

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

Acompanhamento de danos

TOMO I – Contextualização

Ecotoxicologia

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 I – Contextualização Ecotoxicologia	
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.	
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
Executante:	E-mail:	carlosbruno@mpf.mp.br
	Institutos 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 Alkmin 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
Aline Ingrid Andrade de Barros	Técnica em Meio Ambiente	Ecotoxicologia
Angélica Alves de Paula	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Claudia Bueno dos Reis Martinez	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Kelly Sabrina Riby Afonso	Técnica em química	Ecotoxicologia
Leticia da Silva Pereira Fernandes	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Lilian Dalago Salgado	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Luciana Rodrigues de Souza Bastos	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Luís Fernando Fávaro	Dr. Biólogo	Ecotoxicologia
Mariana Machado Lauer	Dra. Oceanógrafa	Ecotoxicologia
Monica Valdyrce dos Anjos Lopes Ferreira	Dra. Bióloga	Ecotoxicologia
Natália Vitorino Leite dos Santos	Técnica em Meio Ambiente	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 Biotecnologias	Triagem de Altos Valores de Conservação
Jane Siqueira Lino	M.Sc. Ecólogo	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
Gheysa do Rocio Moraes Pires	MSc. Tecnóloga em Química Ambiental	Qualidade de Sedimentos e Águas Subterrâneas
Isabella Francoso Rebutini Figueira	Dra. Geóloga	Qualidade de Sedimentos, Águas Subterrâneas e Geologia
Leonardo Evangelista Lagoeiro	Dr. Geólogo	Geologia e Geoquímica
Camila Ghilardi Cardoso Fontanella	MSc. Bióloga	Macroinvertebrados Aquáticos e Bentos de Fundos Inconsolidados
Devon Gebauer Mayer	Biólogo	Bentos de Fundos Inconsolidados
Ericka Viviane Lemos Marcondes	Bióloga	Macroinvertebrados Aquáticos
Rosemary A. Brogim	Dra. Bióloga	Bentos de Fundos Inconsolidados
Adriano Hauer	Esp. Biólogo	Ictiofauna
Bruno Kazuo Nakagawa	MSc. Biólogo	Ictiofauna
Giuliano Menegale Martinazzo	Biólogo	Ictiofauna
Matheus Oliveira Freitas	Dr. Biólogo	Ictiofauna
Maurício Belezia de Oliveira	MSc. Biólogo	Ictiofauna
Vinícius Abilhoa	Dr. Biólogo	Ictiofauna

Emanuel Luis Razzolini	MSc. Biólogo	Ictiofauna – Diversidade Genética
Rafael Antunes Baggio	Dr. Biólogo	Ictiofauna – Diversidade Genética e Modelagem da dinâmica populacional
Walter Antônio Pereira Boeger	Dr. Oceanógrafo	Ictiofauna – Diversidade Genética
Angie Thaisa da Costa Souza	MSc. Bióloga	Ictiofauna – Modelagem da dinâmica populacional
Sabrina Borges Lino de Araújo	Dra. Física	Ictiofauna – Modelagem da dinâmica populacional
Fabrcio 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 Ecosistêmicos
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	Bioteecnólogo	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 Segal 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 – quiropteroфаuna
Thali Leal Sampaio	MSc. Médica Veterinária	Fauna silvestre – quiropteroфаuna
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	Íctiofauna – 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 Falkiewicz	Engenharia Florestal	Flora
Rebeca Dias Pegollo	Ciências Biológicas	Fauna Aquática
Carolina Valério Leme	Engenharia Ambiental	Ecotoxicologia
Carlos Denilson Soares	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Fellip Rodrigues Marcondes	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia
Fernanda Araujo Fernandes	Ciências Biológicas	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
Yasmim Cristine Brunholo Carvalho	Ciências Biológicas	Ecotoxicologia

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa da localização dos pontos de amostragem de ecotoxicologia ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	80
Figura 2. Heparinização da seringa para coleta de sangue (A); Punção caudal do peixe para obtenção de sangue (B).	82
Figura 3. Esquema dos biomarcadores avaliados nos diferentes tecidos dos peixes amostrados e suas respectivas metodologias	83
Figura 4. Fotomicrografia mostrando as diferentes classes de cometa consideradas no cálculo do escore de danos e uma célula inviável: A) Classe 0; B) Classe 1; C) Classe 2; D) Classe 3; E) Célula inviável	84
Figura 5. Imagem representativa de extensão sanguínea necessária às análises de micronúcleos (MN) e demais alterações nucleares em eritrócitos (ANEs)	85
Figura 6. Imagens representativas das lâminas secando em laminários após fixação em metanol (A) e da coloração com Giemsa 10% (B)	85
Figura 7. Imagens representativas de micronúcleo (A) e alterações nucleares (B-E) em eritrócitos de peixes	86
Figura 8. Valores absolutos de precipitação acumulada (mm) de jan/2018 a dez/2019 em cada um dos compartimentos amostrados (1, 2 e 3), com destaque para os períodos amostrais (C1 - Campanha 1, C2 - Campanha 2, C3 - Campanha 3, C4 - Campanha 4)	94
Figura 9. Esquema do procedimento empregado para o teste de toxicidade aguda com embrião de zebrafish – FET (da esquerda para a direita): produção de ovos, coleta dos ovos, pré-exposição imediatamente após fertilização em recipientes de vidro, seleção de ovos fertilizados com um microscópio invertido ou binocular e distribuição de ovos fertilizados em placas de 24 poços preparadas com as respectivas concentrações de teste/controles, n = número de ovos necessários por concentração de teste/controle (aqui 20), hpf = horas pós-fertilização	97
Figura 10. Fotografias dos estágios normais de desenvolvimento de Danio rerio ao longo de 96 horas	98
Figura 11. Anomalias identificadas no teste de toxicidade aguda com embrião de zebrafish (FET). Essas alterações indicam toxicidade aguda e, conseqüentemente, morte dos embriões: A - coagulação do embrião; B - ausência de formação de somito; C - falta de separação entre a cauda e o saco vitelínico e, D - falta de batimento cardíaco.	99

Figura 12. Mapa da localização dos pontos de amostragem dos exemplares de fauna silvestre utilizados em análises ecotoxicológicas ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	102
Figura 13. Esquema da metodologia de preparo do material coletado e das análises empregadas para avaliação da fauna e suas respectivas metodologias.....	106
Figura 14. Imagens de micronúcleo (A) e alterações nucleares (B-E) em eritrócitos de herpetofauna.....	107
Figura 15. Imagem de micronúcleo em eritrócitos da mastofauna	108
Figura 16. Etapas de realização da análise morfológica e de microestrutura por MEV-EDS.....	110
Figura 17. Localização dos encalhes de botos-cinza (<i>Sotalia guianensis</i>) cujas amostras foram destinadas para a análise das concentrações de EPTs.....	112
Figura 18. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 1 durante a campanha 1	120
Figura 19. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 1 durante a campanha 2	121
Figura 20. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 1 durante a campanha 3	121
Figura 21. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 1 durante a campanha 4	122
Figura 22. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 1 durante a campanha 1	122
Figura 23. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 1 durante a campanha 2	123
Figura 24. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 1 durante a campanha 3	123
Figura 25. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 1 durante a campanha 4	124
Figura 26. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 1 durante a campanha 1	124
Figura 27. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 1 durante a campanha 2	125
Figura 28. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do	

compartimento 1 durante a campanha 3	125
Figura 29. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 1 durante a campanha 4	126
Figura 30. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DQ S4 do compartimento 1 durante a campanha 1	126
Figura 31. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DQ S4 do compartimento 1 durante a campanha 2	127
Figura 32. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DQ S4 do compartimento 1 durante a campanha 3	127
Figura 33. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DQ S4 do compartimento 1 durante a campanha 4	128
Figura 34. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 2 durante a campanha 1	254
Figura 35. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 2 durante a campanha 2	255
Figura 36. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 2 durante a campanha 3	256
Figura 37. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 2 durante a campanha 4	256
Figura 38. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 2 durante a campanha 1	257
Figura 39. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 2 durante a campanha 2	257
Figura 40. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 2 durante a campanha 3	258
Figura 41. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 2 durante a campanha 4	258
Figura 42. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 2 durante a campanha 1	259
Figura 43. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 2 durante a campanha 2	259
Figura 44. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do	

compartimento 2 durante a campanha 3	260
Figura 45. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 2 durante a campanha 4	260
Figura 46. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 3 durante a campanha 1	348
Figura 47. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 3 durante a campanha 2	349
Figura 48. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 3 durante a campanha 3	349
Figura 49. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 3 durante a campanha 4	349
Figura 50. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 3 durante a campanha 1	350
Figura 51. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 3 durante a campanha 2	350
Figura 52. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 3 durante a campanha 3	351
Figura 53. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 3 durante a campanha 4	351
Figura 54. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 3 durante a campanha 1	352
Figura 55. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 3 durante a campanha 2	352
Figura 56. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 3 durante a campanha 3	353
Figura 57. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 3 durante a campanha 4	353
Figura 58. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto foz do rio Doce, compartimento 4 durante a campanha 1	473
Figura 59. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto foz do rio Doce, compartimento 4 durante a campanha 2	474
Figura 60. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto foz do rio Doce,	

compartimento 4 durante a campanha 3	474
Figura 61. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto foz do rio Doce, compartimento 4 durante a campanha 4	475
Figura 62. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto P. Açú durante a campanha 2	475
Figura 63. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto P. Açú durante a campanha 3	475
Figura 64. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto P. Açú durante a campanha 4	476
Figura 65. Biomarcadores fisiológicos determinados em todos os peixes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Osmolalidade (OSM) (círculo), Cl^- (triângulo), Na^+ (quadrado); B - K^+ (círculo), Mg^{2+} (quadrado); C – Teor hídrico (TH) (círculo); D – Anidrase carbônica (AC) branquial (círculo) e renal (quadrado); E – Na^+/K^+ -ATPase (NAK) (círculo) e H^+ -ATPase (quadrado) branquial.....	478
Figura 66. Biomarcadores fisiológicos determinados em peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Osmolalidade (OSM) (círculo), Cl^- (triângulo), Na^+ (quadrado); B - K^+ (círculo), Mg^{2+} (quadrado); C – Teor hídrico (TH) (círculo); D – Anidrase carbônica (AC) branquial (círculo) e renal (quadrado); E – Na^+/K^+ -ATPase (NAK) (círculo) e H^+ -ATPase (quadrado) branquial..	480
Figura 67. Biomarcadores fisiológicos determinados em peixes, de hábito alimentar invertívoro bentônico, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Osmolalidade (OSM) (círculo), Cl^- (triângulo), Na^+ (quadrado); B - K^+ (círculo), Mg^{2+} (quadrado); C – Teor hídrico (TH) (círculo); D – Anidrase carbônica (AC) branquial (círculo) e renal (quadrado); E – Na^+/K^+ -ATPase (NAK) (círculo) e H^+ -ATPase (quadrado) branquial.....	482
Figura 68. Biomarcadores fisiológicos determinados em peixes, de hábito alimentar zoobentívoro, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Osmolalidade (OSM) (círculo), Cl^- (triângulo), Na^+ (quadrado); B - K^+ (círculo), Mg^{2+} (quadrado); C – Teor hídrico (TH) (círculo); D – Anidrase carbônica (AC) branquial (círculo) e renal (quadrado); E – Na^+/K^+ -ATPase (NAK) (círculo) e H^+ -ATPase (quadrado) branquial.....	484
Figura 69. Biomarcadores relacionados ao metabolismo energético determinados em todos	

os peixes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). Glicose (círculo) e lactato (quadrado) plasmáticos e glicogênio muscular (triângulo).	486
Figura 70. Biomarcadores relacionados ao metabolismo energético determinados em peixes da ordem Siluriformes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). Glicose (círculo) e lactato (quadrado) plasmáticos e glicogênio muscular (triângulo).	487
Figura 71. Biomarcadores relacionados ao metabolismo energético determinados em peixes, de hábito alimentar invertívoro bentônico, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). Glicose (círculo) e lactato (quadrado) plasmáticos e glicogênio muscular (triângulo).	488
Figura 72. Biomarcadores relacionados ao metabolismo energético determinados em peixes, de hábito alimentar zoobetnívoro, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). Glicose (círculo) e lactato (quadrado) plasmáticos e glicogênio muscular (triângulo).	488
Figura 73. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em todos os peixes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Catalase (CAT); B – Superóxido dismutase (SOD); C – Glutathiona peroxidase (GPx); D – Glutathiona S-tranferase (GST) e E – Glutathiona redutase (GR) branquial (círculo) e hepática (quadrado).	490
Figura 74. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em peixes da ordem Siluriformes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Catalase (CAT); B – Superóxido dismutase (SOD); C – Glutathiona peroxidase (GPx); D – Glutathiona S-tranferase (GST) e E – Glutathiona redutase (GR) branquial (círculo) e hepática (quadrado).	492
Figura 75. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em peixes, de hábito alimentar invertívoro bentônico, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Catalase (CAT); B – Superóxido dismutase (SOD); C – Glutathiona peroxidase (GPx) e D – Glutathiona S-tranferase (GST) branquial (círculo) e hepática (quadrado).	495
Figura 76. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em peixes, de hábito alimentar zoobentívoro, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD	

(símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Catalase (CAT); B – Superóxido dismutase (SOD); C – Glutathione peroxidase (GPx) e D – Glutathione S-transferase (GST) branquial (círculo) e hepática (quadrado).....	498
Figura 77. Biomarcadores dos sistemas não enzimáticos determinados em todos os peixes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Glutathione reduzida (GSH); B – Metalotioneínas (MT); C – Peroxidação lipídica (LPO) branquial (círculo) e hepática (quadrado) e D - Proteínas carboniladas (PCO) muscular (círculos)	501
Figura 78. Biomarcadores dos sistemas não enzimáticos determinados em peixes da ordem Siluriformes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Glutathione reduzida (GSH); B – Metalotioneínas (MT); C – Peroxidação lipídica (LPO) branquial (círculo) e hepática (quadrado) e D - Proteínas carboniladas (PCO) muscular (círculos).....	503
Figura 79. Biomarcadores dos sistemas não enzimáticos determinados em peixes, de hábito alimentar invertívoro bentônico, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Glutathione reduzida (GSH); B – Metalotioneínas (MT); C – Peroxidação lipídica (LPO) branquial (círculo) e hepática (quadrado) e D - Proteínas carboniladas (PCO) muscular (círculos)	505
Figura 80. Biomarcadores dos sistemas não enzimáticos determinados em peixes, de hábito alimentar zoobentívoro, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). A – Glutathione reduzida (GSH); B – Metalotioneínas (MT); C – Peroxidação lipídica (LPO) branquial (círculo) e hepática (quadrado) e D - Proteínas carboniladas (PCO) muscular (círculos).....	508
Figura 81. Biomarcadores de neurotoxicidade determinados em músculo (círculo) e cérebro (quadrado) de peixes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário).	510
Figura 82. Biomarcadores de neurotoxicidade determinados em músculo (círculo) e cérebro (quadrado) de peixes da ordem Siluriformes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário).	511
Figura 83. Biomarcadores de neurotoxicidade determinados em músculo (círculo) e cérebro (quadrado) de peixes, de hábito alimentar invertívoro bentônico, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário).	512

Figura 84. Biomarcadores de neurotoxicidade determinados em músculo (círculo) e cérebro (quadrado) de peixes, de hábito alimentar zoobentívoro, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário).....	513
Figura 85. Biomarcadores de citogenotoxicidade determinados em sangue de peixes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). Escore de dano ao DNA, avaliado pelo ensaio cometa (círculos); Micronúcleos (MN) (quadrados) e alterações nucleares eritrocitárias (ANEs) (triângulos)	514
Figura 86. Biomarcadores de citogenotoxicidade determinados em sangue de peixes da ordem Siluriformes capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). Escore de dano ao DNA, avaliado pelo ensaio cometa (círculos); Micronúcleos (MN) (quadrados) e alterações nucleares eritrocitárias (ANEs) (triângulos) ..	515
Figura 87. Biomarcadores de citogenotoxicidade determinados em sangue de peixes, de hábito alimentar invertívoro bentônico, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). Escore de dano ao DNA, avaliado pelo ensaio cometa (círculos); Micronúcleos (MN) (quadrados) e alterações nucleares eritrocitárias (ANEs) (triângulos).....	516
Figura 88. Biomarcadores de citogenotoxicidade determinados em sangue de peixes, de hábito alimentar zoobentívoro, capturados nos pontos PA (símbolos brancos) e FRD (símbolos pretos) do compartimento 4 (estuário). Escore de dano ao DNA, avaliado pelo ensaio cometa (círculos); Micronúcleos (MN) (quadrados) e alterações nucleares eritrocitárias (ANEs) (triângulos)	517
Figura 89. Perfil da bioacumulação dos 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido muscular e hepático dos peixes capturados nos pontos do compartimento 4 (estuário). Comparação entre os pontos CN (leia-se PA- foz do rio Piraquê-Açu) e DA (leia-se FRD - foz do rio Doce).	518
Figura 90. Perfil da bioacumulação dos 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido muscular e hepático dos peixes capturados nos pontos do compartimento 4 (estuário). Comparação entre as campanhas para um mesmo ponto CN (leia-se PA- foz do rio Piraquê-Açu) ou DA (leia-se FRD - foz do rio Doce).	520
Figura 91. Perfil da bioacumulação dos 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido muscular e hepático dos peixes da ordem Siluriformes capturados nos pontos do compartimento 4 (estuário). Comparação entre as campanhas para um mesmo ponto CN (leia-	

se PA- foz do rio Piraquê-Açu) ou DA (leia-se FRD - foz do rio Doce).	521
Figura 92. Perfil da bioacumulação dos 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido muscular e hepático dos peixes, de hábito alimentar invertívoro bentônico, capturados nos pontos do compartimento 4 (estuário). Comparação entre as campanhas para um mesmo ponto CN (leia-se PA- foz do rio Piraquê-Açu) ou DA (leia-se FRD - foz do rio Doce).....	522
Figura 93. Perfil da bioacumulação dos 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido muscular e hepático dos peixes, de hábito alimentar zoobentívoro, capturados nos pontos do compartimento 4 (estuário). Comparação entre os pontos CN (leia-se PA- foz do rio Piraquê-Açu) ou DA (leia-se FRD - foz do rio Doce).	524
Figura 94. Perfil da bioacumulação dos 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido muscular e hepático dos peixes, de hábito alimentar zoobentívoro, capturados nos pontos do compartimento 4 (estuário). Comparação entre as campanhas para cada um dos pontos CN (leia-se PA- foz do rio Piraquê-Açu) ou DA (leia-se FRD - foz do rio Doce).	526
Figura 95. Bioacumulação das espécies orgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e da inorgânica de Hg (MeHg) no tecido muscular de peixes capturados nos pontos do compartimento 4 (estuário)	528
Figura 96. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto 5 do compartimento 5 (mar), 5 km da costa, durante a campanha 1	530
Figura 97. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto 5 do compartimento 5 (mar), 5 km da costa, durante a campanha 2	531
Figura 98. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto 3 do compartimento 5 (mar), 5 km da costa, durante a campanha 3	531
Figura 99. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto 1 do compartimento 5 (mar), 5 km da costa, durante a campanha 4	532
Figura 100. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto 6 do compartimento 5 (mar), 20 km da costa, durante a campanha 1	533
Figura 101. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto 4 do compartimento 5 (mar), 20 km da costa, durante a campanha 2	534
Figura 102. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto 2 do compartimento 5 (mar), 20 km da costa, durante a campanha 3	534
Figura 103. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto 6 do compartimento 5 (mar), 20 km da costa, durante a campanha 4	534

Figura 104. Comparação das respostas dos biomarcadores fisiológicos entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	536
Figura 105. Comparação das respostas dos biomarcadores fisiológicos entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	538
Figura 106. Comparação das respostas dos biomarcadores fisiológicos entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	540
Figura 107. Comparação das respostas dos biomarcadores fisiológicos entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	542
Figura 108. Comparação das respostas dos biomarcadores fisiológicos entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	544
Figura 109. Comparação das respostas dos biomarcadores fisiológicos entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	547
Figura 110. Comparação das respostas dos biomarcadores fisiológicos dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal)	549
Figura 111. Comparação das respostas dos biomarcadores fisiológicos dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	551
Figura 112. Comparação das respostas dos biomarcadores relacionados ao metabolismo energético entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	553
Figura 113. Comparação das respostas dos biomarcadores relacionados ao metabolismo energético entre os peixes da ordem Siluriformes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	554
Figura 114. Comparação das respostas dos biomarcadores relacionados ao metabolismo energético entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.....	555

Figura 115. Comparação das respostas dos biomarcadores relacionados ao metabolismo energético entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.....	555
Figura 116. Comparação das respostas dos biomarcadores relacionados ao metabolismo energético entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	557
Figura 117. Comparação das respostas dos biomarcadores relacionados ao metabolismo energético entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	558
Figura 118. Comparação das respostas dos biomarcadores relacionados ao metabolismo energético dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	559
Figura 119. Comparação das respostas dos biomarcadores relacionados ao metabolismo energético dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal)	560
Figura 120. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (brânquias) entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	562
Figura 121. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (brânquias) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	563
Figura 122. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (fígado) entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	564
Figura 123. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (fígado) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	565
Figura 124. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (brânquias) entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	566

Figura 125. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (brânquias) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	567
Figura 126. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (fígado) entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	568
Figura 127. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (fígado) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	569
Figura 128. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (brânquias) entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	571
Figura 129. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (brânquias) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	573
Figura 130. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (fígado) entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	575
Figura 131. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (fígado) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	577
Figura 132. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (brânquias) dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	579
Figura 133. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (brânquias) dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal)	580
Figura 134. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (fígado) dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	581

Figura 135. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação (fígado) dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal)	583
Figura 136. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (brânquias) entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa ("próximos da costa") em cada uma das campanhas amostrais.	584
Figura 137. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (brânquias) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa ("próximos da costa") em cada uma das campanhas amostrais.	585
Figura 138. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (fígado) entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa ("próximos da costa") em cada uma das campanhas amostrais.	586
Figura 139. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (fígado) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa ("próximos da costa") em cada uma das campanhas amostrais.	587
Figura 140. Comparação das respostas do biomarcador do sistema não enzimático (PCO - músculo) entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa ("próximos da costa") em cada uma das campanhas amostrais.	588
Figura 141. Comparação das respostas do biomarcador do sistema não enzimático (PCO - músculo) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa ("próximos da costa") em cada uma das campanhas amostrais.	588
Figura 142. Comparação das respostas dos biomarcadores do sistema não enzimático (brânquias) entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa ("distantes da costa") em cada uma das campanhas amostrais.....	589
Figura 143. Comparação das respostas dos biomarcadores do sistema não enzimático (brânquias) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa ("distantes da costa") em cada uma das campanhas amostrais.....	590
Figura 144. Comparação das respostas dos biomarcadores do sistema não enzimático (fígado) entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa ("distantes da costa") em cada uma das campanhas amostrais.	591
Figura 145. Comparação das respostas dos biomarcadores do sistema não enzimático (fígado) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da	

costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	591
Figura 146. Comparação das respostas do biomarcador do sistema não enzimático (PCO - músculo) entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.....	592
Figura 147. Comparação das respostas do biomarcador do sistema não enzimático (PCO - músculo) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.....	592
Figura 148. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (brânquias) entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	594
Figura 149. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (brânquias) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	595
Figura 150. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (fígado) entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	597
Figura 151. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (fígado) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	598
Figura 152. Comparação das respostas do biomarcador do sistema não enzimático (PCO - músculo) entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	599
Figura 153. Comparação das respostas do biomarcador do sistema não enzimático (PCO - músculo) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	600
Figura 154. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (brânquias) dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	601
Figura 155. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (brânquias) dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal)	602
Figura 156. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos	

(fígado) dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	603
Figura 157. Comparação das respostas dos biomarcadores dos sistemas não enzimáticos (fígado) dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	604
Figura 158. Comparação das respostas do biomarcador do sistema não enzimático (PCO - músculo) dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	605
Figura 159. Comparação das respostas do biomarcador do sistema não enzimático (PCO - músculo) dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	606
Figura 160. Comparação das respostas do biomarcador de neurotoxicidade entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.	607
Figura 161. Comparação das respostas do biomarcador de neurotoxicidade entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais	608
Figura 162. Comparação das respostas do biomarcador de neurotoxicidade entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais	609
Figura 163. Comparação das respostas do biomarcador de neurotoxicidade entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais	609
Figura 164. Comparação das respostas do biomarcador de neurotoxicidade entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	611
Figura 165. Comparação das respostas do biomarcador de neurotoxicidade entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	612
Figura 166. Comparação das respostas do biomarcador de neurotoxicidade dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	613

Figura 167. Comparação das respostas do biomarcador de neurotoxicidade dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	614
Figura 168. Comparação das respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.....	615
Figura 169. Comparação das respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais	616
Figura 170. Comparação das respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.....	617
Figura 171. Comparação das respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.....	617
Figura 172. Comparação das respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	619
Figura 173. Comparação das respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais.....	620
Figura 174. Comparação das respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade entre os peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	621
Figura 175. Comparação das respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal)	622
Figura 176. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nos tecidos muscular e hepático dos peixes capturados no compartimento 5. Comparação entre os pontos próximos da costa (5 km - pontos 1, 3 e 5) e entre os pontos distantes da costa (20 km – pontos 2, 4 e 6).	625
Figura 177. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nos	

tecidos muscular e hepático dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados no compartimento 5. Comparação entre os pontos próximos da costa (5 km - pontos 1, 3 e 5) e entre os pontos distantes da costa (20 km – pontos 2, 4 e 6).....	627
Figura 178. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nos tecidos muscular e hepático dos peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	628
Figura 179. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nos tecidos muscular e hepático dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	629
Figura 180. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nos tecidos muscular e hepático dos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	631
Figura 181. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) nos tecidos muscular e hepático dos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal)	632
Figura 182. Comparação das concentrações das espécies inorgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e orgânica de Hg (MeHg) entre os peixes capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais.....	633
Figura 183. Comparação das concentrações das espécies inorgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e orgânica de Hg (MeHg) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 1, 3 e 5, localizados a 5 km da costa (“próximos da costa”) em cada uma das campanhas amostrais	634
Figura 184. Comparação das concentrações das espécies inorgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e orgânica de Hg (MeHg) entre os peixes capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais	635
Figura 185. Comparação das concentrações das espécies inorgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e orgânica de Hg (MeHg) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos 2, 4 e 6, localizados a 20 km da costa (“distantes da costa”) em cada uma das campanhas amostrais	636
Figura 186. Comparação das concentrações das espécies inorgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e orgânica de Hg (MeHg) entre os peixes capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	638

