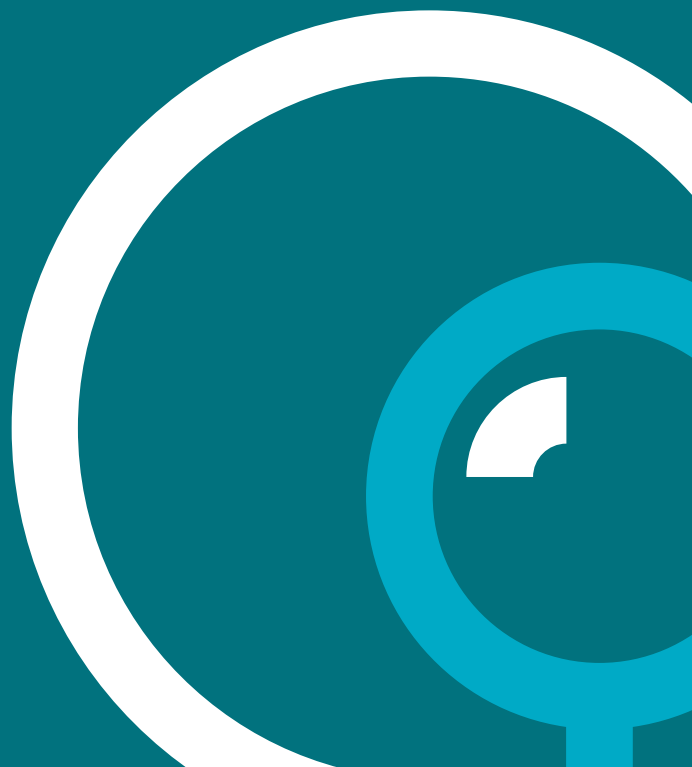


Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento
da barragem de Fundão na bacia do rio Doce

Acompanhamento de Danos TOMO IV – Zona Costeira e Marinha

Lactec
Curitiba – Paraná – Brasil
Julho/2021



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

Autoria: Equipe Técnica do Lactec	Emitido por: Leonardo Pussieldi Bastos, M. Sc. Biólogo / CRBio 28808-07D Meio Ambiente
	Aprovado por: Tânia Lucia Graf de Miranda, D. Sc. Engenheira Agrônoma / CREA RS 069105/D Gerente de Serviços Tecnológicos e Inovação
	Luiz Alkimin de Lacerda, D. Sc. Engenheiro Civil / CREA PR 155674/D Gerente de Pesquisa e Inovação

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

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

EQUIPE EXECUTORA

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

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

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

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

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

EQUIPE DE CAMPO

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

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

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

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Compartimentalização e estações amostrais do Ambiente Marinho para o diagnóstico dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, MG.	46
Figura 2 – Compartimentalização do ambiente marinho e principais pontos de monitoramento da qualidade das águas avaliados em cada compartimento.....	50
Figura 3 – Fluxo de condições gerais de avaliação de tendência de evolução dos danos à qualidade da água.....	53
Figura 4 – Esforço amostral para alumínio dissolvido durante o período de monitoramento pós-desastre.....	54
Figura 5 – Classificação dos dados de turbidez nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).	56
Figura 6 – Tendência das alterações para turbidez no ambiente costeiro.	58
Figura 7 – Tendência das alterações para o alumínio dissolvido no ambiente costeiro.....	60
Figura 8 – Classificação dos dados de alumínio dissolvido nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).61	
Figura 9 – Tendência das alterações para o arsênio total no ambiente costeiro (Dados Lactec e Fundação Renova).	64
Figura 10 – Classificação dos dados de arsênio total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).65	
Figura 11 – Tendência das alterações para o cádmio total no ambiente costeiro.	68
Figura 12 – Classificação dos dados de cádmio total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).69	
Figura 13 – Tendência das alterações para o chumbo total no ambiente costeiro.....	72
Figura 14 – Classificação dos dados de chumbo total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).73	
Figura 15 – Tendência das alterações para o cromo total no ambiente costeiro.....	76
Figura 16 – Classificação dos dados de cromo total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).77	
Figura 17 – Tendência das alterações para o ferro dissolvido no ambiente costeiro.....	80
Figura 18 – Classificação dos dados de ferro dissolvido nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).81	
Figura 19 – Tendência das alterações para o manganês total no ambiente costeiro.....	84
Figura 20 – Classificação dos dados de manganês total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).85	

Figura 21 – Tendência das alterações para o mercúrio total no ambiente costeiro.	88
Figura 22 – Classificação dos dados de mercúrio total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).89	89
Figura 23 – Tendência das alterações para o zinco total no ambiente costeiro.....	92
Figura 24 – Classificação dos dados de zinco total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).93	93
Figura 25 – Localização das estações avaliadas no monitoramento do fitoplâncton marinho pelo Lactec.	101
Figura 26 – Densidade média do fitoplâncton marinho em regiões próximas a foz do rio Doce, antes e após o desastre.	108
Figura 28 – Concentração média de clorofila-a e feopigmentos em diferentes profundidades, antes e após o desastre.	109
Figura 29 – Diversidade (H') média de espécies do fitoplâncton, antes e após o desastre.	109
Figura 30 – Ilustração de algumas espécies do fitoplâncton nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro.	114
Figura 31 – Riqueza e diversidade do fitoplâncton nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro.	118
Figura 32 – Densidade fitoplanctônica e concentração de clorofila-a nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro.	119
Figura 33 – Representatividade das classes de algas nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro.	120
Figura 34 – Variação da densidade (org.m^{-3}) em escala logarítmica (Log) para o zooplâncton por ponto amostral (coluna azul) no Ambiente Marinho na foz do rio Doce (P4: julho/2018; P5: fevereiro/2019 e setembro/2019 P6: março/2020 e setembro/2020 – DADOS PRIMÁRIOS) e zona costeira adjacente. Linhas tracejadas (valores máximos de densidade) = verde – densidade máxima pré-desastre (P0); vermelha – densidade máxima pós-desastre (P1/P2); laranja – densidade máxima pós-desastre (P4); preta – densidade máxima pós-desastre (P5).	122
Figura 35 – Série histórica de vazões e concentrações de sólidos suspensos totais na estação Colatina e destaque para a data da chegada do rejeito na área costeira em 21/11/2015 em cinza.....	136
Figura 36 – Figura superior: carga excedente de sólidos suspensos na estação Colatina. Figura inferior: carga cumulativa excedente de sólidos suspensos na estação Colatina. A linha tracejada cinza indica os períodos secos e chuvosos avaliados.	137
Figura 37 – Compartimentalização do ambiente marinho e principais pontos de monitoramento da qualidade dos sedimentos avaliados em cada compartimento.	144
Figura 38 – Fluxo de condições gerais de avaliação de tendência de evolução dos danos à qualidade do sedimento.	147
Figura 39 – Classes granulométricas (FOLK, 1954) das amostras de sedimento, provenientes de dados primários e secundários, para os meses pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce.	151
Figura 40 – Classificação granulométricas (FOLK, 1954) das amostras de sedimento provenientes de dados primários e secundários, para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce.....	152

Figura 41 – Classificação das alterações para alumínio em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	154
Figura 42 – Classificação dos dados de alumínio em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	155
Figura 43 – Classificação dos dados de arsênio em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	158
Figura 44 – Classificação das alterações para bário em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	161
Figura 45 – Classificação dos dados de bário em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	162
Figura 46 – Classificação das alterações para o cádmio em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	165
Figura 47 – Classificação dos dados de cádmio em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	166
Figura 48 – Classificação das alterações para chumbo em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	169
Figura 49 – Classificação dos dados de chumbo em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	170
Figura 50 – Classificação das alterações para cobre em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	173
Figura 51 – Classificação dos dados de cobre em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	174
Figura 52 – Classificação das alterações para cromo em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	177
Figura 53 – Classificação dos dados de cromo em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	178
Figura 54 – Classificação das alterações para ferro em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	181
Figura 55 – Classificação dos dados de ferro em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	182

Figura 56 – Classificação das alterações para manganês em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	185
Figura 57 – Classificação dos dados de manganês em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	186
Figura 58 – Classificação das alterações para mercúrio em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	189
Figura 59 – Classificação dos dados de mercúrio em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	190
Figura 60 – Classificação das alterações para níquel em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	193
Figura 61 – Classificação dos dados de níquel em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	194
Figura 62 – Classificação das alterações para zinco em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).	197
Figura 63 – Classificação dos dados de zinco em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	198
Figura 64 – Gráficos das médias e erros padrão dos parâmetros: A. Densidade (ind.m^{-2}), B. Número de táxons e C. Diversidades registradas pré e pós- desastre da barragem de Fundão (MG) ocorrido em 2015. As barras em azul representam os resultados de linha-base MATTHEWS-CASCON et al., 2018; a barra cinza, os resultados da MARINHA DO BRASIL, 2016; a barra amarela, os resultados de LONGO, 2019 e as barras vermelhas representam os resultados obtidos no presente acompanhamento de danos.	204
Figura 65 – Gráficos das médias e erros padrão das Densidades (ind.m^{-2}) de A. Mollusca, B. Polychaeta, C. Crustacea e D. Outros, registradas pré- e pós- desastre da barragem de Fundão (MG) ocorrido em 2015. Na categoria “Outros” estão inclusos os grandes grupos taxonômicos com baixas abundâncias.	205
Figura 66 – Riqueza (barras azuis e verdes) e abundância (linha preta) da ictiofauna registrada no ambiente marinho durante o levantamento de dados primários entre 2018 e 2020.	217
Figura 67 – Representação gráfica da ordenação multidimensional não métrica (NMDS) baseada na composição da ictiofauna registrada nas fases amostrais realizadas em 2018 e 2020 nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce, no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2016 pela SAMARCO/CTA no ambiente marinho adjacente. Como o NMDS foi baseado em uma matriz de distância, a proximidade entre os pontos indica maior similaridade.	218
Figura 68 – Distinção taxonômica média (AvTD) e variação da distinção taxonômica (VarTD) da composição e relação taxonômica da ictiofauna registrada entre 2018 e 2020 nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce e no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2016 pela CTA/SAMARCO no ambiente marinho adjacente. A média esperada (calculada) foi representada pela linha pontilhada central e o limite do intervalo de confiança (95%) dado pelas linhas sólidas do entorno, em forma de funil.	222

- Figura 69** – Curvas de K-dominância para abundância e biomassa de espécies registradas entre 2018 e 2020 nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce. A dominância em peso (estatística W positiva) indica uma assembleia não perturbada, enquanto que a dominância em número de indivíduos (estatística W negativa ou próxima de zero) implica em distúrbios moderados (CLARKE; WARWICK, 2001)..... 224
- Figura 70** – Proporção dos grupos tróficos (riqueza) registrados nas fases amostrais realizadas entre 2018 e 2020 nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce..... 225
- Figura 71** – Proporção dos grupos tróficos (abundância) registrados nas fases amostrais realizadas entre 2018/2020 nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce..... 226
- Figura 72** – Riqueza dos grupos tróficos registrados nas fases amostrais realizadas em 2018 (diagnóstico) e 2020 (acompanhamento) nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce e no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2016 pela CTA/SAMARCO no ambiente marinho adjacente..... 227
- Figura 73** – Relação entre a riqueza e abundância de peixes ictiófagos e zooplânctívoros para a ictiofauna registrada nas fases amostrais realizadas em 2018 (diagnóstico) e 2020 (acompanhamento) nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce e no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2016 pela CTA/SAMARCO no ambiente marinho adjacente..... 227
- Figura 74** – Proporção de espécies com e sem interesse para a pesca (colunas) e riqueza geral (linha tracejada) registradas nas fases amostrais realizadas entre 2018 e 2020 nas faixas de 5 km e 15-20 km da foz do rio Doce. 228
- Figura 75** – Curvas de rarefação (linha preta contínua) e extrapolação (linha vermelha tracejada) da riqueza da ictiofauna marinha por meio do método que utiliza os números de Hill ($q=0$), considerando o esforço amostral e o número de indivíduos. Os dados extrapolados indicam o número de espécies que será atingido com um esforço amostral (ou abundância) adicional. Os intervalos de confiança (IC) de 95% (linha preta tracejada) foram obtidos através do método Bootstrap. A linha pontilhada horizontal representa as informações (riqueza) obtidas em CTA/SAMARCO (2016a; 2016; 2016c)..... 231
- Figura 76** – *Backgrounds* de áreas potenciais de ocorrência definidas em modelos de larga escala, com indicação de gride de 20 x 20 km (linha cinza). A) *Sotalia guianensis*; B) *Chelonia mydas*. 237
- Figura 77** – Diagrama de dispersão entre Precipitação Pluviométrica Média obtida na Estação automática de São Mateus (ES) e Precipitação Média para o litoral do Espírito Santo. 243
- Figura 78** – Diagrama de dispersão entre Precipitação Pluviométrica Média a montante da foz do Rio Doce (mm) e Vazão Média obtida na Estação Colatina (Período: 2013 a 2020)..... 244
- Figura 79** – Médias de Precipitação Pluviométrica a montante da foz do Rio Doce (mm – linha vermelha) e de Vazão (linha azul) obtida na Estação Colatina calculadas para os meses do período de 2013 a 2020. 244
- Figura 80** – Diagrama de dispersão entre Precipitação Pluviométrica Média do litoral do Espírito Santo e Vazão Média obtida na Estação Colatina. 245
- Figura 81** – Diagrama de dispersão entre Precipitação Pluviométrica Média a montante da foz do Rio Doce e Precipitação Pluviométrica Média da Estação de São Mateus/ES. 245
- Figura 82** – Correlograma das variáveis explicativas usadas nos modelos de nicho de escala fina. Abs – absorção total; chl – clorofila α ; sdd – profundidade por Disco de Secchi; tsm – sólidos totais; tur – turbidez. 248
- Figura 83** – Médias $\pm$ erros-padrão de Absorção Total (em nm) dos pontos de ocorrência das espécies em estudo. A) Comparações entre os períodos de baixa e elevada precipitação pluviométrica (classificados de acordo com Peel *et al.*, 2007) em relação aos cenários temporais (pré e

- pós-desastre). B) Comparações entre as estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). 249
- Figura 84** – Média + desvio-padrão de Absorção Total (área sombreada em verde claro) e precipitação acumulada (linha azul) ao longo das estações do ano (verão – v; outono – o; inverno – i; primavera – p) no período de estudo. Nos mapas, acima do gráfico, destaca-se a variação das medianas de Absorção Total nas primaveras de 2013, 2015, 2017 e 2018, ao longo da área de estudo (azul escuro). 250
- Figura 85** – Circulação esquemática da região leste da costa do Brasil mostrando os vórtices da Corrente do Brasil, que corre do Norte para o Sul margeando a plataforma continental. Foz do rio Doce marcada com uma seta vermelha. 251
- Figura 86** – Médias $\pm$ erros-padrão de Clorofila α (em mg/cm³) dos pontos de ocorrência das espécies em estudo. A) Comparações entre os períodos de precipitação pluviométrica (baixa x elevada) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). B) Comparações entre as estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). 252
- Figura 87** – Média + Desvio-padrão de Clorofila α (área sombreada em verde claro) e precipitação acumulada (linha azul) ao longo das estações do ano (verão – v; outono – o; inverno – i; primavera – p) no período de estudo. Nos mapas, acima do gráfico, destaca-se a variação das medianas de Clorofila α nas primaveras de 2013, 2015, 2017 e 2018, ao longo da área de estudo (azul escuro). 253
- Figura 88** – Médias $\pm$ erros-padrão de Sólidos Totais (em mg/L) dos pontos de ocorrência das espécies em estudo. A) Comparações entre os períodos de precipitação pluviométrica (baixa x elevada) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). B) Comparações entre as estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). 254
- Figura 89** – Média + Desvio-padrão de Sólidos Suspensos Totais (área sombreada em verde claro) e precipitação acumulada (linha azul) ao longo das estações do ano (verão – v; outono – o; inverno – i; primavera – p) no período de estudo. Nos mapas, acima do gráfico, destaca-se a variação das medianas de Sólidos Suspensos Totais nas primaveras de 2013, 2015, 2017 e 2018, ao longo da área de estudo (azul escuro). 255
- Figura 90** – Médias $\pm$ erros-padrão de turbidez (em NTU) dos pontos de ocorrência das espécies em estudo. A) Comparações entre os períodos de precipitação pluviométrica (baixa x elevada) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). B) Comparações entre as estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). 256
- Figura 91** – Média + Desvio-padrão de Turbidez (área sombreada em verde claro) e precipitação acumulada (linha azul) ao longo das estações do ano (verão – v; outono – o; inverno – i; primavera – p) no período de estudo. Nos mapas, acima do gráfico, destaca-se a variação das medianas de Turbidez nas primaveras de 2013, 2015, 2017 e 2018, ao longo da área de estudo (azul escuro). 257
- Figura 92** – Médias $\pm$ erros-padrão de Profundidade por Disco de Secchi (em m) dos pontos de ocorrência das espécies em estudo. A) Comparações entre os períodos de precipitação pluviométrica (baixa x elevada) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). B) Comparações entre as estações do ano (verão, outono, inverno e primavera) em relação aos cenários temporais (pré e pós-desastre). 258
- Figura 93** – Média + Desvio-padrão de transparência mensurada pela Profundidade por Disco de Secchi (área sombreada em verde) e precipitação acumulada (linha azul) ao longo das estações do ano (verão – v; outono – o; inverno – i; primavera – p) no período de estudo. Nos mapas,

acima do gráfico, destaca-se a variação das medianas de Profundidade do Disco de Secchi nas primaveras de 2013, 2015, 2017 e 2018, ao longo da área de estudo (azul escuro).	259
Figura 94 – Diagrama de dispersão da área de distribuição potencial de <i>Sotalia guianensis</i> em relação à precipitação, considerando os cenários temporais de pré e pós-desastre.	262
Figura 95 – Área de distribuição potencial de <i>Sotalia guianensis</i> (linha azul) e precipitação acumulada (linha verde) ao longo das estações do ano (verão – v; outono – o; inverno – i; primavera – p) no período de estudo. Nos mapas, acima do gráfico, destaca-se as áreas de distribuição potencial da espécie (azul escuro) nas primaveras de 2013, 2015, 2017 e 2018.....	264
Figura 96 – Diagrama de dispersão da área de distribuição potencial de <i>Chelonia mydas</i> em relação à precipitação, considerando os cenários temporais pré e pós-desastre.....	265
Figura 97 – Área de distribuição potencial de <i>Chelonia mydas</i> (linha azul) e precipitação acumulada (linha verde) ao longo das estações do ano (verão – v; outono – o; inverno – i; primavera – p) no período de estudo. Nos mapas, acima do gráfico, destaca-se as áreas de distribuição potencial da espécie (azul escuro) nas primaveras de 2013, 2015, 2017 e 2018.....	267
Figura 98 – Imagem demonstrando as áreas amostrais para quelônios marinhos. Legenda: AM= área marinha; ES= estuário.	269
Figura 99 – Áreas avaliadas pelo Programa de Monitoramento de Praias da Bacia de Campos e Espírito Santo (PMP-BC/ES) nas proximidades da foz do rio Doce.....	271
Figura 100 – Representação gráfica do número de encalhes de tartarugas marinhas ao longo dos nove anos de monitoramento do PMP-BC/ES.	272
Figura 101 – Amostra de alga macrófita marinha da espécie <i>Sargassum vulgare</i> para análise de concentração de EPTs.	274
Figura 102 – Resumo ilustrativo sobre as análises e resultados sobre a saúde e bioacumulação em filhotes da tartaruga-marinha <i>Caretta caretta</i>	276
Figura 103 – Filhote neonato de tartaruga-cabeçuda (<i>Caretta caretta</i>), logo após deixar o ninho na praia de Comboios.	277
Figura 104 – Espécime de tartaruga-verde (<i>Chelonia mydas</i>) encontrado morto na foz do rio Piraqueçu, REVIS Santa Cruz.	277
Figura 105 – Tartaruga-de-pente (<i>Eretmochelis imbricata</i>).	278
Figura 106 – Indivíduo subadulto de tartaruga-verde (<i>Chelonia mydas</i>) registrado na área amostral AM 1 (APA Costa das Algas), em Aracruz, Espírito Santo, durante a sétima campanha de campo.	279
Figura 107 – Números de indivíduos de <i>Chelonia mydas</i> observados em forrageamento ao longo das sete campanhas nos pontos AM1 e AM2. A linha azul apresenta os números de indivíduos por campanha, enquanto a linha preta apresenta a tendência geral.....	279
Figura 108 – Comparação entre números de registros de exemplares de <i>Chelonia mydas</i> entre estações similares ao longo de dois anos de estudos.	281
Figura 109 – Boto-cinza encalhado na costa do Banco dos Abrolhos pronto para início da necropsia.....	287
Figura 110 – Corte histológico de dentes de botos-cinza para a contagem do número de camadas de dentina e estimativa da idade: (A) dente de um animal jovem com idade estimada em 3 anos; (B) animal com 16 anos; e (C) animal com 27 anos. Traços pretos indicam a separação de cada camada de dentina. Ln = linha neonatal.	288
Figura 111 – Boto-cinza na região da foz do rio Doce.	290

Figura 112 – Concentração de EPTs (mg/kg) em tecidos de botos-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>) encalhados na região do Banco dos Abrolhos e foz do rio Doce entre 2011 e 2018.....	291
Figura 113 – Concentração de EPTs (na escala logarítmica) em tecidos de botos-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>) encalhados na região do Banco dos Abrolhos e foz do rio Doce entre 2011 e 2018.	292
Figura 114 – Biplot com os dois primeiros eixos fatoriais da Análise de Componentes Principais (PCA) das dosagens de EPTs em botos-cinza da região do rio Doce e Banco dos Abrolhos. Elipses normais para cada grupo com 95% de probabilidade.....	294
Figura 115 – Concentração de alumínio (mg/kg) em músculo de botos-cinza da região do rio Doce e Banco dos Abrolhos antes e depois do desastre.....	295
Figura 116 - Concentração de alumínio (mg/kg) no rim de botos-cinza predita pelo melhor GLM na região do Banco dos Abrolhos entre 2011 e 2018.	295
Figura 117 – Concentração de arsênio (mg/kg) em fígado de botos-cinza da região do rio Doce e Banco dos Abrolhos antes e depois do desastre.....	296
Figura 118 – Concentração de arsênio (mg/kg) no rim de botos-cinza predita pelo melhor GLM na região do Banco dos Abrolhos em função da distância da foz do rio Doce.	296
Figura 119 – Concentração de cobre (mg/kg) em fígado de botos-cinza da região do rio Doce e Banco dos Abrolhos antes e depois do desastre.....	297
Figura 120 – Concentração de cobre (mg/kg) no rim de botos-cinza predita pelo melhor GLM na região do Banco dos Abrolhos em função da distância da foz do rio Doce.	297
Figura 121 – Concentração de cromo (mg/kg) em fígado de botos-cinza da região do rio Doce e Banco dos Abrolhos antes e depois do desastre.....	298
Figura 122 – Concentração de manganês (mg/kg) em fígado de botos-cinza da região do rio Doce e Banco dos Abrolhos antes e depois do desastre.....	299
Figura 123 – Concentração de mercúrio (mg/kg) em fígado de botos-cinza da região do rio Doce e Banco dos Abrolhos antes e depois do desastre.....	300
Figura 124 – Resumo das análises de bioacumulação e biomagnificação em cetáceos.	302
Figura 125 – Taxas de encalhes do boto-cinza por km nos municípios da costa do estado do Espírito Santo entre 2012 e 2019 (dados do Projeto de Monitoramento de Praias – PMP - da Petrobras). Linha azul representa a linha de tendência não linear (método LOESS). Linha tracejada vermelha representa o período em que ocorreu o desastre.	304
Figura 126 – Número de encalhes do boto-cinza no município de São Mateus entre 2012 e 2019. ...	304
Figura 127 – Previsões do melhor modelo para provável causa de morte do boto-cinza no litoral do Espírito Santo.	306
Figura 128 – Relação entre danos do rompimento da barragem de Fundão sobre os cetáceos e suas presas.	307
Figura 129 – Espécies representativas de Copepoda: A) <i>Euterpina acutifrons</i> ; B) <i>Onychocorycaeus giesbrechti</i>	324
Figura 130 – Imagem da espécie <i>Branchiostoma caribaeum</i>	326
Figura 131 – Filhote de boto-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>) com a mãe na costa das algas.	327
Figura 132 – Área de estudo para os estuários.	329
Figura 133 – Compartimentalização do ambiente estuarino e principais pontos de monitoramento da qualidade das águas avaliados em cada compartimento.....	332

Figura 134 – Variação dos níveis e classificação dos dados de turbidez no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	334
Figura 135 – Tendência das alterações para a turbidez na região estuarina do rio Doce.	335
Figura 136 – Tendência das alterações para o alumínio dissolvido na região estuarina do rio Doce.	336
Figura 137 – Variação das concentrações e classificação dos dados de alumínio no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	336
Figura 138 – Tendência das alterações para o arsênio total na região estuarina do rio Doce.	337
Figura 139 – Variação das concentrações e classificação dos dados de arsênio no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	337
Figura 140 – Tendência das alterações para o cádmio total na região estuarina do rio Doce.	338
Figura 141 – Variação das concentrações e classificação dos dados de cádmio no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	339
Figura 142 – Tendência das alterações para o chumbo total na região estuarina do rio Doce.	340
Figura 143 – Variação das concentrações e classificação dos dados de chumbo no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	340
Figura 144 – Tendência das alterações para o cobre dissolvido na região estuarina do rio Doce.	341
Figura 145 – Variação das concentrações e classificação dos dados de cobre no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	341
Figura 146 – Tendência das alterações para o cromo total na região estuarina do rio Doce.	342
Figura 147 – Variação das concentrações e classificação dos dados de cromo no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	343
Figura 148 – Tendência das alterações para o ferro dissolvido na região estuarina do rio Doce.	344
Figura 149 – Variação das concentrações e classificação dos dados de ferro no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	344
Figura 150 – Tendência das alterações para o manganês total na região estuarina do rio Doce.	345
Figura 151 – Variação das concentrações e classificação dos dados de manganês no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	346
Figura 152 – Tendência das alterações para o mercúrio total na região estuarina do rio Doce.	347
Figura 153 – Variação das concentrações e classificação dos dados de mercúrio no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	347
Figura 154 – Tendência das alterações para o níquel total na região estuarina do rio Doce.	348
Figura 155 – Variação das concentrações e classificação dos dados de níquel no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	349
Figura 156 – Tendência das alterações para o zinco total na região estuarina do rio Doce.	350
Figura 157 – Variação das concentrações e classificação dos dados de zinco no estuário do rio Doce ao longo dos períodos avaliados.	350
Figura 158 – Variação da Turbidez no Estuário Piraquê-açu, 2017 a 2019.	353
Figura 159 – Variação de Alumínio Dissolvido no Estuário Piraquê-açu, 2017 a 2019.	354
Figura 160 – Variação de Zinco Total no Estuário Piraquê-açu, 2017 a 2019.	354
Figura 161 – Variação da Turbidez na Lagoa Monsarás, 2016 a 2019.	356

Figura 162 – Variação da concentração Alumínio Dissolvido na Lagoa Monsarás, 2016 a 2019.....	357
Figura 163 – Variação da concentração Ferro Dissolvido na Lagoa Monsarás, 2016 a 2019.	358
Figura 164 – Variação da concentração Manganês Total na Lagoa Monsarás, 2016 a 2019.....	359
Figura 165 – Variação da concentração Zinco Total na Lagoa Monsarás, 2016 a 2019.....	360
Figura 166 – Ilustração das espécies do fitoplâncton encontradas nas estações monitoradas pelo Lactec em ambientes estuarinos.....	372
Figura 167 – Riqueza e diversidade do fitoplâncton nas estações monitoradas pelo Lactec em ambientes estuarinos.....	376
Figura 168 – Densidade do fitoplâncton e concentração de clorofila-a nas estações monitoradas pelo Lactec em ambientes estuarinos.....	376
Figura 169 – Contribuição das classes de microalgas nas estações monitoradas pelo Lactec em ambientes estuarinos.....	377
Figura 170 – Riqueza do fitoplâncton nas estações monitoradas pela Renova na lagoa Monsarás após o desastre.....	377
Figura 171 – Densidade do fitoplâncton nas estações monitoradas pela Renova na lagoa Monsarás após o desastre.	378
Figura 172 – Densidade celular de cianobactérias nas estações monitoradas pela Renova na lagoa Monsarás após o desastre.	378
Figura 173 – Compartimentalização do ambiente estuarino e principais pontos de monitoramento da qualidade dos sedimentos avaliados em cada compartimento.	387
Figura 174 – Classificação das alterações para a análise granulométrica.	389
Figura 175 – Média das classes granulométricas nos diversos pontos amostrados nos períodos pré e pós-desastre nos sete compartimentos no ambiente estuarino do rio Doce, desconsiderando resultados atípicos.	391
Figura 176 – Classificação das alterações para alumínio em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	392
Figura 177 – Classificação dos dados de alumínio em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	393
Figura 178 – Classificação das alterações para arsênio em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	394
Figura 179 – Classificação dos dados de arsênio em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	394
Figura 180 – Classificação das alterações para bário em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	395
Figura 181 – Classificação dos dados de bário em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	396
Figura 182 – Classificação das alterações para cádmio em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	397

Figura 183 – Classificação dos dados de cádmio em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.....	397
Figura 184 – Classificação das alterações para chumbo em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	398
Figura 185 – Classificação dos dados de chumbo em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	398
Figura 186 – Classificação das alterações para cobre em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	399
Figura 187 – Classificação dos dados de cobre em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.....	400
Figura 188 – Classificação das alterações para cromo em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	401
Figura 189 – Classificação dos dados de cromo em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.....	401
Figura 190 – Classificação das alterações para ferro em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	402
Figura 191 – Classificação dos dados de ferro em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.....	403
Figura 192 – Classificação das alterações para manganês em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	404
Figura 193 – Classificação dos dados de manganês em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	404
Figura 194 – Classificação das alterações para mercúrio em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	405
Figura 195 – Classificação dos dados de mercúrio em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.	406
Figura 196 – Classificação das alterações para níquel em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	407
Figura 197 – Classificação dos dados de níquel em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce.....	407
Figura 198 – Classificação das alterações para zinco em sedimento estuarino (Dados Lactec e Fundação Renova).	408

Figura 199 – Classificação dos dados de zinco em sedimento em período pós-desastre no ambiente estuarino do rio Doce.....	408
Figura 200 – Classificação granulométrica do sedimento no Estuário Piraquê-açu, 2017 a 2020, por amostragem. Fonte dos dados: Lactec e Fundação Renova.	411
Figura 201 – Classificação granulométrica do sedimento no Estuário Piraquê-açu, 2017 a 2020, por período.....	412
Figura 202 – Variação de alumínio total (%)no sedimento do estuário do rio Piraquê-açu, 2017 a 2020.	413
Figura 203 – Variação de arsênio total (mg/kg) no sedimento do estuário do rio Piraquê-açu, 2017 a 2020.	414
Figura 204 – Variação de manganês total (mg/kg) no sedimento do estuário do rio Piraquê-açu, 2017 a 2020.....	415
Figura 205 – Variação de mercúrio total (mg/kg) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020....	415
Figura 206 – Classificação granulométrica do sedimento na lagoa Monsarás, 2016 a 2020, por amostragem. Fonte dos dados: Lactec e Fundação Renova.	417
Figura 207 – Classificação granulométrica do sedimento na lagoa Monsarás, 2016 a 2020, por período. Fonte dos dados: Lactec e Fundação Renova.	418
Figura 208 – Variação de alumínio total (%) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020.	419
Figura 209 – Variação de arsênio total (mg/kg) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020.....	420
Figura 210 – Variação de bário total (mg/kg) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020.	420
Figura 211 – Variação de cádmio total (mg/kg) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020.....	421
Figura 212 – Variação de cobre total (mg/kg) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020.	422
Figura 213 – Variação de manganês total (mg/kg) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020.	422
Figura 214 – Variação de mercúrio total (mg/kg) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020.	423
Figura 215 – Variação de níquel total (mg/kg) no sedimento da lagoa Monsarás, 2016 a 2020.....	423
Figura 216 – Gráficos das médias e desvios padrão dos parâmetros : A. Densidades (ind.m ⁻²) dos Grandes Grupos; B. Densidades de Chironomidae e C. Índice de Diversidade de Shannon e D. Número Total de táxons registrados pré- e pós- desastre no estuário da foz do rio Doce. *Valores de -11d, -9d, -2d, 0d, 1d, 2d foram extraídos de Gomes et al. (2017).	425
Figura 217 – Gráficos das abundâncias relativas (%) de A. Mollusca, B. Polychaeta, C. Crustacea, D. Chironomidae e. Outros registradas pré- e pós- desastre da barragem de Fundão (MG) ocorrido em 2015. Na categoria “Outros” estão inclusos os grandes grupos taxonômicos com baixas abundâncias (vide texto). *Valores de -11d, -9d, -2d, 0d, 1d, 2d foram extraídos de Gomes et al. (2017).	429
Figura 218 – Riqueza da ictiofauna registrada no estuário do rio Doce, considerando o levantamento de dados primários realizados pelo Lactec entre 2018 e 2020 e os dados de referência. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.	437
Figura 219 – Proporção dos grupos tróficos (riqueza) registrados nas fases amostrais realizadas entre 2018 e 2020 no ambiente estuarino do rio Doce.....	438
Figura 220 – Proporção dos grupos tróficos (abundância) registrados nas fases amostrais realizadas em 2018/2020 no ambiente estuarino do rio Doce.	438
Figura 221 – Riqueza dos grupos tróficos registrados nas fases amostrais realizadas em 2018 e 2020 e no conjunto de amostragens realizadas no ano de 2016 pela COPPE (2017) e em 2001 (CEA) no	

ambiente estuarino. A linha pontilhada representa o rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015.	439
Figura 222 – Curvas de rarefação (linha preta contínua) e extrapolação (linha vermelha tracejada) da riqueza da ictiofauna estuarina por meio do método que utiliza os números de Hill, considerando o esforço amostral e o número de indivíduos. Os dados extrapolados indicam o número de espécies que será atingido com um esforço amostral (ou abundância) adicional. Os intervalos de confiança (IC) de 95% (linha preta tracejada) foram obtidos através do método Bootstrap. A linha pontilhada horizontal representa as informações (riqueza) obtidas em CEA (2001) e na Linha-Base.	441
Figura 223 – Área de estudo para os ambientes praias.	443
Figura 224 – Granulometria dos ambientes de praias.	448
Figura 225 – Resultados de arsênio total para as estações amostrais localizadas nos ambientes de praias.	449
Figura 226 – Resultados de manganês total para as estações amostrais localizadas nos ambientes de praias.	450
Figura 227 – Área de estudo para os ambientes de manguezais.	457
Figura 228 – Granulometria dos ambientes de manguezais.	461
Figura 229 – Resultados de alumínio total (mg/kg) para as estações amostrais localizadas nos ambientes de manguezais.	462
Figura 230 – Resultados de arsênio total para as estações amostrais localizadas nos ambientes de manguezais.	463
Figura 231 – Variação da densidade de ovos e larvas de peixes (org./10m ³) por ponto amostral no Ambiente Marinho da região da foz do rio Doce e zona costeira adjacente (fevereiro/2019 a setembro/2020).	472
Figura 232 – Abundância relativa (%) entre ovos e larvas de peixes ocorrentes no Ambiente Marinho da região da foz do rio Doce (fevereiro/2019).	474
Figura 233 – Abundância relativa (%) entre ovos e larvas de peixes ocorrentes no Ambiente Marinho da região da foz do rio Doce (setembro/2019).	474
Figura 234 – Abundância relativa (%) entre ovos e larvas de peixes ocorrentes no Ambiente Marinho da região da foz do rio Doce (março/2020).	474
Figura 235 – Abundância relativa (%) entre ovos e larvas de peixes por ponto amostral no Ambiente Marinho da região da foz do rio Doce (fevereiro/2019 a setembro/2020).	475
Figura 236 – Análise de agrupamento (Cluster) entre os pontos amostrais (modo Q) no Ambiente Marinho na foz do rio Doce e zona costeira adjacente (fevereiro/2019 a março/2020).	477
Figura 237 – Variação da densidade de ovos e larvas de peixes (org./10m ³) por ponto amostral em ambiente estuarino e lagoas marginais entre fevereiro de 2019 a setembro de 2020 na foz do rio Doce e sua área costeira adjacente.	483
Figura 238 – Abundância relativa (%) entre ovos e larvas de peixes ocorrentes no ambiente estuarino e lagoas marginais em fevereiro de 2019 na foz do rio Doce e sua área costeira adjacente. ...	484
Figura 239 – Abundância relativa (%) entre ovos e larvas de peixes por ponto amostral do ambiente estuarino e lagoas marginais entre fevereiro de 2019 e setembro de 2020 na foz do rio Doce e sua área costeira adjacente.	485
Figura 240 – Ilustração representando todos os danos causados pelo desastre da Samarco à zona costeira e marinha.	500

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Compartimentalização do Ambiente Marinho para o diagnóstico dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, MG.	46
Tabela 2 – Estações amostrais em cada compartimento do ambiente marinho.	49
Tabela 3 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.	49
Tabela 4 – Indicadores dos danos à qualidade da água.	51
Tabela 5 – Categorias de classificação dos dados de qualidade da água.	51
Tabela 6 – Critério para definição da gravidade dos danos à qualidade da água superficial.	52
Tabela 7 – Estações avaliadas no monitoramento do fitoplâncton marinho pelo Lactec.	101
Tabela 8 – Expedições oceanográficas realizadas pela Rede UFES-Rio Doce para coleta de fitoplâncton na costa do Espírito Santo.	103
Tabela 9 – Estações avaliadas no monitoramento do fitoplâncton realizado pelo PMBA, no setor foz.	103
Tabela 10 – Lista de relatórios avaliados na análise do fitoplâncton marinho do Espírito Santo.	104
Tabela 11 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.	105
Tabela 12 – Indicadores dos danos à comunidade zooplânctônica.	106
Tabela 13 – Ocorrência das espécies do fitoplâncton nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro, nas 04 campanhas após o desastre.	110
Tabela 14 – Variação da ocorrência das espécies representativas (muito frequente e/ou abundante) de Copepoda entre os períodos P0, P1/P2, P4, P5 e P6 no Ambiente Marinho.	124
Tabela 15 – Valores de IBR bioacumulação calculados a partir dos dados de EPTs determinados no plâncton coletado no monitoramento marinho durante as campanha 1, 2 e no períodos pré-rompimento da barragem de Fundão (IBR bioacumulação pretérita). Os valores em vermelho indicam aumento no valor do IBR bioacumulação, em relação ao respectivo valor do IBR bioacumulação pretérita. Fonte: adaptado de RRDM/FEST/UFES, 2019.	129
Tabela 16 – Estações de monitoramento e períodos avaliados na estimativa de cargas excedentes devido ao desastre da barragem de Fundão.	134
Tabela 17 – Estações amostrais em cada compartimento do ambiente marinho.	142
Tabela 18 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre (detalhamento dos dados em Brasil (MPF)/Lactec, 2020e).	143
Tabela 19 – Indicadores dos danos à qualidade de sedimento.	145
Tabela 20 – Critério para definição da gravidade do dano “aumento da concentração de EPTs no sedimento”.	146
Tabela 21 – Valores médios e erros padrão dos parâmetros estruturais registrados nos estudos realizados no ambiente marinho do Espírito Santo pré- e pós- desastre da barragem de Fundão em 2015 (MG). Na categoria “Outros” estão inclusos os grandes grupos taxonômicos com baixas abundâncias. Densidades expressas em m ²	206
Tabela 22 – PERMANOVA calculada a partir da matriz de similaridade de Bray-Curtis para a ictiofauna registrada nos diferentes pontos amostrais das áreas de amostragens (5 km e 15-20 km da foz do rio Doce) no ambiente marinho adjacente. Itens em negrito representam diferenças significativas. GL – Graus de liberdade, SQ – Soma dos quadrados, QM – Quadrados médios.	218

Tabela 23 – Resultados da análise de SIMPER para as espécies com maior contribuição percentual nas similaridades registradas nas áreas de amostragem no ambiente marinho adjacente.	219
Tabela 24 – Frequência e biomassa absoluta e relativa (%) das espécies de peixes registradas nas áreas de amostragem no ambiente marinho adjacente.	219
Tabela 25 – Variáveis marinhas utilizadas no processo de modelagem da biodiversidade em larga escala.	236
Tabela 26 – Cenários temporais da região costeira de potencial ocorrência das espécies <i>Sotalia guianensis</i> e <i>Chelonia mydas</i>	239
Tabela 27 – Precipitação acumulada por estação do ano.	242
Tabela 28 – Volumes de precipitação na estação do ano (em mm), áreas de distribuição potencial (km ²) de <i>Sotalia guianensis</i> e <i>Chelonia mydas</i> em relação às estações do ano (verão, outono, inverno e primavera), cenários temporais em relação ao desastre (pré e pós-desastre), períodos em relação à precipitação (baixa e elevada).	261
Tabela 29 – Períodos de desenvolvimento das sete campanhas de monitoramento de quelônios na bacia do rio Doce e das regiões costeira e marinha do litoral do Espírito Santo.	269
Tabela 30 – Áreas amostrais e número de encalhes de tartarugas marinhas ao longo dos nove Anos de monitoramento do PMP-BC/ES.....	272
Tabela 31 – Resultados da análise de EPTs (arsênio e níquel, peso seco) em táxons de macroalgas marinhas coletadas durante três campanhas do diagnóstico.	274
Tabela 32 – Espécies registradas e número de registros por espécie ao longo das sete campanhas de monitoramento de quelônios das regiões costeira e marinha do litoral do Espírito Santo.	278
Tabela 33 – Espécies de cetáceos, números de espécimes e amostras por tecidos de cetáceos na região do Banco dos Abrolhos usadas para dosagem de contaminantes.	287
Tabela 34 – Autovetores e autovalores da análise de componentes principais (PCA) com as dosagens de contaminantes no fígado de botos-cinza encalhados na região do rio Doce e Banco dos Abrolhos. Os elementos com maior contribuição para a variação no eixo estão marcados em vermelho claro.	293
Tabela 35 – Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) encontrados em concentrações elevadas no boto-cinza na região da foz do rio Doce, variável explanatória que melhor explica a variação da concentração nos dados de acordo com o GLM e tendência anual linear de concentração do elemento em cada tecido avaliado. * e itálico indicam que a tendência linear ou dada pela variável do melhor modelo é significativa estatisticamente.....	294
Tabela 36 – Conjunto de modelos multinomiais para a provável causa de morte do boto-cinza no litoral do Espírito Santo. Melhor modelo é dado pelo menor valor de AIC (Critério de Informação de Akaike). Delta AIC é a diferença do AIC do modelo em relação ao melhor modelo (Delta AIC = 0). Notação: # par = número de parâmetros do modelo.....	305
Tabela 37 – Estações amostrais em cada compartimento do ambiente estuarino.....	331
Tabela 38 – Indicadores dos danos à qualidade da água.	332
Tabela 39 – Categorias de classificação dos dados de qualidade da água.	333
Tabela 40 – Estações de monitoramento do fitoplâncton avaliadas pelo Lactec nos ambientes estuarinos.....	363
Tabela 41 – Estações de monitoramento do fitoplâncton avaliadas pela Renova na lagoa Monsarás.	364

Tabela 42 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.....	366
Tabela 43 – Ocorrência das espécies do fitoplâncton nas estações monitoradas pelo Lactec em ambientes estuarinos.....	367
Tabela 44 – Variação da ocorrência das espécies representativas (muito frequente e/ou abundante) de Copepoda entre os períodos pré-desastre (P0) e pós-desastre (P4, P5 e P6) no Ambiente Estuarino.	379
Tabela 45 – Espécies representativas (muito frequente e/ou abundante) de Copepoda para o estuário do rio Piraquê Açu durante os períodos pré-desastre (P0) e pós-desastre (P4, P5 e P6).....	380
Tabela 46 – Estações amostrais em cada compartimento do ambiente estuarino.	386
Tabela 47 – Indicadores dos danos à qualidade de sedimento.	388
Tabela 48 – Valores médios, desvios padrão e resultados dos Testes <i>a posteriori</i> das análises de variância (ANOVA) das Abundâncias, Número de táxons ($0,07\text{ m}^{-2}$), dos índices de Diversidade de Shannon (H') e Equitabilidade de Pielou (J') ($0,07\text{ m}^{-2}$) da macrofauna benthica registradas nas estações de coletas estuarinas do Espírito Santo, durante as cinco campanhas de amostragens.....	426
Tabela 49 – Valores dos parâmetros estruturais das comunidades benthicas verificados em estudos realizados na foz do rio Doce nos períodos pré- e pós- desastre da barragem de Fundão, em 2015 (MG). Na categoria “Outros” estão inclusos os grandes grupos taxonômicos com baixas frequência de ocorrência e abundâncias. As densidades dos Grandes Grupos (DENS.) estão expressas em ind.m^{-2} e as abundâncias relativas em porcentagem (%). * Resultados obtidos de Gomes et al. (2017).	431
Tabela 50 – Densidades médias (ind.m^{-2}), desvios padrão e abundâncias relativas (%) dos táxons registrados nas estações C1 e C2 durante cinco campanhas pós-desastre da barragem de Fundão (07/18, 02/19, 09/19, 03/20 e 09/20), no estuário do rio Doce no Espírito Santo.....	431
Tabela 51 – Estações amostrais do ambiente praial.	445
Tabela 52 – Resultados na análise granulométrica para as amostras localizadas nos ambientes de praias.....	447
Tabela 53 – Valores dos parâmetros estruturais verificados em estudos realizados nas praias arenosas do litoral do Espírito Santo pré e pós- desastre da barragem de Fundão em 2015 (MG). *resultados obtidos nesse estudo; **valores expressos em ind.m^{-3}	451
Tabela 54 – Valores médios, desvios padrão e resultados dos testes <i>a posteriori</i> entre as abundâncias (ind.0,031m^{-2}), número de táxons ($\text{táxons.0,031m}^{-2}$), índice de diversidade e de equitabilidade da macrofauna benthica registrada nas praias da zona costeira do Espírito Santo, durante as cinco campanhas de amostragens. Estações BS2 e BS3.....	453
Tabela 55 – Estações de monitoramento no ambiente de manguezais.....	459
Tabela 56 – Resultados na análise granulométrica para as amostras localizadas nos ambientes de manguezais.	460
Tabela 57 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.....	468
Tabela 58 – Densidade de ovos e larvas de peixes (org./10m^3) e frequência de ocorrência (%) com dados físico-químicos por ponto amostral no Ambiente Marinho da região da foz do rio Doce (fevereiro/2019-setembro/2020).	469
Tabela 59 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.....	481

Tabela 60 – Densidade de ovos e larvas de peixes (org./10m ³) e frequência de ocorrência (%) com dados físico-químicos por ponto amostral em ambiente estuarino e lagoas marginais entre fevereiro de 2019 e setembro de 2020 na foz do rio Doce e sua área costeira adjacente.....	481
Tabela 61 – Valores dos parâmetros estruturais da macroinfauna verificados nos manguezais em estudos realizados no litoral do Espírito Santo pré e pós- desastre da barragem de Fundão em 2015 (MG). *alteração da localidade; **valores expressos em ind.m ⁻²	489
Tabela 62 – Valores médios e desvios padrão das Densidades de tocas de <i>Ucides cordatus</i> (tocas.m ⁻²) nas estações BS4 e BS5 e nos estudos realizados em manguezais na zona costeira do Espírito Santo, pré e pós-desastre da barragem de Fundão. * Brasil (MPF)/ Lactec, resultados do presente estudo.	490

LISTA DE ABREVIATURAS

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

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

LISTA DE SIGLAS

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

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

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

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

PI	-	Proteção Integral
PI1	-	Padrão Intermediário Fase 1
PL	-	Procura Aleatória Livre
PM	-	Material Particulado
PMN	-	Parque Natural Municipal
PMQACH	-	Programa de Monitoramento da Qualidade da Água para Consumo Humano
PMQQS	-	Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos
PMSAA	-	Programa de Melhoria dos Sistemas de Abastecimento de Água
PMSB	-	Plano Municipal da Saneamento Básico
PN	-	Parque Natural
PNAP	-	Plano Estratégico Nacional de Áreas Protegidas
PNRS	-	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PP	-	Precipitação
PPI	-	Proteína Plasmática
PR	-	Paraná
PRI	-	Polígono de Relações Interiônicas
PRIC	-	Polígono de Relações intercatiônicas
PSLT	-	Procura Sistematizada Limitada por Tempo
PT	-	Proteínas Totais
PTS	-	Partículas Totais em Suspensão
PV	-	Procura com Veículo
QF	-	Quadrilátero Ferrífero
QM	-	Quociente de Mistura de Jentsch
R	-	Riqueza de Margalef
RB	-	Reservas da Biosfera
RBMA	-	Reserva da Biosfera da Mata Atlântica
RBSE	-	Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço
RCC	-	Resíduos de Construção Civil
RCD	-	Resíduos de Construção Civil e Demolição
RDDM	-	Rede Rio Doce Mar
ReBio	-	Reserva Biológica
REVIS	-	Refúgio de Vida Silvestre
RG	-	Radiação
RJ	-	Rio de Janeiro
RL	-	Reservas Legais
rpm	-	Rotações por minuto
RPPN	-	Reserva Particular do Patrimônio Natural
RSCD	-	Resíduos Sólidos de Construção Civil e Demolição
RT	-	Relatório Técnico
SAA	-	Sistema de Abastecimento de Água
SAAE	-	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SABESP	-	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

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

APRESENTAÇÃO

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	45
2 ÁREA MARINHA.....	46
2.1 Danos à qualidade das águas	47
2.1.1 Metodologia	47
2.1.2 Dano de aumento das concentrações de sólidos na água	54
2.1.3 Dano de aumento das concentrações de EPTs na água	59
2.1.3.1 Alumínio dissolvido	59
2.1.3.2 Arsênio total.....	63
2.1.3.3 Cádmio total.....	67
2.1.3.4 Chumbo total	71
2.1.3.5 Cromo total.....	75
2.1.3.6 Ferro dissolvido.....	79
2.1.3.7 Manganês total	83
2.1.3.8 Mercúrio total.....	87
2.1.3.9 Zinco total	91
2.1.3.10 Síntese do dano “aumento da concentração de EPTs na água”	95
2.1.4 Cenário de danos	96
2.1.5 Conclusões	97
2.2 Danos às comunidades planctônicas.....	99
2.2.1 Metodologia.....	100
2.2.1.1 Fitoplâncton	100
2.2.1.2 Zooplâncton	104
2.2.2 Alteração da comunidade fitoplanctônica	107
2.2.3 Alteração da comunidade zooplanctônica.....	121
2.2.3.1 Alterações na densidade e na composição das espécies do zooplâncton ..	121
2.2.3.2 Aumento da concentração de Elementos Potencialmente Tóxicos – EPTs no zooplâncton marinho.....	128
2.2.4 Cenário de danos	130
2.2.5 Conclusões	130
2.3 Danos associados ao transporte de sedimentos.....	132
2.3.1 Metodologia.....	133
2.3.1.1 Dados e períodos de avaliação.....	134
2.3.1.2 Cargas cumulativas excedentes	135
2.3.2 Incremento na deposição de sedimentos	135
2.3.3 Cenário de danos	138

2.3.4 Conclusões	139
2.4 Danos à qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	139
2.4.1 Metodologia	141
2.4.2 Alteração das características granulométricas do sedimento superficial	149
2.4.3 Aumento da concentração de EPTs no sedimento	153
2.4.3.1 Alumínio	153
2.4.3.2 Arsênio	157
2.4.3.3 Bário	160
2.4.3.4 Cádmio	164
2.4.3.5 Chumbo	168
2.4.3.6 Cobre	172
2.4.3.7 Cromo	176
2.4.3.8 Ferro	180
2.4.3.9 Manganês	184
2.4.3.10 Mercúrio	188
2.4.3.11 Níquel	192
2.4.3.12 Zinco	196
2.4.3.13 Síntese do dano de aumento da concentração de EPTs no sedimento	200
2.4.4 Alterações na estrutura das comunidades bêmicas de fundos inconsolidados ..	201
2.4.5 Alterações na condição de saúde e contaminação dos invertebrados bêmicos de fundos inconsolidados por EPTs	207
2.4.6 Cenário de danos	210
2.4.7 Conclusões	211
2.5 Danos à ictiofauna	213
2.5.1 Metodologia	213
2.5.1.1 Metodologia para coleta de dados primários	213
2.5.1.2 Análises ecotoxicológicas	215
2.5.1.3 Classificação dos danos	216
2.5.2 Redução da riqueza e diversidade da ictiofauna no ambiente marinho adjacente à foz do rio Doce	216
2.5.3 Simplificação da estrutura trófica da ictiofauna	225
2.5.4 Diminuição das populações de espécies de peixes costeiros de interesse comercial	228
2.5.5 Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	229
2.5.6 Aumento na bioacumulação	229
2.5.7 Cenário de danos	230
2.5.8 Conclusões	231

2.6 Danos aos quelônios e mamíferos marinhos	233
2.6.1 Degradação da qualidade dos habitats marinhos	233
2.6.1.1 Metodologia	234
2.6.1.2 Degradação da qualidade de habitats e alterações na distribuição potencial de <i>Chelonia mydas</i> e <i>Sotalia guianensis</i>	246
2.6.2 Danos aos quelônios	268
2.6.2.1 Metodologia.....	268
2.6.2.2 Contaminação por EPTs e aumento da incidência de encalhes de quelônios.....	270
2.6.2.3 Demais variáveis avaliadas.....	277
2.6.2.4 Síntese dos danos aos quelônios	284
2.6.3 Danos aos cetáceos.....	285
2.6.3.1 Metodologia.....	286
2.6.3.2 Mortalidade e degradação da saúde de cetáceos pelo aumento da concentração de EPTs	289
2.6.4 Cenário de danos	308
2.6.5 Conclusões	309
2.7 Danos às Unidades de Conservação e a outras Áreas	
Naturais Protegidas.....	313
2.7.1 Acompanhamento dos danos à Abrolhos.....	314
2.7.1.1 Introdução	314
2.7.1.2 Monitoramento do ambiente marinho de Abrolhos	315
2.7.1.3 Considerações Gerais	320
2.7.2 Acompanhamento dos danos a APA Costa das Algas e ReVis Santa Cruz.....	321
2.7.2.1 Introdução	321
2.7.2.2 Monitoramento dos Sedimentos.....	321
2.7.2.3 Monitoramento da Qualidade de água	322
2.7.2.4 Monitoramento do Zooplâncton.....	323
2.7.2.5 Monitoramento da comunidade bentônica de fundos inconsolidados	324
2.7.3 Acompanhamento dos danos a Reserva de Desenvolvimento Sustentável Municipal (RDSM) Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim.....	325
2.7.3.1 Introdução	325
2.7.3.2 Monitoramento do Zooplâncton.....	326
2.7.4 Acompanhamento dos danos na ReVis Santa Cruz, APA Costa das Algas, ResEx Cassurubá, APA da Costa da Baleia/Abrolhos e PARNAM dos Abrolhos com ênfase nos Cetáceos.....	327
2.7.5 Conclusões.....	328
3 ESTUÁRIOS	329

3.1 Danos à qualidade das águas	330
3.1.1 Metodologia	330
3.1.2 Estuário do Rio Doce	333
3.1.2.1 Aumento da concentração de sólidos na água	333
3.1.2.2 Aumento das concentrações de elementos potencialmente tóxicos - EPTs na água	335
3.1.3 Estuário do rio Piraquê-açu.....	351
3.1.3.1 Concentração de sólidos na água.....	352
3.1.3.2 Concentrações de EPTs na água.....	353
3.1.4 Lagoa Monsarás	355
3.1.4.1 Concentração de sólidos na água.....	355
3.1.4.2 Concentrações de EPTs na água.....	356
3.1.5 Cenário de danos	360
3.1.6 Conclusões	361
3.2 Danos às comunidades planctônicas.....	362
3.2.1 Metodologia.....	363
3.2.1.1 Fitoplâncton	363
3.2.1.2 Zooplâncton	364
3.2.2 Alteração da comunidade fitoplanctônica.....	367
3.2.3 Possíveis alterações na composição das espécies do zooplâncton estuarino	378
3.2.4 Conclusões	383
3.3 Danos à qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas.....	384
3.3.1 Metodologia.....	385
3.3.2 Estuário do Rio Doce.....	390
3.3.2.1 Alteração da granulometria do sedimento superficial nas adjacências da foz do rio Doce em decorrência do desastre.....	390
3.3.2.2 Aumento da concentração de EPTs do sedimento superficial nas adjacências da foz do rio Doce em decorrência do desastre	392
3.3.3 Estuário do rio Piraquê-açu.....	410
3.3.3.1 Granulometria do sedimento superficial no estuário do rio Piraquê-açu ..	410
3.3.3.2 Concentração de EPTs no sedimento.....	412
3.3.4 Lagoa Monsarás	416
3.3.4.1 Granulometria do sedimento superficial na lagoa Monsarás	416
3.3.4.2 Concentração de EPTs.....	418
3.3.5 Alterações na estrutura da macrofauna bêntica dos estuários	424
3.3.6 Contaminação e alterações no estado de saúde da macrofauna bêntica de estuários.....	432

3.3.7	Cenário de danos	432
3.3.8	Conclusões	433
3.4	Danos à ictiofauna.....	434
3.4.1	Metodologia.....	435
3.4.1.1	Metodologia de coleta de dados primários	435
3.4.1.2	Classificação dos danos.....	436
3.4.2	Redução da riqueza e diversidade da ictiofauna estuarina.....	436
3.4.3	Alteração da estrutura trófica da ictiofauna.....	438
3.4.4	Alterações nas condições corporais e/ou na saúde da ictiofauna	439
3.4.5	Aumento na bioacumulação	440
3.4.6	Cenário de danos	440
3.4.7	Conclusões	441
4	PRAIAS	443
4.1	Danos à qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	443
4.1.1	Metodologia.....	445
4.1.1.1	Qualidade dos sedimentos	445
4.1.1.2	Macrofauna bêntica.....	446
4.1.2	Características granulométricas do sedimento.....	447
4.1.3	Concentração de EPTs	448
4.1.3.1	Arsênio Total	449
4.1.3.2	Manganês Total.....	449
4.1.4	Alterações na estrutura da macrofauna bêntica das praias arenosas	450
4.1.5	Contaminação e alterações no estado de saúde da macrofauna bêntica de praias arenosas.....	453
4.1.6	Cenário de danos	455
4.1.7	Conclusões	455
5	MANGUEZAIS	457
5.1	Danos à qualidade dos sedimentos e comunidades bentônicas	457
5.1.1	Metodologia.....	458
5.1.1.1	Base de dados	459
5.1.1.2	Acompanhamento das alterações no sedimento.....	459
5.1.2	Granulometria do sedimento superficial	460
5.1.3	Avaliação da concentração de EPTs	461
5.1.3.1	Alumínio total.....	461
5.1.3.2	Arsênio total.....	462
5.1.4	Contaminação e alterações no estado de saúde da macrofauna bêntica de manguezais	463

5.1.5	Cenário de danos	464
5.1.6	Conclusões	464
6	OUTROS TEMAS ESTUDADOS	466
6.1	Ictioplâncton	466
6.1.1	Caracterização do ictioplâncton do Ambiente Marinho	466
6.1.1.1	Metodologia	466
6.1.1.2	Caracterização da Comunidade Ictioplanctônica	468
6.1.1.3	Conclusões	478
6.1.2	Caracterização do ictioplâncton do ambiente estuarino	479
6.1.2.1	Metodologia	480
6.1.2.2	Caracterização da Comunidade Ictioplanctônica	481
6.1.2.3	Conclusões	486
6.2	Avaliação da estrutura da macrofauna bêntica dos manguezais	487
6.2.1	Resultados	487
6.2.2	Conclusões	491
7	AÇÕES DE RECUPERAÇÃO	492
7.1	Ações de gestão da atividade de pesca	492
7.2	Ações de monitoramento da biodiversidade costeira	493
7.3	Ação de consolidação e criação de unidades de conservação	494
7.4	Ações de auxílio ao gerenciamento costeiro	494
7.5	Ação de fortalecimento da comunicação social	495
7.6	Ação de educação ambiental	496
7.7	Incentivo as ações de fiscalização	496
7.8	Ação de desenvolvimento do turismo	497
7.9	Ações de saneamento	497
8	ANÁLISE INTEGRADA	499
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	509
10	GLOSSÁRIO	533
	DOCUMENTOS SUPLEMENTARES	549
	APÊNDICES	635
	ANEXOS	669

1 INTRODUÇÃO GERAL

O diagnóstico dos danos socioambientais do rompimento da barragem de Fundão ocorrido em 2015 para a zona costeira e marinha foi executado durante o período de dois anos, a partir de março de 2017. Os resultados na íntegra constam no Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce, TOMO IV - Zona Costeira e Marinha (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e).

