembro de 2015 pela Fundação Renova, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) do Espírito Santo. O levantamento de dados de uma maneira sistêmica e contínua foi realizado apenas pela Fundação Renova e pelo IEMA resultando num banco de dados de qualidade dos sedimentos conciso que cobre todo o período abrangido por este relatório (Novembro de 2015 a Agosto de 2017). Outros estudos de análise da qualidade do sedimento a partir de amostras coletadas pós-desastre (UFES, 2017; ROMERO, 2017), foram considerados neste relatório, porém, como contribuição suplementar na discussão.

Com relação aos parâmetros, foi avaliada a granulometria e os elementos químicos de potencial interesse ecológico que apresentaram um número de resultados suficientes para análises estatísticas. Desta maneira, o presente relatório abordará as análises na região de abrangência dos dados da Fundação Renova, e que envolve uma região de um raio de 22 km a partir da foz do rio Doce e a região da APA Costa das Algas (Figura 81).

Figura 81 – Localização dos pontos de amostragem de sedimento na zona costeira e subdivisão da área aquática nos setores a serem analisados.



Conforme pode ser visualizado na Figura 81, o espaço aquático costeiro analisado, nas adjacências da foz do rio Doce, foi dividido em 5 áreas, cada uma representada por pontos amostrais distintos. A representatividade dos pontos amostrais para cada área é detalhada na Tabela 26.

Tabela 26 – Divisão do espaço aquático em áreas e pontos amostrais de sedimentos correspondentes.

Grupo	Id do Ponto	X	Y	ZONA	DATUM	Instituição responsável
Área Foz	P5 (IEMA)	414361	7826485	24S	SIRGAS2000	IEMA*
ÁREA 1 < 4 km da foz do rio Doce	Seção IA – ES	415911	7827650	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	Seção II – ES	414545	7825624	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	Seção III – ES	414368	7825031	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	Seção IV – ES	416417	7828044	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	Seção V – ES	417401	7828528	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	1N – ES	416873	7827003	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	1S – ES	415565	7825640	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	1E – ES	417209	7825949	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	P1	416370	7827252	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
ÁREA 2 > 4 e < 6,5 km da foz do rio Doce	2N – ES	418018	7830823	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	2S – ES	410972	7824576	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	2E – ES	421106	7825556	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	P2	419482	7823105	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
ÁREA 3 > 6,5 e < 12 km da foz do rio Doce	3N – ES	420031	7835333	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	3S – ES	406918	7823167	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	3E – ES	425693	7825342	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	P3	422923	7819922	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
ÁREA 4 > 12 e < 22 km da foz do rio Doce	4S - ES	403324	7820639	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	4N - ES	421630	7839393	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	4E - ES	428891	7824980	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	P4	431206	7813648	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	P5	411656	7813794	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
ÁREA 5 - APA Costa das Algas	Seção X - ES	411169	7801583	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	Seção XI - ES	422163	7798704	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	Seção XIII - ES	394638	7791042	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	Seção XIV - ES	392179	7786876	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova
	Seção XV - ES	381682	7789835	24S	SIRGAS2000	Fundação Renova

5.1.2 PERÍODO AVALIADO

Nesse documento são apresentadas avaliações dos resultados do banco de dados da Fundação Renova que compreende o período de novembro de 2015 até agosto de 2017 e do banco de dados do IEMA, que compreende o período de novembro de 2015 a agosto de 2016. Os resultados desses dois anos de monitoramento foram classificados como pós-desastre, sendo que foram divididos entre períodos pré e pós-chegada da pluma de sedimentos, visto que as primeiras coletas foram realizadas no dia 17 de novembro de 2015, período considerado pela CPRM (2016) como posterior a chegada da água deslocada pelo rompimento da barragem (11/11/2015) e pré-chegada da pluma de sedimentos (21/11/2015). Estes dados pós-desastre, bem como os dados pré-desastre levantados durante a elaboração do relatório da linha base (Institutos Lactec, 2017), também foram divididos em estação seca e chuvosa, conforme pode ser verificado na Tabela 27.

Tabela 27 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.

Período	Minas Gerais (IGAM)	Estação	Abreviação
Pré-desastre	Série histórica de dados levantados na linha base	Seca	T0-Sc
		Chuvosa	T0-Ch
Pós-desastre	Coletas do dia 17/11/2015, pré chegada da pluma de sedimentos	Chuvosa Pré-Pluma 2015	T1
	21/11/2015 a Março/2016, pós-chegada da pluma de sedimentos	Chuvosa 2015/2016	T2
	Abril/2016 a Setembro/2016	Seca 2016	T3
	Outubro/2016 a Março/2017	Chuvosa 2016/2017	T4
	Abril/2017 a Agosto/2017	Seca 2017	T5

5.1.3 VARIÁVEIS FÍSICAS E QUÍMICAS DOS SEDIMENTOS MARINHOS

Para a avaliação das alterações na qualidade dos sedimentos marinhos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, foram selecionados os parâmetros relacionados na Tabela 28.

Um primeiro objetivo foi caracterizar a distribuição dos sedimentos de acordo com sua granulometria, com a intenção de verificar a eventual presença de material oriundo da barragem de rejeitos nos sedimentos amostrados do fundo oceânico.

A seguir, foram selecionados elementos químicos de potencial interesse ecológico relacionado aos rejeitos do desastre de Mariana para comparar com valores de concentrações consideradas limiares de efeitos em modelos de avaliação da qualidade de sedimentos. Analisou-se descritivamente as concentrações dos elementos alumínio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês, mercúrio, níquel, vanádio e zinco.

Tabela 28 – Variáveis de qualidade de sedimento avaliadas e respectivos objetivos.

Objetivo da avaliação	Variável de qualidade de sedimento
Caracterização dos sedimentos	Distribuição Granulométrica

Objetivo da avaliação	Variável de qualidade de sedimento
Avaliação das concentrações de metais com relação à valores de referência de qualidade de sedimentos marinhos: TEL (<i>Threshold effects level</i>), PEL (<i>Probable Effect Level</i>), ERM (<i>Effect Range Median</i>), ERL (<i>Effect Range Low</i>) e AET (<i>Apparent effects threshold</i>)	Alumínio
	Arsênio
	Bário
	Cádmio
	Chumbo
	Cobre
	Cromo
	Ferro
	Manganês
	Mercúrio
	Níquel
	Vanádio
	Zinco

5.1.4 AVALIAÇÃO DOS DADOS DE QUALIDADE DO SEDIMENTO E GRANULOMETRIA

5.1.4.1 Graulometria

Primeiramente, para a preparação dos dados, os resultados de granulometria das diferentes fontes de dados utilizadas foram padronizados em percentual que é a unidade usualmente utilizada para quantificar as frações de sedimentos, bem como classificados de acordo com a fonte geradora dos dados.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 454/2012, as frações de sedimento devem ser classificadas em Areia Muito Grossa, Areia Grossa, Areia Média, Areia Fina, Areia Muito Fina, Silte e Argila, cuja soma deve totalizar 100%. Na Tabela 29 pode ser visualizado o tamanho de grão correspondente a cada fração classificada.

Tabela 29 – Classificação granulométrica dos sedimentos*(Resolução CONAMA nº 454/12).

CLASSIFICAÇÃO	(mm)
Areia muito grossa	2 a 1
Areia grossa	1 a 0,5
Areia média	0,5 a 0,25
Areia fina	0,25 a 0,125
Areia muito fina	0,125 a 0,062
Silte	0,062 a 0,00394
Argila	0,00394 a 0,0002

Ainda quanto à preparação dos dados, foram retirados das tabelas resultados de amostras cujo total de frações não somaram 100% ou que apresentaram frações granulométricas com valores

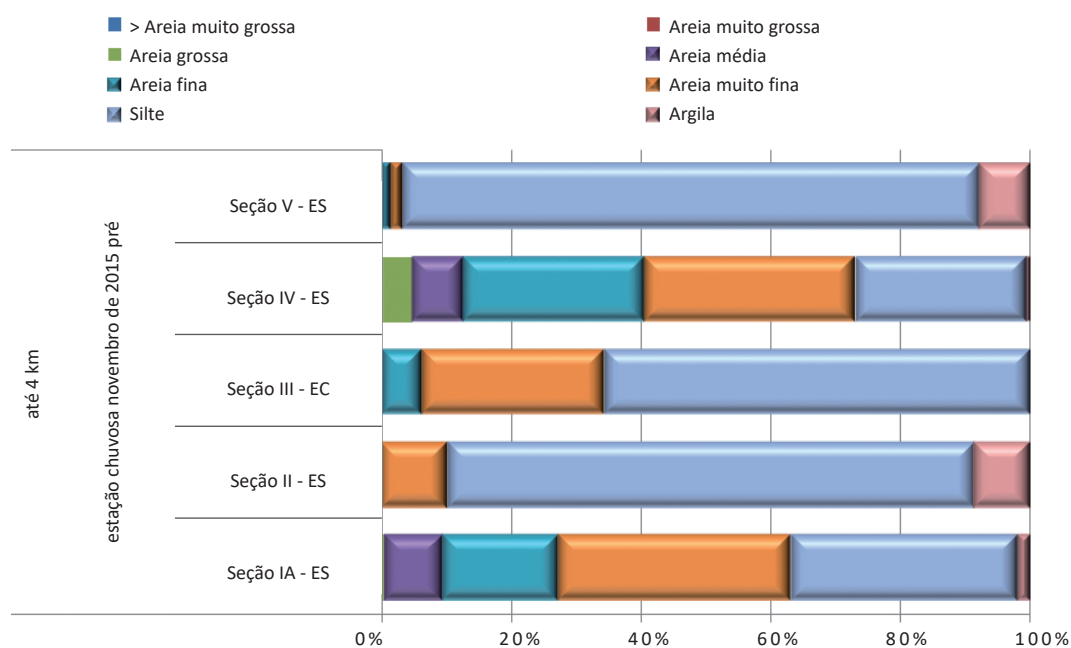
indefinidos (<q), visto que estas situações colocam em dúvida a quantidade total de sedimentos de cada uma das amostras, bem como os pontos amostrais que não apresentavam coordenadas geográficas impossibilitando o entendimento da localização exata da amostra. Este filtro qualitativo nos dados fez com que neste relatório fossem incluídos nas análises estatísticas e cartográficas os dados gerados pelo IEMA e fornecidos pela Fundação Renova. Dados de outras fontes foram utilizados de maneira complementar a discussão dos resultados.

Posteriormente, as amostras foram separadas em grupos compostos por pontos amostrais localizados em distâncias predefinidas em relação à foz do rio Doce e em períodos distintos, conforme as divisões do espaço aquático e a sazonalidade do regime hidrológico determinadas na seção anterior.

Posteriormente à etapa de preparação, os dados foram processados através de métodos computacionais para classificação quanto ao tamanho das partículas que compõe a amostra. O programa utilizado para tal procedimento foi o *Sysgran* (CAMARGO, 2005), cujos critérios de caracterização se fundamentam em Folk & Ward (1957), onde são determinadas as porcentagens relativas dos quatro componentes granulométricos básicos do sedimento (areias, silte e argila), além de parâmetros estatísticos das amostras, como os valores de média ou diâmetro médio, desvio padrão ou grau de seleção, assimetria e curtose das amostras. No entanto, destaca-se que este aplicativo não leva em consideração a composição mineralógica das amostras.