Figura 187. Comparação das concentrações das espécies inorgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e orgânica de Hg (MeHg) entre os peixes, da ordem Siluriformes, capturados nos pontos próximos x distantes da costa (1x2; 3x4 e 5x6) em cada uma das campanhas amostrais	640
Figura 188. Comparação das concentrações das espécies inorgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e orgânica de Hg (MeHg) nos peixes capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal).....	642
Figura 189. Comparação das concentrações das espécies inorgânicas de As (As^{3+} e As^{5+}) e orgânica de Hg (MeHg) nos peixes, da ordem Siluriformes, capturados em cada um dos pontos ao longo das campanhas amostrais (comparação temporal)	644
Figura 190. Mapa da delimitação da área de proibição da pesca (em magenta) e da concentração de sólidos em suspensão na região esturina-marinha acometida pela lama proveniente do rompimento da Barragem de Fundão, em Marina – MG.....	660
Figura 191. Mapa da delimitação da área de proibição da pesca (em magenta) e da sedimentação de rejeito proveniente do rompimento da Barragem de Fundão, em Marina - MG na região esturina-marinha da foz do rio Doce.....	660
Figura 192. Resposta integrada de biomarcadores (IBR) fisiológicos dos peixes capturados em cada ponto de coleta (Compartimentos 1, 2 e 3), ao longo das Campanhas de amostragem (C1, C2, C3 e C4).....	666
Figura 193. Resposta integrada de biomarcadores (IBR) metabólicos dos peixes capturados em cada ponto de coleta (Compartimentos 1, 2 e 3), ao longo das Campanhas de amostragem (C1, C2, C3 e C4).....	667
Figura 194. Resposta integrada de biomarcadores (IBR) do sistema antioxidante e de biotransformação em brânquias dos peixes capturados em cada ponto de coleta (Compartimentos 1, 2 e 3), ao longo das Campanhas de amostragem (C1, C2, C3 e C4)	669
Figura 195. Resposta integrada de biomarcadores (IBR) não enzimáticos em brânquias dos peixes capturados em cada ponto de coleta (Compartimentos 1, 2 e 3), ao longo das Campanhas de amostragem (C1, C2, C3 e C4)	670
Figura 196. Resposta integrada de biomarcadores (IBR) do sistema antioxidante e de biotransformação em fígado dos peixes capturados em cada ponto de coleta (Compartimentos 1, 2 e 3), ao longo das Campanhas de amostragem (C1, C2, C3 e C4)	671
Figura 197. Resposta integrada de biomarcadores (IBR) não enzimáticos em fígado dos peixes capturados em cada ponto de coleta (Compartimentos 1, 2 e 3), ao longo das Campanhas de	

amostragem (C1, C2, C3 e C4)	673
Figura 198. Resposta integrada de biomarcadores (IBR) relativos à neurotoxicidade dos peixes capturados em cada ponto de coleta (Compartimentos 1, 2 e 3), ao longo das Campanhas de amostragem (C1, C2, C3 e C4)	674
Figura 199. Respostas integradas gerais de biomarcadores (IBR Geral) dos peixes capturados em cada ponto de coleta (Compartimentos 1, 2 e 3), ao longo das Campanhas de amostragem (C1, C2, C3 e C4)	675
Figura 200. Curvas de rarefação (Riqueza de espécies em função de Abundância) para os pontos de amostragem (CN, CP e DA) dos Compartimentos 1,2 e 3	676
Figura 201. Diagramas de dispersão entre a variável resposta Abundância (eixo y) e as variáveis fisiológicas preditoras (eixo x). Compartimento 1 - A) IBR de Biomarcadores Fisiológicos x Abundância; B) IBR de Não-enzimáticos das Brânquias x Abundância; C) Campanhas x Abundância. Compartimento 2 - D) IBR de Biomarcadores Fisiológicos x Abundância; E) IBR de Não-enzimáticos das Brânquias x Abundância; F) Campanhas x Abundância. Compartimento 3 - G) IBR de Biomarcadores Fisiológicos x Abundância; H) IBR de Não-enzimáticos das Brânquias x Abundância; I) Campanhas x Abundância	680
Figura 202. Diagramas de dispersão entre a variável resposta Riqueza (eixo y) e variáveis fisiológicas preditoras (eixo x). Compartimento 1 - A) IBR de Biomarcadores Não-enzimáticos de Brânquias x Riqueza; B) IBR de Biomarcadores Não-enzimáticos do Fígado x Riqueza; C) Campanhas x Riqueza. Compartimento 2 - A) IBR de Biomarcadores Não-enzimáticos de Brânquias x Riqueza; B) IBR de Biomarcadores Não-enzimáticos do Fígado x Riqueza; C) Campanhas x Riqueza. Compartimento 3 - A) IBR de Biomarcadores Não-enzimáticos de Brânquias x Riqueza; B) IBR de Biomarcadores Não-enzimáticos do Fígado x Riqueza; C) Campanhas x Riqueza	681
Figura 203. Mortalidade induzida por amostras de águas em embriões e larvas de Danio rerio. Os embriões 0 hpf (n=5/poço/duplicata) foram tratados pela exposição ao meio E2 (controle negativo) ou 100 µL das amostras (RD07, RD08, RD09, RD16, RD17, RD19, RD24, RD25, RD26 e RD27). Os indivíduos foram analisados diariamente por um período de 4 dias (24, 48, 72 e 96 hpf - horas pós fertilização) para contagem de embriões ou larvas mortas. Não houve troca do meio	684
Figura 204. Análise de malformações observadas em embriões e larvas de Danio rerio expostos a amostras de águas. Os embriões 0 hpf (n=5/poço/duplicata) foram tratados pela	

exposição ao meio E2 (controle negativo) ou 100 µL das amostras (RD07, RD08, RD09, RD16, RD17, RD19, RD24, RD25, RD26 e RD27). Os indivíduos foram analisados 96 hpf (horas pós fertilização), buscou-se anomalias quanto à morfologia das larvas e os defeitos foram elencados assim como a porcentagem dos indivíduos portadores das mesmas	685
Figura 205. Fotografias de larvas de Danio rerio em 96 hpf de exposição a: (A) controle negativo (meio E2) e (B-E) amostras de água. Setas vermelhas indicam a bexiga natatória, de aspecto normal e inflada em (A) e com anomalias, não inflada em (B – E).....	686
Figura 206. Fotografias de larvas de Danio rerio em 96 hpf de exposição a: (A) controle negativo (meio E2) e (B) amostra RD17 (rio Doce em Gov. Valadares – DA), que provocou desenvolvimento tardio	686
Figura 207. Mortalidade induzida por amostras de sedimentos em embriões e larvas de Danio rerio. Os embriões 0 hpf (n=5/poço/duplicata) foram tratados pela exposição ao meio E2 (controle negativo) ou 100 µL das amostras (BRD1, BRD2, BRD3, MRD1, MRD2, MRD3, ARD1, ARD2, ARD3, DIQUE). Os indivíduos foram analisados diariamente por um período de 4 dias (24, 48, 72 e 96 hpf - horas pós fertilização) para contagem de embriões ou larvas mortas. Não houve troca do meio	687
Figura 208. Análise de malformações observadas em embriões e larvas de Danio rerio expostos a amostras de sedimentos. Os embriões 0 hpf (n=5/poço/duplicata) foram tratados pela exposição ao meio E2 (controle negativo) ou 100 µL das amostras (BRD1, BRD2, BRD3, MRD1, MRD2, MRD3, ARD1, ARD2, ARD3, DIQUE). Os indivíduos foram analisados 96 hpf (horas pós fertilização), buscou-se anomalias quanto à morfologia das larvas e os defeitos foram elencados assim como a porcentagem dos indivíduos portadores dessas.....	688
Figura 209. Fotografias das anomalias detectadas em larvas de Danio rerio no período de 96 hpf após a exposição a: (A) controle negativo (meio E2) e (B-F) amostras de sedimento. (A) indivíduo normal, (B) bexiga natatória não inflada, (C) edema pericárdico, (D) edema no saco vitelínico, (E) escoliose e (F) ausência de pigmentação. As setas indicam as anomalias.	689
Figura 210. Fotografias das hemorragias detectadas em larvas de Danio rerio no período de 96 hpf pelas amostras ARD1 e DIQUE. A seta indica a hemorragia.	689
Figura 211. Imagens de <i>Rhinella schneideri</i> (sapo cururu) espécie mais representativa da herpetofauna capturada ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	699
Figura 212. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de exemplares da herpetofauna (anfíbios) capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) em	

cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	700
Figura 213. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de exemplares de anfíbios pertencentes a família Bufonidae que foram capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	704
Figura 214. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares da herpetofauna (anfíbios) capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	708
Figura 215. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares da herpetofauna (anfíbios) pertencentes a família Bufonidae e que foram capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	710
Figura 216. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares da herpetofauna (anfíbios) capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	712
Figura 217. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares da herpetofauna (anfíbios) pertencentes a família Bufonidae que foram capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	714
Figura 218. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de exemplares da herpetofauna (anfíbios) capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	716
Figura 219. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de exemplares da herpetofauna (anfíbios) pertencentes a família Bufonidae que foram capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	718
Figura 220. Concentrações de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g.mg Hb}^{-1}$) da	

herpetofauna (anfíbios) capturados nos pontos C (colunas cinzas) e DA (colunas pretas) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	721
Figura 221. Concentrações de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g}.\text{mg Hb}^{-1}$) da herpetofauna (anfíbios) pertencentes a família Bufonidae que foram capturados nos pontos C (colunas cinzas) e DA (colunas pretas) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	727
Figura 222. Imagem de um filhote de tartaruga marinha da espécie <i>Caretta caretta</i> (tartaruga-cabeçuda)	741
Figura 223. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de filhotes de tartaruga-cabeçuda (<i>Caretta caretta</i>) capturados nos períodos reprodutivos de 2015/2016; 2016/2017 e 2017/2018 na Reserva Biológica de Comboios.....	742
Figura 224. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de filhotes de tartaruga-cabeçuda (<i>Caretta caretta</i>) capturados nos períodos reprodutivos de 2015/2016; 2016/2017 e 2017/2018 na Reserva Biológica de Comboios..	744
Figura 225. Concentração de EPTs em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g}.\text{mg Hb}^{-1}$) de filhotes de tartaruga-cabeçuda (<i>Caretta caretta</i>) capturados nos períodos reprodutivos de 2015/2016; 2016/2017 e 2017/2018 na Reserva Biológica de Comboios	746
Figura 226. Concentração de EPTs em músculo ($\text{mg}.\text{kg}^{-1}$ de peso úmido) de filhotes de tartaruga-cabeçuda (<i>Caretta caretta</i>) capturados nos períodos reprodutivos de 2015/2016; 2016/2017 e 2017/2018 na Reserva Biológica de Comboios	750
Figura 227. Micrografias (A até I) e análises químicas elementares (MEV/EDS – J até O) de uma amostra representativa referente ao ano reprodutivo de 2015/2016.....	754
Figura 228. Micrografias (A até I) e análises químicas elementares (MEV/EDS – J até O) de uma amostra representativa referente ao ano reprodutivo de 2016/2017	755
Figura 229. Micrografias (A até I) e análises químicas elementares (MEV/EDS – J até O) de uma amostra representativa referente ao ano reprodutivo de 2017/2018.....	756
Figura 230. Imagens representativas de espécies de aves capturadas para avaliação ecotoxicológica. A: <i>Platyrinchus mystaceus</i> ; B: <i>Malacoptila striata</i> ; C: <i>Chiroxiphia caudata</i> e D: <i>Myiobius atricaudus</i>	762
Figura 231. Concentração de EPTs determinada em penas de contorno ($\text{mg}.\text{kg}^{-1}$, peso seco)	

das aves capturadas em pontos controle (C – barras cinzas) e adjacentea APDL (DA – barras pretas) nos três compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce nas diferentes campanhas/estações amostrais	774
Figura 232. Concentração de EPTs determinada em penas de contorno (mg.kg^{-1} , peso seco) das aves insetívoras capturadas em pontos controle (C – barras cinzas) e adjacentea APDL (DA – barras pretas) nos três compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce nas diferentes campanhas/estações amostrais	781
Figura 233. Concentração de EPTs determinada em penas de contorno (mg.kg^{-1} , peso seco) das aves granívoras capturadas em pontos controle (C – barras cinzas) e adjacentea APDL (DA – barras pretas) nos três compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce nas diferentes campanhas/estações amostrais	789
Figura 234. Concentração de EPTs determinada em penas de contorno (mg.kg^{-1} , peso seco) das aves omnívoras capturadas em pontos controle (C – barras cinzas) e adjacentea APDL (DA – barras pretas) nos três compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce nas diferentes campanhas/estações amostrais	797
Figura 235. Concentração de EPTs determinada em penas de contorno (mg.kg^{-1} , peso seco) das aves frugívoras/nectarívoras capturadas em pontos controle (C – barras cinzas) e adjacentea APDL (DA – barras pretas) nos três compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce nas diferentes campanhas/estações amostrais	805
Figura 236. Imagem de <i>Artibeus lituratus</i> , a espécie mais representativa de quirópteros (morcegos) capturada ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre.....	825
Figura 237. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de todos os exemplares de quirópteros (morcegos) que foram capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	828
Figura 238. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de exemplares de quirópteros (morcegos), pertencentes a família Phyllostomidae, que foram capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	833
Figura 239. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de exemplares de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar frugívoro, que foram capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do	

rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	838
Figura 240. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de todos os exemplares de quirópteros (morcegos) capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	842
Figura 241. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo exemplares de quirópteros (morcegos), pertencentes a família Phyllostomidae, capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	845
Figura 242. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar frugívoro, capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.	848
Figura 243. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de todos os exemplares de quirópteros (morcegos) capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	851
Figura 244. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de quirópteros (morcegos), pertencentes a família Phyllostomidae, capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	854
Figura 245. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar frugívoro, capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	857
Figura 246. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de todos os exemplares de quirópteros (morcegos) capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	859
Figura 247. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de exemplares de quirópteros (morcegos), pertencentes a família Phyllostomidae, capturados	

nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	861
Figura 248. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de exemplares de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar frugívoro, capturados nos pontos C (círculos cinzas) e DA (círculos pretos) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	863
Figura 249. Concentração de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g.mg Hb}^{-1}$) de todos os quirópteros (morcegos) capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	867
Figura 250. Concentração de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g.mg Hb}^{-1}$) de quirópteros (morcegos), pertencentes a família Phyllostomidae, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	876
Figura 251. Concentração de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g.mg Hb}^{-1}$) de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar frugívoro, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	884
Figura 252. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de todos os quirópteros (morcegos) capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	894
Figura 253. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de quirópteros (morcegos), pertencentes a família Phyllostomidae, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	903
Figura 254. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar frugívoro, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	912
Figura 255. Concentração de EPTs determinados em fezes (mg.kg^{-1}) de quirópteros (morcegos) capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais	919

Figura 256. Concentração de EPTs determinados em fezes (mg.kg^{-1}) de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar frugívoro, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	926
Figura 257. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar hematófago, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	933
Figura 258. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar nectarívoro, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	940
Figura 259. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar insetívoro, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	947
Figura 260. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de quirópteros (morcegos), de hábito alimentar insetívoro, capturados nos pontos C (barras cinzas) e DA (barras pretas) de cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce ao longo de quatro campanhas amostrais.....	954
Figura 261. Imagem das espécies pertencentes aos gêneros mais representativo ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre. A: <i>Didelphis aurita</i> (gambá-da-orelha-preta); B: <i>Akodon montensis</i> (rato-do-mato); C: <i>Marmosops incanus</i> (cuíca-cinza); D: <i>Marmosa murina</i> (cuíca-marrom).....	971
Figura 262. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de exemplares de pequenos mamíferos capturados, ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	974
Figura 263. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família <i>Cricetidae</i> , capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da	

área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas	978
Figura 264. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Didelphidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas	
	982
Figura 265. Biomarcadores fisiológicos determinados em plasma de exemplares de pequenos mamíferos, de hábito alimentar omnívoro, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	
	986
Figura 266. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de pequenos mamíferos, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	
	990
Figura 267. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Cricetidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	
	992
Figura 268. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Didelphidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	
	995
Figura 269. Biomarcadores dos sistemas antioxidante e de biotransformação determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de pequenos mamíferos, de hábito alimentar omnívoro, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de	

lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....998

Figura 270. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de pequenos mamíferos capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....1001

Figura 271. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Cricetidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....1003

Figura 272. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Didelphidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....1005

Figura 273. Biomarcadores não enzimáticos determinados em hemolisado sanguíneo de exemplares de pequenos mamíferos, de hábito alimentar onívoro, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....1007

Figura 274. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de exemplares de pequenos mamíferos capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....1009

Figura 275. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Cricetidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos

compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1011
Figura 276. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Didelphidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1012
Figura 277. Biomarcadores de genotoxicidade e mutagenicidade determinados em sangue de exemplares de pequenos mamíferos, de hábito alimentar omnívoro, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1013
Figura 278. Concentração de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g.mg Hb}^{-1}$) de exemplares de pequenos mamíferos capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1016
Figura 279. Concentração de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g.mg Hb}^{-1}$) de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Cricetidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1024
Figura 280. Concentração de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g.mg Hb}^{-1}$) de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Didelphidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1032
Figura 281. Concentração de EPTs determinados em hemolisado sanguíneo ($\mu\text{g.mg Hb}^{-1}$) de exemplares de pequenos mamíferos, de hábito alimentar omnívoro, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1040
Figura 282. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de exemplares de	

pequenos mamíferos capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas	1047
Figura 283. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Cricetidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1054
Figura 284. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de exemplares de pequenos mamíferos, pertencentes a família Didelphidae, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas.....	1061
Figura 285. Concentração de EPTs determinados em pelos (mg.kg^{-1}) de exemplares de pequenos mamíferos, de hábito alimentar omnívoro, capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas	1069
Figura 286. Concentração de EPTs determinados em fezes (mg.kg^{-1}) de exemplares de pequenos mamíferos capturados ao longo de toda a extensão acometida pela passagem da onda de lama, nos pontos controle (símbolos cinzas) e dentro da área de passagem e deposição da lama (símbolos pretos) em cada um dos compartimentos (1, 2 e 3) de cada uma das campanhas	1076
Figura 287. Imagens das espécies mais representativas de médios e grandes mamíferos cujas fezes foram coletadas e destinadas para determinação da concentração de EPTs. A: <i>Hydrochoerus hydrochaeris</i> ; B: <i>Cerdocyon thous</i> ; C: <i>Chrysocyon brachyurus</i> e D: <i>Lontra longicaudis</i>	1093
Figura 288. Concentração de EPTs determinada em amostras de fezes (mg.kg^{-1} , peso seco) de todos os espécimes da mastofauna de médio e grande porte nos pontos controle (C – barras cinzas) e adjacentes a APDL (DA – barras pretas) dos três compartimentos (1, 2 e 3) da bacia do rio Doce nas diferentes campanhas/estações amostrais	1096

Figura 289. Imagens representativas das espécies de cetáceos avaliadas: A - *Sotalia guianensis* (boto-cinza); B - *Pontoporia blainvillei* (toninha) e C - *Megaptera novaeangliae* (baleia jubarte)

.....1123

Figura 290. Concentrações de EPTs determinadas em amostras de tecidos (fígado, rim, músculo e gordura; mg.kg⁻¹ de peso úmido) retirados de carcaças de *Sotalia guianensis* (boto-cinza) encalhados nos períodos pré e pós-desastre próximos da foz do rio Doce.1125

Figura 291. Concentrações de EPTs determinadas em amostras de tecidos (fígado, rim, músculo e gordura; mg.kg⁻¹ de peso úmido) retirados de carcaças de *Pontoporia blainvillei* (toninha) encalhadas nos períodos pré e pós-desastre (2017 e 2018) próximos da foz do rio Doce.1129

Figura 292. Concentrações de EPTs determinadas em amostras de tecidos (rim, músculo e gordura; mg.kg⁻¹ de peso úmido) retirados de carcaças de *Megaptera novaeangliae* (baleia jubarte) encalhadas nos períodos pós-desastre (2017 e 2018) próximos da foz do rio Doce.1133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição e coordenadas dos pontos de amostragem de ecotoxicologia nas regiões continental, estuarina e marinha	80
Tabela 2. Extensão das lesões observadas (a) de acordo com a porcentagem de ocorrência da lesão no corte histológico.....	88
Tabela 3. Precipitação (mm) nos meses de estações secas e chuvosas e precipitação acumulada (mm) nos Compartimentos 1, 2 e 3 do rio Doce	95
Tabela 4. Descrição dos pontos e codificação das amostras de água e sedimento utilizadas no teste FET	97
Tabela 5. Descrição e coordenadas dos pontos de amostragem de fauna silvestre para análises de ecotoxicologia.....	103
Tabela 6. Descritivo das espécies de peixes capturadas para avaliação ecotoxicológica, nas campanhas seca e chuvosa, nos diferentes compartimentos dos ambientes aquático continental, estuarino e marinho acometidos pelo desastre	114
Tabela 7. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) em cada ponto de cada uma das campanhas ao longo do período amostral	128
Tabela 8. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) para as ordens mais representativas em cada ponto ao final do período amostral.....	128
Tabela 9. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	130
Tabela 10. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	135
Tabela 11. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre campanhas.	141
Tabela 12. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) relacionados ao metabolismo energético dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	146
Tabela 13. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) relacionados ao metabolismo energético dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 1,	

comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	151
Tabela 14. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) relacionados ao metabolismo energético dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre as campanhas.....	156
Tabela 15. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação do tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	163
Tabela 16. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	169
Tabela 17. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação do tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre as campanhas.....	174
Tabela 18. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	181
Tabela 19. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	187
Tabela 20. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre as campanhas.....	192
Tabela 21. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos do tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	198
Tabela 22. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	203

Tabela 23. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos do tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre as campanhas.....	208
Tabela 24 - Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	214
Tabela 25 - Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	219
Tabela 26. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre as campanhas.....	224
Tabela 27 - Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) de neurotoxicidade dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	230
Tabela 28 - Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) de neurotoxicidade dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.....	235
Tabela 29. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) de neurotoxicidade dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre as campanhas.....	240
Tabela 30. Proteínas carboniladas no tecido muscular dos peixes dos pontos CN, CP, DA e DQ, do compartimento 1.....	243
Tabela 31. Respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade nos peixes dos pontos CN, CP, DA e DQ, do compartimento 1.	245
Tabela 32. Bioacumulação das espécies metálicas As (III), As(V) e MeHg no tecido muscular dos peixes do compartimento 1.....	253
Tabela 33. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) em cada ponto de cada uma das campanhas ao longo do período amostral	261
Tabela 34. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) para as ordens mais representativas em cada ponto ao final do período amostral.....	261
Tabela 35. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes	

dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	263
Tabela 36. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre as campanhas.	269
Tabela 37. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) relacionados ao metabolismo energético dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	276
Tabela 38. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) relacionados ao metabolismo energético dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre as campanhas.....	281
Tabela 39. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	288
Tabela 40. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre as campanhas.....	293
Tabela 41. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	299
Tabela 42. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre as campanhas.....	304
Tabela 43. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	310
Tabela 44. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre as campanhas.....	315
Tabela 45. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de	

tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	321
Tabela 46. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre as campanhas.....	326
Tabela 47. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) de neurotoxicidade dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.....	331
Tabela 48. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) de neurotoxicidade dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 2, comparação entre as campanhas.....	335
Tabela 49. Proteínas carboniladas no tecido muscular dos peixes dos pontos CN, CP e DA, do compartimento 2.....	337
Tabela 50. Respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade nos peixes dos pontos CN, CP e DA, do compartimento 2.	339
Tabela 51. Bioacumulação das espécies metálicas As(III), As(V) e MeHg no tecido muscular dos peixes do compartimento 2.....	347
Tabela 52. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) em cada ponto de cada uma das campanhas ao longo do período amostral	354
Tabela 53. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) para as ordens mais representativas em cada ponto ao final do período amostral.....	354
Tabela 54. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	356
Tabela 55. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre as campanhas.	362
Tabela 56. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) relacionados ao metabolismo energético dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	369
Tabela 57. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) relacionados ao metabolismo energético dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3,	

comparação entre as campanhas.....	375
Tabela 58. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	382
Tabela 59. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre as campanhas.....	387
Tabela 60. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação do tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	395
Tabela 61. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) enzimáticos dos sistemas antioxidante e de biotransformação do tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre as campanhas.....	400
Tabela 62. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais 3.	407
Tabela 63. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido branquial dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre as campanhas.....	412
Tabela 64. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.	419
Tabela 65. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) não-enzimáticos de tecido hepático dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre as campanhas.....	424
Tabela 66. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) de neurotoxicidade dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.....	430
Tabela 67. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) de neurotoxicidade dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 3, comparação entre as	

campanhas.....	435
Tabela 68. Proteínas carboniladas no tecido muscular dos peixes dos pontos CN, CP e DA, do compartimento 3.....	437
Tabela 69. Respostas dos biomarcadores de citogenotoxicidade nos peixes dos pontos CN, CP e DA, do compartimento 3.	439
Tabela 70. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido muscular dos peixes capturados nos compartimentos 1, 2 e 3. Comparação entre os pontos CN, CP, DA e DQ em cada uma das campanhas amostradas.	442
Tabela 71. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido muscular dos peixes capturados nos compartimentos 1, 2 e 3. Comparação entre as campanhas amostradas em cada um dos pontos amostrais	447
Tabela 72. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido hepático dos peixes capturados nos compartimentos 1, 2 e 3. Comparação entre os pontos CN, CP, DA e DQ em cada uma das campanhas amostradas.	453
Tabela 73. Perfil da bioacumulação de 19 elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no tecido hepático dos peixes capturados nos compartimentos 1, 2 e 3. Comparação entre as campanhas amostradas em cada um dos pontos amostrais	457
Tabela 74. Bioacumulação das espécies metálicas As(III), As(V) e MeHg no tecido muscular dos peixes do compartimento 3.....	461
Tabela 75. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) em cada ponto de cada uma das campanhas ao longo do período amostral	476
Tabela 76. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) para as ordens mais representativas em cada ponto ao final do período amostral.....	476
Tabela 77. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) em cada ponto próximo (5km – pontos 1, 3 e 5) e distantes (20 km – pontos 2, 4 e 6) da costa, em cada uma das campanhas e ao final do período amostral (média IB)	535
Tabela 78. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) para as ordens mais representativas em cada um dos pontos ao final do período amostral	535
Tabela 79. Média das concentrações de EPTs (mg.kg ⁻¹ PU) determinadas em tecido muscular de peixes. Comparação entre o estudo atual e estudos pré-desastre (linha base).....	654
Tabela 80. Média das concentrações de EPTs (mg.kg ⁻¹ PU) determinadas em tecido muscular de peixes. Comparação entre estudos realizados entre 2 e 4 anos pós-desastre.....	658

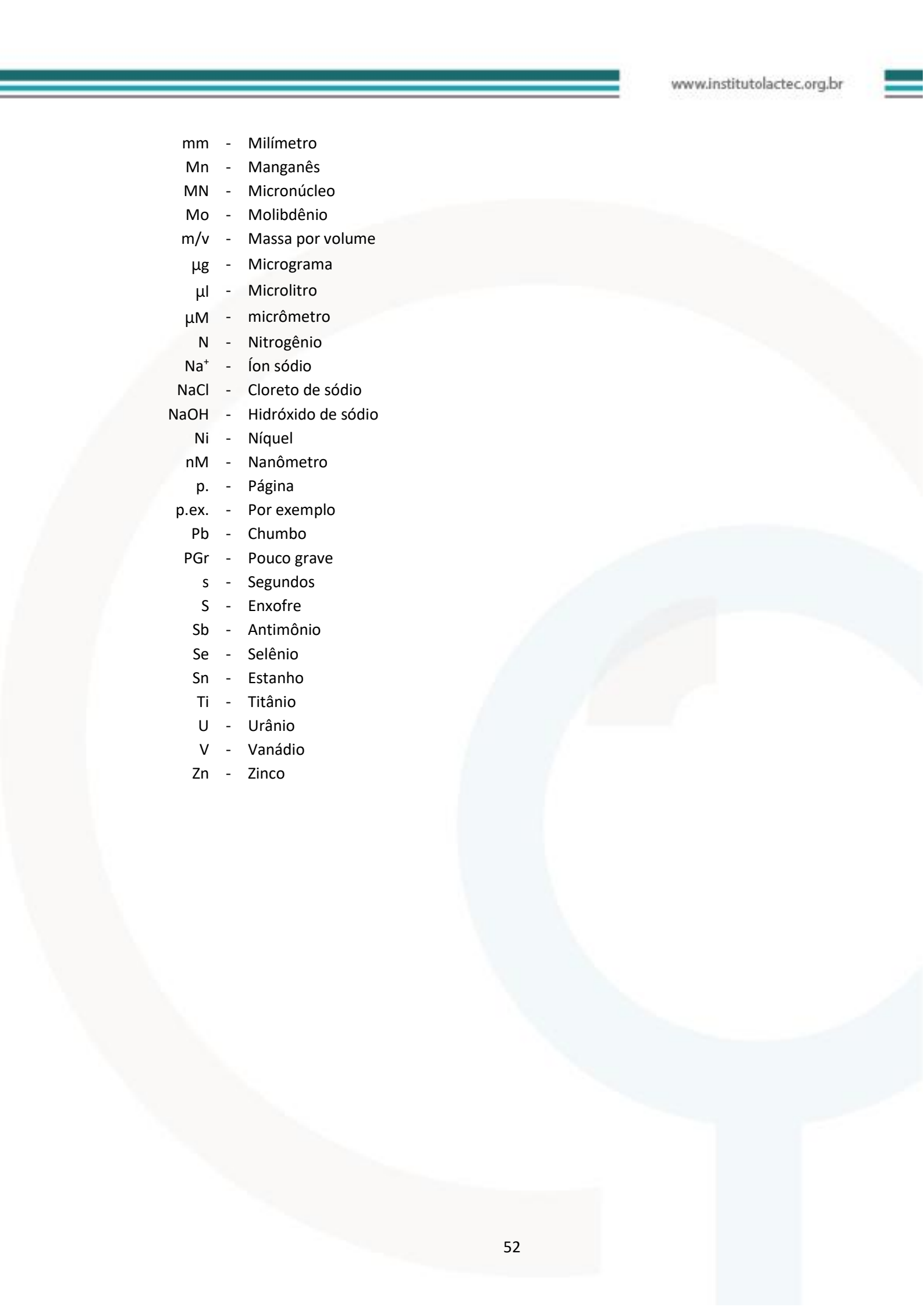
Tabela 81. Média da concentração de As (mg.kg^{-1} PU) determinada no tecido muscular de peixes capturados em cada um dos pontos e campanhas.....	661
Tabela 82. Composição, % numérica, classificação da % numérica, frequência de ocorrência nos pontos de amostragem, classificação de frequência de ocorrência	677
Tabela 83. Descritivo dos exemplares herpetofauna coletados para avaliação ecotoxicológica ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	698
Tabela 84. Frequência de ocorrência dos elementos químicos detectados, através da técnica MEV/EDS, em cascas de ovos ($n=8$ por período reprodutivo) de filhotes de tartaruga-cabeçuda (<i>Caretta caretta</i>) capturados nos períodos reprodutivos de 2015/2016; 2016/2017 e 2017/2018 na Reserva Biológica de Comboios	753
Tabela 85. Descritivo dos exemplares de avifauna coletados para avaliação da concentração de EPTs em penas de contorno	763
Tabela 86. Descritivo do total de exemplares de mastofauna voadora (Quirópteros) capturados, para avaliação ecotoxicológica, ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	820
Tabela 87. Descritivo dos exemplares de mastofauna voadora (Quirópteros) que tiveram sangue amostrado para avaliação ecotoxicológica, ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	824
Tabela 88. Descritivo dos exemplares de mastofauna voadora (Quirópteros) que tiveram fezes coletadas para determinação da concentração de EPTs, durante a avaliação ecotoxicológica, ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	825
Tabela 89. Descritivo do total de exemplares de mastofauna de pequeno porte (pequenos mamíferos) capturados, para avaliação ecotoxicológica, ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	969
Tabela 90. Descritivo dos exemplares de mastofauna de pequeno porte (pequenos mamíferos) que tiveram sangue amostrado para avaliação ecotoxicológica, ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	970
Tabela 91. Descritivo dos exemplares de mastofauna de pequeno porte (pequenos mamíferos) que tiveram fezes coletadas para determinação da concentração de EPTs, dentro da avaliação ecotoxicológica, ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre	972
Tabela 92. Descritivo dos espécimes da mastofauna de médio e grande porte que tiveram fezes coletadas para a análise de determinação da concentração de EPTs	1094

Tabela 93. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte. Comparação entre as concentrações determinadas em fezes de animais pertencentes a guildas tróficas diferentes cujas fezes foram obtidas em uma mesma campanha, compartimento e ponto.	1103
Tabela 94. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar omnívoro. Comparação entre os pontos C e DA em cada compartimento (1, 2 e 3) e campanha (1, 2 e 4)	1105
Tabela 95. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar omnívoro. Comparação em um mesmo ponto (C ou DA) entre as campanhas (1, 2 e 4)	1106
Tabela 96. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar omnívoro. Comparação em um mesmo ponto (C ou DA) nos diferentes compartimentos (1, 2 e 3) de uma mesma campanha (1, 2 ou 4)...	1107
Tabela 97. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar carnívoro (incluindo piscívoros). Comparação entre os pontos C e DA em cada compartimento (1, 2 e 3) e campanha (1 e 4)	1109
Tabela 98. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar carnívoro (incluindo piscívoros). Comparação em um mesmo ponto (C ou DA) entre as campanhas (1 e 4)	1109
Tabela 99. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar carnívoro (incluindo piscívoros). Comparação em um mesmo ponto (C ou DA) nos diferentes compartimentos (1, 2 e 3) de uma mesma campanha (1 ou 4).....	1110
Tabela 100. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar piscívoro. Comparação em um mesmo ponto (C ou DA) entre as campanhas (1 e 4)	1112
Tabela 101. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar piscívoro. Comparação em um mesmo ponto (C ou DA) nos diferentes compartimentos (1, 2 e 3) de uma mesma campanha (1 ou 4).....	1112
Tabela 102. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar herbívoro. Comparação entre os pontos C e DA em cada compartimento (1, 2 e 3) e campanha (1 e 4)	1114