A área de estudo englobou especialmente o estuário do rio Doce e região marinha adjacente, com limite ao sul na região da Área de Proteção Ambiental Costa das Algas e limite ao norte na região de Degredo, não ultrapassando áreas em que a profundidade fosse superior a 50 metros. Também foram avaliadas as faixas de praias arenosas e manguezais, o estuário do rio Piraquê (confluência dos rios Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim) e a lagoa ou laguna Monsarás, que dentre as lagoas da região, foi a única que apresentou características salobras pelo menos em algum período do estudo. Para além dos limites dessas áreas, foram analisados dados secundários de outras instituições atuantes no contexto do desastre da Samarco.

Foram identificados, ao todo, 18 danos englobando sete grupos temáticos, sendo que a maioria deles foi classificada como gravíssima e irreversível, mas com tendência de redução: associados ao transporte de sedimentos, à qualidade das águas e dos sedimentos, e às comunidades biológicas ali presentes: plâncton (fitoplâncton - algas marinhas; zooplâncton - animais microscópicos presentes na coluna da água), macroinvertebrados bentônicos (pequenos animais associados ao sedimento), ictiofauna (peixes), quelônios e mamíferos marinhos (ênfase em cetáceos), incluindo os danos em unidades de conservação e outras áreas naturais protegidas.

Além dessas áreas temáticas, foi estudada ainda a vegetação costeira (restinga), entretanto não foi possível identificar danos à esse grupo biológico, e por esse motivo ele não consta neste relatório.

Os danos associados à presença de rejeito e contaminação por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) na zona costeira e marinha merece atenção uma vez que esse ambiente recebeu e continua recebendo os rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão. Essa camada de rejeito pode se movimentar e ser transportada ao longo do tempo para regiões adjacentes, porém permanecerá no fundo do mar e a depender das condições do ambiente, parte do material poderá ser disponibilizada periodicamente para a coluna da água. Além disso, devido ao extenso tempo de residência dos elementos químicos nestes meios, uma vez disponibilizados no ambiente, os EPTs tendem a permanecer como contaminantes em diferentes espécies químicas, circulando, incorporando e se acumulando nos diferentes compartimentos ambientais e ao longo da cadeia trófica.

No presente relatório é apresentado o acompanhamento dos danos aos sete grupos temáticos para os quais foram diagnosticados danos, de modo a identificar mudanças no comportamento das alterações no período subsequente aos dois anos analisados. A exceção é para os danos que foram classificados como cessados. Para aqueles que ainda continuavam a ocorrer, são trazidos dados com relação à tendência de evolução de cada dano e sua reversibilidade em comparação às classificações realizadas e apresentadas no diagnóstico. Para os danos que ainda ocorrem é apresentado um cenário do que se espera daqui para a frente. A área de abrangência do acompanhamento de danos é exatamente a mesma do diagnóstico de danos disponível em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), mas os mapas e estações amostrais foram inseridos novamente em cada um dos ambientes para facilitar a visualização e entendimento.

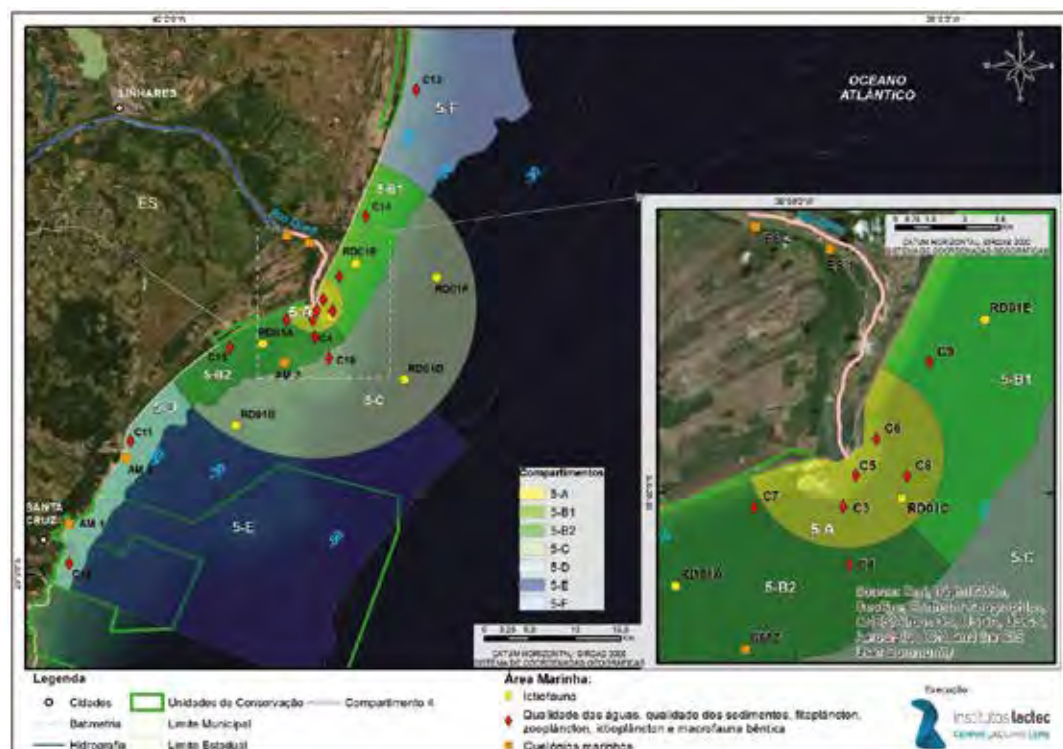
2 ÁREA MARINHA

A porção marinha da área de abrangência desse estudo, denominada aqui como Área Marinha, refere-se ao ambiente aquático formado pelo mar e seu leito. Visando facilitar a interpretação dos resultados e o entendimento dos danos, suas gravidades e espacialidade, foram definidos sub compartimentos de acordo com as distâncias a partir da foz do rio Doce e de acordo com as profundidades (Tabela 1 e Figura 1). Nesta mesma figura é possível visualizar as estações amostrais de coleta de água, sedimento, plâncton, macrofauna bêntica, ictiofauna e quelônios marinhos. Para os cetáceos, o monitoramento foi realizado por meio de deslocamento dentro dessa mesma área de abrangência, e os detalhes constam no item 2.6.

Tabela 1 – Compartimentalização do Ambiente Marinho para o diagnóstico dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, MG.

Profundidade do ponto	Compartimento				
	Raio <4 km da foz	Raio Entre 4 e 22 km da foz		> raio de 22 km da foz	
		Norte	Sul	Sul	Norte
<20 metros	5-A	5-B1	5-B2	5-D	5-F
Entre 20 e 50 metros		5-C		5-E	

Figura 1 – Compartimentalização e estações amostrais do Ambiente Marinho para o diagnóstico dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão, MG.



Execução: Lactec.

Para a área marinha consta a descrição do acompanhamento dos danos do rompimento da barragem de Fundão sobre a **qualidade das águas** e sobre as comunidades biológicas frequentemente utilizadas como bioindicadores: o fitoplâncton e o zooplâncton, aqui tratados como **comunidades**

planctônicas. De forma semelhante foram elencados danos relativos ao **transporte e qualidade dos sedimentos** e na fauna associada, as **comunidades bentônicas.** Na sequência são apresentados os danos sobre a **ictiofauna, quelônios e mamíferos marinhos,** e por fim a avaliação da ocorrência de danos em **Unidades de Conservação e outras Áreas Naturais Protegidas.**

Para este ambiente também foi estudado o **ictioplâncton,** entretanto, os resultados obtidos até o momento não permitiram a caracterização de danos advindos do desastre da Samarco. Assim, os resultados para essa área temática são apresentados no capítulo 6, item 6.1.

2.1 DANOS À QUALIDADE DAS ÁGUAS

No dia 21 de novembro de 2015, a lama de rejeitos minerários proveniente do rompimento da barragem de Fundão atingiu a costa do Espírito Santo, após percorrer todo o curso dos rios, alterando os aspectos qualitativos das águas na região costeira. A pluma de rejeitos se dispersou no mar ao longo das adjacências da foz do rio Doce e a sua intensidade variou, tanto latitudinalmente quanto longitudinalmente dependendo de vários fatores, como a vazão do rio Doce, ventos, correntes e direção de ondas (ICMBio, 2017b). Segundo os dados apresentados em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), devido à chegada da lama de rejeitos, foram identificados os seguintes danos à qualidade das águas do ambiente marinho: aumento na concentração de sólidos, redução das concentrações de oxigênio dissolvido e o aumento da concentração de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs).

Em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), os danos à qualidade das águas na zona costeira foram classificados quanto a sua magnitude (pouco grave, grave e gravíssimo) e em relação a sua tendência de evolução ao longo do tempo. O dano de aumento de concentração de sólidos foi classificado como gravíssimo no compartimento 5-A e pouco grave nos outros compartimentos, já o dano em relação ao aumento de EPTs na água foi classificado como pouco grave em todos os compartimentos; ambos os danos apresentaram tendência à redução com o passar dos anos. Conforme demonstrado no relatório supracitado Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), o dano de redução das concentrações de oxigênio dissolvido foi classificado como grave e com o passar do tempo verificou-se que o ambiente marinho se recuperou quanto as concentrações de oxigênio dissolvido, sendo este considerado como cessado, de modo que o mesmo não foi abordado neste relatório.

O presente documento tem como objetivo continuar a avaliação dos resultados obtidos para os danos relacionados ao aumento das concentrações de sólidos e EPTs na água em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), incorporando à análise anterior o conjunto de dados referente ao ano de 2019 (janeiro a dezembro).

Ainda, vale ressaltar que os dados de qualidade da água coletados pelo Lactec no período próximo a cheia de janeiro/2020 foram avaliados em Brasil (MPF)/ Lactec (2020i), no qual foram apresentados os resultados de alteração da qualidade da água decorrentes deste evento hidrológico.

2.1.1 METODOLOGIA

A fim de avaliar a manutenção dos resultados obtidos para os danos relacionados ao aumento das concentrações de sólidos e EPTs na água em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), foi incorporado à análise anterior o conjunto de dados referente ao ano de 2019. Para o ano de 2019, foram avaliados

dados primários coletados em campanhas de monitoramento de qualidade de água do Lactec, dados secundários da Fundação Renova e da Rede Rio Doce Mar (RRDM), sendo que sua utilização se deu do mesmo modo como no estudo supracitado.

No ambiente marinho, os dados primários foram oriundos de monitoramento realizado pelo Lactec, decorrentes de três campanhas, com coleta de amostras de água em julho/2018, fevereiro/2019 e setembro/2019. As estações avaliadas, o método de coleta e a análise foram os mesmos utilizados no diagnóstico de danos na zona costeira (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e), no qual foram avaliadas 13 estações de monitoramento nas quais foram coletadas amostras de água de superfície e de fundo. A localização das estações amostrais está apresentada na Figura 1. Os laudos da campanha de junho/2018 encontram-se no Apêndice K do 2º Relatório Parcial de Resultados (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2019e) e os laudos de 2019 foram disponibilizados no Apêndice do Parecer técnico nº 33 sobre a Avaliação da Qualidade da Água da bacia do rio Doce e da região costeira adjacente realizada pelo Lactec entre os anos de 2018 e 2020 (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2021)

Quanto aos dados secundários, além das fontes de dados avaliadas no diagnóstico de danos (Samarco, Fundação Renova e universidades), no presente documento foram avaliados também os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar (RRDM/FEST/UFES, 2019), entre outubro/2018 e setembro/2019, que foram fornecidos pela Câmara Técnica de Biodiversidade no âmbito do Comitê Interfederativo – CIF. A localização das estações amostrais referentes aos dados secundários avaliados é apresentada na Figura 2, na qual podem ser visualizados também a compartimentalização da área avaliada. As estações amostrais que representam cada compartimento podem ser visualizadas na Tabela 2.

Os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar são apresentados nos gráficos de classificação junto com todos os dados avaliados para este estudo, entretanto devido a diversas disparidades metodológicas os mesmos apresentaram-se diferentes dos dados obtidos pelos demais estudos, sendo assim eles não foram utilizados para a classificação da tendência dos danos e são discutidos de maneira genérica dentro deste relatório.

Os resultados da avaliação dos danos quanto a alterações na qualidade da água foram apresentados em relação às condições de linha-base (anterior ao desastre) e entre diferentes janelas temporais após o desastre, conforme pode ser visualizado na Tabela 3. Para o acompanhamento dos danos no presente documento, avaliou-se, principalmente, o comportamento das variáveis durante o período P5 em comparação aos períodos anteriores, referente ao período entre janeiro/2019 e dezembro/2019.

Os dados coletados pelo Lactec em 2020 foram avaliados separadamente em Brasil(MPF)/ LACTEC (2020i) e Apêndice do Parecer técnico nº 33 sobre a Avaliação da Qualidade da Água da bacia do rio Doce e da região costeira adjacente realizada pelo Lactec entre os anos de 2018 e 2020 (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2021).

A segmentação temporal utilizada pode ser visualizada na Tabela 3 em conjunto com as fontes que produziram os dados avaliados em cada período. A segmentação temporal foi estabelecida anualmente após o período 1, P1 (estabelecido entre 21 de novembro de 2015 a março/2016), com o objetivo de se estabelecer um número de observações representativo em cada um deles, bem como de coincidir com o intervalo avaliado na região fluvial, que também procedeu com o acompanhamento dos danos por quatro anos após o desastre.

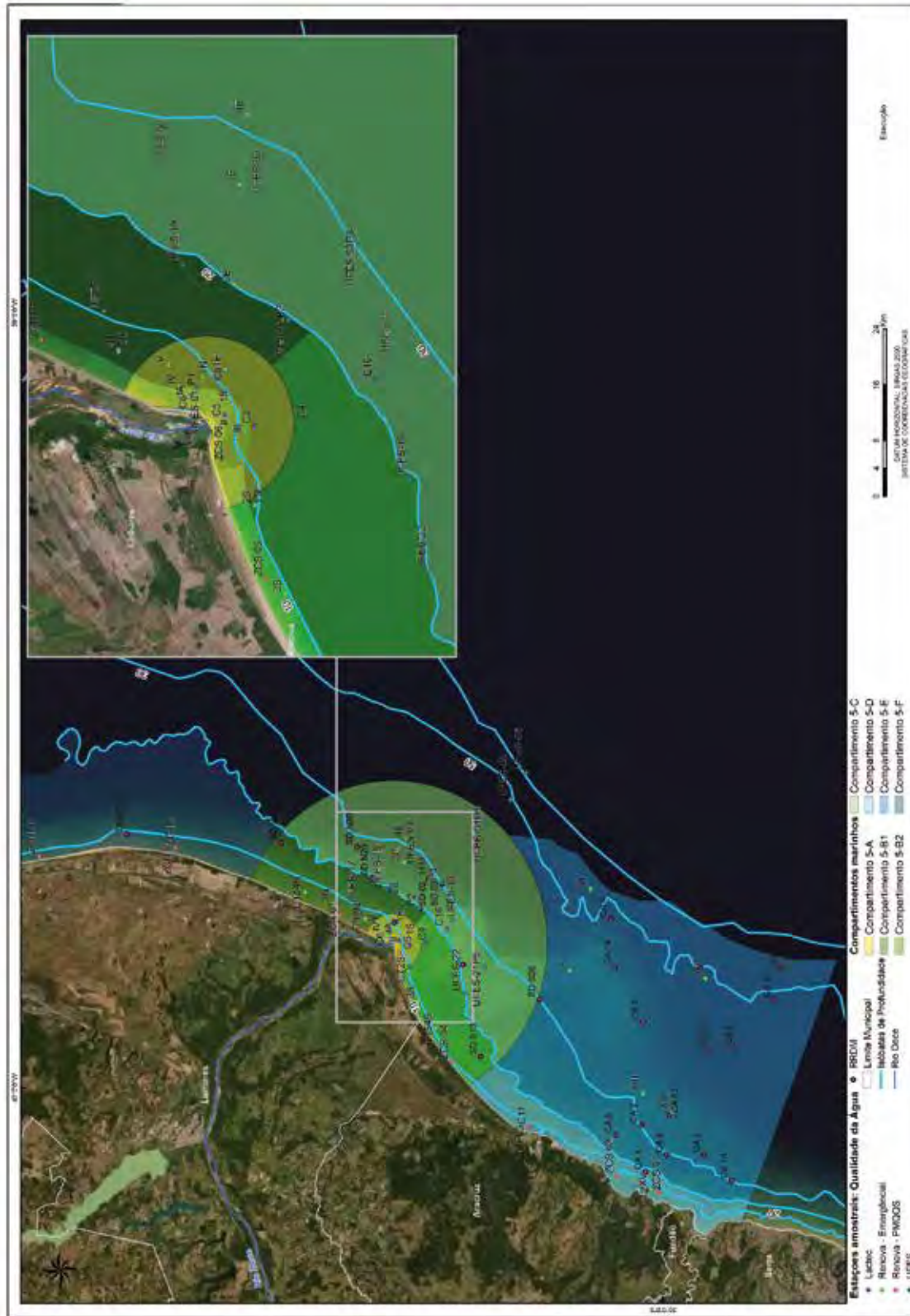
Tabela 2 – Estações amostrais em cada compartimento do ambiente marinho.

Compartimento	Estações de Monitoramento					Nº total de estações amostrais
	Lactec	Renova - Emergencial	Renova PMQQS	Outras Instituições	RRDM	
Compartimento 5-A	C3, C5, C6, C8	1N, 1S, 1E, P1, IA, II, III, IV, V	-	1, 18, UFES	SD01	16
Compartimento 5-B1	C9, C14	2N, 3N, 4N	ZCN 01	17, 19, UFES	SD02, SD N13, SDN20	11
Compartimento 5-B2	C4, C7, C15	2S, 3S, 4S	ZCS 04, ZCS05, ZCS 06	16, 22, UFES	SD S13, SD S20	14
Compartimento 5-C	C16	P2, 2E, 3E, 4E, P3, P4, P5	-	2, 8, 9, 3, 13, 21, UFES	SD03, SD04, SD N30, SD S30	18
Compartimento 5-D	C11, C12	XV	ZCS 01, ZCS 02, ZCS 03	X	CA1	8
Compartimento 5-E	-	X, XI, XII, XIII, XIV	-	X	CA2, CA3, CA4, CA5, CA6, CA7, CA8, CA9, CA10, CA11, CA12, CA13, CA14, CA15	19
Compartimento 5-F	C13	-	ZCN02, ZCN03	X	DEG1	4

Tabela 3 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.

Período	Identificação do Período	Intervalo de tempo	Fonte de dados avaliados no período
Pré-desastre	P0	Série histórica de dados levantados na linha-base até 20 de novembro de 2015	Diversos estudos levantados na linha base e Renova Emergencial
	P1	21 de novembro de 2015 a março/2016	Renova Emergencial e outras instituições
	P2	Abril/2016 a dezembro/2016	Renova Emergencial e outras instituições
Pós-desastre	P3	Janeiro/2017 a dezembro/17	Renova Emergencial, Renova PMQQS, Lactec
	P4	Janeiro/2018 a dezembro/18	Lactec e Renova PMQQS
	P5	Janeiro/2019 a dezembro/2019	Lactec, Renova PMQQS e RRDM

Figura 2 – Compartimentalização do ambiente marinho e principais pontos de monitoramento da qualidade das águas avaliados em cada compartimento.



Execução: Lactec.

Com exceção da incorporação dos dados obtidos no monitoramento da RRDM, a metodologia de análise dos danos e sua evolução permaneceram as mesmas, sendo que o seu detalhamento foi apresentado em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e). A metodologia adotada, desta forma, envolveu a avaliação de dados primários e secundários, sendo que a avaliação de danos à qualidade da água foi realizada a partir de diferentes indicadores, conforme apresentado na Tabela 4. No caso do dano referente ao aumento nas concentrações de EPTs, optou-se por utilizar, como indicadores, os elementos em suas formas, total e dissolvido, que apresentam limite na legislação nacional, de modo a possibilitar a avaliação comparativa do dado.

Tabela 4 – Indicadores dos danos à qualidade da água.

Danos	Indicadores
Aumento das concentrações de sólidos na água	Valor de turbidez (NTU)
Aumento das concentrações de elementos potencialmente tóxicos – EPTs na água	Concentração de alumínio dissolvido, arsênio total, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido*, cromo total, ferro dissolvido, manganês total, níquel total*, zinco total (mg/L)

* Como os indicadores cobre dissolvido e níquel total não foram utilizados para determinação do dano em Brasil (MPF)/Lactec (2020e), a evolução das concentrações destes indicadores não foram apresentadas neste relatório.

Visando à mensuração dos danos, cada um dos dados do período pós-desastre foi classificado de acordo com as categorias apresentadas na Tabela 5. A classificação ocorreu para os dados de cada um dos indicadores (Tabela 4) e para cada uma das estações de monitoramento avaliadas (Tabela 4). Por tal classificação, a qualidade da água varia no sentido de que dados pós-desastre classificados na “categoria A” indicam uma condição melhor, enquanto dados classificados na “categoria C” indicam uma condição pior.

Tabela 5 – Categorias de classificação dos dados de qualidade da água.

Categoria de classificação dos dados	Descrição
Categoria A	Valores de acordo com os limites da classe 1 da Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salinas e dentro da variação histórica pré-desastre;
Categoria B	Valores de acordo com a variação histórica pré-desastre, mas que não atenderam aos limites da classe 1, ou, então, valores que extrapolaram a variação histórica pré-desastre, mas que atenderam aos limites da classe 1;
Categoria C	Valores em desacordo com os limites da classe 1 da Resolução CONAMA Nº 357/2005 para águas salinas e que extrapolaram a variação histórica pré-desastre.

Os dados classificados de acordo com as categorias A, B e C foram então agrupados em cada um dos sete compartimentos (5-A, 5-B1, 5-B2, 5-C, 5-D, 5-E e 5-F) e cinco períodos de tempo conforme observado na Tabela 3.

A gravidade dos danos foi estabelecida de acordo com a pior categoria registrada para, pelo menos, um de seus indicadores durante um dos meses de P1 (novembro/2015 a março/2016). Na Tabela 6 estão apresentados os critérios adotados para a definição da gravidade dos danos à qualidade da água, bem como sua interpretação.

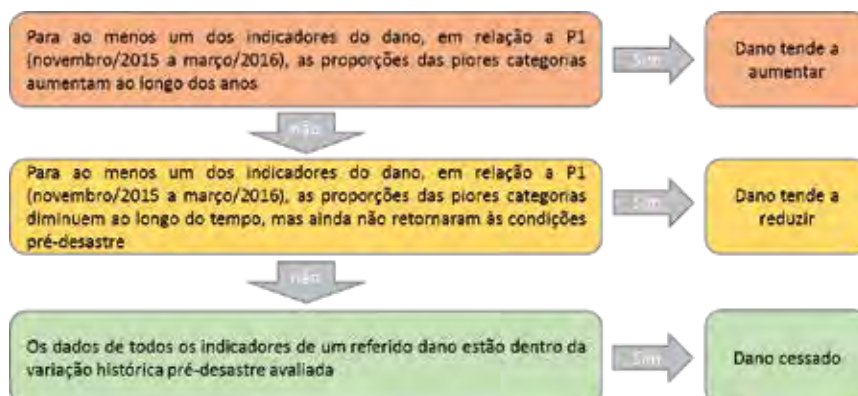
Tabela 6 – Critério para definição da gravidade dos danos à qualidade da água superficial.

Gravidade	Critério	Interpretação
Pouco grave	Todos os indicadores foram classificados na categoria A em relação ao P1.	Dano que perdurou por um menor tempo em relação aos demais e/ou apresentou alterações menores em termos de magnitude com relação à linha-base.
Grave	Nenhum dos indicadores foi classificado na categoria C em P1 e ao menos um dos indicadores foi classificado na categoria B no mesmo período.	Quando observada alteração em relação à linha-base, mas de acordo com os padrões legislados. Ou, então, quando não se atendeu ao padrão legislado, mas tal condição já era observada antes do rompimento.
Gravíssimo	Pelo menos um dos indicadores foi classificado na categoria C em P1	Indica alterações mais significativas em relação à linha-base, haja vista sua maior duração e magnitude.

Ao longo dos demais períodos, observou-se a tendência de evolução do dano em relação à situação observada para P1 (novembro/2015 a março/2016), ou seja, se o dano cessou (retornou às condições de linha-base), tendeu a diminuir (em relação a P1, as condições melhoraram, mas ainda não retornaram à linha-base) ou tendeu a aumentar (em relação a P1, as condições pioraram). Para tanto, foi levado em conta o fluxo de condições apresentado na Figura 3. Para a avaliação da tendência de evolução dos danos, foram utilizados somente os dados do Lactec e da Fundação Renova em virtude de minimizar possíveis diferenças relacionadas a metodologia de coleta e análise das amostras e a variação do número de estações de monitoramento em cada compartimento ao longo dos anos (Figura 4). As diferenças metodológicas utilizadas para a determinação de EPTs na água podem gerar componentes de incerteza atrelados a diferentes fatores, tais como: condições ambientais; operador; equipamentos; padrões utilizados; método de medição; amostragem e outros. Convém esclarecer que as referidas condições se tratam de diretrizes gerais que nortearam a avaliação de tendência de evolução do dano. Contudo, ao longo da discussão dos resultados, levaram-se em consideração, também, as particularidades dos dados obtidos para cada indicador, bem como dos compartimentos. Foi ainda realizada uma análise conjunta dos resultados dos gráficos da classificação individual dos dados pós-desastre nas categorias A, B e C e dos gráficos das proporções das categorias. A existência de dados pós-desastre superando os máximos históricos pré-desastre foi considerada como alerta, indicando ainda alterações em relação às condições de linha-base. Esta interpretação se faz necessária, pois podem ocorrer exceções relacionadas ao limite de detecção das variáveis utilizadas dentre outros fatores.

Especificamente em relação à avaliação dos danos à qualidade da água, quando se define que o dano está cessado, subentende-se que a recuperação do ambiente ocorreu também, visto que foram reestabelecidas as condições pretéritas ao rompimento. A viabilização desta relação de recuperação ambiental se deu em virtude de haver um referencial de linha-base quanto aos aspectos qualitativos dos ambientes avaliados, de um modo geral.

Figura 3 – Fluxo de condições gerais de avaliação de tendência de evolução dos danos à qualidade da água.



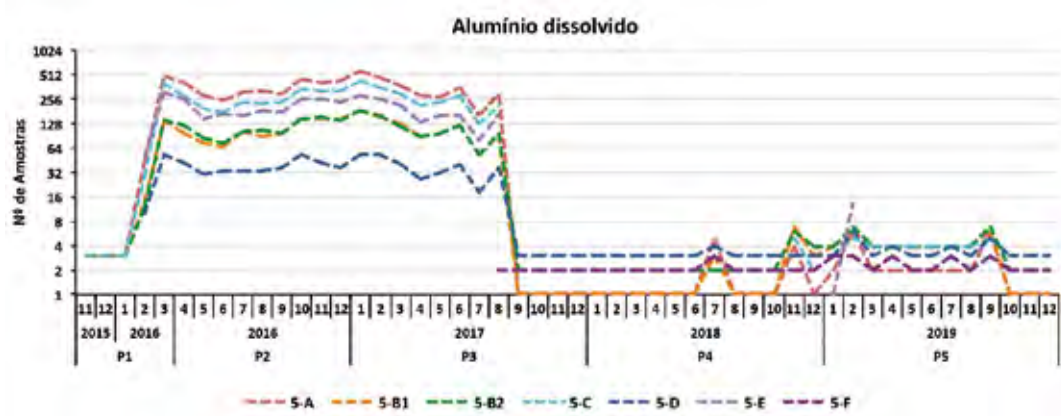
Fonte: Brasil (MPF)/ Lactec (2020e).

Nos casos em que os resultados das variáveis de qualidade de água foram inferiores ao limite de quantificação do método (LQ), utilizou-se o próprio valor do LQ para fins de cálculo. Ainda é importante mencionar que alguns indicadores apresentaram LQ acima dos padrões estabelecidos na resolução CONAMA nº 357/2005 ou acima dos máximos encontrados na linha-base, o que será discutido ao longo da apresentação dos resultados. Este caso aconteceu basicamente com os dados de origem secundária.

É importante destacar, contudo, que, em virtude de o número de estações de monitoramento variar de compartimento para compartimento e a frequência das campanhas de monitoramento ter se alterado ao longo do tempo, os percentuais não foram calculados em cima do mesmo número de observações.

Na Figura 4 está ilustrada, a partir de um gráfico que correlaciona o esforço amostral com o tempo, para o alumínio dissolvido, como exemplo, essa variabilidade no número de amostras para cada compartimento ao longo dos períodos monitorados, na qual é possível verificar a diferença do esforço amostral entre o período do monitoramento emergencial (novembro/2015 a agosto/2017), realizado pela Samarco, os períodos abrangidos pelo PMQQS (agosto/2017 a dezembro/2018) e o período P5 com a inclusão dos dados da RRDM.

Figura 4 – Esforço amostral para alumínio dissolvido durante o período de monitoramento pós-desastre.



2.1.2 DANO DE AUMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS NA ÁGUA

De acordo com a Figura 5 e Figura 6, no ano de 2019 houve um aumento, em relação ao período anterior (P4 - 2018), da proporção da categoria A nos dados de concentração de sólidos na água de superfície e fundo em todos os compartimentos do ambiente marinho, com exceção dos dados de fundo no compartimento 5-F. Tal padrão evidencia que, no referido ano, um maior número de dados atendeu ao limite capaz de influenciar a fotossíntese e de alterar a estrutura trófica devido à restrição da luminosidade (FABRICIUS, 2005; LUNT, SMEE, 2014), e esteve de acordo com a variação histórica pré-rompimento.

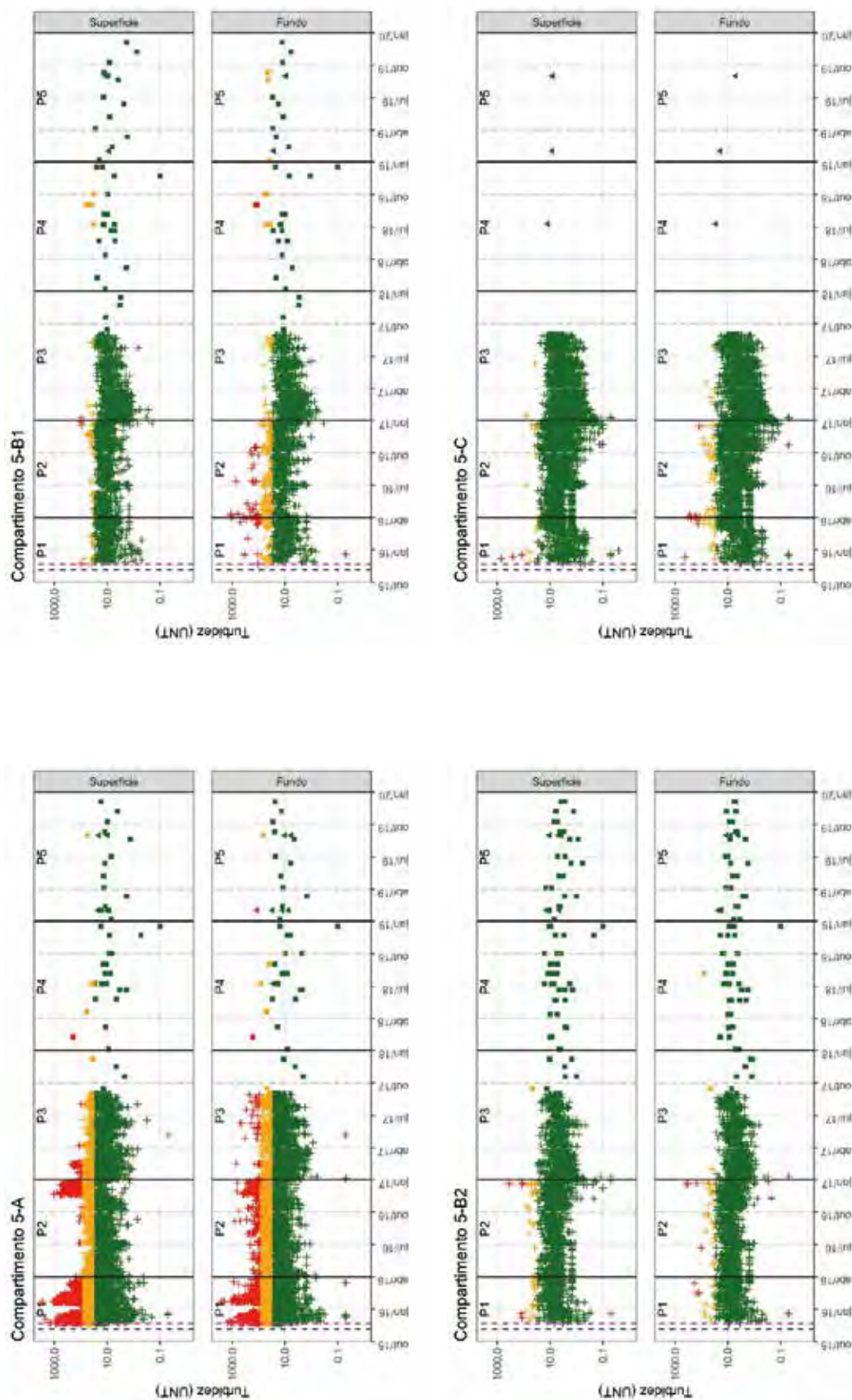
A ocorrência de dados na categoria C no período pós-desastre indica o registro de valores superiores ao máximo histórico pré-desastre registrado nas adjacências da foz do rio Doce (89 UNT) e ao valor de 30 UNT referente ao limite capaz de influenciar a fotossíntese e de alterar a estrutura trófica devido à restrição de luz (FABRICIUS, 2005; LUNT, SMEE, 2014). Em 2019 (P5), foram registrados dados nesta categoria apenas em amostras de águas de fundo, nos compartimentos 5-A, 5-D e 5-F (Figura 5). No compartimento mais próximo da foz do rio Doce (5-A) foram registrados, apenas em uma ocasião, valores de turbidez classificados na Categoria C. Em 2019, nos compartimentos 5-D e 5-F, foram registrados valores de turbidez nesses níveis em duas e quatro ocasiões, respectivamente. Em 2019, os níveis de turbidez mais elevados foram observados no compartimento 5-D, onde registrou-se 228 UNT em outubro/2019. No compartimento mais próximo à foz do rio Doce (5-A), o valor mais elevado registrado foi de 115 UNT em fevereiro/2019.

A ocorrência de dados na categoria C apenas em amostras de águas de fundo evidencia que os níveis de turbidez nesta camada estão sendo mais influenciados pela ressuspensão do material depositado no fundo e não diretamente pela pluma do rio Doce. Dados nesta categoria foram registrados pelos estudos do Lactec e da Fundação Renova.

Dentre os dados de águas de superfície, apenas no compartimento 5-A foi registrado, em uma ocasião, um valor passível de classificação na Categoria B (55 UNT), acima do limite capaz de influenciar a fotossíntese e de alterar a estrutura trófica devido à restrição da luminosidade (30 UNT) e abaixo do máximo histórico pré-desastre.

Visto que ainda se observaram, em 2019, valores de turbidez que ultrapassam o máximo histórico pré-desastre e que as proporções de dados na categoria A estão aumentando com o passar do tempo, entende-se que o dano relativo ao aumento da concentração de sólidos na água não está cessado, mas tende a reduzir, seguindo a tendência estabelecida no diagnóstico de danos (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e).

Figura 5 – Classificação dos dados de turbidez nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).



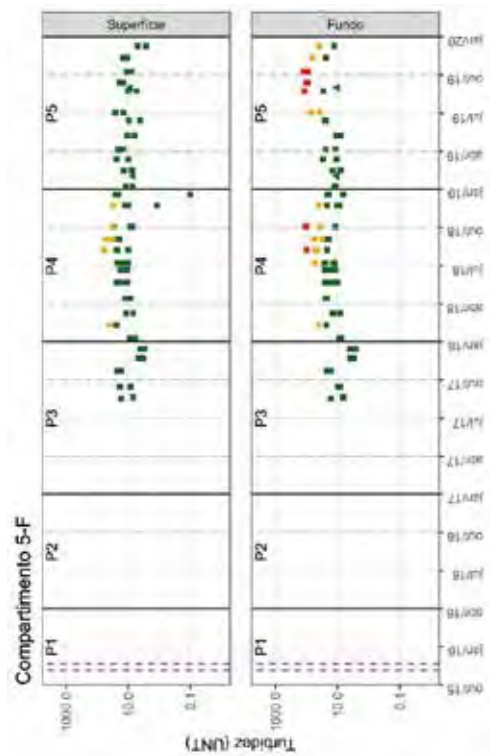
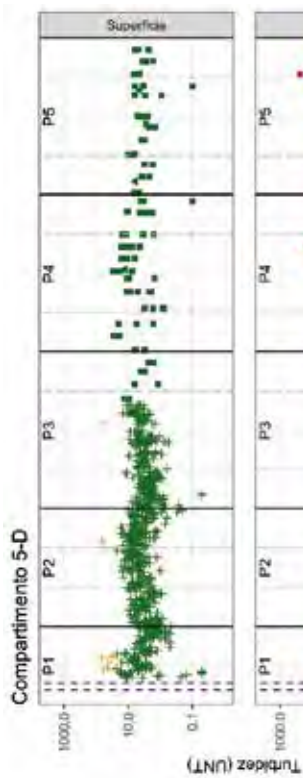
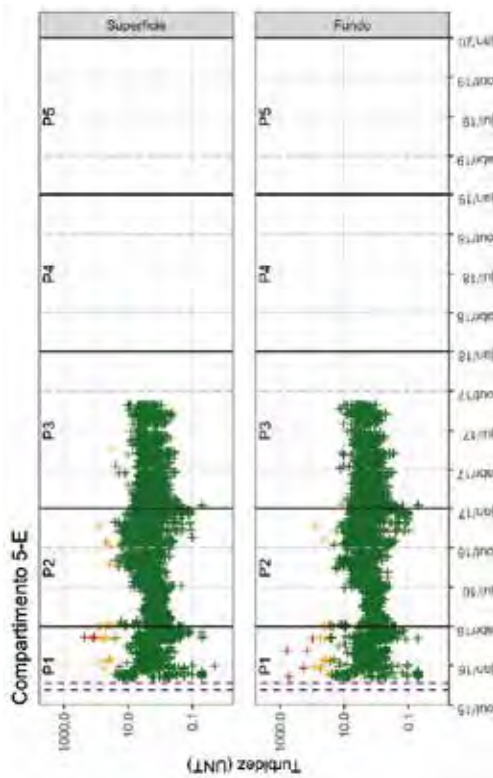


Figura 6 – Tendência das alterações para turbidez no ambiente costeiro.



2.1.3 DANO DE AUMENTO DAS CONCENTRAÇÕES DE EPTS NA ÁGUA

O dano de aumento das concentrações de EPTs na água é indicado pelos parâmetros: alumínio dissolvido, arsênio total, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido, cromo total, ferro dissolvido, manganês total, mercúrio total, níquel total e zinco total. Na sequência, é apresentada a síntese do dano com sua respectiva classificação da tendência de evolução no ano de 2019.

2.1.3.1 Alumínio dissolvido

Os dados de alumínio dissolvido foram classificados considerando o máximo histórico pré-desastre da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (0,201 mg/L) e de acordo com a classe 1 da resolução CONAMA Nº 357/2005 para águas salinas (1,5 mg/L). Ressalta-se que o valor máximo de alumínio dissolvido registrado no período pré-desastre é bastante reduzido quando comparado ao limite legislado, o que possivelmente está relacionado a um baixo número de observações para este parâmetro nas proximidades da foz do rio Doce, local onde se espera encontrar maiores concentrações de alumínio devido ao aporte continental, principalmente em períodos de cheia.

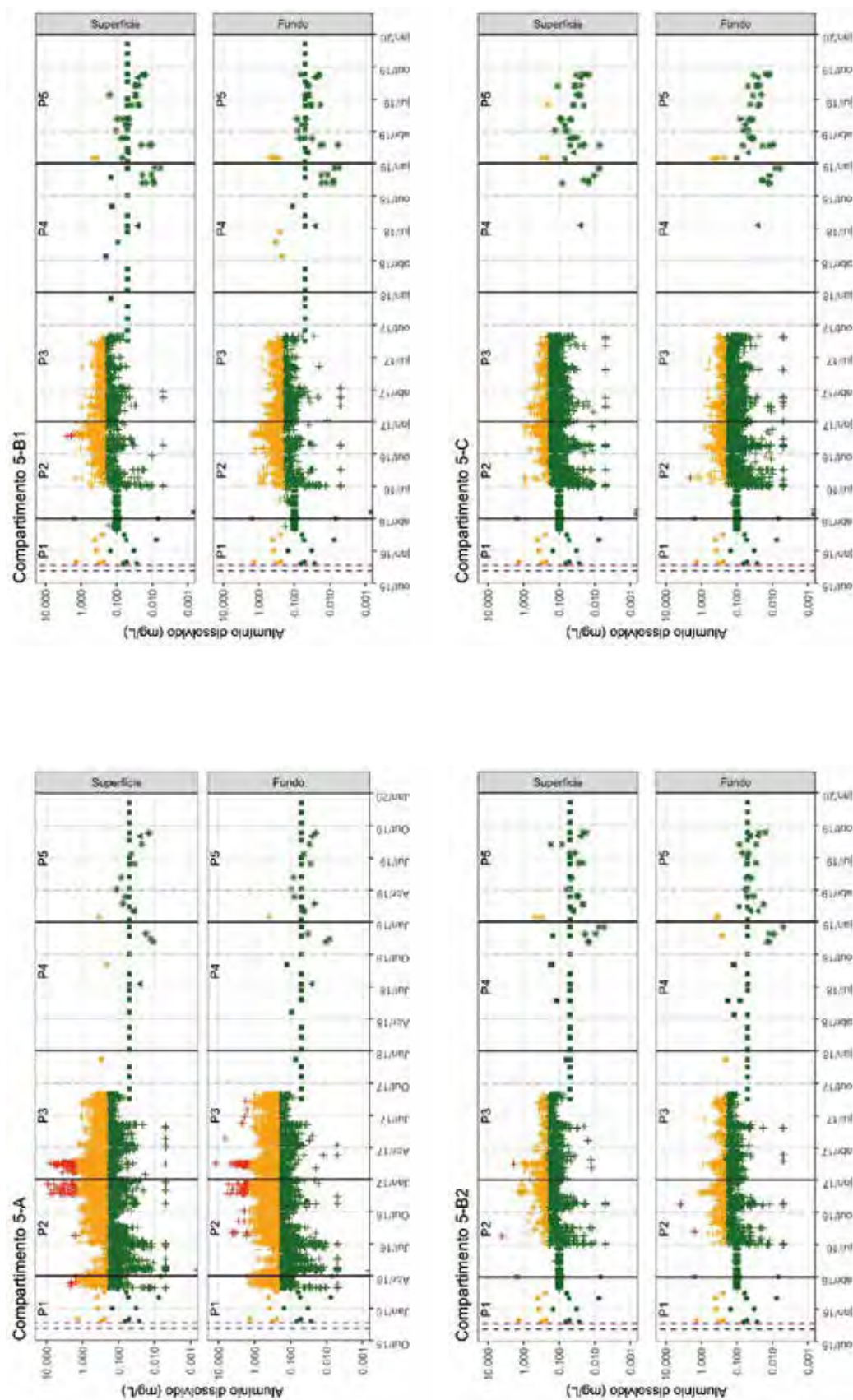
Ressalta-se que o valor máximo da linha-base pode não representar as condições normais na região mais próxima à foz durante os referidos períodos de cheia. Tal condição foi verificada pela dominância de valores classificados como Categoria B no compartimento 5-A (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e), que, possivelmente, estão associados a condições normais nas proximidades da foz do rio Doce. Desse modo, o acompanhamento das alterações em relação a este indicador foi realizado através da avaliação dos dados classificados na Categoria C, ou seja, que representam valores acima da classe 1 da Resolução CONAMA e do máximo histórico pré-desastre, e sua evolução durante os períodos considerados.

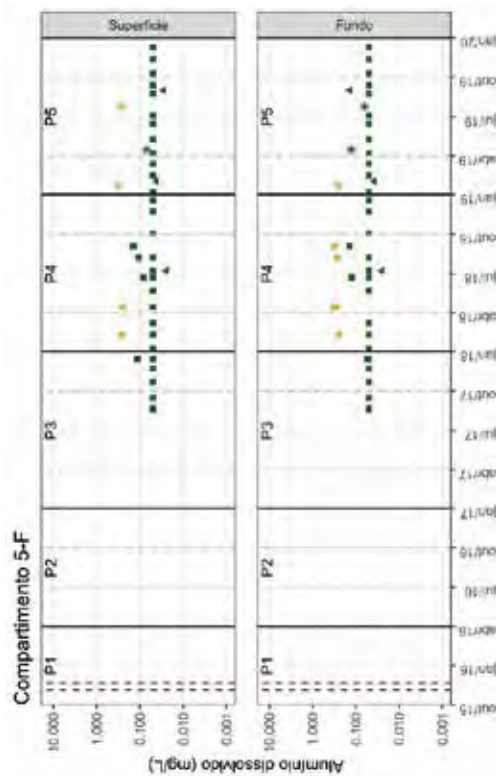
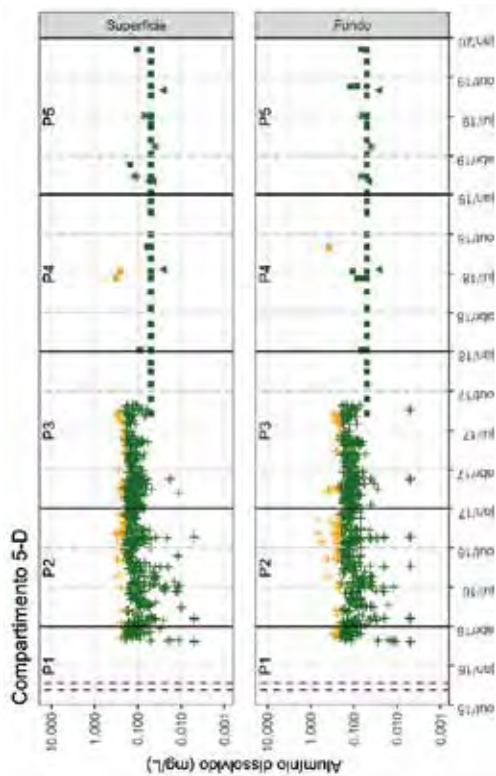
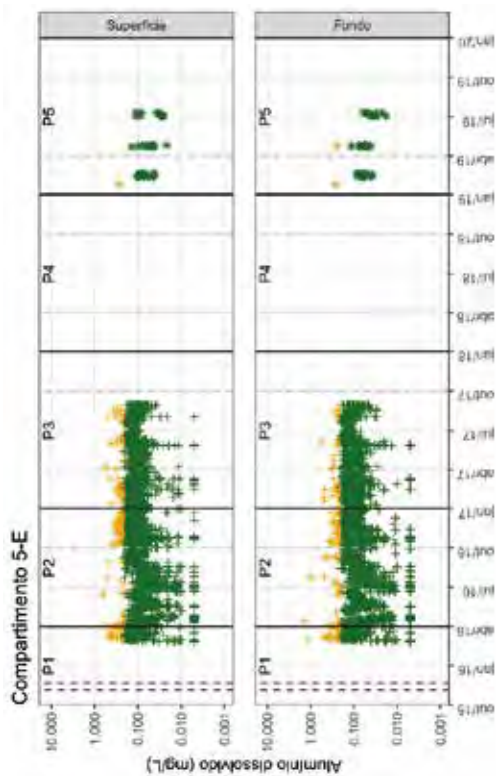
Para entendimento da tendência de evolução das concentrações deste indicador, foram avaliados os dados do Lactec e da Fundação Renova por compartimento e período (Figura 7), conforme estabelecido na metodologia. Entre os anos de 2018 (P4) e 2019 (P5), não foi registrado nenhum dado na categoria C, não sendo possível identificar um aumento das concentrações deste indicador entre os últimos anos. O último registro de dados na categoria C, pelo Lactec ou pela Fundação Renova, ocorreu em 2017 (P3). Desde então, todos os dados foram classificados nas categorias A e B. Comparando os percentuais de dados na categoria B em 2019 (P5) com o período logo após o desastre (P1), é possível verificar uma redução dos percentuais de dados nesta classe com o passar do tempo.

Figura 7 – Tendência das alterações para o alumínio dissolvido no ambiente costeiro.



Figura 8 – Classificação dos dados de alumínio dissolvido nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul) e da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





Foram registrados dados de alumínio na categoria B apenas pela RRDM em 2019, principalmente nos meses de janeiro e fevereiro, durante o período chuvoso. Os dados na categoria B, que representam concentrações acima do máximo histórico pré-desastre, indicam que as concentrações de alumínio dissolvido estão de acordo com o limite legislado, porém acima do máximo histórico registrado no período pré-desastre.

2.1.3.2 Arsênio total

Cada um dos dados de arsênio total pós-desastre foi classificado de acordo com as categorias A, B e C. Para a avaliação da evolução das concentrações deste indicador foram utilizados os dados do Lactec e da Fundação Renova, conforme descrito na metodologia, que foram agregados por compartimento e período e apresentados na Figura 9. No ano de 2019, houve um aumento/manutenção da proporção da categoria A em todos os compartimentos do ambiente marinho (5-A a 5-F). Tanto os compartimentos mais próximos à foz quanto os compartimentos mais distantes apresentaram 100% das concentrações de arsênio classificadas na Categoria A no ano de 2019 (P5), evidenciando que, no referido ano, em todos os dados do Lactec e da Fundação Renova estiveram de acordo com o valor máximo histórico da variável registrado no período pré-desastre (0,0661 mg/L) nos compartimentos mais próximos da foz do rio Doce e com a classe 1 da resolução CONAMA nº 357/2005 (0,01 mg/L).

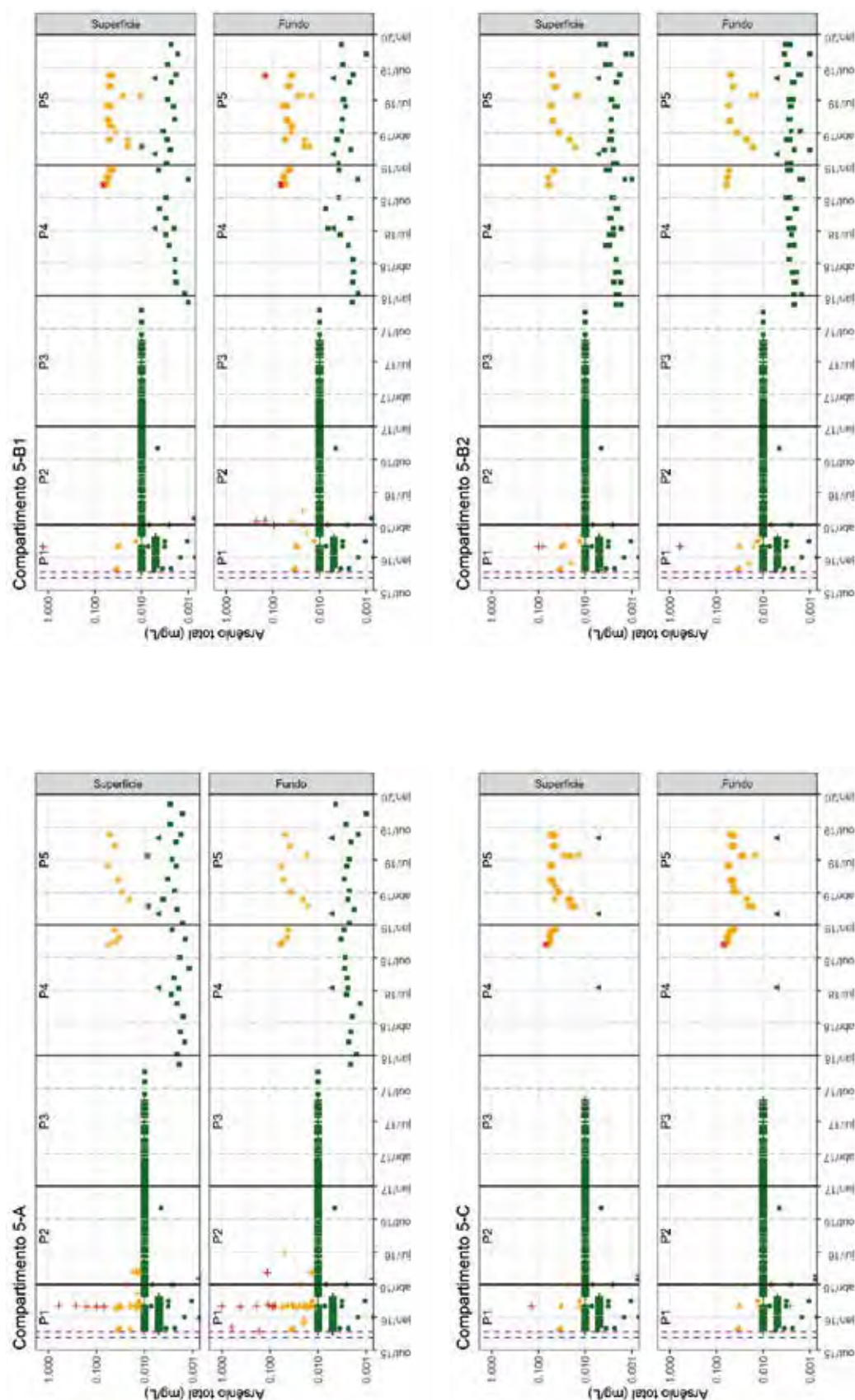
Foi realizada também uma avaliação dos dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar, que é apresentada nos gráficos da Figura 10. Os dados classificados nas categorias B e C durante 2018 e 2019 foram todos provenientes dos resultados da RRDM, conforme pode ser visualizado nos gráficos apresentados (Figura 10). A ocorrência da categoria C no ano de 2019 indica o registro de valores superiores aos limites legislados e aos máximos históricos pré-rompimento. Foram registrados dados, nesta categoria nos compartimentos logo ao sul e ao norte da foz do rio Doce, no compartimento 5-B1, em amostras de águas de fundo, e no compartimento 5-B2, em amostras de águas de superfície. Em todos os compartimentos observaram-se dados na categoria B, que indicam concentrações de arsênio superiores ao limite legislado, porém abaixo dos máximos históricos.

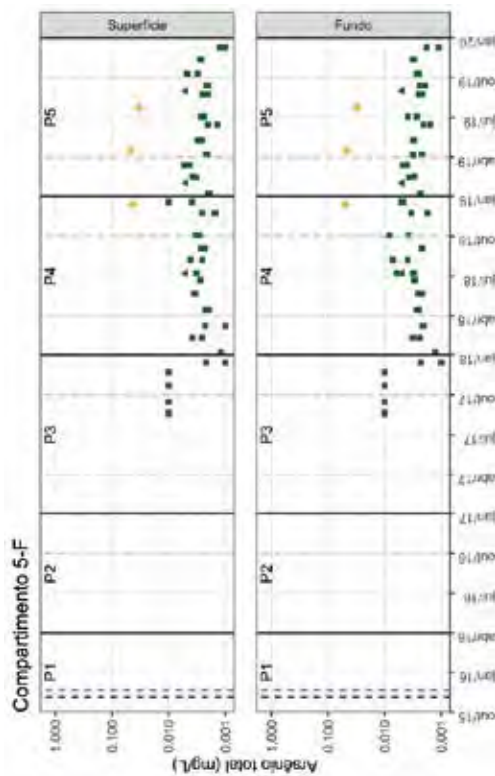
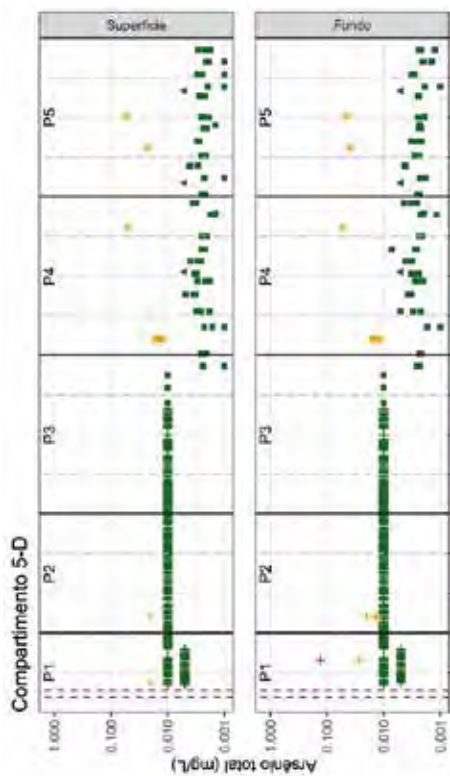
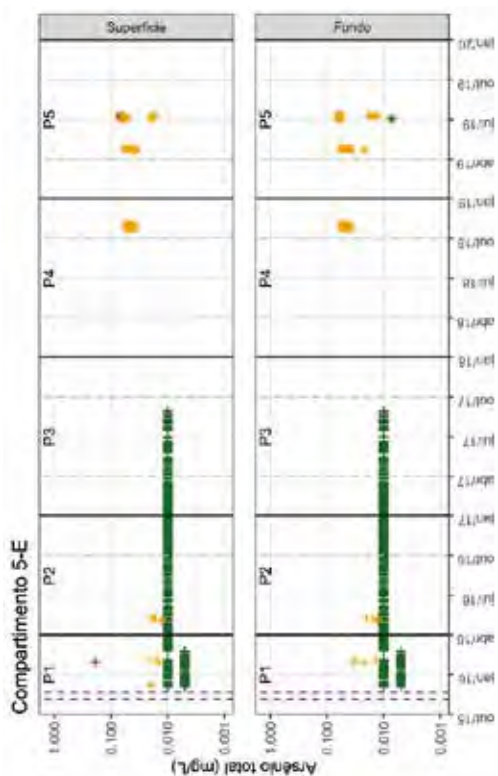
O enriquecimento e a contaminação de arsênio no sedimento na plataforma continental leste brasileira, devido à exploração mineral na bacia do rio Doce desde o século 17, foram relatados por Cagnin (2018). Concentrações de arsênio no sedimento superiores aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 454/2012 foram registradas nesse estudo em camadas mais profundas dos testemunhos retirados nas adjacências da foz do rio Doce referentes a deposições anteriores ao desastre. No relatório de linha-base (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2019d) foram identificados dados de qualidade da água que apresentaram concentrações de arsênio superiores aos limites da classe 1 da Resolução CONAMA nº 357/2005 na região anteriormente a ocorrência do desastre, ou seja, mesmo antes da ocorrência do desastre já eram observadas concentrações de arsênio na água e no sedimento superiores aos limites legislados, dificultando o estabelecimento de uma correlação direta das concentrações de arsênio verificadas apenas com o desastre.

Figura 9 – Tendência das alterações para o arsênio total no ambiente costeiro (Dados Lactec e Fundação Renova).