A partir dos resultados extraídos do *Sysgran* para cada amostra, foi calculada a média de cada uma das frações granulométricas de cada ponto amostral para os diferentes períodos, no intuito de caracterizar a granulometria do ponto amostral com base nos dados obtidos durante toda a extensão do período. Para auxiliar a análise da predominância das frações de cada um dos períodos pós-desastre, foram elaborados gráficos de barras, onde pode ser visto o percentual médio de cada fração, conforme exemplo da Figura 82. Também foram apresentados para algumas amostras diagramas triangulares, com as frações de areia x silte x argila, produzidos no software *Sysgran*.

Figura 82 – Exemplo dos gráficos utilizados para demonstrar o percentual médio das frações granulométricas em cada amostra.



Para auxiliar no entendimento das variações espaciais das frações granulométricas nos sedimentos marinhos nas adjacências da foz do rio Doce, foram elaborados mapas com as frações de argila, silte e areias médias em cada ponto amostral para os distintos períodos, que permitiu identificar as diferenças espaciais entre as frações ao longo da área estudada, bem como verificar mais amplamente eventuais diferenças entre os períodos analisados.

5.1.4.2 Parâmetros de qualidade do sedimento

Para os metais considerados de interesse, elaboraram-se gráficos do tipo “Box-plot” que representam os valores mínimos, máximos, médios além dos valores representativos dos quartis de 25% e 75%. Também foram elaboradas cartas da distribuição dos valores medianos de cada metal separando os períodos de chuva e seca de 2016 e 2017.

Os resultados de metais também foram comparados com os valores empíricos de qualidade de sedimentos, baseados nos valores de referência de alguns índices recomendados pela NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (BUCHMAN, 2008). Foram utilizados os índices de concentração provável de efeito (“*Probable Effect Level*” - PEL), que é a concentração acima da qual efeitos biológicos adversos ocorrem com frequência; concentração limiar de efeito (“*Threshold effects level*” - TEL) que é a concentração abaixo da qual efeitos biológicos adversos ocorrem raramente (WENNING, 2002). Também foram utilizados os índices de faixa média de efeitos (“*Effect Range Median*” - ERM), que é a concentração acima da qual os efeitos são observados com frequência; e a faixa baixa de efeito (“*Effect Range Low*” - ERL), concentração abaixo da qual raramente são observados efeitos biológicos adversos (LONG et al, 1995). Os três metais de maior interesse para a avaliação dos sedimentos, conforme o estudo de avaliação da qualidade da água costeira desse monitoramento são alumínio, ferro e manganês para os quais não se dispõe de valores TEL, PEL, ERM ou ERL. Nesse caso utilizou-se o índice de qualidade de sedimentos denominado limite de efeitos aparentes (“*Apparent effects threshold*” – AET) que identifica concentrações no sedimento acima das quais efeitos adversos sempre são esperados que ocorram (WENNIG, 2002). Finalmente, utilizou-se uma abordagem de cálculo de quocientes dividindo-se a concentração encontrada de cada elemento químico pelo PEL deste elemento para, na sequência calcular um quociente médio para a amostra (WENNING, 2002). Os valores de referência (BUCHMAN, 2008) para os parâmetros avaliados podem ser visualizados na Tabela 30.

Tabela 30 – Valores de referência utilizados para comparação das concentrações dos elementos avaliados no sedimento marinho (BUCHMAN, 2008).

Parâmetro	Valores de referência				
	TEL	ERL	PEL	ERM	AET
Al (%)	-	-	-	-	1,8
As (mg/kg)	7,24	8,2	41,6	70	-
Ba (mg/kg)	130,1	-	-	-	-
Cd (mg/kg)	0,68	1,2	4,21	9,6	-
Cr (mg/kg)	52,3	81	160	370	-
Cr+3 (mg/kg)	-	-	-	-	-
Cr+6 (mg/kg)	-	-	-	-	-
Cu (mg/kg)	18,7	34	108	270	-

Parâmetro	Valores de referência				
	TEL	ERL	PEL	ERM	AET
Fe (%)	-	-	-	-	22
Hg (mg/kg)	0,13	0,15	0,7	0,71	-
Mn (mg/kg)	-	-	-	-	260
Ni (mg/kg)	15,9	20,9	42,8	51,6	-
Pb (mg/kg)	30,24	46,7	112	218	-
V (mg/kg)	-	-	-	-	57
Zn (mg/kg)	124	150	271	410	-

5.1.4.2.3.1 Mapeamento das Variáveis:

Foram elaborados mapas com os percentuais médios de areia, silte e argila de cada ponto amostral para cada período pós-desastre, no intuito de avaliar os mesmos fatores mencionados acima, e auxiliar na compreensão e caracterização do padrão espacial da granulometria dos sedimentos na região da foz do rio Doce pós-desastre.

Para analisar as alterações de qualidade do sedimento e de padrões granulométricos nas adjacências da foz do rio Doce em cada período amostrado, bem como verificar possíveis diferenças nos padrões de concentrações de metais e de frações granulométricas entre os diferentes períodos, optou-se por utilizar também métodos cartográficos.

Para o mapeamento da distribuição das concentrações de metais foi realizada a interpolação das medianas, calculadas conforme metodologia descrita anteriormente, dos resultados de cada ponto amostral para os parâmetros mencionados anteriormente. Para a interpolação optou-se por utilizar o método *Natural Neighbor* (Vizinhos Naturais). A seleção do método se deu após a realização de testes com outros métodos (Krigagem, *Inverse Distance Weighted – IDW*, *Spline*) sendo este o que representou melhor as distribuições das concentrações de acordo com as características dos dados e malha amostral do plano de monitoramento de qualidade do sedimento na zona costeira elaborado pela Fundação Renova.

O método de interpolação *Natural Neighbor* é uma técnica de interpolação introduzida por Sibson (1981), onde é utilizada uma média ponderada baseada na proporção das áreas em torno de cada ponto amostral. Estas áreas são determinadas por meio da geração de diagramas de Voronoi no entorno de cada ponto. O conceito do diagrama de Voronoi constitui-se da divisão de determinada região em um conjunto de sub-regiões formando assim polígonos convexos, em que cada sub-região está associada a um ponto. Mais precisamente, cada sub-região (também chamada de polígono de Voronoi ou de Thiessen) é formada por um ponto gerador que contém todos os pontos que estão mais próximos do ponto gerador do que qualquer outro ponto (LEDOUX; GOLD, 2005). Este método é considerado adequado, pois não extrapola valores, resolvendo a interpolação apenas para o interior do domínio dos dados, região escopo da presente avaliação, bem como faz a interpolação através da média ponderada dos pontos vizinhos, onde os pesos são proporcionais ao tamanho das áreas.

Além disso, foram sobrepostos às interpolações os percentuais médios de finos de cada ponto amostral nos diferentes períodos caracterizados pós-desastre, no intuito de auxiliar na discussão das relações entre metais e os percentuais de finos na região da foz do rio Doce pós-desastre.

5.2 RESULTADOS

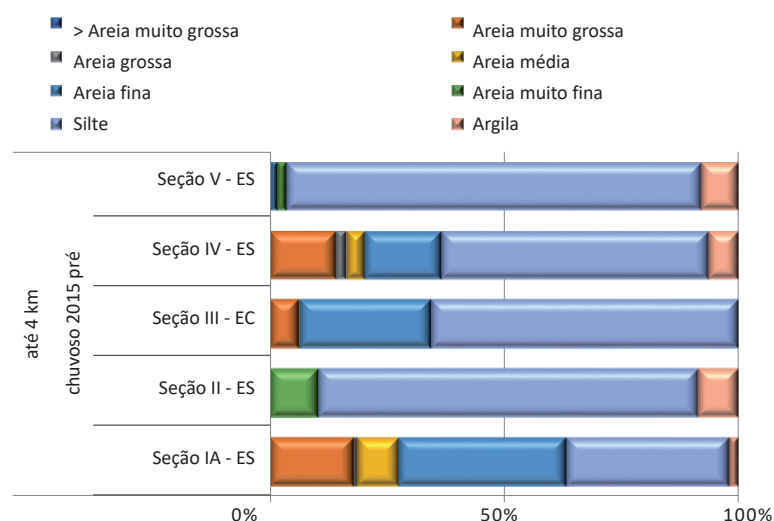
5.2.1 GRANULOMETRIA

5.2.1.1 Dados provenientes dos monitoramentos realizado pela Fundação Renova

5.2.1.1.1 Médias das distribuições granulométricas dos sedimentos coletados na foz do rio Doce no período pós-desastre e pré-chegada da pluma de sedimentos a zona costeira – T1 (amostragem do dia 17/11/2015)

Os sedimentos coletados no período após a chegada da água deslocada pelo rompimento da barragem, porém antes da chegada da pluma de sedimentos (T1), podem já ter sido afetados pelo desastre visto o potencial de ressuspensão de sedimentos contaminados do leito do rio Doce e carregamento destes até a zona costeira. Neste período foram coletadas 5 amostras, sendo que os resultados das amostras das Seções V-ES, II-ES e III-ES apresentaram predominância de sedimentos silticos enquanto que nas estações Seção IV-ES e Seção 1A-ES as frações arenosas somaram mais de 60% (Figura 83).

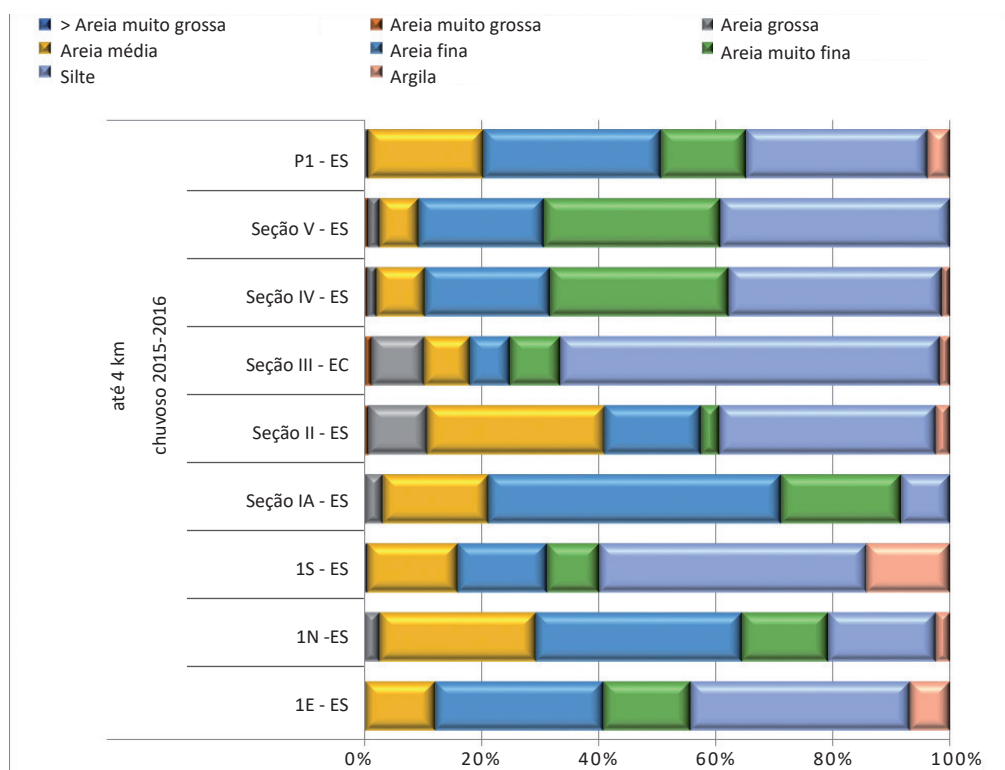
Figura 83 – Médias das frações granulométricas dos sedimentos coletados até novembro de 2015 na estação chuvosa a distância de até 4 km da foz do rio Doce.