Tabela 103. Concentrações de EPTs (mg.kg^{-1} , peso seco) determinadas nas fezes de mamíferos de médio e grande porte de hábito alimentar piscívoro. Comparação em um mesmo ponto (C ou DA) nos diferentes compartimentos (1, 2 e 3) de uma mesma campanha (1 ou 4).....1114

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
<i>e.g.</i>	-	Abreviação em latim que significa 'por exemplo'
<i>etc.</i>	-	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 Ocasionais
(US)EPA	-	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês <i>United States Environmental Protection Agency</i>)
EPTs	-	Elementos Potencialmente Tóxicos
ESPTs	-	Elementos e Substâncias 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 de 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-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-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 Socioambientais (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 à 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-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 o ano de 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	69
1.1.	POLUIÇÃO AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE E OS EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO	69
1.2.	CARACTERÍSTICAS E EFEITOS DOS EPTS ENCONTRADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE	74
1.3.	BIOINDICADORES E BIOMARCADORES – FERRAMENTAS PARA A AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO DESASTRE	76
2.	METODOLOGIA	79
2.1.	PEIXES	79
2.1.1.	PONTOS AMOSTRADOS	79
2.1.2.	OBTENÇÃO, PROCESSAMENTO E ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS	81
2.1.3.	ANÁLISES DAS AMOSTRAS	83
2.1.3.1.	ANÁLISES SANGUÍNEAS	83
2.1.3.2.	ANÁLISES PLASMÁTICAS.....	86
2.1.3.3.	ANÁLISES TECIDUAIS	87
2.1.3.4.	ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE AS MÉTRICAS ECOTOXICOLÓGICAS E A ABUNDÂNCIA E A RIQUEZA DE ESPÉCIES DE PEIXES CONTINENTAIS.....	93
2.1.3.5.	ANÁLISE DE TOXICIDADE COM AMOSTRAS DE ÁGUAS E SEDIMENTOS DA PORÇÃO CONTINENTAL EM EMBRIÕES DE DANIO RERIO (ZEBRAFISH)	96
2.1.3.6.	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	100
2.2.	FAUNA SILVESTRE (HERPETOFAUNA, AVIFAUNA, MASTOFAUNA TERRESTRE DE PEQUENO, MÉDIO E GRANDE PORTE, MASTOFAUNA VOADORA E MASTOFAUNA AQUÁTICA)	101
2.2.1.	HERPETOFAUNA, MASTOFAUNA TERRESTRE DE PEQUENO PORTE E MASTOFAUNA VOADORA.....	101
2.2.1.1.	PONTOS AMOSTRADOS.....	101
2.2.1.2.	OBTENÇÃO, PROCESSAMENTO E ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS.....	104
2.2.1.3.	ANÁLISES DAS AMOSTRAS.....	106
2.2.2.	HERPETOFAUNA (QUELÔNIOS - TARTARUGAS MARINHAS)	108

2.2.3.	AVIFAUNA	110
2.2.4.	MASTOFAUNA TERRESTRE DE MÉDIO E GRANDE PORTE	111
2.2.5.	MASTOFAUNA AQUÁTICA (CETÁCEOS)	111
2.2.6.	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	112
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	113
3.1.	PEIXES	113
3.1.1.	AMBIENTE AQUÁTICO CONTINENTAL	119
	COMPARTIMENTO 1.....	119
3.1.1.1.	ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE	119
3.1.1.1.1.	PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO DAS BRÂNQUIAS (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS).....	119
3.1.1.1.2.	BIOMARCADORES FISIOLÓGICOS – OSM, ÍONS PLASMÁTICOS, TH, AC BRANQUIAL E RENAL, Na^+/K^+ -ATPASE E H^+ -ATPASE	129
3.1.1.1.3.	BIOMARCADORES DE METABOLISMO ENERGÉTICO – GLICOSE E LACTATO PLASMÁTICOS E GLICOGÊNIO MUSCULAR	144
3.1.1.1.4.	PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO REPRODUTIVA (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE GÔNADAS)	160
3.1.1.1.5.	BIOMARCADORES ENZIMÁTICOS DOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO NO TECIDO BRANQUIAL – SOD, CAT, GPX, GST E GR	160
3.1.1.1.6.	BIOMARCADORES ENZIMÁTICOS DOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO NO TECIDO HEPÁTICO – SOD, CAT, GPX, GST E GR.....	178
3.1.1.1.7.	BIOMARCADORES NÃO ENZIMÁTICOS NO TECIDO BRANQUIAL – GSH, MT E LPO	196
3.1.1.1.8.	BIOMARCADORES NÃO ENZIMÁTICOS NO TECIDO HEPÁTICO – GSH, MT E LPO	212
3.1.1.1.9.	BIOMARCADORES DE NEUROTOXICIDADE – ACHE CEREBRAL E MUSCULAR..	228
3.1.1.1.10.	BIOMARCADOR DE DANO EM PROTEÍNAS – PCO	242
3.1.1.1.11.	BIOMARCADORES DE GENOTOXICIDADE E MUTAGENICIDADE – ENSAIO COMETA, MN E ANE	243
3.1.1.2.	BIOACUMULAÇÃO DE EPTS	247

COMPARTIMENTO 2.....	253
3.1.1.3. ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE	253
3.1.1.3.1. PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO DAS BRÂNQUIAS (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS).....	253
3.1.1.3.2. BIOMARCADORES FISIOLÓGICOS – OSM, ÍONS PLASMÁTICOS, TH, AC BRANQUIAL E RENAL, Na^+/K^+ -ATPASE E H^+ -ATPASE	261
3.1.1.3.3. BIOMARCADORES DE METABOLISMO ENERGÉTICO – GLICOSE E LACTATO PLASMÁTICOS E GLICOGÊNIO MUSCULAR	273
3.1.1.3.4. PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO REPRODUTIVA (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE GÔNADAS)	285
3.1.1.3.5. BIOMARCADORES ENZIMÁTICOS DOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO NO TECIDO BRANQUIAL – SOD, CAT, GPX, GST E GR	285
3.1.1.3.6. BIOMARCADORES ENZIMÁTICOS DOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO NO TECIDO HEPÁTICO – SOD, CAT, GPX, GST E GR.....	297
3.1.1.3.7. BIOMARCADORES NÃO ENZIMÁTICOS NO TECIDO BRANQUIAL – GSH, MT E LPO	308
3.1.1.3.8. BIOMARCADORES NÃO ENZIMÁTICOS NO TECIDO HEPÁTICO – GSH, MT E LPO	319
3.1.1.3.9. BIOMARCADORES DE NEUROTOXICIDADE – ACHE CEREBRAL E MUSCULAR ..	330
3.1.1.3.10. BIOMARCADOR DE DANO EM PROTEÍNAS – PCO	336
3.1.1.3.11. BIOMARCADORES DE GENOTOXICIDADE E MUTAGENICIDADE – ENSAIO COMETA, MN E ANE	337
3.1.1.4. BIOACUMULAÇÃO DE EPTS	341
COMPARTIMENTO 3.....	347
3.1.1.5. ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE	347
3.1.1.5.1. PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO DAS BRÂNQUIAS (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS).....	347
3.1.1.5.2. BIOMARCADORES FISIOLÓGICOS – OSM, ÍONS PLASMÁTICOS, TH, AC BRANQUIAL E RENAL, Na^+/K^+ -ATPASE E H^+ -ATPASE	354

3.1.1.5.3.	BIOMARCADORES DE METABOLISMO ENERGÉTICO – GLICOSE E LACTATO PLASMÁTICOS E GLICOGÊNIO MUSCULAR	367
3.1.1.5.4.	PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO REPRODUTIVA (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE GÔNADAS)	379
3.1.1.5.5.	BIOMARCADORES ENZIMÁTICOS DOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO NO TECIDO BRANQUIAL – SOD, CAT, GPX, GST E GR	379
3.1.1.5.6.	BIOMARCADORES ENZIMÁTICOS DOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO NO TECIDO HEPÁTICO – SOD, CAT, GPX, GST E GR	392
3.1.1.5.7.	BIOMARCADORES NÃO ENZIMÁTICOS NO TECIDO BRANQUIAL – GSH, MT E LPO	405
3.1.1.5.8.	BIOMARCADORES NÃO ENZIMÁTICOS NO TECIDO HEPÁTICO – GSH, MT E LPO ..	417
3.1.1.5.9.	BIOMARCADORES DE NEUROTOXICIDADE – ACHE CEREBRAL E MUSCULAR ..	429
3.1.1.5.10.	BIOMARCADOR DE DANO EM PROTEÍNAS – PCO	437
3.1.1.5.11.	BIOMARCADORES DE GENOTOXICIDADE E MUTAGENICIDADE – ENSAIO COMETA, MN E ANE	438
3.1.1.6.	BIOACUMULAÇÃO DE EPTS	441
3.1.2.	AMBIENTE COSTEIRO	472
	COMPARTIMENTO 4 (ESTUÁRIO)	472
3.1.2.1.	ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE DA ICTIOFAUNA ..	472
3.1.2.1.1.	PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO DAS BRÂNQUIAS (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS)	472
3.1.2.1.2.	PREJUÍZOS ÀS FUNÇÕES FISIOLÓGICAS DE OSMORREGULAÇÃO, RESPIRAÇÃO, EXCREÇÃO E EQUILÍBRIO ÁCIDO-BASE (BIOMARCADORES: OSMOLALIDADE, ÍONS, TEOR HÍDRICO, ATIVIDADE ESPECÍFICA DAS ENZIMAS AC, NAK E H ⁺ -ATPASE).	477
3.1.2.1.3.	PREJUÍZOS AO METABOLISMO ENERGÉTICO (BIOMARCADORES: GLICOSE, GLICOGÊNIO E LACTATO)	485

3.1.2.1.4.	PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO REPRODUTIVA (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE GÔNADAS)	488
3.1.2.1.5.	ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO DOS TECIDOS BRANQUIAL E HEPÁTICO (BIOMARCADORES: CAT, SOD, GPX, GST E GR)	489
3.1.2.1.6.	ALTERAÇÕES EM SISTEMAS NÃO ENZIMÁTICOS BRANQUIAL, HEPÁTICO E MUSCULAR (BIOMARCADORES: GSH, MT, LPO E PCO)	499
3.1.2.1.7.	NEUROTOXICIDADE (BIOMARCADOR: ACHE CEREBRAL E MUSCULAR).....	509
3.1.2.1.8.	CITOGENOTOXICIDADE (BIOMARCADORES: ENSAIO COMETA, MN E ANES) ..	513
3.1.2.2.	ALTERAÇÕES NA CONCENTRAÇÃO DE EPTS (BIOACUMULAÇÃO) EM TECIDOS MUSCULAR E HEPÁTICO (ELEMENTOS AVALIADOS: AG, AL, AS, BA, CD, CE, CO, CR, CU, FE, HG, LA, MN, NI, PB, SB, SE, SN E ZN)	517
3.1.2.3.	ANÁLISE DA BIOACUMULAÇÃO AS ³⁺ E AS ⁵⁺ E DE MEHG EM TECIDO MUSCULAR.....	526
	COMPARTIMENTO 5 (MAR)	529
3.1.2.4.	ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE DA ICTIOFAUNA ..	529
3.1.2.4.1.	PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO DAS BRÂNQUIAS (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE BRÂNQUIAS).....	529
3.1.2.4.2.	PREJUÍZOS ÀS FUNÇÕES FISIOLÓGICAS DE OSMORREGULAÇÃO, RESPIRAÇÃO, EXCREÇÃO E EQUILÍBRIO ÁCIDO-BASE (BIOMARCADORES: OSMOLALIDADE, ÍONS, TEOR HÍDRICO, ATIVIDADE ESPECÍFICA DAS ENZIMAS AC, NAK E H ⁺ -ATPASE).	535
3.1.2.4.3.	PREJUÍZOS AO METABOLISMO ENERGÉTICO (BIOMARCADORES: GLICOSE, GLICOGÊNIO E LACTATO)	552
3.1.2.4.4.	PREJUÍZOS À ESTRUTURA E FUNÇÃO REPRODUTIVA (BIOMARCADOR: HISTOPATOLOGIA DE GÔNADAS)	561
3.1.2.4.5.	ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO BRANQUIAL E HEPÁTICO (BIOMARCADORES: CAT, SOD, GPX E GST)	561
3.1.2.4.6.	ALTERAÇÕES EM SISTEMAS NÃO ENZIMÁTICOS BRANQUIAL, HEPÁTICO E MUSCULAR (BIOMARCADORES: GSH, MT, LPO E PCO)	583
3.1.2.4.7.	NEUROTOXICIDADE (BIOMARCADOR: ACHE CEREBRAL E MUSCULAR).....	606

3.1.2.4.8.	CITOGENOTOXICIDADE (BIOMARCADORES: ENSAIO COMETA, MN E ANES) ..	615
3.1.2.5.	ALTERAÇÕES NA BIOACUMULAÇÃO DE EPTS (ELEMENTOS AVALIADOS: AG, AL, AS, BA, CD, CE, CO, CR, CU, FE, HG, LA, MN, NI, PB, SB, SE, SN E ZN)	622
3.1.2.6.	ANÁLISE DA BIOACUMULAÇÃO AS^{3+} E AS^{5+} E DE MEHG EM TECIDO MUSCULAR.....	632
3.1.2.7.	ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE AS MÉTRICAS ECOTOXICOLÓGICAS E A ABUNDÂNCIA E A RIQUEZA DE ESPÉCIES DE PEIXES CONTINENTAIS.....	664
3.1.2.7.1.	AGRUPAMENTO DE CATEGORIAS DE BIOMARCADORES	665
	BIOMARCADORES FISIOLÓGICOS.....	665
	BIOMARCADORES METABÓLICOS.....	666
	BIOMARCADORES DO SISTEMA ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO EM BRÂNQUIAS	667
	BIOMARCADORES NÃO-ENZIMÁTICOS EM BRÂNQUIAS	669
	BIOMARCADORES DO SISTEMA ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO EM FÍGADO	670
	BIOMARCADORES NÃO-ENZIMÁTICOS EM FÍGADO	672
	BIOMARCADORES RELATIVOS À NEUROTOXICIDADE	673
	IBR GERAL.....	674
3.1.2.7.2.	ATRIBUTOS ECOLÓGICOS.....	675
3.1.2.7.3.	RELAÇÃO ENTRE A SAÚDE ANIMAL E A ABUNDÂNCIA E RIQUEZA DE PEIXES .	678
	SAÚDE ANIMAL X ABUNDÂNCIA.....	678
	SAÚDE ANIMAL X RIQUEZA	680
3.1.2.7.4.	ANÁLISE DE TOXICIDADE COM AMOSTRAS DE ÁGUAS E SEDIMENTOS DA PORÇÃO CONTINENTAL EM EMBRIÕES DE DANIO RERIO (ZEBRAFISH).....	683
	EXPOSIÇÃO À ÁGUA DA PORÇÃO CONTINENTAL	683
	EXPOSIÇÃO AO SEDIMENTO DA PORÇÃO CONTINENTAL.....	686
3.2.	FAUNA SILVESTRE	696
3.2.1.	HERPETOFAUNA.....	696
3.2.1.1.	ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE	699
	ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS (OSMORREGULAÇÃO E METABOLISMO) – BIOMARCADORES: OSM, ÍONS, GLICOSE, LACTATO, PROTEÍNA PLASMÁTICA	699
	ALTERAÇÕES NO SISTEMA ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO – BIOMARCADORES: SOD, CAT, GPX, GST.....	706
	ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS NÃO ENZIMÁTICOS - GSH, MT, LPO	711

GENOTOXICIDADE E MUTAGENICIDADE – COMETA, MICRONÚCLEO, ANES	715
3.2.1.2. ALTERAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DE EPTS	719
3.2.2. HERPETOFAUNA (TARTARUGAS MARINHAS)	740
3.2.2.1. ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU DE SAÚDE	741
ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO – SOD, GPX, GST.....	741
ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS NÃO ENZIMÁTICOS - GSH, MT, LPO	742
3.2.2.2. ALTERAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DE EPTS	745
HEMOLISADO SANGUÍNEO	745
MÚSCULO.....	748
CASCAS DE OVOS	752
3.2.3. AVIFAUNA	761
3.2.4. MASTOFAUNA VOADORA (QUIRÓPTEROS).....	819
3.2.4.1. ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE	825
ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS (OSMORREGULAÇÃO E METABOLISMO) – OSM, ÍONS, GLICOSE, LACTATO, PP	825
ALTERAÇÕES NO SISTEMA ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO – SOD, CAT, GPX, GST	840
ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS NÃO ENZIMÁTICOS - GSH, MT, LPO	849
GENOTOXICIDADE E MUTAGENICIDADE – COMETA, MICRONÚCLEO.	858
3.2.4.2. ALTERAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DE EPTS	863
HEMOLISADO SANGUÍNEO	863
PELOS.....	890
FEZES	918
3.2.5. MASTOFAUNA TERRESTRE DE PEQUENO PORTE (PEQUENOS MAMÍFEROS)	968
3.2.5.1. ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE	972
ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS (OSMORREGULAÇÃO E METABOLISMO) – OSM, ÍONS, GLICOSE, LACTATO E PP.....	972
ALTERAÇÕES NO SISTEMA ANTIOXIDANTE E DE BIOTRANSFORMAÇÃO – CAT, SOD, GPX, GST	988
ALTERAÇÕES NOS SISTEMAS NÃO ENZIMÁTICOS - GSH, MT, LPO	999
GENOTOXICIDADE E MUTAGENICIDADE – ENSAIO COMETA, MICRONÚCLEO	1008
3.2.5.2. ALTERAÇÕES NAS CONCENTRAÇÕES DE EPTS	1014
HEMOLISADO SANGUÍNEO	1014

PELOS.....	1046
FEZES	1075
3.2.6. MASTOFAUNA TERRESTRE DE MÉDIO E GRANDE PORTE	1092
3.2.7. MASTOFAUNA AQUÁTICA (CETÁCEOS)	1122
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	1143
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1145
APÊNDICE A	1185
APÊNDICE B	1189

1. INTRODUÇÃO

A ecotoxicologia (também denominada toxicologia ambiental) é a ciência que estuda os efeitos tóxicos, qualitativos, quantitativos e de modo integrado, de substâncias naturais ou sintéticas sobre organismos vivos animais ou vegetais, aquáticos ou terrestres, incluindo suas interações com o ambiente (TRUHAUT, 1977). Trata-se de uma ciência relativamente nova, reconhecida a partir da década de 60, com vistas tanto ao diagnóstico da qualidade ambiental quanto à avaliação e previsão de impactos ambientais decorrentes da poluição (SISINNO; OLIVEIRA-FILHO, 2013; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014). Esta ciência permite, pela identificação de alterações subletais em diferentes níveis da organização biológica, compreender as causas, os efeitos e os mecanismos de ação de um determinado poluente ou de alterações ambientais sobre o animal, bem como antecipar efeitos subsequentes sobre as populações, comunidades e até mesmo ecossistemas (MOUNEYRAC; AMIARD-TRIQUET, 2013; ZAGATTO; BERTOLETTI, 2014).

Em decorrência da extensão do relatório referente a este tópico, de modo a não segmentar os textos, optou-se por apresentar o presente capítulo a parte, em um volume único. Assim, os textos de Ecotoxicologia, componentes do TOMO I do Relatório de Acompanhamento de Danos, referidos como item 6 do relatório original, serão apresentados integralmente neste documento, intitulado *Ecotoxicologia*. Os apêndices e anexos relativos à temática serão apresentados sequencialmente, neste documento e nos Volumes 1 a 12 deste mesmo tomo.

1.1. POLUIÇÃO AMBIENTAL NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE E OS EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

A poluição ambiental, especialmente nos ambientes aquáticos, tem aumentado sensivelmente em decorrência do crescimento industrial e demográfico, os quais contribuem de modo significativo para as alterações físicas, químicas e biológicas nesses ambientes (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; MAGALHÃES; FERRÃO FILHO, 2008; NIKINMAA, 2014; YANCHEVA et al., 2015; SOUZA-BASTOS et al., 2017). Tais alterações são decorrentes de descargas diretas de fontes de contaminação, como a deposição de efluentes domésticos, agrícolas, industriais; ou por contaminação indireta, quando os contaminantes presentes no solo são carregados aos rios ou infiltrados no lençol freático ou, ainda, quando os mesmos atingem a atmosfera e retornam à água por meio de processos hidrológicos e atmosféricos (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; PORTZ; WOODLEY; CECHE, 2006; NIKINMAA, 2014). Assim, além de uma variedade de espécies químicas (orgânicas e inorgânicas), o ambiente aquático tem acumulado grande quantidade de matéria orgânica, os quais em conjunto são responsáveis pela redução na qualidade da água (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003;

NIKINMAA, 2014) e, conseqüentemente, ameaçam o bem-estar e as condições adequadas ao desenvolvimento e à sobrevivência de organismos que dependem, direta ou indiretamente, destes ambientes (SCOTT; SLOMAN, 2004; PORTZ; WOODLEY; CECH, 2006; LÜRLING; SCHEFFER, 2007; NIKINMAA, 2014; SOUZA-BASTOS et al., 2017).

Em todo o estado de Minas Gerais a atividade extrativo-mineral é bastante característica e histórica, com processos extrativos de ferro (Fe), ouro (Au) e manganês (Mn), principalmente nos municípios que compõem a cabeceira da bacia hidrográfica do rio Doce (HORA et al., 2012; SEGURA et al., 2016; HATJE et al., 2017; MAIA, 2017). Especificamente nos rios do Carmo e Gualaxo do Norte, historicamente impactados por diferentes atividades antrópicas, destaca-se a atividade de garimpo e mineração de ouro, responsáveis pela disponibilização ambiental, em mais de 100 anos de exploração, de grande quantidade de mercúrio (Hg) (HORA et al., 2012; HATJE et al., 2017), além de de outros elementos potencialmente tóxicos (EPTs; elementos persistentes no meio, ou seja, que não se degradam facilmente e que permanecem por longo período de tempo no ambiente), como é o caso do arsênio (As) (COSTA, 2001; BORBA et al., 2004). Tal atividade ainda se fazia presente em vários pontos destes rios quando os mesmos foram atingidos pela onda de rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão (IBAMA, 2015; HATJE et al., 2017; UFVJM, 2017). Adicionalmente, é válido ressaltar que a região do Quadrilátero Ferrífero é reconhecida quanto a presença mineralógica de arsenopirita (FeAsS), composta por, aproximadamente, 45% de arsênio (As) (HORA et al., 2012; HATJE et al., 2017; UFVJM, 2017).

Além disso, toda a extensão desta bacia é caracterizada pela intensa ocupação antrópica, marcada pelo crescimento desordenado, uso inadequado do solo, intensa atividade industrial e minerária, além da agropecuária extensiva, o que contribui para que diferentes danos ambientais assemem os compartimentos ambientais da região, promovendo significativo prejuízo às áreas de mananciais, várzeas e rios (ANDRADE, 2003; ALMEIDA et al., 2004; RAMOS, 2005; BRASIL, 2006; QUEIROZ, 2006; ÁVILA; MONTE-MÓR, 2007; GUIMARÃES, 2007; VAREJÃO, 2008; VIOLA, 2008; MORAIS, 2009; CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010; RHODES, 2010; SILVA, 2010; LIMA E SILVA et al., 2013; CBH-DOCE, 2014; PARREIRAS, 2014a, b; LIMA 2016; QUEIROZ et al., 2017). Devido a isso, a bacia hidrográfica do rio Doce, já era apontada como a mais degradada de Minas Gerais (PARREIRAS, 2014a) apresentando, em toda a sua extensão, diferentes espécies metálicas e semi-metálicas potencialmente tóxicas (EPTs) (revisado em BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017b, item 4.4 ecotoxicologia), dentro dos quais destacavam-se chumbo (Pb), zinco (Zn), cobre (Cu), prata (Ag), arsênio (As) e antimônio (Sb), respectivamente (GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; PALMIERI, 2006; VAREJÃO, 2008; COSTA et al., 2010; RHODES, 2010; SILVA, 2010; RODRIGUES et al., 2014). Assim, os rios que compõem esta bacia hidrográfica funcionam como canais receptores e transportadores de rejeitos e efluentes na região e, desse modo, além de refletirem o uso das águas e do solo de sua bacia de drenagem (BRASIL, 2006;

ÁVILA; MONTE-MÓR, 2007; GUIMARÃES, 2007; VIOLA, 2008; CONSÓRCIO ECOPLAN-LUME, 2010; COSTA et al., 2010; RHODES, 2010; LIMA E SILVA et al., 2013; CBH-DOCE, 2014), contribuem para que grande parte da poluição gerada em um determinado ponto afete outras regiões à jusante (RAMOS, 2005; ÁVILA; MONTE-MÓR, 2007; SOUZA, 2007; VIOLA, 2008; SALES, 2013; RODRIGUES et al., 2014).

Com o rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 5 de novembro de 2015, além dos 44,4 hm³ de rejeito de mineração (minério de ferro) lançados na calha do rio Doce, a força e a velocidade do fluxo de lama causaram erosão nas margens dos rios, revolvimento/remobilização e carregamento dos sedimentos, sendo, deste modo, responsável pela ressuspensão de EPTs e outros contaminantes presentes nos sedimentos e solo dos cursos d'água e áreas afetadas, resultando em uma mistura complexa de contaminantes que atingiram não somente o ambiente aquáticos dulcícola, mas também, os ambientes terrestres, estuarino e marinho integrantes da bacia do rio Doce (IBAMA, 2015; ICMBio, 2015; POEMAS, 2015; DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; FELIPPE et al., 2016; FERNANDES et al., 2016; GOLDER ASSOCIATES, 2016a; SAMARCO, 2016; SEDRU, 2016; SEGURA et al., 2016; SILVA et al., 2016; UFES, 2016a; b; VARGAS et al., 2016; CARMO et al., 2017; GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017; LEONARDO et al., 2017; MAIA, 2017; SARTORI et al., 2017; UFES, 2017; UFVJM, 2017).

Resíduos de minério são particularmente preocupantes, especialmente devido à presença de EPTs em sua composição (HORA et al., 2012; POEMAS, 2015; LOTTERMOSER, 2010 *apud* GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017). EPTs apresentam elevada correlação com a presença de ferro, metal abundante no rejeito (PIRES et al., 2003; JUNCÁ et al., 2017; UFES, 2017), porque este apresenta altos teores de goethita (FeO(OH)) que possui elevada capacidade de complexação, adsorção e retenção de EPTs, denominados siderófilos, tais como o manganês (Mn), o níquel (Ni) e o chumbo (Pb), os quais têm seu potencial tóxico bastante conhecido (COSTA, 2001; PIRES et al. 2003; PEREIRA et al., 2008; SILVA et al., 2016; UERJ, 2016; VERONEZ et al., 2016; JUNCÁ et al., 2017). Do mesmo modo, devido à granulometria (muito fina) destes materiais, a associação de espécies químicas às partículas constituídas, basicamente, de grânulos de silte ou argila, ocorre mais facilmente devido às características de ligações químicas que as mesmas propiciam (PIRES et al., 2003; PUPPIM, 2014; SEGURA et al., 2016; UFES, 2016b; HATJE et al., 2017; JUNCÁ et al., 2017; UFES, 2017). Representando assim, uma grave ameaça para a qualidade da água, sedimentos, solo, organismos aquáticos e terrestres, incluindo pessoas que vivem à jusante de barragens (POEMAS, 2015; GUERRA et al., 2017; HATJE et al., 2017).

Corroborando estas informações, as análises realizadas com o rejeito proveniente da barragem de Fundão indicaram a presença de alguns EPTs como antimônio (Sb), arsênio (As), bário (Ba), chumbo (Pb), cobalto (Co), cromo (Cr), mercúrio (Hg), molibdênio (Mo), níquel (Ni), prata (Ag), alumínio (Al), vanádio (V) e zinco (Zn) em sua composição, embora, em baixas concentrações (GOLDER ASSOCIATES, 2016b; c; revisado em BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017a; 2018b). Do mesmo modo, Silva et

al. (2016) encontraram, em amostras de rejeito coletadas na cidade de Barra Longa, dias após o desastre, elevadas concentrações de ferro (Fe) e manganês (Mn) e baixas concentrações de zinco (Zn), cádmio (Cd), cobre (Cu), chumbo (Pb) e níquel (Ni). Adicionalmente, diferentes estudos têm apresentado evidências sobre a presença de EPTs em vários trechos dos rios do Carmo, Gualaxo do Norte e Doce, tanto em amostras de água quanto de sedimento e solo (CPRM, 2015; ORGANON, 2015; DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; ICMBio, 2016d; GIAIA, 2016; SAMARCO, 2016; SEGURA et al., 2016; GUERRA et al., 2017; MAIA, 2017). Com base nos resultados das análises de água, realizadas desde o desastre, verificou-se que as concentrações de várias espécies químicas ultrapassaram os limites normativos e, até mesmo, das médias históricas descritas para o rio Doce (DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016; SAMARCO, 2016; UFVJM, 2017; revisado em MPF/LACTEC, 2019a). As concentrações foram significativamente altas nos pontos mais próximos ao local do rompimento da barragem (entre 95 e 279 km) com gradativa redução dos valores à medida que a lama foi carregada para a foz do rio Doce (DEAMB/SEMAD/SISEMA, 2016). No entanto, com valores considerados ainda elevados apesar da distância da barragem, da diluição e da retenção de grande quantidade de rejeito ao longo de toda a extensão do rio Doce (HATJE et al., 2017), uma vez que este foi transportado ao longo de 17 dias e depositado pelo caminho em diferentes ambientes e concentrações (FERNANDES et al., 2016). É válido ressaltar que a deposição de lama, ao longo de toda a extensão percorrida pela mesma, acometeu ambientes terrestres adjacentes aos ambientes aquáticos promovendo a supressão da vegetação florestal, alteração na composição e resistência do solo, soterramento de diversas espécies de fauna pouco móveis, afugentamento de outras espécies de maior mobilidade, entre outros (conforme descrito ao longo de todos os tomos do diagnóstico).