Figura 10 – Classificação dos dados de arsênio total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul) e da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





2.1.3.3 Cádmio total

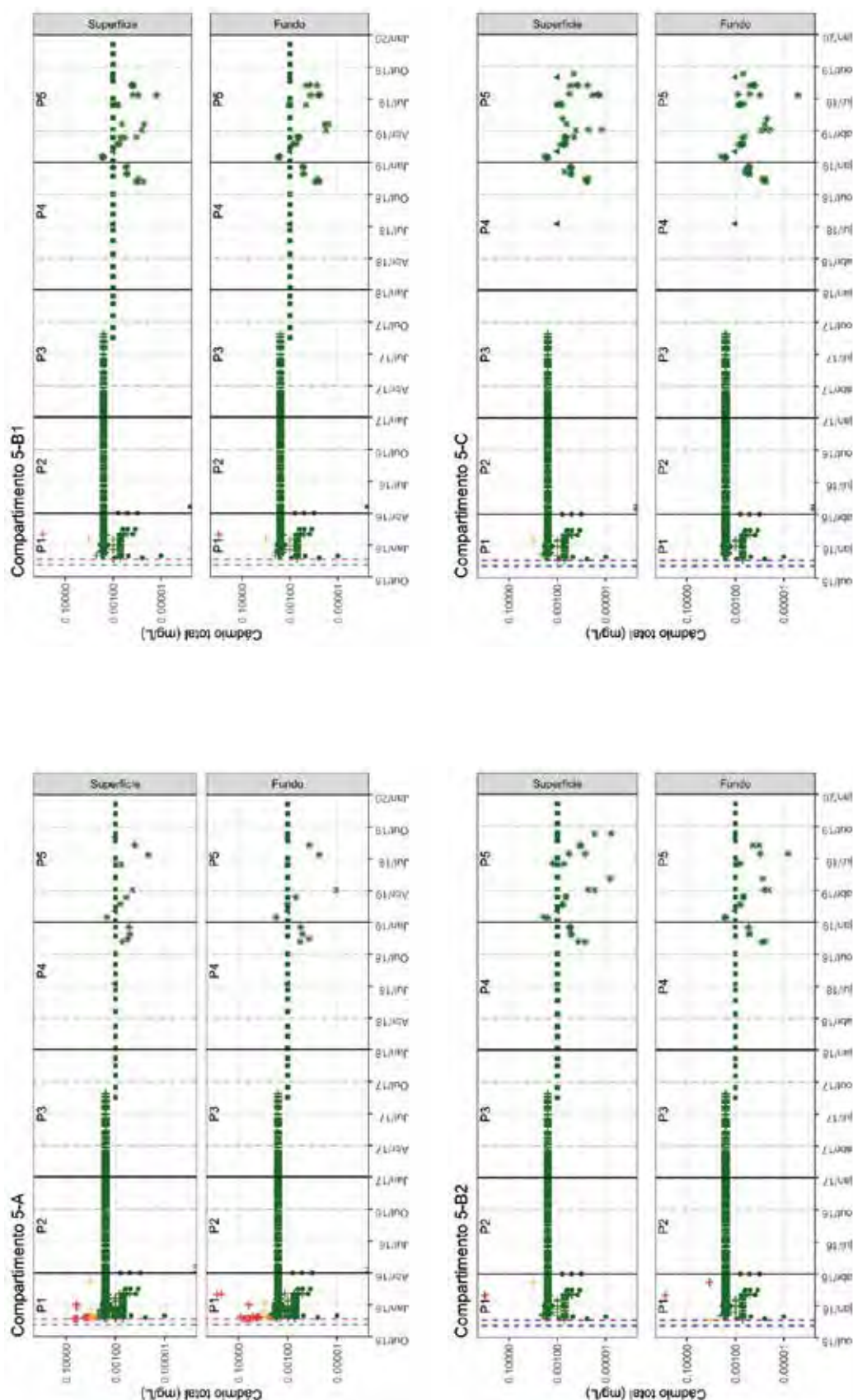
De acordo com a Figura 11, no ano de 2019, houve uma manutenção da proporção de dados de cádmio classificados na categoria A em todos os compartimentos do ambiente marinho (5-A a 5-F). Tanto os compartimentos mais próximos à foz quanto os compartimentos mais distantes apresentaram 100% das concentrações de cádmio classificadas na Categoria A no ano de 2019 (P5) e nos períodos anteriores (P2, P3 e P4), inclusive os dados da RRDM, conforme pode ser visualizado nos gráficos da Figura 12.

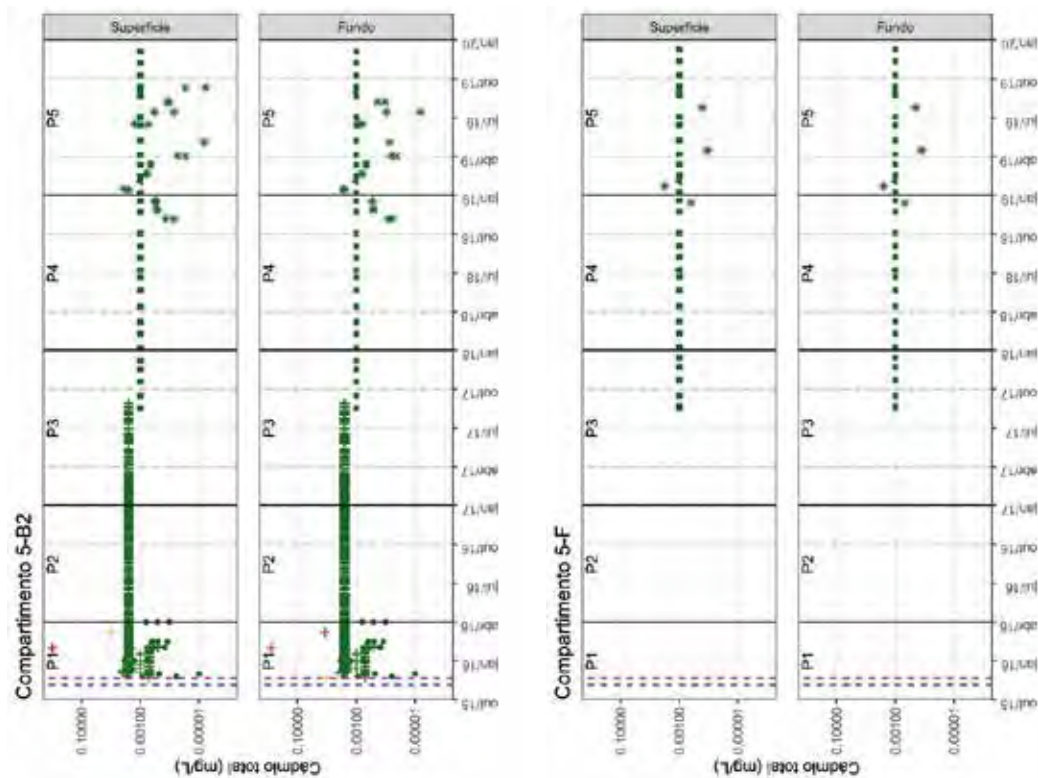
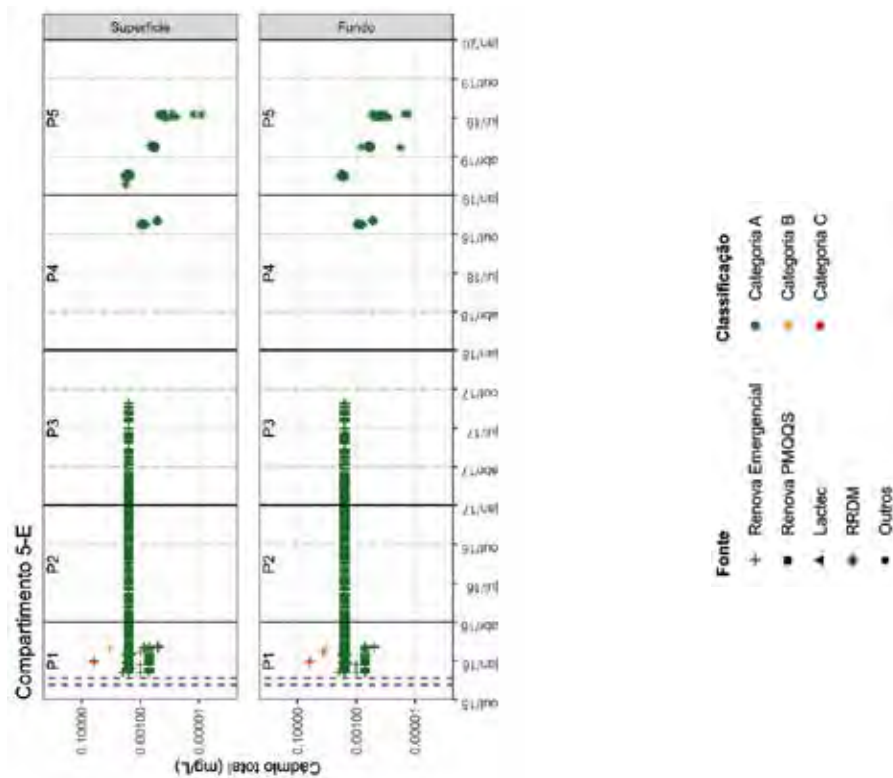
Os dados classificados na categoria A indicam que as concentrações de cádmio registradas estão abaixo da classe 1 da resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salinas (0,005 mg/L) e do valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce no período pré-desastre (0,011 mg/L). Os dados apresentados indicam que não estão sendo mais registradas alterações quanto ao indicador cádmio total no ambiente marinho em decorrência do desastre, conforme registrado no período P1 (Figura 12). Ressalta-se que, no período avaliado (novembro/2015 a dezembro/2019), não foram registradas cheias de grande magnitude no rio Doce, que podem vir a remobilizar o rejeito depositado no fundo do rio e nas margens, e potencialmente aumentar as concentrações deste EPT. Assim, por precaução, faz-se necessária a continuidade do acompanhamento das alterações das concentrações deste indicador.

Figura 11 – Tendência das alterações para o cádmio total no ambiente costeiro.



Figura 12 – Classificação dos dados de cádmio total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul) e da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





2.1.3.4 Chumbo total

Os dados de chumbo total foram classificados considerando o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (0,0170 mg/L) e de acordo com a classe 1 da resolução CONAMA Nº357/2005 para águas salinas (0,0100 mg/L).

Para a avaliação da tendência de evolução das concentrações deste indicador, realizou-se o cálculo das proporções entre as categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre, considerando apenas os dados da Fundação Renova e do Lactec, conforme descrito na metodologia. Na Figura 13, são apresentadas as proporções de dados de chumbo total classificados nas categorias A, B e C. No ano de 2019 (P5), foi possível não foi possível verificar um aumento do percentual de dados classificados nas categorias B e C, sendo que 100% das concentrações de chumbo total foram classificadas na Categoria A nos anos de 2018 (P4) e 2019 (P5).

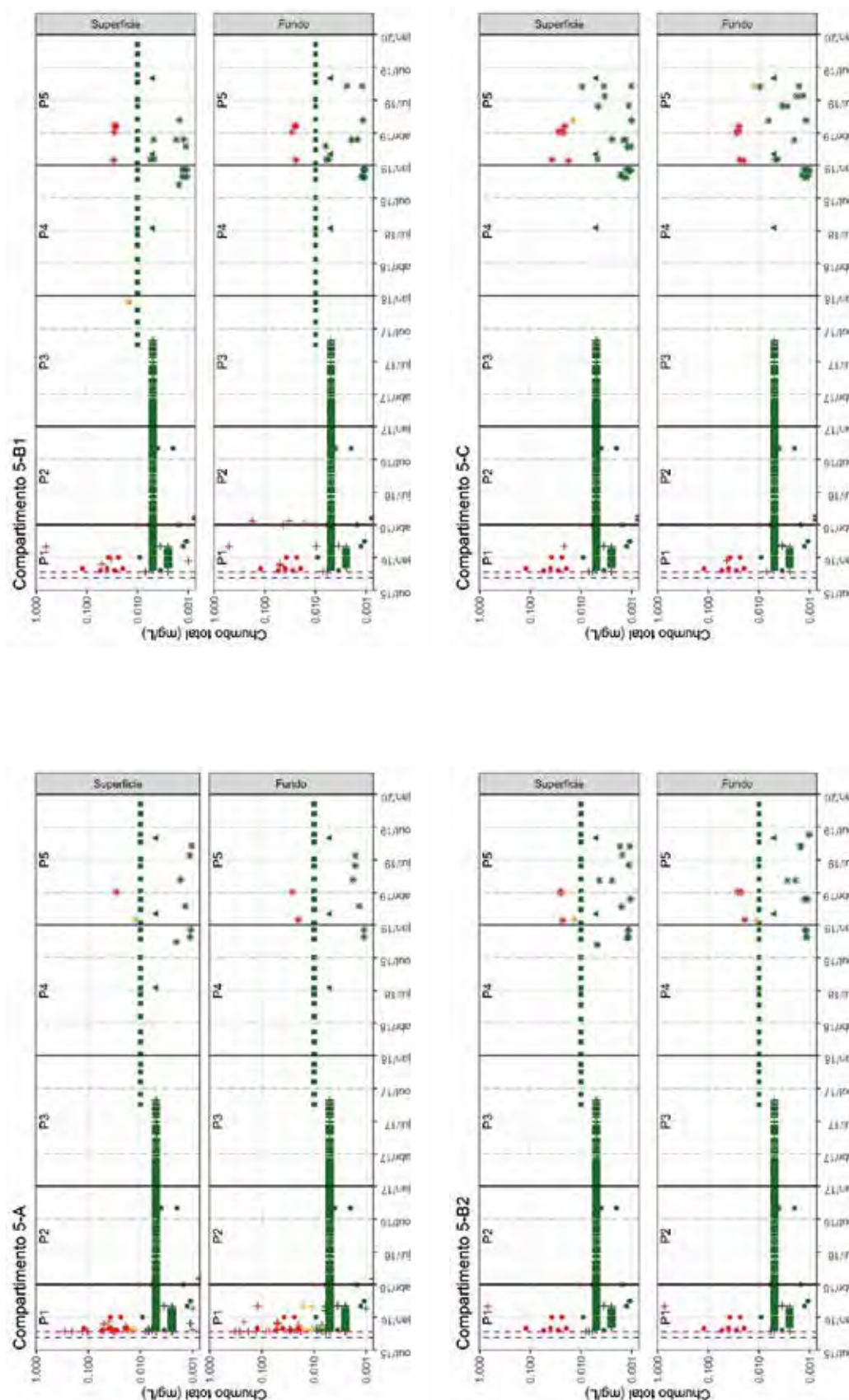
De modo complementar, foram avaliados os dados da RRDM em conjunto com os dados do Lactec e da Fundação Renova. Nos gráficos da Figura 14 é possível verificar que em 2019 (P5) foram registrados dados na categoria C apenas pela RRDM. A ocorrência de dados na categoria C indica o registro de valores superiores aos limites legislados e aos máximos históricos pré-rompimento da barragem de Fundão. Os compartimentos que apresentaram uma maior quantidade de dados em 2019 foram o compartimento 5-C (entre 4 e 22 quilômetros da foz do rio Doce e acima de 20 metros de profundidade) e 5-E (que representa a APA Costa das Algas em profundidades acima de 20 metros), conforme pode ser visualizado na Figura 14.

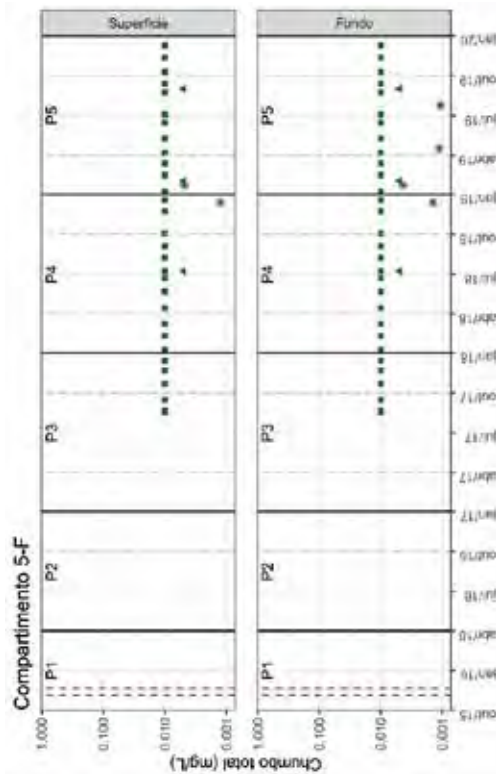
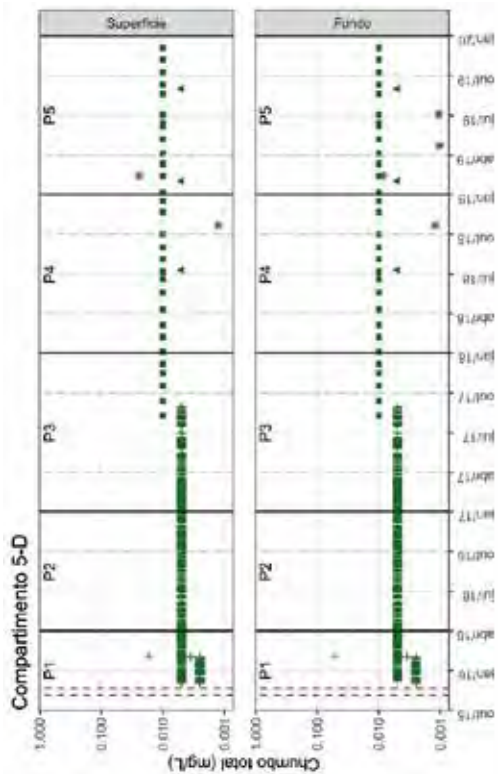
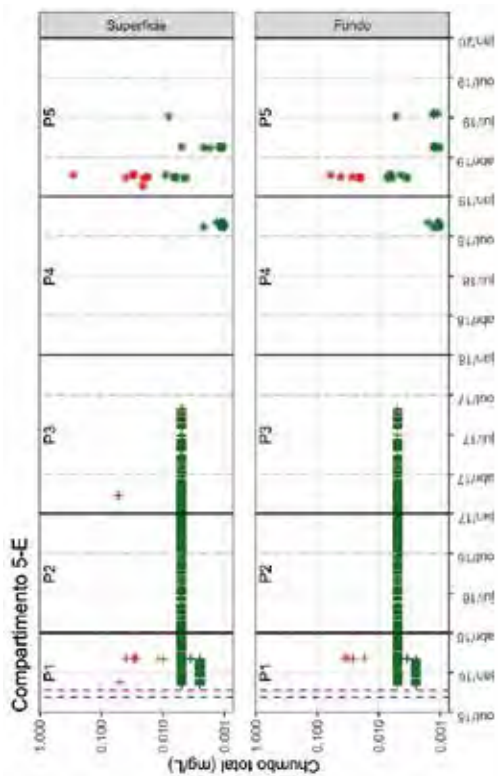
Embora tenham sido registrados diversos dados de chumbo total na categoria C em 2019 pela RRDM, as concentrações não atingiram os níveis máximos registrados logo após o desastre (0,74 mg/L) (período P1- novembro/2015 a março/2016), porém apresentaram concentrações elevadas, principalmente no compartimento 5-E, que apresentou concentrações de até 0,287 mg/L em uma amostra de superfície. As concentrações no compartimento 5-E foram superiores às concentrações registradas nos compartimentos mais próximos da foz do rio Doce (5-A, 5-B1 e 5-B2), onde a concentração máxima registrada foi de 0,0295 mg/L no compartimento 5-B1. Tal padrão não favorece a relação destas concentrações com resultados do desastre, visto que é esperado encontrar maiores concentrações de EPTs próximas a foz do rio Doce, devido ao aporte do rio Doce e a deposição de material oriundo do rio Doce que foi mais intensa nas proximidades da foz.

Figura 13 – Tendência das alterações para o chumbo total no ambiente costeiro.



Figura 14 – Classificação dos dados de chumbo total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul) e da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





2.1.3.5 Cromo total

De acordo com a Figura 15, no ano de 2019, houve uma manutenção da proporção de dados de cromo classificados na categoria A em todos os compartimentos do ambiente marinho, considerando os dados do Lactec e da Fundação Renova para o acompanhamento da evolução das concentrações deste indicador. Todos os compartimentos do ambiente marinho apresentaram 100% das concentrações de cromo classificadas na Categoria A no ano de 2019 (P5) e nos períodos anteriores (P2, P3 e P4). Os dados classificados na categoria A indicam que as concentrações de cromo registradas estão abaixo da classe 1 da resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salinas (0,05 mg/L) e do valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce no período pré-desastre (0,025 mg/L).'

Complementarmente, considerando também os dados da RRDM (Figura 16), foi possível verificar que os compartimentos do ambiente marinho apresentaram todos os dados na categoria A, com exceção de duas amostras de superfície nos compartimentos 5-E e 5-F e uma amostra de fundo no compartimento 5-D, que foram classificadas na categoria B. Os dados classificados na categoria B indicam que as concentrações de cromo total registradas estão abaixo da classe 1 da resolução CONAMA nº 357/2005 para águas salinas (0,05 mg/L), porém acima do valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce no período pré-desastre (0,025 mg/L).

Os dados apresentados indicam que não estão sendo mais registradas alterações significativas quanto ao indicador cromo total no ambiente marinho em decorrência do desastre. Ressalta-se que, no período avaliado, não foram registradas cheias de grande intensidade no rio Doce, que podem vir a remobilizar o rejeito depositado no fundo do rio e nas margens, e potencialmente aumentar as concentrações deste EPT. Nas amostras coletadas pelo Lactec no final da cheia de 2020 (BRASIL (MPF)/LACTEC (2020i)), não foram observadas concentrações de cromo total acima dos limiares supracitados,. Mesmo assim, por precaução, faz-se necessária a continuidade do acompanhamento das alterações das concentrações deste indicador.

Figura 15 – Tendência das alterações para o cromo total no ambiente costeiro.

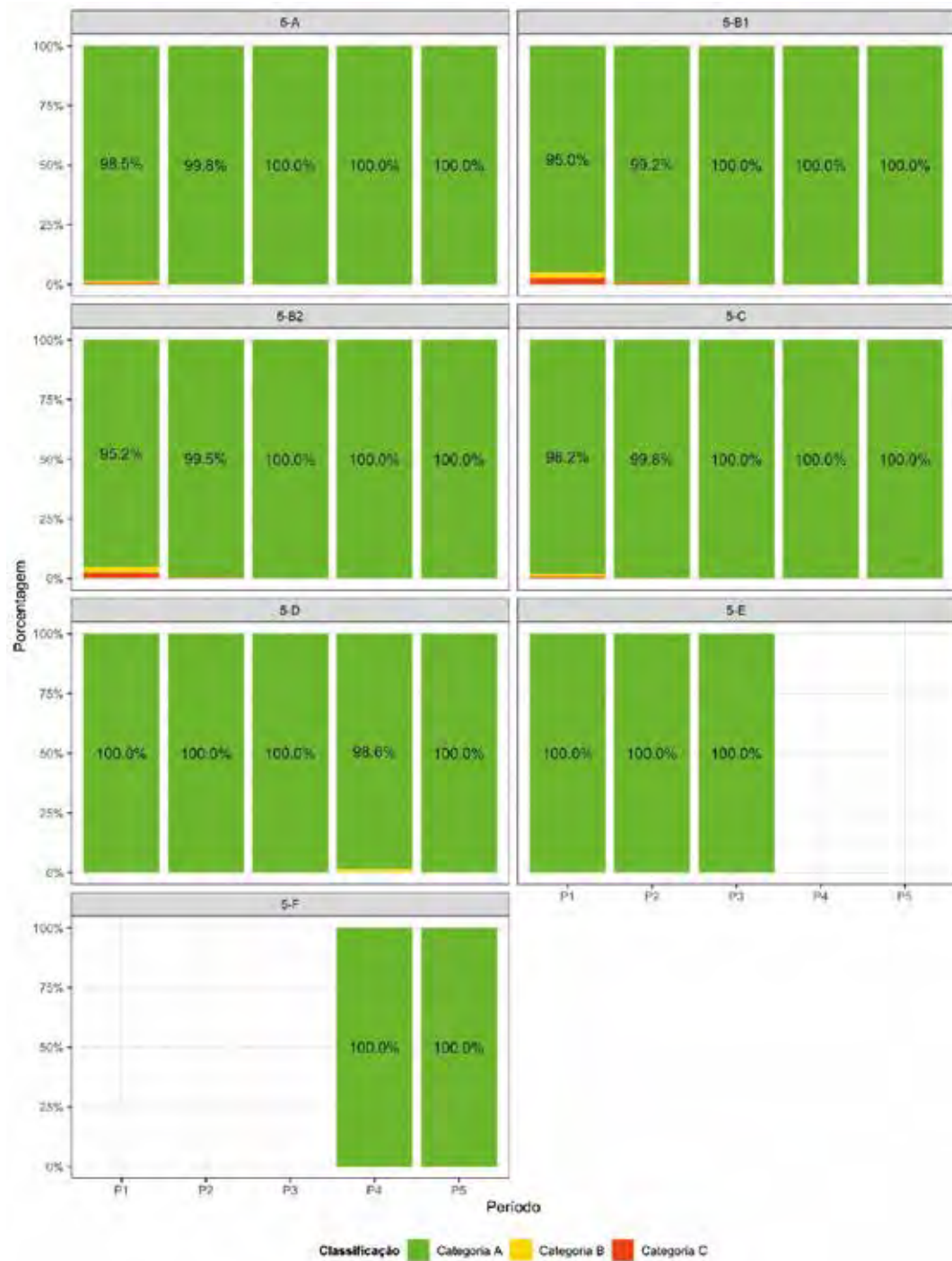
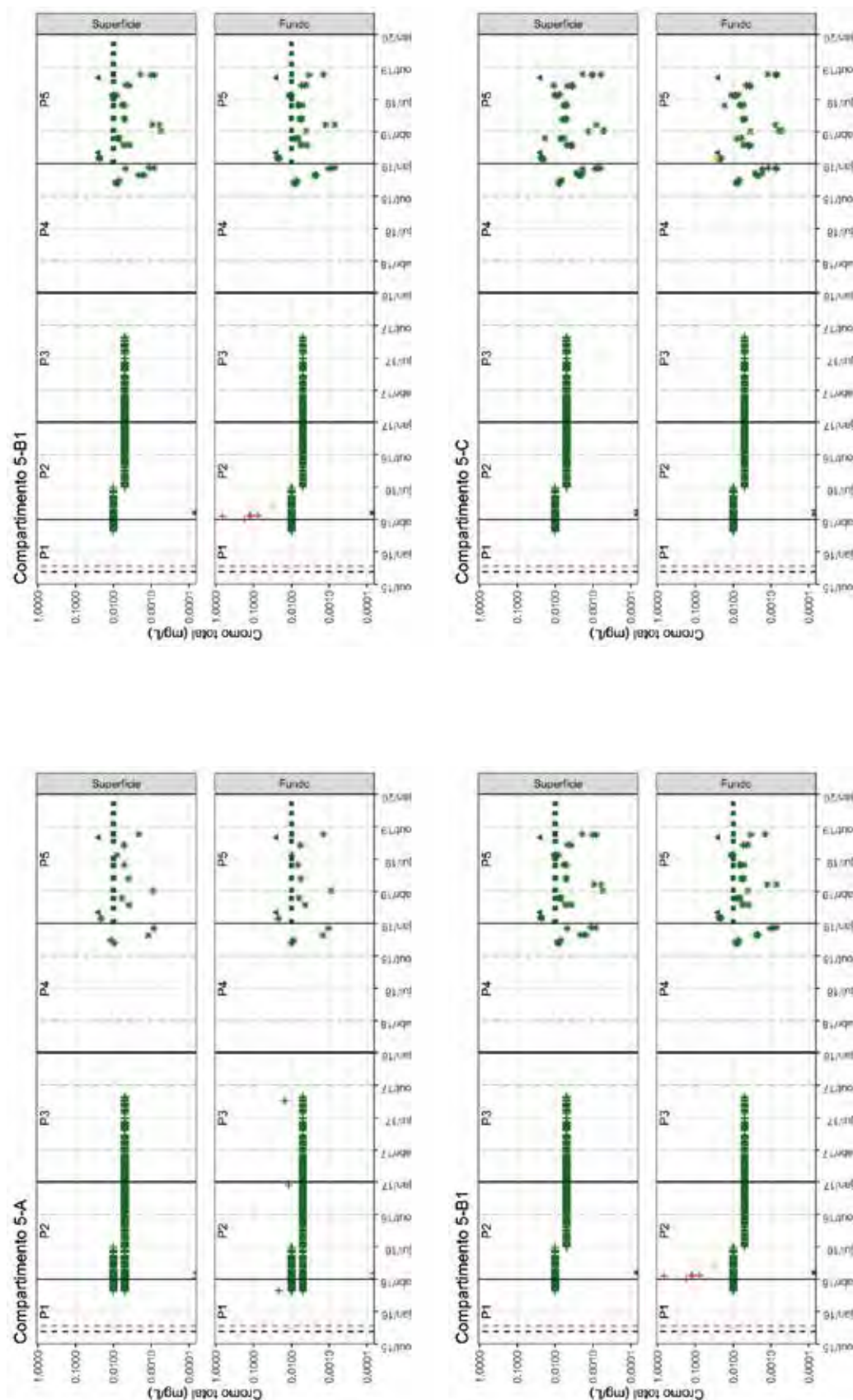
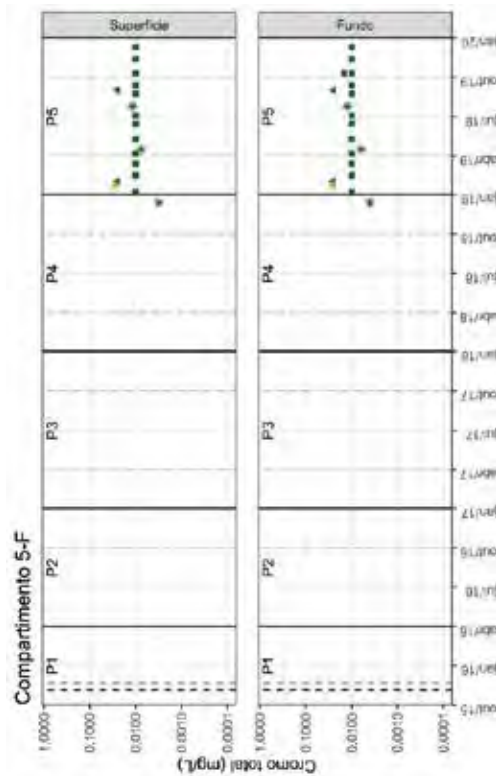
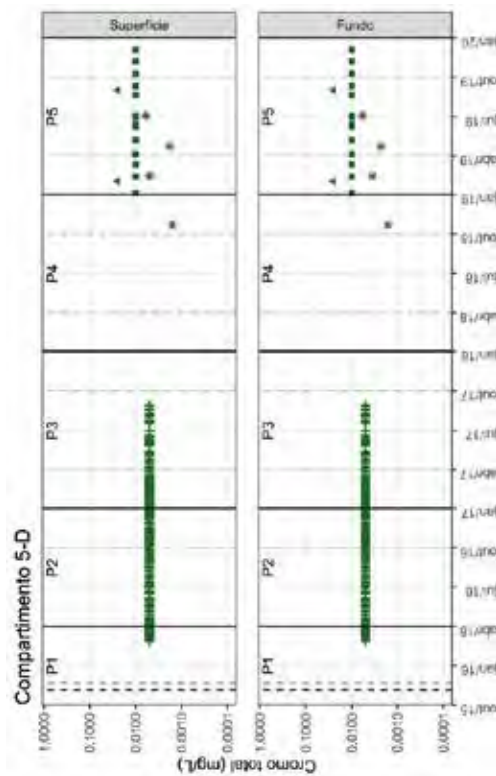
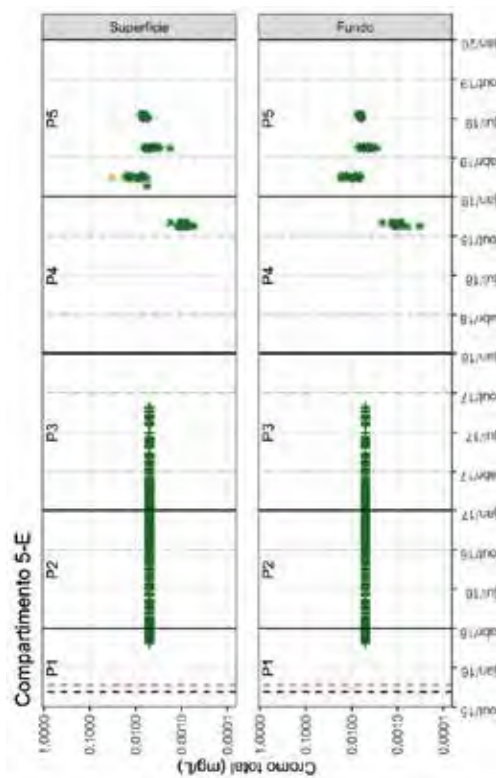


Figura 16 – Classificação dos dados de cromo total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





2.1.3.6 Ferro dissolvido

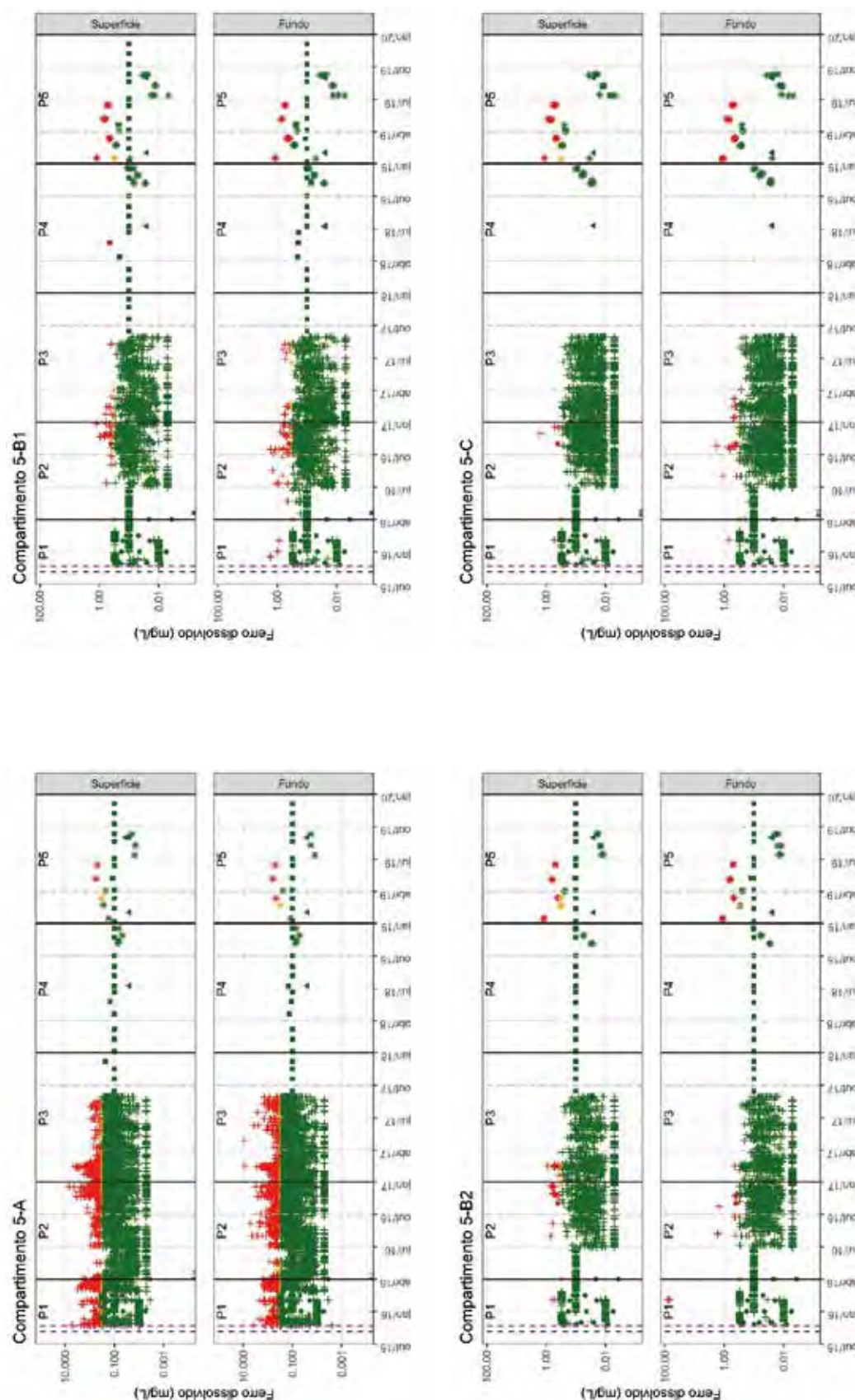
Para a avaliação da tendência de evolução das concentrações do indicador ferro dissolvido em, realizou-se o cálculo das proporções entre as categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre, considerando apenas os dados da Fundação Renova e do Lactec, conforme detalhado na metodologia. Na Figura 17, são apresentadas as proporções de dados de ferro dissolvido classificados em cada categoria para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre. No ano de 2019 (P5), foi possível verificar um aumento no percentual de dados na Categoria A em todos os compartimentos do ambiente marinho em relação ao ano de 2018. Neste último ano, 100% dos dados de ferro dissolvido obtidos pelo Lactec e pela Fundação Renova foram classificados na categoria A, ou seja, 100% dos dados estiveram de acordo com o limite legislado e abaixo das concentrações máximas pré-desastre.

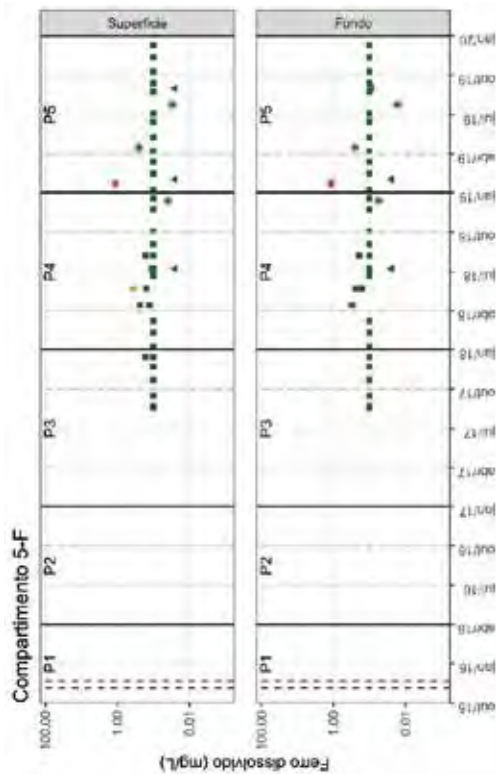
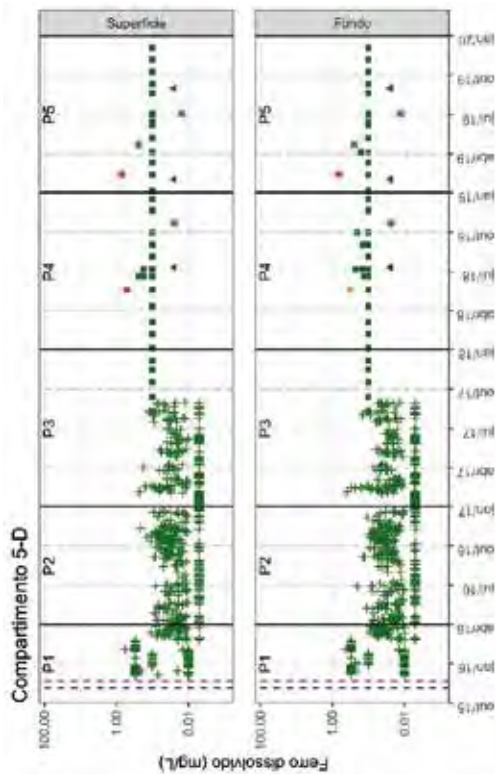
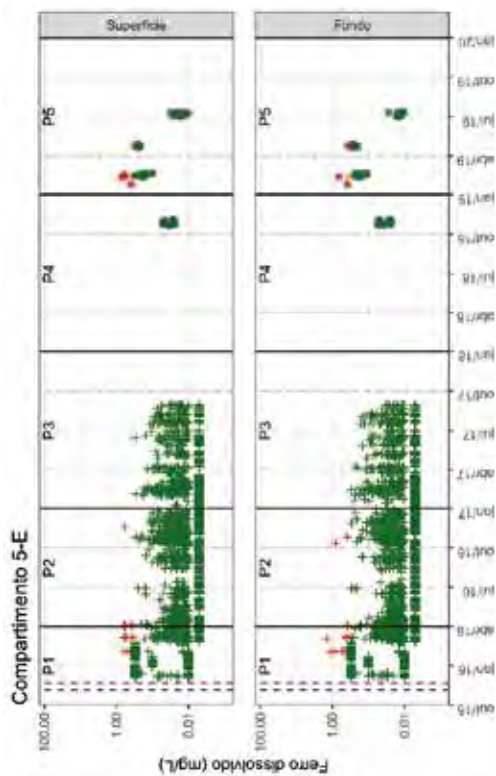
Complementarmente foram avaliados os dados obtidos pela Rede Rio Doce Mar – RRDM em conjunto com os dados do Lactec e da Fundação Renova. Nos gráficos da Figura 18 é possível verificar que no último ano (2019) foram observadas concentrações acima dos limiares citados apenas nos dados coletados pela RRDM. Foram registrados dados na categoria C pela RRDM em todos os compartimentos do ambiente marinho, principalmente nos compartimentos mais próximos da foz do rio Doce (5-A, 5B1, 5-B2 e 5-C). A observação de dados classificados na categoria C tinha sido registrado em poucas ocasiões nos anos anteriores (2018 e 2017) nos dados do Lactec e da Fundação Renova (PMQQS). Quanto as concentrações registradas em 2019 (P5) pela RRDM em relação ao período logo após o desastre (P1), foi possível verificar que, em 2019, a concentração máxima de ferro dissolvido foi de 1,209 mg/L no compartimento 5-C, enquanto, logo após o desastre, foram registradas concentrações mais elevadas, que atingiram até 79,1 mg/L no compartimento 5-B1.

Figura 17 – Tendência das alterações para o ferro dissolvido no ambiente costeiro.



Figura 18 – Classificação dos dados de ferro dissolvido nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul) e da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





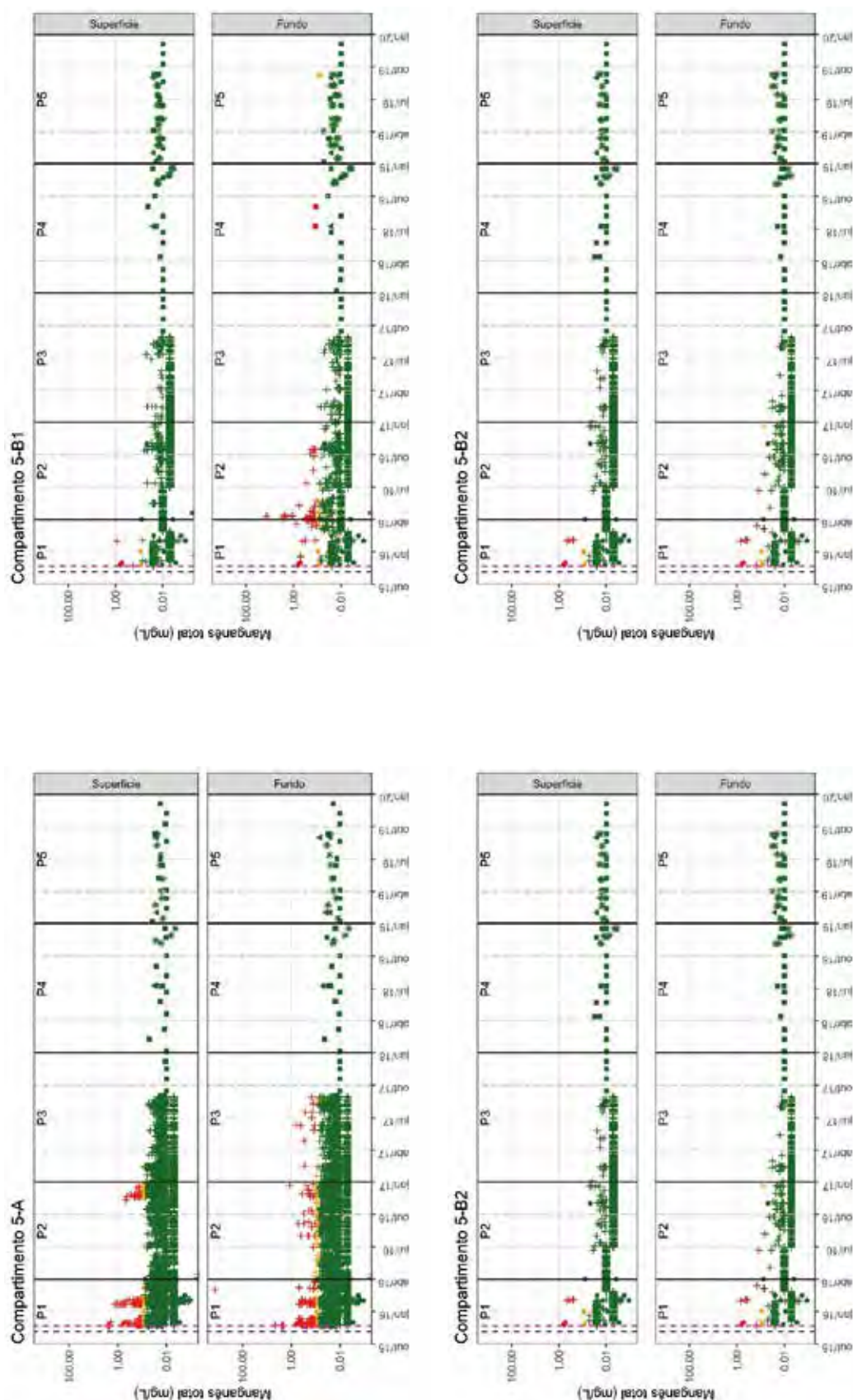
2.1.3.7 Manganês total

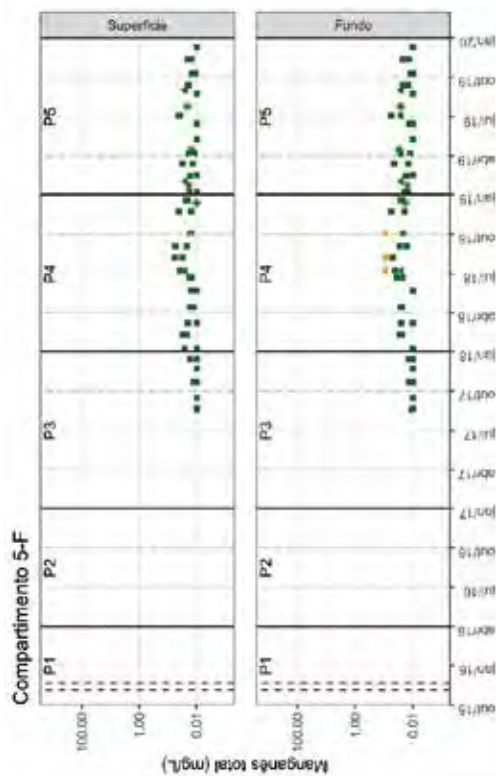
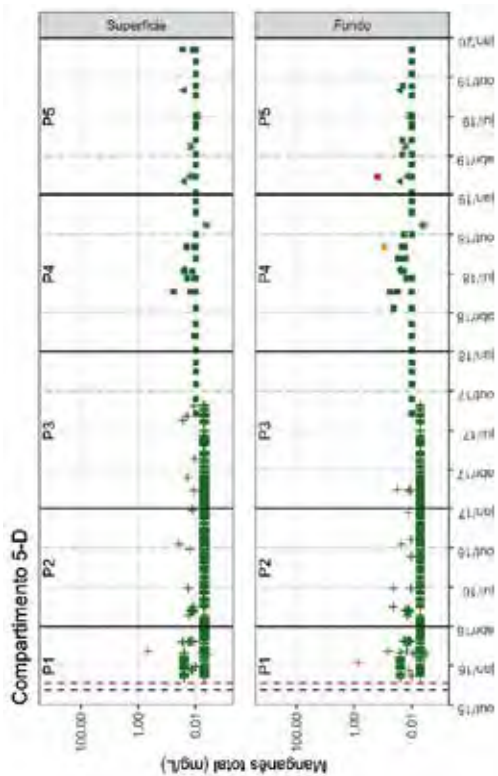
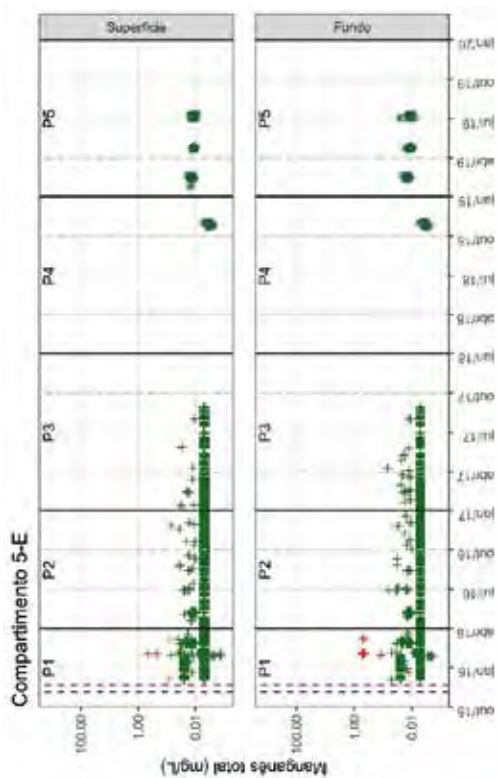
Quanto a tendência de evolução das concentrações do indicador manganês total, de acordo com a Figura 19, no ano de 2019, houve uma maior proporção de dados na Categoria A (concentrações de acordo com o máximo histórico pré-desastre (0,077 mg/L) e com a classe 1 da Resolução CONAMA nº 357/2005 (0,100 mg/L)) em relação aos anos anteriores. Apenas no Compartimento 5-D foi observada uma mudança de um percentual de dados classificados na categoria B para a categoria C entre 2018 e 2019. Em 2018 tinha sido registrado apenas 1 dado classificado na categoria B no compartimento 5-D, enquanto em 2019 foi registrado 1 dado na Categoria C neste compartimento, conforme pode ser visualizado na Figura 20. Estes dois registros foram provenientes de amostras de água próximas ao fundo, indicando que as concentrações elevadas de manganês registradas no sedimento (ver item 2.4.3), influenciam as concentrações de manganês na água a ponto de superar o limite legislado e/ou o máximo histórico.

Figura 19 – Tendência das alterações para o manganês total no ambiente costeiro.



Figura 20 – Classificação dos dados de manganês total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul) e da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





2.1.3.8 Mercúrio total

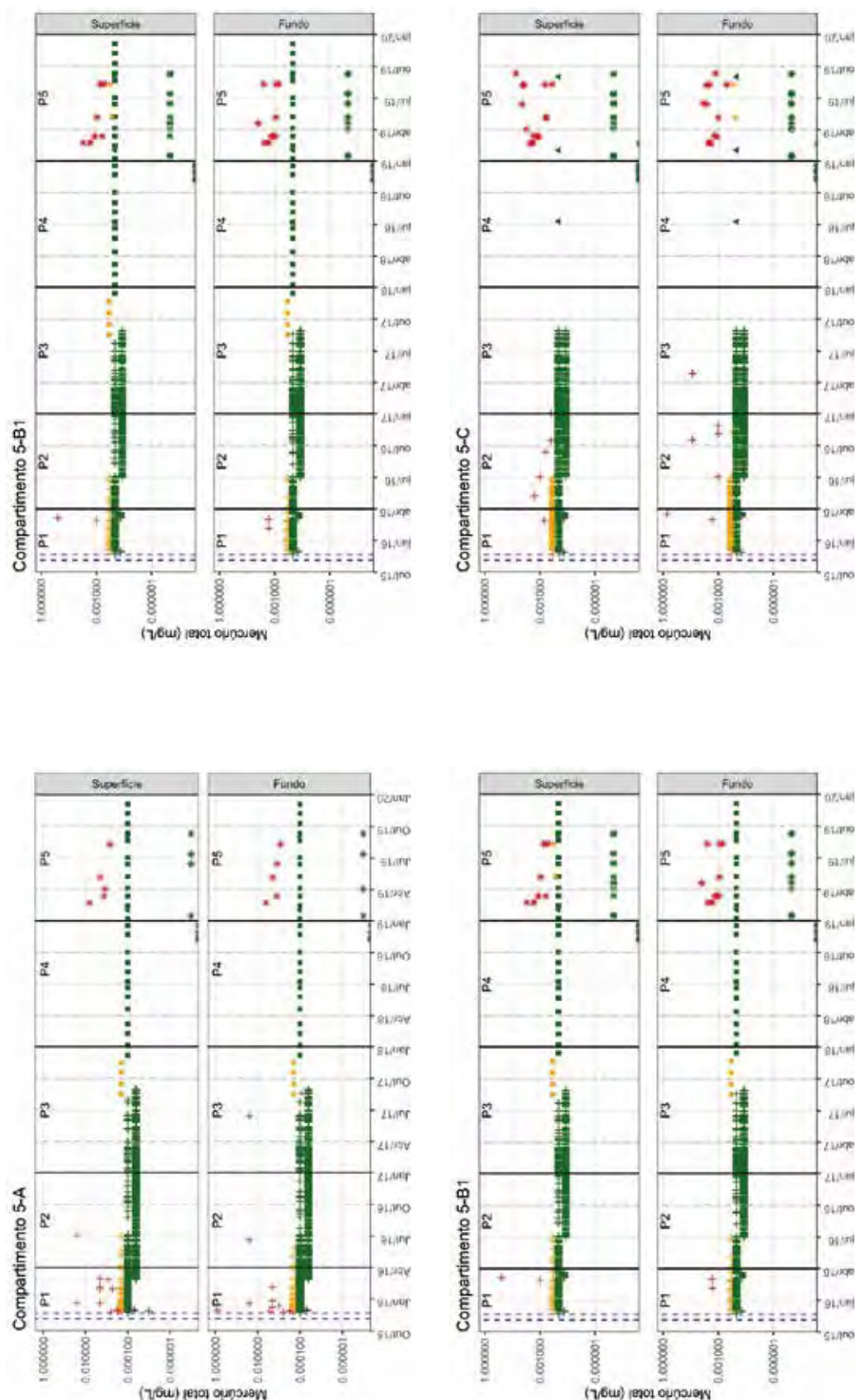
Os dados de mercúrio total foram classificados considerando o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (0,0002 mg/L) e de acordo com a classe 1 da resolução CONAMA Nº357/2005 para águas salinas (0,0001 mg/L). Para a avaliação da tendência de evolução das concentrações deste indicador, realizou-se o cálculo das proporções entre as categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre, considerando apenas os dados da Fundação Renova e do Lactec, conforme descrito na metodologia. Na Figura 21, são apresentadas as proporções de dados de mercúrio total classificados nas categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre. No ano de 2019 (P5), foi possível verificar uma manutenção da predominância de dados na Categoria A em todos os compartimentos do ambiente marinho em relação ao ano de 2018, em ambos os anos 100% dos dados do Lactec e da Fundação Renova apresentaram concentrações de acordo com o limite legislado e abaixo do máximo histórico pré-desastre.

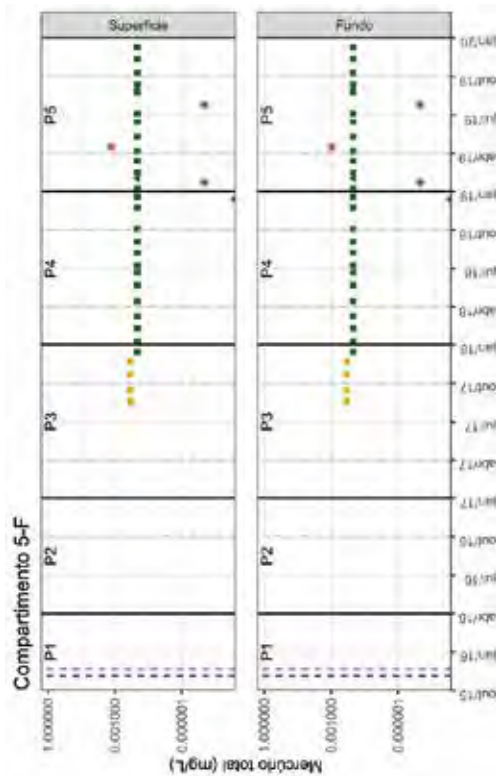
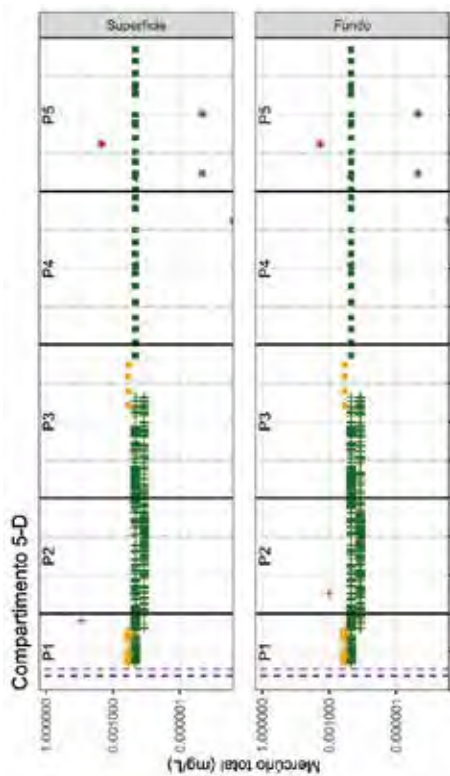
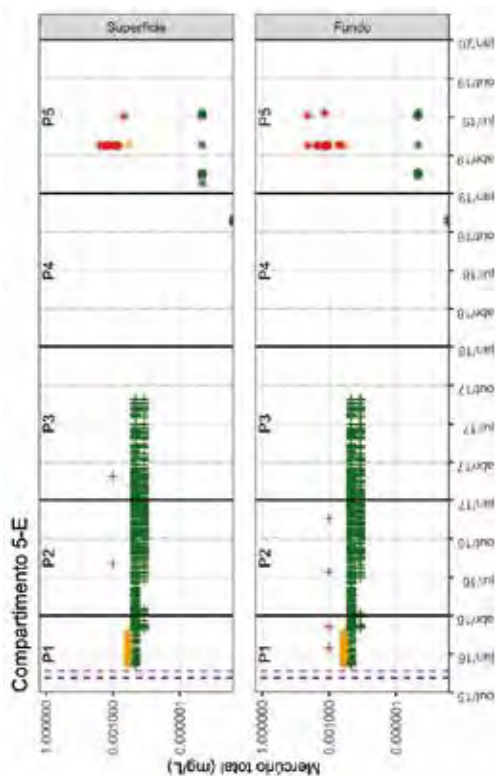
Complementarmente, foram avaliados os dados obtidos pela Rede Rio Doce Mar – RRDM em conjunto com os dados do Lactec e da Fundação Renova. Nos gráficos da Figura 22 é possível verificar que no último ano (2019) foram registrados dados na Categoria C pela RRDM em todos os compartimentos do ambiente marinho, enquanto os dados da Fundação Renova e do Lactec estiveram sempre classificados na categoria A neste ano. A ocorrência de dados na categoria C indica o registro de valores superiores aos limites legislados e aos máximos históricos pré-rompimento da barragem de Fundão (Figura 22). As concentrações de mercúrio total em 2019 registradas pela RRDM não atingiram os níveis máximos registrados logo após o desastre (0,822 mg/L), porém apresentaram concentrações bastante elevadas, atingindo um máximo de 0,208 mg/L no compartimento 5-C.

Figura 21 – Tendência das alterações para o mercúrio total no ambiente costeiro.



Figura 22 – Classificação dos dados de mercúrio total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul) e da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





2.1.3.9 Zinco total

Os dados de zinco total foram classificados considerando o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (0,082mg/L) e de acordo com a classe 1 da resolução CONAMA Nº357/2005 para águas salinas (0,090 mg/L). Na Figura 23, são apresentadas as proporções de dados de zinco total classificados nas categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre, agrupando-se os dados categorizados das estações de cada compartimento. No ano de 2019 (P5), foi possível verificar uma diminuição do percentual de dados na Categoria A e um aumento do percentual de dados classificados na categoria C nos compartimentos 5-A, 5-B1 5-B2 e 5-D em relação ao ano de 2018 (P4). Nos outros compartimentos observou-se uma manutenção dos dados na categoria A, visto que em ambos os anos 100% dos dados foram classificados nesta categoria.