5.2.1.1.2 Médias das distribuições granulométricas dos sedimentos coletados nas adjacências da foz do rio Doce no período pós-desastre T2 a T5 (dezembro de 2015 a setembro de 2017)

A granulometria dos sedimentos coletados no período T2, estação chuvosa 2015/2016 pós chegada da pluma de rejeitos, a uma distância inferior a 4 km da foz do rio Doce (Figura 84) é composta principalmente por sedimentos majoritariamente arenosos com um percentual de finos considerável (aproximadamente 40%), com exceção das amostras 1S, 1E e Seção III onde predominaram sedimentos finos. Ressalta-se a exceção da estação IA que apresentou um teor de areias de aproximadamente 90%.

Figura 84 – Médias das frações granulométricas dos sedimentos coletados na estação chuvosa de novembro 2016 a distância até 4 km da foz do rio Doce.



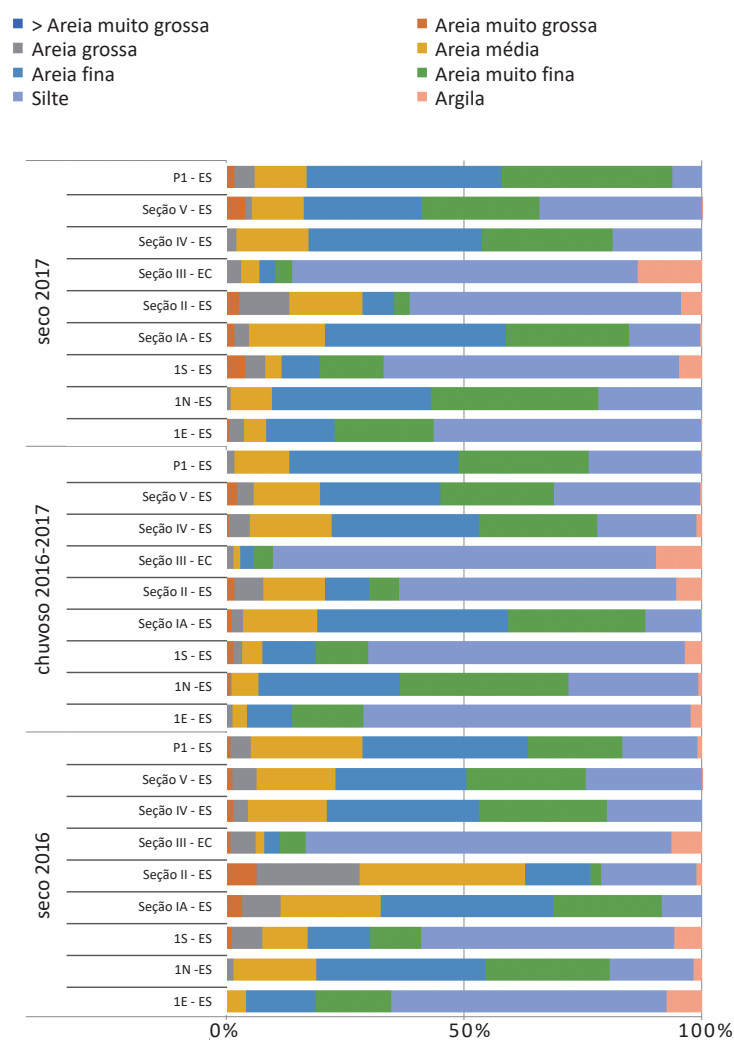
Tanto na estação seca de 2016 quanto na estação chuvosa de 2016/2017 (Figura 85) a distribuição dos sedimentos coletados a distância inferior a 4 km continuou a apresentar principalmente grãos da fração arenosa, com frações de finos consideráveis. Os pontos que apresentaram maiores predominância de finos (1S, 1E e III), nos dois períodos consequentes continuaram a apresentar este padrão, com um leve aumento no teor de finos, conforme pode ser visualizado na Tabela 31. Em geral, devido à heterogeneidade quanto às características granulométricas, não foi possível determinar alterações de padrões nas estações amostrais quando considerada a sazonalidade pós-chegada da pluma de rejeitos na zona costeira.

Nas estações amostrais IA a V, quando comparados os períodos pós e período pré-chegada da pluma de rejeitos, podem ser identificadas reduções significativas, de até 64%, nos teores de finos (silte + argila), com exceção no ponto III que apresentou um acréscimo de 9% no teor de finos, conforme pode ser visualizado na Tabela 31.

Tabela 31 – Diferença do percentual de finos entre os períodos pré e pós chegada da pluma de rejeitos.

Estação Amostral	Percentual de Finos na Amostragem realizada Pré Chegada da Pluma de Rejeitos	Média dos Percentuais de Finos nos Quatro Períodos pós chegada da Pluma de Rejeitos	Redução do Percentual de Finos Pós e Pré Chegada da Pluma de Rejeitos
Seção IA - ES	11%	37%	26%
Seção II - ES	53%	90%	36%
Seção III - ES	74%	66%	-9%
Seção IV - ES	25%	63%	38%
Seção V - ES	32%	97%	64%

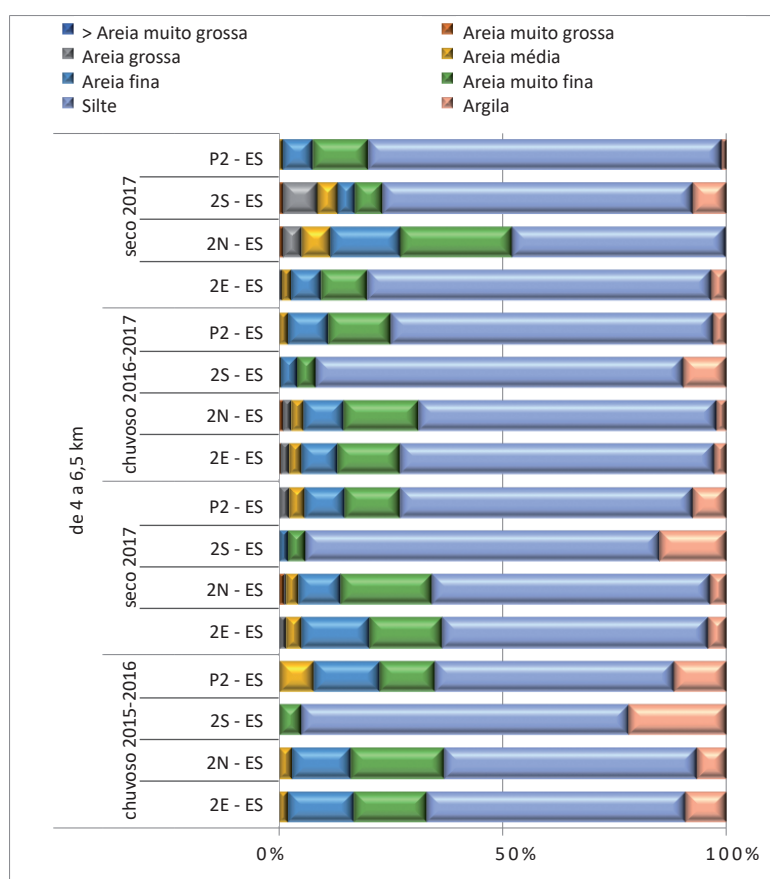
Figura 85 – Médias frações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 a distância até 6,5 km da foz do rio Doce.



A composição granulométrica dos sedimentos coletados na área entre os raios de 4 km e 6,5 km da foz do rio Doce (Área 2) nos períodos chuvoso 2015/2016, seco/2016 e chuvoso 2016/2017 apresentaram os maiores teores de finos entre todas áreas, inclusive maiores teores do que a Área 1 (< 4 km da foz), podendo indicar que os sedimentos mais finos, tendem a se depositar predominante nesta distância da foz (Figura 86).

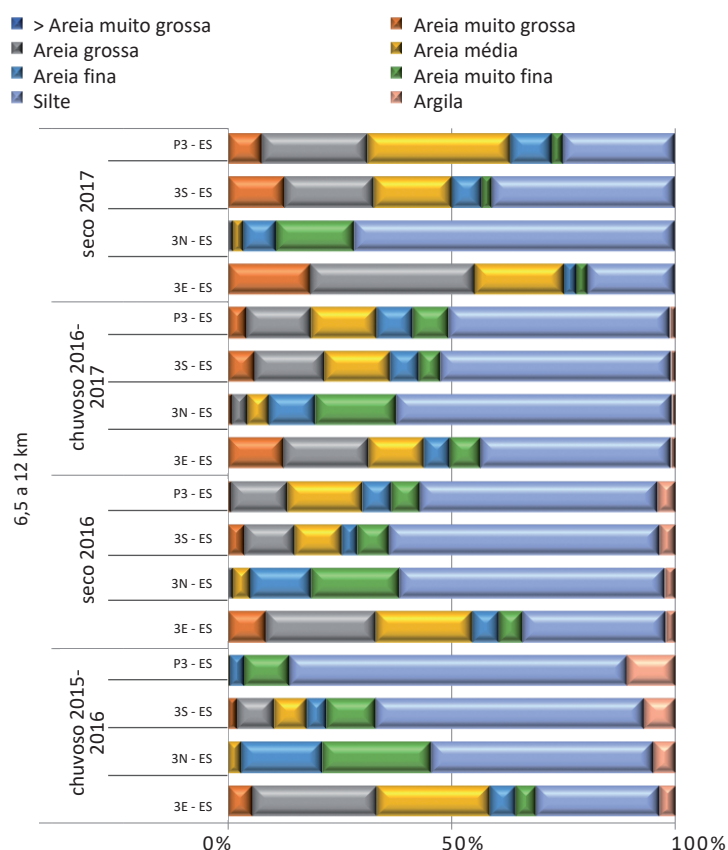
Entretanto, quanto à diferença entre os períodos, pode ser observado uma tendência que indica uma possível redução das frações de argila enquanto que as concentrações de silte permanecem praticamente constantes, sem um padrão bem definido de redução ou aumento, o que pode indicar que as frações mais altas de argila no período chuvoso 2015/2016 nesta área são em parte oriundas do desastre, potencialmente sendo a área preferencial de deposição do material oriundo da barragem de Fundão. Além disso, essa redução das frações de argila nesta área com o passar do tempo pode indicar que nesta área ocorreu novas deposições de material que diminui a fração de argila em relação ao total da granulometria ou ainda que a argila depositada nestes pontos amostrais pode ter sido remobilizada para outros locais. Tais padrões de sedimentação e relações da fração argilosa com o rejeito derramado ainda não podem ser confirmados, carecendo de maiores informações, como modelagens hidrossedimentológicas.