No dia 21 de novembro de 2015, a lama de rejeitos chegou à foz do rio Doce. O material que atingiu esta região foi caracterizado como muito fino, seguindo o mesmo padrão descrito para o material encontrado na calha do rio Doce (SEGURA et al., 2016; UFES, 2016a; b; HATJE et al., 2017; JUNCÁ et al., 2017; UFES, 2017), no entanto, com características bastante diferentes do material que normalmente ocorre na foz do rio Doce, mesmo em épocas de cheia (UFES, 2016 a; b; UERJ, 2016; UFES 2017). Assim como identificado na porção continental, houve aumento nas concentrações totais de EPTs em amostras de água e sedimentos coletadas na foz do rio Doce (FAURG, 2016a; b; GOLDER ASSOCIATES, 2016a; IBAMA, 2016; ICMBio, 2016 a; b; d; f; NETO et al., 2016; UFES, 2016 a; b; 2017). Nas amostras de água houve aumento nas concentrações dos elementos arsênio (As), alumínio (Al), bário (Ba), ferro (Fe), cádmio (Cd), cromo (Cr), chumbo (Pb), cobre (Cu), manganês (Mn), níquel (Ni), vanádio (V) e zinco (Zn) (FAURG a; b; GOLDER ASSOCIATES, 2016a; ICMBio, 2016 a; b; d; f; NETO et al., 2016; UFES, 2016 a; b; 2017). Nas amostras de sedimento houve aumento nas concentrações de Al, As, Ba, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni e Zn (ICMBio, 2016b; UFES, 2016 b; 2017). Segundo pesquisadores da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES, 2016 a; b; 2017), este aumento pode ser resultado do

sinergismo das diferentes alterações que aconteceram em toda a extensão do rio Doce e região costeira adjacente em decorrência da passagem da lama como, por exemplo, alterações em processos de adsorção e dessorção, os quais regulam a mobilidade desses elementos em ambientes aquáticos. Assim, os resultados apresentados sugerem que a ocorrência do evento provocou a mobilização significativa de EPTs não associados a atividade de mineração, bem como elevou os níveis daqueles diretamente relacionados a esta atividade (FAURG, 2016 b; ICMBio, 2016 a; b; d; f; UFES, 2016 a; b; RRDM, 2019) em todos os ecossistemas afetados pelo desastre.

Todos estes compostos contribuem para diferentes alterações na dinâmica das regiões afetadas, sejam elas alterações físicas, químicas ou biológicas como, por exemplo, alterações nas comunidades fito e zooplânctônica e, conseqüentemente, em toda a cadeia alimentar (IBAMA, 2016; ICMBio, 2016f; UFES, 2016 a; b; 2017, RRDM, 2019), ou ainda, aumento no crescimento de determinadas algas, produtoras de toxinas, devido a elevada disponibilidade de Fe e de nutrientes, as quais podem contribuir para alterações nos diferentes ecossistemas da região afetada (ICMBio, 2016f; 2017; UFES, 2017). Do mesmo modo, contribuem para bioacumulação de EPTs em organismos da biota aquática (e.g., zooplâncton, moluscos, crustáceos e peixes) (ECONSERVATION, 2016; FAURG, 2016a; b; ICMBio 2016 a; b; d; e; f; SAMARCO, 2016; RRDM, 2019) e semi-aquática (anfíbios; JUNCÁ et al., 2017) da região e, para a geração de alterações ecotoxicológicas prejudiciais à saúde destes organismos (FAURG, 2016a; ICMBio, 2016 a; b; d; e; f, JUNCÁ et al., 2017; RRDM, 2019).

Apesar da Samarco (2016) indicar que o rejeito não apresentava riscos à biota, saúde humana, bem como, não liberava espécies químicas que pudessem contaminar o meio ambiente, a lama de rejeitos, em associação com a elevada carga de sedimentos e outros elementos carreados ao longo do rio Doce, causou a morte de inúmeras espécies de peixes, muitas delas endêmicas da bacia do rio Doce (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017b; 2018a), além de animais domésticos que beberam a água do rio contaminado nas cidades de Periquito e Barra Longa, em Minas Gerais (FELIPPE et al., 2016), bem como, de outras espécies que direta ou indiretamente dependiam da água do rio Doce (IBAMA, 2015; ICMBio, 2015; POEMAS, 2015; LEONARDO et al., 2017). Além disso, estudos indicam que devido ao vasto período de permanência e a ação dos elementos presentes no material e na área acometida pelo desastre, os ecossistemas demandarão extenso tempo de recuperação, o qual poderá variar entre décadas a cerca de um século (POEMAS, 2015; FELIPPE et al., 2016; FERNANDES et al., 2016). Neste sentido, buscou neste estudo conhecer os efeitos do rejeito extravasado após o rompimento da barragem de Fundão sobre a biota através da análise de diferentes biomarcadores, determinados em diferentes tecidos dos organismos da ictiofauna e fauna silvestre capturados nos ambientes atingidos.

1.2. CARACTERÍSTICAS E EFEITOS DOS EPTS ENCONTRADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE

Os EPTs são encontrados normalmente em baixas concentrações no ambiente aquático (GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; SOUZA et al., 2015; YANCHEVA et al., 2015; LIMA, 2016; MAIA, 2017), mesmo na bacia hidrográfica do rio Doce, a qual está inserida em uma região reconhecidamente rica em minérios (RAMOS, 2005; RHODES, 2010; SILVA, 2010; RODRIGUES et al., 2014; LIMA, 2016). No entanto, os mesmos podem ser inseridos ao ambiente aquático por meio de diferentes atividades antropogênicas, principalmente as industriais e de mineração, mas, também, pelo escoamento superficial de águas das chuvas, emissão de gases por chaminés ou fontes difusas (como veículos automotivos, por exemplo), esgotos domésticos e industriais não tratados, etc., as quais contribuem significativamente para aumentar as concentrações destes contaminantes (FERREIRA, 2003; JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; RHODES, 2010; SILVA, 2010; RODRIGUES et al., 2014; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; SOUZA et al., 2015; FAURG, 2016 a; ICMBio, 2016d; HATJE et al., 2017), assim como vem sendo evidenciado na bacia hidrográfica do rio Doce (ANDRADE, 2003; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; ARANTES et al., 2009; MORAIS, 2009; ANDRADE et al., 2010; RHODES, 2010; SILVA, 2010; RODRIGUES et al., 2014; LIMA, 2016; MAIA, 2017).

A denominação 'metais pesados' é comumente utilizada para os elementos metálicos com densidade maior que cinco e massa atômica maior que 40 (PASCALICCHIO, 2002), sendo estes normalmente tóxicos. Para evitar conflitos técnicos e de nomenclatura, as espécies metálicas estão sendo tratadas neste relatório como Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs). Estão inseridos nesta denominação elementos como o As, Al, Cd, Hg, Ni, Pb e urânio (U) (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; EISLER, 2000). Assim como os metais essenciais (ou seja, importantes para a fisiologia e como constituintes de organismos vivos) como cobalto (Co), cobre (Cu), cromo (Cr), manganês (Mn), selênio (Se), ferro (Fe) e zinco (Zn) os quais também podem ser considerados tóxicos, uma vez que em elevadas concentrações podem causar diferentes alterações aos organismos (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; NRIAGU, 1988; EISLER, 2000; ANDRADE, 2003; FERREIRA, 2003; JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; SOUZA, 2007; VAREJÃO, 2008; MORAIS, 2009; SILVA, 2010; SALES, 2013; MAIA, 2017).

No ambiente aquático estes EPTs passam por diferentes transformações químicas, especialmente complexação com outros elementos e substâncias presentes na coluna d'água, podendo ser transportados pelos materiais particulados em suspensão ou depositados gradualmente nos sedimentos de fundo, em decorrência da redução da velocidade da corrente de água (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; CHAPMAN et al., 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006;

SOUZA, 2007; VAREJÃO, 2008; RHODES, 2010; SILVA, 2010; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; SOUZA et al., 2015; IBAMA, 2016). Ao serem incorporados aos sedimentos, os mesmos tornam-se menos biodisponíveis, ou seja, quando em fase aquosa os EPTs são mais facilmente absorvidos pelos organismos. No entanto, é válido ressaltar que o sedimento é um compartimento ativo no meio, e qualquer alteração físico-química pode promover não somente o acúmulo de elementos, mas, também, a reposição, redistribuição e biodisponibilização para a coluna d'água e, conseqüentemente, à biota aquática (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; BEVILACQUA, 1996; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; SARMIENTO et al., 2011; SALES, 2013; PUPPIM, 2014; SOUZA et al., 2015; FERNANDES et al., 2016; IBAMA, 2016; MAIA, 2017; JUNCÁ et al., 2017), atuando como fonte potencial de poluição difusa no ambiente aquático (SILVA, 2010).

Mudanças nos padrões de concentração dos EPTs nos corpos hídricos têm impactos significativos à biota (PUPPIM, 2014). No entanto, a presença de um contaminante no ambiente aquático, não significa que o mesmo irá produzir danos aos organismos que ali habitam (VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; FAURG, 2016a; ICMBio, 2016d), pois, a potencialidade tóxica destes sobre a biota aquática é dependente não somente da sua concentração química no meio, mas, da forma como estão fixados, das condições abióticas, do tempo e nível de exposição, da rota de absorção (oral, cutânea, branquial), da capacidade absorptiva e de defesa dos organismos e, também, de como a sua especificidade química afeta a distribuição deste no organismo (ANDRADE, 2003; GUILHERME et al., 2005; RAMOS, 2005; QUEIROZ, 2006; VAREJÃO, 2008; MORAIS, 2009; RHODES, 2010; PEREIRA et al., 2010; SOUZA et al., 2015; YANCHEVA et al., 2015; FAURG, 2016a; ICMBio, 2016d). Porém, é incontestável que diferentes compartimentos ambientais têm capacidade limitada para receber EPTs sem que os mesmos promovam toxicidade (FÖRSTNER; WITTMANN, 1981; NRIAGU, 1988).

Os efeitos agudos destes elementos ocorrem rapidamente, são claramente definidos, geralmente fatais e raramente reversíveis. Os efeitos crônicos ou subletais levam ao comprometimento orgânico-funcional de todo o organismo, com alterações em funções osmorregulatórias, bioquímicas, comportamentais, entre outras (ANDRADE, 2003; JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; QUEIROZ, 2006; MORAIS, 2009; FERNANDES et al., 2016; FAURG, 2016a; IBAMA, 2016; ICMBio, 2016d). De modo geral, estes elementos têm a capacidade de interferir no funcionamento orgânico de diferentes maneiras, especialmente em reações enzimáticas de todo o organismo. Por possuírem grande afinidade por moléculas que contenham átomos de nitrogênio (N) e enxofre (S), ligam-se facilmente às proteínas e às macromoléculas celulares, bloqueando, deslocando o íon essencial ou alterando a estrutura ativa das biomoléculas (ANDRADE, 2003; JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; QUEIROZ, 2006; MORAIS, 2009). Além disso, devido à baixa mobilidade apresentada por estes elementos, os mesmos podem ser facilmente acumulados. Também, estes se ligam covalentemente a átomos de carbono (C) em grupos orgânicos como, o metil (-CH₃), por

exemplo, originando compostos organometálicos, que quando neutros tendem a ser lipossolúveis e, portanto, atravessam facilmente as membranas biológicas atingindo, conseqüentemente, vários compartimentos orgânicos e interferindo no funcionamento de todo o organismo.

Está bem documentado na literatura que animais que vivem em ambientes aquáticos quimicamente poluídos irão, cedo ou tarde, bioconcentrar/bioacumular parte destes poluentes (YANCHEVA et al., 2015; FAURG, 2016a; ICMBio, 2016d). Como estes organismos acumulam estes e outros contaminantes em concentrações superiores às encontradas nos demais compartimentos do ambiente (água e sedimento), inclusive mesmo quanto estes compartimentos possuem teores desses compostos abaixo da concentração máxima permitida pela legislação. Deste modo, concentrações menores que as legisladas para a coluna d'água e sedimento não indicam ausência de absorção e efeitos dos mesmos sobre a biota. Pois, ao serem absorvidos e, conseqüentemente, acumulados pelos organismos, atingem níveis altamente tóxicos e, até mesmo, fatais (NIENCHESKI et al., 2014; YANCHEVA et al., 2015; CABRAL; RISSO; MARTINEZ, 2018).

É válido ressaltar que muitos destes EPTs podem atingir altas concentrações na biota devido ao seu aumento progressivo ao longo dos diferentes níveis da cadeia trófica. Nesta condição, denominada de biomagnificação, os organismos que se posicionam no topo da cadeia alimentar apresentariam concentrações mais elevadas e tóxicas destes elementos. Além disso, como organismos aquáticos atuam na dinâmica de ciclagem desses elementos nos ecossistemas, eles favorecem a exportação entre os ambientes aquáticos e terrestres, via cadeia alimentar, ampliando o risco humano à contaminação (ANDRADE, 2003; JOYEUX; CAMPANHA FILHO; JESUS, 2004; MORAIS, 2009; NIENCHESKI et al., 2014; YANCHEVA et al., 2015; FERNANDES et al., 2016). Deste modo, o conhecimento sobre a concentração, a mobilidade, a disponibilidade, a bioacumulação e os efeitos destes elementos são de extrema importância para caracterização dos riscos, dos impactos e dos danos causados pelos mesmos ao ecossistema. Adicionalmente, devido ao tempo de permanência no ambiente e a forma como estes elementos se comportam ao longo da cadeia trófica, o seu estudo passa, também, a apresentar relevância quanto ao acúmulo no ambiente, recursos pesqueiros e, conseqüentemente, à saúde humana.

1.3. BIOINDICADORES E BIOMARCADORES – FERRAMENTAS PARA A AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO DESASTRE

Bioindicadores são organismos ou sistemas biológicos que respondem a alterações ambientais a partir da modificação de suas funções vitais normais e/ou de sua composição química refletindo, deste modo, a situação ambiental vigente (VAN GESTEL; VAN BRUMMELEN, 1996; WENDELAAR BONGA, 1997; VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; YANCHEVA et al., 2015). Essas respostas

detectáveis, denominadas biomarcadores, são manifestadas em componentes moleculares, celulares, processos, estruturas e funções de tecidos, órgãos e sistemas orgânicos e são utilizadas para indicar exposição, efeito e/ou susceptibilidade de um organismo ao fator estressor. Os biomarcadores são classificados em moleculares, genéticos, bioquímicos, fisiológicos, comportamentais ou estruturais e são quantificados nos organismos ou em seus tecidos e fluidos corpóreos (DEPLEDGE, 1995; VAN GESTEL; VAN BRUMMELEN, 1996; WENDELAAR BONGA, 1997; VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; MAGALHÃES; FERRÃO FILHO, 2008; NIKINMAA, 2014; YANCHEVA et al., 2015).

Os biomarcadores fornecem informações biológicas da exposição dos organismos a contaminantes ambientais mesmo que a baixas concentrações e por um curto período de tempo. Assim, a capacidade estressora ou a toxicidade de um determinado composto pode ser determinada de acordo com as disfunções causadas pelo mesmo ao organismo ou as suas funções celulares. Deste modo, servem satisfatoriamente como indicadores de alterações subletais, permitindo uma melhor compreensão dos efeitos da poluição sobre o animal, bem como antecipando efeitos subsequentes sobre as populações e as comunidades dos ecossistemas impactados. Sendo assim, e, em conjunto com a avaliação química da qualidade da água e sedimentos (que identificam e quantificam as substâncias presentes em amostras ambientais), são considerados indispensáveis para a avaliação da poluição hídrica, tornando-se um importante instrumento não só para a avaliação da qualidade da água, mas, também, para o entendimento da dinâmica do sistema e para as escolhas de medidas de manejo e de recuperação de um determinado ecossistema (VAN GESTEL; VAN BRUMMELEN, 1996; WENDELAAR BONGA, 1997; VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; MAGALHÃES; FERRÃO FILHO, 2008; NIKINMAA, 2014; YANCHEVA et al., 2015).

Os peixes, vertebrados mais diversos e abundantes na Terra (NELSON, 2006; YANCHEVA et al., 2015), são totalmente dependentes da qualidade da água para sua sobrevivência. Os mesmos estão cada vez mais sujeitos a águas contaminadas ou de baixa qualidade, nos mais variados habitats (de água doce, estuarino e marinho) em que se distribuem e, em diferentes estágios do seu ciclo de vida (e.g. EVANS, 1987; EVANS; PERMARINI; CHOE, 2005; YANCHEVA et al., 2015; CARPENÈ; ANDREANI; ISANI, 2017). Devido a esta exposição, abundância, diversidade e ao vasto conhecimento das respostas fisiológicas e bioquímicas desses organismos, os peixes têm sido cada vez mais utilizados como bioindicadores em estudos de avaliação dos efeitos decorrentes da contaminação e da alteração na qualidade da água. Essa relevância se torna ainda maior pelo fato destes interagirem em diversos níveis tróficos da cadeia biológica apresentando, assim, grande importância ecológica (e.g. WENDELAAR BONGA, 1997; VAN DER OOST; BEYER; VERMEULEN, 2003; YANCHEVA et al., 2015; CARPENÈ; ANDREANI; ISANI, 2017).

Apesar de não serem tão comuns como os que empregam peixes, estudos que utilizem organismos da fauna silvestre como bioindicadores ambientais, nos mais diferentes habitats que se

distribuem, estão em ascensão (FERREIRA, 2003; MATEO et al., 2006; MILLÁN et al., 2008; BRAIT; FILHO; FURTADO, 2009; ANZOLIN, 2011; GONÇALVES et al., 2012; WEIJS; ZACCARONI, 2016; CARPENÈ; ANDREANI; ISANI, 2017; SILVA et al., 2018; VIDAL et al., 2018). Animais selvagens também são frequentemente expostos a poluentes, advindos de diversas atividades antropogênicas, que são absorvidos de diferentes formas por estes organismos (MATEO et al., 2006; MILLÁN et al., 2008; BRAIT; FILHO; FURTADO, 2009). Assim, vários grupos da fauna terrestre vêm sendo utilizados como indicadores de contaminação ambiental, especialmente por metais pesados (SMITH et al., 2007; MARQUES et al., 2008). Nesse contexto, espécies carnívoras, presumivelmente mais suscetíveis à bioacumulação, e herbívoras são utilizadas como sentinelas em áreas afetadas por atividades industriais ou acometidas por desastres ambientais, e diversos biomarcadores são aplicados nessas pesquisas (MATEO et al., 2006; MILLÁN et al., 2008), indicando que há sensibilidade de vários desses métodos à avaliação de danos. Porém, devido a aspectos éticos, protetivos e legislativos, os estudos com estes organismos, na maioria das vezes, empregam metodologias de amostragem minimamente ou não invasivas, sendo avaliadas, portanto, amostras de sangue, fezes, urina, pelos, pele e penas (e.g., FERREIRA, 2003; FOSSI et al., 2004; BRAIT; FILHO; FURTADO, 2009; ANZOLIN, 2011; DEBÉN et al., 2012; GUPTA; BAKRE, 2013; LODENIUS; SOLONEN, 2013; ESTRADA-GUERRERO; SOLER-TOVAR, 2014; WEIJS; ZACCARONI, 2016), exatamente como adotado pelo LACTEC no presente estudo.

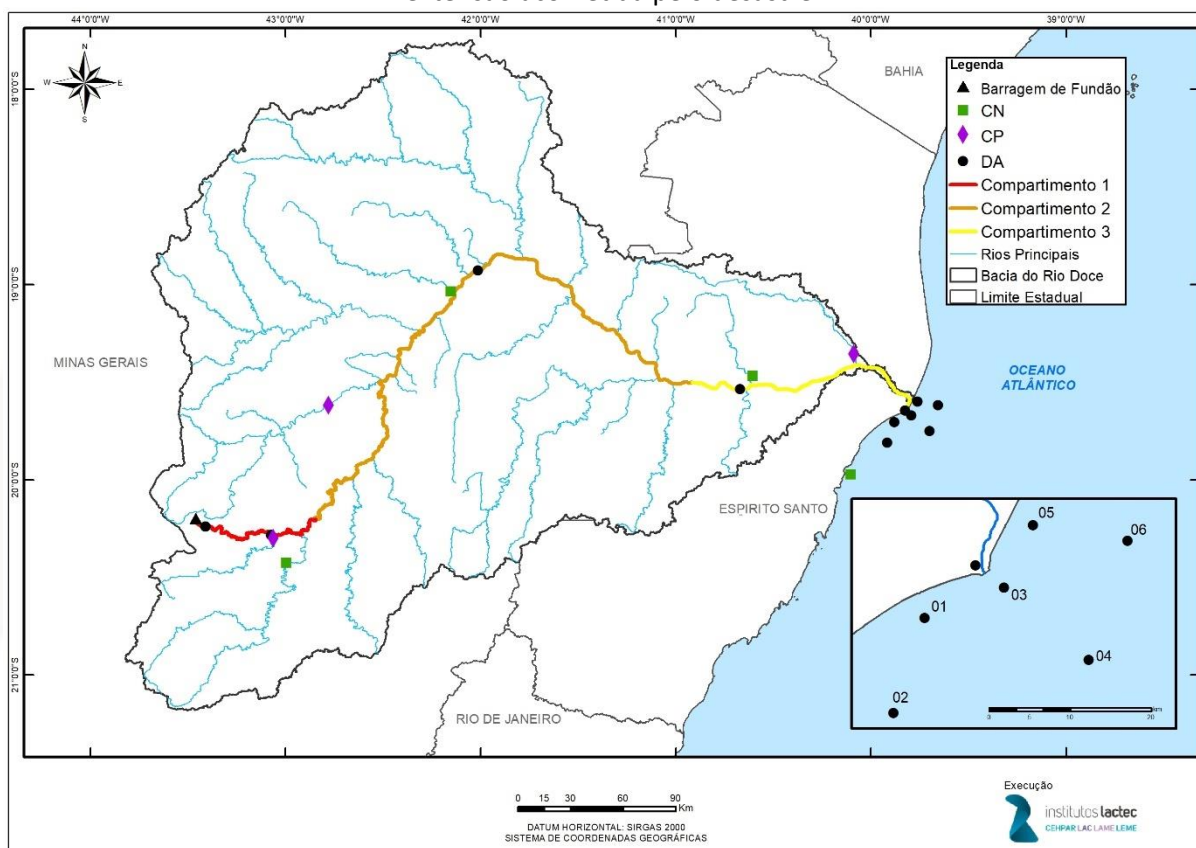
2. METODOLOGIA

2.1. PEIXES

2.1.1. PONTOS AMOSTRADOS

Foram definidos para amostragem 18 pontos ao longo de toda a extensão da área de passagem e deposição da lama (APDL), sendo: dez (10) pontos na porção continental, dois (2) pontos na região estuarina e seis (6) pontos na região marinha (Figura 1; Tabela 1). Os pontos da porção continental foram distribuídos nos três (3) compartimentos da bacia do rio Doce, ou seja, compartimentos 1, 2 e 3, de modo a percorrer toda a extensão acometida pelo desastre. Em cada um dos três compartimentos foram estabelecidos três pontos, os quais foram escolhidos de modo a contemplar um local dentro da APDL, ou seja, onde ocorreu a passagem e/ou deposição da lama (aqui denominado, simplesmente, DA); um ponto controle negativo (CN, livre de possíveis interferentes antrópicos diretos) e um controle positivo (CP). Foram considerados como controle positivo ambientes que além de degradados por fontes de contaminação antrópica apresentavam problemas de deterioração ou alteração das condições ambientais, aproximando-se das características locais previamente descritas para a região (BRASIL (MPF)/LACTEC, 2017b, item 4.4. ecotoxicologia). Especificamente no compartimento 1, foram amostrados 4 pontos, ou seja, um ponto DA, um ponto CP, um ponto CN e o Dique S4 (DQ), também considerado dentro da APDL, mas com populações de peixes relativamente recém constituídas, uma vez que o Dique, que corresponde a uma medida emergencial de contenção de sedimentos do Complexo Minerário de Germano, foi construído apenas no ano de 2016. Na região estuarina foram selecionados dois pontos, sendo um ponto considerado dentro da área afetada pela passagem ou deposição da lama, localizado exatamente na foz do rio Doce (compartimento 4) e um ponto considerado como não contaminado (ou controle) situado na foz do estuário do rio Piraquê-Açu. Na porção marinha (compartimento 5) foram selecionados seis pontos, sendo três pontos próximos a região costeira (5 km da costa), onde ficou a maior concentração da pluma de rejeitos e, três pontos afastados cerca de 20 km da costa, onde ficou acumulado uma menor concentração da pluma (Figura 1). A distância entre os três pontos em cada um dos raios (5 ou 20 km) é de 10 km. Todas as coordenadas geográficas dos pontos amostrados são apresentadas na Tabela 1.

Figura 1. Mapa da localização dos pontos de amostragem de ecotoxicologia ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre



CN – Controle Negativo (quadrado verde); CP – Controle Positivo (losango roxo) e DA – Dentro da APDL (círculo preto)

Tabela 1. Descrição e coordenadas dos pontos de amostragem de ecotoxicologia nas regiões continental, estuarina e marinha

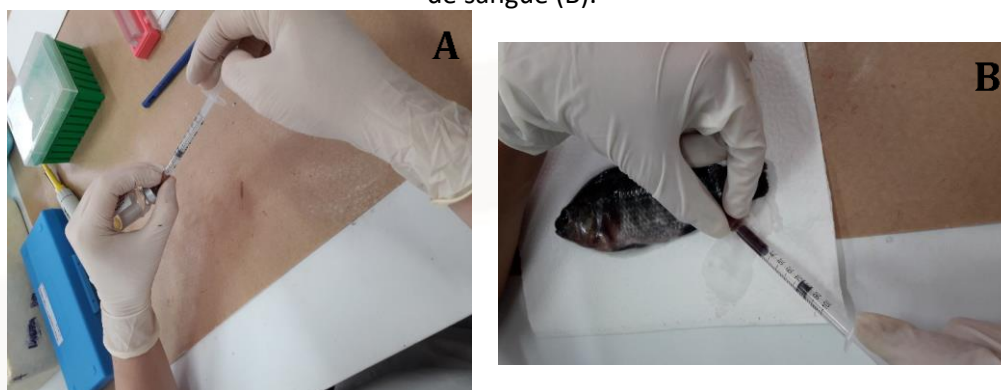
Regiões	Compartimento	Localização ponto	Característica do Ponto	Coordenadas (latitude/longitude – SIRGAS2000)
Continental	1	Rio Piranga	Controle Negativo	20°25'39.61" S/ 42°55'14.27" W
Continental	1	Rio do Carmo	Controle Positivo	20°17'50.53" S/43°4'25.46" W
Continental	1	Dique S4	Dentro da APDL	20°14'21.39" S/43°24'41.09" W
Continental	1	Rio Gualaxo	Dentro da APDL	20°17'7.79" S/43°4'43.71" W
Continental	2	Rio Corrente Grande	Controle Negativo	19°02'05.04" S/42°09'09.46" W
Continental	2	Rio Piracicaba	Controle Positivo	19°36'56.03" S/ 42°46'50.81" W
Continental	2	Doce-Gov.Valadares	Dentro da APDL	19°0'59.79" S/42°7'5.22" W
Continental	3	Rio Pancas	Controle Negativo	19°28'27.99" S/ 40°36'48.97" W
Continental	3	Rio Pequeno	Controle Positivo	19°22'28.31" S/40°4'43.63" W
Continental	3	Doce-Colatina	Dentro da APDL	19°30'37.95" S/40°36'35.21" W
Estuarina	-	Foz do Piraquê-Açú	Controle Negativo	19°57'18.35" S/40°10'15.56" W
Estuarina	4	Foz do rio Doce	Dentro da APDL	19°38'22.08"S/39°49'1.16" W
Marinha	5	Ponto 1 - 5 km da costa	Dentro da APDL	19°42'09.74" S/39°52'46.55" W
Marinha	5	Ponto 3 - 5 km da costa	Dentro da APDL	19°40'07.63" S/39°47'30.91" W
Marinha	5	Ponto 5 - 5 km da costa	Dentro da APDL	19°35'58.19" S/39°45'34.08" W
Marinha	5	Ponto 2 - 20 km da costa	Dentro da APDL	19°48'28.70" S/39°54'52.50" W
Marinha	5	Ponto 4 - 20 km da costa	Dentro da APDL	19°44'57.23" S/39°41'50.91" W
Marinha	5	Ponto 6 - 20 km da costa	Dentro da APDL	19°37'00.51" S/39°39'17.11" W

2.1.2. OBTENÇÃO, PROCESSAMENTO E ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS

As amostragens de peixes para análises ecotoxicológicas foram realizadas juntamente com as amostragens de ictiologia, ou seja, em alguns dos pontos amostrados pela equipe de ictiologia e seguindo o mesmo protocolo e petrechos, adequados ao ambiente e tamanho dos indivíduos (para maiores detalhes ver dados de Ictiologia, item 2.5 do TOMO II do presente relatório de Acompanhamento de Danos). Esforço adicional de captura, através de pesca com vara, foi empregado para complementação do número amostral e/ou para obtenção de espécies de nível trófico específico. A classificação dos níveis tróficos/hábitos alimentares dos espécimes capturados para avaliação ecotoxicológica foi baseada na análise do conteúdo estomacal realizada (dados primários). Para maiores detalhes ver dados de Ictiologia, item 2.5 do TOMO II do presente relatório de Acompanhamento de Danos.

Após captura, os animais foram acondicionados em caixas plásticas e mantidos com água do local de coleta, sob aeração constante, protegidos do sol ou chuva, até o momento das amostragens de sangue e tecidos. A água das caixas de manutenção foi substituída com frequência, de modo a evitar a deterioração da mesma e, conseqüentemente, da saúde dos organismos. Foram amostrados, sempre que possível, 10 indivíduos de três espécies pertencentes a três diferentes níveis tróficos (n total = 30 por ponto). Para isso, os animais foram individualmente anestesiados (total ausência de reações e estímulos de toque), por aproximadamente 2 min, em um balde contendo água do local de coleta acrescido de anestésico (benzocaína 5%). Em seguida os animais foram medidos (comprimento total), pesados (peso total) e tiveram sangue retirado através de punção da veia caudal com seringas de insulina heparinizadas (heparina sódica, Hemofol®) (Figura 2). Este material foi acondicionado em microtubos, teve uma alíquota (10 μ l) imediatamente transferida para um tubo criogênico contendo 1 mL de tampão de criopreservação (BONY et al., 2008; SANTOS et al., 2016), o qual em seguida, foi congelado em nitrogênio líquido de modo a garantir a viabilidade da amostra para o ensaio de avaliação de dano ao DNA (ou ensaio cometa, COM). Duas outras alíquotas (5 μ l cada) foram utilizadas para a preparação de extensões sanguíneas, em duplicada, necessárias às análises de micronúcleos (MN) e demais alterações nucleares em eritrócitos (ANEs). O restante do sangue foi centrifugado (10 min, 3.000 rpm, temperatura ambiente) para a obtenção do plasma, o qual foi imediatamente transferido para tubos criogênicos e congelado em nitrogênio líquido, onde foram mantidos até a chegada ao laboratório nos Institutos LACTEC, em Curitiba.

Figura 2. Heparinização da seringa para coleta de sangue (A); Punção caudal do peixe para obtenção de sangue (B).