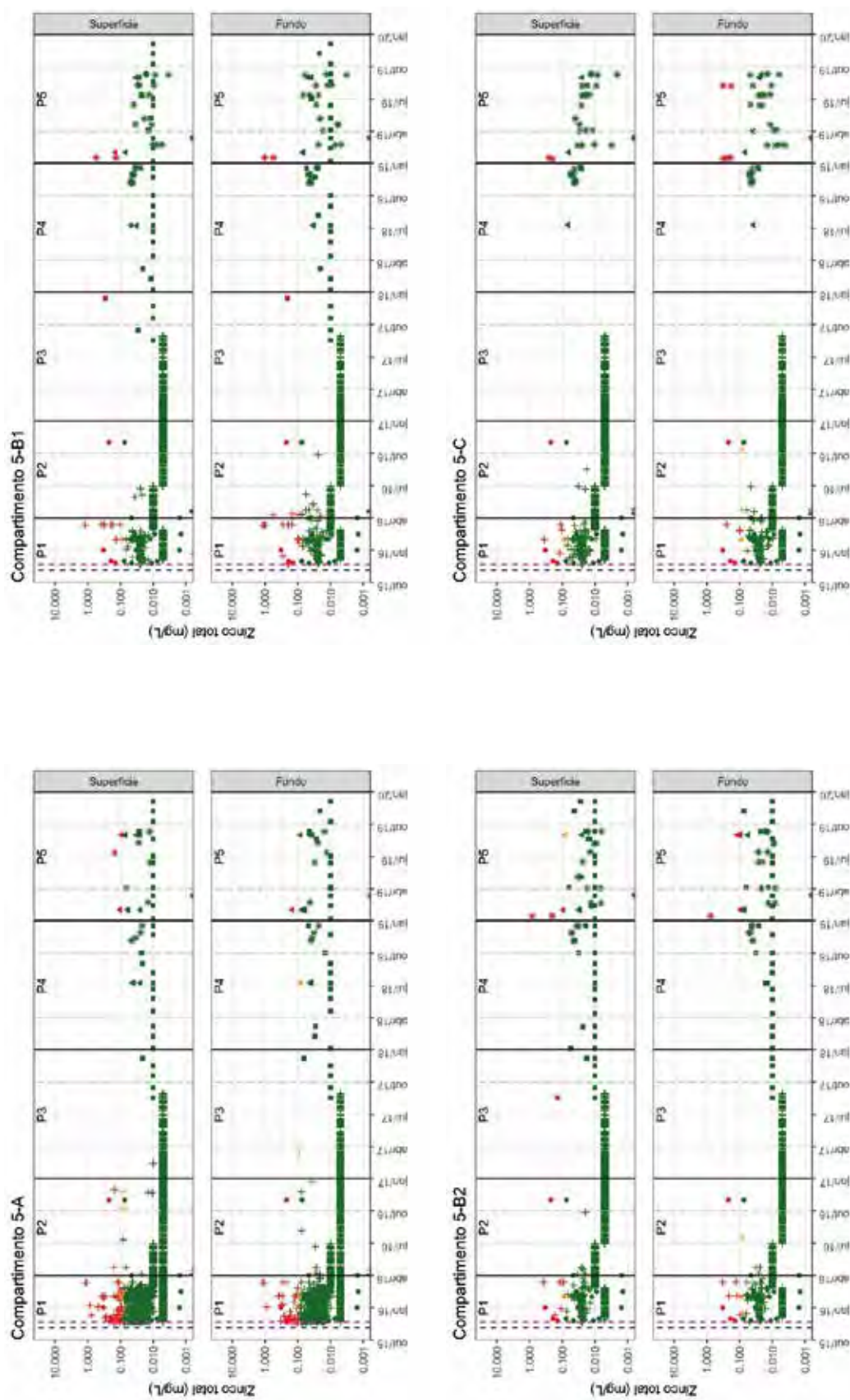
As concentrações de zinco total registradas pelo Lactec e pela Fundação Renova em 2019 não atingiram os níveis máximos registrados logo após o desastre durante P1 (26,6 mg/L), sendo que foram registradas concentrações de até 0,216 mg/L. Ainda, ressalta-se que não foram observadas diferenças significativas entre os dados de superfície e de fundo, ou seja, as concentrações de zinco mais elevadas ocorrem em toda a coluna d'água da região avaliada.

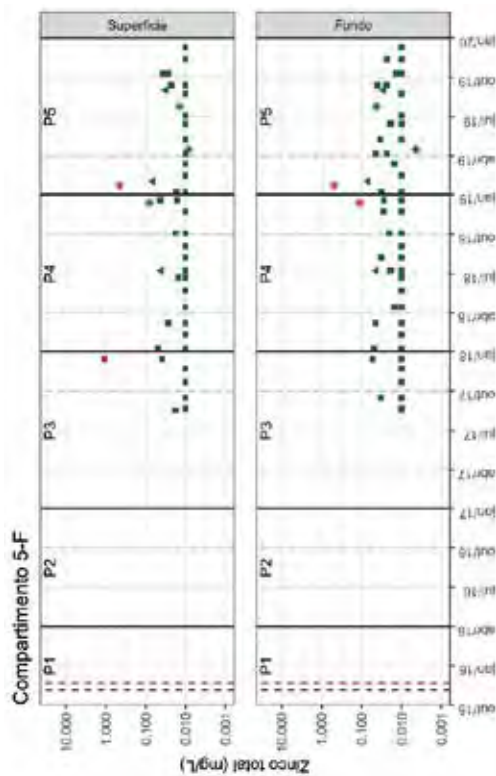
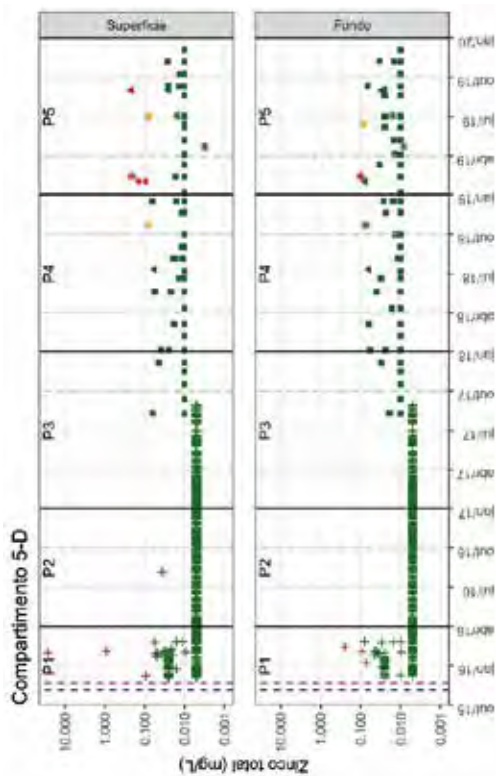
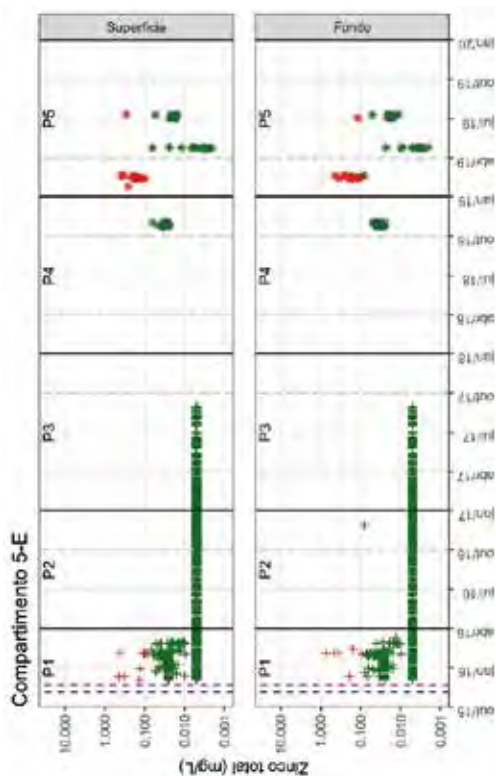
Avaliando também os dados da Rede Rio Doce Mar – RRDM, complementarmente, é possível verificar que em 2019 foram registrados dados na categoria C com mais frequência e em concentrações mais elevadas por esta fonte do que os dados gerados pelo Lactec e pela Fundação Renova (Figura 24). A ocorrência de dados na categoria C indica o registro de valores superiores aos limites legislados e aos máximos históricos pré-rompimento da barragem de Fundão. Dados nesta categoria foram registrados em todos os compartimentos do ambiente marinho com concentrações similares, não sendo possível verificar uma maior distribuição de dados nesta categoria nos compartimentos mais próximos da foz do rio Doce, ou seja, as concentrações não têm relação direta com a proximidade da foz do rio Doce

Figura 23 – Tendência das alterações para o zinco total no ambiente costeiro.



Figura 24 – Classificação dos dados de zinco total nos sete compartimentos da área marinha adjacente à foz do rio Doce. Linhas verticais tracejadas indicam as datas do desastre (azul), da chegada dos rejeitos no oceano (rosa) e da transição entre períodos secos e chuvosos (cinza).





2.1.3.10 Síntese do dano “aumento da concentração de EPTs na água”

Cada um dos dados pós-desastre utilizados foi classificado de acordo com as categorias A, B e C, considerando o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce e de acordo com a classe 1 da resolução CONAMA Nº357/2005 para águas salinas. Em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e) foi identificado que a maior parte dos indicadores apresentaram concentrações classificadas na categoria C, principalmente nos compartimentos mais próximos da foz do rio Doce (5-A, 5-B1, 5-B2 e 5-C) durante o período logo após o desastre (P1 – novembro/2015 a março/2016) e o período posterior (P2 – abril/2016 a dezembro/2016).

Para a avaliação da tendência de evolução do dano em relação ao aumento das concentrações de EPTs foram considerados apenas os dados da Fundação Renova e do Lactec, em virtude de minimizar possíveis diferenças relacionadas a metodologia de coleta e análise das amostras e a variação do número de estações de monitoramento em cada compartimento ao longo dos anos. Conforme explicado na metodologia, possíveis diferenças metodológicas utilizadas para a determinação de EPTs na água podem gerar componentes de incerteza atrelados a diferentes fatores, tais como: condições ambientais; operador; equipamentos; padrões utilizados; método de medição; amostragem e outros.

Para a avaliação desta tendência realizou-se o cálculo das proporções entre as categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre. No ano de 2019, a categoria A mostrou-se predominante entre as demais ao longo de todos os compartimentos do ambiente marinho e para todos os indicadores utilizados. Em 2019 (P5), apenas o indicador zinco total apresentou uma diminuição das proporções de dados na categoria A em relação ao período anterior (2018 – P4) e um aumento nas proporções de dados na categoria C. Ao comparar os dados de zinco registrados em 2019 com os dados registrados no período logo após o desastre (P1), é possível verificar que, em P1, foram registrados dados na categoria C com maior frequência e também que as concentrações foram mais elevadas, de modo que percentuais mais elevados na categoria C de zinco em 2019 podem estar relacionados a diferenças associadas a quantidade de amostras em cada período, não sendo possível afirmar claramente que as concentrações de zinco estão aumentando no ambiente marinho.

O restante dos indicadores apresentou um aumento ou manutenção (quando 100% dos dados foram classificados na categoria A em ambos os anos) nas proporções de dados na categoria A no ano de 2019 (P5) em relação a 2018 (P4). Estes indicadores também apresentaram um aumento dos percentuais na categoria A e redução dos percentuais na categoria B e C em relação ao período P1 (novembro/2015 a março/2016), indicando que as concentrações superiores aos limiares utilizados são observadas com menor frequência com o passar dos anos. Desse modo, entende-se que o dano relativo ao aumento das concentrações de EPTs na água tende a reduzir.

Complementarmente, foram avaliados os dados da RRDM em 2019 (P5), que registrou dados na Categoria C, que representam concentrações acima de ambos os limiares citados, para os indicadores arsênio total, chumbo total, cobre dissolvido, ferro dissolvido, mercúrio total, níquel total e zinco total. Todos esses indicadores apresentaram dados nesta categoria em praticamente todos os compartimentos do ambiente marinho, ou seja, apresentaram concentrações elevadas ao longo de toda a área de estudo, com exceção do indicador arsênio total, que apresentou dados na categoria C apenas nos compartimentos 5-C e 5-E. Dentre esses indicadores, apenas o ferro dissolvido apresentou uma maior

concentração de dados na categoria C nos compartimentos mais próximos a foz do rio Doce, indicando que o aporte do rio Doce e/ou a ressuspensão do material depositado nas proximidades da foz podem estar influenciando nas concentrações de ferro dissolvido na água. Tal padrão também foi verificado para o indicador alumínio dissolvido. Entretanto, as concentrações de alumínio mais elevadas foram classificadas na categoria B, visto que superaram os máximos históricos pré-desastre, mas estiveram de acordo com o limite legislado. O ferro e o alumínio foram identificados como dentre os EPTs mais abundantes no rejeito, deste modo concentrações mais elevadas deste EPTs nas proximidades da foz do rio Doce podem indicar dano em relação ao aumento da concentração de EPTs na água.

As concentrações máximas registradas para os indicadores em 2019 (P5) foram sempre inferiores as concentrações máximas registradas logo após o desastre (P1), evidenciando que, embora ainda sejam verificados dados acima dos limites legislados e dos máximos históricos, a intensidade das concentrações está diminuindo com o passar dos anos.

Ressalta-se que todos os dados classificados nas categorias B e C para os indicadores utilizados foram registrados apenas pela RRDM, com exceção do zinco total, para o qual foram registrados dados na categoria C pelo Lactec. Enquanto os dados do Lactec e da Fundação Renova, para os indicadores do dano em relação ao aumento da concentração de EPTs, estiveram em sua maioria abaixo do limite de quantificação do método utilizado, os dados da RRDM apontaram para concentrações superiores, com diversos dados nas categorias B e C. Tais alterações, também, foram registradas em poucas ocasiões nos anos anteriores (2017 e 2018) pelos monitoramentos do Lactec e da Fundação Renova (PMQQS).

Quando realizadas as avaliações dos resultados obtidos no ano de 2020 será possível realizar uma comparação mais direta com os dados da RRDM, visto que em 2019 e 2020 as malhas amostrais e as frequências das campanhas das três fontes de dados avaliadas serão similares, minimizando as possíveis diferenças estatísticas e metodológicas, podendo demonstrar de forma mais clara as alterações em relação as concentrações de EPTs entre os últimos dois anos no ambiente marinho considerando todas as fontes de dados.

2.1.4 CENÁRIO DE DANOS

Conforme exposto neste relatório, em relação à qualidade das águas estuarinas e marinhas, foram identificados três danos: aumento das concentrações de sólidos na água, redução das concentrações de oxigênio dissolvido na água e aumento das concentrações de elementos potencialmente tóxicos na água. O dano relacionado à redução das concentrações de oxigênio dissolvido na água ocorreu em um intervalo de tempo mais curto, sendo que o mesmo já foi cessado. Os demais danos ainda não cessaram, sendo que a tendência é que estes reduzam ao longo do tempo.

Os danos concernentes ao aumento das concentrações de sólidos e EPTs na água estão intimamente relacionados à presença de rejeitos nas margens, no leito dos rios e nos barramentos, uma vez que a ocorrência de chuvas favorece o aporte dos rejeitos presentes nas margens para o leito do rio, bem como demais perturbações facilitam a ressuspensão do material sedimentado para a coluna d'água. Esse material pode vir a ser transportado até o estuário do rio Doce e a região marinha alterando a qualidade das águas nestes ambientes.

Nesse contexto, de acordo com o item 2.3, considerando o volume de rejeitos que transpôs a barragem da UHE Candonga, o tempo esperado de carreamento da maioria dos rejeitos, ocorrerá em até 65 anos após o desastre entre a UHE Candonga e Colatina/ES, respeitadas as incertezas embutidas nos dados. Caso essa estimativa seja feita para todo o volume de rejeitos de Fundão, a previsão seria entre 113 e 163 anos, se eles estivessem disponíveis para serem removidos naturalmente pela erosão fluvial ao longo do tempo. Tais previsões estão relacionadas ao tempo para os rejeitos saírem da bacia hidrográfica do rio Doce, considerando como o exutório a própria foz do rio no encontro com o mar. Ao atingir a região marinha, os processos meteocenográficos passam a ser predominantes e influenciam o destino dos rejeitos na região, que tende a se dispersar na coluna d'água e se sedimentar, para posteriormente ser remobilizado e novamente ficar disponível na coluna d'água, e assim sucessivamente, podendo este ambiente ser considerado como o destino final dos rejeitos, desconsiderando os processos de bioacumulação e biomagnificação na cadeia trófica.

Assim, enquanto o rejeito permanecer no leito dos cursos d'água e nas margens dos rios, em qualquer momento podem ocorrer alterações físico-químicas que promovam a mobilização dos EPTs para a coluna da água (como por exemplo a ocorrência de chuvas ou pH mais ácidos). Contudo, essas alterações na qualidade da água não irão se apresentar na mesma grandeza e frequência observada logo após a chegada da pluma de sedimentos a zona costeira. Há de se considerar, todavia, que uma cheia significativa, como a ocorrida em 2020 e relatada em Brasil (MPF)/Lactec (2020), em toda a bacia do rio Doce poderia promover alterações mais expressivas também no estuário e no ambiente marinho.

Além disso, a turbidez e a concentração de EPTs na água são afetadas pela ressuspensão do material oriundo do desastre depositado na foz, principalmente durante eventos meteocenográficos significativos, como por exemplo a entrada de uma frente fria com ondas de alta energia. De acordo com a modelagem apresentada no item 2.3, este material depositou-se ao longo de toda a área adjacente a foz do rio Doce. Os resultados de turbidez e concentração de EPTs apontam para níveis e concentrações mais elevadas nas águas de fundo que estão mais sujeitas as alterações durante estes fenômenos, evidenciando que a qualidade da água ainda é afetada pela remobilização de um material que ainda persiste nestes locais.

2.1.5 CONCLUSÕES

No presente item, foi avaliada a evolução dos danos à qualidade das águas no ambiente marinho decorrentes da chegada da lama de rejeitos identificados em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e). Essa avaliação foi realizada através da incorporação à análise anterior do conjunto de dados referente ao ano de 2019 (janeiro a dezembro). Foram avaliados os danos de aumento de concentração de sólidos e de EPTs na água que, até 2018, ainda estavam ocorrendo, porém de forma mais reduzida em comparação ao período logo após o rompimento da barragem de Fundão (período P1). Conforme demonstrado no relatório citado, o ambiente marinho se recuperou do dano relacionado à redução das concentrações de oxigênio dissolvido, de modo que este não foi abordado no presente relatório.

Ao longo de 2019, observou-se a tendência de evolução dos danos de aumento de concentração de sólidos e de EPTs na água em relação à situação observada em P1 - novembro/2015 a março/2016 e

nos períodos posteriores (2016, 2017 e 2018). Para isso, os dados obtidos pelo Lactec e Fundação Renova durante esse ano foram comparados aos máximos históricos pré-desastre e à classe 1 da Resolução CONAMA Nº 357/2005, e classificados de acordo com o nível de alteração definido na metodologia.

Quanto ao aumento das concentrações de sólidos, em 2019, registrou-se, para o indicador turbidez, um aumento da proporção da categoria A nos dados de superfície e fundo em praticamente todos os compartimentos do ambiente marinho. Porém, ainda se observaram, em 2019, valores de turbidez que ultrapassam o máximo histórico pré-desastre; assim, entende-se que o dano relativo ao aumento da concentração de sólidos na água não está cessado, mas tende a reduzir. Importante ressaltar que nos períodos avaliados não foram registradas cheias de grande magnitude com potencial de maior alteração da concentração de sólidos na água e dos níveis de turbidez. No final de janeiro/2020 ocorreu uma cheia de grande magnitude e os resultados das coletas do Lactec após o evento foram analisados em relatório específico (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020i). Os resultados apontaram que os níveis de turbidez na região marinha ultrapassaram os máximos históricos da linha base, porém não com a mesma magnitude que nos ambientes a montante (rio Doce e seu estuário).

Com relação ao dano relacionado ao aumento da concentração de EPTs na água, foram avaliados os seguintes indicadores: alumínio dissolvido, arsênio total, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido, cromo total, ferro dissolvido, manganês total, mercúrio total, níquel total e zinco total. No ano de 2019, a categoria A (concentrações de acordo com o limite legislado e abaixo do máximo histórico pré-desastre) mostrou-se predominante entre as demais ao longo de todos os compartimentos do ambiente marinho e para todos os indicadores utilizados. Em 2019 (P5), apenas o indicador zinco total apresentou uma diminuição das proporções de dados na categoria A em relação ao período anterior (2018 – P4) e um aumento nas proporções de dados na categoria C (concentrações acima do limite legislado e do máximo histórico pré-desastre). Ao comparar os dados de zinco registrados em 2019 (P5) com os dados registrados no período logo após o desastre (P1), não é possível afirmar claramente que as concentrações de zinco estão aumentando no ambiente marinho, sendo necessária a continuidade do monitoramento. Já o restante dos indicadores apresentou uma diminuição das proporções de dados nas categorias B no ano de 2019 (P5) em relação a 2018 (P4). Estes indicadores também apresentaram um aumento dos percentuais na categoria A e redução dos percentuais na categoria B e C em relação ao período P1 (novembro/2015 a março/2016), indicando que as concentrações superiores aos limites utilizados são observadas com menor frequência com o passar dos anos. Desse modo, entende-se que o dano relativo ao aumento das concentrações de EPTs na água tende a reduzir.

Avaliando os dados da RRDM, complementarmente, é possível verificar que, em 2019 (P5), foram registrados dados na categoria B e C para todos os indicadores utilizados apenas por esta fonte de dados, com exceção do indicador zinco total, para o qual o Lactec registrou dados classificados na categoria C também. Foi possível verificar que, as concentrações máximas registradas para esses indicadores em 2019 (P5) foi sempre inferior as concentrações máximas registradas logo após o desastre (P1), evidenciando que, embora ainda sejam verificados dados acima dos limites legislados e dos máximos históricos, as concentrações estão diminuindo com o passar dos anos.

A maior parte destes indicadores que apresentaram alterações momentâneas está dentre os EPTs associados ao rejeito com maior potencial de efeito negativo a biota aquática, bem como

apresenta a possibilidade de acumulação nos organismos e magnificação ao longo da cadeia trófica. Desta forma, mesmo que as alterações na qualidade da água ocorram em poucas ocasiões, os possíveis danos a biota aquática em relação a estes parâmetros podem ser significativos, contribuindo para um aumento da concentração de EPTs na biota marinha, conforme identificado ao longo do presente relatório.

Essas alterações classificadas nas categorias B e C podem estar relacionadas ao desastre devido à possibilidade de ressuspensão do rejeito depositado no leito marinho ou do rejeito depositado nos barramentos e no leito do rio Doce, disponibilizando, assim, contaminantes para a coluna d'água. Neste sentido, se considera que esse dano é parcialmente reversível no ambiente marinho e que o ambiente ainda não está recuperado.

Conforme destacado anteriormente, nos períodos avaliados não foram registradas cheias de grande magnitude com maior potencial de remobilização dos rejeitos depositados no rio Doce, e consequente disponibilização de EPTs na água e transporte até a região marinha. A ocorrência das alterações verificadas ao longo dos períodos avaliados evidencia que a qualidade das águas quanto a concentração de EPTs do ambiente marinho é diretamente afetada, não somente pela introdução de EPTs pelo rio Doce, mas também pela remobilização dos EPTs depositados no sedimento (ver item 2.4.3 com o detalhamento das concentrações de EPTs no sedimento).

2.2 DANOS ÀS COMUNIDADES PLANCTÔNICAS

Os dados descritos a seguir referem-se à avaliação do acompanhamento de danos às comunidades planctônicas que englobam organismos, na maior parte das vezes, microscópicos, e que vivem na coluna da água com capacidade de locomoção limitada. Dentre os organismos que fazem parte desse grupo, deu-se ênfase ao fitoplâncton e ao zooplâncton, que estão detalhados nos próximos itens e que são muito relacionados entre si e também com aspectos da qualidade da água, sendo bioindicadores. Resultados para o ictioplâncton são apresentados no capítulo 6, item 6.1.

No Relatório de Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e) foi apresentada a avaliação da comunidade fitoplanctônica do período pós-desastre com base em dados primários, coletados pelo Lactec (agosto/2018 e fevereiro/2019), e secundários obtidos do monitoramento da Rede UFES-Rio Doce (novembro/2015 a dezembro/2016). Como resultado destes estudos, obteve-se que a chegada da lama de rejeitos de minério à foz do rio Doce e região marinha adjacente, em novembro de 2015, ocasionou mudanças profundas na estrutura e composição da comunidade fitoplanctônica local. Houve aumento na densidade de organismos e substituição das espécies marinhas por células nanoplanctônicas de água doce (UFES, 2017). Nos meses seguintes (janeiro a abril/2016, e dezembro/2016), o fitoplâncton teve seu crescimento influenciado pela elevada concentração de partículas em suspensão na água, resultante da chegada contínua de rejeitos e pela ressuspensão do material já depositado por eventos de maior pluviosidade. Apesar das amplas modificações ocasionadas à comunidade, a gravidade destes danos não pôde ser mensurada, devido a indisponibilidade dos valores brutos dos parâmetros avaliados (densidade, clorofila, feopigmentos e diversidade de espécies) no primeiro ano de análises de pós-desastre (novembro/2015 a dezembro/2016) (BRASIL (MPF)/ LACTEC,

2020e). Portanto, os danos causados ao fitoplâncton pela lama de rejeitos foram avaliados de forma qualitativa (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e).

No presente Relatório de Acompanhamento de Danos será apresentada a continuidade da avaliação dos danos ao fitoplâncton da região costeira e marinha, com base em informações de densidade, biomassa e riqueza da comunidade obtidos no último ano de monitoramento pela Rede Rio Doce Mar (novembro/2018 a dezembro/2019) e Institutos Lactec (setembro/2019).

Para o zooplâncton, segundo o Relatório de Danos elaborado por Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), os danos identificados foram: a alteração na densidade de organismos, a alteração na composição específica e o aumento na concentração dos EPTs no zooplâncton. Tais danos foram identificados por meio da avaliação de dados secundários gerados entre dezembro/2015 e março/2019 e de dados primários obtidos entre julho/2018 e março/2019, entretanto, devido a baixa disponibilidade de dados no período pré-desastre, também não foi possível mensurar e classificar estes danos quanto a sua gravidade. A partir disso, o presente documento tem como objetivo avaliar a manutenção/alteração dos danos identificados em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), incorporando à análise anterior (dezembro/2015 a março/2019), o conjunto de dados primários e secundários tomados entre abril/2019 e setembro/2020.

2.2.1 METODOLOGIA

A seguir, estão descritas as metodologias utilizadas para o acompanhamento de danos individualmente para a comunidade fitoplanctônica e zooplantônica.

2.2.1.1 Fitoplâncton

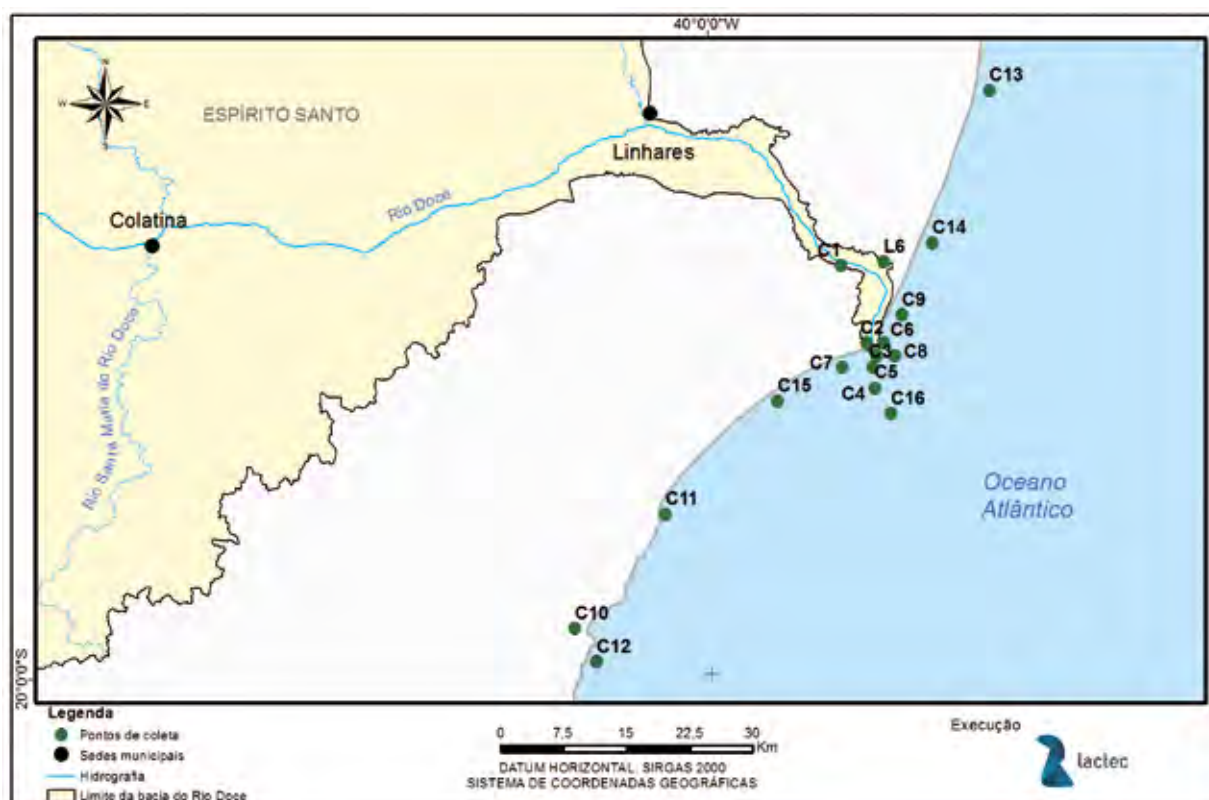
Para o acompanhamento dos danos ao fitoplâncton foram utilizados dados primários e secundários, descritos a seguir.

2.2.1.1.1 *Dados primários*

Os resultados das primeiras campanhas de amostragem do Lactec (julho/2018, fevereiro/2019), apresentados no Relatório de Diagnóstico de Danos (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e), foram agora complementados com os dados da coleta realizada em setembro/2019. Amostras de fitoplâncton foram coletadas em 13 estações amostrais na região marinha adjacente à foz do rio Doce (Tabela 7, Figura 25).

Tabela 7 – Estações avaliadas no monitoramento do fitoplâncton marinho pelo Lactec.

Estações	Município	Coordenadas (UTM – 24K)		Período de monitoramento
		Latitude	Longitude	
C3	Linhares	7824753.97 m E	414600.06 m S	jul/18, fev/19, set/19
C4	Linhares	7822099.12 m E	414843.37 m S	
C5	Linhares	7826073.13 m E	415065.52 m S	
C6	Linhares	7827648.58 m E	415907.30 m S	
C7	Linhares	7824581.30 m E	410973.73 m S	
C8	Linhares	7825950.38 m E	417204.81 m S	
C9	Linhares	7830823.44 m E	418021.16 m S	
C11	Aracruz	7807198.58 m E	389946.74 m S	
C12	Aracruz	7789557.98 m E	381665.38 m S	
C13	Linhares	7857692.66 m E	428474.47 m S	
C14	Linhares	7839393.97 m E	421633.05 m S	
C15	Linhares	7820634.80 m E	403321.37 m S	
C16	Linhares	7819153.04 m E	416691.43 m S	

Figura 25 – Localização das estações avaliadas no monitoramento do fitoplâncton marinho pelo Lactec.

O material foi coletado na subsuperfície e no limite da zona eufótica (3 x a transparência da água medida pelo disco de Secchi) com auxílio de garrafa de Van Dorn, e fixado com solução de lugol acético (WETZEL; LIKENS, 1991). Posteriormente, alíquotas de 10 ou 25 mL foram colocadas para sedimentar em câmaras de Ütermohl (ÜTERMOHL, 1958) e analisadas em microscópio óptico invertido Olympus CKX41. A sedimentação das amostras seguiu o tempo determinado por Lund et al. (1958), ou seja, três horas para cada centímetro de altura da cubeta. A contagem dos organismos foi realizada de acordo com as indicações de Huszar & Giani (2004), que consideram transectos e curva de estabilização de espécies.

Para estimar a densidade de indivíduos por litro de amostra foi utilizada a equação de Ross (1979): $Densidade = (n/sc).(1/h).F$, sendo n = número de indivíduos contados, s = área do campo (mm^2), c = número de campos contados, h = altura da câmara de sedimentação (mm), F = fator de correção para L . A determinação das espécies foi baseada, principalmente, em literatura específica tais como: Ricard (1987), Tomas (1997), Faust & Gullledge (2002), Hallegraeff et al. (2003), Hoppenrath et al. (2014), e artigos científicos.

Para avaliar as alterações na comunidade fitoplanctônica marinha decorrentes da lama de rejeitos da barragem de Fundão, foram analisadas informações sobre (a) concentração de clorofila-a, (b) densidade do fitoplâncton, (c) riqueza e (d) diversidade de espécies na região costeira.

- a) A clorofila é o principal pigmento fotossintético das microalgas. A concentração de clorofila-a pode dar indicação da biomassa do fitoplâncton e é expressa em $\mu g/L$ (ESTEVES; SUZUKI, 2011).
- b) A densidade expressa o número total de organismos do fitoplâncton em um determinado local, e é expressa em ind/L. O cálculo da densidade é um dos métodos de estimativa da biomassa fitoplanctônica (ESTEVES; SUZUKI, 2011).
- c) A riqueza específica é o número de espécies presentes um determinado local.
- d) A diversidade específica representa a relação entre o número de espécies e o número de indivíduos dentro de cada espécie, e é expressa em bits/ind, esta foi calculada pelo índice de Shannon (H') (SHANNON; WEAVER, 1949).

Os resultados destes parâmetros foram utilizados para caracterização da comunidade fitoplanctônica, e sempre que possível, comparados com os de linha-base e de pós-desastre obtidos de dados secundários.

2.2.1.1.2 Dados secundários

As informações contidas em CEPEMAR (2011), NUTRIPETRO (2013), CP+ (2015) e PETROBRAS (2015) foram utilizadas como linha-base para o fitoplâncton marinho (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e). A avaliação desta comunidade, no período pós-desastre, foi realizada com base nos dados gerados pela Rede UFES-Rio Doce (UFES, 2016a,b; UFES, 2017), no período de novembro/2015 a dezembro/2016 (Tabela 8) e pelo Programa de Monitoramento da Biota Aquática-PMBA da Rede Rio Doce Mar-RRDM, no período de novembro/2018 a janeiro/2020 (Tabela 9).

Oito expedições de amostragem (Tabela 8) foram realizadas Rede UFES-Rio Doce após a chegada da lama de rejeitos da barragem de Fundão à costa do estado do Espírito Santo. As estações de coleta foram localizadas em frente, ao norte e ao sul da foz do rio do Doce, e não foram totalmente coincidentes entre as expedições. A localização exata (coordenadas geográficas) de todas as estações de coleta não foi informada no relatório de consolidação elaborado pela UFES (2017). Apenas valores médios, mínimos e máximos dos parâmetros avaliados (densidade, clorofila-a, feopigmentos e diversidade de espécies) por profundidade e setor de amostragem foram divulgados no relatório. Desta forma, não foi possível mensurar os danos causados à comunidade fitoplânctônica pela lama de rejeitos.

Tabela 8 – Expedições oceanográficas realizadas pela Rede UFES-Rio Doce para coleta de fitoplâncton na costa do Espírito Santo.

Expedição	Data	Nº de estações	Profundidade de coleta
NOc Vital de Oliveira	27.11.2015 a 02.12.2015	23	superfície e fundo
Solancy Moura I	28.01.2016 a 02.02.2016	21	superfície e fundo
CP+	03.02.2016 a 05.02.2016	29	superfície e fundo
Antares	16.02.2016 a 18.02.2016	14	superfície e fundo
Solancy Moura II	19.04.2016 a 27.04.2016	27	superfície e fundo
Solancy Moura III - Abaeté		-	superfície e fundo
LABOGEO - ICMBio	23.11.2016 a 26.11.2016	17	superfície e fundo
ICMBio	05.12.2016 a 10.12.2016	16	superfície e fundo

Dentre as estações amostrais do PMBA, selecionaram-se aquelas incluídas no setor Foz, por estarem localizadas mais próximas da foz do rio Doce e por serem passíveis de comparação com os dados de linha-base e demais resultados de pós-desastre gerados pela Rede UFES-Rio Doce. Dados quali-quantitativos, de biomassa e diversidade do fitoplâncton foram obtidos mensalmente em duas profundidades (superfície e fundo), em 11 estações amostrais (Tabela 9).

Tabela 9 – Estações avaliadas no monitoramento do fitoplâncton realizado pelo PMBA, no setor foz.

Estações	Município	Coordenadas (UTM – 24K)		Profundidade de coleta	Período de monitoramento
		Latitude	Longitude		
SDN 13	Linhares	7842923.48 m E	428269.43 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SDN 20	Linhares	7829898.02 m E	423532.88 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SDN 30	Linhares	7832036.40 m E	427721.54 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SD 01	Linhares	7826708.20 m E	417558.92 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SD 02	Linhares	7823040.03 m E	4193392.72 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SD 03	Linhares	7819937.86 m E	422769.21 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SD 04	Linhares	7815169.35 m E	428467.96 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SD 05	Linhares	7807959.70 m E	437864.77 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SDS 13	Linhares	7814269.46 m E	399459.03 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SDS 20	Linhares	7816813.23 m E	411879.35 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20
SDS 30	Linhares	7805922.15 m E	407209.37 m S	superfície e fundo	nov/18 a jan/20

Gráficos foram gerados com os valores médios das variáveis selecionadas para avaliação das condições mais recentes da comunidade fitoplanctônica.

Os relatórios listados na Tabela 10 foram utilizados para a análise e discussão dos dados de pré e pós-desastre.

Tabela 10 – Lista de relatórios avaliados na análise do fitoplâncton marinho do Espírito Santo.

CEPEMAR. Monitoramento do Efluente Líquido da Fibria no Ecossistema Marinho. Relatório Técnico CPM RT 289/11. 2011.
NUTRIPETRO. Estudo de Impacto Ambiental – Terminal Portuário de uso múltiplo da Nutripetro. Julho, 2013.
CPMAIS. 12ª Campanha de monitoramento marinho – Estaleiro Jurong Aracruz – EJA. Relatório Técnico. CP+ RT 022/15. 2015.
PETROBRÁS. Projeto de Caracterização Ambiental Regional da Bacia do Espírito Santo e parte norte da Bacia de Campos (PCR-ES). Atividade de Perfuração Marítima na Área Geográfica do Espírito Santo – AGES. Relatório Final. Volume 1. 2015.
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. Monitoramento da Influência da Pluma do Rio Doce após o rompimento da Barragem de Rejeitos em Mariana/MG – novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados. Vitória. 2017.
PMBA. Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente. Anexo 3 Marinho – Fitoplâncton. Relatório Anual RT-19F RRDM/NOV19. 2019.

2.2.1.2 Zooplâncton

Para o acompanhamento dos danos ao zooplâncton foram utilizados dados primários e secundários, descritos a seguir.

Para os dados primários, além das duas campanhas já avaliadas em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), foram inclusos os dados primários referentes às campanhas de setembro de 2019 (período seco) e de março de 2020 (período chuvoso), totalizando quatro campanhas de coleta do zooplâncton. As estações avaliadas, método de coleta e análise das amostras foram os mesmos utilizados no diagnóstico de danos na zona costeira, sendo descritos em detalhes em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e). As estações amostrais são apresentadas na Tabela 1 e Figura 1. Para a coleta de amostras do zooplâncton foi utilizada rede cônica com malha de 200 μm , e volume conhecido.

A metodologia das análises qualitativas e quantitativas do zooplâncton englobaram a análise da densidade (org.m^{-3}), da abundância relativa (%), da frequência de ocorrência (%) e dos índices ecológicos como riqueza, diversidade e equitabilidade. A metodologia está descrita em detalhes em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), onde foram apresentados os resultados do zooplâncton registrado em julho de 2018 e em fevereiro de 2019.

Quanto ao conjunto de dados secundários, os principais levantamentos de dados do zooplâncton no período pós-desastre, na região costeira, foram realizados por instituições acadêmicas, destacando-se a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e Universidade Federal de Rio Grande (FURG), além da Marinha do Brasil e ICMBio, os quais têm sua descrição em detalhes no Relatório de Danos elaborado por Brasil (MPF)/ Lactec (2020e).

Para o presente documento de acompanhamento de danos foram adicionados, ao banco de dados utilizado no relatório de diagnóstico, os dados secundários provenientes dos trabalhos realizados pela Rede Rio Doce Mar (RRDM/UFES/FEST, 2019; 2020), os quais englobam os dados coletados entre outubro/2018 e março/2020 na avaliação do zooplâncton marinho.

No presente relatório, apresentam-se os resultados da avaliação dos danos quanto a alterações na comunidade zooplanctônica em relação às condições de linha-base (anterior ao desastre) e entre diferentes janelas temporais após o desastre. A segmentação temporal levou em consideração as informações coletadas quanto à qualidade da água e do sedimento e quanto aos dados de fitoplâncton e de zooplâncton, cuja divisão segue descrita na Tabela 11.

Os dados do zooplâncton que caracterizam a região marinha adjacente à foz do rio Doce no período pré-desastre (P0), são aqueles gerados antes da chegada da onda de cheias à foz do rio Doce, em 21 de novembro de 2015 (FAURG, 2016; FURG, 2016). Após esta data inicia-se o período pós-desastre, o qual foi dividido de acordo com os períodos onde foram verificadas as maiores alterações na qualidade das águas e com a disponibilidade de dados secundários existentes logo após o desastre. Os primeiros períodos após o desastre (P1/P2) se estendem do dia 21 de dezembro de 2015 até dezembro de 2016. Os períodos subsequentes representam o padrão de ocorrência do zooplâncton registrado ao longo do tempo: P4 - janeiro a dezembro de 2018; P5 - janeiro a dezembro de 2019 e P6 – janeiro a dezembro de 2020. Vale apontar que em P3 não há disponibilidade de dados para o zooplâncton. O padrão de ocorrência do zooplâncton durante os períodos P5 e P6 está descrito no presente documento de acompanhamento de danos.

Tabela 11 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre.

Período	Identificação do Período	Intervalo de Tempo	Fontes de dados analisados no período
Pré - Desastre	P0	Série histórica de dados levantados na linha-base até 10 de novembro de 2015	ARACRUZ, 1986; NOGUEIRA; OLIVEIRA, 1991; EKAU, 1996; BRANDINI et al., 1997; EKAU, 1999; CEPEMAR, 2004; GUALANDI, 2007; AMARAL; FERREIRA; LOUREIRO FERNANDES, 2007; CEPEMAR, 2009; CAMPELO, 2010; CEPEMAR, 2011; KOETTKER e LOPES, 2013; MARCOLIN et al, 2013; KOETTKER, 2013; NUTRIPETRO, 2013; CPMAIS, 2015; COSTA et al, 2015
	P1/P2	21 de novembro de 2015 a Dezembro de 2016	MARINHA, 2015; FERNANDES; PEREIRA, 2016; UFES, 2016b; UFES, 2017
Pós - Desastre	P3	Não há disponibilidade de informações para o zooplâncton	
	P4	Janeiro a Dezembro de 2018	LACTEC dados primários; FEST, 2019d; RRDM/UFES/FEST, 2019
	P5	Janeiro a Dezembro de 2019	LACTEC dados primários; RRDM/UFES/FEST, 2019
	P6	Janeiro a Dezembro de 2020	LACTEC dados primários; RRDM/UFES/FEST, 2019

Com exceção da incorporação dos dados brutos obtidos no monitoramento da RRDM (RRDM/UFES/FEST, 2019; 2020), a metodologia de análise dos danos e sua evolução permaneceu a mesma, sendo que o seu detalhamento se encontra em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e). Na sequência são elencados os principais pontos da metodologia adotada, que se baseou em indicadores para o padrão de ocorrência da comunidade zooplancônica com o objetivo de diagnosticar a situação do ambiente, face a influência do rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG) ocorrido em 2015.

Dentre os indicadores estudados, a composição das espécies foi o parâmetro melhor descrito nos trabalhos encontrados com dados logo após o desastre. Porém, a falta de clareza quanto às informações presentes nos relatórios não permitiu a avaliação. Com isso, a comparação da composição das espécies entre os distintos períodos não foi possível de ser avaliada quantitativamente, desse modo o dano de **alteração na composição do zooplâncton**, bem como a sua evolução, foram avaliados qualitativamente, por meio da descrição do indicador de **composição específica do zooplâncton**. Outras variáveis como densidade, abundância, concentração de EPTs e índices de estrutura da comunidade foram descritos de forma generalizada nos estudos consultados e com lacunas de dados nos períodos avaliados. Dessa forma, os danos de **alteração na densidade do zooplâncton** e de **aumento da concentração dos EPTs**, também foram identificados e avaliados de forma qualitativa (Tabela 12).

Tabela 12 – Indicadores dos danos à comunidade zooplanctônica.

Dano	Indicador
Alteração na composição do zooplâncton marinho	Composição específica
Alteração na densidade do zooplâncton marinho	Densidade total
Aumento da concentração de EPTs no zooplâncton marinho	Concentração de EPTs no zooplâncton

Para a avaliação do dano de **alteração na composição específica do zooplâncton**, foram elencadas, dentro do grupo dominante Copepoda, espécies representativas no período pré-desastre (P0). As espécies representativas são aquelas que apresentaram a classificação de “muito frequente” (espécies que ocorreram em todos ou quase todos os pontos amostrais de cada trabalho pesquisado, ou seja, ocorreram em mais de 70% dos pontos de coleta), ou “abundantes” (com alta densidade em cada trabalho pesquisado, considerando os valores de densidade registrados por trabalho) no período pré-desastre (P0). A lista de espécie representativas no período pré-desastre está descrita em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e).

É oportuno esclarecer que buscou-se elencar as espécies de Copepoda, pois este grupo faz parte dos organismos mais abundantes do planeta, os crustáceos. E ainda, com grande importância ecológica para os ambientes aquáticos, Copepoda foi o grupo com maior densidade e riqueza nos trabalhos pesquisados, englobando os dados primários e secundários (1986 a 2020) na região costeira e marinha, adjacentes à foz do rio Doce.

Para cada uma das espécies representativas, houve a comparação de sua frequência e/ou abundância, entre o período do pré – desastre (P0) com as dos demais períodos pós-desastre (P1/P2, P4, P5 e P6).

Quanto ao dano de **alteração na densidade do zooplâncton**, diferentemente do relatório de diagnóstico dos danos (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e), quando foram observadas as densidades médias, no presente relatório foram observados os valores máximos de densidade de organismos nos pontos amostrais zooplanctônicos entre os períodos P0 (pré - desastre), P1/P2 (logo após o desastre) e P4, P5 e P6 (pós – desastre) de modo a avaliar a flutuação da densidade máxima zooplanctônica ao longo do tempo e comparar ao pico de densidade observado logo após a chegada da lama à zona costeira.

Considerando o dano de **aumento na concentração dos EPTs no zooplâncton marinho**, foram avaliados os trabalhos que apresentaram resultados advindos de testes ecotoxicológicos realizados durante o pré-desastre (P0) e o pós-desastre (P1/P2 e P4). Em P5 e P6 não houve dados sobre a concentração dos EPTs no ambiente em estudo.

2.2.2 ALTERAÇÃO DA COMUNIDADE FITOPLANCTÔNICA

A chegada da lama de rejeitos da barragem de Fundão à costa do estado do Espírito Santo, em novembro de 2015, ocasionou mudanças expressivas na estrutura e dinâmica do fitoplâncton da região. Estas alterações ocorreram de forma mais intensa no primeiro ano de monitoramento (novembro/2015 a dezembro/2016). Neste período foram detectados valores elevados de densidade (média 210 a 2.005 x10³ ind/L) e biomassa (média 0,3 a 1,7 µg/L) fitoplanctônica em relação à linha-base (Figura 26, Figura 27, Figura 28), decorrentes do enriquecimento das águas pelo aporte contínuo de rejeitos pelo rio Doce e por eventos de pluviosidade (UFES, 2016a,b; UFES, 2017; BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e). Também, houve a substituição das espécies marinhas por cianobactérias e clorofíceas de pequenas dimensões, as quais passaram a ser predominantes na comunidade (UFES, 2017), alterando a biodiversidade e as relações tróficas existentes no local. Uma vez que as microalgas constituem a base da cadeia alimentar nos ecossistemas aquáticos, quaisquer modificações na comunidade influenciará a relação com os consumidores primários e irá ser refletida para os demais níveis tróficos.

Com o monitoramento contínuo da comunidade fitoplanctônica nos últimos anos (2018, 2019), observa-se que, em geral, o número médio de organismos diminuiu na região próxima a foz do rio Doce (Figura 26). Entretanto, os valores permaneceram acima (mínimo de 252 x10³ ind/L) dos registrados para linha-base (máximo de 189x10³ ind/L), indicando que a comunidade ainda está respondendo às alterações ambientais causadas pelo desastre. Alguns picos de densidade foram constatados durante o período, tanto nas estações amostrais situadas à frente da foz do rio Doce quanto mais ao sul (Figura 26), geralmente ocorrendo em maior profundidade (Figura 27). A média mais elevada de densidade fitoplanctônica (2.379x10³ ind/L) foi encontrada em amostras de fundo em frente à foz do rio Doce, em dezembro/2019, sendo a máxima de 6.021x10³ ind/L registrada para a estação SD01. Nesse mês, as chuvas intensas que incidiram na região da cabeceira do rio Doce promoveram o aumento do nível das águas, ocasionando a ressuspensão do sedimento depositado no fundo dos ambientes fluviais e costeiros. Estes eventos ocasionaram o enriquecimento das águas costeiras por nutrientes e EPTs, propiciaram maior crescimento das células fitoplanctônicas.

Figura 26 – Densidade média do fitoplâncton marinho em regiões próximas a foz do rio Doce, antes e após o desastre.



Figura 27 - Densidade média do fitoplâncton em diferentes profundidades, antes e após o desastre.



Apesar do número de organismos fitoplanctônicos ter permanecido acima da média de linha-base nos últimos dois anos de amostragem, a concentração de clorofila-a não variou muito nas campanhas realizadas (0,24-0,99 $\mu\text{g/L}$) e foi semelhante aos valores de pré-desastre (0,2-0,8 $\mu\text{g/L}$) (Figura 28). Isto indica que, neste período, houve maior abundância de espécies de pequenas dimensões, as quais possuem biovolume pequeno e não resultam em aumento expressivo dos valores de biomassa. De maneira geral, valores mais elevados de clorofila-a foram detectados no fundo da coluna d'água, assim como os de densidade fitoplanctônica. A concentração média de feopigmentos esteve proporcionalmente sempre abaixo dos valores de clorofila-a nas amostragens do PBMA (Figura 28), indicando que houve poucos períodos em que a comunidade apresentou-se senescente.

Em média, a região próxima a foz do rio Doce apresentou diversidade específica (H') elevada após o desastre (Figura 29), sendo os menores valores registrados de janeiro a abril/2016, provavelmente pelo desaparecimento de algumas espécies marinhas. Houve pouca diferença entre os valores médios de diversidade entre os períodos avaliados de pós-desastre (UFES: 2,0-3,7 bits/ind; PBMA: 2,8-3,8 bits/ind) (Figura 29), e a variação encontrada esteve dentro da calculada em estudos de linha-base (0,6-3,4 bits/ind) (ex. CEPENAR, 2011; NUTRIPETRO, 2013; CPMAIS, 2015; PETROBRAS, 2015).

Figura 28 – Concentração média de clorofila-a e feopigmentos em diferentes profundidades, antes e após o desastre.



Figura 29 – Diversidade (H') média de espécies do fitoplâncton, antes e após o desastre.



Segundo PMBA (2019), o grupo que sofreu maior alteração após o desastre foi o das Haptophyta. Este grupo é composto por diversas espécies nanoplânctônicas marinhas, como os cocolitofóridos, que ocorrem em maior abundância em águas oligotróficas quentes (LOURENÇO, 2006; NICHOLLS, 2015). Com o aumento da turbidez e enriquecimento das águas após a chegada da lama de rejeitos na região costeira, estas algas passaram a ser encontradas em densidade baixa ou nula nas amostras. A diminuição no número destes organismos no ambiente pode ocasionar mudanças nos demais níveis da cadeia trófica, uma vez que constituem recurso alimentar para diferentes organismos, como: rotíferos, camarões, larvas de crustáceos e peixes. Com base nos resultados obtidos pelo PMBA para o último ano, principalmente a partir de julho/2019, a contribuição das Haptophyta aumentou nas estações amostrais, mas ainda em número abaixo do que era encontrado antes do desastre (ex. PETROBRAS, 2015). Cianobactérias e algas verdes permanecem sendo os principais constituintes da comunidade fitoplânctônica do pós-desastre.

Dentre todas as espécies encontradas no fitoplâncton, as que apresentaram maior frequência de ocorrência nas amostras foram *Chlorella* sp. (Chlorophyceae), *Cylindrotheca closterium* (Bacillariophyceae), *Tripos furca* (Dinophyceae), *Trichodesmium thiebautii* e *Synechocystis* sp. (Cyanophyceae) (PMBA, 2019).

Nas coletas realizadas pelo Lactec após o desastre (julho/2018, fevereiro/2019 e setembro/2019) foram encontradas 151 espécies no fitoplâncton (Tabela 13, Figura 30), sendo as diatomáceas (Bacillariophyceae) e dinoflagelados (Dinophyceae) os grupos mais ricos (81 e 39 táxons, respectivamente).

Tabela 13 – Ocorrência das espécies do fitoplâncton nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro, nas 04 campanhas após o desastre.

Táxons	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Bacillariophyceae													
<i>Actinopterychus senarius</i>											x		x
<i>Amphora</i> sp.			x										
<i>Asterionellopsis glacialis</i>	x	x	x	x	x	x	x			x	x		x
<i>Campylosira cymbelliformis</i>	x		x	x		x	x						
<i>Capartogramma crucicola</i>	x												
<i>Cerataulina pelagica</i>								x				x	
<i>Chaetoceros curvisectus</i>										x			
<i>Chaetoceros tenuissimus</i>						x			x		x		x
<i>Chaetoceros teres</i>		x	x				x	x				x	x
<i>Chaetoceros</i> sp.1	x		x			x	x				x		
<i>Chaetoceros</i> sp.2		x								x			
<i>Corethron cryophilum</i>							x			x		x	
<i>Coscinodiscus rothii</i>										x			
<i>Cyclostephanus invisitatus</i>			x										
<i>Cyclotella striata</i>							x						
<i>Cyclotella</i> sp.1						x				x			
<i>Cyclotella</i> sp.2						x	x		x				
<i>Cylindrotheca closterium</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Cymatnitzschia marina</i>						x		x				x	
<i>Cymatosira belgica</i>	x					x					x		
<i>Cymatoteca weissflogii</i>						x				x			
<i>Dactyliosolen fragilissimum</i>						x		x					
<i>Diploneis aestuarii</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Diploneis bombus</i>			x	x	x		x	x		x		x	x
<i>Diploneis weissflogii</i>									x			x	
<i>Diploneis</i> sp.3				x		x	x						
<i>Entomoneis paludosa</i>									x			x	
<i>Entomoneis</i> sp.		x				x	x						
<i>Eucampia zodiacus</i>				x					x				
<i>Fallacia</i> sp.									x	x			
<i>Guinardia flaccida</i>									x				
<i>Guinardia striata</i>						x	x			x	x		x
<i>Gyrosigma</i> sp.	x			x			x				x		
<i>Haslea</i> sp.		x	x	x		x			x	x	x		x
<i>Hemiaulus indicus</i>						x							
<i>Hemiaulus sinensis</i>		x			x						x	x	
<i>Leptocylindrus danicus</i>						x		x	x	x			
<i>Leptocylindrus minimus</i>		x		x	x	x	x			x	x	x	x
<i>Navicula cryptotenella</i>	x												
<i>Navicula</i> sp.1	x												

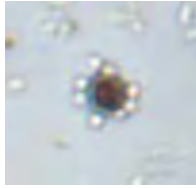
Táxons	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C11	C12	C13	C14	C15	C16
<i>Navicula</i> sp.2		x	x										
<i>Navicula</i> sp.4									x				
<i>Navicula</i> sp.8				x									
<i>Navicula</i> sp.9												x	x
<i>Navicula</i> sp.10			x	x			x			x		x	x
<i>Navicula</i> sp.11							x			x			
<i>Navigeia aikenensis</i>	x												
<i>Nitzschia sigma</i>											x		
<i>Nitzschia</i> sp.3	x	x	x				x	x			x		x
<i>Nitzschia</i> sp.4					x	x	x		x		x	x	x
<i>Nitzschia</i> sp.5	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x		x
<i>Nitzschia</i> sp.6									x				
<i>Nitzschia</i> sp.7						x							
<i>Nitzschia</i> sp.8						x							
<i>Odontella aurita</i>				x									
<i>Paralia sulcata</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Pleurosigma angulatum</i>	x			x			x						
<i>Pleurosigma diversestriatum</i>				x			x			x	x	x	
<i>Proboscia alata</i>					x	x	x			x	x		
<i>Psammodyction constrictum</i>				x				x		x	x		
<i>Psammodyction panduriforme</i>	x	x							x	x	x	x	x
<i>Pseudonitzschia</i> sp.1				x	x						x	x	
<i>Pseudonitzschia</i> sp.2		x				x						x	
<i>Rhizosolenia setigera</i>	x	x	x	x		x	x			x	x	x	x
<i>Rimoneis</i> sp.	x		x										
<i>Skeletonema tropicum</i>		x	x	x		x	x			x	x		
<i>Skeletonema potamus</i>											x		
<i>Tetramphora decussata</i>		x				x		x					
<i>Thalassionema frauenfeldii</i>		x	x		x		x			x	x	x	
<i>Thalassionema nitzschioides</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Thalassiosira</i> sp.1	x	x	x	x	x	x	x	x		x			
<i>Thalassiosira</i> sp.2											x		x
<i>Thalassiosira</i> sp.3	x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
<i>Thalassiosira</i> sp.4	x		x						x			x	
<i>Thalassiosira</i> sp.5											x		x
<i>Thalassiosira</i> sp.6	x		x						x	x			x
<i>Trachyneis aspera</i>			x				x						
<i>Trieres mobiliensis</i>			x				x			x	x		
<i>Tropidoneis</i> sp.		x				x	x				x		
<i>Tryblionella perversa</i>			x										
<i>Tryblionella</i> sp.							x					x	
Chlamydomphyceae													
<i>Chlamydomonas</i> sp.2	x		x										

Táxons	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C11	C12	C13	C14	C15	C16
Chlorophyceae													
<i>Actinastrum aciculare</i>	x												
<i>Acutodesmus dimorphus</i>	x			x									
<i>Ankyra</i> sp.	x		x										
<i>Desmodesmus</i> sp.2		x	x										
<i>Desmodesmus</i> sp.5													x
<i>Dictyosphaerium</i> sp.													x
<i>Geminella</i> sp.											x		
<i>Lemmermannia triangularis</i>													x
<i>Monoraphidium contortum</i>	x		x										
<i>Monoraphidium griffithii</i>			x										
<i>Pseudotetrademus quaternarius</i>		x											
<i>Scenedesmus ecornis</i>	x	x											x
<i>Westella brotryoides</i>	x												
Cryptophyceae													
<i>Cryptomonas</i> sp.2			x										
<i>Plagioselmis prolunga</i>		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Teleaulax amphioxeia</i>	x							x		x			
cryptophyceae sp.					x								
Cyanophyceae													
<i>Aphanocapsa delicatissima</i>	x												
<i>Cyanogranys ferruginea</i>	x		x										
<i>Merismopedia</i> sp.2			x										
<i>Synechococcus</i> aff. <i>aquaticus</i>					x								
cyanophyceae sp.2		x							x	x			
cyanophyceae sp.3	x												x
Dinophyceae													
<i>Alexandrium</i> sp.		x						x					
<i>Dinophysis acuminata</i>		x									x	x	x
<i>Dinophysis caudata</i>		x							x				
<i>Goniaulax</i> sp.										x	x		
<i>Gymnodinium</i> sp.1		x		x		x	x		x	x	x	x	x
<i>Gymnodinium</i> sp.2								x			x		x
<i>Gymnodinium</i> sp.3		x						x		x			
<i>Gymnodinium</i> sp.4								x					
<i>Gymnodinium</i> sp.5											x	x	
<i>Gyrodinium</i> sp.1					x								
<i>Gyrodinium</i> sp.2													x
<i>Gyrodinium</i> sp.3					x			x					
<i>Heterocapsa circularisquama</i>	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
<i>Heterocapsa</i> sp.1					x			x		x			
<i>Heterocapsa</i> sp.2												x	x
<i>Heterocapsa</i> sp.3	x				x	x	x						

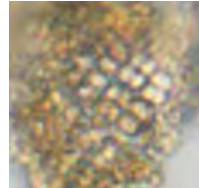
Táxons	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C11	C12	C13	C14	C15	C16
<i>Karenia mikimotoi</i>					x		x		x		x	x	x
<i>Oxytoxum</i> sp.								x					
<i>Peridinium quinquecorne</i> var. <i>trispiniferum</i>				x									
<i>Peridinium</i> sp.2	x		x			x				x		x	
<i>Peridinium</i> sp.3					x								
<i>Peridinium</i> sp.4									x				
<i>Peridionopsis</i> sp.					x						x		
<i>Pfiesteria</i> sp.		x								x		x	x
<i>Prorocentrum compressum</i>	x												
<i>Prorocentrum gracile</i>							x			x			
<i>Prorocentrum micans</i>		x			x								
<i>Prorocentrum minimum</i>		x									x		
<i>Prorocentrum robustum</i>					x	x		x					
<i>Prorocentrum sigmoides</i>		x											
<i>Prorocentrum triestinum</i>				x	x	x	x					x	x
<i>Protoberidinium biceps</i>												x	
<i>Protoberidinium pallidum</i>		x								x			
<i>Protoberidinium</i> sp.1						x	x						
<i>Protoberidinium</i> sp.2					x								
<i>Scrippsiella trochoidea</i>		x				x	x	x				x	
<i>Torodinium robustum</i>	x				x				x			x	
<i>Triplos symmetricum</i>													x
<i>dinogelgado</i> sp.												x	
Euglenophyceae													
<i>Eutreptiella eupharingea</i>		x	x		x	x	x	x			x	x	x
<i>Eutreptiella</i> sp.									x				
Prasinophyceae													
<i>Pyramimonas</i> sp.1		x	x		x	x		x	x	x		x	x
<i>Pyramimonas</i> sp.2		x			x								
Zygnemaphyceae													
<i>Cosmarium</i> sp.4		x											
<i>Cosmarium</i> sp.5	x												
<i>Mougeotia</i> sp.1			x			x							
Riqueza	40	42	40	30	34	45	44	29	30	44	43	41	41

Figura 30 – Ilustração de algumas espécies do fitoplâncton nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro.