Figura 86 – Médias frações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 e de 2017 a distância entre 4 e 6,5 km da foz do rio Doce.



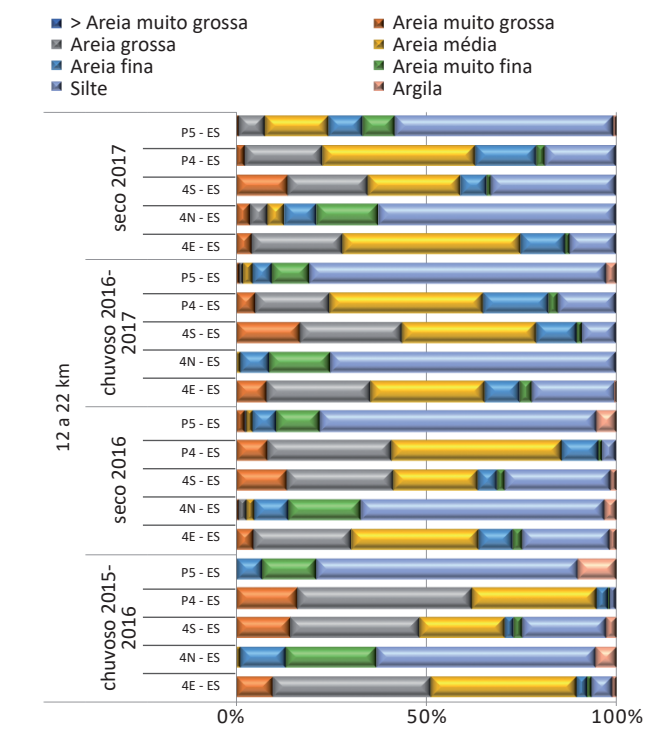
Na área compreendida entre 6,5 e 12 km – Área 3 (Figura 87) as frações de sedimentos finos também foram superiores as frações de grosseiros (> areia muito fina) embora estivessem presentes em percentuais menores do que da área anterior (Área 2 - entre 4 e 6,5 km) (Figura 87). O mesmo padrão que indica possíveis reduções das frações de argila observado na Área 2 pode ser observado na Área 3. Com relação a outras frações da granulometria, pode se observar em geral uma diminuição também na fração de silte, porém sem um padrão definido.

Figura 87 – Médias das frações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 e de 2017 a distância entre 6,5 a 12 km da foz do rio Doce.



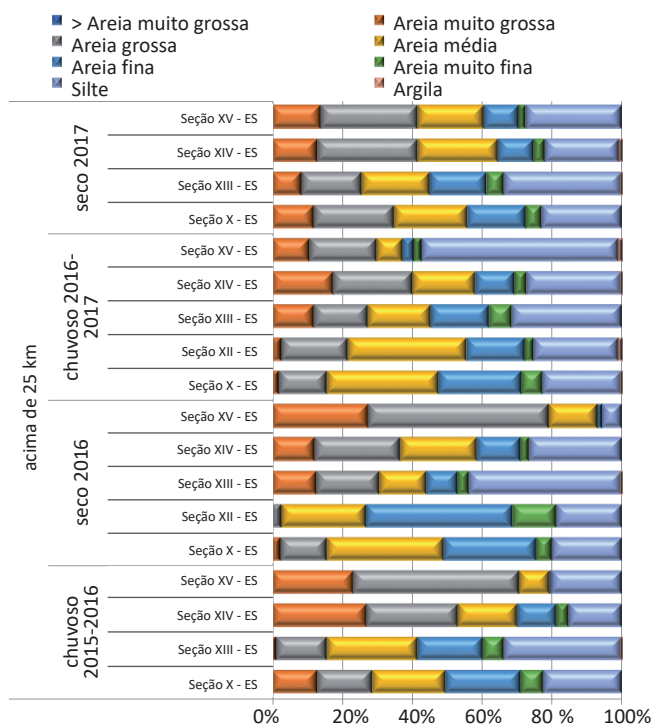
Os sedimentos coletados entre 12 e 22 km (Figura 88), independente da sazonalidade, apresentaram maior frequência de frações grosseiras. Uma exceção foi a amostra 4N onde a fração siltica predominou nos quatro períodos considerados.

Figura 88 – Médias das frações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 e de 2017 a distância entre 12 a 22 km da foz do rio Doce.



Nas amostras coletadas na área da APA Costa das Algas, as frações de areia muito grossa, grossa e média foram as mais frequentes na composição granulométrica das amostras, não havendo distinção de padrões entre os períodos de coleta realizados (Figura 89).

Figura 89 – Médias das rações granulométricas dos sedimentos coletados nas estações chuvosa e seca de 2016 e de 2017 a distância superior a 22 km da foz do rio Doce.



5.2.1.1.3 Distribuição espacial dos sedimentos coletados na área de influência da foz do rio Doce

Através da elaboração de mapas com as frações de argila, silte e areias médias em cada ponto amostral para os distintos períodos buscou-se identificar as diferenças espaciais entre os percentuais destas frações ao longo da área estudada, bem como verificar mais amplamente potenciais diferenças entre os períodos analisados. Os mapas de cada período são apresentados através de figuras, constando na Figura 90 a Figura 93.

Conforme observado anteriormente, houve uma redução das frações de argila, principalmente nas amostras localizadas entre 3 e 12 km de distância da foz do rio Doce; somente na Área 1, até 4 km da foz, não se pode identificar padrão de diminuição ou aumento desta fração ao longo do tempo. Com relação ao silte, pode-se observar um aumento das frações ao longo do tempo na concêntrica entre 4,5 e 6 km (Área 2), nas outras distâncias não se pode observar um padrão estabelecido ao longo do tempo, nem quanto a sazonalidade.

Quanto à distribuição espacial das frações granulométricas, em todos os períodos, pode-se observar um padrão espacial similar, variando em relação ao percentual de cada fração. Este padrão indica uma deposição mais abrangente de finos nas áreas ao sul da foz do Rio Doce, que pode ser observada nas figuras pelas frações maiores de finos não somente na radial Sul (1S a 4S) como também nos pontos P2, P3, P4 e P5. Ao Norte também podem ser observadas frações de finos no sedimento, porém mais concentrada até a isóbata de dez metros, ao longo da costa, representada pela Radial Norte (1N a 4N). Importante ressaltar também que embora a deposição ao Sul pareça mais abrangente e de certa forma mais intensa na maior parte dos pontos, quando comparados os pontos 4N e 4S, o ponto 4N apresenta frações maiores de finos, potencialmente indicando um maior alcance para o norte ao longo da costa da deposição de material fino, oriundo do rio Doce.

Essa maior concentração de finos na zona ao sul e proximidades da foz do rio Doce já foi observada anteriormente em estudos realizados em período pré-desastre. Soares (2014) avaliou amostras coletadas pela Petrobras durante campanhas do programa “Caracterização Ambiental da Bacia do Espírito Santo e da Parte Norte da Bacia de Campos” (Ambes), que está inserido no projeto de “Geologia, Geomorfologia e Sedimentologia da Plataforma Continental da Bacia do Espírito Santo e Norte da Bacia de Campos”. A autora concluiu que a concentração de sedimentos finos permanece mais próxima ao sul da foz do rio, o que foi observado nas amostras coletadas pós-desastre, enquanto que as áreas mais afastadas são compostas por areia. Quaresma (2015) também observou maiores concentrações de sedimentos próximos da desembocadura, o que foi atribuído por Albino e Suguio (2010) a descarga de sedimentos pelo rio, e eventos meteorológicos. De maneira qualitativa a distribuição espacial dos sedimentos finos pós-desastre parece seguir padrões já verificados anteriormente, entretanto por falta de dados prévios não se pode avaliar a magnitude desses padrões. Também, a escassez de dados prévios, compostos de uma campanha por autor, impossibilita a avaliação de mudanças nos padrões de granulometria ao longo do tempo no período pré-desastre.

Figura 90 – Distribuição espacial dos sedimentos arenosos (GRO), silticos (SI) e argilosos (AR) no período chuvoso de 2015-2016 no entorno da foz do rio Doce e na APA Costa das Algas.

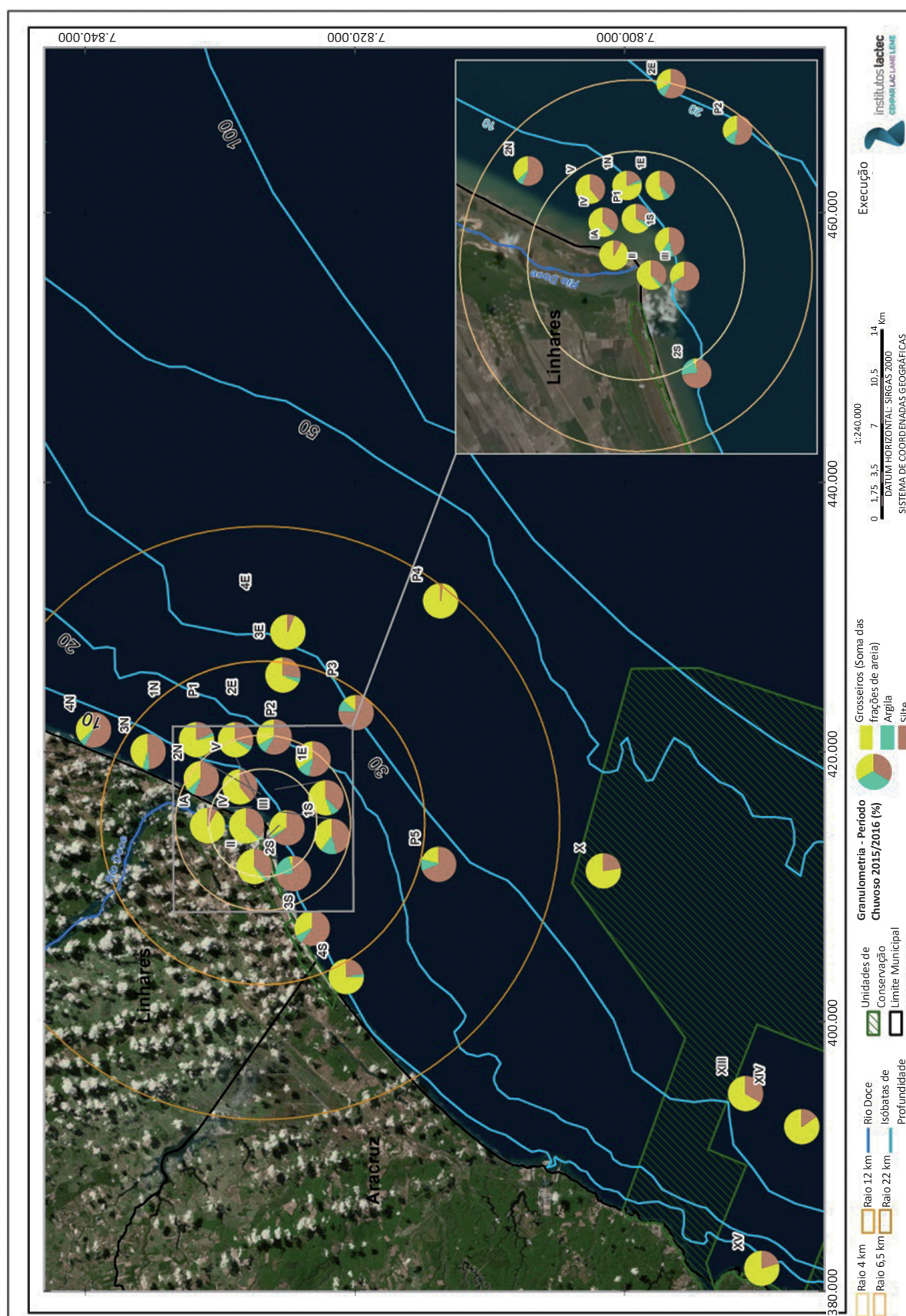


Figura 91 – Distribuição espacial dos sedimentos arenosos (GRO), silticos (SI) e argilosos (AR) no período seco de 2016 no entorno da foz do rio Doce e na APA Costa das Algas.