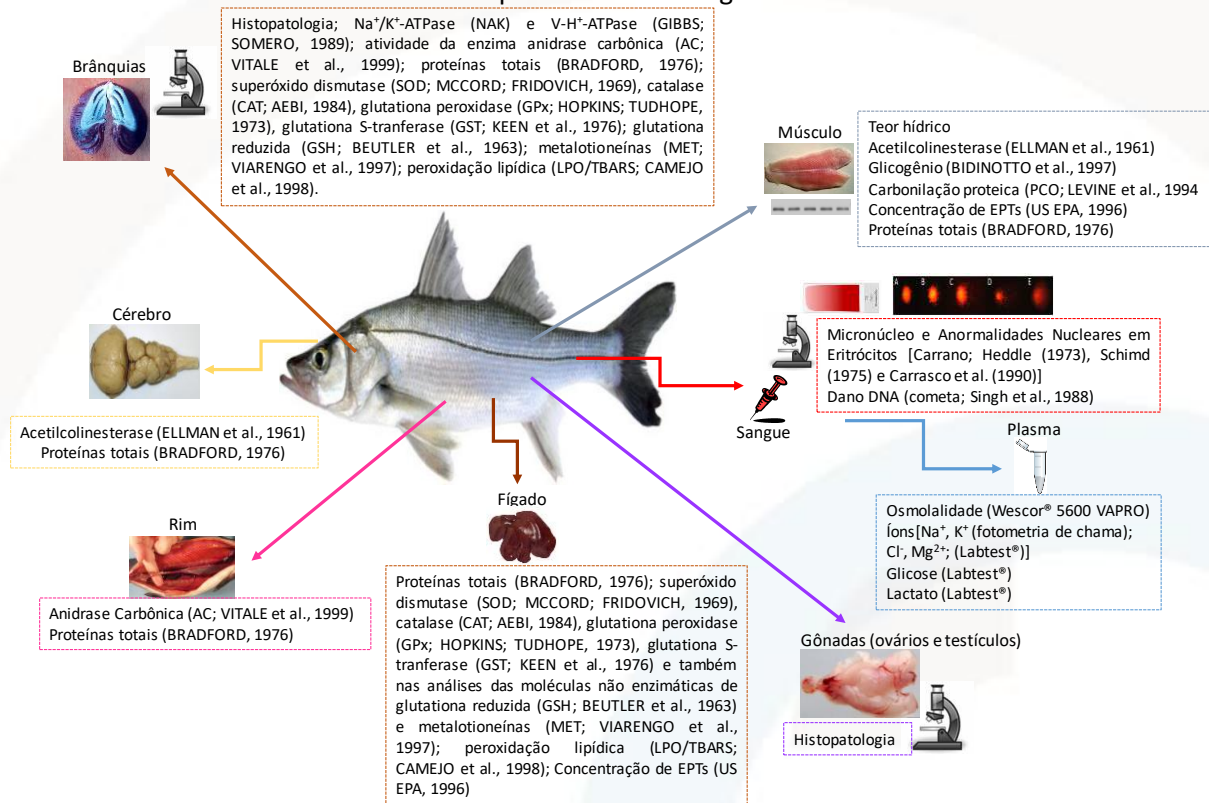
Fonte: LACTEC

Imediatamente após amostragem de sangue, os animais foram rapidamente eutanasiados (conforme previsto na portaria CFBio 148/2012) e tiveram suas cavidades opercular, cranial e abdominal abertas para identificação do sexo e remoção de tecidos (brânquias, rim, fígado, gônadas, cérebro e músculo), necessários às diferentes análises histológicas, fisiológicas, químicas e bioquímicas. O segundo arco branquial direito e as gônadas (ovários e testículos) foram imediatamente acondicionados em frascos plásticos, contendo aproximadamente 5 mL de solução de formaldeído 10%, onde foram mantidos, sob temperatura ambiente, até o final das amostragens (aproximadamente 30 dias). Os demais tecidos foram rapidamente acondicionados em tubos criogênicos e, em seguida, congelados em nitrogênio líquido onde foram mantidos até a chegada ao laboratório nos Institutos LACTEC, em Curitiba.

No destino, as amostras de sangue criopreservadas foram imediatamente processadas para a análise de dano ao DNA (ensaio cometa). As lâminas com extensões sanguíneas foram analisadas quanto à presença de micronúcleos (MN) e demais alterações nucleares em eritrócitos (ANEs). As amostras de plasma foram transferidas para freezer -20° C onde foram mantidas até a realização das análises de osmolalidade, íons (Na^+ , K^+ , Cl^- , Mg^{2+}), glicose e lactato. As amostras de tecidos fixadas em formaldeído 10% foram processadas para as análises histopatológicas. As demais amostras de tecidos foram transferidas para ultrafreezer (-80° C), onde foram mantidas até o momento da realização das análises de determinação das atividades específicas das enzimas Na^+/K^+ - ATPase (NAK) e V-H^+ -ATPase (brânquias); anidrase carbônica (AC) (brânquias e rins); superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione peroxidase (GPx), glutathione S-transferase (GST); das moléculas não enzimáticas de glutathione reduzida (GSH) e metalotioneínas (MT); da peroxidação lipídica (LPO/TBARS) (brânquias e fígado); da concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) (fígado e músculo), teor de hidratação (TH), glicogênio e carbonilação proteica (músculo); atividade da acetilcolinesterase (AChE,

músculo e cérebro); e da concentração de proteínas totais (PT, brânquia, rim, fígado, músculo e cérebro), conforme resumido na Figura 3.

Figura 3. Esquema dos biomarcadores avaliados nos diferentes tecidos dos peixes amostrados e suas respectivas metodologias



Fonte: LACTEC

2.1.3. ANÁLISES DAS AMOSTRAS

2.1.3.1. ANÁLISES SANGUÍNEAS

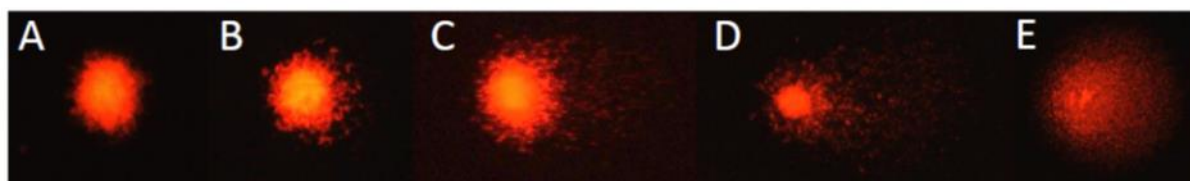
Análise de danos no DNA – ensaio de cometa

O ensaio alcalino do cometa foi realizado de acordo com Singh et al. (1988). Apenas as amostras que apresentaram viabilidade celular superior a 80%, determinada através do método de exclusão por azul de Trypan, foram utilizadas no ensaio. Este consistiu na homogeneização de 10 μL de cada amostra em 120 μL de agarose de baixo ponto de fusão (LMP) que, em seguida, foi dispensada em lâminas previamente cobertas com agarose normal, recoberta com lamínula e colocada na geladeira por 50 min. Posteriormente, as lamínulas foram retiradas e as lâminas submetidas às seguintes etapas: a) lise: 2 h, a 4° C, protegido da luz, em solução de lise (NaCl 2,5 M, EDTA 100 mM, Tris 10 mM, DMSO 10%, Triton X-100 1%, N-lauril sarcosinato 1%, pH 10,0); b) desnaturação do DNA: 30 min, no escuro, em tampão de eletroforese (NaOH 0,3 N, EDTA 1 mM, pH >13); c) eletroforese: 20 min, 300 mA, 25 V, 1 V cm^{-1} ; d) neutralização: três lavagens de 5 min com tampão (0,4 M Tris, pH 7,5).

As lâminas foram fixadas com etanol absoluto por 10 min e acondicionadas em geladeira até o momento das análises. Para as análises, as lâminas foram coradas com GelRed (Uniscience®) e cobertas com lamínula.

Foram analisados 100 nucleóides por animal, por meio de teste cego, em microscópio de fluorescência na objetiva de 40x. Os danos no DNA foram classificados visualmente, considerando o tamanho da cauda do cometa, em 4 classes: a) classe 0 = sem dano aparente; b) classe 1 = cauda curta menor que o diâmetro do núcleo (dano pequeno); c) classe 2 = comprimento da cauda correspondendo a uma ou duas vezes o diâmetro do núcleo (dano médio); d) classe 3 = comprimento da cauda maior que o dobro do diâmetro do núcleo (dano significativo); e) célula inviável (Figura 4). Para o cálculo do escore de dano, o número de células em cada classe (0, 1, 2 ou 3) foi multiplicado pelo valor de cada classe e o escore foi calculado pela fórmula: $(0 \times A) + (1 \times B) + (2 \times C) + (3 \times D)$, onde: A, B, C e D correspondem ao número de células em cada uma das classes. Assim, o valor de escore pode variar de um mínimo de 0 e um valor máximo de 300. Os resultados foram expressos pela média dos escores de danos no DNA.

Figura 4. Fotomicrografia mostrando as diferentes classes de cometa consideradas no cálculo do escore de danos e uma célula inviável: A) Classe 0; B) Classe 1; C) Classe 2; D) Classe 3; E) Célula inviável



Fonte: VIEIRA et al. (2016)

Análise de micronúcleo (MN) e demais alterações nucleares em eritrócitos (ANEs)

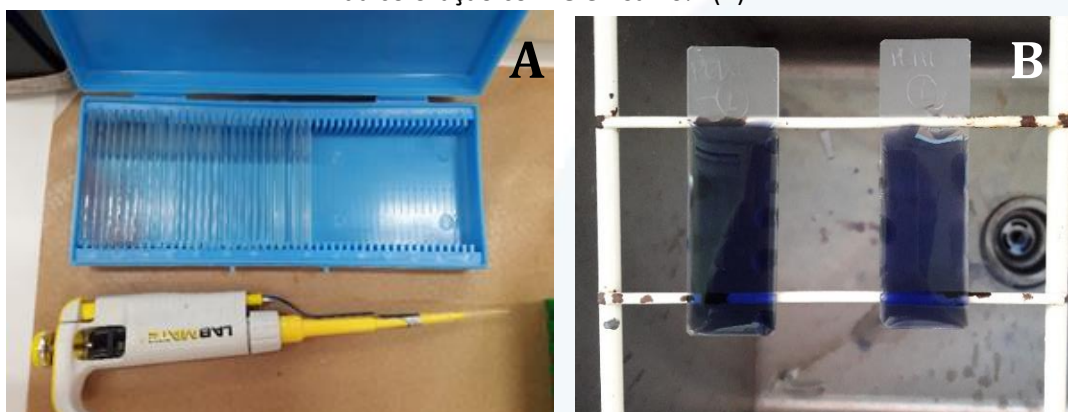
As lâminas contendo as extensões sanguíneas foram analisadas quanto à presença de MN e ANEs de acordo com os protocolos descritos por Carrano; Heddle (1973), Schimd (1975) e Carrasco et al. (1990). Para isso, uma pequena quantidade de sangue (5µl) foi distendida sobre a lâmina de vidro, formando uma fina camada, sobre toda a superfície da lâmina (Figura 5).

Figura 5. Imagem representativa de extensão sanguínea necessária às análises de micronúcleos (MN) e demais alterações nucleares em eritrócitos (ANEs)



As lâminas secaram protegidas da luz (em laminários), por 24h, em temperatura ambiente e, então, foram fixadas em metanol puro absoluto por 10 min. Em seguida, foram armazenadas novamente em laminários onde foram mantidas até o momento da coloração (Figura 6 A). A coloração foi realizada com Giemsa 10% por um período que variou entre 10 a 35 min dependendo da espécie (Figura 6 B).

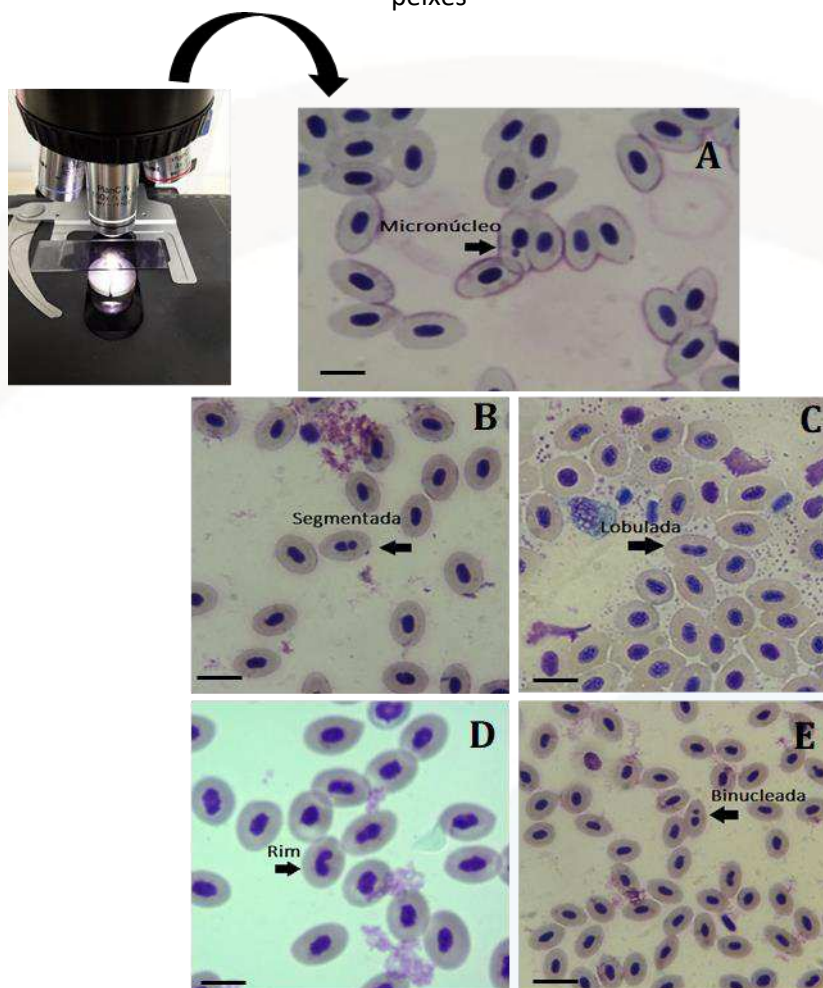
Figura 6. Imagens representativas das lâminas secando em laminários após fixação em metanol (A) e da coloração com Giemsa 10% (B)



Fonte: LACTEC

Um total de 3000 eritrócitos foram observados e contados, aleatoriamente, por meio de teste cego, em microscópio óptico (1000x de magnificação). Apenas eritrócitos nucleados e com membranas celulares e nucleares intactas foram considerados na análise. Partículas arredondadas, com um diâmetro de 1/5 a 1/20 do núcleo principal, sem nenhuma ligação com o mesmo, com uma coloração característica, coerente com o núcleo principal, e uma imagem não refratária, foram aceitos como micronúcleos (Figura 7 A). Foram consideradas como alterações nucleares: núcleo segmentado (Figura 7 B), núcleo lobulado (Figura 7 C), núcleo em forma de rim (Figura 7 D) e a presença de células binucleadas (Figura 7 E). A frequência média de MN e ANEs foram calculadas e expressas por 1000 células (%).

Figura 7. Imagens representativas de micronúcleo (A) e alterações nucleares (B-E) em eritrócitos de peixes



Fonte: LACTEC; escala: 20 μ M

2.1.3.2. ANÁLISES PLASMÁTICAS

Osmolalidade (OSM)

A osmolalidade plasmática foi determinada em amostras de plasma, sem diluição, lidas no micro-osmômetro de pressão de vapor (Wescor® 5600 VAPRO). Os resultados foram expressos em mOsm.Kg H₂O⁻¹.

Íons

A determinação dos íons cloreto (Cl⁻) e magnésio (Mg²⁺) foi realizada em amostras de plasma sem diluição, no caso de peixes de água doce e diluídas (1:5) em amostras de peixes estuarinos e marinhos. Esses íons foram determinados por meio de kits colorimétricos comerciais (Labtest®) com leitura de absorbância em 470 e 505 nm, respectivamente, em espectrofotômetro (Molecular Devices® SpectraMax M2e). Os íons sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) foram determinados em amostras de plasma

diluídas (1:200) em água ultra-pura (Milli-Q®) através de fotômetro de chama (QUIMIS® – Q498M). Os resultados foram expressos em mM.

Glicose e Lactato

As concentrações de glicose e de lactato foram determinadas com o uso de kits comerciais colorimétricos (Labtest®) em amostras de plasma, sem diluição, com leitura de absorbância a 505 nm e 550 nm, respectivamente (Molecular Devices® SpectraMax M2e). Os resultados foram expressos em mg.dL⁻¹.

2.1.3.3. ANÁLISES TECIDUAIS

Histopatologia

As brânquias e gônadas (ovários e testículos), fixados em formaldeído 10%, foram submetidos ao processo de desidratação em série crescente de álcool etílico, nos seguintes tempos e proporções: álcool 70% (1h para ambos os tecidos); álcool 80% (15 e 30 min para brânquias e gônadas, respectivamente); álcool 90% (30 min e 1h, respectivamente); álcool 100% (30 min e 1h, respectivamente); álcool 100% + xilol (proporção de 1:1; 15 e 30 min, respectivamente). Em seguida, as amostras foram submetidas aos procedimentos de diafanização (10 e 20 min em xilol puro, respectivamente), impregnação em Paraplast (Sigma Aldrich®) a 60° C e inclusão em Paraplast (Sigma Aldrich®) em temperatura ambiente. Após a inclusão, o material foi cortado em micrótomo (6 µm) e corado com hematoxilina-eosina (HE) para análise em microscópio de luz.

As brânquias foram analisadas quanto à presença de deformações e lesões, tais como: descolamento do epitélio branquial, desarranjo na estrutura das lamelas, edema lamelar, hiperplasia e hipertrofia celular nas lamelas branquiais, fusão lamelar, e alterações vasculares, como constrição do seio sanguíneo, congestão vascular e aneurisma. Para a quantificação das alterações histopatológicas nas brânquias fez-se o uso do índice de Bernet (BERNET et al., 1999) modificado por Marinho et al. (2014), na qual considera-se a extensão das lesões observadas em todo o corte (a) e o fator de importância da alteração (w), aplicando-os na fórmula abaixo:

$$IBind = \sum (a * w)$$

As lesões consideradas neste estudo foram Aneurisma, Edema, Atrofia, Deslocamento do epitélio, Hipertrofia, Hiperplasia, Fusão e Desestruturação de lamelas. Para cada uma das lesões, atribuiu-se um valor (de 0 a 6) de acordo com o grau de distribuição e intensidade das alterações histopatológicas (Tabela 2). Deste modo, as lesões identificadas nos peixes avaliados ao longo das quatro campanhas apresentaram os seguintes fatores de importância: Edema, Descolamento de

epitélio, Hipertrofia e Desestruturação de lamelas receberam valor 1; Aneurisma, Hiperplasia e Fusão receberam valor 2; por fim, Atrofia recebeu valor 3.

Tabela 2. Extensão das lesões observadas (a) de acordo com a porcentagem de ocorrência da lesão no corte histológico

Porcentagem (%)	Extensão das lesões (a)
0 - 17	1
18 - 34	2
35 - 51	3
52 - 68	4
69 - 85	5
86 - 100	6

Com base nos valores de importância foi calculado o valor estimado de (a) com base na quantidade de lamelas que apresentaram a lesão e no número total de lamelas do corte histológico em questão. A partir disso, e dos fatores de importância já citados, foi obtido o valor estimado de IB. Os indivíduos das diferentes espécies foram agrupados em dois grupos: 1) todos os indivíduos e 2) nível taxonômico “Ordem”, para os quais foi determinado o IB. A quantificação permitiu verificar quais os pontos amostrais e as ordens que mais sofreram lesões branquiais e, conseqüentemente, se mostraram mais impactados.

Nas gônadas, além da identificação de lesões que pudessem levar ao comprometimento da estrutura ou alteração no processo reprodutivo, foram identificados os estádios de desenvolvimento gonadal, através da escala de maturidade proposta por VAZZOLER (1996), considerando os seguintes estádios de desenvolvimento: (A) Imaturo, (B) Maturação, (C) Maduro, (SD) Semi-Desovado/(SE) Semi-Esgotado (para algumas espécies, fêmeas e machos, respectivamente) e (D) Desovado/Recuperado (fêmeas) ou (E) Esgotado/Recuperado (machos). Os estádios B, C, SD/SE, D/E são estádios avaliados apenas em adultos.

Preparo dos homogeneizados para análises fisiológicas e bioquímicas

Uma parte das lamelas branquiais, de cada uma das amostras coletadas, foi pesada (Bel Engineering® M214Ai, precisão 0,1 mg), homogeneizada (1:10 m/v; homogeneizador do tipo Turrax, Tecnal® por 30 segundos) em tampão SEID (Sacarose, EDTA, Imidazol e Deoxicolato de sódio), centrifugada (10.000 xg, 20 min, 4° C; Daiki® DTR16.000) e o sobrenadante aliqotado para a determinação das atividades específicas das enzimas Na^+/K^+ -ATPase, $V-H^+$ ATPase, AC e da

concentração de PT. A massa restante das lamelas branquiais e o fígado foram pesados (Bel Engineering® M214Ai, precisão 0,1 mg), homogeneizados (1:3 m/v; ultrasonicador Eco-Sonics® Ultronic QR300, com potência de 30% em dois ciclos de 10 segundos) em tampão fosfato de potássio (0,1 M, pH 7,0), centrifugados (13.000 rpm, 20 min, 4° C; Daiki® DTR16.000) e o sobrenadante aliqotado para as análises das atividades da SOD, CAT, GPx, GST, e das concentrações de GSH, MT, TBARS (LPO) e PT. As amostras de rins foram pesadas (Bel Engineering® M214Ai, precisão 0,1 mg), homogeneizadas (1:10 m/v; homogeneizador do tipo Turrax, Tecnal® por 30 segundos) em tampão fosfato de sódio (10 mM; pH 7,4), centrifugadas (10.000 xg, 20 min, 4° C; Daiki® DTR16.000) e o sobrenadante aliqotado para as análises da atividade da AC e da concentração de PT. As amostras de cérebro foram pesadas (Bel Engineering® M214Ai, precisão 0,1 mg), homogeneizadas (1:10 m/v; ultrasonicador Eco-Sonics® Ultronic QR300, potência de 30% em dois ciclos de 10 segundos) em tampão fosfato de potássio (0,1 M, pH 7,5), centrifugadas (12.000 x g, 20 min, 4°C; Daiki® DTR16.000) e o sobrenadante aliqotado para as análises da atividade da AChE e da concentração de PT. Uma alíquota de fragmento muscular foi pesada (~ 100 mg; Bel Engineering® M214Ai, precisão 0,1 mg), homogeneizada (1:10 m/v; ultrasonicador Eco-Sonics® Ultronic QR300, potência de 30% em dois ciclos de 10 segundos) em tampão fosfato de potássio (0,1 M, pH 7,5), centrifugada (12.000 x g, 20 min, 4° C; Daiki® DTR16.000) e o sobrenadante aliqotado para as análises da atividade da AChE e das concentrações de PCO e PT.

Na⁺K⁺ATPase (NAK) e V-H⁺ATPase

A determinação das atividades específicas das enzimas Na⁺/K⁺-ATPase, V-H⁺-ATPase em brânquias foi realizada através do protocolo descrito por Gibbs e Somero (1989) e adaptado para microplacas por Kültz e Somero (1995). Os resultados dessas enzimas foram expressos em µmol de ADP.mg de proteína⁻¹.h⁻¹.

Anidrase carbônica (AC)

A atividade específica da AC branquial e renal foi determinada com base no protocolo estabelecido por Henry (1991) e descrito por Vitale et al. (1999). O cálculo da atividade foi realizado com base nas descrições de Burnett et al. (1981) e Vitale et al. (1999), através da fórmula: AAC = [TC/(TNC – 1)].mg de proteína total⁻¹. Os resultados foram expressos em atividade específica da AC. mg de proteína⁻¹.

Superóxido dismutase (SOD)

A atividade da SOD branquial e hepática foi determinada conforme protocolo descrito por Mccord e Fridovich (1969). Os resultados foram expressos como U de SOD.mg de proteína⁻¹.

Catalase (CAT)

A atividade da CAT branquial e hepática foi determinada conforme protocolo descrito por Aebi (1984), adaptado para microplacas. Os resultados foram expressos como $\mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}$ de proteína⁻¹.

Glutathione peroxidase (GPx)

A atividade da GPx branquial e hepática foi determinada conforme protocolo estabelecido por Hopkins e Tudhope (1973). Os resultados foram expressos como $\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}$ de proteína⁻¹.

Glutathione S-transferase (GST)

A atividade da GST branquial e hepática foi determinada conforme protocolo estabelecido por Keen et al. (1976). Os resultados foram expressos como $\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}$ de proteína⁻¹.

Glutathione reduzida (GSH)

A concentração de glutathione reduzida branquial e hepática foi determinada conforme protocolo descrito por Beutler et al. (1963). Os resultados foram expressos como $\text{nmol} \cdot \text{mg}$ de proteína⁻¹.

Metalotioneínas (MT)

A determinação da concentração de MT presentes em tecido branquial e hepático foi realizada conforme protocolo descrito por Viarengo et al. (1997) baseado numa curva padrão de GSH. O cálculo da quantidade de MT presentes no homogenato foi realizado conforme protocolo descrito por Linde e Garcia-Vazquez (2006), utilizando a razão de 1:20. Os resultados foram expressos como $\text{nmol} \cdot \text{mg}$ de proteína⁻¹.

Lipoperoxidação (LPO)

Para determinação da peroxidação lipídica em tecido branquial e hepático foi empregado o método de determinação de TBARS (substâncias reativas ao ácido tiobarbitúrico) descrito por Camejo et al. (1998). Os resultados foram expressos como $\text{nmol} \cdot \text{mg}$ de proteína⁻¹.

Acetilcolinesterase (AChE)

A determinação da atividade da AChE em tecido cerebral e muscular foi realizada através do protocolo descrito por Ellman et al. (1961). Os resultados foram expressos como nmol. min⁻¹.mg de proteína⁻¹.

Teor de hidratação muscular (TH)

Para a determinação da porcentagem de água presente em músculos, os tecidos foram pesados (~ 50 mg; peso úmido) em microtubos, em balança analítica (Bel Engineering® M214Ai, precisão 0,1 mg). Em seguida os tecidos foram transferidos para desidratação em estufa (QUIMIS® Q13) a 60° C por 24 h. Após este período os tecidos foram novamente pesados (peso seco) e a perda de água foi demonstrada pela porcentagem do peso inicial da amostra (peso úmido). Os resultados foram expressos em porcentagem (%).

Glicogênio muscular (GLICOG)

A determinação do GLICOG foi realizada segundo método descrito por Bidinotto et al. (1997). Os resultados foram expressos em µmol de glicosil-glicose.g de tecido úmido⁻¹.

Carbonilação proteica (PCO)

A carbonilação de proteínas foi determinada de acordo com o método descrito por Levine et al. (1994). Os resultados foram expressos em nmol de carbonilas. mg de proteína⁻¹.

Proteínas totais (PT)

A concentração de PT dos homogeneizados teciduais (brânquia, rim, fígado, músculo e cérebro), necessária para a normalização dos diferentes biomarcadores, foi determinada de acordo com o método estabelecido por Bradford (1976), com leitura de absorbância a 595 nm (Molecular Devices® SpectraMax M2e). Os resultados foram expressos como mg de proteína.ml⁻¹.

Determinação da concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPTs)

As amostras de tecidos muscular e hepático utilizadas para a determinação de elementos potencialmente tóxicos (Ag, Al, As, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, La, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Zn) foram preparadas conforme protocolo estabelecido pela norma nº 3052 da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA, 1996). A determinação dos elementos foi realizada por Espectrômetro de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado iCAP RQ (ICP-MS - Thermo Fisher Scientific®, Bremen, Alemanha), juntamente com amostrador automático Cetac Autosampler ASX-560 (Thermo Fisher Scientific®, Alemanha) ou em Espectrômetro de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado

iCAP 6000 series com amostrador automático Cetac Autosampler ASX-520 (ICP-OES - Thermo Fisher Scientific®, Alemanha) no caso de amostras com elevadas concentrações dos elementos. Os padrões de calibração para construir a curva analítica dos elementos foram preparados em solução de HNO₃ 20% (v/v) a partir de diluições adequadas de soluções estoque de 1000 mg.L⁻¹ que foram adquiridos de Absolute Standards Inc (Hamden, Connecticut, EUA) com ISO GUIDE 34, todos rastreáveis pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (NIST). Os resultados estão apresentados em mg.kg⁻¹. Os valores foram calculados com base nas massas secas digeridas utilizando a expressão abaixo, no entanto os resultados foram corrigidos pelo teor de umidade das amostras e apresentados em mg.kg de massa úmida⁻¹

$$\frac{C \text{ (mg.kg}^{-1}\text{)} = c \text{ (}\mu\text{g.L}^{-1}\text{)} * V \text{ (mL)}}{m \text{ (g)} * 1000}$$

Onde:

C é a concentração final em mg.kg⁻¹;

c é a concentração em μg.L⁻¹ lida em solução;

V é o volume final da solução em mL;

m é a massa da amostra em g;

e 1000 é o fator de conversão de μg.kg⁻¹ para mg.kg⁻¹.

Uma vez que o Limite de Quantificação (LQ) é definido como a menor quantidade do analito em uma amostra que pode ser determinada com precisão e exatidão aceitáveis sob as condições experimentais estabelecidas (CURRIE, 1995; BRITO et al., 2003; GONZÁLEZ; HERRADOR, 2007; INMETRO, 2007; SKOOG et al., 2008; ANVISA, 2017; SHOARI; DUBÉ, 2018), as amostras cujos resultados apresentaram-se com concentrações entre o limite de detecção (LD) e o LQ, ou seja, com concentrações maiores que o LD, mas, menores que o LQ, tiveram seus valores substituídos pelo limite de quantificação do método, que LQ corresponde ao limite de quantificação de cada um dos elementos avaliados. É importante mencionar que quando utilizados os limites de quantificação, estes valores também foram convertidos à base úmida, conforme teor de umidade específico para cada uma das amostras avaliadas. Para as amostras de peixes, os resultados das concentrações de EPTs serão apresentados na forma de heatmaps, cuja metodologia de análise encontra-se descrito no APÊNDICE A.