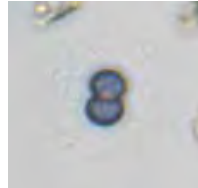
Cyanophyceae



Cyanogranis ferruginea



Merismopedia sp.2



Synechococcus aff.
aquatilis



cyanophyceae sp.2



cyanophyceae sp.3

Chlorophyceae



Actinastrum aciculare



Monoraphidium
contortum



Monoraphidium griffithii



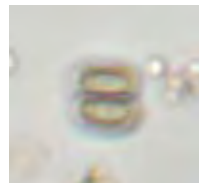
Ankyra sp.



Westella botryoides



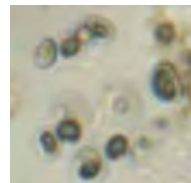
Lemmermannia triangularis



Scenedesmus ecoris



Pseudotetrademus
quaternarius



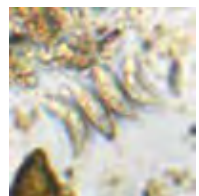
Dictyosphaerium sp.



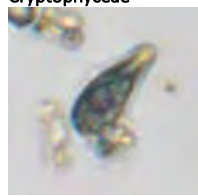
Desmodesmus sp.2



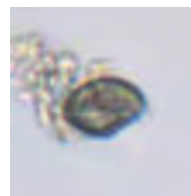
Desmodesmus sp.5



Acutodesmus dimorphus



Teleaulax amphioxeia



Plagioselmis prolunga



Cryptophyceae sp.

Zygnemaphyceae



Cosmarium sp.4



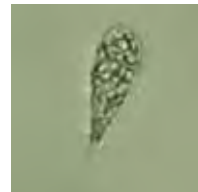
Cosmarium sp.5



Mougeotia sp.1

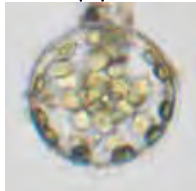


Eutreptiella
euphringea

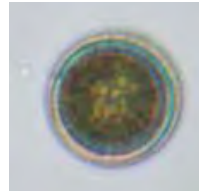


Eutreptiella sp.

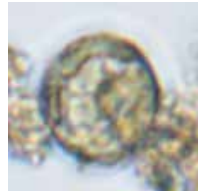
Bacillariophyceae



Thalassiosira sp.1



Thalassiosira sp.2



Thalassiosira sp.3



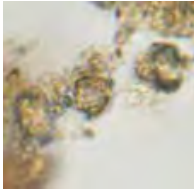
Thalassiosira sp.4



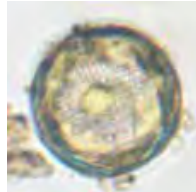
Thalassiosira sp.5

Euglenophyceae

Bacillariophyceae



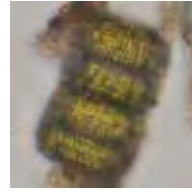
Thalassiosira sp.6



Coscinodiscus rothii



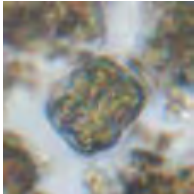
Actinoptychus senarius



Paralia sulcata



Cyclostephanos invisitatus



Cyclotella striata



Cyclotella sp.1



Cyclotella sp.2



Corethron cryophilum



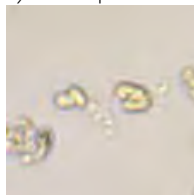
Odontella aurita



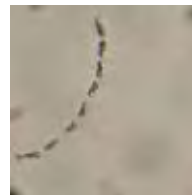
Trieres mobiliensis



Chaetoceros teres



Chaetoceros tenuissimus



Chaetoceros curvisetus



Chaetoceros sp.1



Chaetoceros sp.2



Cymatothea weissflogii



Skeletonema tropicum



Skeletonema potamus



Rhizosolenia setigera



Proboscia alata



Hemiaulus indicus



Dactyliosolen
fragilissimum



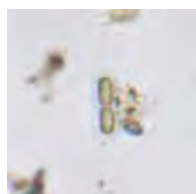
Guinardia flaccida



Guinardia striata



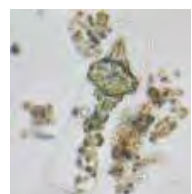
Eucampia zodiacus



Leptocylindrus minimus



Leptocylindrus danicus



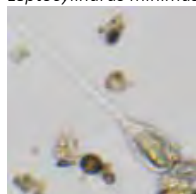
Cerataulina pelagica



Rimoneis sp.



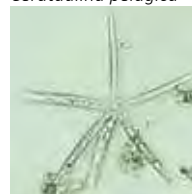
Campylosira
cymbelliformis



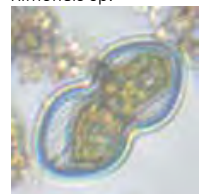
Asterionellopsis glacialis



Thalassionema
nitzschioides



Thalassionema
frauenfeldii

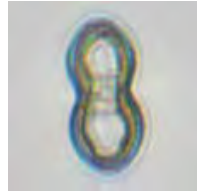


Diploneis weissflogii

Bacillariophyceae



Diploneis aestuarii



Diploneis bombus



Diploneis sp.1



Capartogramma crucicola



Haslea sp.



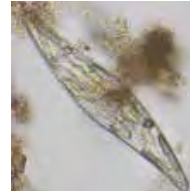
Trachyneis aspera



Gyrosigma sp.1



Pleurosigma diversestriatum



Pleurosigma angulatum



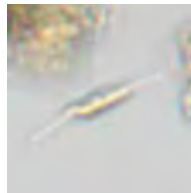
Nitzschia sigma



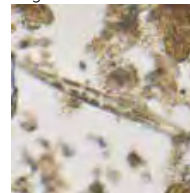
Nitzschia sp.3



Nitzschia sp.4



Nitzschia sp.5



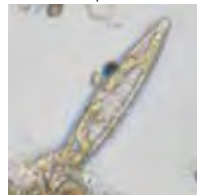
Nitzschia sp.6



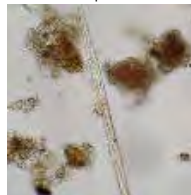
Nitzschia sp.7



Nitzschia sp.8



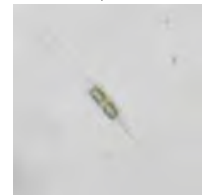
Cymatonitzschia marina



Pseudonitzschia sp.1



Pseudonitzschia sp.2



Cylindrotheca closterium



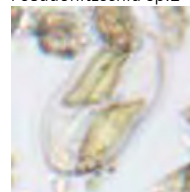
Tryblionella perversa



Tryblionella sp.



Psammodyction constrictum



Psammodyction panduriforme



Entomoneis paludosa



Entomoneis sp.1



Tropidoneis sp.



Tetramphora decussata



Amphora sp.



Chlamydomonas sp.2

Dinophyceae



Prorocentrum robustum



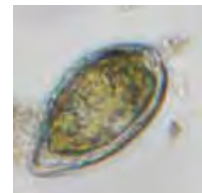
Prorocentrum micans



Prorocentrum triestinum

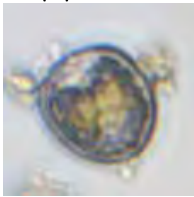


Prorocentrum sigmoides

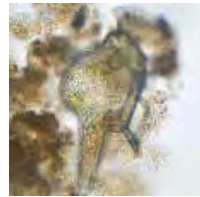


Prorocentrum gracile

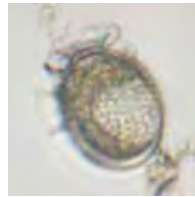
Dinophyceae



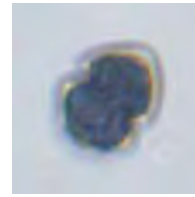
Prorocentrum minimum



Dinophysis caudata



Dinophysis acuminata



Heterocapsa circularisquama



Heterocapsa sp.1



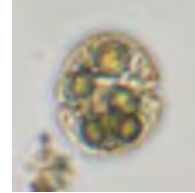
Heterocapsa sp.2



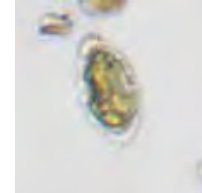
Heterocapsa sp.3



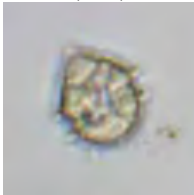
Tripos symmetricum



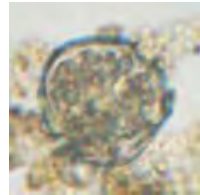
Pfiesteria sp.



Peridiniopsis sp.



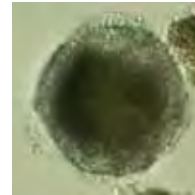
Peridinium quinquecorne
var. trispiniferum



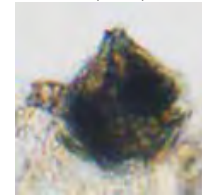
Peridinium sp.2



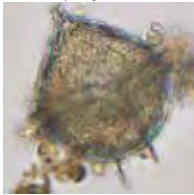
Peridinium sp.3



Peridinium sp.4



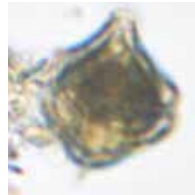
Goniaulax sp.



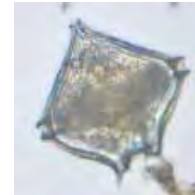
Protoperidinium pallidum



Protoperidinium biceps



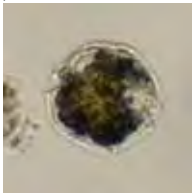
Protoperidinium sp.1



Protoperidinium sp.2



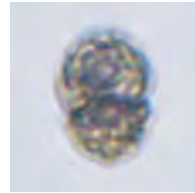
Scripsiella trochoidea



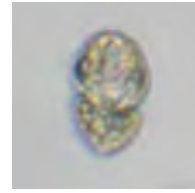
Alexandrium sp.



Oxytoxum sp.



Gymnodinium sp.1



Gymnodinium sp.2



Gymnodinium sp.3



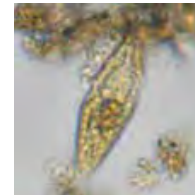
Gymnodinium sp.4



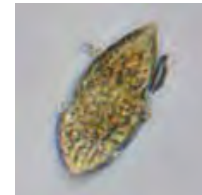
Gymnodinium sp.5



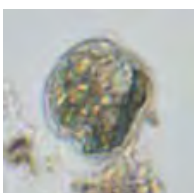
Gyrodinium sp.1



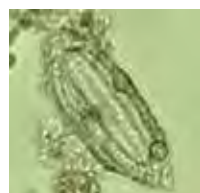
Gyrodinium sp.2



Gyrodinium sp.3



Karenia mikimotoi



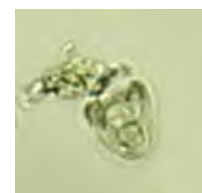
Torodinium robustum



Dinoflagelado sp.



Pyramimonas sp.1

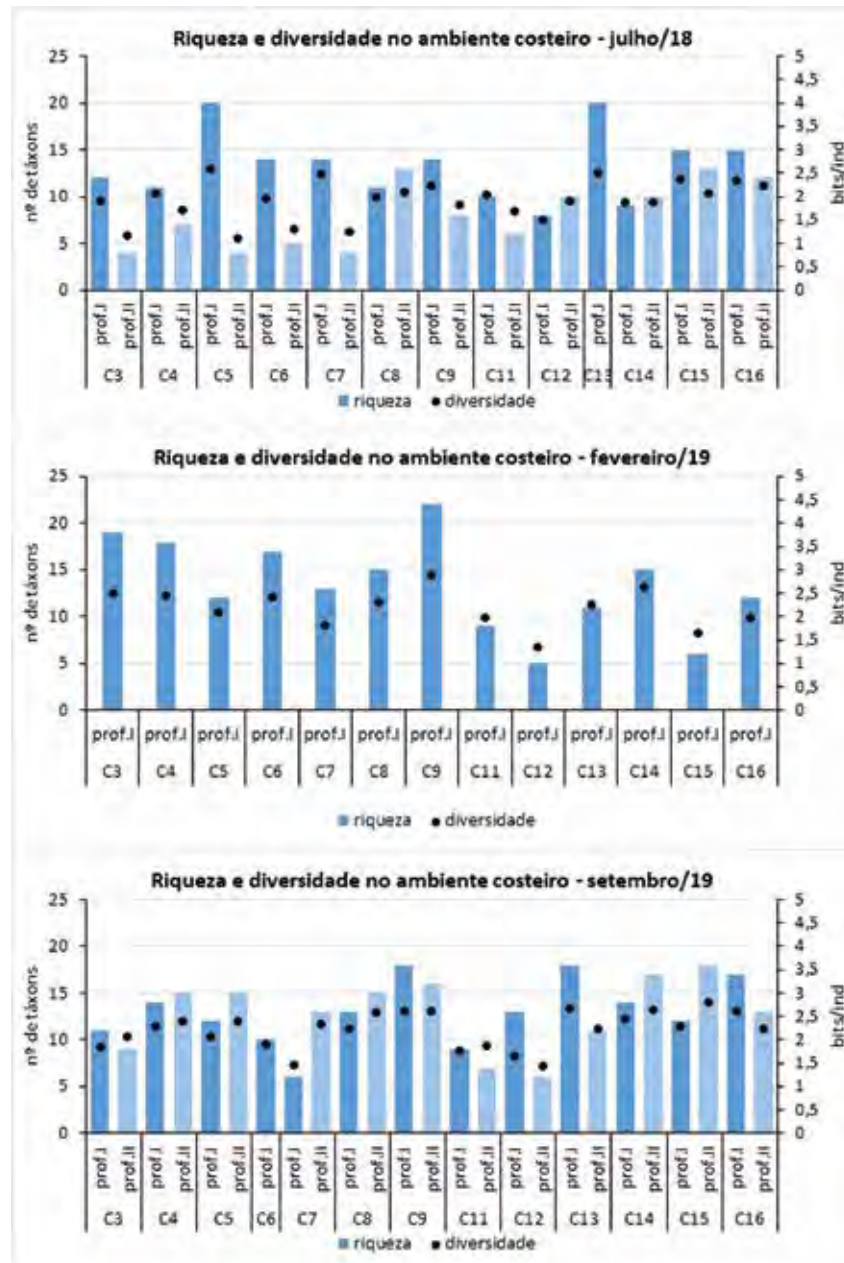


Pyramimonas sp.2

Prasinophyceae

Baixa riqueza de espécies foi registrada nas estações amostrais durante as campanhas (4 a 22 táxons/estação) (Figura 31), se comparada a média registrada em período anterior ao desastre (50 táxons, PETROBRAS (2015)). Os valores de diversidade específica (H') foram relativamente baixos (1,1-2,9 bits/ind), e acompanharam os de riqueza em todas as amostragens (Figura 31), não havendo predominância de organismos.

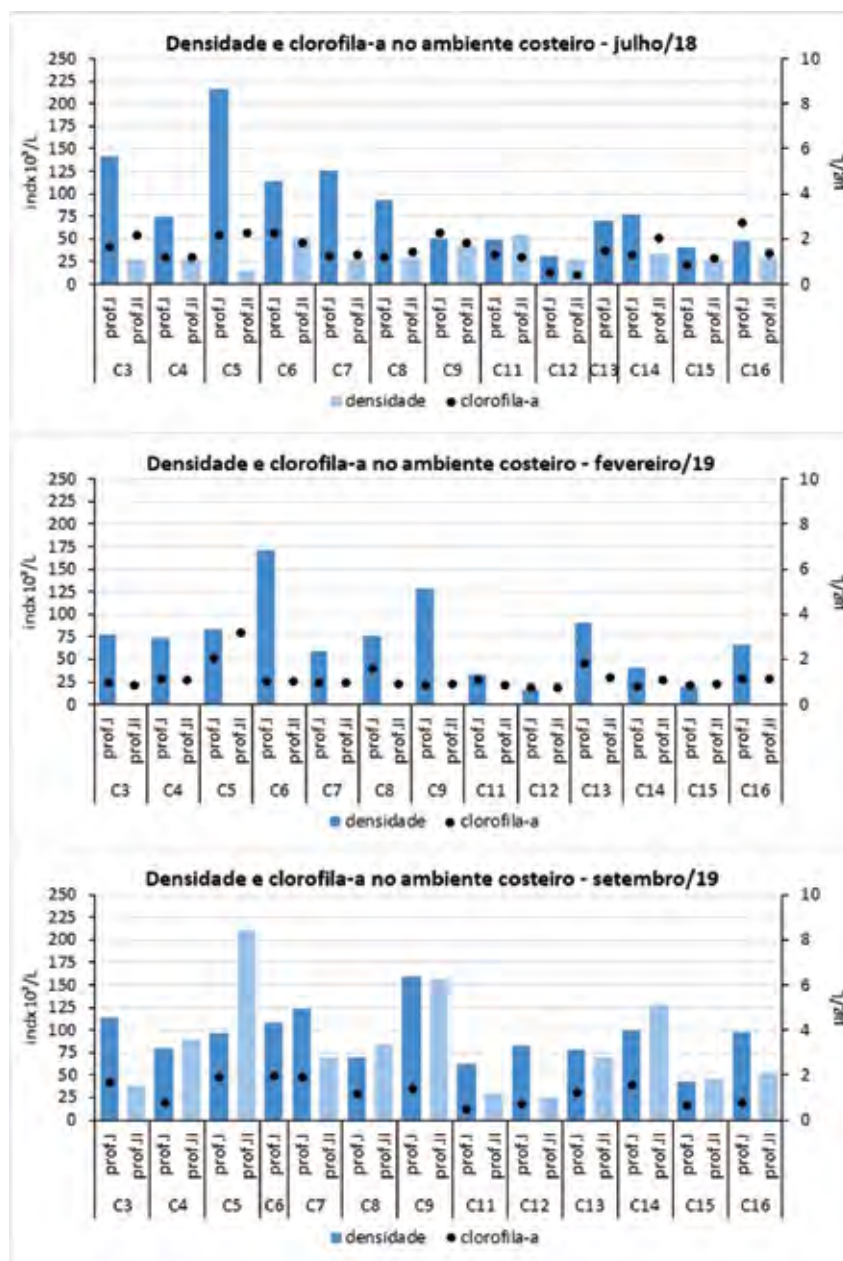
Figura 31 – Riqueza e diversidade do fitoplâncton nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro.



Em geral, a densidade fitoplanctônica esteve abaixo da média registrada para linha-base (189×10^3 ind/L) em todas estações amostrais (Figura 32). Exceção é feita à estação C5, que está localizada em frente a foz do rio Doce. Neste local foram contabilizados 217×10^3 ind/L em amostras de superfície e 210×10^3 ind/L em amostra profundidade, nos meses de julho/2018 e setembro/2019, respectivamente. Alta concentração de clorofila-a também foi estimada na amostragem realizada em fevereiro/2019 para

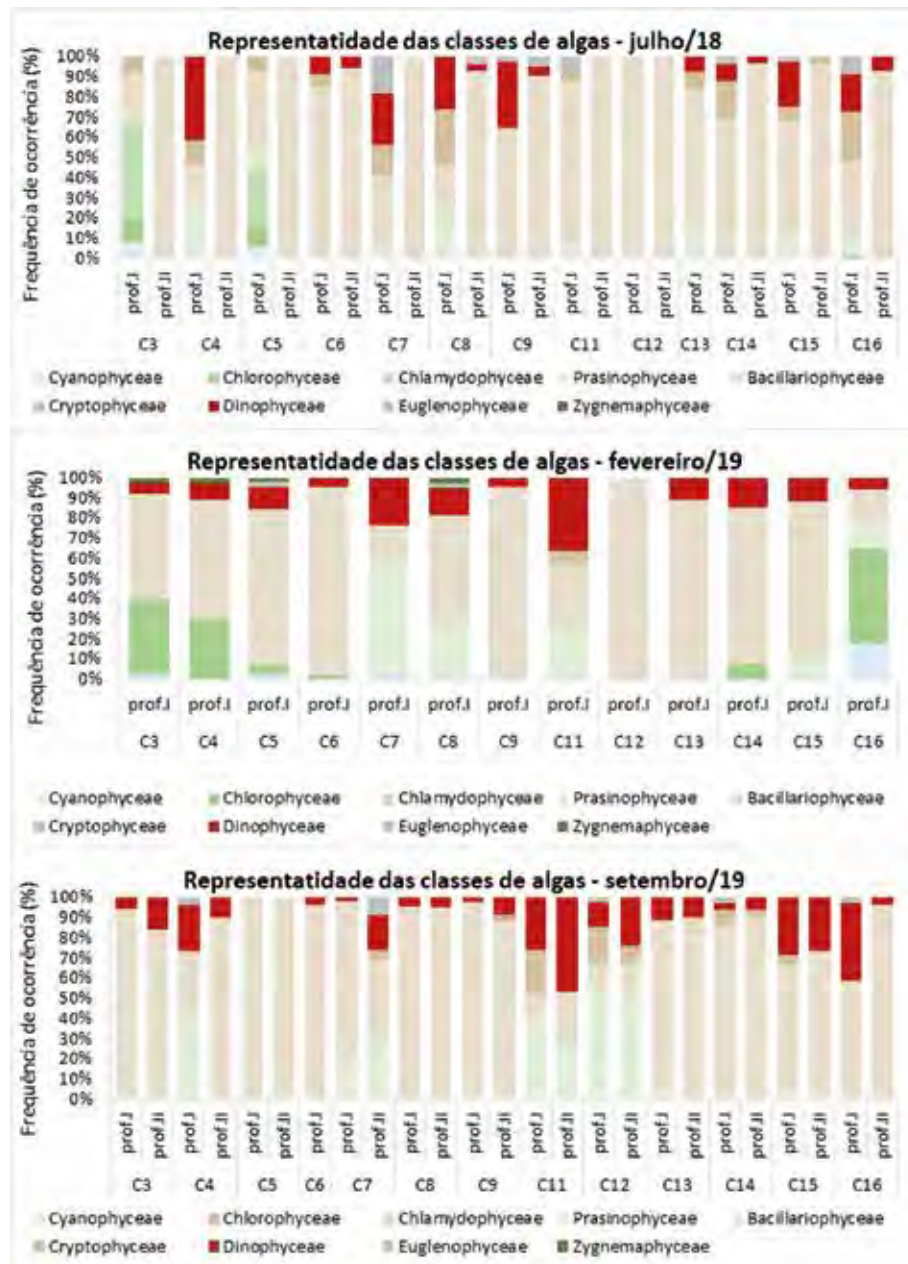
esta estação (3,2 µg/L), contudo não há dado quantitativo para relacionar ao de biomassa (Figura 32). Valores de clorofila-a estiveram acima da média de linha-base (<1 µg/L) na maior parte das estações avaliadas (Figura 32), especialmente nas amostragens de julho/2018 e setembro/2019.

Figura 32 – Densidade fitoplanctônica e concentração de clorofila-a nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro.



Em termos quantitativos, as diatomáceas (Bacillariophyceae) constituíram o grupo mais abundante da comunidade fitoplanctônica em todas as amostragens (Figura 33). Dinoflagelados e Prasinophyceae foram comumente encontrados nas amostras, sendo os demais fitoflagelados (Chlamydomphyceae, Euglenophyceae, Cryptophyceae) mais numerosos em julho/2018 e setembro/2019. Cianobactérias e clorófitas foram representadas, principalmente, por táxons de água doce, que provavelmente vieram carregados pela foz do rio Doce. Estes grupos apresentaram maior abundância em estações próximas a foz deste rio, especialmente durante o período chuvoso (fevereiro/2019) (Figura 33).

Figura 33 – Representatividade das classes de algas nas estações monitoradas pelo Lactec no ambiente costeiro.



As espécies com maior frequência de ocorrência nas amostras foram *Thalassionema nitzschioides*, *Asteionellopsis glacialis* (Bacillariophyceae) e *Pyramimonas* sp.1 (Prasinophyceae). Além do registro de espécies que eram comumente registradas em estudos pré-desastre na região, como: *Cylindrotheca closterium*, *Diploneis bombus*, *Guinardia flaccida*, *Leptocylindrus danicus*, *L. minimus*, *Rhizosolenia setigera*, *Thalassiosira* spp. e *Pseudo-nitzschia* spp.

2.2.3 ALTERAÇÃO DA COMUNIDADE ZOOPLANCTÔNICA

Nos itens a seguir estão descritos os danos identificados para o zooplâncton marinho, decorrentes do desastre da Samarco, e o seu comportamento ao longo do período P6 (março/2020 a dezembro/2020), lembrando que os danos de alteração na composição específica, de alteração na densidade e de aumento da concentração de EPTs foram apenas descritos de forma qualitativa.

2.2.3.1 Alterações na densidade e na composição das espécies do zooplâncton

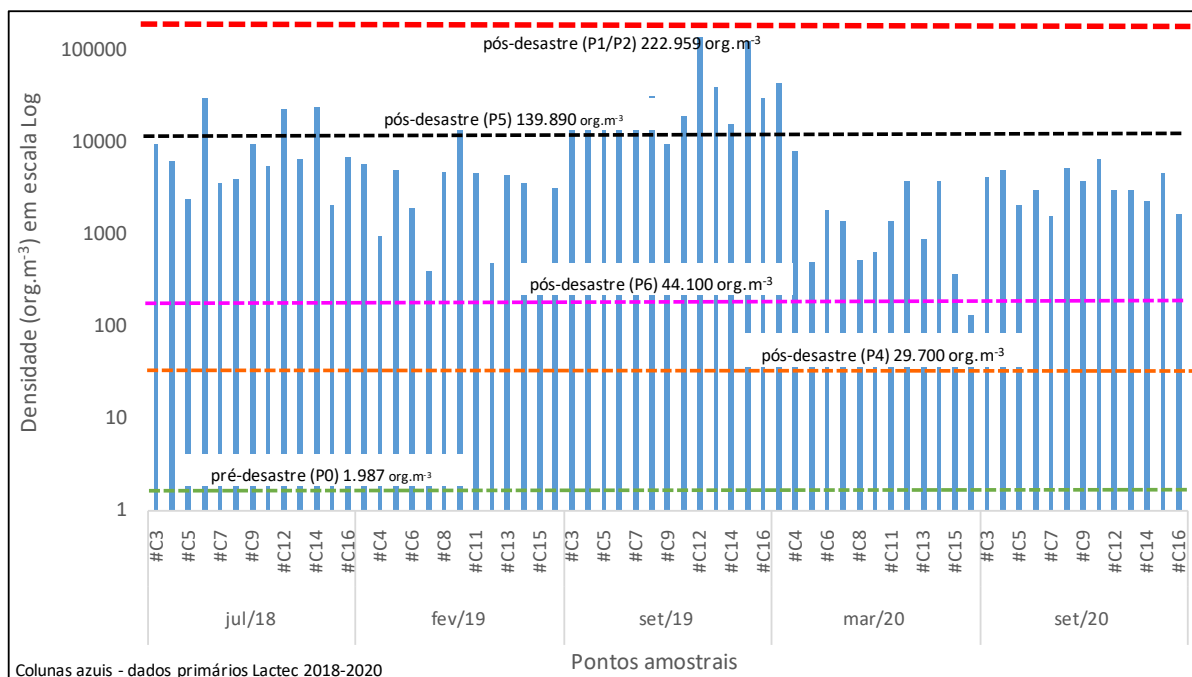
Analizando os dados secundários provenientes dos trabalhos encontrados do período pré-desastre (P0) e dos períodos pós-desastre (P1/P2, P4, P5 e P6), em conjunto com os dados primários no pós-desastre (P4 – 2018; P5 – 2019 e P6 - 2020), foi possível observar alterações na densidade de organismos zooplanctônicos devido à flutuação no número de organismos ao longo do tempo.

Para o período pré-desastre (P0), dentre os trabalhos que apontaram de forma clara as densidades máximas nos pontos amostrais, o valor máximo de densidade do zooplâncton foi equivalente a $1.987 \text{ org. m}^{-3}$ (linha tracejada verde na Figura 34) na região marinha (CPMAIS, 2015).

Conforme observado em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), logo após o desastre, UFES (2017) detectou um pico na densidade de organismos de $222.959 \text{ org. m}^{-3}$, que é considerado o valor máximo entre os pontos amostrais durante P1/P2 (linha tracejada vermelha na Figura 34). Este valor atípico para a densidade do zooplâncton foi aproximadamente 28 vezes maior que o valor máximo observado para a região em anos anteriores e esteve associado a duas espécies (*Oithona nana* e *Parvocalanus scotti*) que foram as responsáveis por 80% desse valor, como explica UFES (2017). A chegada da lama de rejeito de minérios na região da foz do rio Doce e área marinha adjacente alterou as condições físico-químicas do meio como turbidez, luminosidade, oxigênio dissolvido, presença de EPTs entre outros aspectos (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e) e assim influenciou na distribuição da comunidade planctônica logo após o desastre. Os altos valores de densidade e dominância no zooplâncton observados durante novembro e dezembro de 2015 no local do presente estudo mostram que houve um desequilíbrio na comunidade zooplanctônica, refletido então pelo domínio (pico na densidade) de poucas espécies (mais resistentes) em detrimento de outras espécies menos resistentes (e.g. *Acartia lilljeborgi*; *Oithona hebes* entre outras) às alterações no ambiente.

Nos períodos subsequentes ao período P1/P2, houve declínio da densidade do zooplâncton. Em P4 (janeiro/2018 a dezembro/2018), segundo dados secundários de outubro de 2018 a dezembro de 2018 (RRDM/UFES/FEST, 2019), a densidade máxima entre os pontos amostrais foi de 4.141 org.m^{-3} . Considerando os dados primários do Lactec (julho de 2018 – P4), a densidade máxima entre os pontos amostrais foi de $29.700 \text{ org.m}^{-3}$, ou seja, maior do que a encontrada nos dados secundários (Figura 34 - linha tracejada laranja).

Figura 34 – Variação da densidade (org.m^{-3}) em escala logarítmica (Log) para o zooplâncton por ponto amostral (coluna azul) no Ambiente Marinho na foz do rio Doce (P4: julho/2018; P5: fevereiro/2019 e setembro/2019 P6: março/2020 e setembro/2020 – DADOS PRIMÁRIOS) e zona costeira adjacente. Linhas tracejadas (valores máximos de densidade) = verde – densidade máxima pré-desastre (P0); vermelha – densidade máxima pós-desastre (P1/P2); laranja – densidade máxima pós-desastre (P4); preta – densidade máxima pós-desastre (P5).



Na segmentação temporal do presente relatório (P5 - janeiro/2019 a dezembro/2019), conforme os dados secundários (RRDM/UFES/FEST, 2019 - dados de abril/2019 a setembro/2019), o valor máximo de densidade entre os pontos amostrais foi de 43.485 org.m^{-3} , ou seja, maior que o observado nos dados secundários no período anterior (P4). Verificando os dados primários do Lactec em P5 (dados de fevereiro de 2019 e setembro de 2019 – P5), a densidade máxima entre os pontos amostrais chegou a 139.890 org.m^{-3} (linha tracejada preta na Figura 34), bem maior que a densidade máxima verificada em P4, porém ainda inferior ao pico registrado em P1/P2. Os valores mais altos de densidades registrados nos períodos P4/P5 em relação ao período P0 podem estar relacionados também ao maior esforço amostral durante estes anos. Em P6 houve queda na densidade quando comparada com P5, tanto nos dados secundários quanto nos dados primários. Assim em P6, conforme dados secundários (RRDM/UFES/FEST, 2020 - dados de janeiro a março de 2020), a densidade máxima alcançou 3.708 org.m^{-3} entre os pontos amostrais. Já os dados primários do Lactec (dados de março de 2020 e setembro de 2020 – P6) mostraram valor máximo de densidade de 44.100 org.m^{-3} entre os pontos amostrais (linha tracejada rosa na Figura 34).

Para melhor visualização da flutuação da densidade total do zooplâncton entre os dados primários e os dados secundários ao longo do tempo (P0, P1/P2, P4, P5 e P6) na área de estudo, optou-se por mostrar os valores de densidade em escala logarítmica Log, como aponta o gráfico de densidade na Figura 34.

A flutuação na densidade máxima verificada no zooplâncton registrado no ambiente marinho em estudo ao longo do tempo, sugere que o pico no número de organismos logo após o desastre foi

o resultado de um dano agudo no ambiente. Apesar do declínio na densidade nos períodos subsequentes ao desastre, voltou a haver um aumento nos valores, e não se pode afirmar que a comunidade zooplânctônica chegou aos patamares anteriores à chegada da lama de rejeito de minérios, deixando evidente a necessidade de mais estudos, com maior frequência e de longo prazo na região da foz do rio Doce e sua área marinha adjacente.

Observando os dados primários em P4, P5 e P6 obtidos pelo Lactec (2018/2020), pôde-se verificar que a densidade zooplânctônica apresentou variação entre as campanhas de coleta (Figura 34 - colunas azuis representam a densidade total por ponto amostral dos dados primários entre 2018 e 2020) no ambiente marinho. Entre os anos de 2018 e 2020, as maiores densidades estiveram associadas ao período seco e as menores ao período chuvoso. Assim, em julho de 2018 e em setembro de 2019 (período seco) houve maior densidade comparando com a de fevereiro de 2019 e de março de 2020 (período chuvoso), quando houve menor densidade de zooplâncton na área em estudo. No entanto em setembro de 2020 (período seco) houve a menor densidade zooplânctônica registrada pelos dados primários na área de estudo, desde a primeira campanha em julho de 2018. Por outro lado houve aumento no número de *taxa* zooplânctônica chegando ao valor médio de 18 *taxa* em setembro de 2020, acompanhando o período de julho de 2018 com média de 25 *taxa* entre os pontos amostrais, o maior número até o momento (detalhes no item COMUNIDADE ZOOPLANCTÔNICA dos DOCUMENTOS SUPLEMENTARES).

Chuvas intensas ocorreram na bacia do rio Doce e no estado do Espírito Santo no final de janeiro de 2020 ocasionando grande cheia e aumento da vazão de água fluvial, o que pode ter dispersado o plâncton e portanto, causado o declínio no número de organismos do zooplâncton em março de 2020 (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020i). De fato, a baixa densidade em março de 2020 também foi observada em fevereiro de 2019, campanha que também foi realizada no período chuvoso e isso sugere que as condições hidrológicas nestes eventos podem influenciar na queda da densidade zooplânctônica na região em estudo. Estudos em outras regiões do Brasil mostraram esse comportamento, como o monitoramento do zooplâncton no médio e baixo estuário do rio Itajaí Açu (Itajaí, Santa Catarina) assim como na região da sua foz, durante os anos de 2011 e 2020 (ACQUAPLAN, 2017 – ATLAS; ACQUAPLAN, 2020 – EIA TGLI). Na região da Amazônia Central, Fischer (1978) mostrou que a densidade do fitoplâncton foi menor em períodos de menor luminosidade durante as chuvas intensas no local, o que refletiu na menor representatividade do zooplâncton. Já na região da foz do rio Amazonas, foi principalmente a dispersão no período chuvoso, que causou o declínio na densidade de organismos zooplânctônicos (e.g. larvas Decapoda), conforme relatou Silva (2017). Dias et al (2015) também verificaram os menores valores de densidade do zooplâncton durante o período chuvoso nos sistemas marinhos costeiros entre o litoral do Rio de Janeiro e do Espírito Santo. Com tais variações observadas, é possível associar as menores densidades do zooplâncton ao período chuvoso na região da foz do rio Doce e sua área marinha adjacente. Avaliando as diferenças entre o período seco e chuvoso quanto à densidade zooplânctônica, era de se esperar que durante o desastre (novembro de 2015), por ser um período chuvoso, a densidade do zooplâncton sofresse declínio na região da foz do rio Doce e sua área marinha adjacente. Entretanto o contrário foi observado já que foi detectado pico na densidade do zooplâncton na área de estudo, o que dá mais peso ao dano agudo sofrido pelo zooplâncton com a chegada da lama de rejeito de minérios na foz do rio Doce, após o rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG).

Quanto às variações das densidades entre os pontos amostrais (detalhes no Documento Suplementar COMUNIDADE ZOOPLANCTÔNICA) e seus respectivos compartimentos nos dados primários, coletados pelo Lactec durante o período P4, o compartimento 5-A teve a maior densidade associada ao ponto amostral C6 em julho de 2018 (período seco). Já em P5 a campanha de setembro de 2019 (período seco) teve a maior densidade do período e se deu no ponto C12 (Compartimento 5 – D). Para P6, março de 2020 (período chuvoso) teve a maior densidade do período e o maior valor se deu no ponto C3, compartimento 5-A, localizado em frente à desembocadura do rio Doce.

De um modo geral a densidade do zooplâncton pareceu diminuir durante o período chuvoso (fevereiro/2019 e março/2020), o que pode estar associado ao aumento da vazão de água fluvial proveniente do rio Doce, dispersando os organismos e causando seu declínio na região de estudo. Na região da foz do rio Doce, os dados brutos dos trabalhos realizados em P4 pela Rede Rio Doce Mar (RRDM/UFES/FEST, 2019) apontaram os valores máximos de densidade do zooplâncton durante o período chuvoso no compartimento 5-B1. Em P5 apontaram os valores máximos de densidade também no período chuvoso, porém no compartimento 5-B2. Já em P6, também no período chuvoso a densidade zooplanctônica foi maior no compartimento 5-F.

Para a avaliação do dano relacionado à alteração na composição das espécies zooplanctônicas ao longo do tempo seguiu-se as diretrizes metodológicas utilizada no diagnóstico de danos (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020e), onde foram comparadas as espécies representativas (muito frequente e/ou abundantes) dos períodos pós-desastre com as espécies representativas (muito frequente e/ou abundantes) do grupo Copepoda no período pré-desastre. Na Tabela 14 podem ser visualizadas as espécies representativas de Copepoda no período pré-desastre (P0) e dentre estas, as que foram representativas nos quatro períodos pós desastre (P1/P2, P4, P5 e P6). O levantamento de dados coletados em P0 resultou em 24 espécies representativas de Copepoda no ambiente marinho durante P0 (pré-desastre). Após o desastre, durante P1/P2, P4 e P5 foram identificadas, respectivamente, apenas oito (8), treze (13) e onze (11) das espécies representativas em P0, evidenciando uma alteração no padrão de ocorrência do zooplâncton do ambiente avaliado.

Maiores detalhes quanto às informações de distribuição geográfica e de preferências ecológicas das espécies representativas de Copepoda verificadas pelos dados primários de Lactec entre 2018 e 2020 podem ser encontrados no Documento Suplementar COMUNIDADE ZOOPLANCTÔNICA.

Tabela 14 – Variação da ocorrência das espécies representativas (muito frequente e/ou abundante) de Copepoda entre os períodos P0, P1/P2, P4, P5 e P6 no Ambiente Marinho.

Ambiente Marinho					
Copepoda	Pré Desastre (P0)	Pós Desastre (P1/P2)	Pós Desastre (P4)	Pós Desastre (P5)	Pós Desastre (P6)
<i>Acartia lilljeborgi</i>	x				
<i>Acartia tonsa</i>	x				
<i>Calanopia americana</i>	x		x	x	x
<i>Centropages velificatus</i>	x	x	x		
<i>Clausocalanus furcatus</i>	x		x		
<i>Corycaeus speciosus</i>	x				

Ambiente Marinho					
Copepoda	Pré Desastre (P0)	Pós Desastre (P1/P2)	Pós Desastre (P4)	Pós Desastre (P5)	Pós Desastre (P6)
<i>Euterpina acutifrons</i>	x		x	x	x
<i>Farranula gracilis</i>	x				
<i>Mecynocera clausi</i>	x				
<i>Nannocalanus minor</i>	x				
<i>Oithona hebes</i>	x	x	x	x	x
<i>Oithona nana</i>	x	x	x		x
<i>Oithona c.f. plumifera</i>	x		x	x	x
<i>Oithona similis</i>	x				
<i>Oncaea mediterranea</i>	x				
<i>Oncaea venusta</i>	x				
<i>Onychocorycaeus giesbrechti</i>	x	x	x	x	x
<i>Paracalanus cf parvus</i>	x		x	x	x
<i>Paracalanus quasimodo</i>	x	x	x	x	
<i>Parvocalanus crassirostris</i>	x		x	x	x
<i>Parvocalanus scotti</i>	x	x		x	
<i>Temora stylifera</i>	x	x	x	x	x
<i>Temora turbinata</i>	x	x	x	x	x
<i>Undinula vulgaris</i>	x				

Para os dados secundários que foram coletados no período P6 (pós desastre) as informações quanto à representatividade de espécies de Copepoda, quando disponíveis, apontaram *Calanopia americana*, *Oithona nana*, *Oithona cf plumifera*, *Onychocorycaeus giesbrechti*, *Paracalanus cf parvus*, *Temora stylifera* e *Temora turbinata* (Tabela 14) como muito frequente e/ou abundante entre janeiro de 2020 e março de 2020 (RRDM/UFES/FEST, 2020). Já os dados primários (março/2020 e setembro/2020), referentes ao período P6 apontaram as espécies *Euterpina acutifrons*, *Oithona hebes*, *Parvocalanus crassirostris* e *Temora turbinata* como muito frequente e/ou abundante (Tabela 14) durante o período P6 na área de estudo em questão. Comparando estas espécies com a composição zooplancônica registrada antes do desastre, em P0, somente 10 espécies ocorreram em P6, o que mostra que consideráveis diferenças na comunidade zooplancônica foram observadas em P1/P2, P4, P5 e, novamente, observadas no período P6. Maiores detalhes das diferenças na composição das espécies representativas de zooplâncton, entre os distintos períodos, são expostos nos parágrafos a seguir.

No ambiente marinho, levantamentos foram realizados por Brandini et al. (1997) quanto à comunidade zooplancônica da região oceânica da cadeia Vitória – Trindade e também na região marinha do arquipélago de Abrolhos. Assim tais autores apontaram as espécies representativas durante o período pré-desastre (P0), *F. gracilis*, *M. clausi*, *O. similis*, *O. venusta* na cadeia Vitória – Trindade e as espécies *O. giesbrechti*, *P. quasimodo* e *T. stylifera* como representativas, porém na região do arquipélago de Abrolhos. Já o trabalho de Ekau (1999), na região do banco de Abrolhos, registrou o domínio de *C. americana*, *C. furcatus*, *C. speciosus*, *F. gracilis*, *O. c.f. plumifera*, *O. mediterranea*, *O. giesbrechti*, *N. minor*, *T. stylifera* e *U. vulgaris* também durante o período pré-desastre (P0). Em P1/P2 não foram encontradas informações e somente em P4 (2018), houve o trabalho de Fest (2019d – campanha semestral 2018) na

região do banco de Abrolhos, onde apontou *O. nana* como espécie representativa. Já em P5 houve uma campanha em abril de 2019 conforme os dados brutos provenientes do trabalho da Rede Rio Doce Mar (RRDM/UFES/FEST, 2019) que apontou como dominantes as espécies *Oithona nana* e *Oithona oculata*. Para P6 os dados tomados em 2020 mostraram os copepodas *Paracalanus cf parvus* e *Temora stylifera* como o zooplâncton representativo nos pontos amostrais da região do banco de Abrolhos (RRDM/UFES/FEST, 2020 – dados brutos).

Dentre as espécies representativas, porém com menor frequência de ocorrência, segundo os trabalhos que descrevem tal informação, os copépodes *Clausocalanus furcatus* e *Nannocalanus minor* (EKAU, 1999), *P. crassirostris* e *O. hebes* (CEPEMAR, 2011) foram os menos frequentes em P0. Já em P1/P2, *Centropages velificatus*, *Oithona hebes*, *Parvocalanus scotti*, *Temora stylifera* e *Temora turbinata* foram as menos frequentes no levantamento realizado por UFES (2017). Em P4 *Oncaea venusta* foi uma espécie pouco frequente conforme os dados brutos da Rede Rio Doce Mar (RRDM/UFES/FEST, 2019), assim como *Acartia lilljeborgi*, *Farranula gracilis*, *Clausocalanus furcatus* entre outras espécies. Em P5 *Oithona hebes*, *O. nana*, *O. plumifera* e outras tiveram menor representatividade nos dados brutos da Rede Rio Doce Mar e em P6 *C. furcatus*, *O. plumifera*, *O. giesbrechti* e outros organismos foram menos frequentes na área marinha conforme estes dados secundários. Já nos dados primários, em P4, *C. furcatus*, *O. plumifera*, *A. lilljeborgi* foram menos frequentes. Em P5 foram *O. giesbrechti*, *C. velificatus*, *A. lilljeborgi* dentre outros e em P6 *Euterpina acutifrons*, *O. oswaldocruzi*, *P. scottii* e outros também tiveram queda na frequência de ocorrência entre os pontos amostrais na área marinha em estudo.

A ocorrência das espécies representativas e menos frequentes em P0, P1/P2, P4, P5 e P6 deve ser observada com cuidado, pois seus registros futuros podem voltar a ser frequentes na região ao longo do tempo, visto que algumas (e.g. *C. americana*, *E. acutifrons*) que não ocorreram em P1/P2, tornaram a ser muito frequentes em P4, P5 e P6. Isso mostra que as espécies representativas, porém menos frequentes, têm grande probabilidade em se tornar muito frequentes como as outras, caso ocorra uma recuperação do ambiente e da comunidade zooplanctônica, já que são típicas do litoral do Brasil, indicam águas costeiras (BOLTOVSKOY, 1981 e 1999) e constituem importantes elos na cadeia trófica marinha (BRANDINI et al., 1997; BONECKER, 2006; BONECKER et al., 2014). Quanto aos gêneros *Paracalanus* e *Temora* que dominaram a área de estudo ao longo do tempo, são organismos abundantes em ambientes tropicais e subtropicais com hábito alimentar preferencialmente herbívoro (MENEZES; MACEDO-SOARES; FREIRA, 2019). É oportuno esclarecer que os dados primários têm a caracterização do zooplâncton apresentada em detalhes no Documento Suplementar COMUNIDADE ZOOPLANCTÔNICA.

Ao considerar os dados secundários, tanto aqueles que nortearam a linha base para o período pré-desastre (P0) quanto para o período pós-desastre (P1/P2, P4, P5 e P6), foi observada certa alteração nas espécies representativas que compõem o zooplâncton da área marinha. Por exemplo, em P1/P2 houve o surgimento de outras espécies, como os copépodes *Oithona nana* e *Parvocalanus scotti* que foram os dominantes na área, logo após a chegada da lama de rejeito de minério na região da foz do rio Doce e sua área costeira adjacente (FERNANDES; PEREIRA, 2016 *apud* UFES, 2017) e que não haviam

sido registradas neste local antes do desastre, sugerem uma resposta da comunidade zooplanctônica frente às novas condições. A flutuação das espécies representativas em P0 ao longo do tempo em P1/P2, P4, P5 e P6 é outra evidência da alteração da composição da comunidade zooplanctônica com ausência e presença periódica das espécies e que pode estar associada às condições ambientais com a chegada da lama de rejeito de minérios. A perda da biodiversidade (perda de espécies), mesmo que momentânea, pode levar ao desequilíbrio da comunidade e refletir em toda a cadeia alimentar e alcançar os níveis tróficos superiores representados pelos carnívoros, como por exemplo peixes de interesse comercial. O retorno da ocorrência de espécies representativas também pode acontecer, como o que foi observado para *C. americana*, *E. acutifrons*, *O. cf plumifera*, *P. cf. parvus* e *P. crassirostris* que foram representativos em P0 e assim, voltaram a ser muito frequentes e/ou abundantes na área do estudo em P4, P5 e P6. Tal registro não permite a confirmação de recuperação do ambiente aos níveis originais de pré-desastre (P0), visto que outras espécies representativas ainda não foram registradas ou foram registradas de modo pontual durante o pós-desastre, como o que ocorreu com *C. furcatus* observado em P4 somente. Já *A. lilljeborgi*, *A. tonsa*, *C. speciosus*, *F. gracilis*, *M. clausi*, *N. minor*, *O. similis*, *O. mediterrânea*, *O. venusta* e *U. vulgaris* ainda não foram registradas no ambiente marinho após o desastre da Samarco, o que denota mais uma vez a importância da continuidade dos estudos a longo prazo quando o zooplâncton pode ser um indicador das condições hidrológicas e de impacto ambiental na área de estudo em questão.

Independente da importância ecológica de cada espécie, a alteração na representatividade pode indicar defasagem na composição específica, comparando com todo o universo de espécies registradas durante o período investigado. Esta possível perda da biodiversidade sugere que os efeitos da pluma de rejeitos (e.g. alta concentração de material em suspensão, presença de metais no ambiente, etc.) podem ser limitantes ao estabelecimento original da biota zooplanctônica até o momento atual. No entanto, em virtude da complexidade das relações da biota aquática com o meio no qual está inserida, somada ainda a magnitude do desastre ambiental sob investigação, se faz necessários estudos de longo prazo a fim de evitar a possível subestimação das espécies zooplanctônicas e as lacunas existentes quanto à compreensão dos danos e sua evolução até o cenário atual.

No que tange aos danos sobre a comunidade zooplanctônica devido à presença da pluma de rejeitos de minérios que alcançou o litoral do Espírito Santo em novembro de 2015, a alteração na composição de espécies, além da alteração na sua densidade, podem ser evidências dos danos sofridos.

Vale destacar que espécies de Copepoda e de outros grandes grupos vêm sendo utilizadas como indicadoras hidrológicas e/ou de impacto ambiental por Resgalla (2001), Veado (2008; 2017) apontando então, a importância destes organismos em avaliações das condições ambientais sujeitas a interferências naturais e antrópicas e, no caso do presente estudo, dos efeitos do desastre da Samarco. Somado a isto, as espécies representativas que ocorreram somente durante o período pré-desastre intensificam a necessidade de estudos futuros que avaliem as possíveis consequências da presença da pluma de rejeitos sobre a fauna zooplanctônica e sua possível recuperação aos níveis originais do período pré-desastre.

2.2.3.2 Aumento da concentração de Elementos Potencialmente Tóxicos – EPTs no zooplâncton marinho

A concentração dos EPTs foi avaliada por meio de dados secundários e de modo qualitativo, pois assim como as demais variáveis apresentadas, havia poucos dados disponíveis sobre tal condição e, portanto, impossibilitou também a classificação da gravidade do dano sobre o zooplâncton.

Conforme detalhado em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), o aumento de EPTs na água também refletiu no aumento de EPTs nos organismos zooplanctônicos, especialmente em amostras obtidas mais próximas da foz do rio Doce entre 2016 e 2018. As maiores concentrações foram de As, Cr, Fe e Mn na região da foz do rio Doce. O Fe foi o EPT que continuou a aumentar ao longo do tempo e os níveis de lipoperoxidação, que é a resposta ao estresse fisiológico ao qual o zooplâncton está sujeito, acompanharam a flutuação das concentrações de EPTs no ambiente (ICMBio, 2016d; FAURG, 2016a). O mesmo foi observado por Fest (2019b) em seus dados coletados em setembro e outubro de 2018 que mostraram a presença de Cr, Fe e Mn tanto na biota quanto no ambiente, assim como Hg e Zn na água e os efeitos sobre a biota acompanharam os agrupamentos destes EPTs na região em estudo. Isto sugere a grande influência do aporte fluvial, proveniente do rio Doce, na distribuição destes elementos pelo ambiente marinho costeiro e sua exposição aos organismos presentes na área, principalmente nos pontos mais próximos à foz do rio Doce.

Quanto ao acúmulo de EPTs na biota registrado nos dados coletados no início de 2019 (janeiro/fevereiro de 2019), o relatório anual da Rede Rio Doce Mar (RRDM/UFES/FEST, 2019 – RT 17) mostrou que as concentrações de Fe foram maiores no zooplâncton na região da foz, tanto na campanha 1 (set/ou18 – estação seca) quanto na campanha 2 (jan/fev19 – estação chuvosa) quando comparadas com as concentrações anteriores ao rompimento da barragem. Na campanha 1 estavam 3x maiores e na campanha 2 estavam 14x maiores. O cromo (Cr) também teve acréscimo na concentração na água após o rompimento da barragem de Fundão (Mariana, MG) e, considerando sua concentração no zooplâncton na região da foz, o Cr apresentou leve declínio ao longo do tempo, ou seja, na campanha 1 esteve 4x maior e na campanha 2 esteve 2x maior que a concentração detectada antes do rompimento.

Com relação aos níveis de lipoperoxidação (biomarcador) também foi possível detectar o aumento dos valores de lipoperoxidação acompanhando os valores de bioacumulação (IBR bioacumulação: Índice integrado de Respostas de Biomarcadores - do inglês *Index of Biomarkers Responses*) no zooplâncton na região da foz (RRDM, 2019 – RT 28) (Tabela 15 – valores em vermelho), o que está condizente com as maiores concentrações de metais observadas na região de estudo, principalmente quanto ao Fe. Este elemento está associado a maiores níveis de estresse do zooplâncton assim como os metais Cd e Cu na região da foz e também da APA (Costa das Algas), principalmente na campanha 2 (jan/fev19).

Tabela 15 – Valores de IBR bioacumulação calculados a partir dos dados de EPTs determinados no plâncton coletado no monitoramento marinho durante as campanha 1, 2 e no períodos pré-rompimento da barragem de Fundão (IBR bioacumulação pretérita). Os valores em vermelho indicam aumento no valor do IBR bioacumulação, em relação ao respectivo valor do IBR bioacumulação pretérita. Fonte: adaptado de RRDM/FEST/UFES, 2019.

Valores de IBR bioacumulação		
Campanha	Setor	Plâncton
Pré-desastre	IBR pretérito	0,32
1	FOZ	0,45
(set-out/2018)	Norte	4,58
	Sul	0,94
2	FOZ	2,54
(jan-fev/2019)	Norte	2,07
	Sul	0,91

Os resultados dos testes de toxicidade deixam evidentes que as concentrações de EPTs no ambiente são acumuladas em níveis elevados pelo zooplâncton, mesmo quatro anos após a chegada da lama de rejeito de minérios na região da foz do rio Doce. Isso indicava que há biodisponibilização de Fe e Cr na região marinha pelo desastre e pelo alto nível de Fe no zooplâncton, que foi maior na campanha 2, pode estar associado ao maior aporte deste elemento em função das chuvas (jan/fev 2019 – período chuvoso). A pluviosidade pode acarretar no transporte de material continental além da remobilização daquele sedimentado nas margens, em direção à calha do rio Doce, incluindo os contaminantes que chegam à foz e à região costeira e marinha adjacente (RRDM/FEST/UFES, 2019 – RT 17). As concentrações observadas no relatório de toxicidade da Rede Rio Doce Mar parecem estar diretamente relacionadas à presença da lama de rejeito de minérios, visto as diferenças apontadas entre os dados pré e pós desastre, fato que aumenta a importância de estudos futuros sobre o tema na região em estudo.

Considerando a região de Abrolhos onde foram encontrados elevados níveis de bioacumulação de alguns metais, especialmente As, Cr, Fe e Pb (ICMBio, 2016d; FAURG, 2016a) os dados coletados pela Rede Rio Doce Mar apontaram maiores valores de Fe, Cd e Cr, principalmente na campanha 2 (jan/fev2019). O período chuvoso foi associado a este padrão com o aumento de concentrações de alguns metais como consequência do aporte continental chegando à região costeira e atingindo também recifes de coral sob influência da desembocadura de rios, como é o caso do banco de Abrolhos (RRDM/FEST/UFES, 2019 – RT 17).

O processo de bioacumulação de EPTs pelo zooplâncton é fator de risco ao equilíbrio ambiental ainda mais com potencial de biomagnificação, ou seja, com potencial de acúmulo progressivo ao longo da cadeia trófica, partindo do plâncton e chegando inclusive ao ser humano. O zooplâncton contaminado por esses elementos é predado pelos peixes menores e planctófagos (e.g. anchova e sardinha) que, por sua vez, são predados pelos peixes maiores e carnívoros (e.g. atum), normalmente, consumidos pelo homem, onde a concentração de EPTs se torna maior.

2.2.4 CENÁRIO DE DANOS

Os danos detectados para a comunidade zooplanctônica do Ambiente Marinho foram a) a alteração na composição das espécies representativas de Copepoda; b) a alteração na densidade do zooplâncton e c) o aumento na concentração de EPTs no zooplâncton entre os períodos pré-desastre (P0) e pós-desastre (P1/P2, P4, P5 e P6) na região da foz do rio Doce e sua área marinha adjacente. A densidade do zooplâncton foi intensamente afetada logo após o desastre com o pico na densidade, principalmente relacionado à contribuição de somente duas espécies de Copepoda. Mesmo após quatro anos da chegada da lama de rejeitos de minérios na zona costeira do rio Doce (21 de novembro de 2015), a alteração na ocorrência das espécies pôde ser observada, assim como o aumento da concentração de EPTs (2015-2019) no zooplâncton. Embora os danos não tenham sido mensurados em função da escassez de dados, o que tornaria a sua classificação frágil, pode ser que haja redução dos danos. Principalmente no que tange à densidade e à composição das espécies do zooplâncton, é possível haver a recuperação da comunidade zooplanctônica caso haja no local, o restabelecimento das espécies comumente registradas, durante o período pré-desastre.

Com relação ao quadro atual, a alteração observada tanto na densidade do zooplâncton quanto nas espécies de Copepoda pode desencadear alterações nos níveis tróficos superiores, pois distintas espécies variam em tamanho e valor nutricional para os seus predadores, como larvas de mosquitos (e.g. *Chaoborus*) e peixes zooplanctófagos. Porém medidas de correção não são recomendáveis à comunidade zooplanctônica em virtude da complexidade de fatores que influenciam a comunidade em nível temporal e espacial, além da escassez de metodologias para cultivo de espécies que poderiam recolonizar o ambiente e de informações quanto às consequências desta recolonização artificial do zooplâncton nos corpos d'água atingidos pela lama de rejeitos de minérios, visto ainda que tal impacto ambiental é inédito no país.

Em virtude do exposto acima, se torna prematuro definir a tendência de evolução a partir de 2018 (dados primários) e qual o tempo previsto para sua recuperação em níveis originais anteriores ao desastre para a comunidade zooplanctônica na foz do rio Doce e sua área marinha adjacente. Os eventos pluviométricos e a dinâmica ambiental típica dos ambientes estuarinos e ambientes marinhos ainda podem resultar em condições semelhantes às encontradas durante a chegada da lama de rejeitos de minérios no local do estudo em função da drenagem superficial do sedimento lamoso e, consequentemente, seu aporte no rio Doce e área marinha adjacente, além da remobilização do sedimento depositado no fundo em eventos de ressacas e de condições extremas de correntes marinhas, tornando os metais disponíveis à biota na coluna de água.

As consequências futuras podem ser em nível de indivíduo, de população, de comunidade e de ecossistema, mas somente estudos de longo prazo poderão fornecer as respostas e mostrar o padrão de comportamento da estrutura da biota aquática da região da foz do rio Doce e sua área marinha adjacente.

2.2.5 CONCLUSÕES

A avaliação do fitoplâncton da região costeira e marinha adjacente à foz do rio Doce permitiu constatar que a lama de rejeitos, proveniente da barragem de Fundão, causou danos expressivos à esta comunidade. Entretanto, a indisponibilidade dos valores brutos dos parâmetros avaliados nas análises

secundárias do fitoplâncton (densidade, clorofila, feopigmentos e diversidade de espécies), bem como o início tardio e descontínuo das amostragens de dados primários, impossibilitaram a mensuração dos danos causados aos organismos fitoplanctônicos.