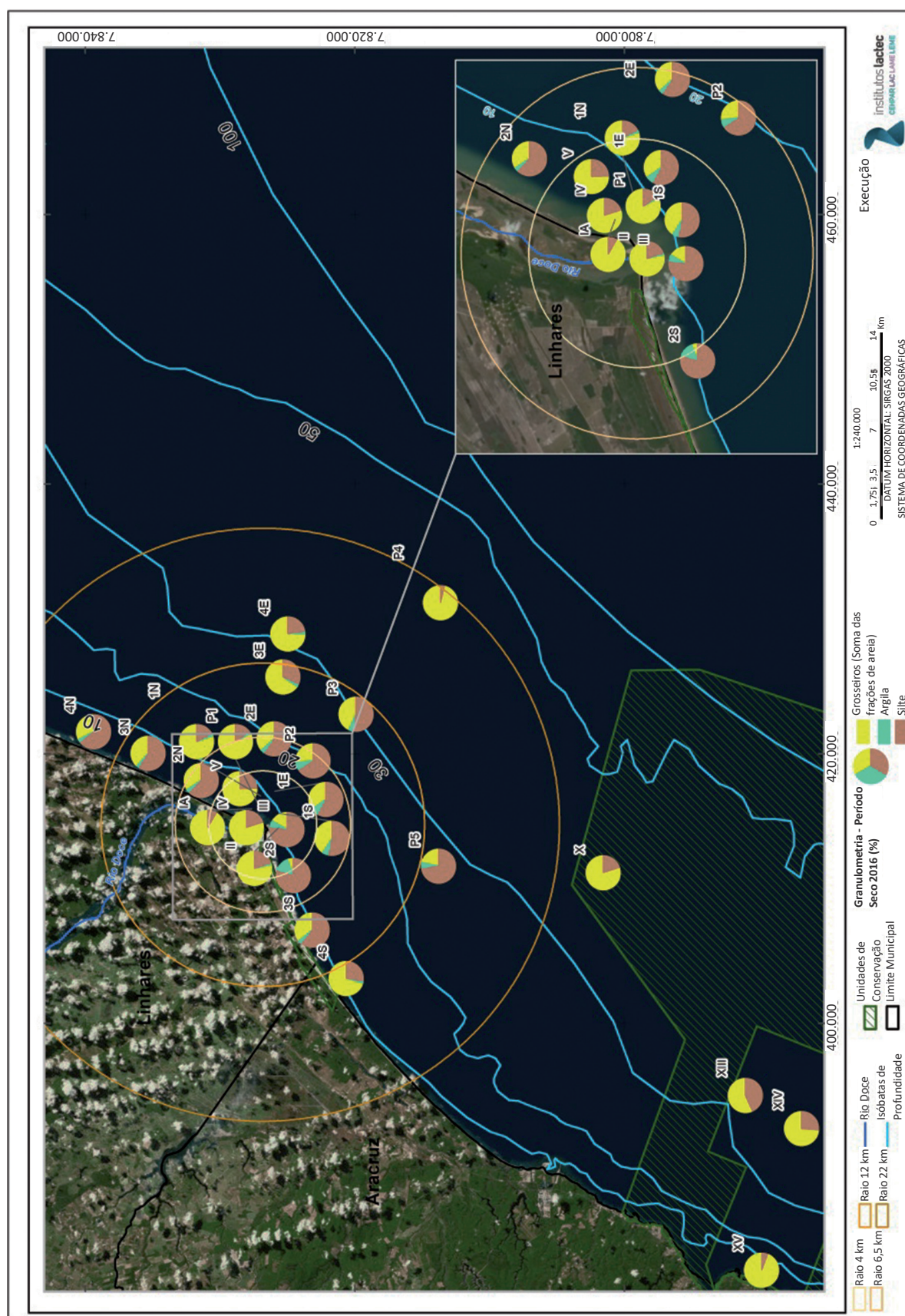


Figura 92 – Distribuição espacial dos sedimentos arenosos (GRO), sílticos (SI) e argilosos (AR) no período chuvoso de 2016-2017 no entorno da foz do rio Doce e na APA Costa das Algas.

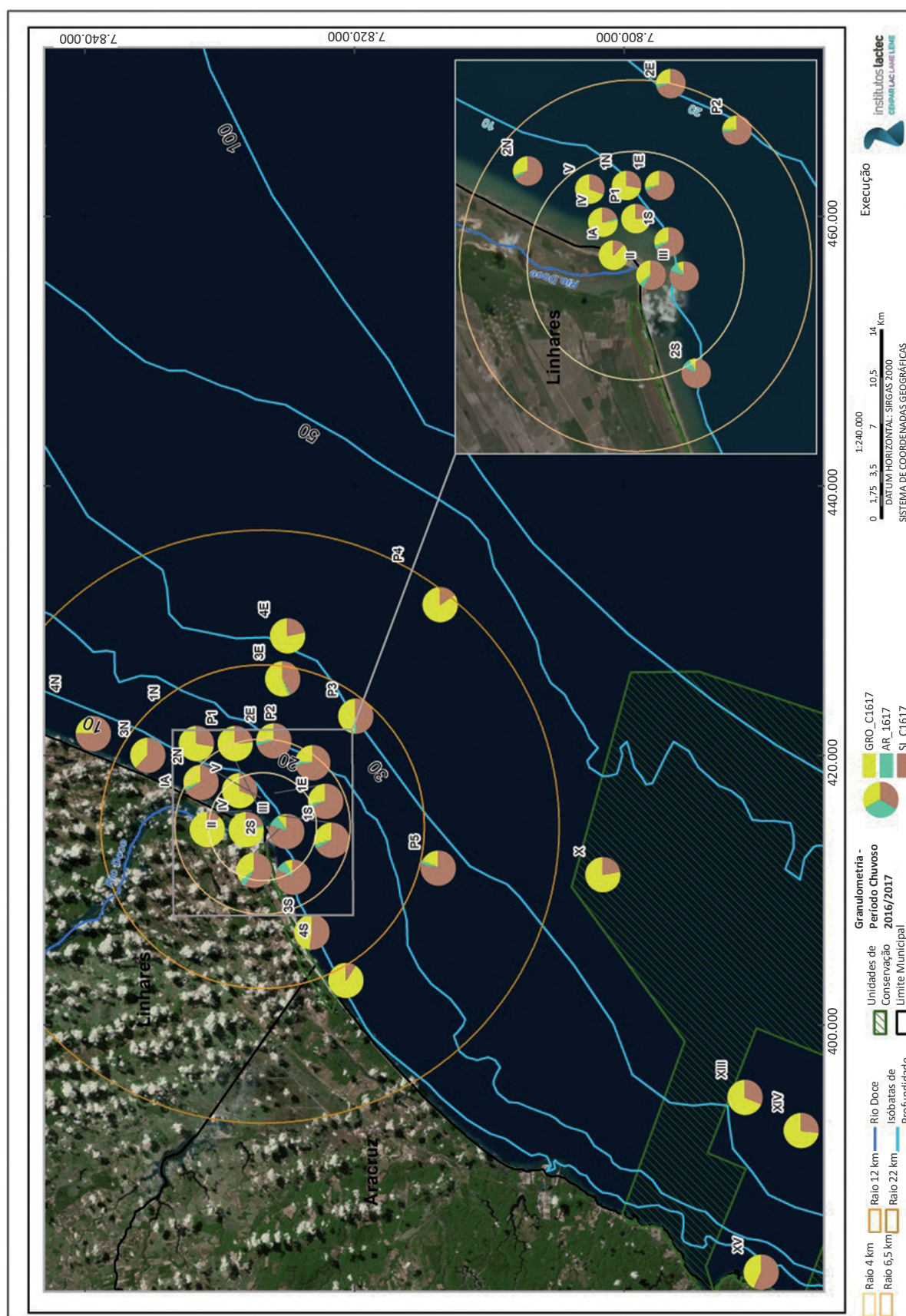
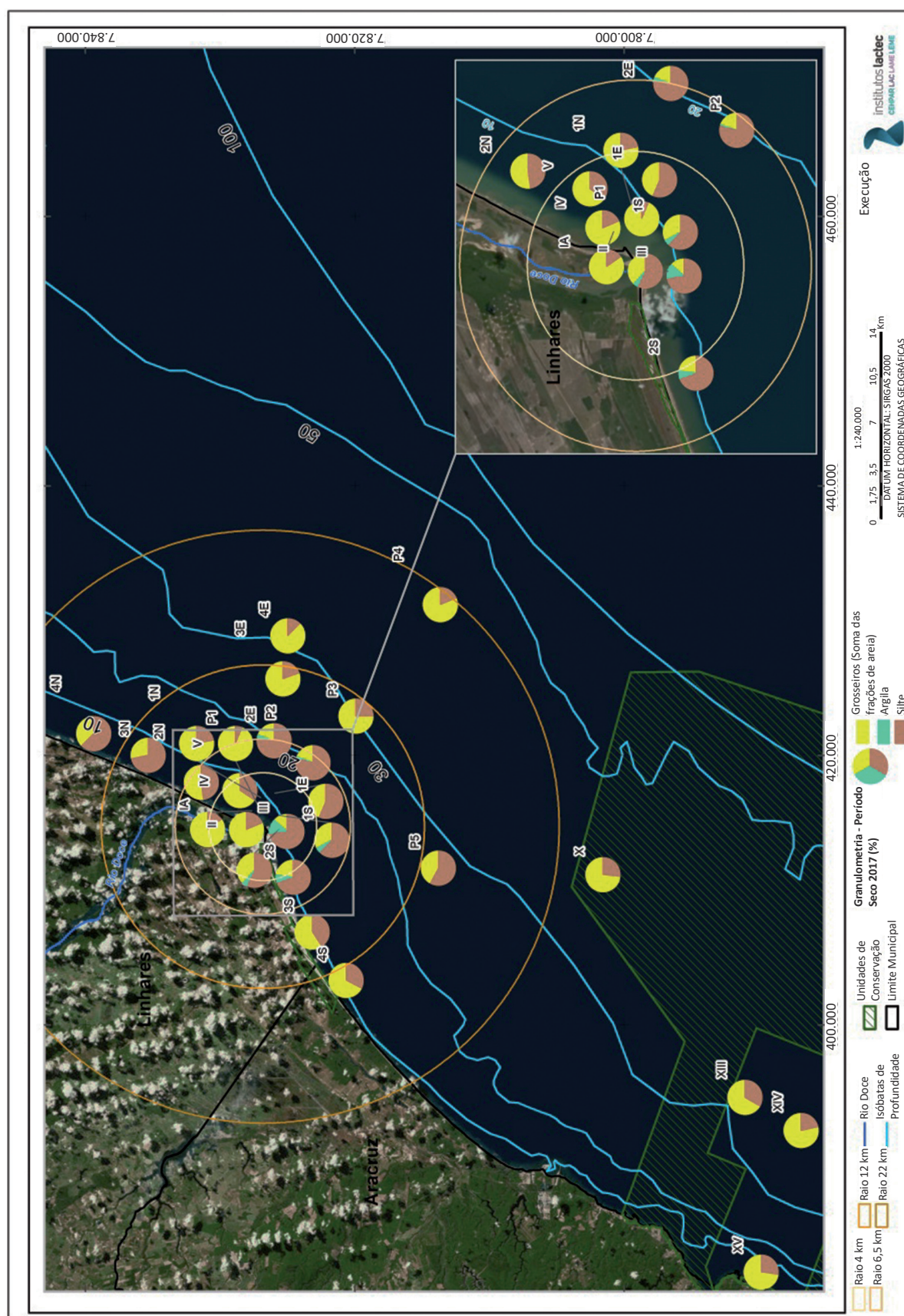