Índice Integrado de Biomarcadores (IBR)

Especificamente para os resultados obtidos dos organismos da porção aquática continental, leia-se, compartimentos 1, 2 e 3, em cada uma das estações amostradas, foi aplicado o “Índice Integrado de Resposta de Biomarcadores (IBR)” descrito por Beliaeff e Burgeot (2002) e revisado por Sanchez et al. (2013) (IBRv2). Sempre que possível os dados foram agrupados de três formas: a)

considerando todos os peixes obtidos em cada um dos pontos amostrais; b) considerando o agrupamento dos peixes, de cada um dos pontos amostrais, com base em sua ordem; c) considerando o agrupamento dos peixes, de cada um dos pontos amostrais, com base no hábito alimentar. Para o cálculo do valor de IBRv2 foram utilizados como valores de referência os resultados obtidos para o grupo controle negativo (CN). Desta forma, a razão entre as condições para cada biomarcador foi logaritimizada (Y_i) e posteriormente tiveram sua média (μ) e o desvio padrão (s) calculados. Em seguida os valores Y_i foram padronizados através da fórmula: $Z_i = (Y_i - \mu)/s$ e a diferença entre Z_i e Z_0 (T_0) determinaram os valores de A. Por fim, o IBRv2 foi calculado para cada local amostrado por meio da somatória de valores de A de cada biomarcador (SANCHEZ et al., 2013). Em cada compartimento e estação, para cada agrupamento avaliado, os parâmetros foram representados através de um gráfico de radar que indica o desvio apresentado por cada um dos biomarcadores investigados, sendo a presença de ponto superior (positivo) indicativa de aumento da resposta do biomarcador, enquanto ponto inferior (negativo) indicativo de diminuição da resposta do biomarcador, sempre em relação às respostas dos biomarcadores nos organismos capturados no ponto CN. É válido ressaltar que o cálculo do IBRv2 foi realizado com o intuito de resumir os resultados, bem como de torna-los mais facilmente observáveis.

2.1.3.4. ANÁLISE DAS RELAÇÕES ENTRE AS MÉTRICAS ECOTOXICOLÓGICAS E A ABUNDÂNCIA E A RIQUEZA DE ESPÉCIES DE PEIXES CONTINENTAIS

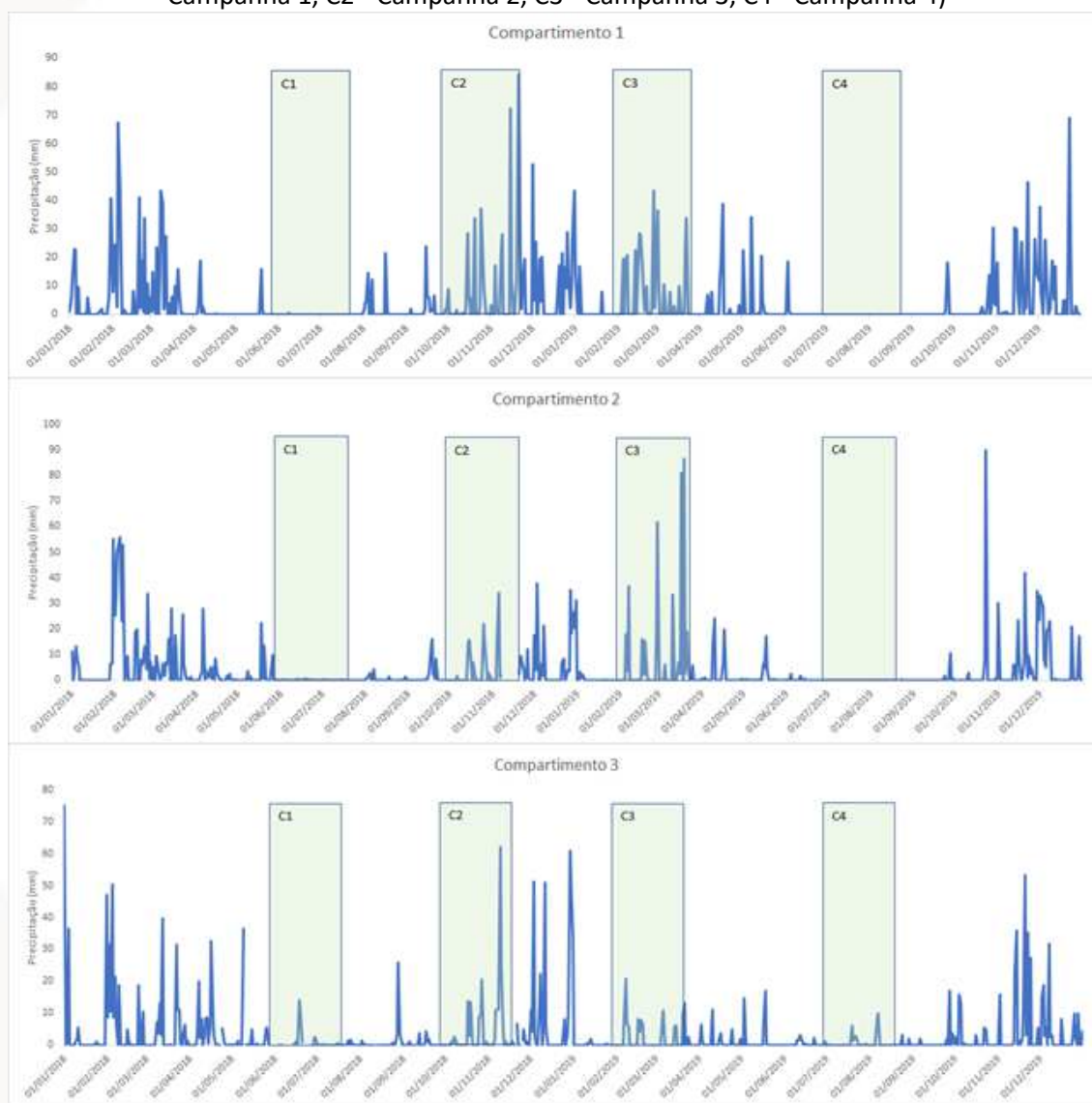
Com base nos cálculos de IBRv2, dos resultados de determinação da concentração de EPTs e nos resultados ecológicos de abundância e riqueza determinados para os peixes continentais ao longo das quatro campanhas consideradas no presente relatório (para maiores detalhes ver item 2.5 do TOMO II do presente relatório de Acompanhamento de Danos) foi realizada a análise para estabelecimento da relação entre as métricas ecotoxicológicas e os resultados ecológicos. Essa análise teve como principais objetivos identificar quais os processos e mecanismos que apresentaram maior relação com os danos identificados (relação de causa e efeito), bem como determinar qual a contribuição desses para a redução do *fitness* individual e, conseqüentemente, de impactos sobre a biodiversidade em cenários temporais futuros. Para tanto, as perguntas direcionadoras foram:

- (i) Qual a magnitude do dano decorrente do rompimento da barragem sobre o potencial de ocorrência das espécies de peixes?
- (ii) Quais métricas ecotoxicológicas estão mais relacionadas com a Abundância e a Riqueza de espécies de peixes?

Para a realização dessa análise informações sobre os valores de precipitação diários entre 2018 e 2019 foram obtidos a partir da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia do Ministério

da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET, 2020). Os dados de precipitação foram resgatados das Estações Meteorológicas Convencionais de Ibitaré – MG/A555 (Compartimento 1 – Long: -44,011249; Lat: -20,031457), de Timóteo – MG/A511 (Compartimento 2 – Long: -42,62222; Lat: -19,5736111) e Marilândia – ES/A632 (Compartimento 3 – Long: -40,539825; Lat: -19,407181), sendo os pontos com estações automáticas mais próximos dos locais de amostragem do presente trabalho. Os valores absolutos de precipitação acumulada (mm) dos meses de coleta (jan/2018 a dez/2019) são representados na Figura 8.

Figura 8. Valores absolutos de precipitação acumulada (mm) de jan/2018 a dez/2019 em cada um dos compartimentos amostrados (1, 2 e 3), com destaque para os períodos amostrais (C1 - Campanha 1, C2 - Campanha 2, C3 - Campanha 3, C4 - Campanha 4)



Os valores diários obtidos foram sumarizados calculando-se a precipitação acumulada por estação (Tabela 3).

Tabela 3. Precipitação (mm) nos meses de estações secas e chuvosas e precipitação acumulada (mm) nos Compartimentos 1, 2 e 3 do rio Doce

Compartimentos	Campanhas	Estações	Mês 1	Mês 2	Precipitação acumulada
Compartimento 1	Campanha 1	seca	0,6	0	0,6
	Campanha 2	chuvosa	155,4	340,4	495,8
	Campanha 3	chuvosa	256,4	135,2	391,6
	Campanha 4	seca	0	0	0
Compartimento 2	Campanha 1	seca	2	0,6	2,6
	Campanha 2	chuvosa	97,8	92,2	190
	Campanha 3	chuvosa	175,8	253	428,8
	Campanha 4	seca	0	0,2	0,2
Compartimento 3	Campanha 1	seca	32	5,2	37,2
	Campanha 2	chuvosa	77,2	133,6	210,8
	Campanha 3	chuvosa	69,2	56	125,2
	Campanha 4	seca	15	24,4	39,4

Para cada espécie de peixe coletada foi calculado o grau de importância relativa pela frequência de ocorrência percentual (FO%), e sua porcentagem numérica (PN%). Desta maneira, foi possível identificar as espécies como:

- a) frequentes e abundantes, sendo aquelas que ultrapassaram as médias de PN% e FO%;
- b) frequentes e não abundantes, aquelas que não ultrapassam as médias de PN%, mas ultrapassam de FO%; e
- c) ocasionais, aquelas que não ultrapassaram as médias de PN% e FO%, conforme estabelecido por (LOEBMANN; VIEIRA, 2005).

Para avaliar a completude de espécies nos pontos de amostragem, foi realizada uma análise de rarefação. Esta análise foi aplicada na matriz de composição e abundância de espécies e assim realizar as estimativas de riqueza. Uma vez que a riqueza de táxons pode aumentar em proporção direta ao número de indivíduos amostrados, o método de rarefação individual foi usado. Essa análise utilizou o algoritmo proposto por (KREBS, 1989), possibilitando estimar a riqueza esperada nos diferentes pontos de amostragem e compará-los graficamente.

Após isso, os valores da IBR (somatório dos desvios absolutos de cada biomarcador) para cada tecido foram considerados como variáveis preditoras, enquanto a Abundância e a Riqueza de espécies de peixe em cada ponto de coleta, exclusivas de cada Compartimento da bacia do rio Doce, foram consideradas como variáveis respostas. Assim, foram realizados Modelos Lineares Generalizados (GLM) utilizando a família de distribuição de probabilidade Binomial negativa para Abundância, e a distribuição de probabilidade de Poisson para Riqueza, como forma de inferir quais das métricas ecotoxicológicas associam-se positiva ou negativamente à Abundância e à Riqueza de espécies de

peixes ao longo do tempo. Vale ressaltar que por questões logísticas não foi realizada a coleta de animais no ponto DA durante a Campanha 4, no Compartimento 1. Todas as análises foram realizadas no software R® (R® Development Core Team 2019).

2.1.3.5. ANÁLISE DE TOXICIDADE COM AMOSTRAS DE ÁGUAS E SEDIMENTOS DA PORÇÃO CONTINENTAL EM EMBRIÕES DE DANIO RERIO (ZEBRAFISH)

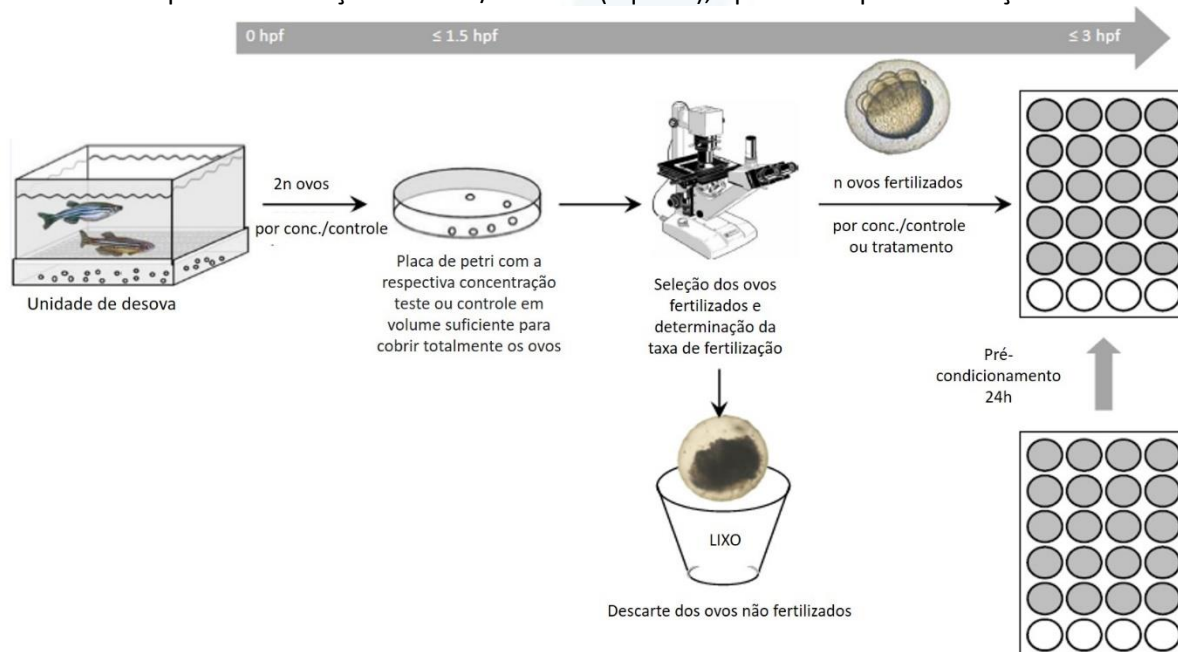
Em cada um dos pontos amostrais dos compartimentos da porção aquática continental (1, 2 e 3), amostras de água e sedimentos foram coletadas em frascos específicos para cada uma das matrizes, conforme descrito no guia de coleta e preservação de amostras (ANA/CETESB, 2011). As amostras foram identificadas com o código correspondente ao ponto amostral (Tabela 4), adequadamente acondicionadas e enviadas para o laboratório para o ensaio de toxicidade em embriões de peixes da espécie *Danio rerio* (zebrafish) (OECD nº 236 - Fish Embryo Toxicity Test, 2013), conforme resumido na Figura 9. Para o ensaio foram utilizados zebrafish adultos (<18 meses de idade) da linhagem AB (International Zebrafish Resource Center, Eugene, OR) os quais foram mantidos a 28°C, pH 7 e luminosidade (14 h claro/10 h escuro) em aquários individuais em estante ALESCO® usando água de sistema (60 µg/ml Instant Ocean sea salts).

Peixes adultos (2 machos/1 fêmea) foram usados para gerar embriões de 0 horas após a fertilização (hpf - horas pós fertilização). Logo após a fertilização os ovos foram visualizados no esteriomicroscópio (LEICA® M205C) e avaliados de modo que os ovos não fertilizados ou irregulares fossem separados dos ovos fecundados e saudáveis. Os ovos não fecundados foram descartados, enquanto os ovos fertilizados foram transferidos para placas de petri plásticas (funda: 100 x 25 mm) e classificados de acordo com Kimmel et al. (1995). Com o intuito de garantir a reprodutibilidade, os ovos foram incubados em estufa, sob temperatura constante de 28°C. Os embriões foram distribuídos em placas de poliestireno de 24 poços (5 embriões por poço), contendo as diferentes amostras (controle e experimentais). Como controle negativo foi utilizado o meio E2. Os embriões foram observados diariamente com auxílio de estereomicroscópio (LEICA® M205C). Os estágios normais de desenvolvimento (Figura 10) foram comparados, conforme estabelecido no protocolo do teste FET, com quatro parâmetros indicadores de letalidade aguda nos peixes: a) coagulação dos ovos fertilizados; b) ausência da formação de somitos; c) falta de separação entre a cauda e o saco vitelínico e, finalmente, d) ausência de batimentos cardíacos. Os parâmetros de teratogênese foram anotados a cada 24h por um período de 4 dias (96h). Todos os parâmetros de anomalias são definidos pelo teste OECD nº236 (Figura 11).

Tabela 4. Descrição dos pontos e codificação das amostras de água e sedimento utilizadas no teste FET

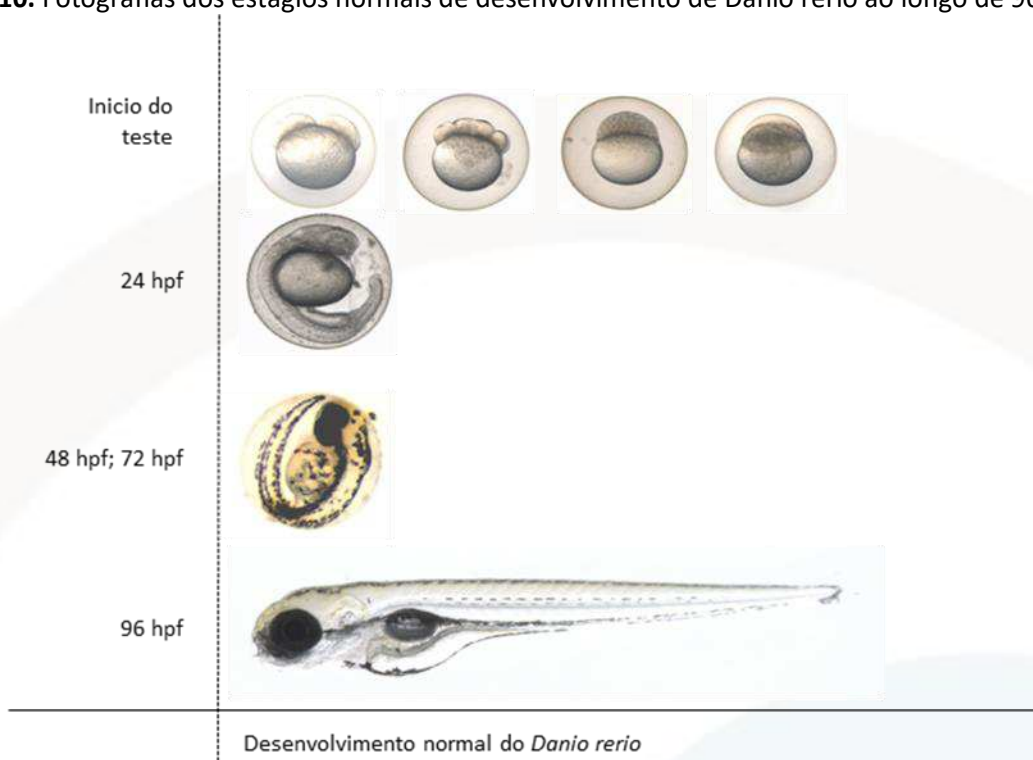
Compartimento	Localização ponto	Característica do Ponto	Coordenadas (latitude/longitude – SIRGAS2000)	Código amostras de água	Código amostras de sedimento
1	Rio Piranga	Controle Negativo	20°25'39.61" S/ 42°55'14.27" W	RD25	ARD02
1	Rio do Carmo	Controle Positivo	20°17'50.53"S/ 43°4'25.46" W	RD26	ARD03
1	Rio Gualaxo	Dentro da APDL	20°17'7.79"S/ 43°4'43.71" W	RD24	ARD01
1	Dique S4	Dentro da APDL	20°14'21.39"/ 43°24'41.09" W	RD27	DIQUE
2	Rio Corrente Grande	Controle Negativo	19°02'05.04"S/ 42°09'09.46" W	RD16	MRD01
2	Rio Piracicaba	Controle Positivo	19°36'56.03" S/ 42°46'50.81" W	RD19	MRD03
2	Doce-Gov.Valadares	Dentro da APDL	19°0'59.79"S/ 42°7'5.22" W	RD17	MRD02
3	Rio Pancas	Controle Negativo	19°28'27.99" S/ 40°36'48.97" W	RD09	BRD03
3	Rio Pequeno	Controle Positivo	19°22'28.31"S/ 40°4'43.63" W	RD07	BRD01
3	Doce-Colatina	Dentro da APDL	19°30'37.95"S/ 40°36'35.21" W	RD08	BRD02

Figura 9. Esquema do procedimento empregado para o teste de toxicidade aguda com embrião de zebrafish – FET (da esquerda para a direita): produção de ovos, coleta dos ovos, pré-exposição imediatamente após fertilização em recipientes de vidro, seleção de ovos fertilizados com um microscópio invertido ou binocular e distribuição de ovos fertilizados em placas de 24 poços preparadas com as respectivas concentrações de teste/controles, n = número de ovos necessários por concentração de teste/controle (aqui 20), hpf = horas pós-fertilização



Fonte: OECD (2013)

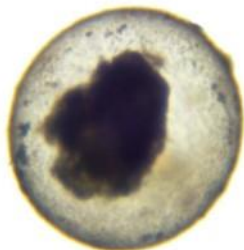
Figura 10. Fotografias dos estágios normais de desenvolvimento de *Danio rerio* ao longo de 96 horas



Fonte: Plataforma Zebrafish®

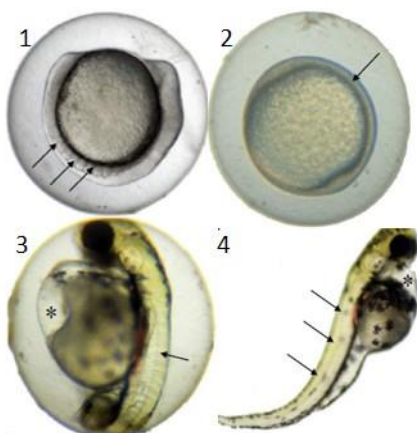
Figura 11. Anomalias identificadas no teste de toxicidade aguda com embrião de zebrafish (FET). Essas alterações indicam toxicidade aguda e, conseqüentemente, morte dos embriões: A - coagulação do embrião; B - ausência de formação de somito; C - falta de separação entre a cauda e o saco vitelínico e, D - falta de batimento cardíaco.

A



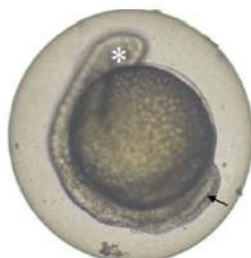
Coagulação do embrião

B



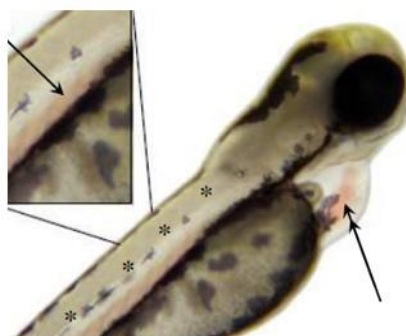
Ausência de formação de somito: 1 - embrião de peixe-zebra com 24 horas de idade e com somitos bem desenvolvidos (→, normal); 2 - embrião sem qualquer sinal de formação de somito (→); 3 - embora exibindo um edema pronunciado do saco vitelino (*), o embrião de peixe-zebra com 48 horas mostra formação distinta de somitos (→), enquanto o embrião de peixe-zebra com 96 horas, representado no 4, não mostra qualquer sinal de formação de somito (→). Observe também a curvatura da coluna vertebral (escoliose) e o edema pericárdico (*) no embrião mostrado em 4.

C



Falta de separação entre a cauda e o saco vitelínico (a: →; embrião de peixe-zebra com 96 horas de idade). Observe também a falta do olho (*).

D



Falta de batimento cardíaco é indicada pela não convulsão do coração (seta dupla). Note também a imobilidade das células sanguíneas na aorta abdominal (→) e a falta de formação de somito no embrião (*, aparência homogênea em vez de segmentar). O tempo de observação para registrar a ausência de batimento cardíaco deve ser de pelo menos um minuto com uma ampliação mínima de 80 ×.

Fonte: OECD (2013)

2.1.3.6. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados obtidos com as análises dos diferentes biomarcadores estão apresentados como média $\pm$ erro padrão da média. Os dados foram agrupados da mesma forma como previamente descrito para o cálculo do IBRv2, ou seja, considerando todos os indivíduos, as diferentes ordens e os diferentes hábitos alimentares. Tais agrupamentos, sempre que possível ($n \geq 3$) foram testados quanto às suas diferenças considerando os diferentes pontos amostrais em cada um dos compartimentos, bem como em relação às diferenças apresentadas entre as campanhas para cada um dos pontos. Desta forma, nos compartimentos 1, 2 e 3 foram realizadas comparações entre os pontos CN, CP e DA (incluindo DQ para o compartimento 1) em cada uma das coletas/estações amostrais, além das comparações entre as coletas/estações para cada um dos pontos. No compartimento estuarino (compartimento 4) foi realizada a comparação entre os pontos Foz do rio Doce (DA) e o ponto Foz do Piraquê-Açú (P. Açú) e entre as diferentes estações para cada um dos pontos. Por fim, no compartimento marinho (compartimento 5), as comparações foram realizadas em relação à distância da costa, ou seja, foram comparados entre si os três pontos próximos à costa (1, 3 e 5), assim como os três pontos distante da costa (2, 4 e 6), além da comparação, par a par, entre os pontos próximos e distantes da costa (1 x 2; 3 x 4; 5 x 6).

Para cada um dos agrupamentos avaliados, os resultados dos diferentes biomarcadores foram submetidos às análises de normalidade e homocedasticidade (homogeneidade de variância) através dos testes de Shapiro-Wilk e Brown-Forsythe, respectivamente. Os resultados que apresentaram normalidade e homogeneidade das variâncias foram submetidos à análise de variância de uma via (One-Way ANOVA) seguido do teste post-hoc de Tukey para localização das diferenças no caso de comparação entre 3 ou mais grupos ou ao teste-t para comparação entre dois grupos. Para dados que não apresentaram normalidade e/ou homogeneidade de variâncias foram utilizados os testes não-paramétricos de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn ou Mann-Whitney que correspondem aos testes não paramétricos para a ANOVA de uma via e teste-t, respectivamente (R® Development Core Team, 2019). Especificamente para as análises de determinação das concentrações de EPTs o teste estatístico aplicado para cada um dos elementos foi o teste de Kruskal-Wallis. As comparações múltiplas foram feitas pelo teste de Dunn, juntamente ao procedimento de correção de p-valor pelo método de Holm-Bonferroni (R® Development Core Team, 2019). Para todos os resultados dos marcadores avaliados no presente estudo, o nível de significância considerado foi menor que 0,05 ($p < 0,05$). Especificamente para as análises de EPTs dos peixes, os dados foram apresentados através de heatmap, cuja metodologia e estatística empregada estão apresentados no APÊNDICE A.

Os resultados obtidos com o teste de toxicidade (FET) de cada uma das condições (controle e experimentais) também foram submetidos às análises de normalidade e homocedasticidade (homogeneidade de variância). Os resultados que apresentaram normalidade e homogeneidade das

variâncias foram avaliados, para cada um dos tempos (24, 48, 72 e 96h) e doses, através da análise de variância de uma via (One-Way ANOVA) seguido do teste de Bonferroni (Prisma® 6 Graph Pad Software, v6.02, 2013). As diferenças foram consideradas significativas para valores de $p < 0,05$.

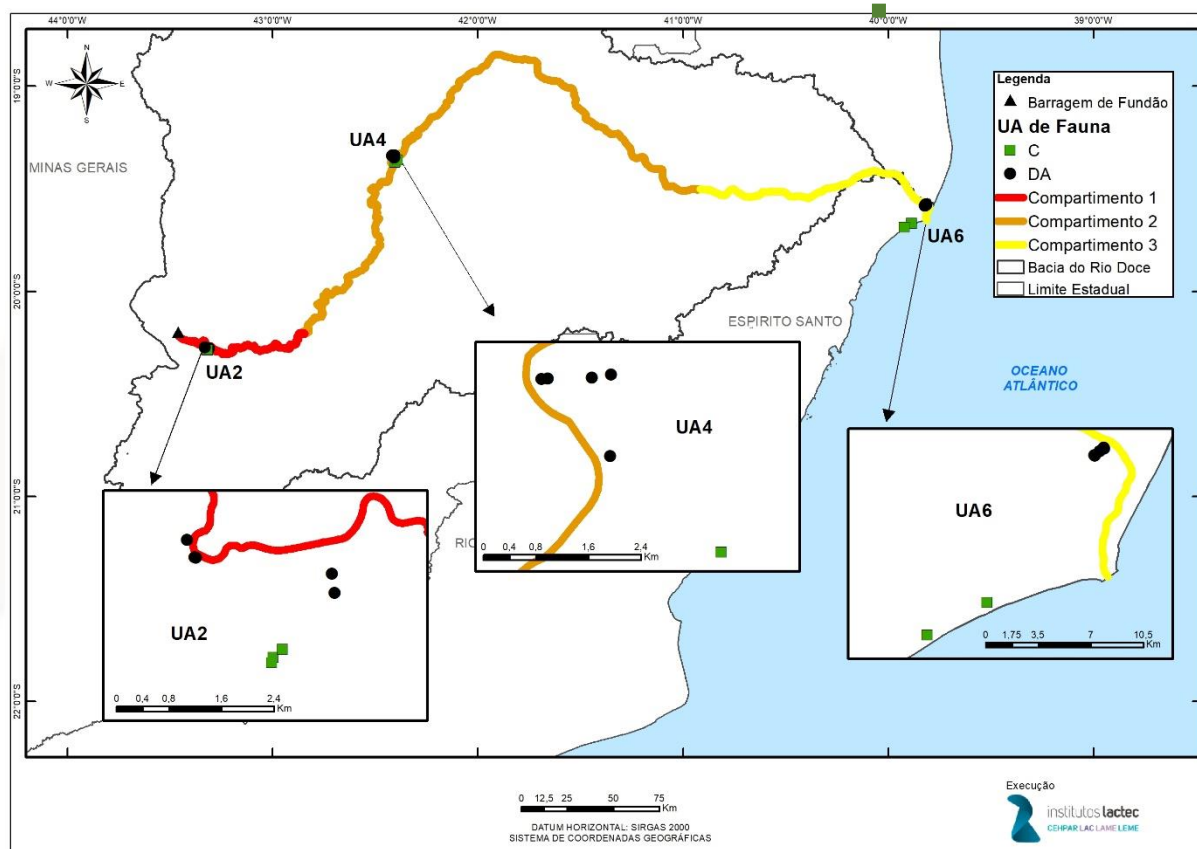
2.2. FAUNA SILVESTRE (HERPETOFAUNA, AVIFAUNA, MASTOFAUNA TERRESTRE DE PEQUENO, MÉDIO E GRANDE PORTE, MASTOFAUNA VOADORA E MASTOFAUNA AQUÁTICA)

2.2.1. HERPETOFAUNA, MASTOFAUNA TERRESTRE DE PEQUENO PORTE E MASTOFAUNA VOADORA

2.2.1.1. PONTOS AMOSTRADOS

Apenas indivíduos pertencentes aos grupos de herpetofauna, mastofauna terrestre de pequeno porte e mastofauna voadora (quirópteros) foram amostrados para análise ecotoxicológica (entenda-se, análises de biomarcadores). A coleta das matrizes necessárias para avaliação destes grupos foi realizada juntamente com as amostragens de monitoramento, em três (3) das seis (6) unidades amostrais (UA) avaliadas no monitoramento de fauna silvestre (para mais detalhes ver dados de Fauna silvestre, item 2.4 do relatório de Diagnóstico de Danos - BRASIL (MPF)/LACTEC, 2020d). As unidades amostrais foram distribuídas nos três (3) compartimentos da bacia do rio Doce, ou seja, compartimento 1 (UA2), compartimento 2 (UA4) e compartimento 3 (UA6), de modo a representar toda a extensão acometida pelo desastre (Figura 12). Em cada uma dessas unidades foram estabelecidos dois sítios amostrais, sendo: um local adjacente à área de passagem e deposição da lama (APDL), denominado de DA, e outro local, afastado da APDL, distante pelo menos em mil (1000) metros da margem do rio Doce, denominado controle (C). Para ampliar o número de espécimes amostrados, os grupos de herpetofauna e mastofauna de pequeno porte tiveram organismos coletados em duas áreas DA de cada um dos compartimentos (Tabela 5).