A chegada da lama de rejeitos à costa capixaba, em novembro de 2015, ocasionou diversas alterações ambientais na região costeira próxima à foz do rio Doce, dentre elas: o carreamento de espécies dulcícolas, o aumento da turbidez da água pela grande quantidade de partículas em suspensão, e o aumento das concentrações de nutrientes e EPTs. Estas modificações, por sua vez, causaram alterações profundas na composição e estrutura da comunidade fitoplanctônica, os quais continuaram a ser verificadas mesmo depois de anos após o desastre.

Dados recentes, obtidos com o monitoramento realizado entre 2018 e 2019, demonstraram uma diminuição na densidade fitoplanctônica em relação ao primeiro ano de pós-desastre (dezembro/2015 a dezembro/2016), porém estes valores permaneceram acima dos registrados em estudos de linha-base. Também, foi verificado que em períodos de maior pluviosidade há um aumento expressivo no número de organismos, uma vez que, o maior volume de água que chega pela foz do rio Doce ocasiona o enriquecimento da região costeira e a ressuspensão do sedimento já depositado no fundo do ambiente. Cianobactérias e clorofíceas nanoplanctônicas de água doce, de crescimento rápido e mais tolerantes à turbidez, continuaram a ocorrer em maior abundância, substituindo as espécies marinhas que anteriormente eram encontradas na região, como as haptófitas. Estas alterações na composição (predominância de espécies) e estrutura (riqueza e densidade) da comunidade, provavelmente modificaram as taxas de predação dos organismos fotossintetizantes. Uma vez que as microalgas constituem a base da cadeia alimentar nos ecossistemas aquáticos, qualquer alteração na comunidade poderá ser refletida nos níveis da cadeia alimentar.

Com base nos resultados da avaliação do fitoplâncton marinho, constatou-se que a comunidade continua alterada e respondendo aos danos causados pelos rejeitos de minério na região. Acredita-se que o restabelecimento do fitoplâncton marinho às suas condições originais será lento, uma vez que eventos de maior pluviosidade parecem repetir, em menor escala, os distúrbios originados pelo desastre.

Em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), logo após a chegada da pluma de rejeitos à foz do rio Doce (P1/P2) foi identificado através de dados secundários coletados pela UFES (UFES, 2017) um aumento pronunciado da densidade de organismos zooplanctônicos, com valores nunca antes observados na região, como a densidade de 222.959 org. m⁻³, que é o valor máximo obtido no ponto amostral na região da foz do rio Doce. Aproximadamente 80% desta densidade consistiam de apenas duas espécies, *Oithona nana* e *Parvocalanus scotti*, provavelmente as espécies mais resistentes às novas condições do ambiente em P1/P2. Com exceção deste pico na densidade do zooplâncton em P1/P2, todos os valores máximos de densidade, registrados por dados primários e secundários, diminuíram nos períodos subsequentes (P4, P5 e P6), sendo no P5 o registro do maior valor máximo na densidade do zooplâncton, mas ainda abaixo do pico registrado em P1/P2. Mesmo com este declínio na densidade máxima, os valores ainda não alcançaram os patamares de linha-base que teve valor máximo de 1.987 org. m⁻³.

O grupo Copepoda foi utilizado como indicador do dano da alteração da composição de espécies, por serem organismos importantes nos ambientes aquáticos e se mostraram dominantes no

zooplâncton. Foi possível observar que as espécies representativas (muito frequentes e/ou abundantes) de Copepoda no período pré-desastre (P0), não mantiveram o seu padrão de ocorrência em P1/P2, P4, P5 e P6 na área de estudo. Dentre as espécies representativas, aquelas menos frequentes, como *Clausocalanus furcatus*, *Nannocalanus minor*, *P. crassirostris*, *O. hebes* e outras podem se tornar muito frequentes na área de estudo, por isso merecem atenção em levantamentos futuros. Destaque para as espécies *A. lilljeborgi*, *A. tonsa*, *C. speciosus*, *F. gracilis*, *M. clausi*, *N. minor*, *O. similis*, *O. venusta* e *Undinula vulgaris* que foram registrados somente durante o período pré-desastre (P0) e assim, seus registros futuros devem ser destacados. Outras espécies representativas em P0 tornaram a ser registradas como muito frequentes e/ou abundantes no ambiente em estudo, como *C. americana*, *E. acutifrons*, *O. cf. plumifera*, *P. cf. parvus* e *P. crassirostris*, o que mostra a importância em realizar estudos do zooplâncton ao longo do tempo, já que são organismos que respondem rapidamente às condições ambientais e suas variações, antrópicas ou não.

A concentração de EPTs na água continuou a refletir no aumento de alguns elementos nos organismos zooplânctônicos, segundo os últimos dados gerados entre setembro e outubro de 2019 pela RRDM/UFES/FEST (2019), especialmente aquelas amostras obtidas mais próximas da foz do rio Doce. Isto sugere a grande influência do aporte fluvial, proveniente do rio Doce, na distribuição destes elementos pelo ambiente marinho costeiro e sua exposição aos organismos presentes na área. Através dos dados secundários (2015-2019) foi possível observar que para os EPTs avaliados, houve aumento das concentrações, principalmente de Fe na região da foz. Como resposta, os níveis de lipoperoxidação também aumentaram, refletindo o estresse fisiológico ao qual o zooplâncton está sujeito com presença de EPTs na foz do rio Doce. Segundo a avaliação quanto aos testes de toxicidade da RRDM (2019), as altas concentrações de EPTs nos organismos testes do zooplâncton estiveram diretamente relacionadas à presença da lama de rejeito de minérios quando comparadas às concentrações obtidas em análises pretéritas ao desastre da Samarco.

A presente análise de acompanhando dos danos ao plâncton deixa evidente que as alterações provocadas pelo desastre e chegada de rejeitos ao mar continuam ocorrendo, e pra uma melhor compreensão da ecologia dos ambientes marinhos e alterações frente ao desastre da Samarco, se faz necessário o emprego de estudos em longo prazo contemplando a comunidade planctônica.

2.3 DANOS ASSOCIADOS AO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

A chegada do rejeito na região costeira, em 21 de novembro de 2015, gerou um incremento no lançamento de sedimentos em suspensão e, conseqüentemente, na deposição de sedimentos. Foram considerados como danos do transporte de sedimentos o aumento da concentração de sedimento em suspensão e a sua deposição, além do natural, no fundo do mar (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e). O aumento da concentração de sólidos em suspensão foi avaliado no conjunto dos parâmetros de qualidade de água no item 2.1. Neste relatório é avaliada a deposição de sedimentos.

No contexto dos danos ocasionados pelo rompimento da barragem de Fundão, o Lactec elaborou o diagnóstico do dano para deposição de sedimentos no ambiente costeiro, baseado em dados secundários anteriores e posteriores ao desastre. Um estudo de modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos foi realizado com o objetivo de se estimar a espessura da deposição de sedimentos

na área costeira devido ao desastre, compreendendo o período de aproximadamente um ano após a ocorrência do rompimento da barragem (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e). Foram obtidos resultados que mostraram que a deposição de sedimentos foi, pelo menos, seis vezes superior à natural em 61,6% da área atingida. A partir desta avaliação, o dano da deposição de sedimentos foi classificado como gravíssimo, com tendência de redução, dado que o aporte de sólidos do ambiente fluvial também tende a reduzir. Quanto a reversibilidade, o dano foi classificado como irreversível, dado que não há tecnologia para remoção do rejeito misturado ao sedimento marinho no ambiente costeiro.

O presente relatório traz resultados do acompanhamento do dano da deposição de sedimentos no ambiente costeiro, no período compreendido entre o desastre e o ano de 2019. Foram utilizados dados de estações fluviométricas da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e dados de concentração de sólidos suspensos provenientes da Fundação Renova, descritos na sequência. O acompanhamento do dano foi realizado a partir de uma estimativa dos aportes de sedimentos à área costeira apenas provenientes do desastre (até 2019) que contribuíram para o dano da deposição de sedimentos, assim como uma avaliação da evolução deste dano ao longo do tempo.

2.3.1 METODOLOGIA

A determinação da área e da quantidade de material depositado no ambiente costeiro, devido ao rompimento da barragem de Fundão, foi inicialmente realizada por meio de simulações matemáticas de um cenário hipotético, onde não ocorreu o rompimento, para calcular a área e a espessura da deposição que ocorreria naturalmente; e outro cenário, incluindo os efeitos do desastre. O software utilizado e detalhes da metodologia foram apresentados no relatório de Diagnóstico, e estão detalhados no item 6.5 do TOMO I – Contextualização (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020b). Para a estimativa da deposição, foi utilizada a concentração de sólidos suspensos vindos do rio Doce. A modelagem, porém, considerou somente o período de 21/10/2015 a 20/10/2016.

Para o acompanhamento do dano foram utilizados três métodos:

- Identificação de tendências nos resultados da modelagem para extrapolações futuras;
- Cálculo de balanço de massa pelo domínio;
- Cálculo de cargas.

O primeiro método, da **identificação de tendências na modelagem**, foi baseado na análise das taxas de erosão e deposição do sedimento oriundo do desastre. Para toda área modelada, foram feitas séries temporais especificamente das taxas de erosão para analisar o tempo necessário para que todo sedimento do desastre fosse erodido naturalmente. Este método, porém, se mostrou pouco conclusivo, já que a erosão em uma região significa que o material foi ressuspensionado e pode depositar em outra região aumentando o dano nesse local. O método, porém, mostrou que embora haja ressuspensão do material do fundo, especialmente em regiões rasas, a mesma precisa atuar nas áreas afetadas por muitas décadas para remobilizar todo o material depositado adicionalmente devido ao desastre. Isto também foi observado por MAGRIS et al. (2019) que modelaram um período até 2029.

O segundo método, o **cálculo de balanço de massa pelo domínio**, foi baseado na análise da variação temporal da massa de sedimento oriundo do desastre sendo transportado para fora do domínio

modelado, conforme o estudo de modelagem hidrodinâmica da área costeira apresentado em Brasil (MPF)/ Lactec (2020b). Porém, da mesma maneira como no método anterior, uma saída de massa do domínio (a qual inclusive pode variar de simulação para simulação) somente permite quantificar quanto da massa de sedimento do desastre saiu de uma região modelada, e assim considera somente uma transposição do dano para outra região fora do domínio considerado.

O terceiro método, o **cálculo de cargas**, foi baseado na análise das cargas adicionais oriundas do desastre que chegaram e chegarão à área costeira. Para isso, foi utilizada a massa total de rejeito liberado pelo desastre (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020b) e subtraída toda massa de rejeito que foi encontrada nos reservatórios, na calha e nas margens dos rios. A comparação do valor da massa restante (que em teoria deveria ter sido lançado ao mar) com o cálculo da massa que já chegou na área costeira, utilizando as medições feitas (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020b) permitiu identificar a massa total que chegou a área costeira, mas também identificar se ainda há aporte oriundo do desastre e em quais momentos. Este foi o método utilizado no presente relatório.

A seguir, é apresentada a metodologia e dados utilizados para as estimativas das cargas excedentes (ou adicionais) oriundas do desastre da barragem de Fundão.

2.3.1.1 Dados e períodos de avaliação

Para avaliação das cargas excedentes (ou adicionais) provenientes do rompimento da barragem de Fundão que chegaram na área costeira, foram utilizados dados provenientes da estação fluviométrica Colatina, obtidos junto à Agência Nacional de Águas (ANA), e da estação RD012, da Fundação Renova.

Na Tabela 16 estão apresentados os dados, fonte e períodos de avaliação para as cargas excedentes (ou adicionais) devido ao desastre. Conforme descrito na referida tabela, os dados de vazão foram obtidos junto a estação fluviométrica de Colatina. Com relação aos dados de sólidos suspensos, para o período de linha-base foi utilizada a curva-chave sólida para as concentrações. O período de linha-base foi considerado o período anterior à chegada da pluma de rejeitos no mar, em 21/11/2015. Os dados para o pós-desastre foram obtidos da estação telemétrica RD012, da Fundação Renova, no período compreendido entre 2015 e 2019. Para as estimativas aqui apresentadas foram utilizadas médias diárias das medições realizadas nesta estação.

Apesar de as medições de quantidade e qualidade da água não ocorrerem na mesma seção do rio, essas estimativas foram realizadas para se obter uma ordem de grandeza da massa de sólidos que passou por essa região devido apenas ao evento do desastre.

Tabela 16 – Estações de monitoramento e períodos avaliados na estimativa de cargas excedentes devido ao desastre da barragem de Fundão.

Estação	Tipo de dado	Período de avaliação	Fonte
Colatina (Código 56994500)	Vazão	Jan/1938-Dez/2019	ANA
Colatina (Código 56994500)	Concentração de sólidos suspensos (curva-chave sólida)	Jan/1938-19/11/2015	ANA
RD012	Média diária da concentração de sólidos suspensos	20/11/2015-Dez/2019	Fundação Renova

2.3.1.2 Cargas cumulativas excedentes

O relatório suplementar de cargas, descrito no TOMO II – Acompanhamento de Danos dos Ambientes Aquáticos Continentais, apresenta de forma detalhada a metodologia de cálculo das cargas cumulativas excedentes devido ao desastre da barragem de Fundão para estações localizadas no Compartimento 2. Nesta avaliação, a qual foi utilizada no presente relatório, o efeito das cargas de linha-base foi retirado das estimativas baseadas nas medições e, desta maneira, na avaliação do pós-desastre, as cargas estimadas foram provenientes apenas da ocorrência do desastre. Portanto, a referida metodologia foi utilizada para se obter os aportes devido ao desastre para a área costeira a partir dos dados de vazões e concentração de sólidos em suspensão. O transporte de sedimento no fundo, por outro lado, não foi considerado pelo fato de que não é medido mas, especialmente em períodos de cheias, pode ter contribuição significativa.

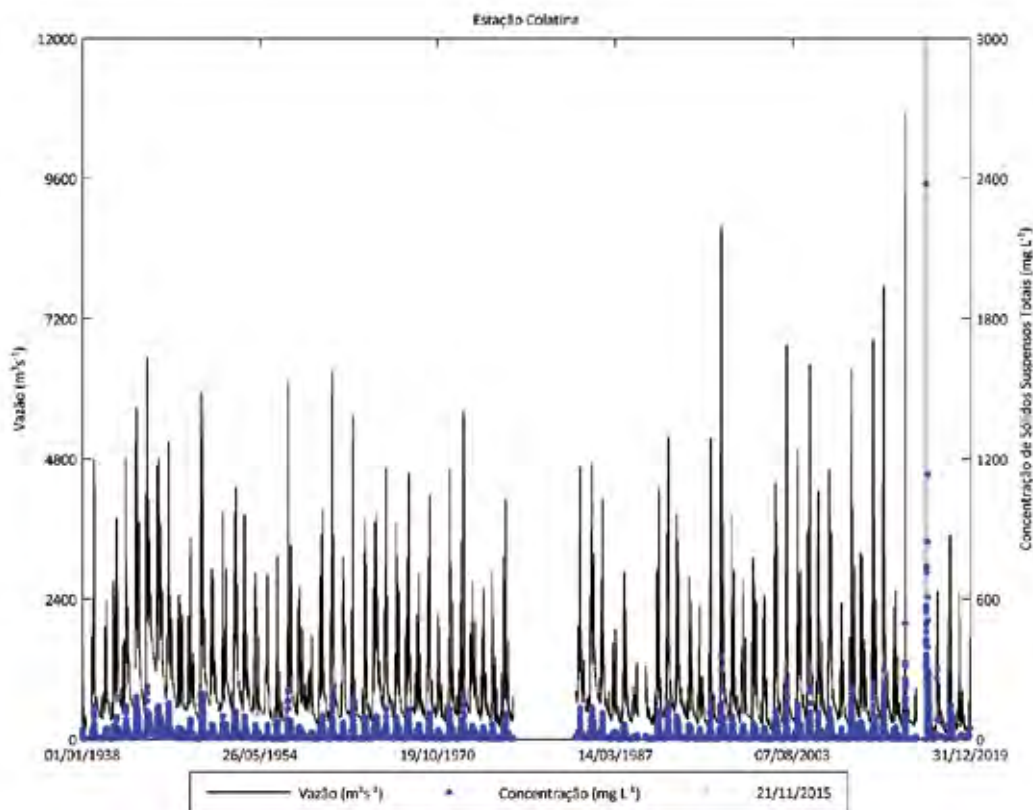
De uma forma resumida, os dados foram subdivididos em períodos de pré (linha-base) e pós-desastre. Para o período de linha-base, foram estimadas as cargas médias mensais e, para o período de pós-desastre, foram estimadas as cargas com base nas concentrações médias mensais (considerando apenas o período após o desastre) e as vazões diárias. Para os dados de sólidos suspensos, o pós-desastre foi subdividido em dois períodos, entre novembro/2015-março/2016 (compreendendo o primeiro período chuvoso após a ocorrência do desastre) e abril/2016-dezembro/2019. Das estimativas de cargas diárias do pós-desastre, foram subtraídos os valores de carga média mensal de linha-base. Desta forma, foi possível obter apenas o excedente das cargas que, em média, ocorriam no período de linha-base. Para a estimativa da quantidade total de sólidos que passou nessa região (em termos de massa), os valores dessas cargas foram acumulados ao longo do período avaliado no pós-desastre. Para mais detalhes da metodologia, consulte o relatório suplementar de cargas, apresentado TOMO II – Acompanhamento de Danos dos Ambientes Aquáticos Continentais.

2.3.2 INCREMENTO NA DEPOSIÇÃO DE SEDIMENTOS

Nesta seção são apresentados resultados que mostram que o dano do incremento da deposição de sedimentos na área costeira devido ao desastre não está cessado. Isto se deve ao fato de que o incremento do aporte de sedimentos provenientes do ambiente continental foi observado em determinados períodos, e que as estimativas da massa de rejeito no ambiente fluvial e do que foi aportado para a área costeira ainda indicam que haverá transporte para essa região.

A série histórica de vazões e concentrações de sólidos suspensos totais é apresentada na Figura 35. Em destaque, é apresentada a data da chegada do rejeito na área costeira, na cor cinza. No período de linha-base, a concentração máxima de sólidos suspensos estimada da curva-chave sólida foi de 497,09 mg L⁻¹, enquanto no período do pós-desastre, a concentração máxima foi de 2.378 mg L⁻¹. A vazão máxima nesta estação foi de 10.715,94 m³ s⁻¹, observada no período de linha-base. No período de pós-desastre avaliado, a vazão máxima nesta estação foi de 3.667,73 m³ s⁻¹, observada em janeiro/2016. A partir dos dados apresentados, foram estimadas as cargas cumulativas excedentes de sólidos suspensos para a estação Colatina, considerando a metodologia apresentada na seção 2.3.1.2 e no relatório suplementar de cargas, apresentado no TOMO II – Acompanhamento de Danos dos Ambientes Aquáticos Continentais.

Figura 35 – Série histórica de vazões e concentrações de sólidos suspensos totais na estação Colatina e destaque para a data da chegada do rejeito na área costeira em 21/11/2015 em cinza.

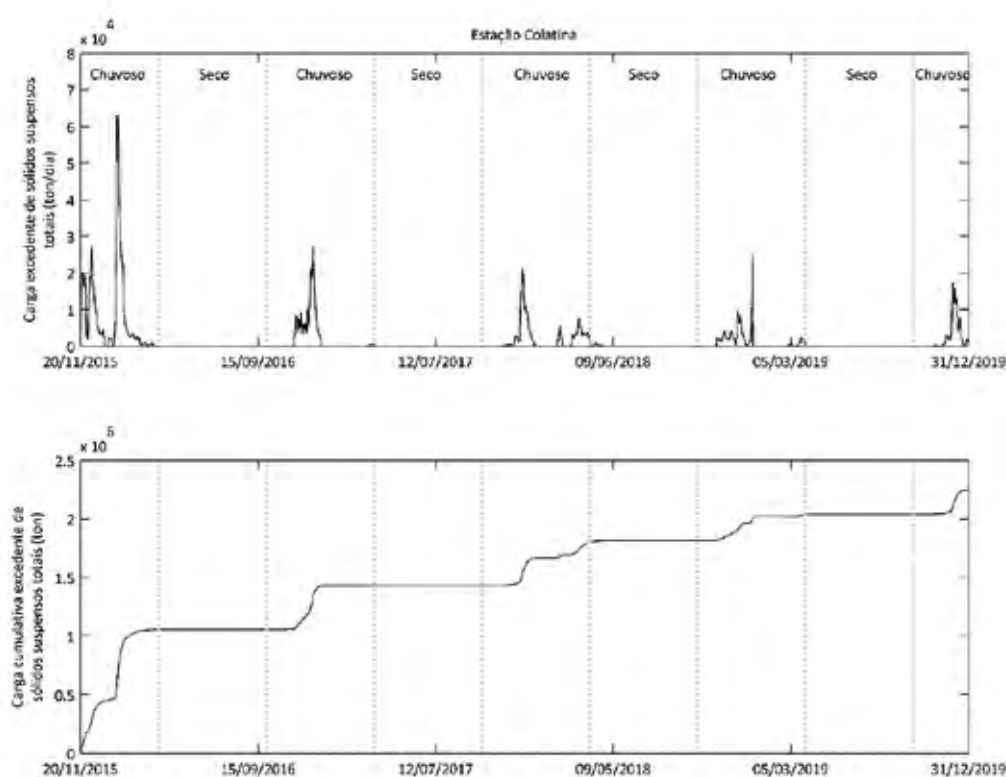


Na Figura 36 está apresentada a carga excedente e a carga cumulativa excedente de sólidos suspensos para a estação Colatina, com destaque para os períodos secos e chuvosos avaliados. De acordo com os dados apresentados na Figura 36, de uma maneira geral, durante os períodos secos após o desastre, não foi observado um excedente de cargas de sólidos suspensos, o que pode ser verificado nos trechos horizontais da curva de carga cumulativa. Estes resultados indicam que as cargas nos períodos secos pós-desastre estão se aproximando das cargas do período de linha-base. Portanto, nos períodos secos pós-desastre, não foi identificado um excedente de cargas relacionado ao desastre nesta estação, para os dados disponíveis, para sólidos suspensos.

Durante os períodos chuvosos pós-desastre, por outro lado, a partir dos resultados de cargas excedentes de sólidos suspensos, foi possível observar cargas superiores às cargas de linha-base (na cheia de janeiro/2016, por exemplo, a carga excedente foi estimada em aproximadamente 63.000 ton – Figura 36). Portanto, das estimativas de cargas excedentes, foi possível observar que houve um aumento nas cargas nos períodos chuvosos. Estes resultados na curva de carga acumulada representaram os incrementos na curva da estação de Colatina e indicam que as cargas estimadas nos períodos chuvosos foram superiores às cargas de linha-base.

Da data da chegada pluma de rejeitos no mar (21/11/2015) até o final do ano de 2019 estimou-se que aproximadamente $2,2 \cdot 10^6$ ton de sólidos suspensos excedentes, devido ao desastre, foram quantificados na estação Colatina, para os dados disponíveis, e foram liberados na área costeira.

Figura 36 – Figura superior: carga excedente de sólidos suspensos na estação Colatina. Figura inferior: carga cumulativa excedente de sólidos suspensos na estação Colatina. A linha tracejada cinza indica os períodos secos e chuvosos avaliados.



Estes resultados de cargas cumulativas excedentes são bastante similares, em ordem de grandeza, ao que foi obtido para cargas cumulativas excedentes de sólidos suspensos totais em estações de monitoramento localizadas no Compartimento 2 (entre as UHE Risoleta Neves e UHE Aimorés), apresentadas no relatório suplementar de cargas, apresentado no TOMO II – Acompanhamento de Danos dos Ambientes Aquáticos Continentais. Estes resultados indicam que o aporte de sólidos suspensos na área costeira, durante o período avaliado, foi da mesma ordem de grandeza dos resultados estimados nesta seção. Portanto, estas cargas contribuíram para o dano da deposição de sedimentos na área costeira, principalmente durante os períodos chuvosos, que se mostraram como os períodos nos quais as cargas calculadas excedem as cargas médias de linha-base.

O dano do incremento da deposição de sedimentos na área costeira tem uma relação direta com os aportes de sedimentos provenientes do rio Doce. Portanto, enquanto houver ou for identificado um incremento das cargas acima dos valores médios que ocorriam em períodos pré-desastre no rio Doce, haverá também um incremento na deposição dos sedimentos na área costeira, além do que é observado de maneira natural.

Como comparação, foram estimados que aproximadamente 44 hm³ de rejeitos foram liberados devido ao desastre da barragem de Fundão (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020b). Este volume corresponde a uma massa de aproximadamente 88 10⁶ ton, considerando uma massa específica de 2.000 kg m⁻³ do rejeito (em condição seca) (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020b). No relatório de contextualização (BRASIL

(MPF)/ LACTEC, 2020b) foram estimados, ainda, os volumes de deposição do rejeito nos diferentes compartimentos – reservatórios e volumes intra e extracalha no compartimento 1. Ainda, de acordo com os dados apresentados no mesmo relatório, do volume total liberado pelo desastre, cerca de 36 hm³ (ou 72 10⁶ ton) ficaram depositados nos reservatórios e no Compartimento 1 (intracalha e extracalha). Desta forma, um remanescente de aproximadamente 8 hm³ (16 10⁶ ton) foram transportados ao longo do rio Doce e contribuíram ou podem contribuir futuramente para o dano da deposição de sedimentos na área costeira.

Neste relatório, baseado no período de análise entre o desastre e dezembro de 2019, estimou-se que, cerca de 2,2 10⁶ ton de sólidos suspensos foram aportados na área costeira (ou seja, 2,5% da massa total proveniente do rompimento da barragem de Fundão), contribuindo para o dano da deposição de sedimentos.

Com estes resultados, pode-se inferir que ainda há um excedente de cargas de sólidos suspensos que podem ser disponibilizados futuramente no ambiente continental (por meio de ressuspensão, por exemplo) e que podem contribuir para o dano da deposição de sedimentos na área costeira. Desta maneira, o dano da deposição de sedimentos ainda não está cessado. A tendência deste dano é de redução (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e), dado que o aporte de sólidos do ambiente fluvial também tende a reduzir. Os períodos em que tais incrementos de cargas foram e são esperados (além do natural), conforme resultados das cargas cumulativas excedentes, são os períodos chuvosos, nos quais foi identificado um aumento de cargas em relação ao período de linha-base. Este dano foi classificado como irreversível, dado que não há tecnologia para remover o rejeito do ambiente costeiro e que o rejeito ali depositado permanecerá neste ambiente. Importante considerar que esta metodologia foi aplicada somente ao parâmetro de sólidos suspensos totais, mas que demais parâmetros, especialmente EPTs são correlacionados e também foram lançados no ambiente costeiro, visto que a associação com partículas sólidas é um dos principais caminhos para o transporte de EPTs em águas naturais (JI, 2008).

2.3.3 CENÁRIO DE DANOS

A deposição de sedimentos na área costeira é um processo natural que foi intensificado pelo rompimento da barragem de Fundão. Juntamente ao aumento do aporte de sedimentos do rejeito, houve o aumento do aporte de EPTs na área costeira, conforme discutido no item 2.1. No relatório (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e), com a modelagem hidrodinâmica de um ano a partir do desastre, considerando cenários com e sem o rompimento da barragem de Fundão, foram obtidas alturas de deposição adicional de sedimentos de até 10 cm junto a foz do rio Doce devido ao desastre. A estimativa do tempo necessário para que o sedimento adicional depositado no período avaliado fosse erodido naturalmente foi inconclusivo, dado que o material ressuspensionado será depositado em outra área, apenas transferindo o dano de região.

Neste relatório foram apresentados resultados que mostram que o dano da deposição de sedimentos no ambiente costeiro não está cessado, dado os aportes de cargas excedentes de sólidos suspensos provenientes do rompimento da barragem de Fundão. Para uma avaliação temporal das cargas de sólidos suspensos oriundas do ambiente fluvial, devido apenas a ocorrência do desastre e que contribuem para o dano do incremento da deposição de sedimentos na área costeira, as cargas

excedentes apresentadas neste relatório indicam que o excedente de cargas provenientes do desastre ocorre nos períodos chuvosos.

Da chegada da pluma de rejeitos no mar até o final de 2019, estimou-se que a massa de rejeitos contribuindo para o dano da deposição de sedimentos foi de aproximadamente $2,2 \cdot 10^6$ ton. Das estimativas de massa de rejeitos depositados no ambiente fluvial e nos reservatórios (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020b), este material depositado pode ser ressuspensionado, principalmente em períodos chuvosos e contribuir para o dano da deposição de sedimentos no ambiente costeiro. Este aporte ao ambiente costeiro deve ter uma tendência de redução ao longo do tempo. A redução deste dano está diretamente vinculada com o transporte de sólidos suspensos no ambiente fluvial e dos reservatórios, portanto, o dano do incremento da deposição de sedimentos será cessado quando não houver cargas excedentes provenientes do rio Doce. O tempo para que isso ocorra depende de condições hidrológicas da bacia e condições hidrossedimentológicas do rio e dos reservatórios e, segundo estimativa apresentada no TOMO II – Acompanhamento de Danos dos Ambientes Aquáticos Continentais, este tempo é de algumas décadas. Este dano foi classificado como irreversível, dado que não há tecnologia para remover o material depositado sem que haja ressuspensão do rejeito que será depositado em outra área, apenas deslocando o dano.

2.3.4 CONCLUSÕES

A modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos realizada para o período de um ano após o desastre mostrou que o dano da deposição de sedimentos foi gravíssimo em 61,6% área atingida, onde a sedimentação foi no mínimo seis vezes maior do que a sedimentação típica no período modelado (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e). As novas análises mostraram que, até hoje, o aporte de rejeito devido ao desastre na área costeira ainda ocorre, especialmente em períodos chuvosos, associado a ressuspensão de rejeito depositado em reservatórios e no rio Doce. Isto significa que o dano não cessou e ainda ocorre deposição adicional de sedimentos oriundos do desastre e acima do natural. O dano tende a reduzir, com a redução do aporte excedente com o tempo. Como não existe tecnologia para remover o material sedimentado com esta espessura e em uma área tão extensa sem criar danos adicionais, o dano foi considerado irreversível. Embora haja circulação das correntes marinhas e demais interações do ambiente que podem parcialmente locomover o material, o mesmo se deposita em outro local, somente transferindo o dano de uma região a outra.

2.4 DANOS À QUALIDADE DOS SEDIMENTOS E COMUNIDADES BENTÔNICAS

O material liberado da barragem de Fundão foi transportado pelo rio Doce e atingiu a costa do Espírito Santo no dia 21/11/2015, vindo a distribuir-se ao longo desta, de acordo com o tamanho e densidade dos grãos do sedimento e das condições meteoceanográficas (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e). Isso alterou as características dos sedimentos superficiais do leito marinho na região costeira adjacente à foz do rio Doce.

Neste contexto, considerando o transporte e deposição do rejeito no mar, segundo os dados apresentados em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), que contemplam o período pós-desastre entre

novembro/2015 a fevereiro/2019, foram identificados os seguintes danos à qualidade dos sedimentos do ambiente marinho: alteração das características granulométricas do sedimento superficial e aumento da concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no sedimento.

Em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), os danos à qualidade dos sedimentos na zona costeira foram classificados quanto a sua magnitude (pouco grave, grave e gravíssimo) e em relação a sua tendência de evolução ao longo do tempo. O dano de alteração das características granulométricas não foi classificado quanto a sua gravidade devido à falta de dados pré-desastre no ambiente marinho; já o dano em relação ao aumento de EPTs no sedimento foi classificado como grave nos compartimentos 5-B1, 5-B2 e 5-C e pouco grave nos compartimentos 5-A, 5-D e 5-E. Em todos os compartimentos foi observada uma tendência à redução do dano com o passar dos anos.

Devido à alteração da qualidade dos sedimentos e aos potenciais danos associados a estas alterações, o presente documento tem como objetivo avaliar a manutenção/alteração dos resultados obtidos em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), incorporando à análise anterior o conjunto de dados referente ao período de março/2019 a setembro/2020.

Ainda, vale ressaltar que os dados de qualidade do sedimento coletados pelo Lactec no período próximo a cheia de janeiro/2020 (campanha 04 -março/2020) foram avaliados quanto as alterações relacionadas a este evento hidrológico em Brasil (MPF)/ Lactec (2020i).

As comunidades bênticas são compostas por organismos que vivem em relação direta com o fundo em ambientes aquáticos. Os organismos bênticos desempenham um importante papel ecológico, uma vez que grande número de espécies de peixes, aves e invertebrados, durante pelo menos parte de suas vidas, necessitam alimentar-se desses organismos. Assim, as espécies bênticas representam não apenas um item alimentar fundamental, mas também um importante elo na trama trófica marinha (COLLING; BEMVENUTI, 2011).

Visando a obtenção de dados pretéritos a primeira atividade desenvolvida junto ao diagnóstico socioambiental foi o levantamento sistemático de estudos realizados com bentos de fundos inconsolidados marinhos na área afetada antes do rompimento da barragem de Fundão. A análise do conhecimento foi apresentada em Brasil (MPF)/ Lactec (2017b).

No diagnóstico do dano, a verificação de alterações na estrutura das comunidades bênticas do ambiente marinho foi realizada através da comparação de métricas ecológicas no período antes do desastre com os resultados obtidos nas duas primeiras campanhas, realizadas no período entre 07/2018 a 02/2019 (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e). As médias dos índices de diversidade, número de táxons, abundâncias médias, densidade total, densidades relativas de Mollusca, Crustacea, Polychaeta e Outros (filos com baixa densidades) foram comparadas. O dano de alterações na estrutura da macrofauna bêntica, no diagnóstico do dano foi constatado, considerado gravíssimo, com tendência a diminuição e parcialmente reversível (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e).

Os resultados das duas primeiras campanhas e avaliação dos danos às comunidades bênticas do ambiente marinho foram entregues em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e). Nesse relatório de diagnóstico foram apresentados também, análise de estudos secundários realizados no período pós-desastre.

No diagnóstico do dano a contaminação de organismos bênticos foi analisada, através de dados secundários obtidos de relatórios técnicos (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e), resultados de análises de

determinação da concentração de EPTs e de ensaios ecotoxicológicos. Esses resultados demonstraram que espécies da macrofauna bêntica apresentaram bioacumulação de EPTs, bem como alterações de funções fisiológicas, as quais constituem indicativos de prejuízos às condições de saúde desses organismos (FAURG, 2016; ICMBIO, 2016; BIANCHINI et al., 2019b). O dano não foi classificado no Relatório de Diagnóstico do Dano, diante do baixo número de estudos de linha-base, mesmo com evidências encontradas, pelos autores dos estudos, relacionando o desastre com o aumento da contaminação e alteração no estado de saúde dos organismos.

O objetivo do presente relatório foi analisar os resultados dos parâmetros da fauna bêntica do ambiente marinho obtidos após o diagnóstico do dano (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e), para verificar a evolução dos danos. O período de setembro de 2019 a setembro de 2020 foi avaliado com a inclusão da análise de três novas campanhas (set/19, mar/20 e set/20). Os resultados foram comparados com aqueles obtidos na linha-base, diagnóstico de danos e com dados secundários do período pós-desastre. Para complementar a avaliação da contaminação dos organismos bênticos, foram analisados estudos realizados por instituições públicas e privadas após o diagnóstico do dano e, então, a classificação do dano foi realizada.

2.4.1 METODOLOGIA

A fim de avaliar a manutenção dos resultados obtidos para os danos relacionados à alteração da granulometria do sedimento superficial e do aumento da concentração de EPTs no sedimento em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), foi incorporado à análise anterior o conjunto de dados primários e secundários referentes ao período de março/2019 a setembro/2020. Para este período, foram avaliados dados de monitoramento de qualidade do sedimento do Lactec, da Fundação Renova e da Rede Rio Doce Mar (RRDM), sendo que sua utilização se deu do mesmo modo como no estudo supracitado.

No ambiente marinho, os dados primários avaliados foram originados pelo Lactec em cinco campanhas de monitoramento para a coleta de amostras de sedimento: em julho/2018, fevereiro/2019, setembro/2019, março/2020 e setembro/2020. As estações avaliadas, o método de coleta e a análise foram os mesmos utilizados no diagnóstico de danos na zona costeira (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e). Em cada estação amostral, por meio do uso de draga Petersen, da marca Limnotec, foram coletadas amostras de sedimentos superficiais, destinadas à análise granulométrica e de parâmetros químicos conforme as diretrizes estabelecidas em CETESB (2011). As amostras de sedimentos foram armazenadas em frascos plásticos ou potes de vidro, dependendo da análise, e mantidas refrigeradas com gelo em caixa térmica, para posterior encaminhamento ao laboratório para a determinação dos parâmetros químicos conforme os parâmetros expostos pela Resolução CONAMA nº 454/2012 (BRASIL, 2012).

Quanto aos dados secundários, além das fontes de dados avaliadas no diagnóstico de danos (Samarco, Fundação Renova e universidades), no presente documento foram avaliados também os dados brutos gerados pela Rede Rio Doce Mar (RRDM/FEST/UFES, 2019), entre outubro/2018 e setembro/2019, que foram fornecidos pela Câmara Técnica de Biodiversidade no âmbito do Comitê Interfederativo – CIF. A localização das estações amostrais referentes aos dados secundários avaliados é apresentada na Figura 37, onde pode ser visualizada também a compartimentalização da área avaliada. As estações amostrais que representam cada compartimento constam na Tabela 17.

Os resultados da avaliação dos danos quanto a alterações na qualidade do sedimento foram apresentados em relação às condições de linha-base (anterior ao desastre) e entre diferentes janelas temporais após o desastre. Para o acompanhamento dos danos, avaliou-se o comportamento dos indicadores durante P5 (janeiro/2019 a dezembro/2019) e P6 (janeiro/2020 a dezembro/2020). A segmentação temporal utilizada pode ser visualizada na Tabela 18 em conjunto com as fontes que produziram os dados avaliados em cada período. A segmentação temporal foi estabelecida anualmente após P1 com o objetivo de se estabelecer um número de observações representativo em cada período, bem como de coincidir com o período avaliado na região fluvial, que também avaliou por aproximadamente cinco anos após o desastre.

Ressalta-se que para a definição da tendência de evolução do dano foram utilizados os dados até o ano de 2019 (P5), visto que para o ano de 2020 (P6) não estavam disponíveis todos os dados secundários até o momento da elaboração deste documento.

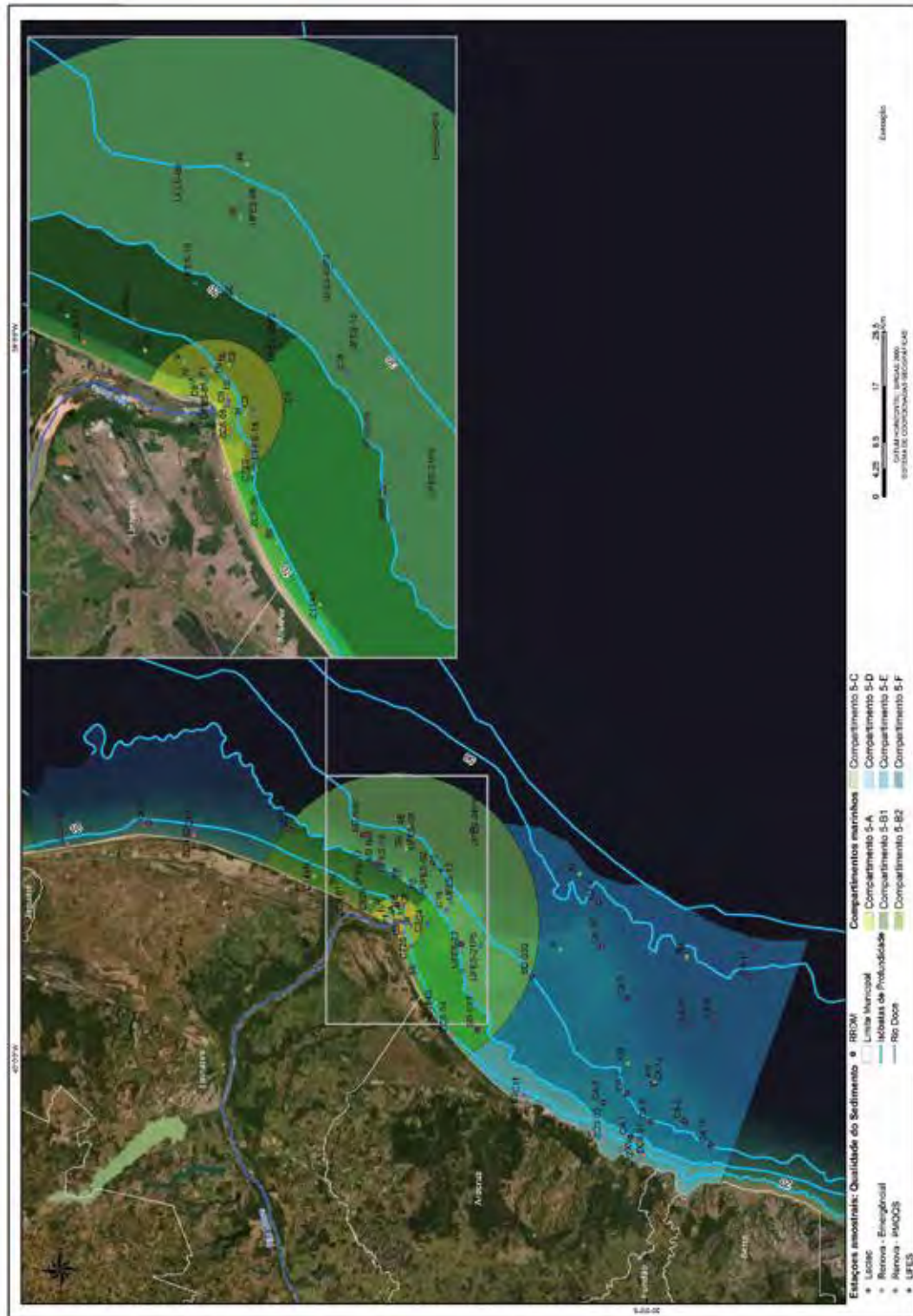
Tabela 17 – Estações amostrais em cada compartimento do ambiente marinho.

Compartimento	Estações de Monitoramento			
	Lactec	Renova - Emergencial	Renova PMQQS	RRDM
Compartimento 5-A	C3, C5, C6, C8	1N, 1S, 1E, P1, IA, II, III, IV, V	-	SD01
Compartimento 5-B1	C9, C14	2N, 3N, 4N	ZCN 01	SD02, SD N13, SDN20
Compartimento 5-B2	C4, C7, C15	2S, 3S, 4S	ZCS 04, ZCS05, ZCS 06	SD S13, SD S20
Compartimento 5-C	C16	P2, 2E, 3E, 4E, P3, P4, P5	-	SD03, SD04, SD N30, SD S30
Compartimento 5-D	C11, C12	XV	ZCS 01, ZCS 02, ZCS 03	CA1
Compartimento 5-E	-	X, XI, XII, XIII, XIV	-	CA2, CA3, CA4, CA5, CA6, CA7, CA8, CA9, CA10, CA11, CA12, CA13, CA14, CA15
Compartimento 5-F	C13	-	ZCN02, ZCN03	DEG1

Tabela 18 – Segmentação dos períodos pré e pós-desastre (detalhamento dos dados em Brasil (MPF)/ Lactec, 2020e).

Período	Identificação do Período	Intervalo de tempo	Fonte de dados avaliados no período
Pré-desastre	P0	Série histórica de dados levantados na linha-base até 20 de novembro de 2015	Diversos estudos levantados na linha base e Renova Emergencial
	P1	21 de novembro de 2015 a março/2016	Renova Emergencial e outras instituições
	P2	Abril/2016 a dezembro/2016	Renova Emergencial e outras instituições
Pós-desastre	P3	Janeiro/2017 a dezembro/17	Renova Emergencial, Renova PMQQS, Lactec
	P4	Janeiro/2018 a dezembro/18	Lactec e Renova PMQQS
	P5	Janeiro/2019 a dezembro/2019	Lactec, Renova PMQQS e RRDM
		Janeiro/2020 a dezembro/2020	Lactec e Renova PMQQS

Figura 37 – Compartimentalização do ambiente marinho e principais pontos de monitoramento da qualidade dos sedimentos avaliados em cada compartimento.



Execução: Lactec.

Com exceção da incorporação dos dados obtidos no monitoramento da RRDM, a metodologia de análise dos danos e sua evolução permaneceram as mesmas detalhadas em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e). Na sequência são elencados os principais pontos da metodologia adotada.

A avaliação de danos à qualidade do sedimento foi realizada a partir de diferentes indicadores, conforme mostrado na Tabela 19. Ressalta-se que o parâmetro cobalto não foi analisado no ambiente marinho visto que não foram encontrados dados históricos deste parâmetro para a região analisada.

Tabela 19 – Indicadores dos danos à qualidade de sedimento.

Danos	Indicadores
Alteração das características granulométricas do sedimento superficial	Distribuição granulométrica, porcentagem de argila, silte e areia
Aumento das concentrações de EPTs no sedimento	Alumínio (mg/kg), arsênio (mg/kg), bário (mg/kg), cádmio (mg/kg), chumbo (mg/kg), cobre (mg/kg), cromo (mg/kg), ferro (mg/kg), manganês (mg/kg), mercúrio (mg/kg), níquel (mg/kg), zinco (mg/kg)

O dano de aumento das concentrações de EPTs no sedimento teve sua magnitude mensurada de acordo com a variação das concentrações dos indicadores, que tiveram suas alterações classificadas na seguinte escala: Categoria A, Categoria B e Categoria C. A definição das diferentes categorias é apresentada a seguir.

Categoria A: valores abaixo do limite do Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 e dentro da variação histórica pré-desastre;

Categoria B: valores de acordo com a variação histórica pré-desastre, mas que não atenderam aos limites do Nível 1, ou então, valores que extrapolaram a variação histórica pré-desastre, mas que atenderam aos limites do Nível 1;

Categoria C: valores em desacordo como Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 e que extrapolaram a variação histórica pré-desastre.

O Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 representa o limiar para o qual valores inferiores a este há menor probabilidade de efeitos adversos à biota, ou seja, acima destes níveis são esperados efeitos negativos a biota aquática.

De forma complementar, para as variáveis que não apresentam padrões estabelecidos pelo CONAMA, foram utilizados padrões internacionais estabelecidos em publicação da *National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA*, dos Estados Unidos, denominada *Screening Quick Reference Tables* (BUCHMAN, 2008), que reúne padrões de qualidade dos sedimentos utilizados em diversos países em uma única publicação. Os valores utilizados são baseados em testes que avaliam os efeitos das concentrações de parâmetros de qualidade sobre a biota aquática. Desta maneira, são limites que, caso ultrapassados, são esperados efeitos negativos sobre a biota aquática. 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; a concentração limiar de efeito (“Threshold effects level” - TEL) que é a concentração abaixo da qual efeitos biológicos adversos ocorrem raramente; e 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

possivelmente ocorrerão. Ressalta-se que a Resolução CONAMA nº 454/2012 também se baseou nos índices TEL e PEL, que correspondem aos limites de “Nível 1” e “Nível 2”, respectivamente.

Visando à mensuração do dano, cada um dos dados do período pós-desastre foi classificado de acordo com as categorias apresentadas anteriormente. A classificação ocorreu para os dados de cada um dos indicadores (Tabela 19) e para cada uma das estações de monitoramento avaliadas (Tabela 17), sendo que a qualidade do sedimento varia no sentido de que dados pós-desastre classificados na “categoria A” indicam uma condição melhor do sedimento, enquanto dados classificados na “categoria C” indicam uma condição pior.

Os dados classificados de acordo com as categorias A, B e C foram então agrupados em cada um dos sete compartimentos (5-A, 5-B1, 5-B2, 5-C, 5-D, 5-E e 5-F) e cinco períodos de tempo conforme observado na Tabela 18. Para a classificação da categoria de alteração de cada indicador, levou-se em consideração os dados do período P1 (novembro/2015 a março/2016), visto que neste período foram verificadas as maiores alterações na qualidade dos sedimentos, de acordo com as seguintes definições:

- Categoria A: Pelo menos 1/3 dos dados classificados como Categoria A; sendo que os dados classificados nas Categoria C e B não superaram 1/3 do total.
- Categoria B: Pelo menos 1/3 dos dados classificados como Categoria B, sendo que os dados classificados na Categoria C não superaram 1/3 do total;
- Categoria C: Pelo menos 1/3 dos dados classificados como Categoria C;

A despeito dos diferentes indicadores utilizados, a classificação final do dano em relação ao aumento da concentração de EPTs no sedimento levou em conta a categoria de alteração mais severa registrada para pelo menos um dos indicadores do dano, de acordo com o estabelecido na Tabela 20.

**Tabela 20 – Critério para definição da gravidade do dano
“aumento da concentração de EPTs no sedimento”.**

Gravidade	Critério	Interpretação
Pouco grave	Todos os indicadores foram classificados na categoria A em relação ao P1.	Dano que perdurou por um menor tempo em relação aos demais e/ou apresentou alterações menores em termos de magnitude com relação à linha-base.
Grave	Nenhum dos indicadores foi classificado na categoria C em P1 e ao menos um dos indicadores foi classificado na categoria B no mesmo período.	Quando observada alteração em relação à linha-base, mas de acordo com os padrões legislados. Ou então, quando não se atendeu ao padrão legislado, mas essa condição já era observada antes do rompimento.
Gravíssimo	Pelo menos um dos indicadores foi classificado na categoria C em P1	Indica alterações mais significativas em relação à linha-base, haja vista sua maior duração e magnitude.

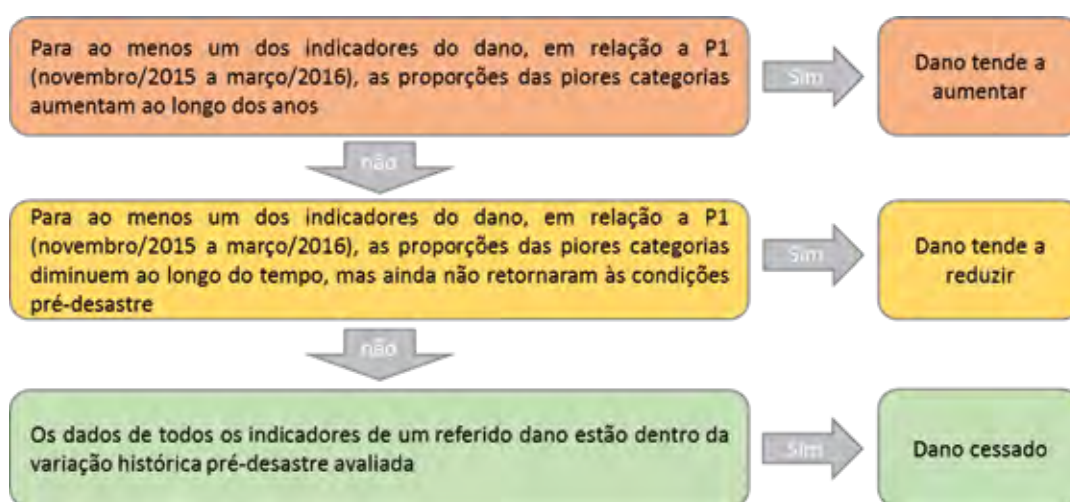
Ao longo dos demais períodos, inclusive no período em análise neste relatório (P5 – janeiro/2019 a dezembro/2019), observou-se a tendência do dano em relação à situação observada para P1, ou seja, se o dano cessou (retorno às condições de linha-base), tendeu a reduzir (em relação a P1, as condições melhoraram, mas ainda não retornaram à linha-base) ou tendeu a aumentar (em relação a P1, as condições pioraram). Para tanto, foi levado em conta o fluxo de condições apresentado na Figura 38. Para a avaliação da tendência de evolução dos danos foram utilizados somente os dados do Lactec e da

Fundação Renova em virtude de minimizar possíveis diferenças relacionadas a metodologia de coleta e análise das amostras e a variação do número de estações de monitoramento em cada compartimento ao longo dos anos. As diferenças metodológicas utilizadas para a determinação de metais na água podem gerar componentes de incerteza atrelados a diferentes fatores, tais como: condições ambientais; operador; equipamentos; padrões utilizados; método de medição; amostragem e outros.

Convém esclarecer que as referidas condições tratam-se de diretrizes gerais que nortearam a avaliação de tendência de evolução do dano. Ao longo da discussão dos resultados, levou-se em consideração também as particularidades dos dados obtidos para cada indicador bem como dos compartimentos. Foi ainda realizada uma análise conjunta dos resultados dos gráficos da classificação individual dos dados pós-desastre nas categorias A, B e C e dos gráficos das proporções das categorias. A existência de dados pós-desastre superando os máximos históricos pré-desastre foi considerada como alerta, indicando ainda alterações em relação às condições de linha-base.

Ainda, quanto a tendência de evolução do dano, caso um dano ainda não tenha sido considerado como cessado em compartimentos a montante do ambiente marinho (ambiente fluvial e estuarino), este dano não foi considerado como cessado no ambiente marinho mesmo que apresente as características definidas acima para considerá-lo como cessado, devido a possibilidade de alterações que ainda ocorrem a montante virem a influenciar a qualidade do sedimento do ambiente marinho. É importante destacar que, em virtude de o número de estações de monitoramento variar de compartimento para compartimento e a frequência das campanhas de monitoramento ter se alterado ao longo do tempo, os percentuais não foram calculados em cima do mesmo número de observações.

Figura 38 – Fluxo de condições gerais de avaliação de tendência de evolução dos danos à qualidade do sedimento.



Fonte: Lactec.

No caso do dano em relação a alteração das características granulométricas do sedimento, não foi possível realizar uma avaliação quantitativa do dano, por meio de classes como a realizada para os parâmetros químicos, tendo em vista a falta de dados brutos de granulometria do sedimento nas adjacências da foz do rio Doce e também devido a ocorrência de uma variedade natural das características granulométricas da região de estudo, envolvendo a ocorrência tanto de sedimentos com predomínio de areia quanto sedimentos onde a argila é predominante na região.

Dessa forma, cada um dos resultados de granulometria em sedimento pós-desastre foi classificado de acordo com a classificação textural proposta por Folk (1954). Ressalta-se que as divisões utilizadas por Folk (1954) são idênticas a classificação granulométrica estabelecida para solos do Boletim Técnico 106 do Instituto Agrônomo de Campinas – IAC (CAMARGO et al., 2009) sobre cascalho, areias e materiais mais finos (silte e argila).

A partir desta classificação textural, foi realizada a avaliação das características granulométricas do sedimento ao longo dos meses monitorados, de forma a identificar eventuais alterações ao longo do tempo, bem como comparar as características predominantes em cada compartimento em comparação com aquelas descritas anteriormente na região de acordo com a bibliografia.

Para a comunidade bêntica a metodologia utilizada para a avaliação e mensuração do dano, bem como a utilizada nas campanhas de amostragem realizadas em set/19, mar/20 e set/20 foram as mesmas empregadas nas duas primeiras campanhas e podem ser consultadas na íntegra em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e). Aqui, são brevemente descritas a seguir.

Para a amostragem da macrofauna foi utilizando um amostrador do tipo busca-fundo modelo Petersen, com área de 0,07 m², em cada estação foram coletadas três réplicas amostrais. No laboratório as amostras foram lavadas sob peneira com malha de abertura 0,5 mm e posteriormente triadas em cubas plásticas com o auxílio de uma lupa com aumento de 10x. Com auxílio de um microscópio estereoscópico os organismos foram identificados ao menor nível taxonômico possível, a partir de consultas às bibliografias especializadas. Os animais foram identificados e contados.

Para algumas análises dos dados os organismos foram agrupados nos grandes grupos taxonômicos: Polychaeta, Crustacea, Mollusca, Echinodermata e Outros. Na categoria “Outros” estão inclusos os seguintes grupos: Turbellaria, Nemertea, Nematomorpha, Priapula, Echiura, Sipuncula, Ectoprocta, Cephalocordata, Chaetognatha e Hemichordata. Para as comparações entre os estudos o Filo Echinodermata também foi incluso na categoria Outros. Essa categoria foi formada para que pudessem contemplar os filos com baixas densidades e que estivessem reunidos nos estudos que foram utilizados na comparação dos resultados.

As métricas utilizadas para mensuração do dano e para a descrição da estrutura das comunidades bênticas foram: composição, número de táxons, abundâncias médias, densidade total e os índices de diversidade de Shannon.

Para analisar as possíveis diferenças das abundâncias médias, dos números de táxons, índices de diversidade entre as 5 campanhas de coletas foram utilizadas análises de variância unifatoriais.

A homocedasticidade dos dados foi testada através do teste de homogeneidade das variâncias de Bartlett e verificada a normalidade dos dados. Quando as médias apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre elas foi utilizado o teste *a posteriori* de HSD Tukey para a averiguação de quais períodos de coletas diferiram estatisticamente dos demais, ou seja, diferença mínima significativa para a hierarquização das médias.

Quando os dados não seguiram os pressupostos da análise de variância foi utilizado o teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis ANOVA que permite a comparação de três ou mais grupos em amostras independentes. As análises foram executadas no programa Statística 12 da StatSoft.

Para o período anterior ao desastre (série histórica até novembro de 2015) foi utilizado o estudo de Matthews-Cascon et al. (2018) como linha-base pois foi realizado entre dezembro de 2010 e julho de 2011. Também foram utilizados os resultados do relatório da Marinha do Brasil (2016), realizado entre novembro de 2015 e março de 2016 para balizar as discussões.

Para as comparações entre os dois estudos foram utilizados os valores médios entre as estações de coletas, expressos em metro quadrado.

Após março de 2016 foram realizadas expedições pelas equipes das Universidades Federais do Espírito Santo, Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul. Os resultados foram inclusos na discussão e nas inferências finais, contudo, não foram utilizados na mensuração do dano pois foram calculados com métricas diferentes, em volume e, nesse diagnóstico foram calculados em área (LONGO, 2019; BIANCHINI, 2019d).

Em todos os estudos, para a discussão dos resultados foram utilizadas somente estações localizadas até 28 m de profundidade.

Para a avaliação da condição de saúde e contaminação por EPTs dos invertebrados bênticos do ambiente marinho foi realizado um levantamento sistemático de dados secundários de estudos realizados antes e após o desastre da barragem de Fundão (MG). No presente relatório serão apresentados os dados secundários, obtidos após a elaboração do diagnóstico do dano, os quais referem-se ao acompanhamento do dano.

2.4.2 ALTERAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS GRANULOMÉTRICAS DO SEDIMENTO SUPERFICIAL

Em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), verificou-se que as características granulométricas no período logo após o desastre (P1) apresentaram maiores percentuais de sedimentos finos (silte e argila) em alguns compartimentos, entretanto dentro de uma faixa de variação já registrada na região antes do rompimento da barragem de Fundão. Conforme apontado pela modelagem de dispersão da pluma apresentada em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e) e por um estudo relativo à ocorrência de deposição de rejeitos no leito marinho (GOLDER, 2016), fica claro que ocorreu a deposição de rejeito nas adjacências da foz do rio Doce, alterando as características granulométricas do sedimento superficial da região analisada. Devido à ausência de dados brutos de sedimentologia do período pré-desastre e a falta destes dados no período P1, logo após o desastre, não foi possível quantificar a alteração de cada classe granulométrica e em qual magnitude ocorreram essas alterações da granulometria da região, não sendo possível quantificar o dano relacionado a estas alterações. Desse modo, foi possível afirmar que ocorreu um dano relacionado a alteração da granulometria do sedimento superficial, que pode ter vindo a afetar os organismos bentônicos de fundos inconsolidados e consolidados. Assim, no presente relatório serão apresentados os resultados da variação das classes granulométricas conforme a classificação de Folk (1954) na região marinha adjacente a foz do rio Doce ao longo de P6 (janeiro/2020 a setembro/2020), P5 (janeiro/2019 a dezembro/2020) e nos períodos anteriores.