Figura 93 – Distribuição espacial dos sedimentos arenosos (GRO), sílticos (SI) e argilosos (AR) no período seco de 2017 no entorno da foz do rio Doce e na APA Costa das Algas.

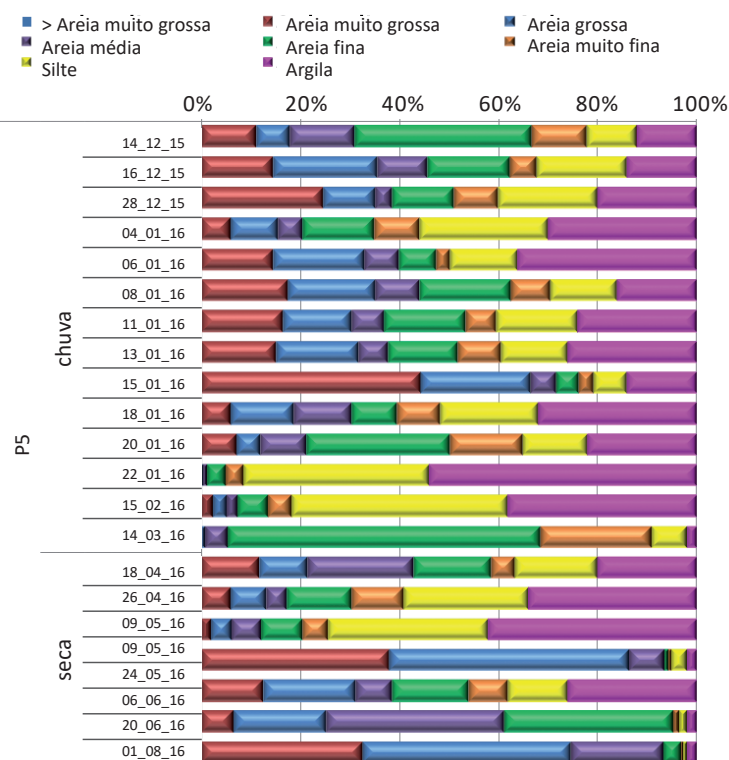


5.2.1.2 Dados provenientes do monitoramento do IEMA

No período compreendido entre dezembro de 2015 e agosto de 2016 foram avaliados os sedimentos coletados na estação amostral (IEMA), localizada próximo da desembocadura do rio Doce.

Observa-se na Figura 94 que na época de chuva os sedimentos finos foram predominantes, enquanto que no período seco eles ocorreram em apenas algumas coletas.

Figura 94 – Distribuição dos percentuais das frações granulométricas na estação amostra P5 durante o período chuvoso 2015-2016 e período seco e 2016.



A classificação dos sedimentos coletados nesta estação amostral está apresentada na Figura 95 e na Figura 96, através de diagramas de Shepard. Embora a quantidade de amostras coletadas tenha sido diferente nos dois períodos, percebe-se que durante o período seco foram observadas maiores concentrações de frações arenosas. A predominância deste padrão é mais esperada em períodos mais secos, quando diminui a vazão do rio e consequentemente a carga sedimentar.

Em um estudo realizado por Aprile, Lorandi e Bianchini Jr (2004), as maiores concentrações de silte na baía próxima da desembocadura do rio Doce foram observadas nas estações amostrais na foz do rio Doce e na região da baía, em que houve uma influência direta da ação das chuvas sobre o tamanho das partículas dos sedimentos. Durante esses períodos, mais de 80% da composição dos sedimentos do canal central foram formados por areia grossa e muito grossa. Já na região da baía houve um predomínio das frações mais finas, com teores de silte e argila variando de 45% na estiagem para 55% durante as chuvas. Os autores citam que, de acordo com IBGE (1987), as áreas de ocorrência de solos arenosos da planície do baixo rio Doce, apresentam uma cobertura coluvial espessa, que favorece maior penetração da água e um escoamento subsuperficial mais intenso, contribuindo para a lixiviação dos níveis inferiores ricos em argila e aumentando a espessura dos solos. Tais características associadas ao contínuo desmatamento das reservas nativas próximas ao delta do rio Doce têm contribuído para a redução da proteção dos solos das ações pluviais, aumentando gradativamente os processos erosivos na região.

5.2.2 QUALIDADE DO SEDIMENTO

5.2.2.1 Qualidade do sedimento por parâmetro físico-químico

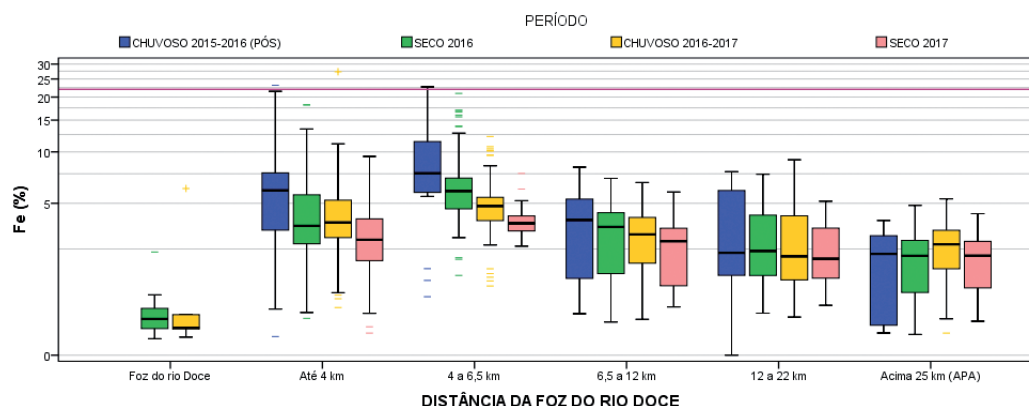
5.2.2.1.1 Ferro (Fe)

As concentrações de Fe verificadas nas amostras de sedimento marinho apresentaram as menores medianas em amostras obtidas na foz do rio Doce, enquanto que as maiores medianas foram verificadas nos conjuntos de pontos localizados nos raios de até 4 km e de 4 a 6,5 km da foz do rio Doce, principalmente no período chuvoso de 2015-2016, após a chegada da pluma de rejeitos no oceano (Figura 101, Figura 102 e Figura 103). Com exceção de valores atípicos (apresentados como *outliers*) e da concentração máxima verificada no período chuvoso de 2015-2016 em amostras do raio de 4 a 6,5 km, as demais concentrações de Fe verificadas na região mantiveram-se abaixo da concentração de efeito aparente (Apparent Effects Thresholds - AET) nível acima do qual os impactos biológicos adversos são sempre esperados para um grupo específico de organismos, sendo, no caso de Fe, poliquetas do gênero *Neanthes* (BUCHMAN, 2008) (Figura 97).

O ferro é transportado para o mar como óxidos hidratados associados com argilas originadas do intemperismo das rochas. Em sedimentos de plataforma, estes metais são geralmente associados com fração de sedimentos finos (REZENDE et al., 2004). Os pontos com maiores concentrações de Fe foram aqueles que apresentaram maiores percentuais de sedimentos finos (silte + argila), indicando ambientes propícios para a deposição desta fração do sedimento. Já os sedimentos da foz apresentaram menores concentrações de Fe, provavelmente por ser um ambiente dominado por frações de areia devido à elevada hidrodinâmica. É possível observar na Figura 97 um decréscimo contínuo das concentrações de Fe no sedimento entre o período chuvoso de 2015-2016 (primeiro período amostrado) e o período seco de 2017 (último período) das distâncias de até 4 km, de 4 a 6,5 km e de 6,5 a 12 km da foz, indicando um restabelecimento das concentrações de Fe verificadas na região ao longo do tempo, enquanto que para distâncias superiores a 12 km (incluindo a APA Costa das Algas) não foram

verificadas variações ao longo dos períodos, indicando níveis nestas regiões possivelmente similares ao período pré-desastre.

Figura 97 – Diagrama de caixa das concentrações de ferro nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha lilás = nível de efeito aparente (AET).



As concentrações de Fe verificadas em amostras de MPS (Material Particulado em Suspensão) no período anterior à chegada da pluma na região (UFES, 2017) apresentaram concentrações baixas (inferiores a 0,05 mg/kg), alcançando concentração de até 3,4 mg/kg no dia da chegada da pluma e até 6,9 mg/kg após a chegada da pluma na região (Figura 98). Já o estudo realizado por GOLDER (2016) em amostras de sedimento do estuário, de praia e do ambiente oceânico após a incidência da pluma de rejeitos na região, em concentrações variando principalmente entre 3 e 6 mg/kg (Figura 99). Em ambos os estudos citados anteriormente, todos os resultados mantiveram-se inferiores ao valor de AET. A amostra de lama oriunda da pluma de rejeitos e depositada em um ponto próximo à foz do rio Doce (PLAMA, segundo ROMERO 2017) apresentou concentração de Fe inferior à AET, indicando que estes rejeitos não teriam potencial de elevar as concentrações de Fe a níveis nocivos, no entanto em amostras de sedimento do estuário do estrato superficial (0-3 cm) as concentrações de Fe após a chegada da pluma apresentaram valores superiores a AET, de forma que, por se tratar de um estrato formado por sedimentos recentemente depositados, podem indicar também para níveis encontrados na lama de rejeitos (Figura 100). De acordo com estudos realizados anteriormente na região próxima à foz do rio doce (AGUIAR et al., 2014 e PUPPIM, 2014) e na região da APA Costa das Algas (CPMAIS, 2015; MIRLEAN et al., 2012 e PETROBRAS, 2007) as concentrações de Fe mantiveram-se sempre inferiores a 7%, nível similar ao observado por GOLDER (2016) e ROMERO (2017).