Figura 12. Mapa da localização dos pontos de amostragem dos exemplares de fauna silvestre utilizados em análises ecotoxicológicas ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre



UA – Unidade Amostral. C – afastado da área de passagem e deposição da lama (APDL) (■) e DA – adjacente à APDL (●). A distribuição dos pontos C e DA correspondem às áreas abrangidas pelas diferentes equipes de fauna silvestre, ou seja, herpetofauna, mastofauna voadora e de pequeno porte.

Tabela 5. Descrição e coordenadas dos pontos de amostragem de fauna silvestre para análises de ecotoxicologia

UA	Compartimento	Ponto	Método	Coordenadas (latitude/longitude - SIRGAS 2000)	Táxon
2	1	C	Armadilha de Intercepção e Queda	20°17'13" S/43°19'09" W	Herpetofauna
		DA1	Armadilha de Intercepção e Queda	20°16'24" S/43°19'47" W	Herpetofauna
		DA2	Armadilha de Intercepção e Queda	20°16'32" S/43°18'40" W	Herpetofauna
4	2	C	Armadilha de Intercepção e Queda	19°22'04" S/42°24'03" W	Herpetofauna
		DA1	Armadilha de Intercepção e Queda	19°20'10" S/42°25'01" W	Herpetofauna
		DA2	Armadilha de Intercepção e Queda	19°20'08" S/42°24'30" W	Herpetofauna
6	3	C	Armadilha de Intercepção e Queda	19°40'03" S/39°53'08" W	Herpetofauna
		DA1	Armadilha de Intercepção e Queda	19°34'30" S/39°48'57" W	Herpetofauna
		DA2	Armadilha de Intercepção e Queda	19°34'47" S/39°49'16" W	Herpetofauna
2	1	C	Armadilha de Captura Viva	20°17'15.54" S /43°19'09.64" W	Mastofauna de pequeno porte
		DA1	Armadilha de Captura Viva	20°16'23.81" S /43°19'47.66" W	Mastofauna de pequeno porte
		DA2	Armadilha de Captura Viva	20°16'41.42" S /43°18'38.75" W	Mastofauna de pequeno porte
4	2	C	Armadilha de Captura Viva	19°22'08.98" S /42°24'16.65" W	Mastofauna de pequeno porte
		DA1	Armadilha de Captura Viva	19°20'10.22" S /42°25'04.14" W	Mastofauna de pequeno porte
		DA2	Armadilha de Captura Viva	19°20'09.44" S /42°24'39.26" W	Mastofauna de pequeno porte
6	3	C	Armadilha de Captura Viva	19°40'02.80" S /39°53'08.15" W	Mastofauna de pequeno porte
		DA1	Armadilha de Captura Viva	19°34'32.11" S /39°48'56.24" W	Mastofauna de pequeno porte
		DA2	Armadilha de Captura Viva	19°34'46.82" S /39°49'16.66" W	Mastofauna de pequeno porte
2	1	C	Redes de neblina	20°17'8.97" S /43°19'4.43" W	Mastofauna voadora (quirópteros)
		DA	Redes de neblina	20°16'15.33" S /43°19'51.39" W	Mastofauna voadora (quirópteros)
4	2	C	Redes de neblina	19°21'35.24" S /42°23'35.70" W	Mastofauna voadora (quirópteros)
		DA	Redes de neblina	19°20'48.08" S /42°24'30.29" W	Mastofauna voadora (quirópteros)
6	3	C	Redes de neblina	19°41'12.85" S /39°55'16.59" W	Mastofauna voadora (quirópteros)
		DA	Redes de neblina	19°34'37.40" S /39°49'5.28" W	Mastofauna voadora (quirópteros)

UA – unidade amostral; C – afastado da área de passagem e deposição da lama (APDL); DA – adjacente à APDL.

2.2.1.2. OBTENÇÃO, PROCESSAMENTO E ACONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS

Devido a grande área de extensão e heterogeneidade do ambiente onde ocorreu o desastre, não foi possível determinar as espécies de cada grupo de fauna que estariam presentes nas unidades amostrais, tampouco o número de indivíduos que seriam amostrados. No entanto, o esforço de coleta foi realizado com o intuito de amostrar sempre indivíduos das espécies mais abundantes de cada grupo de fauna e, no máximo 10 indivíduos por espécie, utilizando metodologias minimamente ou não invasivas para a coleta de amostras.

Os exemplares dos diferentes grupos de fauna foram capturados com armadilhas amplamente utilizadas em estudos de monitoramento e específicas a cada um dos grupos (para mais detalhes ler material e métodos do item 2.4, Fauna silvestre, do presente relatório de Acompanhamento de Danos – TOMO III). Todos os animais capturados por armadilhas e/ou redes específicas foram, o mais rapidamente possível, retirados das mesmas, contidos em sacos de tecido escuro ou em caixas de contenção, a fim de reduzir e padronizar o estresse decorrente do manejo, sendo então preparados para amostragem de sangue venoso. A obtenção do sangue foi realizada com serigas de insulina heparinizadas (heparina sódica, Hemofol®). O volume amostrado não ultrapassou 1% da massa corpórea. Foram amostrados apenas animais com, no mínimo, 30 g de peso corporal.

Considerando o risco anestésico, o longo período necessário para recuperação anestésica, assim como as características de resposta às situações de estresse, os exemplares da herpetofauna tiveram a amostragem de sangue realizada apenas sob contenção física, por meio da punção da veia da base da cauda em lacertídeos; de punção jugular, de vasos da base da cauda ou do seio venoso supraoccipital em quelônios; de punção cardíaca em anuros (SCHUMACHER 1996; BAUER; BAUER, 2014; DUTRA 2014). Os mamíferos de pequeno porte (roedores e marsupiais, com massa corporal entre 30 – 120g) foram anestesiados com associação de cloridrato de xilazina e cloridrato de cetamina (6 mg.kg⁻¹ + 40 mg.kg⁻¹, respectivamente), administrados via intramuscular, seguida de punção cardíaca. Marsupiais acima de 120 g foram submetidos apenas à contenção física e coleta de sangue por meio de punção da veia caudal lateral, direita ou esquerda (THURMON; TRANQUILLI; BENSON, 1996; NASCIMENTO; HORTA, 2014; TEIXEIRA, 2014). Para quirópteros, as amostragens sanguíneas foram realizadas apenas sob contenção física, por meio da punção de ramos da veia ulnar ou cefálica (protopatagial) (HEARD, 2003; CLARK; HOLZ; DUIGNAN, 2004; ESHAR; WEINBERG, 2010).

Para todos os grupos, o sangue coletado foi acondicionado em microtubo e teve uma alíquota imediatamente transferida para um tubo criogênico, contendo tampão de criopreservação (BONY et al., 2008; SANTOS et al., 2016) na proporção de diluição de 1:6, o qual foi imediatamente congelado em nitrogênio líquido de modo a garantir a viabilidade da amostra para o ensaio de avaliação de dano ao DNA (ou ensaio cometa). Duas alíquotas (5 µl cada) foram utilizadas para a preparação de extensões

sanguíneas, em duplicada (Figura 5), necessárias às análises de micronúcleos (MN) e alterações nucleares em eritrócitos (ANEs, apenas para herpetofauna).

O restante do sangue foi centrifugado (10 min, 3.000 rpm, temperatura ambiente) para a obtenção do plasma. Uma alíquota (2 a 3 µl) foi utilizada para leitura de proteínas plasmáticas totais com auxílio do refratômetro portátil (RHC-200ATC, MEGABRIX®). O volume sobressalente foi imediatamente transferido para tubo criogênico e congelado em nitrogênio líquido. O *pellet* de eritrócitos presente no microtubo, formado após a centrifugação do sangue, foi lavado por duas vezes com PBS pH 7,4. Em seguida, recebeu solução hemolisante (BEUTLER, 1975), numa proporção de 1:10 e o hemolisado foi imediatamente transferido para tubos criogênicos e acondicionado em botijões com nitrogênio líquido, onde foram transportados até o laboratório nos Institutos LACTEC, em Curitiba.

Além das amostras de sangue, os exemplares de mastofauna de pequeno porte e quitópteros, tiveram amostras pelos e fezes coletadas. As fezes eram coletadas quando os organismos defecavam durante as amostragens de sangue ou no período de repouso dentro das caixas ou embalagens de contenção. Este material era coletado com auxílio de espátula descartável de madeira e acondicionado em microtubos identificados externamente com número sequencial de identificação e a data da coleta. Em seguida, estas amostras eram acondicionadas em caixas plásticas vedadas e mantidas sob refrigeração até a chegada no laboratório. As amostras de pelos, por sua vez, eram obtidas através do corte ou raspagem do dorso de cada um dos indivíduos capturados, acondicionadas em microtubos e armazenadas em local seco até serem encaminhadas ao laboratório.

No laboratório, as amostras de sangue criopreservadas foram imediatamente processadas para a análise dano ao DNA (ensaio cometa). As lâminas com extensões sanguíneas foram analisadas quanto à presença de MN e ANEs. As amostras de plasma foram transferidas para freezer -20° C onde foram mantidas até a realização das análises de osmolalidade, íons (Na^+ , K^+ , Cl^- , Mg^{2+}), glicose e lactato. As amostras de hemolisado de eritrócitos foram descongeladas, centrifugadas (16.000 rpm, 45 min, 4° C) e o sobrenadante aliquoteado para a realização das análises das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), glutational peroxidase (GPx), glutational S-transferase (GST), das concentrações totais de hemoglobina (Hb), glutational reduzida (GSH), metalotioneínas (MT), da peroxidação lipídica (LPO/TBARS) e da concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPTs). Os resultados das atividades específicas das enzimas e das concentrações de GSH, MT, LPO e EPTs foram normalizados pela concentração de hemoglobina (Hb) dos hemolisados. As amostras de fezes e pelos foram imediatamente encaminhadas para determinação da concentração de EPTs. O resumo da metodologia de coleta e das análises que foram realizadas em cada uma das matrizes obtidas destes organismos encontra-se na Figura 13.

Figura 13. Esquema da metodologia de preparo do material coletado e das análises empregadas para avaliação da fauna e suas respectivas metodologias.



Fonte: LACTEC

2.2.1.3. ANÁLISES DAS AMOSTRAS

a) Análises sanguíneas

Análise de danos no DNA – ensaio cometa

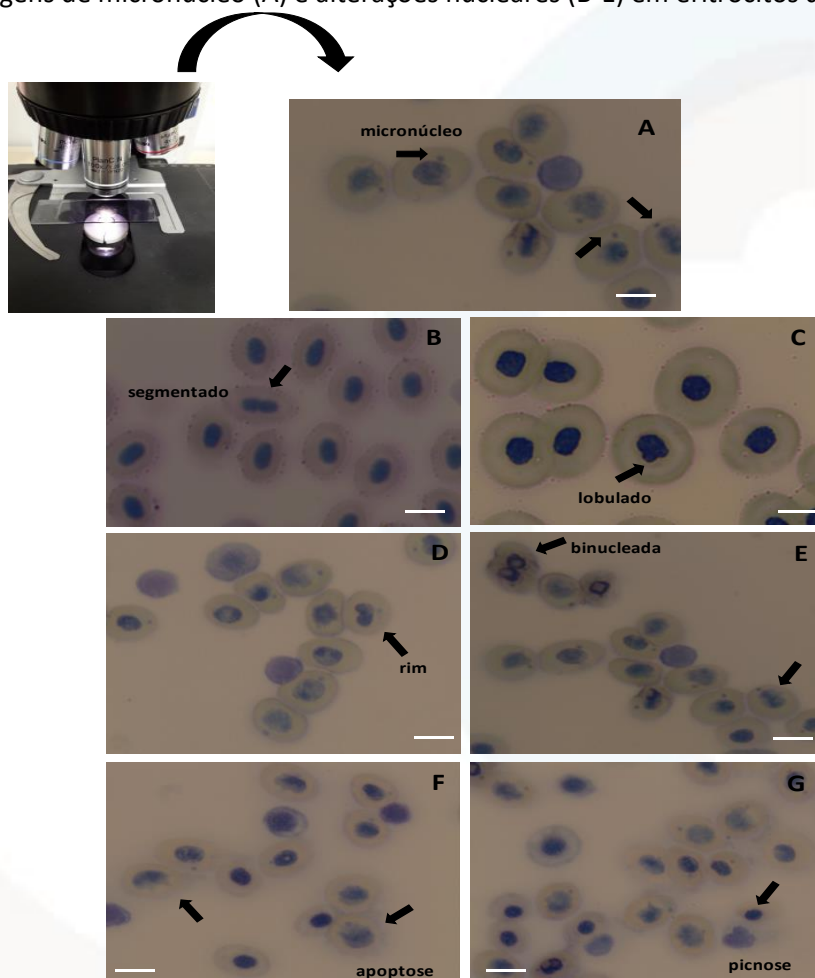
O ensaio alcalino do cometa foi realizado para os exemplares da fauna terrestre exatamente como descrito para as amostras de peixes (item 2.1.3.1 do presente relatório).

Análise de micronúcleo (MN) e alterações nucleares em eritrócitos (ANEs)

As lâminas contendo as extensões sanguíneas foram analisadas quanto à presença de MN e ANEs conforme protocolos descritos por Carrano; Heddle (1973); Schimd (1975) e Carrasco et al. (1990). O preparo das extensões sanguíneas foi realizado como previamente descrito para peixes (item 2.1.3.1 do presente relatório). A coloração foi realizada com Giemsa 10% por um período que variou entre 20 a 60 min, dependendo do grupo faunístico. Um total de 3000 (mastofauna de pequeno porte e quirópteros) ou 1000 (herpetofauna) eritrócitos foram observados e contados, aleatoriamente, em microscópio óptico (1000x de magnificação). Como apenas a herpetofauna possui eritrócitos nucleados, neste grupo tanto a análise de MN quanto a de ANEs foram realizadas, sendo considerados para as análises apenas eritrócitos nucleados e com membranas celulares e nucleares intactas.

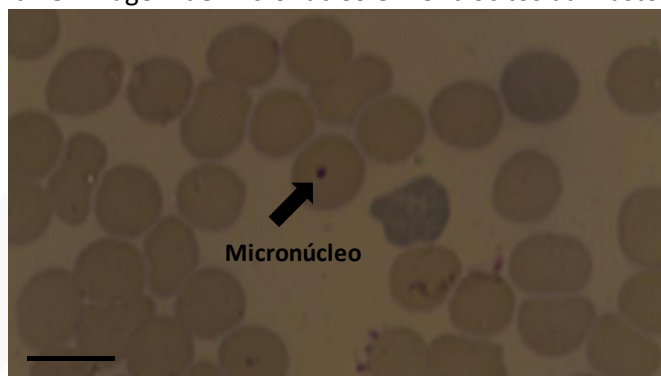
Partículas arredondadas, com um diâmetro de 1/5 a 1/20 do núcleo principal, sem nenhuma ligação com o mesmo, com uma coloração característica coerente com o núcleo principal e uma imagem não refratária, foram considerados como micronúcleos (Figura 14 A). Foram consideradas como anormalidades nucleares: núcleo segmentado (Figura 14 B), núcleo lobulado (Figura 14 C), núcleo em forma de rim (Figura 14 D), células binucleadas (Figura 14 E), células em apoptose (Figura 14 F) e células em picnose (Figura 14 G). A frequência média de MN e ANEs foram calculadas e expressas por 1000 células (%). Para mastofauna de pequeno porte e quirópteros apenas a análise de MN foi realizada, uma vez que os eritrócitos desses organismos são anucleados, assim, a presença de partículas arredondadas, com um diâmetro de 1/5 a 1/20 do tamanho da célula, com uma coloração característica e coerente e uma imagem não refratária, foi considerada como micronúcleos (Figura 15). A frequência média de MN também foi calculada e expressa por 1000 células (%).

Figura 14. Imagens de micronúcleo (A) e alterações nucleares (B-E) em eritrócitos de herpetofauna



Fonte: LACTEC; escala 5µm.

Figura 15. Imagem de micronúcleo em eritrócitos da mastofauna



Fonte: LACTEC, escala 50µm

b) Análises plasmáticas

A análise de osmolalidade, íons (Na^+ , K^+ , Cl^- , Mg^{2+}), glicose e lactato foram realizados como descrito para peixes no item 2.1.3.2 do presente relatório.

c) Análises no hemolisado

As análises de SOD, CAT, GPx, GST, GSH, MT, e LPO foram realizadas de acordo com as metodologias descritas para peixes no item 2.1.3.3 do presente relatório. A determinação da concentração de Hb, necessária para a normalização dos cálculos destes biomarcadores, foi realizada conforme protocolo descrito por Kampen e Zijlstra, 1964. Uma alíquota das mesmas amostras utilizadas para as análises supracitadas foi encaminhada para a determinação da concentração de EPTs e os resultados obtidos foram, também, normalizados pela concentração de Hb, sendo apresentados como $\mu\text{g. mg de Hb}^{-1}$. Assim como descrito para peixes, as amostras cujos resultados das concentrações de EPTs apresentaram-se na faixa entre o LD e o LQ tiveram seus valores substituídos pelo LQ correspondente ao limite de quantificação de cada um dos elementos avaliados. Assim como as demais amostras, esses resultados foram normalizados pela concentração de hemoglobina da amostra específica.

2.2.2. HERPETOFAUNA (QUELÔNIOS - TARTARUGAS MARINHAS)

Para análise dos possíveis danos causados pelo rompimento da barragem de Fundão a estes representantes da herpetofauna, amostras de sangue, músculo e casca de ovos de filhotes da espécie de tartaruga marinha *Caretta caretta* (tartaruga-cabeçuda) capturados na Reserva Biológica de Comboios, Linhares – ES, nas estações reprodutivas dos anos 2015 a 2018, foram cedidas ao LACTEC, por meio de um termo de cooperação técnica, pelo Laboratório de Ictiologia Aplicada da Universidade de Vila Velha. As amostras foram separadas por período reprodutivo/amostragem de modo a serem analisadas quanto aos efeitos do desastre, após a chegada da pluma de rejeitos à foz do rio Doce, ao

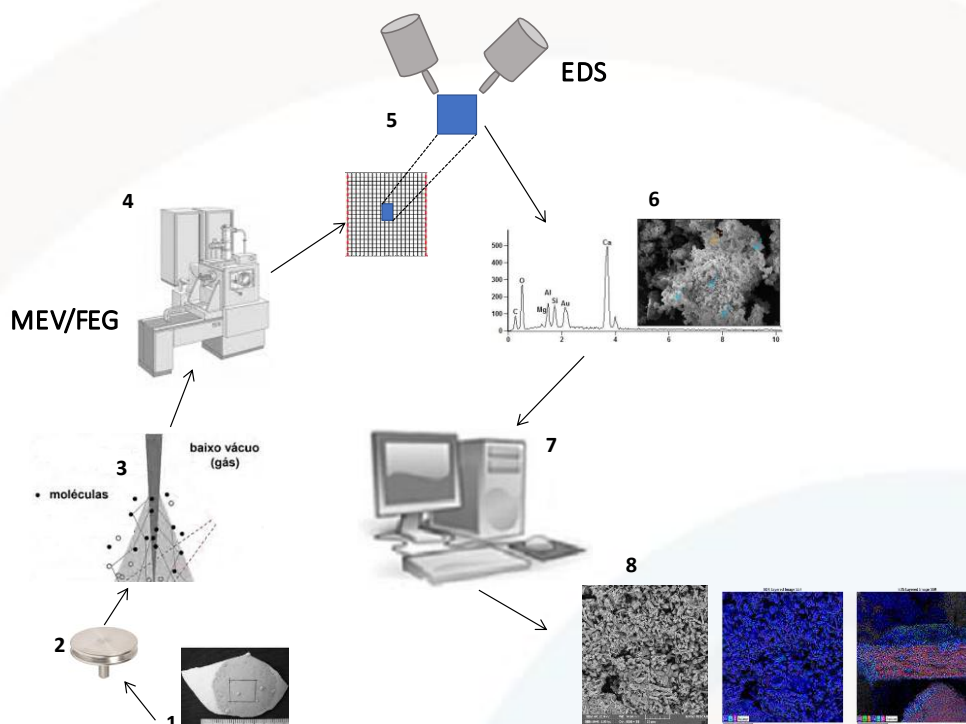
longo do tempo. Deste modo, neste estudo, foram avaliadas 23 amostras de sangue e músculo de exemplares de filhotes de *Caretta caretta* capturados no período reprodutivo de 2015/2016; 29 amostras obtidas no período reprodutivo de 2016/2017 e 30 amostras obtidas no período reprodutivo de 2017/2018. Foram analisadas 8 amostras de cascas de ovos das tartarugas em cada um dos períodos reprodutivos.

As amostras de sangue foram submetidas a extração do hemolisado, conforme protocolo já descrito anteriormente, o qual foi empregado nas análises dos biomarcadores SOD, GPx, GST, GSH, MT e LPO, conforme metodologias já descritas para peixes no item 2.1.3.3 do presente relatório. Assim como descrito para os outros grupos de fauna, estes marcadores foram normalizados pela concentração de Hb, determinada conforme protocolo descrito por Kampen e Zijlstra (1964). Uma alíquota das mesmas amostras de hemolisado, utilizadas para as análises supracitadas, foi encaminhada para a determinação da concentração de EPTs e os resultados obtidos também foram normalizados pela concentração de Hb, sendo apresentados como $\mu\text{g. mg de Hb}^{-1}$. As amostras de músculo foram desidratadas e encaminhadas para as análises de determinação da concentração de EPTs, conforme metodologia já descrita para peixes no item 2.1.3.3 do presente relatório. Do mesmo modo como descrito previamente, tanto para as determinações realizadas em hemolisado quanto no músculo, as amostras cujos resultados apresentaram-se entre o LD e o LQ tiveram seus valores substituídos pelo LQ correspondente a cada um dos elementos avaliados em cada uma das matrizes. Esses resultados foram normalizados pela concentração de hemoglobina ou convertidos à base úmida, respectivamente.

As amostras de cascas de ovos (n=8 por período reprodutivo), por sua vez, foram submetidas à análise de microscopia eletrônica de varredura com a utilização de microsonda de dispersão de energia de raios-X (MEV-EDS), a qual permite a análise química qualitativa e semi-quantitativa de elementos químicos em materiais desta natureza e, cujo objetivo foi a análise morfológica e de microestrutura das amostras, de modo a complementar as análises de EPTs realizadas em tecido muscular dos indivíduos. Para essa análise foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura, tipo FEG (field emission gun) com monocristal de tungstênio e camada de zircônio, modelo MIRA3 LM, marca TESCAN®, com uso dos detectores de elétrons secundários (SE) e de elétrons retroespalhados (BSE) marca TESCAN®, além do uso da microsonda de espectroscopia de energia dispersiva de raios-X para obtenção das informações químicas do material. Os parâmetros do equipamento seguiram com a tensão do feixe de elétrons de 20 kV, intensidade do feixe (beam intensity) 15,00, abertura do feixe (spot size) de 17,0 nm, distância de trabalho (work distance-WD) de 15 mm e modo de resolução para a varredura. As microanálises foram realizadas em áreas representativas do material, com tratamento prévio de cobertura em ouro para o aumento de sua condutividade. As avaliações qualitativas e semi-quantitativas dos elementos químicos presentes nos materiais, procederam com o uso do detector de

espectroscopia de raios-X, marca Oxford Instruments®. As etapas da análise são apresentadas na Figura 16.

Figura 16. Etapas de realização da análise morfológica e de microestrutura por MEV-EDS



Números ao lado das imagens correspondem as etapas pelas quais a amostra passa para a realização da análise de MEV-EDS, a saber: 1 – separação do fragmento da amostra; 2 – fixação da amostra no stub; 3 - metalização com ouro; 4 – inclusão no microscópio eletrônico de varredura e definição dos parâmetros do método no equipamento; 5 – Determinação dos pontos de análise/leitura; 6 – salvamento dos espectros gerados em cada ponto de análise; 7 – seleção de imagens; 8 – montagem das pranchas de resultados. Adaptado de Sampaio et al. (2018).

2.2.3. AVIFAUNA

Os pontos de amostragem das aves são coincidentes aos compartimentos e unidades amostrais dos demais grupos de fauna. Nestes, as aves foram capturadas, por meio de rede de neblina, para a colocação de anilhas de marcação (para mais detalhes ver item 2.4, Fauna Silvestre, do presente relatório de Acompanhamento de Danos – TOMO III). Todas as aves capturadas e anilhadas durante as campanhas de monitoramento tiveram amostras de penas (no mínimo 5 unidades de penas de contorno, ou tetrizes) coletadas do peito do animal e, imediatamente, acondicionadas em envelopes de papel filtro, e em seguida em sacos plásticos tipo zip-lock, os quais foram identificados, com o mesmo número das anilhas, e acondicionados em caixas de isopor, de modo a serem mantidos secos e longe de alterações de temperatura e radiação UV, até serem encaminhados ao laboratório. No laboratório as amostras eram preparadas para as análises de determinação da concentração de EPTs, conforme protocolo descrito no item 2.1.3.3 do presente relatório.

2.2.4. MASTOFAUNA TERRESTRE DE MÉDIO E GRANDE PORTE

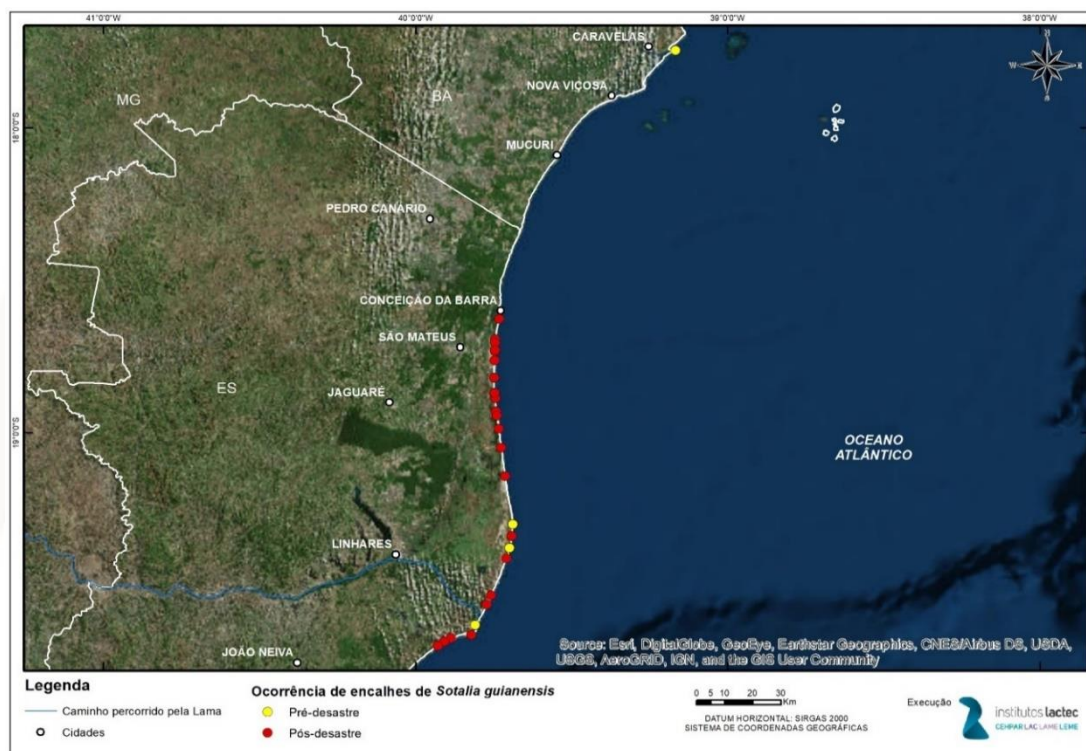
Os representantes da mastofauna terrestre de médio e grande porte tiveram amostras de pelos e fezes coletadas nas áreas correspondentes aos pontos amostrais dos demais grupos, exatamente nos mesmos compartimentos e unidades amostrais. Para isso, foram estabelecidas transecções lineares onde, através de deslocamento e busca ativa, a procura por vestígios destes grupos foi realizada. As amostras fecais eram obtidas apenas quando identificadas como recentemente depositadas, ou seja, frescas. Estas eram recolhidas, com o auxílio de espátulas de madeira descartáveis e acondicionadas em tubos criogênicos previamente preparados. Em seguida, as amostras eram acondicionadas em caixas plásticas vedadas e mantidas sob refrigeração até a chegada no laboratório. As amostras de pelos, obtidas de carcaças ou restos de mamíferos encontrados durante as buscas, foram coletadas com o auxílio de pinças de dissecação e acondicionadas em sacos plásticos tipo zip-lock onde foram mantidas secas até a chegada no laboratório.

2.2.5. MASTOFAUNA AQUÁTICA (CETÁCEOS)

Amostras de diferentes tecidos (gordura, rim, fígado e músculo) de exemplares da mastofauna aquática (cetáceos), foram obtidas de carcaças provenientes de encalhes ocorridos tanto pré quanto pós-desastre, em localidades entre a foz do rio Doce e Caravelas-BA, e destinadas para a determinação de EPTs. A coleta dessas amostras de tecidos foi realizada pelo Instituto Baleia Jubarte (IBJ) e a cessão ao LACTEC se deu por meio de um termo de cooperação técnica.

As amostras dos 77 espécimes foram separadas por espécie e por período de ocorrência do encalhe. Foram consideradas como amostras pré-desastre as provenientes de carcaças encontradas entre 2011 e outubro de 2015, enquanto aquelas coletadas após a chegada da pluma de rejeitos à foz do rio Doce foram consideradas como pós-desastre e agrupadas de acordo com o ano em que foram coletadas, ou seja, 2015 (amostras de novembro e dezembro); 2016, 2017 e 2018. Desta forma, neste estudo, foram avaliadas as concentrações de EPTs em 56 amostras de exemplares de boto-cinza (*Sotalia guianenses*), das quais 8 correspondem a encalhes pré-desastre e 48 de encalhes pós-desastre (Figura 17); 3 amostras de exemplares de Toninha ou Franciscana (*Pontoporia blainvillei*), das quais 1 amostra corresponde a encalhe pré-desastre e 2 amostras de encalhes pós-desastre e, 18 amostras de baleia-jubarte (*Megaptera novaeangliae*) obtidas, apenas, de encalhes pós-desastre. A análise das amostras teciduais ocorreu, exatamente, como descrito para peixes no presente relatório. Todos os resultados foram convertidos à base úmida.