Em P5 e em P6, conforme pode ser observado na Figura 39 e na Figura 40, baseadas em dados primários e secundários, continuou-se a ser observada uma distribuição similar das classes de granulometria em cada compartimento em relação aos períodos anteriores. É possível verificar uma variação

significativa das classes de granulometria nos compartimentos mais próximos a foz, principalmente no compartimento 5-A (raio de 4 quilômetros no entorno da foz do rio doce). Neste compartimento, em todos os períodos observou-se que os sedimentos foram classificados em classes de dominância de grãos de maior diâmetro como areia, mas também observou-se uma influência significativa de sedimentos mais finos, com a predominância das classes areia siltosa, silte arenoso e lama arenosa. O compartimento 5-B1 continua sendo o compartimento que apresenta a maior dominância de grãos de menor diâmetro, com classificações como silte e silte arenoso na maior parte do tempo. No compartimento 5-B2, após P3, houve uma dominância da classe areia, enquanto nos períodos anteriores, este apresentava em diversas ocasiões sedimentos classificados como silte e silte arenoso. Tal variação pode ser associada a mudança da localização das estações amostrais com o início do PMQQS da Fundação Renova. Em P6 ainda se observou a classificação lama e lama arenosa nas coletas de março/2020, e a ocorrência de sedimentos finos, que podem estar associados com a cheia intensa que atingiu a bacia do rio Doce no início de 2020 (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020i), o que evidencia que o compartimento 5B-2 continua apresentando em algumas ocasiões sedimentos mais finos, conforme observado logo após o desastre. O compartimento 5-C, em P6, apresentou também influência de sedimentos finos, sendo estes classificados como areia argilosa e silte arenoso.

Os compartimentos mais distantes e ao sul da foz do rio Doce (5-D e 5-E) apresentaram tendência similar aos anos anteriores em P5 e P6, com a dominância de sedimentos associados a granulometrias de maior diâmetro na maior parte do tempo. Já os sedimentos do compartimento mais distante localizado ao norte da foz do rio Doce apresentou predominância de sedimentos influenciados por silte e argila, conforme pode ser observado na Figura 40.

Importante ressaltar que a variação das classes de granulometria encontradas nos sedimentos da área marinha estudada é similar as já descritas na região antes da chegada da pluma de rejeitos por Albino e Suguio (2010) e Quaresma et al. (2015), conforme detalhado em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e). Assim, com a inserção dos dados de P5 e P6, continua não sendo possível identificar uma clara diferença entre os períodos pré e pós desastre, visto que a foz do rio Doce já apresentava sedimentos predominantemente finos (silte, argila e silte arenoso), granulometrias frequentemente associadas ao rejeito. Desse modo, ainda é possível afirmar que houve o dano de alteração da granulometria do sedimento superficial marinho, devido a ocorrência da deposição de rejeito nas adjacências da foz do rio Doce, alterando as características granulométricas do sedimento superficial da região analisada, conforme apontado na modelagem de dispersão da pluma apresentada em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e) e pela confirmação da deposição de rejeitos no leito marinho (GOLDER, 2016), entretanto este dano não foi classificado.

Figura 39 – Classes granulométricas (FOLK, 1954) das amostras de sedimento, provenientes de dados primários e secundários, para os meses pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce.

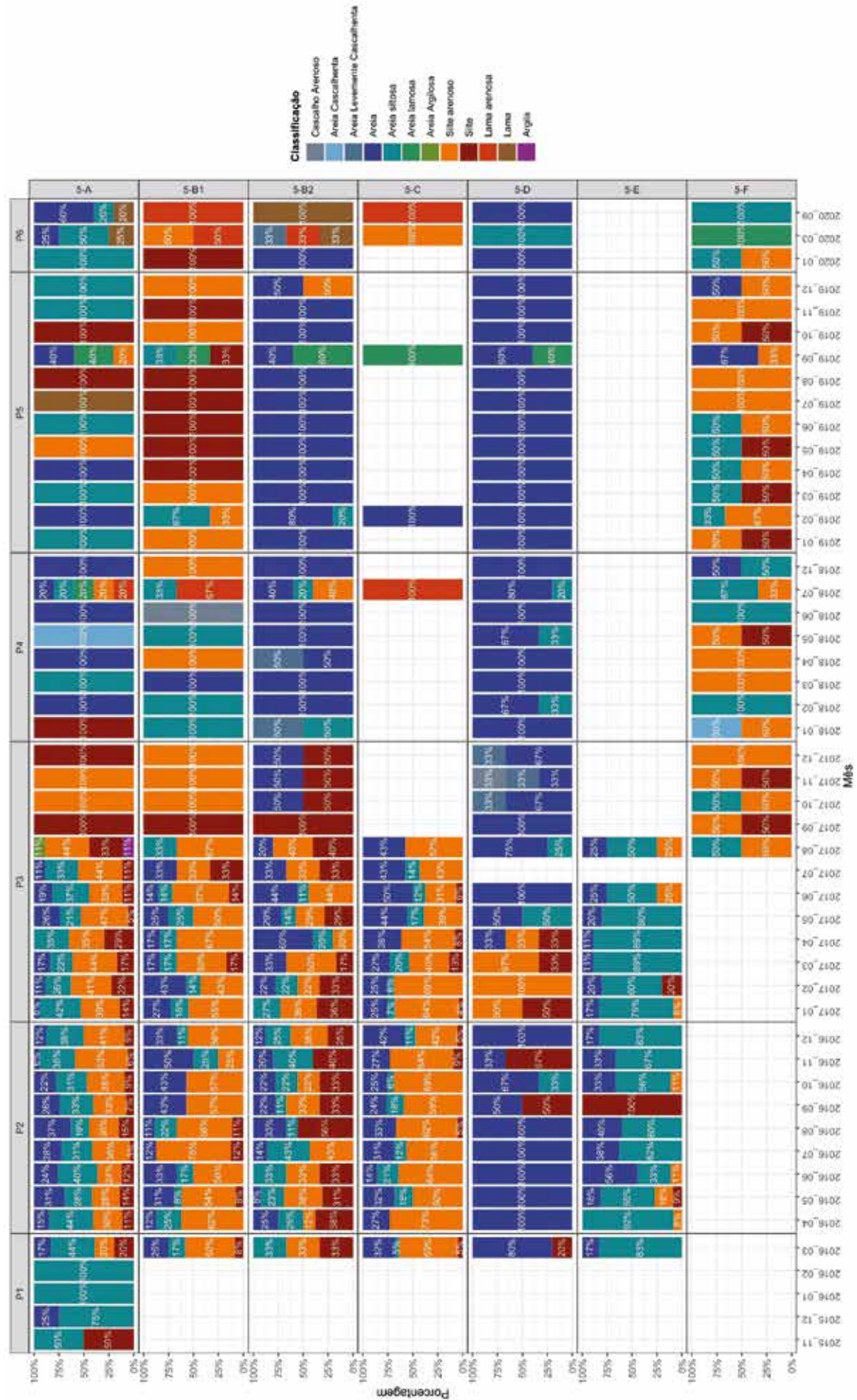
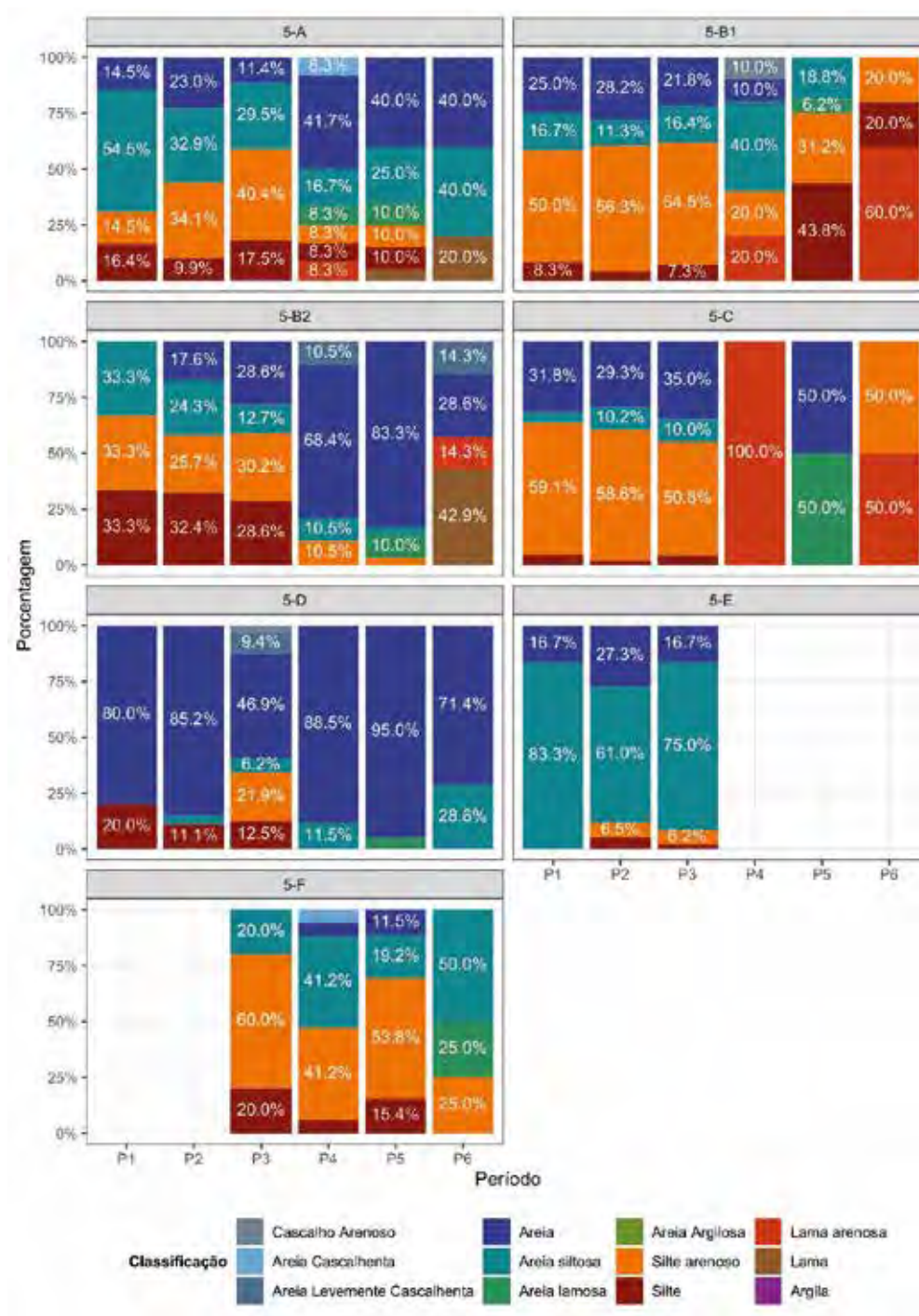


Figura 40 – Classificação granulométrica (FOLK, 1954) das amostras de sedimento provenientes de dados primários e secundários, para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce.



2.4.3 AUMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE EPTS NO SEDIMENTO

Os resultados da avaliação da concentração de EPTs no sedimento é apresentado, inicialmente, por elemento, sendo eles: alumínio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, ferro, manganês, mercúrio, níquel e zinco. Na sequência é apresentada a síntese do dano com sua respectiva tendência de evolução ao longo do tempo.

2.4.3.1 Alumínio

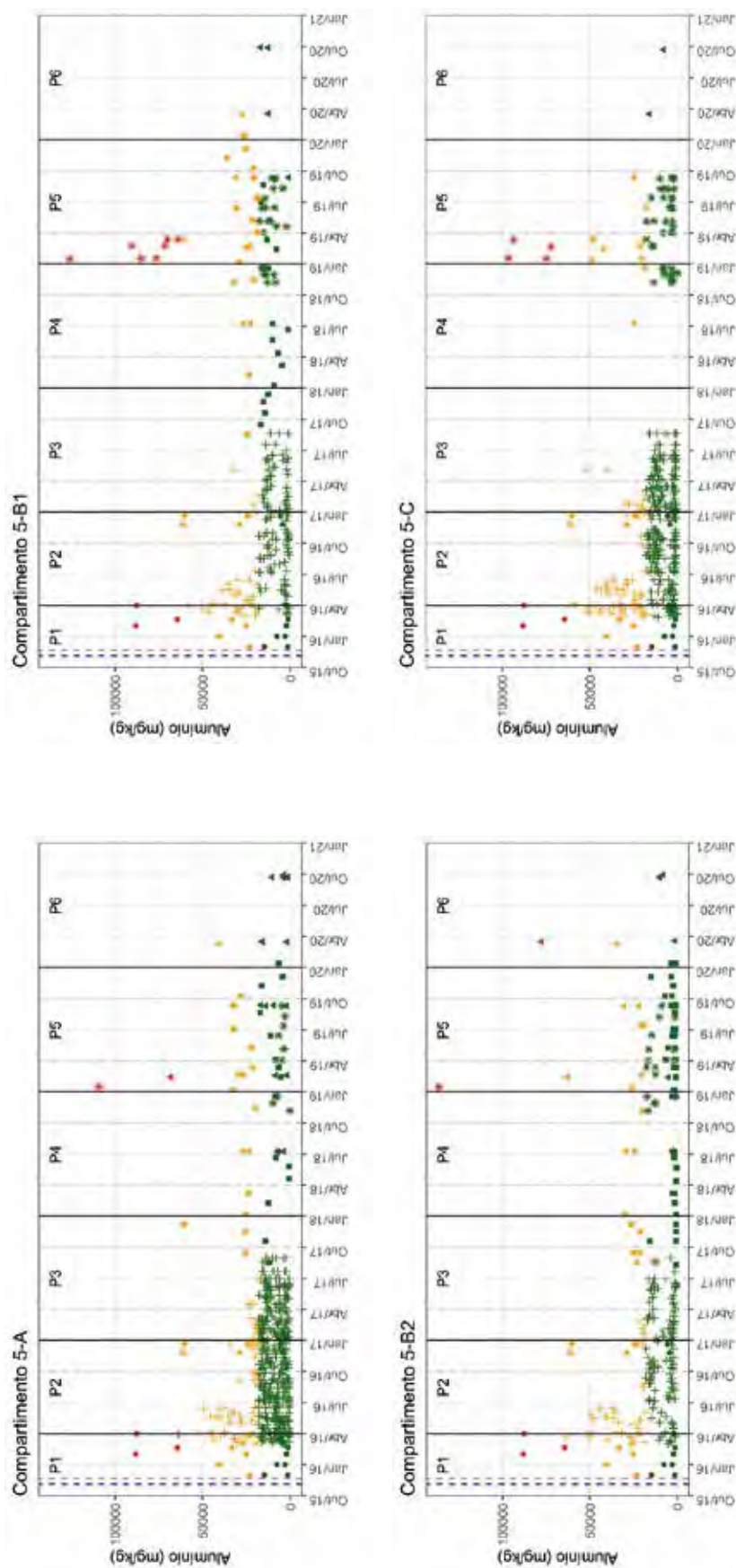
Para a avaliação da tendência de evolução do dano em relação ao aumento das concentrações de EPTs, realizou-se o cálculo das proporções entre as categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre (Figura 41), considerando apenas os dados da Fundação Renova e do Lactec, conforme descrito na metodologia. Os dados de alumínio em sedimento foram classificados considerando o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (62.804,4 mg/kg) e de acordo com o nível de efeitos aparentes (*Apparent Effect Threshold* – AET, 18.000 mg/kg). Em P5 (janeiro/2019 a dezembro/2019) foi possível verificar, de forma geral, uma manutenção do percentual de dados na Categoria A no ambiente marinho em relação ao ano de 2018. Comparando os resultados de P5 com os resultados obtidos logo após o desastre (P1), é possível observar uma menor proporção de dados na categoria C em P5, evidenciando uma melhora das condições do sedimento em relação as concentrações de alumínio.

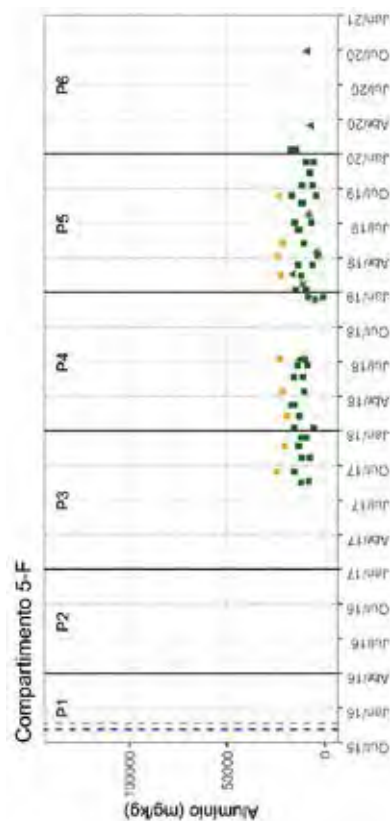
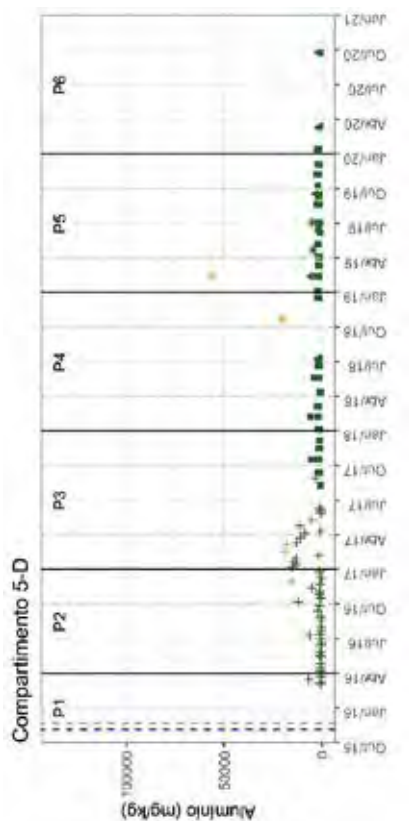
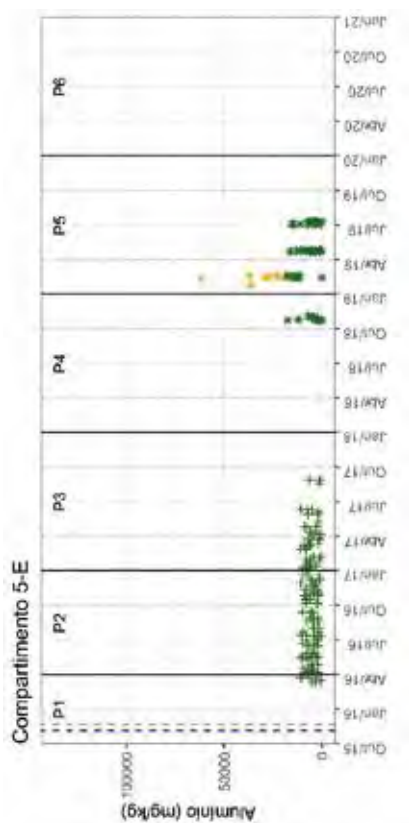
Foi realizada também uma avaliação dos dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar, que é apresentada nos gráficos da Figura 42. Com a inclusão dos dados da RRDM observaram-se diversos dados na categoria C em P5 (janeiro/2019 a dezembro/2019), com diversos registros entre janeiro e março/2019. Esta quantidade de dados na categoria C ainda não tinha sido registrada nos dados da Fundação Renova e do Lactec. Dados na categoria B foram registrados em quase todos os compartimentos, principalmente nos compartimentos 5-A, 5-B1 e 5-B2.

Figura 41 – Classificação das alterações para alumínio em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).



Figura 42 – Classificação dos dados de alumínio em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.



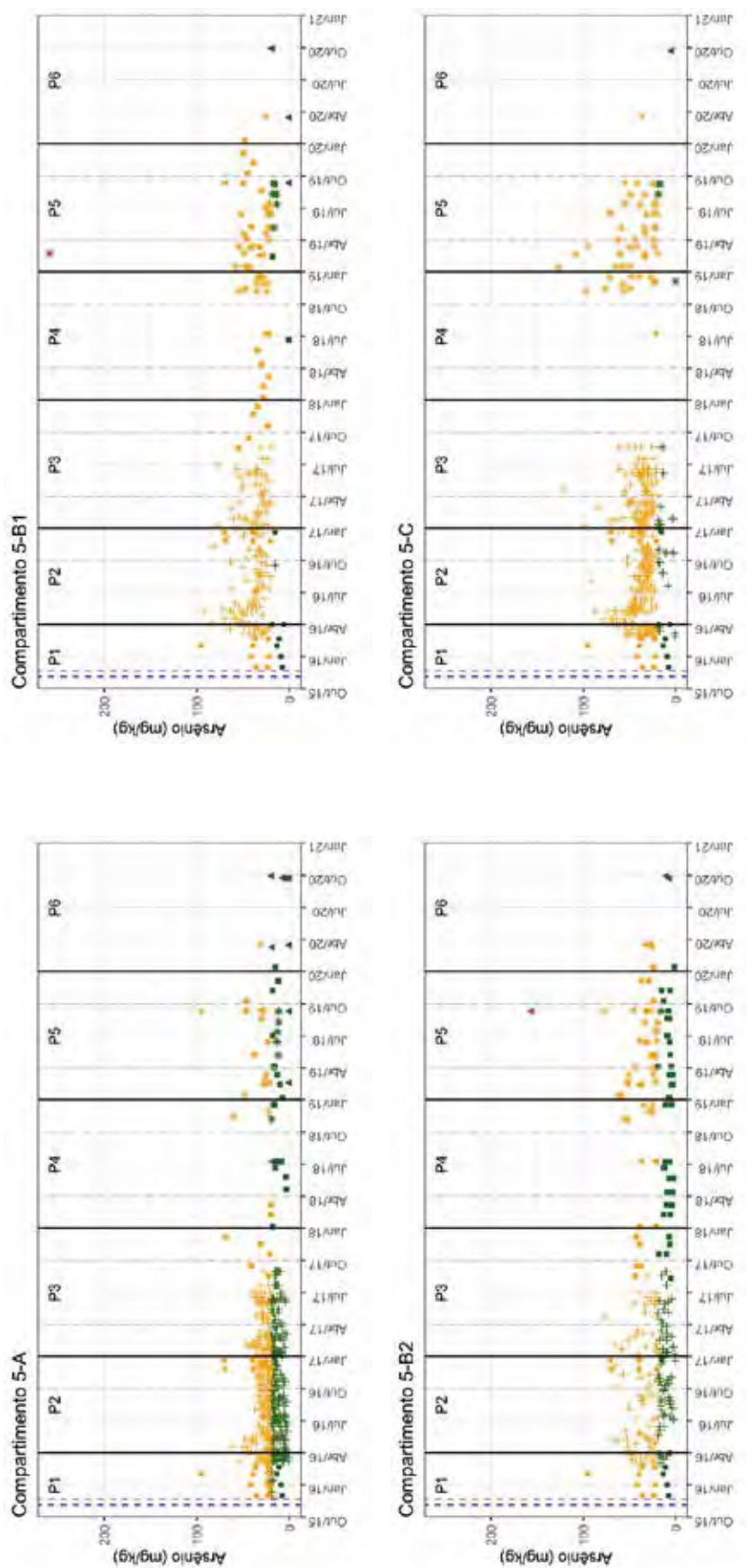


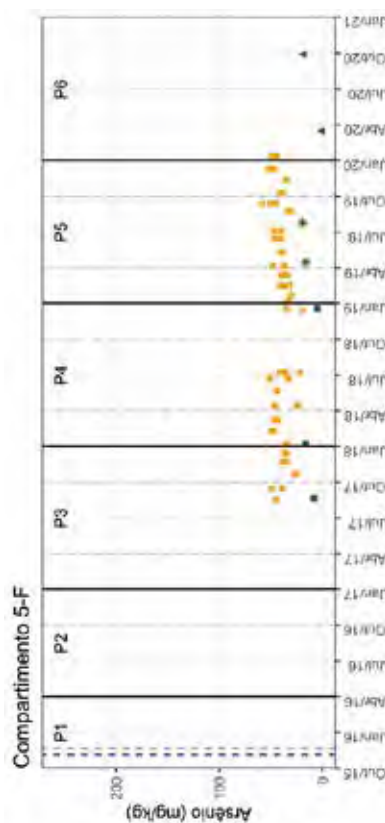
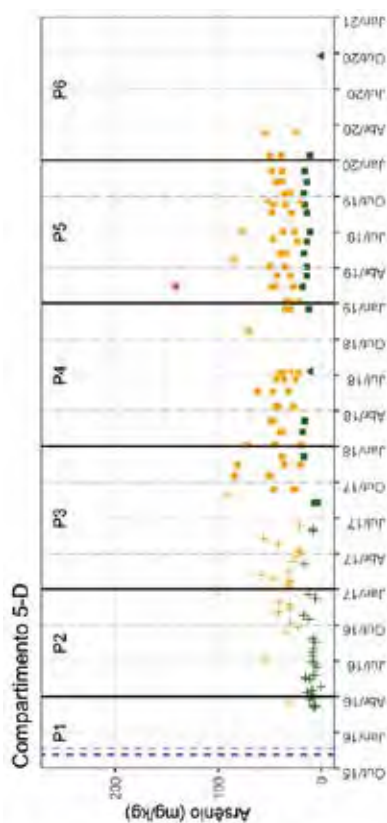
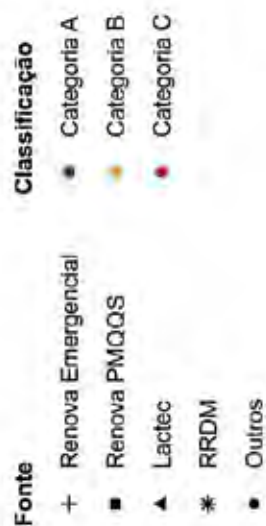
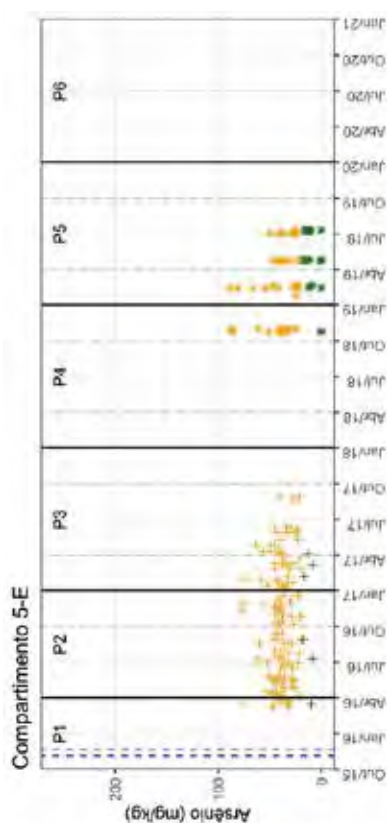
2.4.3.2 Arsênio

Os dados de arsênio em sedimento foram classificados considerando o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (134 mg/kg) e de acordo com o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 (limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota), cuja concentração é de 19 mg/kg. Conforme Brasil (MPF)/ Lactec (2020e) a distribuição espacial e temporal de dados na Categoria B não indicam alterações relacionadas única e diretamente com o desastre, sendo importante ressaltar que a classificação “Categoria B”, apesar de representar valores acima do estabelecido pela legislação ambiental, representa dados de acordo com as concentrações encontrados na região no período pré-desastre, que já apresentava concentrações elevadas de arsênio antes da chegada da pluma de rejeitos à zona costeira. O enriquecimento e a contaminação de arsênio no sedimento na plataforma continental leste brasileira devido a exploração mineral na bacia do rio Doce desde o século 17 foi relatado por Cagnin (2018). Altas concentração de arsênio foram registradas neste estudo em camadas mais profundas dos testemunhos retirados nas adjacências da foz do rio Doce, dificultando a avaliação dos efeitos do desastre sobre as concentrações de arsênio no sedimento, devido a uma contaminação pré-existente. Assim, a avaliação dos resultados deste indicador teve caráter qualitativo, e não quantitativo, conforme ocorreu para alguns indicadores no relatório de danos (BRASIL (MPF)/ LACTEC, 2020e).

No presente relatório são apresentados os gráficos de dispersão dos dados de arsênio classificados por categoria para auxiliar na compreensão das variações do indicador durante P5 e P6 (Figura 43). Nos gráficos apresentados, é possível verificar que, em P5, foram registrados dados na categoria C apenas no compartimento 5-B2, onde foi registrada uma concentração de 156 mg/kg em uma amostra coletada pelo Lactec. Conforme ocorreu nos períodos anteriores a P5, diversos dados novamente foram classificados na categoria B no último período, evidenciando que regularmente as concentrações de arsênio no sedimento são mais elevadas do que o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 454/2012 de 19 mg/kg. Embora não seja possível relacionar as concentrações de arsênio no sedimento diretamente com o desastre, é importante ressaltar que estes níveis de arsênio refletem uma condição ruim do ambiente e podem ter efeitos negativos sobre a biota aquática.

Figura 43 – Classificação dos dados de arsênio em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.3 Bário

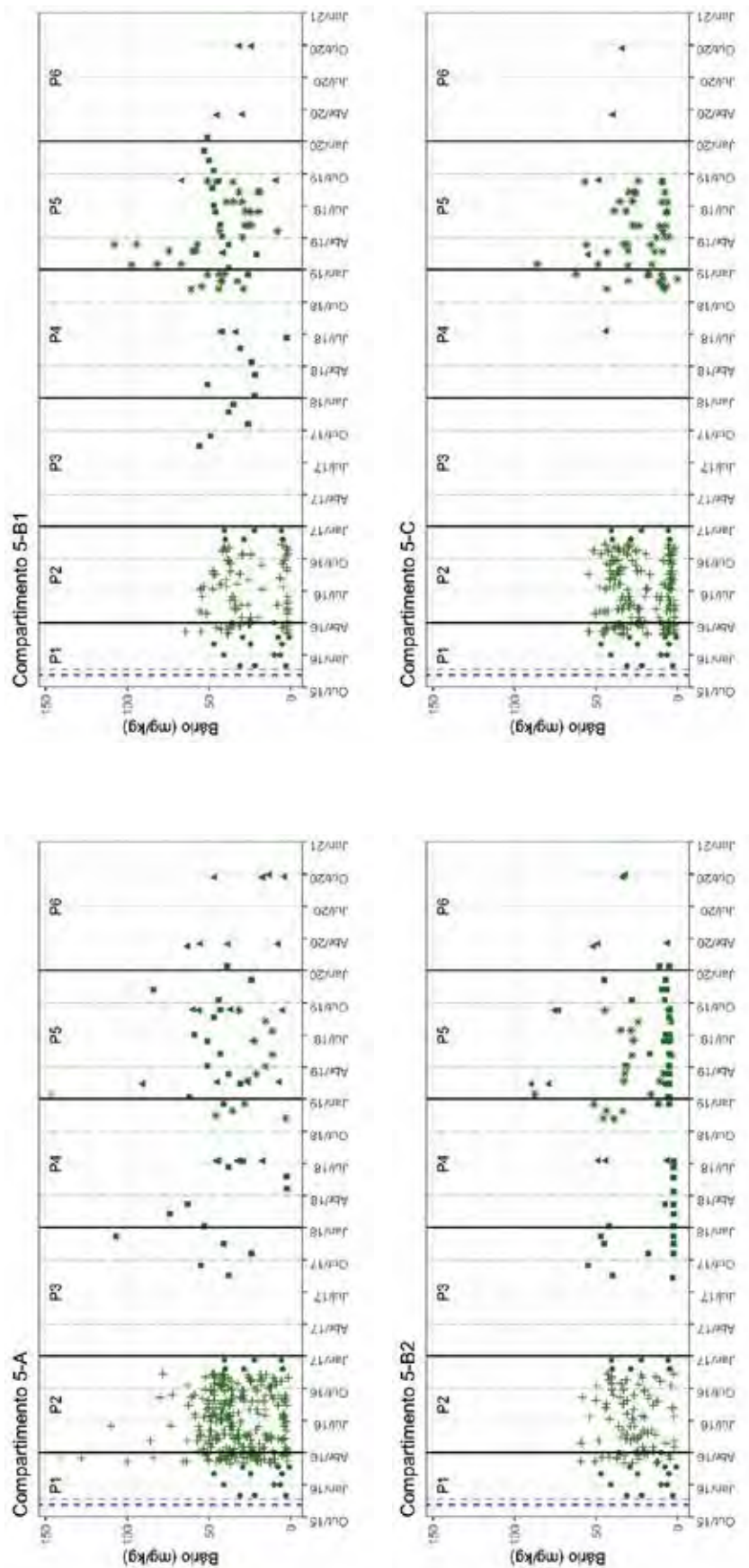
Os dados de bário em sedimento foram classificados considerando o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (219 mg/kg) e de acordo com o nível de efeitos limiares (*Threshold Effects Limit – TEL*), cuja concentração é de 130,1 mg/kg.

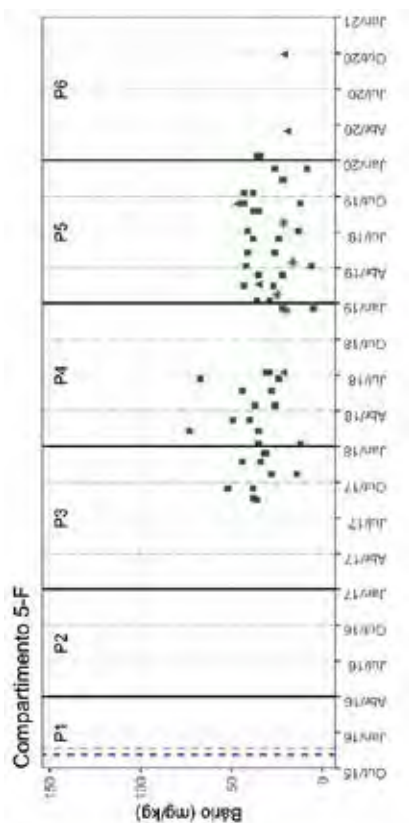
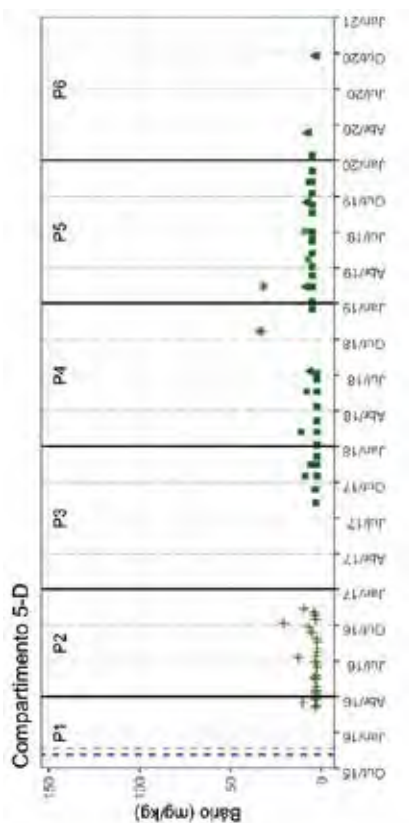
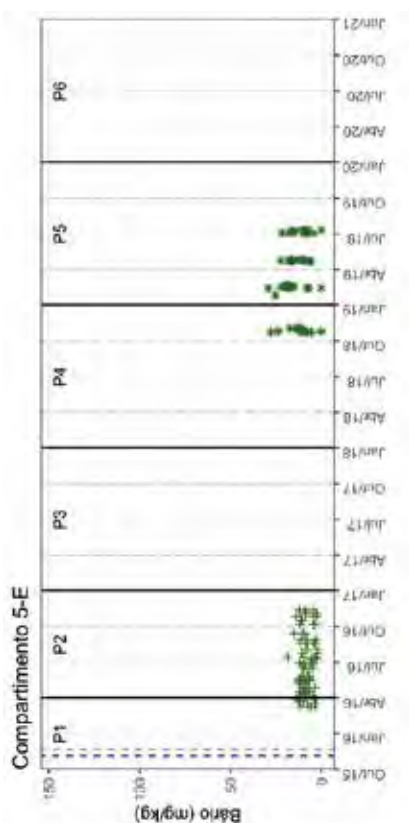
Em P5 (Figura 44), entre janeiro/2019 e dezembro/2019, houve uma manutenção da proporção de dados de bário no sedimento classificados na categoria A em todos os compartimentos do ambiente marinho (5-A a 5-F). Tanto os compartimentos mais próximos à foz quanto os compartimentos mais distantes apresentaram 100% das concentrações de bário classificadas na Categoria A em P5 e nos períodos anteriores (P2, P3 e P4), com exceção do compartimento 5-A em P4 que registrou apenas 1 dado na categoria B.

Complementarmente, avaliando os dados do ano de 2020 e da RRDM em conjunto (Figura 45), é possível verificar que não foi registrado nenhum dado na categoria B ou C nos últimos períodos avaliados (P5 e P6). Os dados apresentados indicam que não estão sendo mais registradas alterações quanto ao indicador bário no ambiente marinho em decorrência do desastre. Por precaução, faz-se necessária a continuidade do acompanhamento das alterações das concentrações deste indicador.

Figura 44 – Classificação das alterações para bário em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).

Figura 45 – Classificação dos dados de bário em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.4 Cádmio

Os dados de cádmio em sedimento foram classificados considerando o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para sedimentos de águas salinas/salobras (limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota), cuja concentração é de 1,2 mg/kg, e o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (1,68 mg/kg).

Todos os compartimentos no período P5 apresentaram 100% dos dados de cádmio no sedimento classificados na categoria A, ou seja, todos os dados coletados pelo Lactec e Fundação Renova em 2020 estiveram de acordo o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 e abaixo do valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce no período pré-desastre, conforme pode ser visualizados nos gráficos da Figura 46.

Complementarmente, avaliando os dados dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar (Figura 47), observou-se dados da RRDM na categoria C em P4 e P5 (janeiro/2019 e dezembro/2019), com registros de dados nesta categoria nos compartimentos 5-E e 5-B1, respectivamente. Este registro de dados na categoria C ainda não tinha sido registrado nos dados da Fundação Renova e do Lactec após P2, dados na categoria C indicam concentrações acima do máximo histórico pré-desastre e do nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012.

Figura 46 – Classificação das alterações para o cádmio em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).

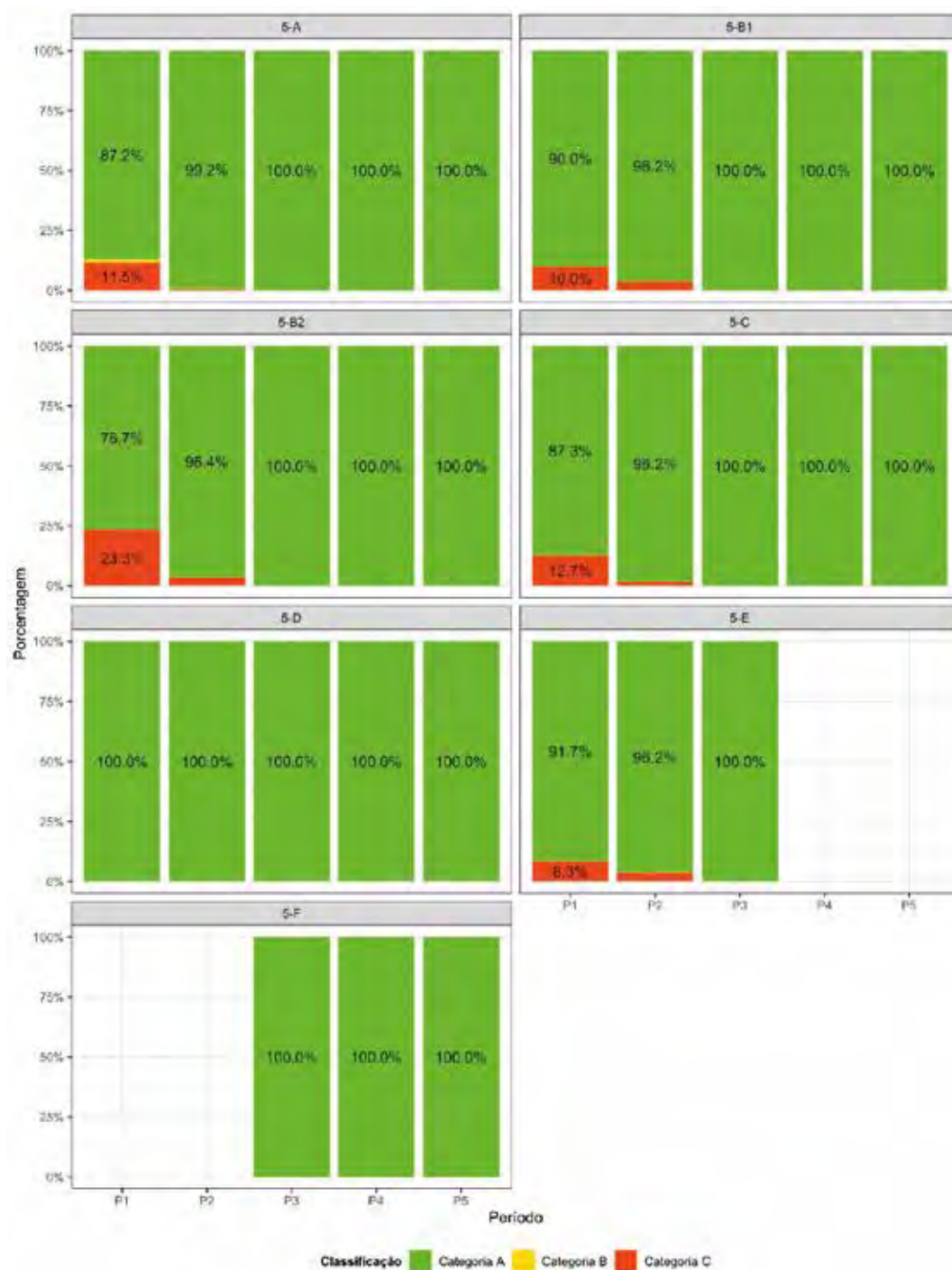
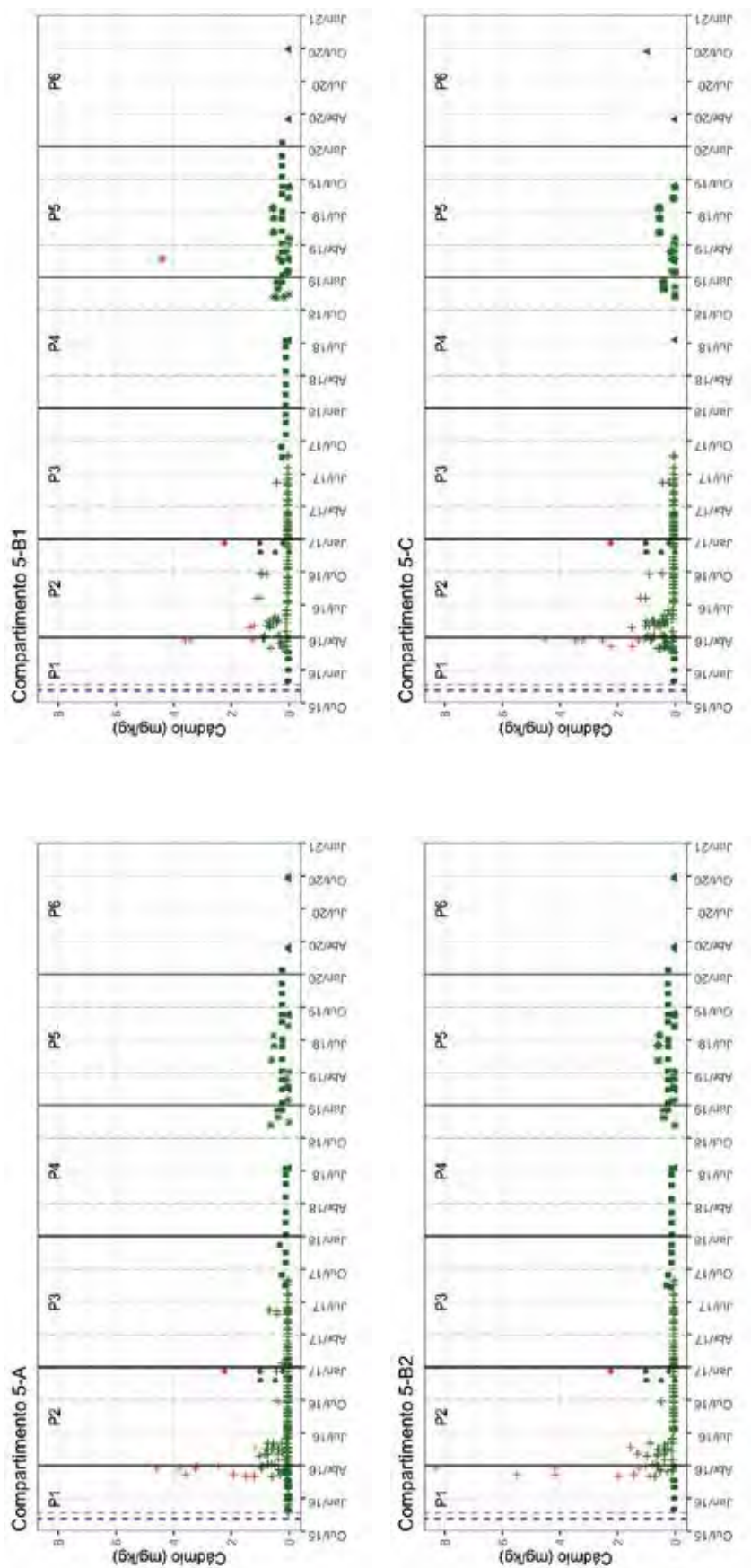
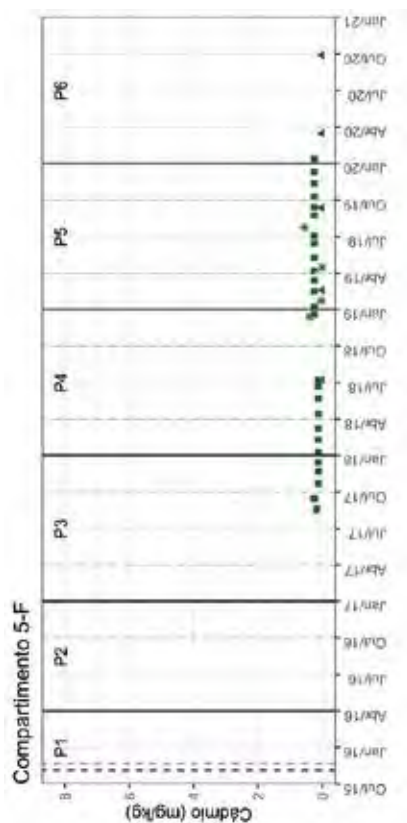
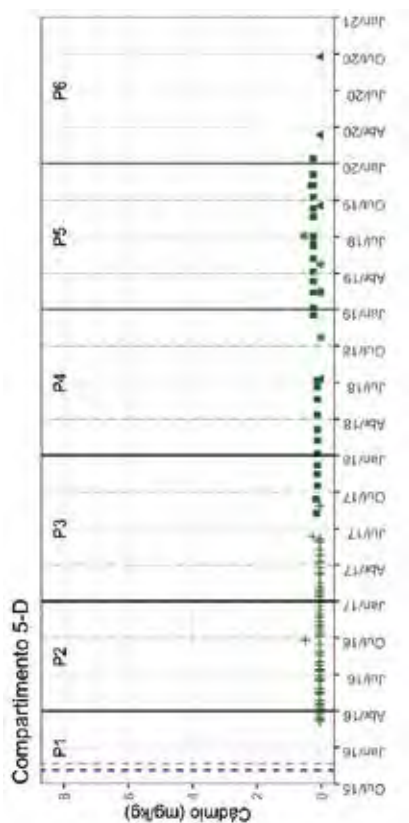
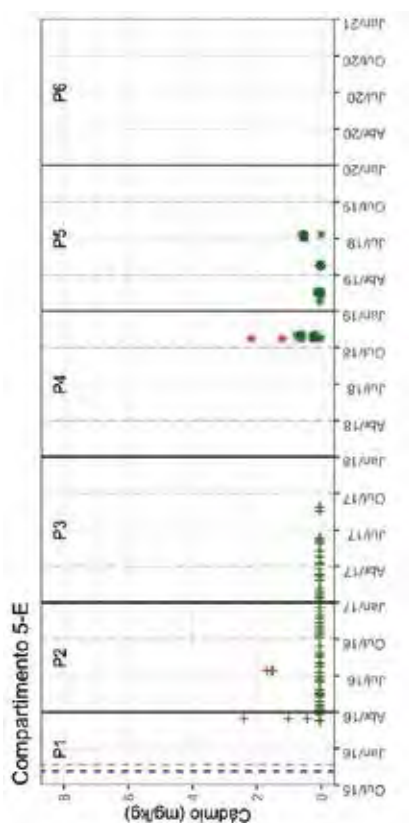


Figura 47 – Classificação dos dados de cádmio em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.5 Chumbo

Os dados de chumbo em sedimento foram classificados considerando o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para sedimentos de águas salinas/salobras (limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota), cuja concentração é de 46,7 mg/kg, e o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (40,31 mg/kg).

Para a avaliação da tendência de evolução do dano em relação ao aumento das concentrações de EPTs, realizou-se o cálculo das proporções entre as categorias A, B e C para cada um dos compartimentos até o período P5 (Figura 48), considerando apenas os dados da Fundação Renova e do Lactec, conforme descrito na metodologia. Com exceção do compartimento 5-B1, todos os compartimentos do ambiente marinho apresentaram 100% dos dados de chumbo no sedimento classificados na categoria A, ou seja, estiveram de acordo com o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 e abaixo do valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce no período pré-desastre.

Complementarmente, foram avaliados os dados dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar (Figura 49). Em P4 e P5, foi registrado no compartimento 5-B1 apenas duas amostras que apresentaram concentrações de chumbo passíveis de classificação na categoria C, uma em cada período. Destas, uma amostra foi coletada pelo Lactec (477 mg/kg) e outra pela RRDM (146,7 mg/kg). Ressalta-se que logo após o desastre (P1) não foram observadas concentrações de chumbo acima dos limites supracitados, entretanto o registro recente de concentrações de chumbo acima dos níveis máximos pré-desastre indica que podem ser verificadas alterações quanto a este indicador no compartimento 5-B1. Quanto aos resultados de chumbo durante P6, provenientes do Lactec e da Fundação Renova, foram observados valores em acordo com os limites supracitados em todos os compartimentos do ambiente marinho.

Figura 48 – Classificação das alterações para chumbo em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).

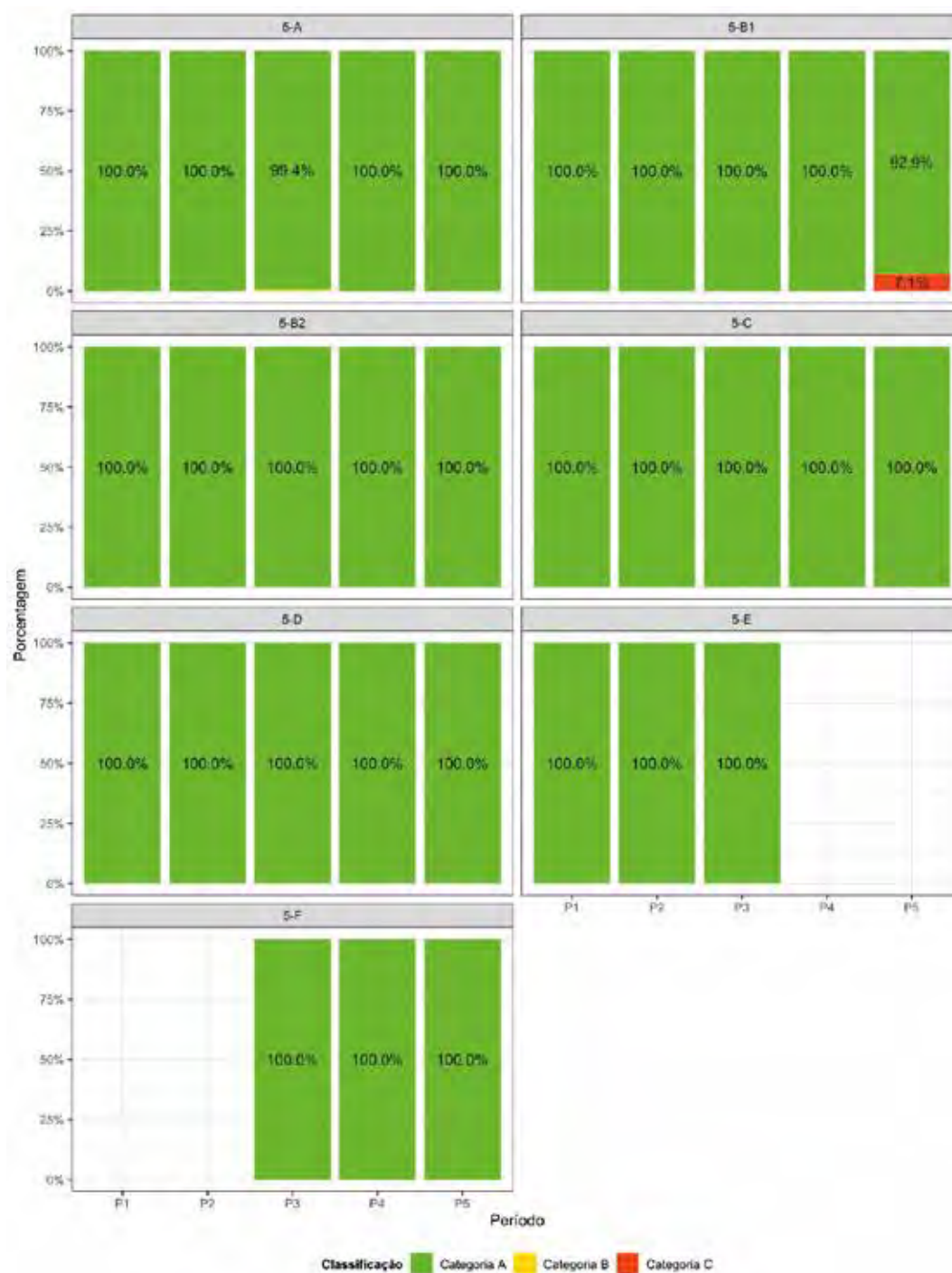
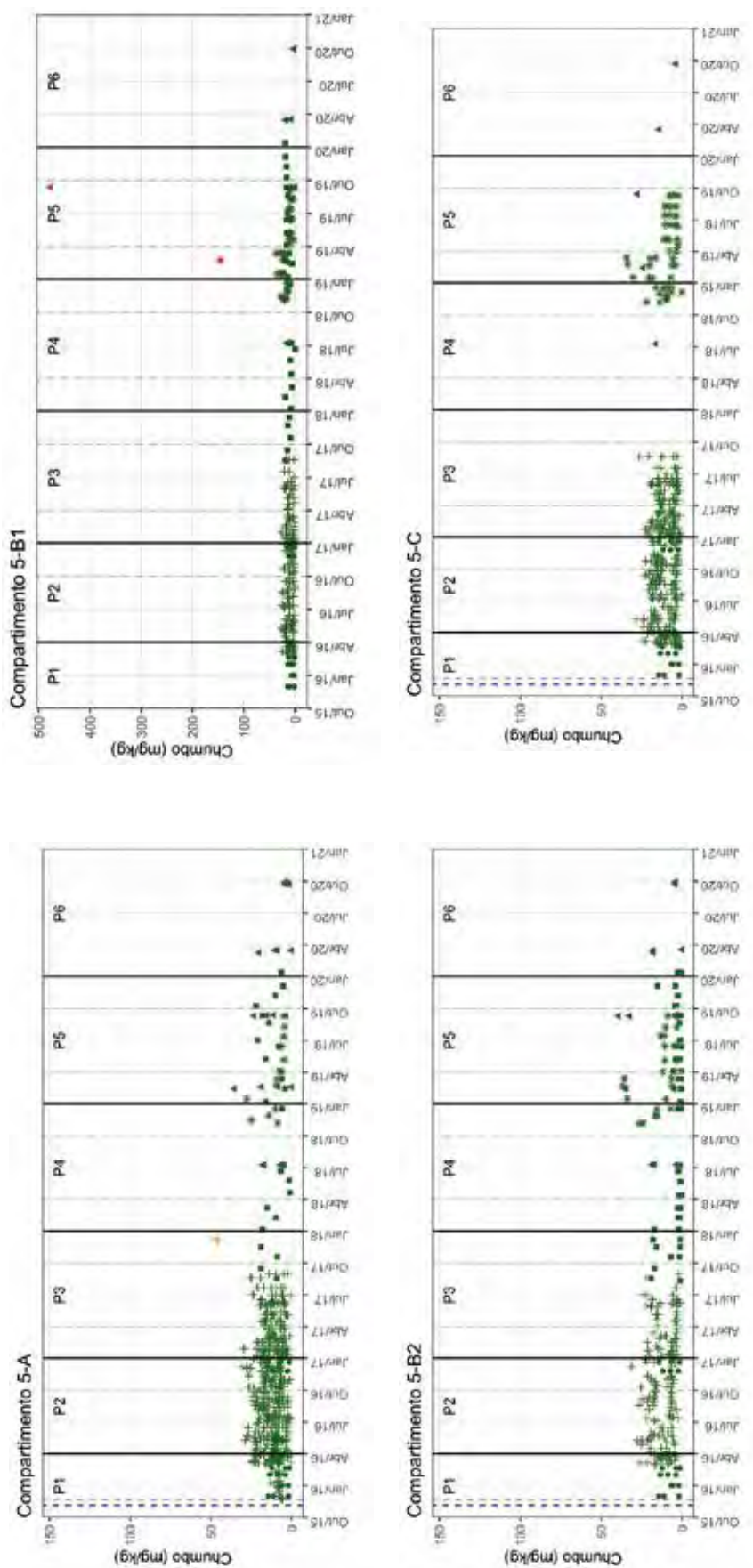
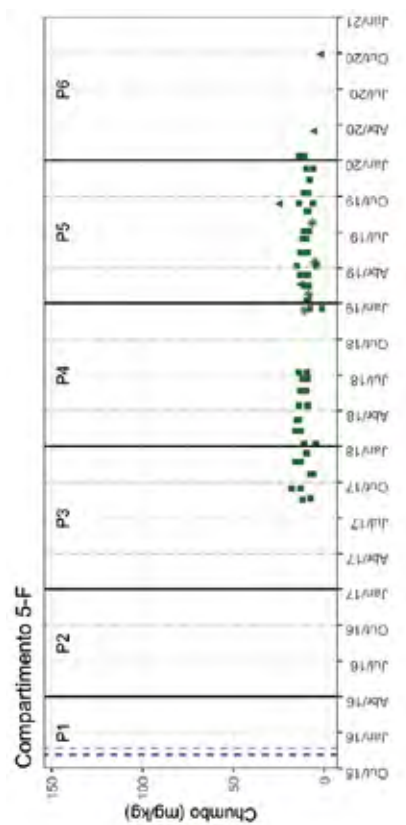
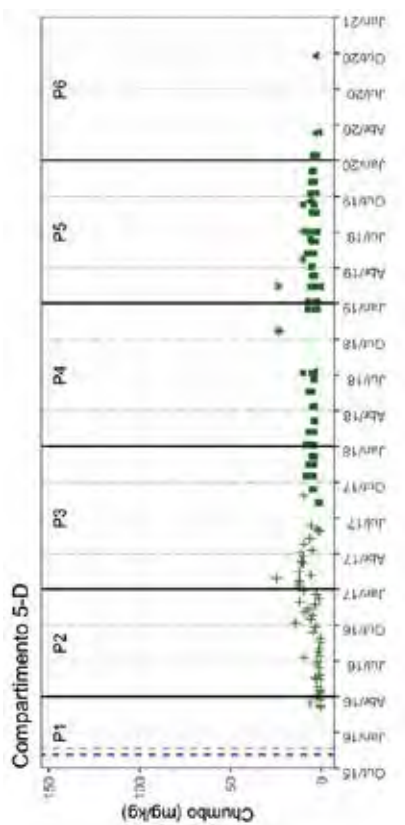
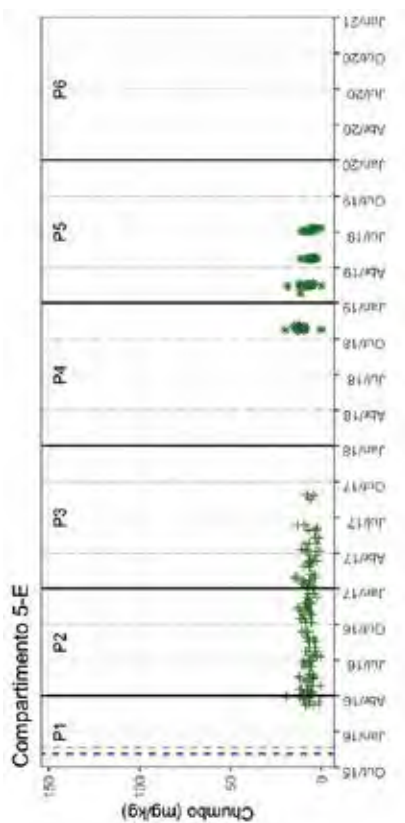


Figura 49 – Classificação dos dados de chumbo em sedimento em sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.6 Cobre

Para a avaliação da tendência de evolução do dano em relação ao aumento das concentrações de EPTs, realizou-se o cálculo das proporções entre as categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre até o final de 2019 (Figura 50), considerando apenas os dados da Fundação Renova e do Lactec, conforme descrito na metodologia. Em P5 (janeiro/2019 a dezembro/2019) foi possível verificar um aumento do percentual de dados na Categoria A em todos os compartimentos do ambiente marinho em relação ao ano de 2018, com exceção do compartimento 5-C, evidenciando que, no referido ano, um maior número de dados esteve de acordo com o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para sedimento de águas salinas/salobras (limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota), cuja concentração é de 34 mg/kg, e o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (39,75 mg/kg). O compartimento 5-C apresentou apenas um dado na categoria C (50,36 mg/kg), conforme pode ser observado na Figura 51. O aumento de percentuais na categoria C neste compartimento está relacionado a baixa quantidade de amostras realizadas no local. Em P5, foram coletadas apenas 2 amostras no compartimento 5-C, sendo que uma delas foi classificada na categoria C, assim P5 apresentou 50% dos dados na categoria C neste compartimento.