Figura 98 – Concentrações de ferro no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

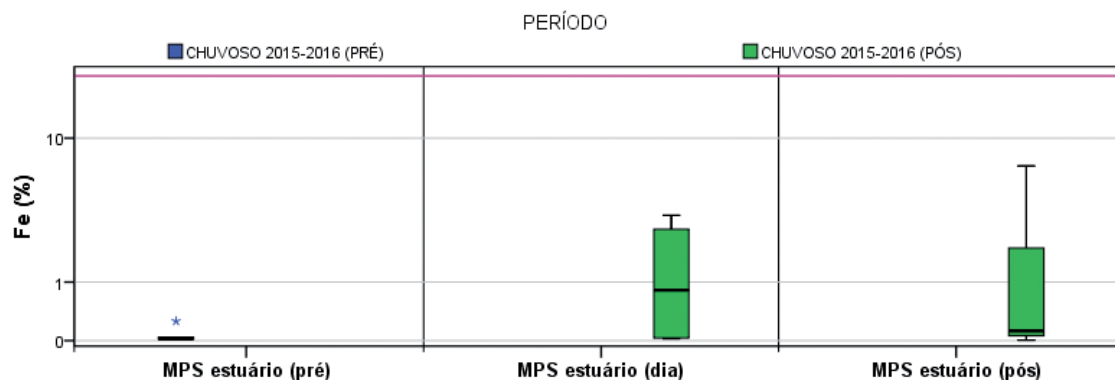


Figura 99 – Concentrações de Fe no ambiente estuarino, praia e oceano após a incidência da pluma de rejeitos na região (GOLDER, 2016).

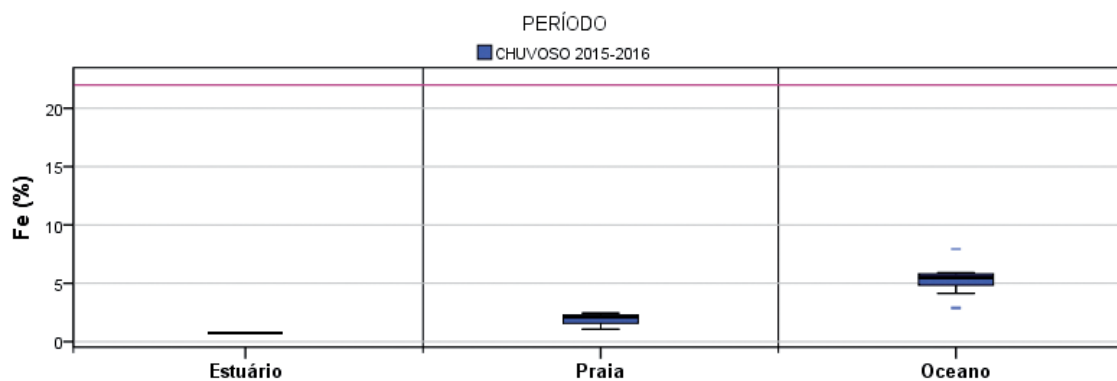


Figura 100 – Concentrações de Fe em secções de diferentes profundidades dos sedimentos do estuário e na lama de rejeitos (ROMERO, 2017).

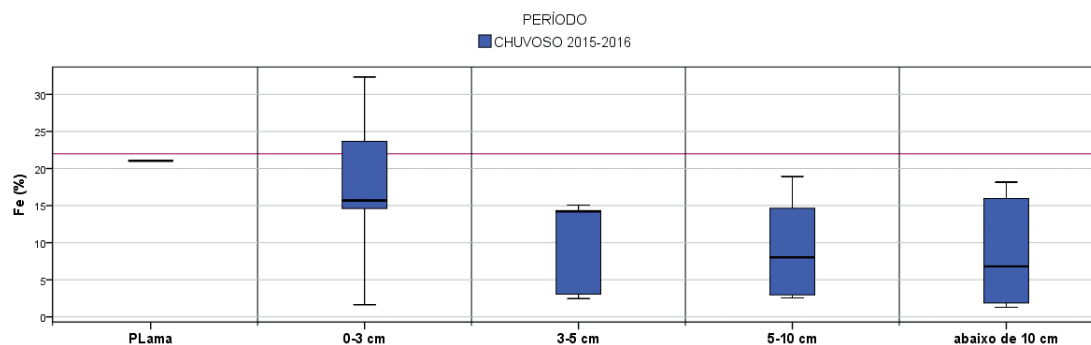


Figura 101 – Distribuição espacial das medianas das concentrações de ferro nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

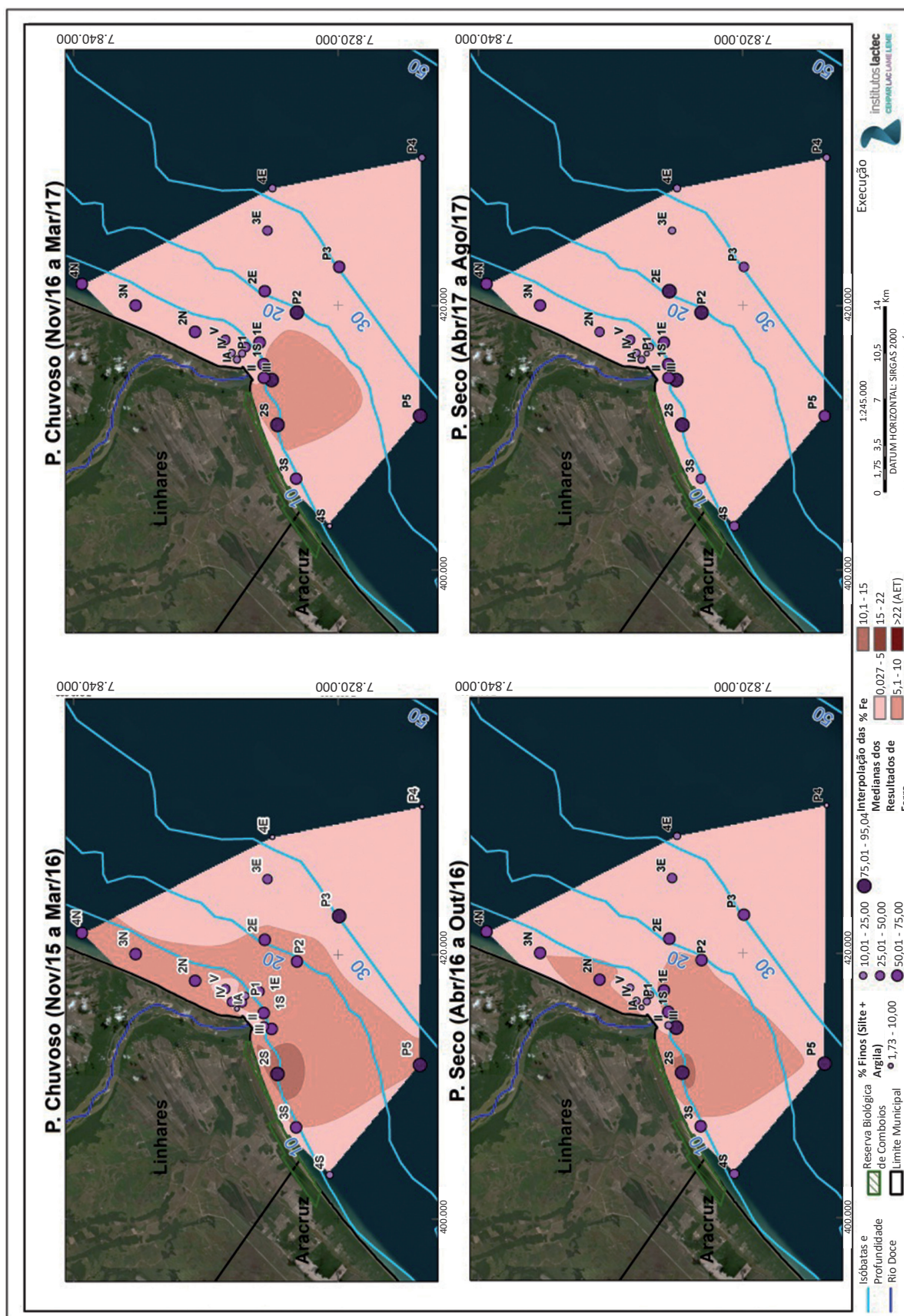


Figura 102 – Detalhe da distribuição espacial das medianas das concentrações de ferro na foz do rio Doce nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017.