Foi realizada também uma avaliação dos dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar, que é apresentada nos gráficos da Figura 51. Avaliando os dados da RRDM, observou-se uma maior quantidade de dados nas categorias B e C em P4 (janeiro/2019 e dezembro/2019), com registros de dados nestas categorias nos compartimentos 5-A a 5-E. Essas quantidades de dados nas categorias B e C ainda não tinham sido registradas nos dados da Fundação Renova e do Lactec, inclusive no período logo após o desastre (P1). Em 2020 (P6), a partir dos dados do Lactec e da Fundação Renova, observou-se que as concentrações de cobre no sedimento foram todas classificadas na categoria A, ou seja, estiveram em acordo com os padrões de qualidade referenciados.

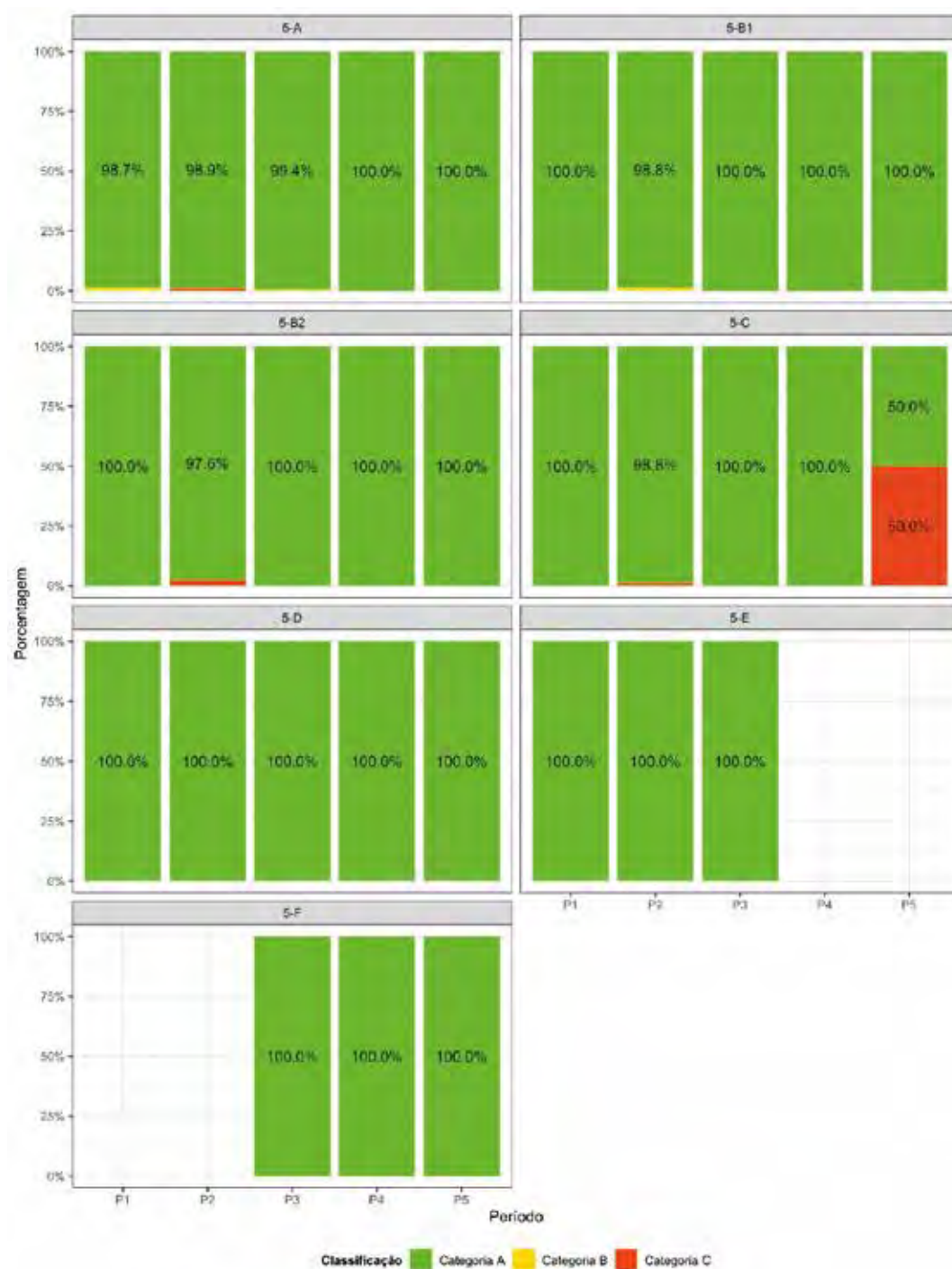
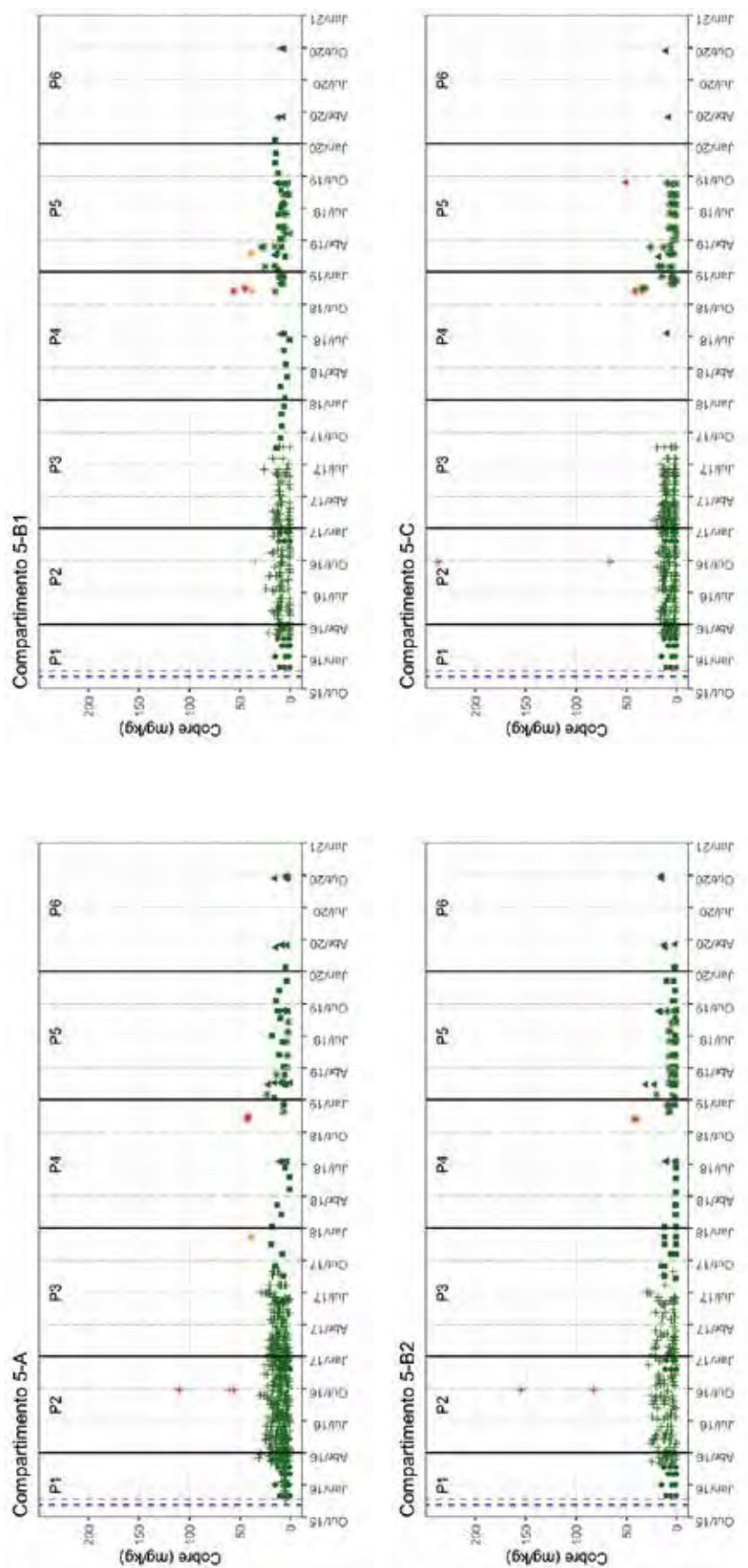
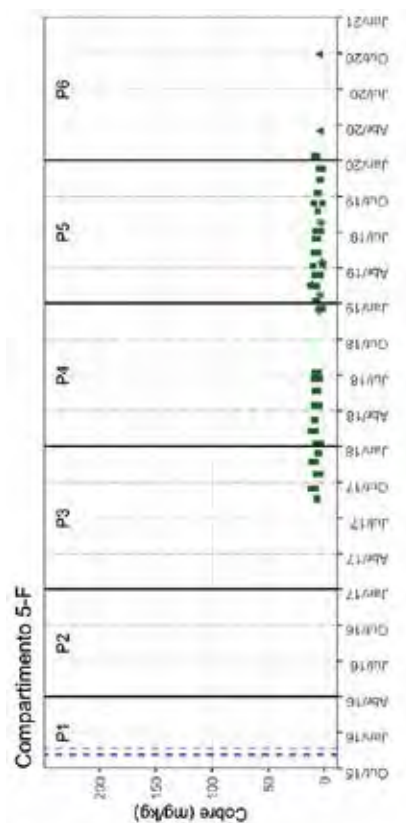
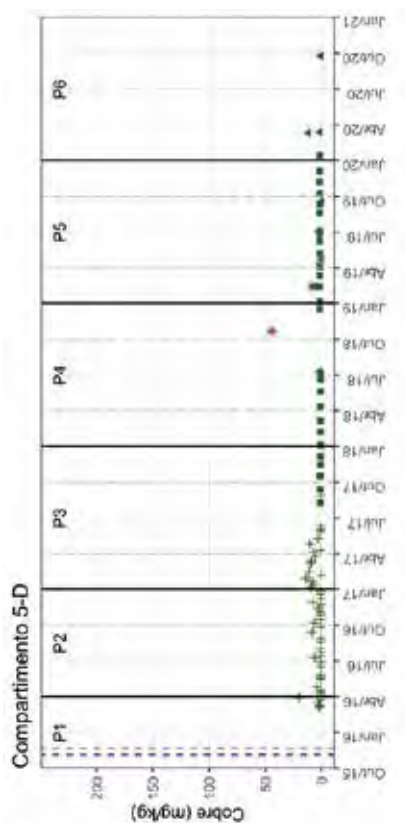
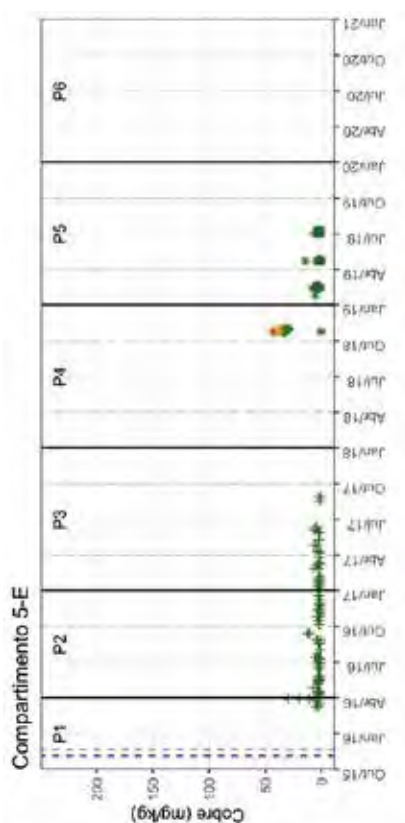
Figura 50 – Classificação das alterações para cobre em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).

Figura 51 – Classificação dos dados de cobre em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.7 Cromo

Os dados de cromo em sedimento foram classificados considerando o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para sedimentos de águas salinas/salobras (limiar abaixo do qual existe menor probabilidade de efeitos adversos à biota), cuja concentração é de 81 mg/kg, e o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (143,83 mg/kg).

Considerando os dados do Lactec e da Fundação Renova para determinação da tendência de evolução do dano, no ano de 2019 (P5), foi possível verificar um aumento ou manutenção do percentual de dados de cromo na Categoria A em todos os compartimentos do ambiente marinho (Figura 52). Em todos os compartimentos, 100% dos dados de cromo no sedimento, provenientes do Lactec e da Fundação Renova, foram classificados na categoria A, ou seja, todos os dados estiveram de acordo com o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 e abaixo do valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce no período pré-desastre.

Complementarmente, foi realizada também uma avaliação dos dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar, que é apresentada nos gráficos da Figura 53. Em P5 (2019), foi observado no compartimento 5-E uma amostra proveniente da RRDM classificada na categoria C. Nos períodos 2 e 3 tinham sido registrados dados de cromo na categoria C também somente neste compartimento. Conforme mencionado em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e), a ocorrência de resultados “Categoria C” em maiores proporções no compartimento 5-E pode estar relacionada a fontes diversas, uma vez que estes compartimentos se encontram a uma distância superior a 22 km da foz do rio Doce, e nos compartimentos mais próximos à foz do rio Doce não foram verificadas concentrações de cromo nestes níveis.

Em P6 (2020), todos os registros apresentaram concentrações classificadas na categoria A (Figura 53).

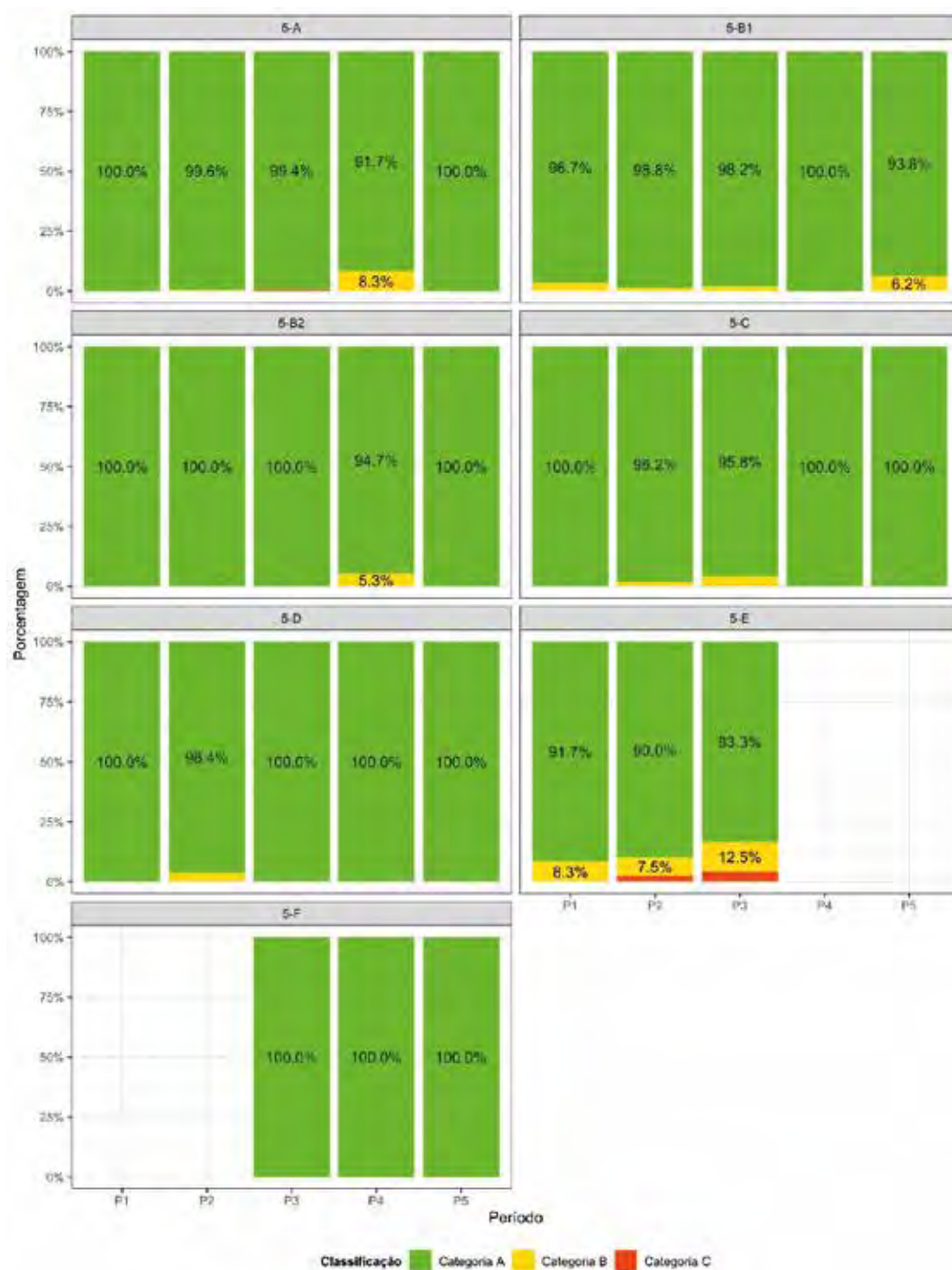
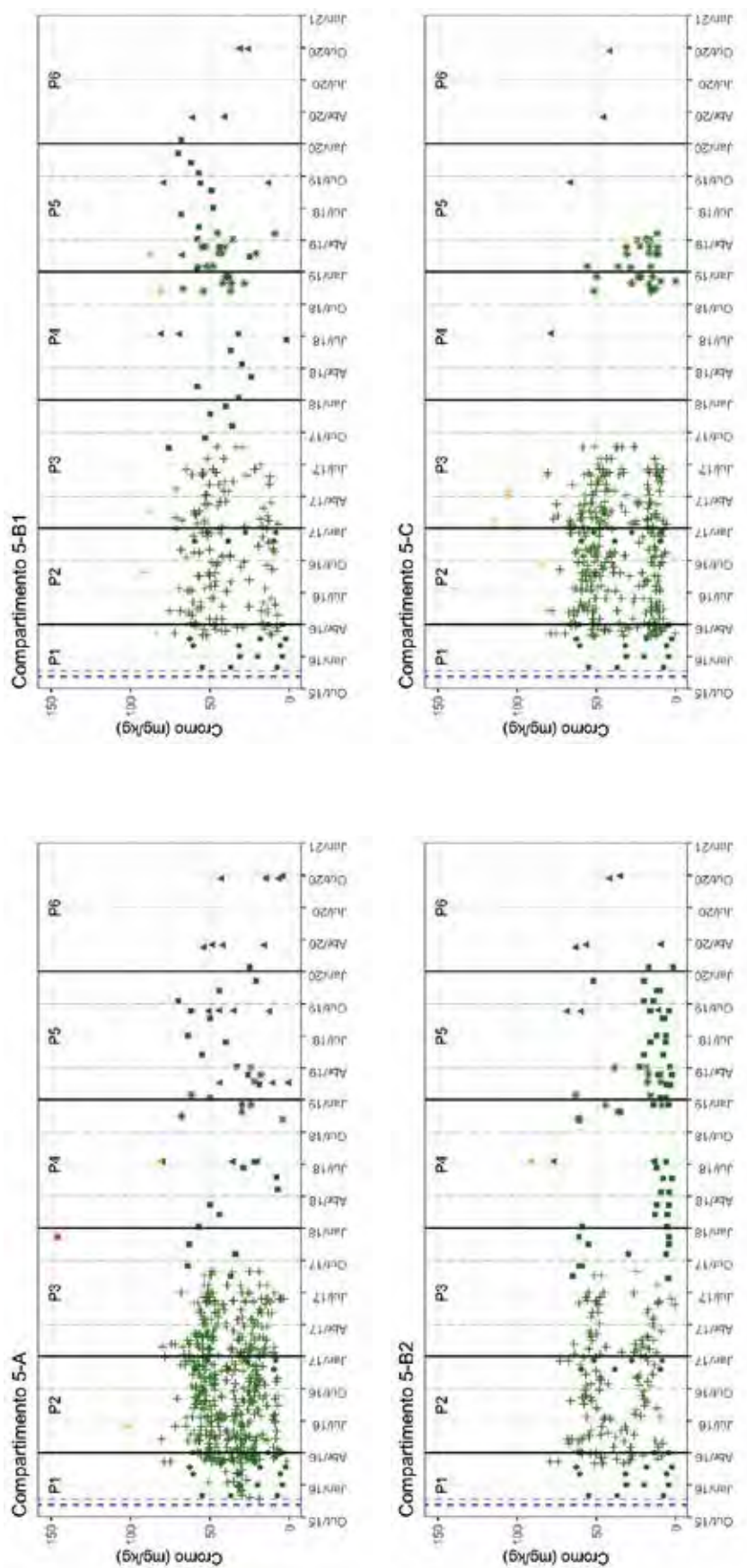
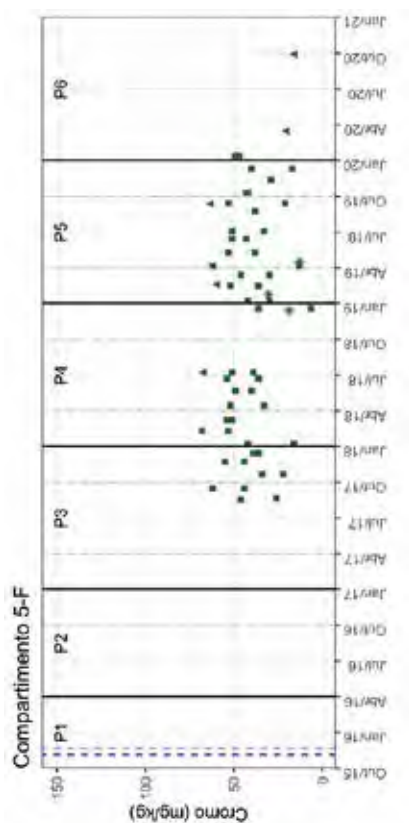
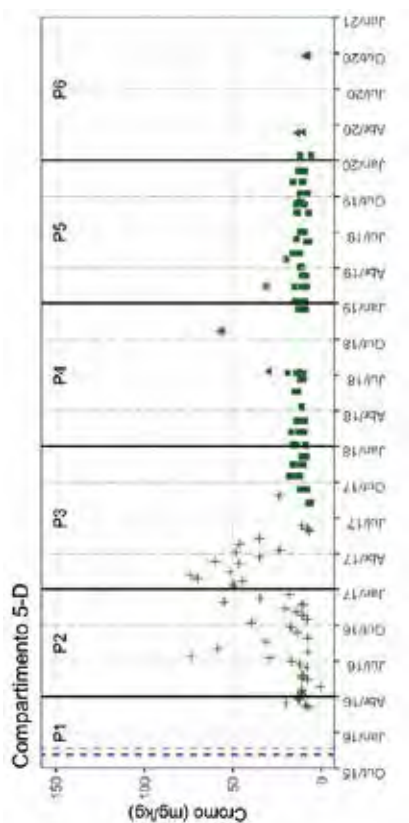
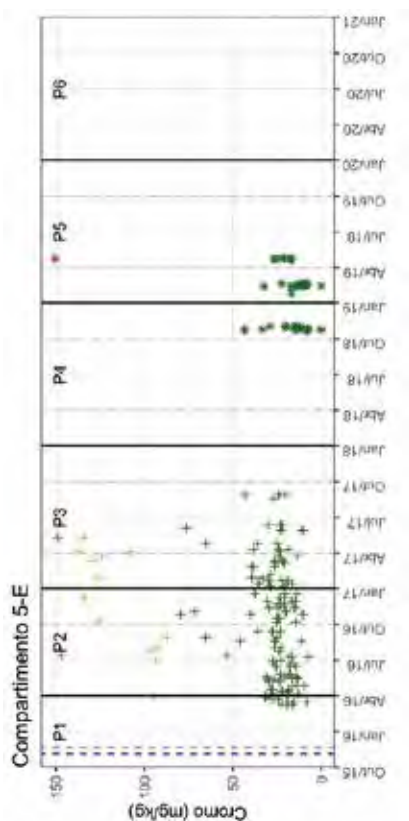
Figura 52 – Classificação das alterações para cromo em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).

Figura 53 – Classificação dos dados de cromo em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.8 Ferro

Os dados de ferro em sedimento foram classificados de acordo com o nível de efeitos aparentes (Apparent Effect Threshold – AET, 220.000 mg/kg) e considerando o valor máximo da série histórica (79.419 mg/kg). Na Figura 55, são apresentadas as proporções de dados de ferro classificados nas categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre, agrupando-se os dados categorizados das estações de cada compartimento.

Considerando os dados do Lactec e da Fundação Renova para determinação da tendência de evolução das concentrações de ferro, como pode ser observado na Figura 54, no período entre janeiro/2019 e dezembro/2019 (P5) foi registrado uma maior proporção de dados na categoria A em relação a 2018. Em todos os compartimentos, 100% dos dados, provenientes do Lactec e da Fundação Renova, foram classificados na categoria A, evidenciando uma melhora das condições do sedimento em relação as concentrações de ferro.

Complementarmente, avaliando os dados dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar (Figura 55), observou-se que a RRDM registrou dados na categoria B em P5, com diversos registros entre janeiro e março/2019, o que não tinha sido registrado no período anterior nos dados do Lactec e da Fundação Renova. Entretanto, não foi registrado nenhum dado na categoria C, indicando que não foram verificadas alterações em relação a linha- base.

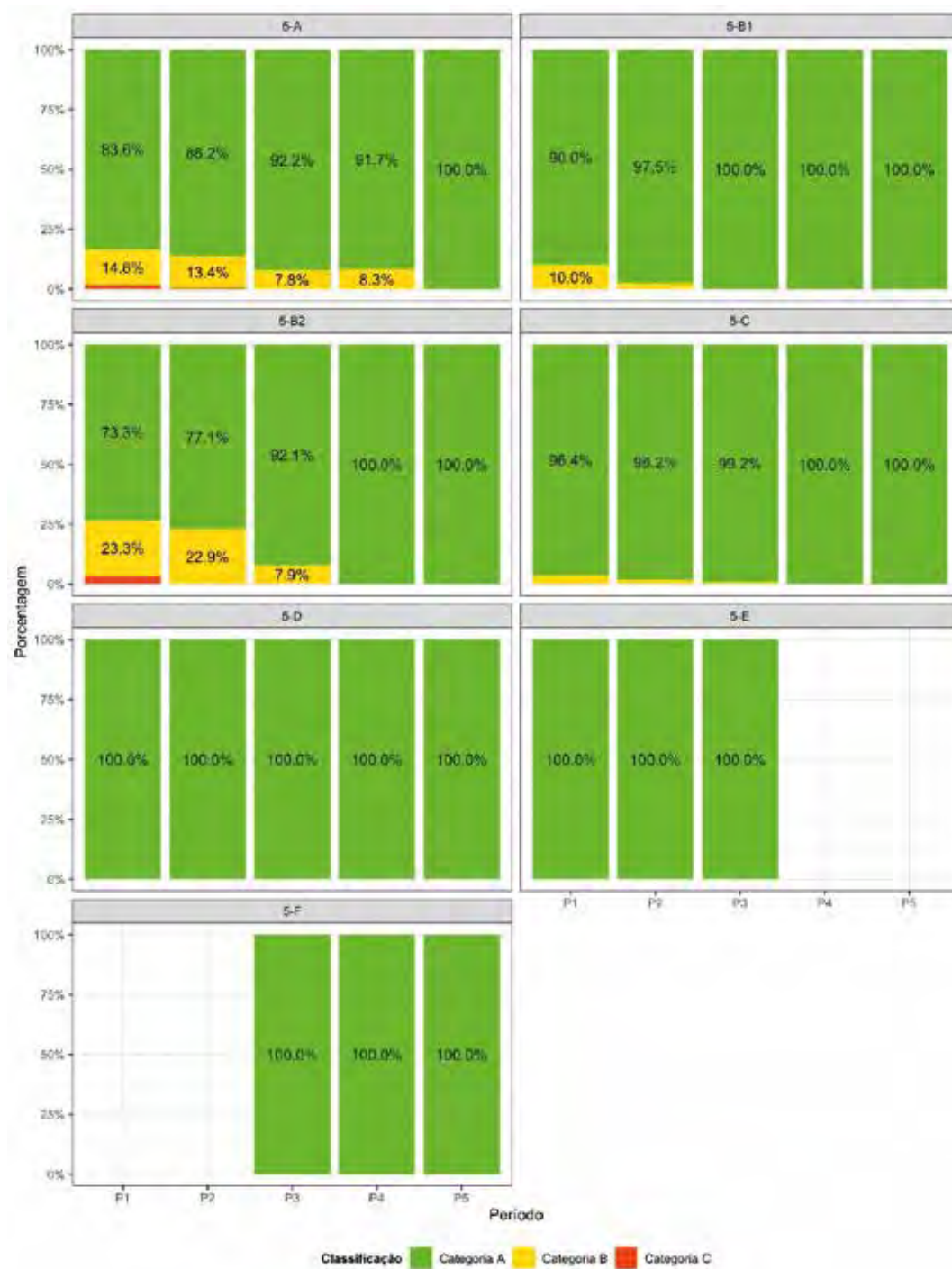
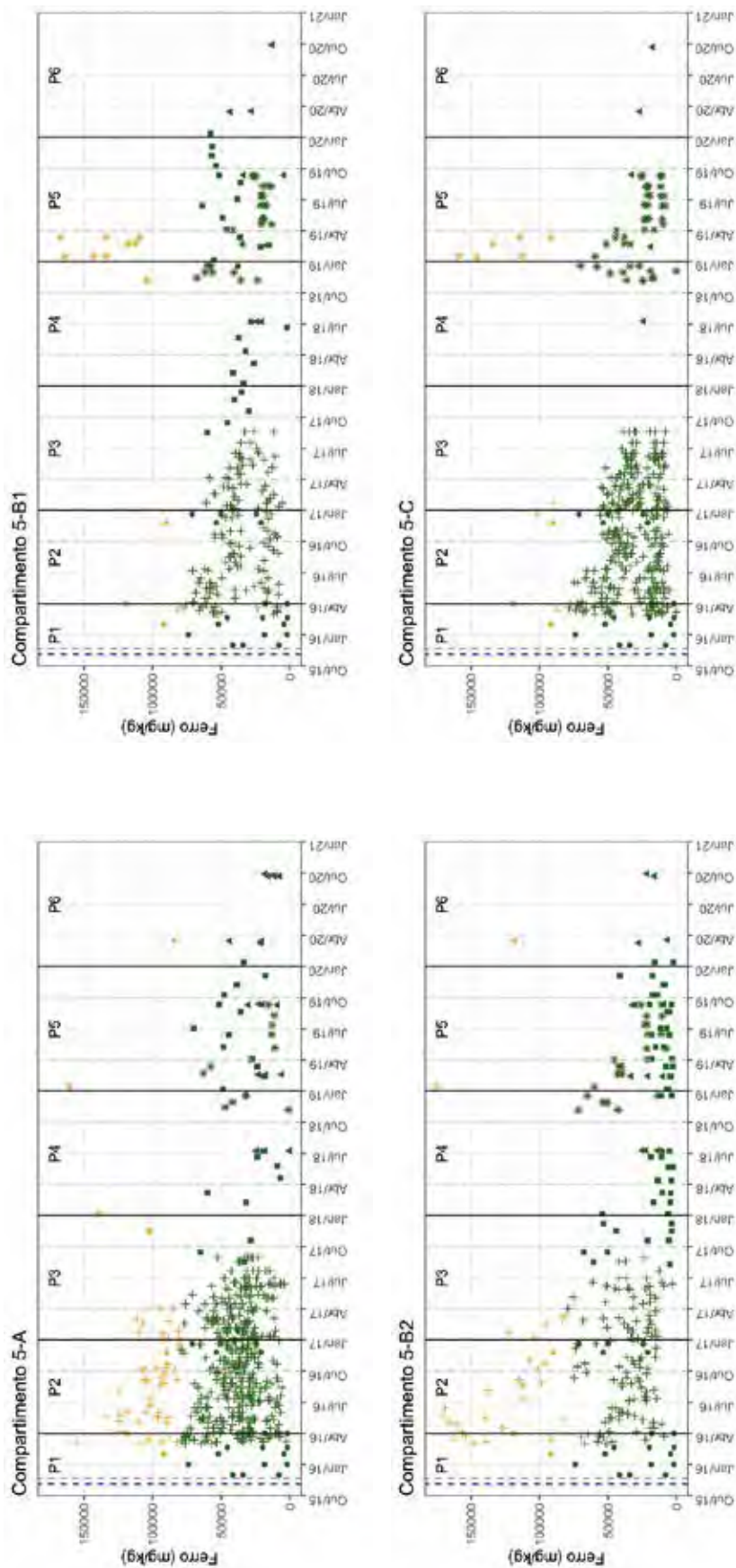
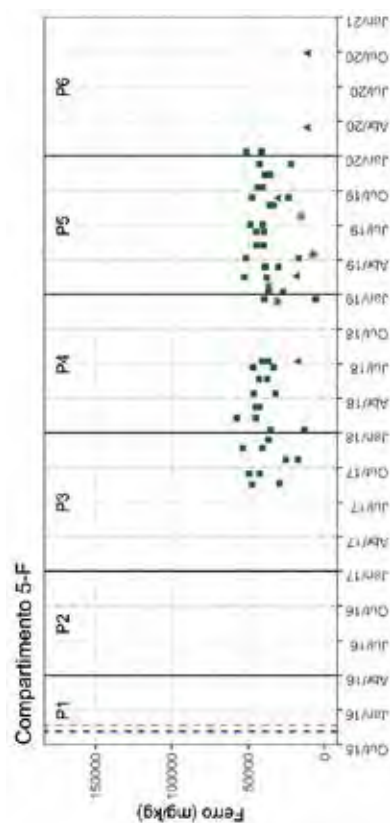
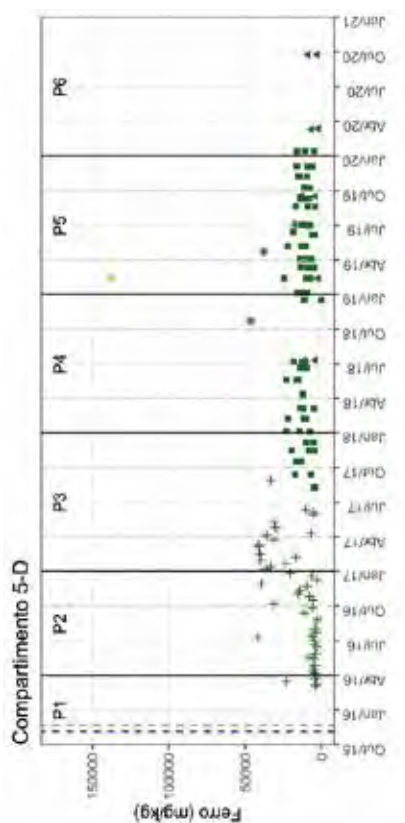
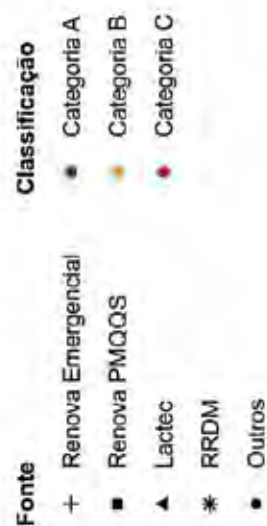
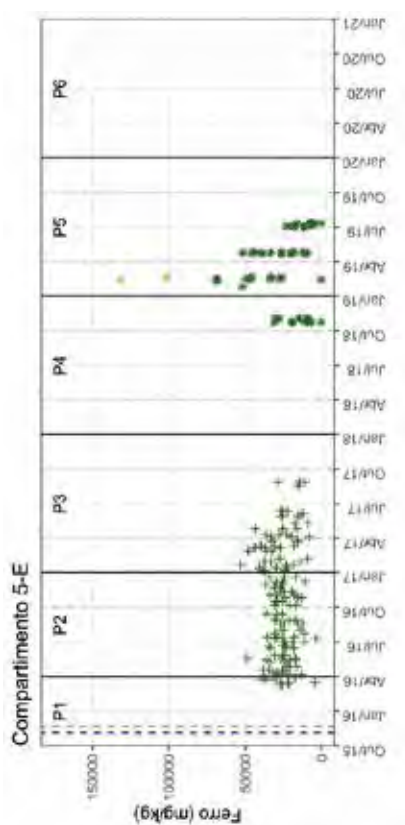
Figura 54 – Classificação das alterações para ferro em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).

Figura 55 – Classificação dos dados de ferro em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.9 Manganês

Os dados de manganês em sedimento foram classificados de acordo com o nível de efeitos aparentes (Apparent Effect Threshold – AET, 260 mg/kg) e considerando o valor máximo da série histórica (1.026,5 mg/kg).

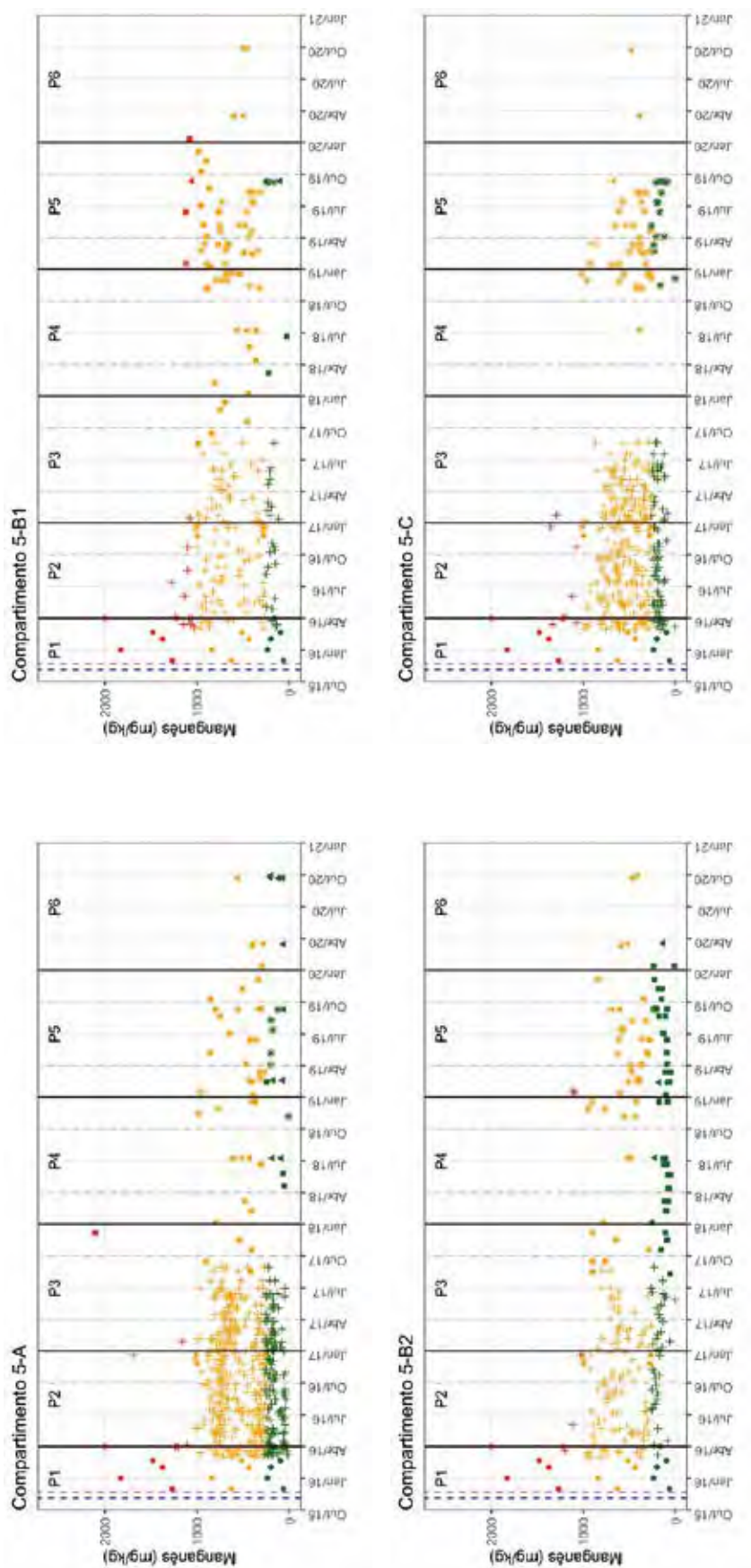
Em Brasil (MPF)/ Lactec (2020e) considerou-se que a dominância espacial e temporal de dados na Categoria B não indicam alterações relacionadas única e diretamente com o desastre, sendo importante ressaltar que a classificação “Categoria B”, apesar de representar valores acima do estabelecidos internacionalmente quantos as concentrações de manganês no sedimento e seus efeitos à biota aquática (Apparent Effect Threshold – AET), caracteriza dados de acordo com as concentrações encontrados na região no período pré-desastre (Figura 57).

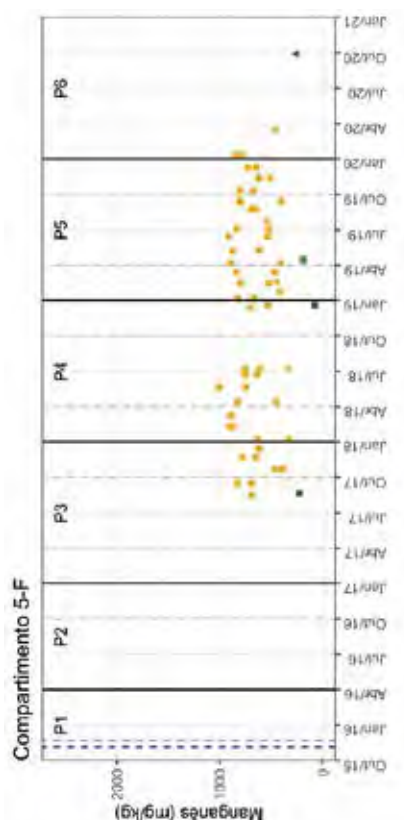
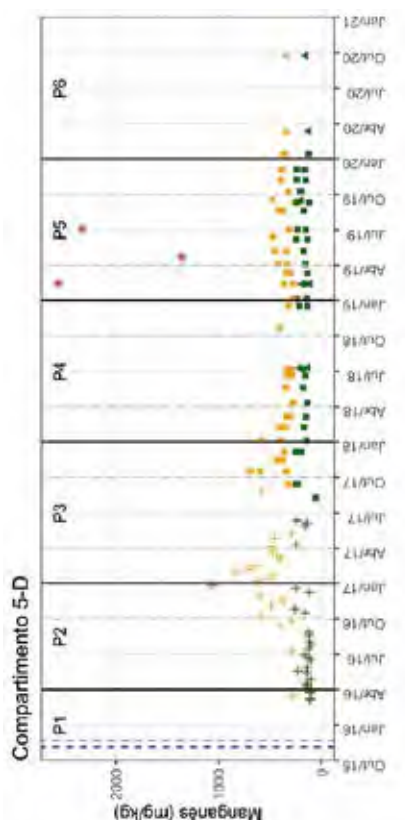
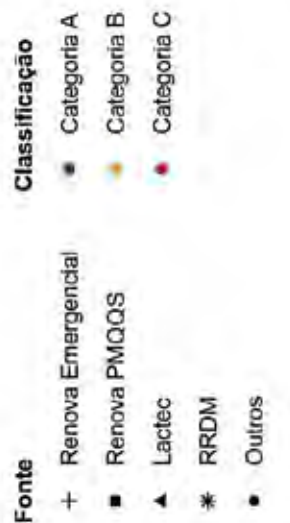
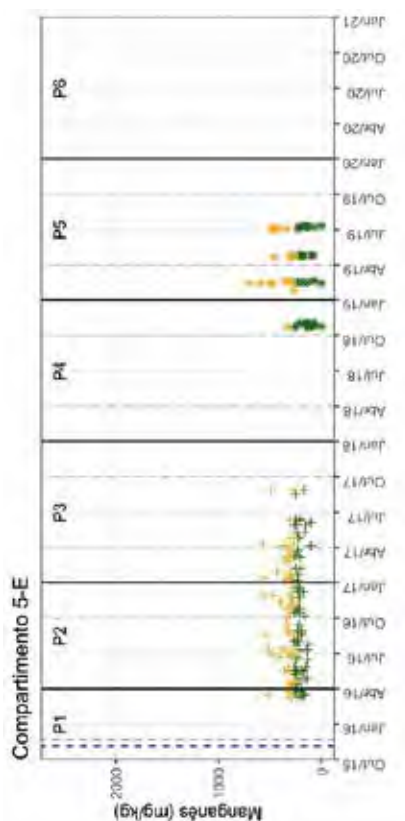
Desse modo, o acompanhamento das alterações em relação a este indicador é realizado através da avaliação dos dados classificados na Categoria C e sua evolução durante os períodos considerados. Em P5, foram registrados dados na categoria C somente nos compartimentos 5-B1, em proporções superiores as registradas no período anterior. A proporção de dados na categoria C em P5 foi inferior à registrada em P1 no compartimento 5-B (Figura 56). Dados na categoria C indicam que ainda são verificadas alterações em relação a linha base para o manganês no sedimento.

Figura 56 – Classificação das alterações para manganês em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).



Figura 57 – Classificação dos dados de manganês em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.10 Mercúrio

Cada um dos dados pós-desastre de mercúrio foi classificado de acordo com as categorias A, B e C, esta classificação é apresentada para cada compartimento definido através de gráficos na Figura 59. Os dados de mercúrio em sedimento foram classificados considerando o valor máximo histórico da variável registrado nas adjacências da foz do rio Doce (0,62 mg/kg) e de acordo com o nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 (0,3 mg/kg).

Para a avaliação da tendência de evolução do dano em relação ao aumento das concentrações de EPTs, realizou-se o cálculo das proporções entre as categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre até o final de 2019 (Figura 58), considerando apenas os dados da Fundação Renova e do Lactec, conforme descrito na metodologia. Em P5 (2019), foi observado uma manutenção de 100% dos dados na categoria A em relação a P4, ou seja, em ambos os períodos 100% dos dados do Lactec e da Fundação Renova estiveram de acordo com o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para sedimento de águas salinas/salobras (limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota) e abaixo do máximo histórico pré-desastre.

Foi realizada também uma avaliação dos dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar, que é apresentada nos gráficos da Figura 59. Observou-se diversos dados da RRDM nas categorias B e C em P5 (janeiro/2019 a dezembro/2019) ao longo dos compartimentos do ambiente marinho. Importante ressaltar que dados nestas categorias foram registrados em todos os compartimentos do ambiente marinho, sem apresentar uma distinção clara quanto a proximidade da foz do rio Doce, o que não tinha sido registrado em P3 e P4 nos dados do Lactec e da Fundação Renova (PMQQS).

Figura 58 – Classificação das alterações para mercúrio em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).

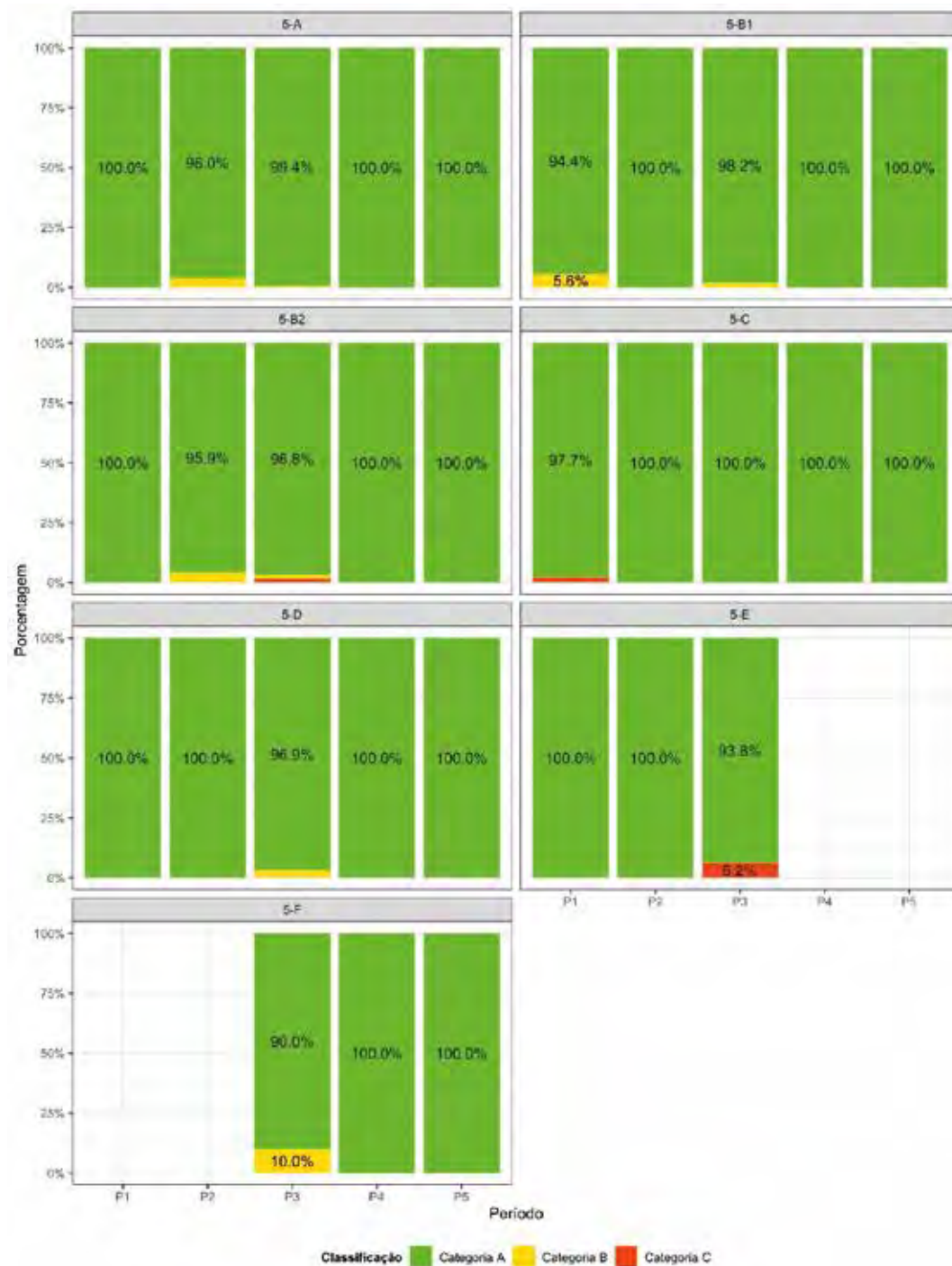
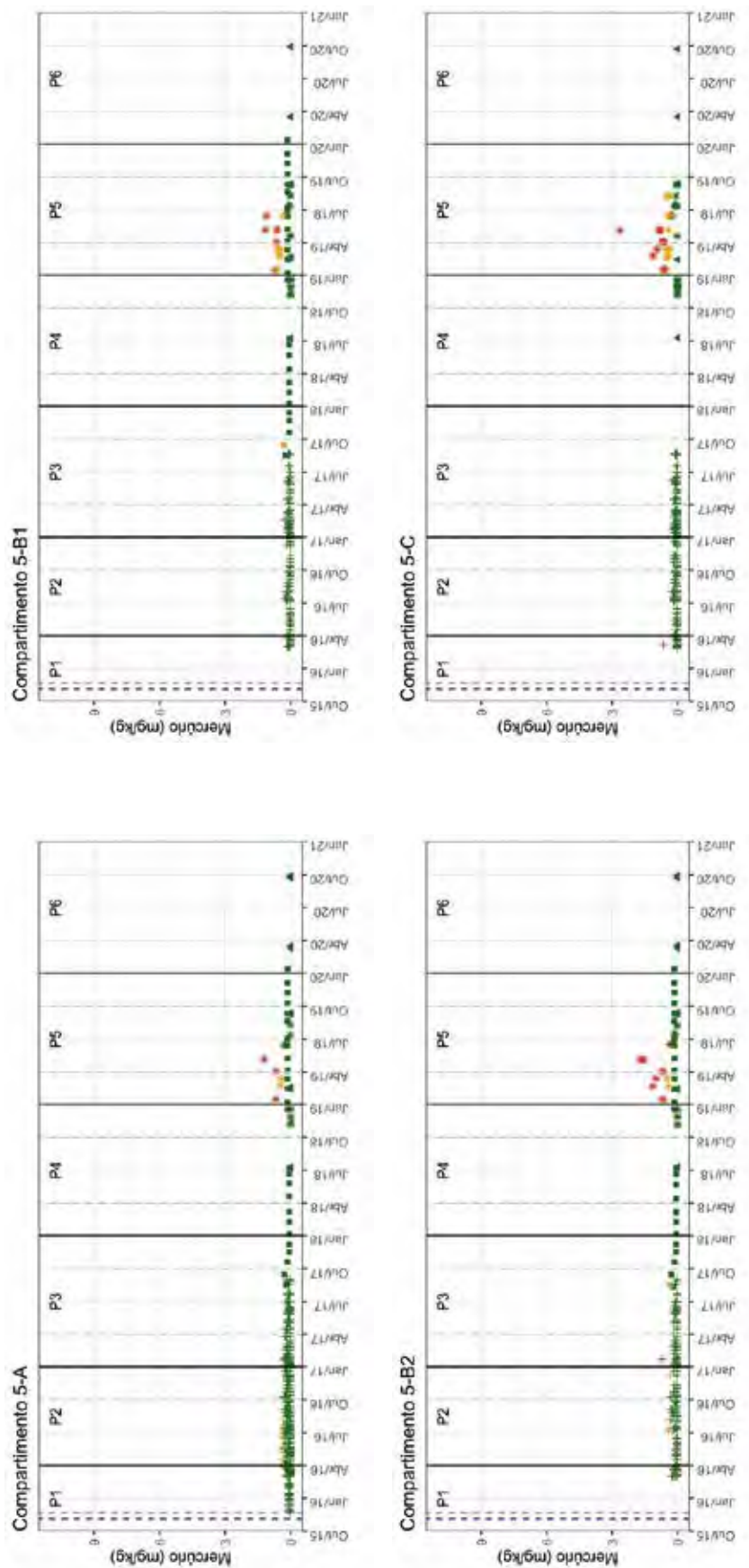
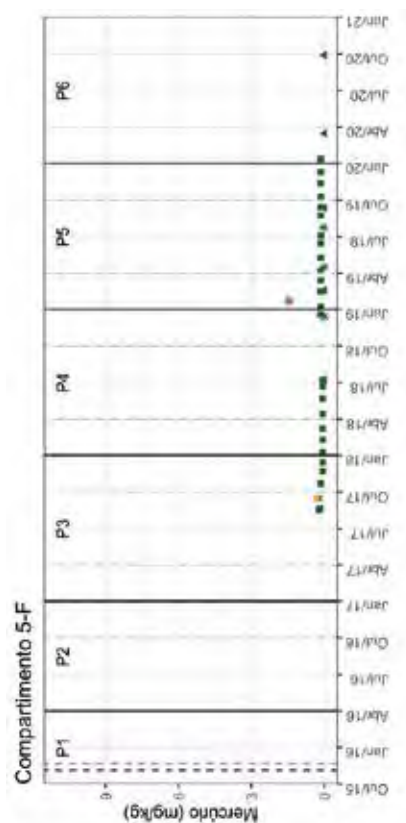
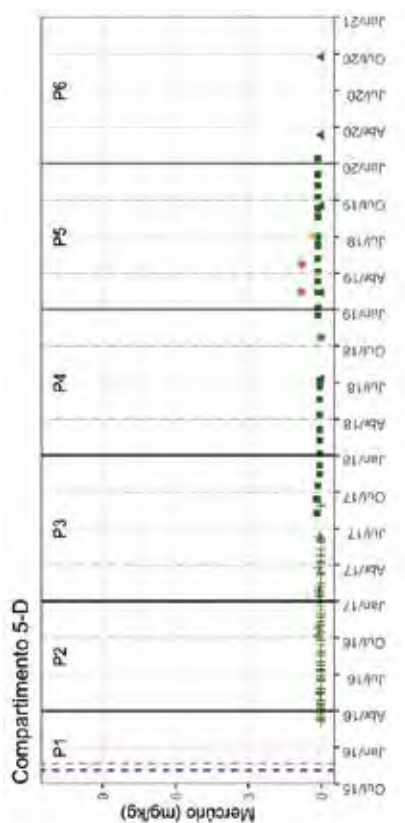
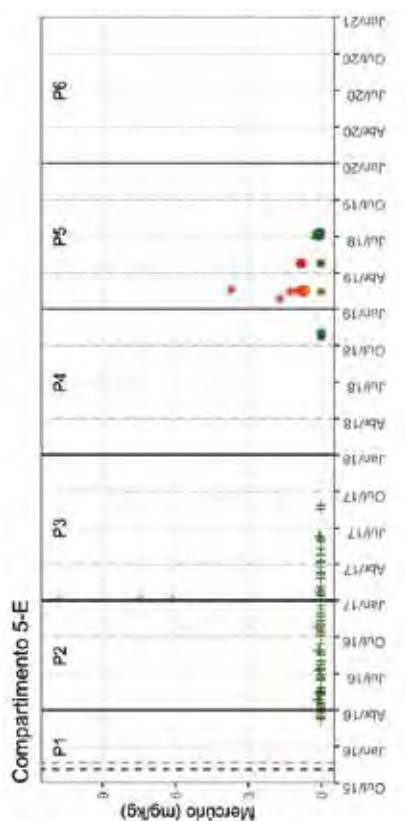


Figura 59 – Classificação dos dados de mercúrio em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.





2.4.3.11 Níquel

Os dados de níquel em sedimento foram classificados de acordo com o Nível 1 da Resolução CONAMA nº 454/2012 para sedimentos de águas salinas/salobras (limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota), cuja concentração é de 20,9 mg/kg, e considerando o valor máximo da série histórica (31,1 mg/kg).

Na Figura 60, são apresentadas as proporções de dados de níquel classificados nas categorias A, B e C para cada um dos compartimentos e períodos pós-desastre até o P5, agrupando-se os dados categorizados do Lactec e da Fundação Renova para determinação da tendência de evolução do dano. Em P5 (janeiro/2019 a dezembro/2019) foi possível verificar um aumento do percentual de dados na Categoria A nos compartimentos 5C e 5-D em relação ao ano de 2018. Já nos compartimentos 5-A, -5-B1 e 5-B2, foi observado um aumento das proporções de dados na categoria B. Comparando os resultados de P5 com os resultados obtidos logo após o desastre (P1), é possível observar uma maior proporção de dados na categoria A e uma menor proporção de dados principalmente nas categorias B e C em P5, evidenciando uma melhora das condições do sedimento em relação as concentrações de níquel.

Complementarmente, foram avaliados os dados do Lactec e da Fundação Renova em conjunto com os dados gerados pela Rede Rio Doce Mar (Figura 61), em P5 foram observados uma maior quantidade de dados na categoria B pela RRDM, que indicam concentrações inferiores ao máximo histórico mas superiores ao nível 1. Em P6 (2020) todos os registros foram classificados na categoria A, indicando concentrações inferiores a ambos os limiares citados. Tanto em P5 quanto em P6 não foram registrados dados na categoria C para o indicador níquel.

Figura 60 – Classificação das alterações para níquel em sedimento (Dados Lactec e Fundação Renova).

Figura 61 – Classificação dos dados de níquel em sedimento para os períodos pós-desastre nos sete compartimentos na área marinha adjacente a foz do rio Doce. Linha tracejada azul: rompimento da barragem de Fundão; linha tracejada rosa: chegada dos rejeitos a zona costeira; linha tracejada cinza: transição de entre períodos secos e chuvosos.