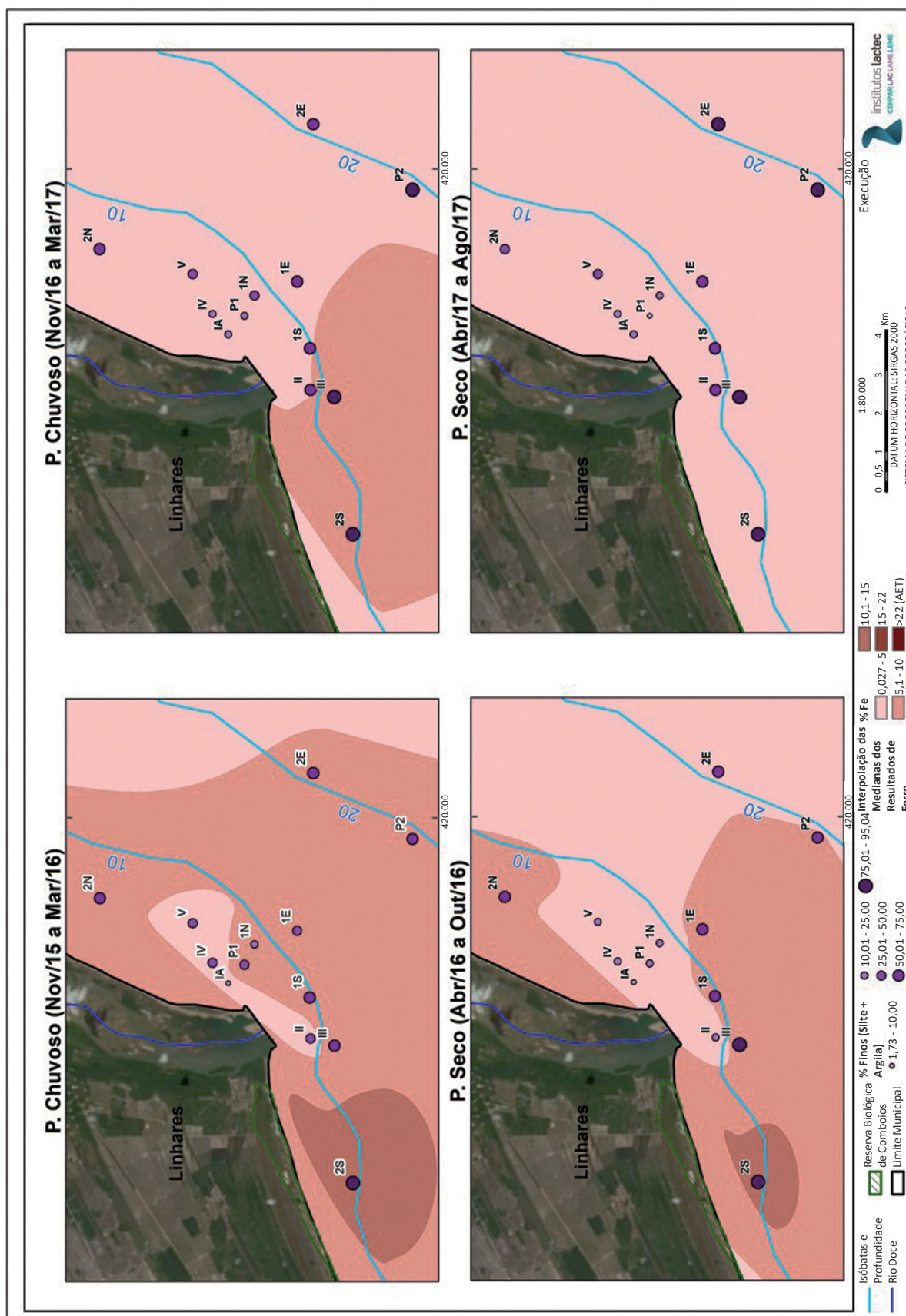
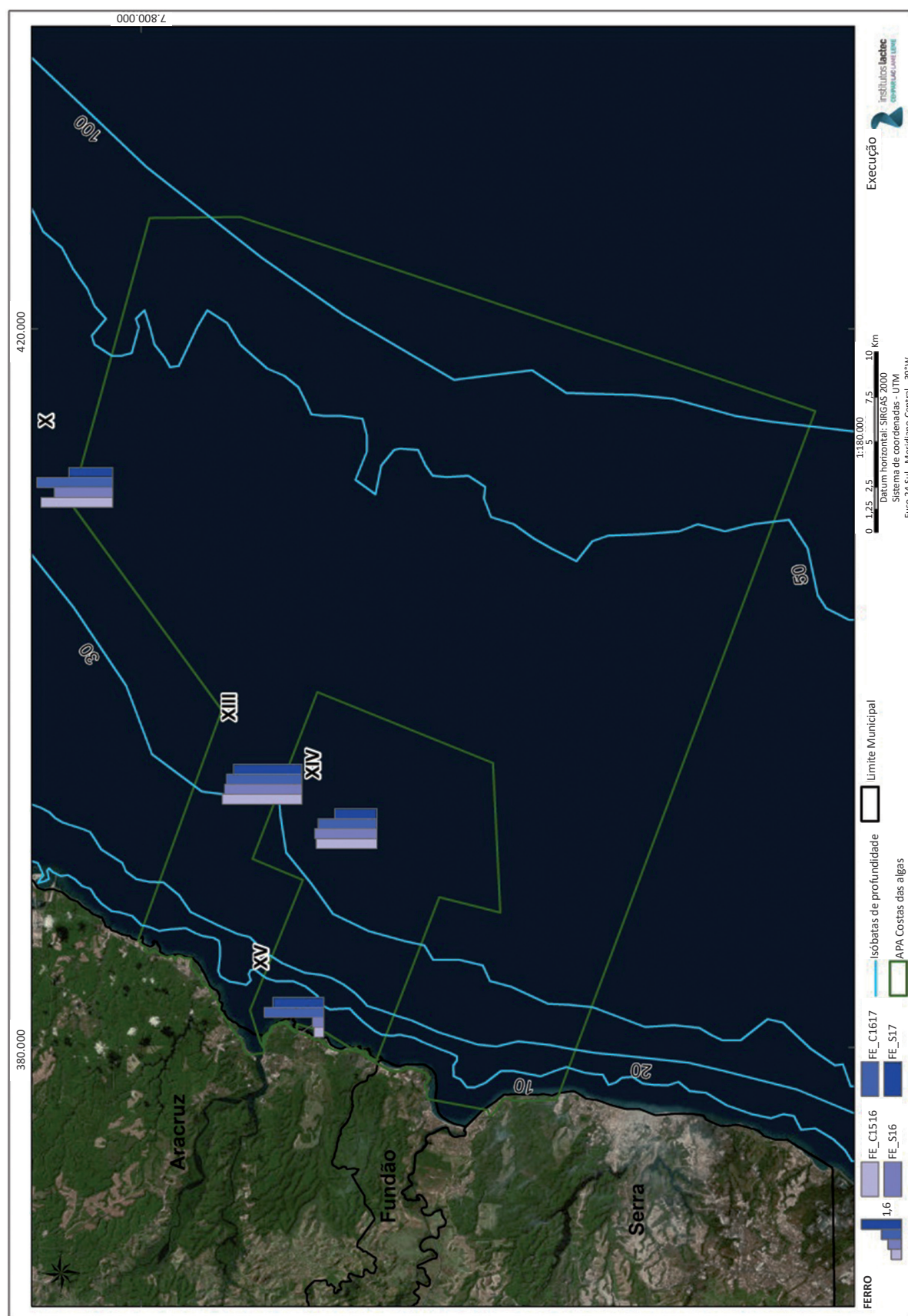


Figura 103 – Representação espacial das medianas das concentrações de ferro nos períodos secos e chuvosos de 2015 a 2017 na região da Costa das Algas.

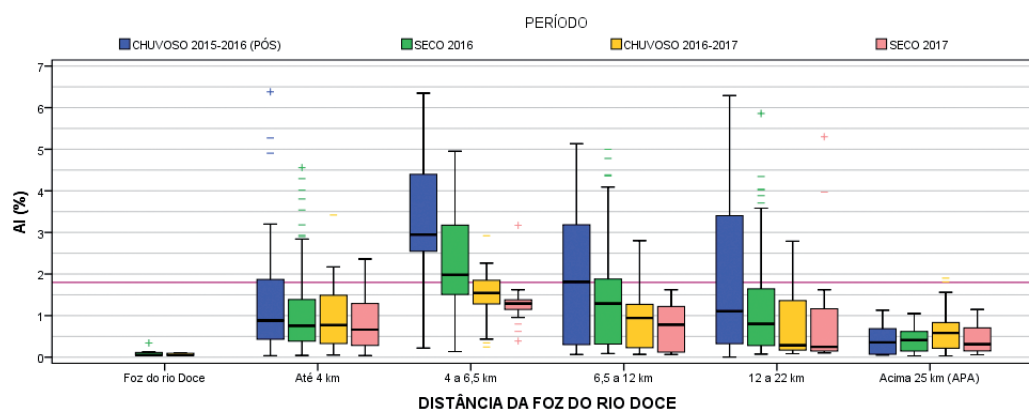


5.2.2.1.2 Alumínio (Al)

Os resultados verificados para Al apresentaram comportamento similar ao descrito para Fe, com menores concentrações verificadas na foz do rio Doce e maiores medianas verificadas na distância de 4 a 6,5 km da foz no período chuvoso de 2015-2016 e período seco de 2016, além da distância de 6,5 a 12 km no período chuvoso de 2015-2016 (Figura 107, Figura 108 e Figura 109). Nestes períodos e distâncias com as maiores medianas foram registrados valores predominantemente superiores ao AET (1,8%), indicando níveis potencialmente tóxicos para a biota da região (Figura 104), sendo que, para as amostras da APA Costa das Algas todas as amostras mantiveram-se em valores inferiores à AET. Cabe destacar, no entanto, que para o cálculo da AET foi utilizado um grupo específico de organismos (poliquetas do gênero *Neanthes*), de forma que os níveis encontrados podem não ser tóxicos para outros grupos de organismos pertencentes à macrofauna da região.

Da mesma forma que o Fe, as concentrações de Al verificadas no sedimento são geralmente associadas com argilominerais e possuem origem estritamente continental (LACERDA & MARINS, 2006). Todas as amostras obtidas na APA Costa das Algas apresentaram predomínio de sedimentos arenosos, de forma que os valores baixos verificados nesta região podem estar mais relacionados com as características granulométricas verificadas na região, que por sua vez indica para baixas influências continentais neste ambiente. No caso da foz do rio Doce, o predomínio de sedimentos arenosos relacionado com a elevada hidrodinâmica neste ponto amostrado são os principais fatores que indicam as concentrações de Al verificadas, conforme já apresentado para Fe, com pontos sujeitos à deposição de sedimentos finos verificados dentro do raio de 4 km da foz.

Figura 104 – Diagrama de caixa das concentrações de alumínio nos conjuntos de pontos amostrados a diferentes distâncias da foz do rio Doce. Linha lilás = nível de efeito aparente (AET).



As concentrações de Al no material particulado em suspensão do ambiente estuarino, em momento anterior à chegada da pluma de rejeitos à região, apresentavam valores desde inferiores a 0,001% até 0,256%, enquanto que no dia em que a pluma chegou ao estuário as concentrações de Al alcançaram de 1,22% até 4,6% nos dias seguintes à chegada da pluma na região, indicando desta forma que o material em suspensão transportado pela pluma possuía potencial para elevar as concentrações deste elemento nos sedimentos da região (Figura 105). Já o estudo realizado por GOLDER (2016) indica que o sedimento oceânico apresenta maior potencial para a deposição de Al, uma vez que as concentrações destas amostras variaram de 2,3% a 5,3%, enquanto que nos ambientes estuarino e de praia as concentrações mantiveram-se inferiores a 0,2%. Não foi realizada a análise de Al no estudo realizado por ROMERO (2017).

Figura 105 – Concentrações de alumínio no material particulado em suspensão do ambiente estuarino em momento anterior e posterior à chegada da pluma de rejeitos (UFES, 2017).

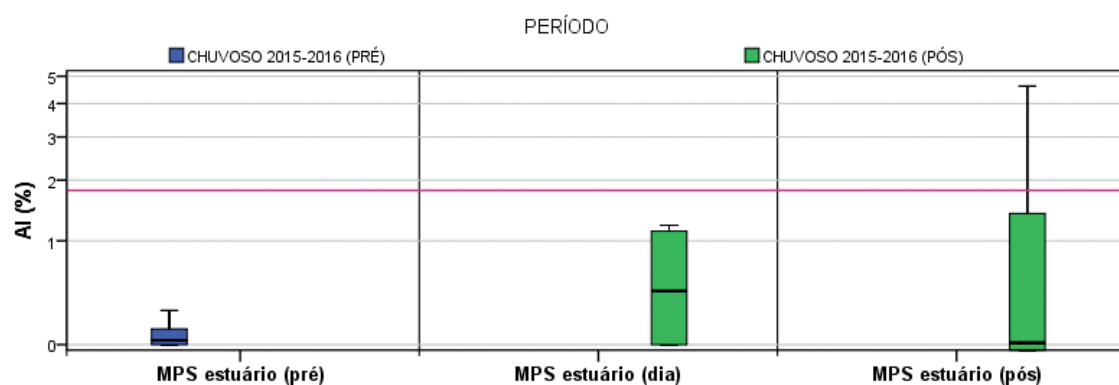


Figura 106 – Concentrações de alumínio no ambiente estuarino, praia e oceano (GOLDER, 2016).