Figura 17. Localização dos encalhes de botos-cinza (*Sotalia guianensis*) cujas amostras foram destinadas para a análise das concentrações de EPTs.



2.2.6. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados dos biomarcadores e das concentrações de EPTs foram submetidos à análise de normalidade e homogeneidade de variância através dos testes de Shapiro-Wilk e Brown-Forsythe, respectivamente. Para herpetofauna, mastofauna terrestre de pequeno porte e mastofauna voadora os resultados considerados paramétricos foram submetidos ao teste t, enquanto aqueles considerados não paramétricos foram submetidos ao teste de Mann-Whitney (SigmaStat 14.0® e R®). Os resultados foram comparados quanto às suas diferenças em relação ao ponto amostral (C x DA) e em relação às coletas/estações amostrais em um mesmo ponto, bem como entre os compartimentos amostrados, numa mesma estação. Para mastofauna aquática, os resultados das concentrações de EPTs foram avaliados para cada uma das espécies e para cada um dos tecidos analisados (gordura, músculo, rim e fígado) quanto às diferenças entre os quatro períodos amostrais (pré-desastre, pós-2015, pós-2016, pós-2017 e pós-2018) através da análise de variância (ANOVA) de uma via, seguido do teste de Tukey, para os resultados considerados paramétricos, enquanto aqueles considerados não paramétricos foram submetidos ao teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn (SigmaStat 14.0® e R®). Todos os resultados foram apresentados como média $\pm$ erro padrão da média e o nível de significância considerado foi menor que 0,05 ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. PEIXES

Este relatório corresponde a apresentação dos resultados obtidos ao longo de um ano de diagnóstico ecotoxicológico, o qual contempla quatro fases de campo realizadas trimestralmente entre os anos de 2018-2019, de modo a contemplar as estações seca (junho/julho de 2018 e julho/agosto de 2019) e chuvosa (outubro/novembro de 2018 e fevereiro/março de 2019). Ao longo de todas as amostragens foram obtidos um total de 1275 espécimes ao longo de toda a extensão acometida pelo desastre (porções continental, estuarina e marinha). Estes compreenderam 55 espécies, 14 ordens e 6 hábitos alimentares (Tabela 6).

É importante mencionar que durante a primeira campanha, por conta das condições climáticas, não foi possível realizar a amostragem dos peixes da região marinha para análises dos biomarcadores. Na ocasião, o mar estava bastante agitado o que impossibilitou a retirada de sangue e tecidos dos animais em alto mar. Assim, embora os animais tivessem sido mantidos em caixas com grande volume de água e aeração/oxigenação constante durante todo o período de transporte até a costa, quando o barco atracou, muitos dos exemplares estavam moribundos, o que poderia prejudicar as análises e, deste modo, inviabilizar a correta interpretação dos dados. Embora estes animais tenham sido utilizados pela equipe de monitoramento da ictiofauna, para a avaliação ecotoxicológica, apenas o tecido muscular foi coletado e destinado para a determinação da concentração de EPTs.

Adicionalmente, durante a primeira campanha, a foz do rio Piraquê-Açú não havia sido estabelecida como ponto controle da região estuarina, portanto, não foi realizada a amostragem neste ponto. Ainda com relação a este ponto, durante a segunda campanha, apesar dos esforços de amostragem, o número de animais capturados neste estuário ($n=2$) não foi suficiente para que o mesmo pudesse ser utilizado como comparativo ao ponto da foz do rio Doce.



Tabela 6. Descritivo das espécies de peixes capturadas para avaliação ecotoxicológica, nas campanhas seca e chuvosa, nos diferentes compartimentos dos ambientes aquático continental, estuarino e marinho acometidos pelo desastre

Região	Compartimento	Localização do ponto	Ponto	Espécie	Ordem	Hábito
Continental	1	Rio Piranga	CN	<i>Astyanax fasciatus</i>	Characiformes	omnívoros
				<i>Geophagus brasiliensis</i>	Perciformes	invertívoro bentônico
				<i>Hypostomus affinis</i>	Siluriformes	detritívoro
				<i>Hoplias intermedius</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Loricariichthys castaneus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Oligosarcus acutirostris</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Psalidodon fasciatus</i>	Characiformes	invertívoro bentônico
				<i>Rhamdia quelen</i>	Siluriformes	omnívoros
		Rio do Carmo	CP	<i>Astyanax fasciatus</i>	Characiformes	omnívoros
				<i>Geophagus brasiliensis</i>	Perciformes	invertívoro bentônico
				<i>Leporinus coppelai</i>	Characiformes	omnívoros
				<i>Loricariichthys castaneus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Megaleporinus conirostris</i>	Characiformes	omnívoros
				<i>Oligosarcus acutirostris</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Prochilodus vimboides</i>	Characiformes	invertívoro bentônico
		Rio Gualaxo	DA	<i>Astyanax fasciatus</i>	Characiformes	omnívoros
				<i>Delturus carionotus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Geophagus brasiliensis</i>	Perciformes	invertívoro bentônico
				<i>Hoplias brasiliensis</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplias intermedius</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hypostomus affinis</i>	Siluriformes	detritívoro
				<i>Loricariichthys castaneus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Oligosarcus acutirostris</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Psalidodon fasciatus</i>	Characiformes	invertívoro bentônico
				<i>Rhamdia quelen</i>	Siluriformes	omnívoros
		Dique S4	DA	<i>Astyanax fasciatus</i>	Characiformes	omnívoros
				<i>Astyanax bimaculatus</i>	Characiformes	omnívoros
				<i>Australoheros ipatinguensis</i>	Perciformes	detritívoro
				<i>Coptodon rendalli</i>	Cichliformes	detritívoro
				<i>Hoplias brasiliensis</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplias intermedius</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Oligosarcus acutirostris</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Oreochromis niloticus</i>	Perciformes	omnívoros
				<i>Psalidodon fasciatus</i>	Characiformes	invertívoro bentônico

Região	Compartimento	Localização do ponto	Ponto	Espécie	Ordem	Hábito
Continental	2	Rio Corrente Grande	CN	<i>Coptodon rendalli</i>	Perciformes	detritívoro
				<i>Loricariichthys castaneus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Oreochromis niloticus</i>	Perciformes	omnívoro
				<i>Pimelodus maculatus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Pygocentrus nattereri</i>	Characiformes	ictiófago
		Rio Piracicaba	CP	<i>Astyanax bimaculatus</i>	Characiformes	omnívoro
				<i>Geophagus brasiliensis</i>	Perciformes	invertívoro bentônico
				<i>Hoplias brasiliensis</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Loricariichthys castaneus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Oligosarcus acutirostris</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Psalidodon fasciatus</i>	Characiformes	invertívoro bentônico
		Doce-Gov. Valadares	DA	<i>Astyanax bimaculatus</i>	Characiformes	omnívoro
				<i>Delturus carionotus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Hoplias aff. malabaricus</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplias brasiliensis</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplias intermedius</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplias sp.</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hypostomus affinis</i>	Siluriformes	detritívoro
				<i>Loricariichthys castaneus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Oligosarcus acutirostris</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Pimelodus maculatus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Pogonopoma wertheimeri</i>	Siluriformes	detritívoro
				<i>Psalidodon fasciatus</i>	Characiformes	invertívoro bentônico
				<i>Pygocentrus nattereri</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Trachelyopterus striatulus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
		Rio Pancas	CN	<i>Cichla kelberi</i>	Cichliformes	ictiófago
				<i>Coptodon rendalli</i>	Cichliformes	detritívoro
				<i>Delturus carionotus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Geophagus brasiliensis</i>	Perciformes	invertívoro bentônico
				<i>Hoplias aff. malabaricus</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplias intermedius</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplosternum littorale</i>	Siluriformes	omnívoro
				<i>Hypostomus affinis</i>	Siluriformes	detritívoro
				<i>Loricariichthys castaneus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Megaleporinus conirostris</i>	Characiformes	omnívoro
				<i>Oligosarcus acutirostris</i>	Characiformes	ictiófago

Região	Compartimento	Localização do ponto	Ponto	Espécie	Ordem	Hábito
Estuarina				<i>Pimelodus maculatus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Prochilodus vimboides</i>	Characiformes	invertívoro bentônico
				<i>Psalidodon fasciatus</i>	Characiformes	invertívoro bentônico
				<i>Pseudauchenipterus affinis</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Pygocentrus nattereri</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Trachelyopterus striatulus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
		Rio Pequeno	CP	<i>Astyanax bimaculatus</i>	Characiformes	omnívoro
				<i>Hoplias aff. malabaricus</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplosternum littorale</i>	Siluriformes	omnívoro
				<i>Megaleporinus conirostris</i>	Characiformes	omnívoro
				<i>Oligosarcus acutirostris</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Pimelodus maculatus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Pygocentrus nattereri</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Pygocentrus piraya</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Trachelyopterus striatulus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
		Doce - Colatina	DA	<i>Astyanax bimaculatus</i>	Characiformes	omnívoro
				<i>Crenicichla lacustris</i>	Perciformes	ictiófago
				<i>Geophagus brasiliensis</i>	Perciformes	invertívoro bentônico
				<i>Hoplias intermedius</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplias aff. malabaricus</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Hoplosternum littorale</i>	Siluriformes	omnívoro
				<i>Hypostomus affinis</i>	Siluriformes	detritívoro
				<i>Hypostomus sp</i>	Siluriformes	detritívoro
				<i>Loricariichthys castaneus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Pimelodus maculatus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Pseudauchenipterus affinis</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Pygocentrus nattereri</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Pygocentrus piraya</i>	Characiformes	ictiófago
				<i>Trachelyopterus striatulus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
		Foz do Piraquê-Açú	CN	<i>Abudefduf saxatilis</i>	Perciformes	zoobentívoro
				<i>Caranx latus</i>	Carangiformes	zoobentívoro
				<i>Chaetodipterus faber</i>	Ephippiformes	zoobentívoro
				<i>Citharichthys spilopterus</i>	Pleuronectiformes	detritívoro
				<i>Eugerres brasilianus</i>	Gerreiformes	zoobentívoro
				<i>Genidens genidens</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Harengula clupeola</i>	Clupeiformes	planctívoro

Região	Compartimento	Localização do ponto	Ponto	Espécie	Ordem	Hábito
Marinha	4	Foz do rio Doce	DA	<i>Lutjanus alis</i>	Lutjaniformes	detritívoro
				<i>Lutjanus jocu</i>	Lutjaniformes	detritívoro
				<i>Mugil curema</i>	Mugiliformes	herbívoro
				<i>Polydactylus virginicus</i>	Carangia	zoobentívoro
				<i>Genidens barbus</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Genidens genidens</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Gobionellus oceanicus</i>	Perciformes	invertívoro bentônico
				<i>Menticirrhus littoralis</i>	Perciformes	zoobentívoro
				<i>Pimelodus maculatus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Pseudauchenipterus affinis</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
				<i>Trachelyopterus striatulus</i>	Siluriformes	invertívoro bentônico
	5	1 – 5 km da costa	DDA	<i>Cathorops spixii</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Genidens genidens</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Stellifer brasiliensis</i>	Perciformes	zoobentívoro
		3 – 5 km da costa	DA	<i>Achirus lineatus</i>	Pleuronectiformes	zoobentívoro
				<i>Aspistor luniscutis</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Cathorops spixii</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Conodon nobilis</i>	Perciformes	zoobentívoro
				<i>Nebris microps</i>	Percomorpharia	zoobentívoro
				<i>Paralanchurus brasiliensis</i>	Percomorpharia	zoobentívoro
				<i>Stellifer brasiliensis</i>	Perciformes	zoobentívoro
				<i>Symphurus plagusia</i>	Pleuronectiformes	zoobentívoro
		5 – 5 km da costa	DDA	<i>Aspistor luniscutis</i>	Siluriformes	zoobentívoro
<i>Cathorops spixii</i>	Siluriformes			zoobentívoro		
<i>Conodon nobilis</i>	Perciformes			zoobentívoro		
<i>Genidens barbus</i>	Siluriformes			zoobentívoro		
<i>Paralanchurus brasiliensis</i>	Percomorpharia			zoobentívoro		
2 – 20 km da costa	DA	<i>Stellifer brasiliensis</i>	Perciformes	zoobentívoro		
		<i>Cathorops spixii</i>	Siluriformes	zoobentívoro		
		<i>Genidens genidens</i>	Siluriformes	zoobentívoro		
		<i>Nebris microps</i>	Percomorpharia	zoobentívoro		
		<i>Paralanchurus brasiliensis</i>	Percomorpharia	zoobentívoro		
4 – 20 km da costa	DA	<i>Stellifer brasiliensis</i>	Perciformes	zoobentívoro		
		<i>Aspistor luniscutis</i>	Siluriformes	zoobentívoro		

Região	Compartimento	Localização do ponto	Ponto	Espécie	Ordem	Hábito
				<i>Cathorops spixii</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Citharichthys spilopterus</i>	Pleuronectiformes	detritívoro
				<i>Conodon nobilis</i>	Perciformes	zoobentívoro
				<i>Nebris microps</i>	Percomorpharia	zoobentívoro
				<i>Paralichthys sp</i>	Pleuronectiformes	zoobentívoro
				<i>Paralanchurus brasiliensis</i>	Percomorpharia	zoobentívoro
				<i>Stellifer brasiliensis</i>	Perciformes	zoobentívoro
				<i>Trinectes paulistanus</i>	Pleuronectiformes	zoobentívoro
		6 – 20km da costa	DDA	<i>Aspistor luniscutis</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Cathorops spixii</i>	Siluriformes	zoobentívoro
				<i>Conodon nobilis</i>	Perciformes	zoobentívoro
				<i>Macrodon ancylodon</i>	Percomorpharia	ictiófago
				<i>Nebris microps</i>	Percomorpharia	zoobentívoro
				<i>Paralichthys sp</i>	Pleuronectiformes	zoobentívoro
				<i>Paralanchurus brasiliensis</i>	Percomorpharia	zoobentívoro
				<i>Stellifer stellifer</i>	Perciformes	zoobentívoro
				<i>Symphurus sp</i>	Pleuronectiformes	zoobentívoro

CN – controle negativo; CP – controle positivo; DA – dentro da APDL. Para ordem e hábitos alimentares foram consideradas as informações disponibilizadas pelo Fishbase e a avaliação do conteúdo estomacal (Relatório de Acompanhamento de Danos – TOMO II), respectivamente

3.1.1. AMBIENTE AQUÁTICO CONTINENTAL

Compartimento 1

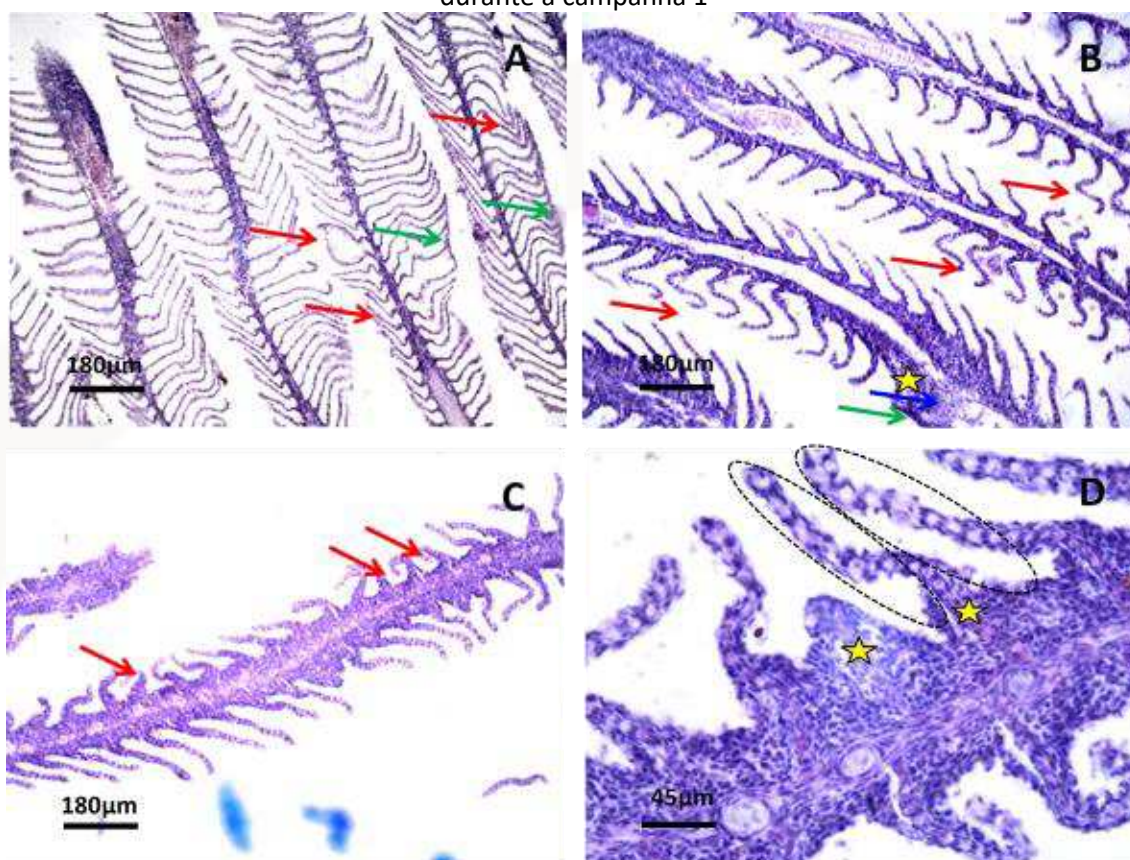
3.1.1.1. ALTERAÇÕES NAS CONDIÇÕES CORPORAIS E/OU NA SAÚDE

3.1.1.1.1. Prejuízos à estrutura e função das brânquias (biomarcador: histopatologia de brânquias)

Todos os peixes capturados no compartimento 1 apresentaram inúmeras alterações na estrutura das brânquias. Dentre as alterações morfológicas identificadas nas brânquias dos peixes capturados no ponto controle negativo (CN) desse compartimento destacam-se: desestruturação do filamento branquial, fusão parcial e/ou total das lamelas primárias, aneurisma (leve), proliferação celular, deslocamento epitelial, hipertrofia, hiperplasia, alterações morfológicas da disposição das lamelas e presença de material castanho aderido nas lamelas (e.g., Figura 18; Figura 19; Figura 20; Figura 21). Os peixes capturados no ponto controle positivo (CP) apresentaram: desestruturação do filamento branquial, aneurisma (leve ou moderado), proliferação celular, fusão parcial e/ou total das lamelas primárias, hiperplasia, hipertrofia, deslocamento epitelial e atrofia (e.g., Figura 22; Figura 23; Figura 24; Figura 25). Os peixes capturados no ponto dentro da APDL (DA) apresentaram: desestruturação do filamento branquial, fusão parcial e/ou total das lamelas primárias, aneurisma (leve ou moderado), proliferação celular, deslocamento epitelial, hipertrofia, hiperplasia, presença de material castanho aderido nas lamelas e atrofia (e.g., Figura 26; Figura 27; Figura 28; Figura 29). Os peixes capturados no ponto Dique S4 (DQ), por sua vez, apresentaram: desestruturação do filamento branquial, fusão parcial e/ou total das lamelas primárias, aneurisma (leve ou moderado), proliferação celular, deslocamento epitelial, hipertrofia, hiperplasia, edema, parasitas e atrofia (e.g., Figura 30; Figura 31; Figura 32; Figura 33).

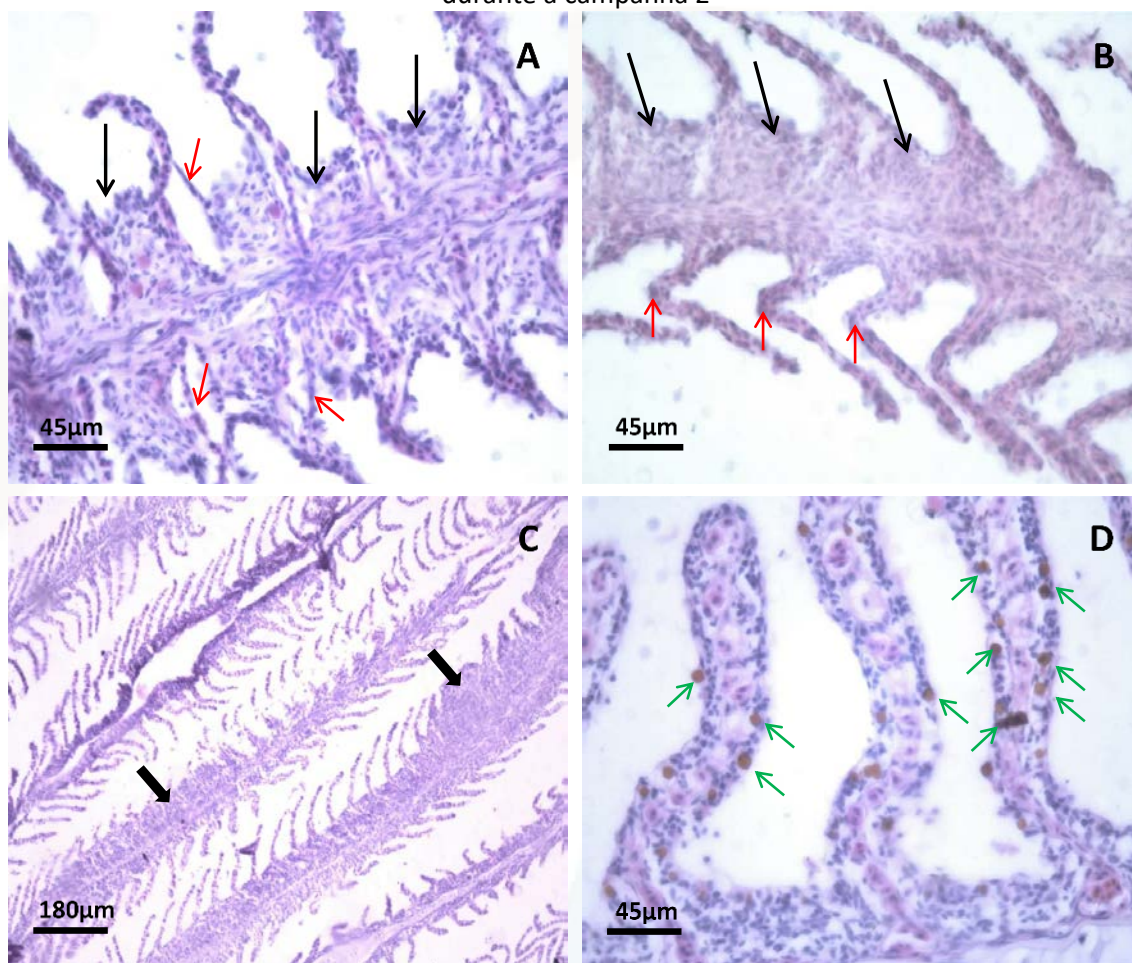
Embora com danos à estrutura branquial bastante similares, observa-se que os peixes capturados nos pontos CP, DA e DQ apresentam maior número ou magnitude de danos no tecido branquial. Entretanto, a aplicação do índice de Bernet (IB) revelou que o ponto cujos peixes apresentaram o maior comprometimento à morfologia do tecido branquial foi o ponto DA (Figura 18). Ainda, a aplicação do IB para os peixes agrupados por ordem demonstrou que os peixes da ordem Characiformes foram os que tiveram o tecido branquial mais comprometido nos pontos CN e DQ; os Perciriformes no ponto CP e os Siluriformes no ponto DA (Tabela 8).

Figura 18. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 1 durante a campanha 1



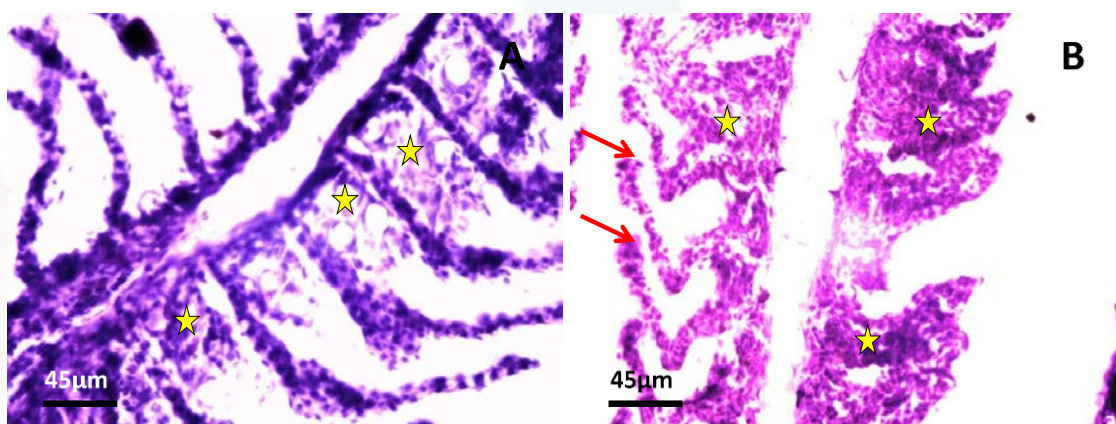
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta vermelha = desestruturação do filamento branquial, seta verde = fusão de lamelas, seta azul = aneurisma, estrela amarela = proliferação celular, área circundada pela linha pontilhada preta = hipertrofia de células do epitélio branquial. Fonte: LACTEC

Figura 19. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 1 durante a campanha 2



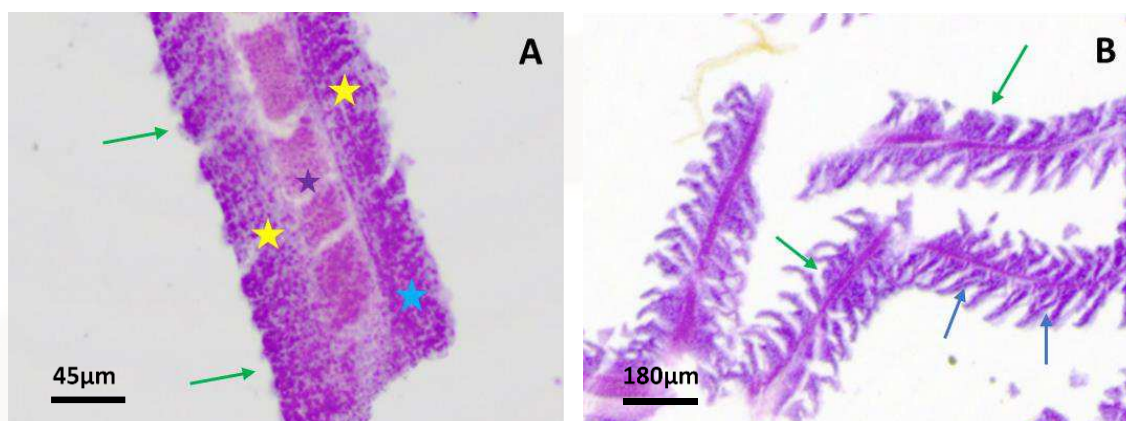
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta vermelha = alteração morfológica na disposição das lamelas, seta preta = hiperplasia lamelar, seta verde = material de cor castanha aderida ao epitélio lamelar. Fonte: LACTEC

Figura 20. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 1 durante a campanha 3



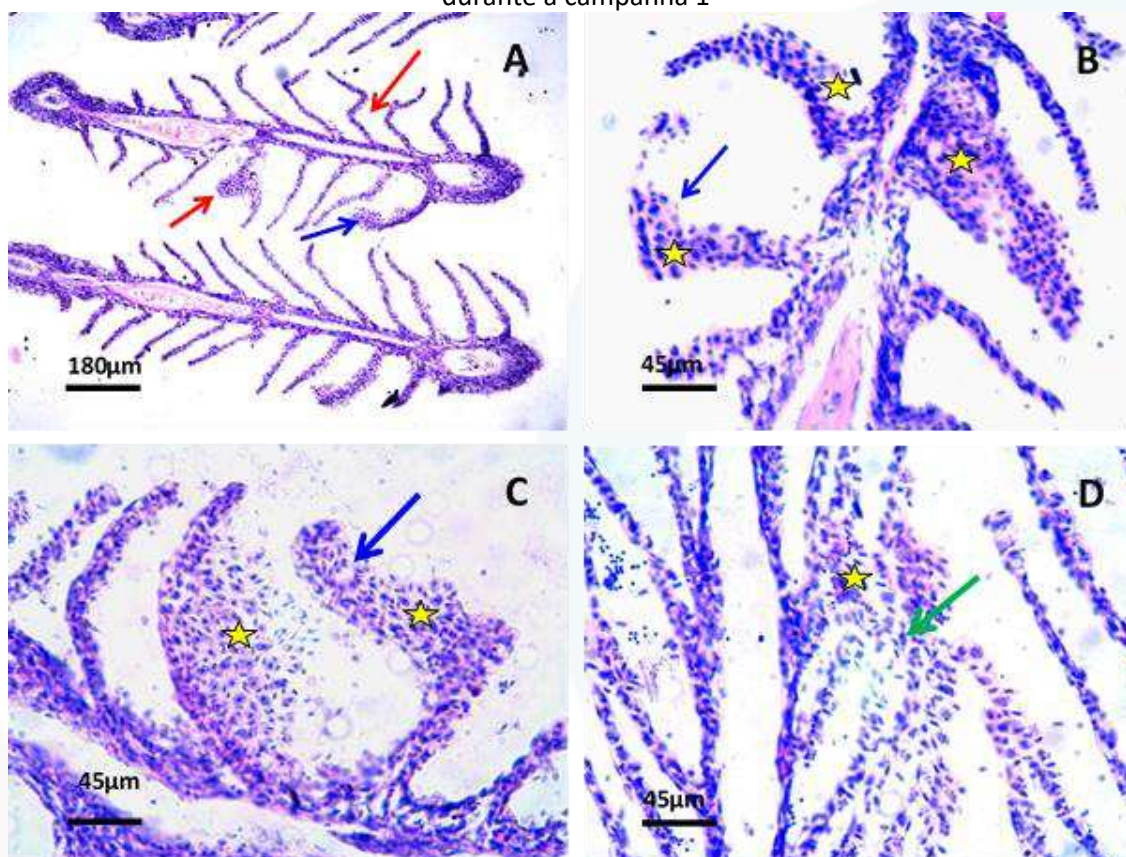
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta vermelha = desestruturação do filamento branquial, estrela amarela = proliferação celular. Fonte: LACTEC

Figura 21. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CN do compartimento 1 durante a campanha 4



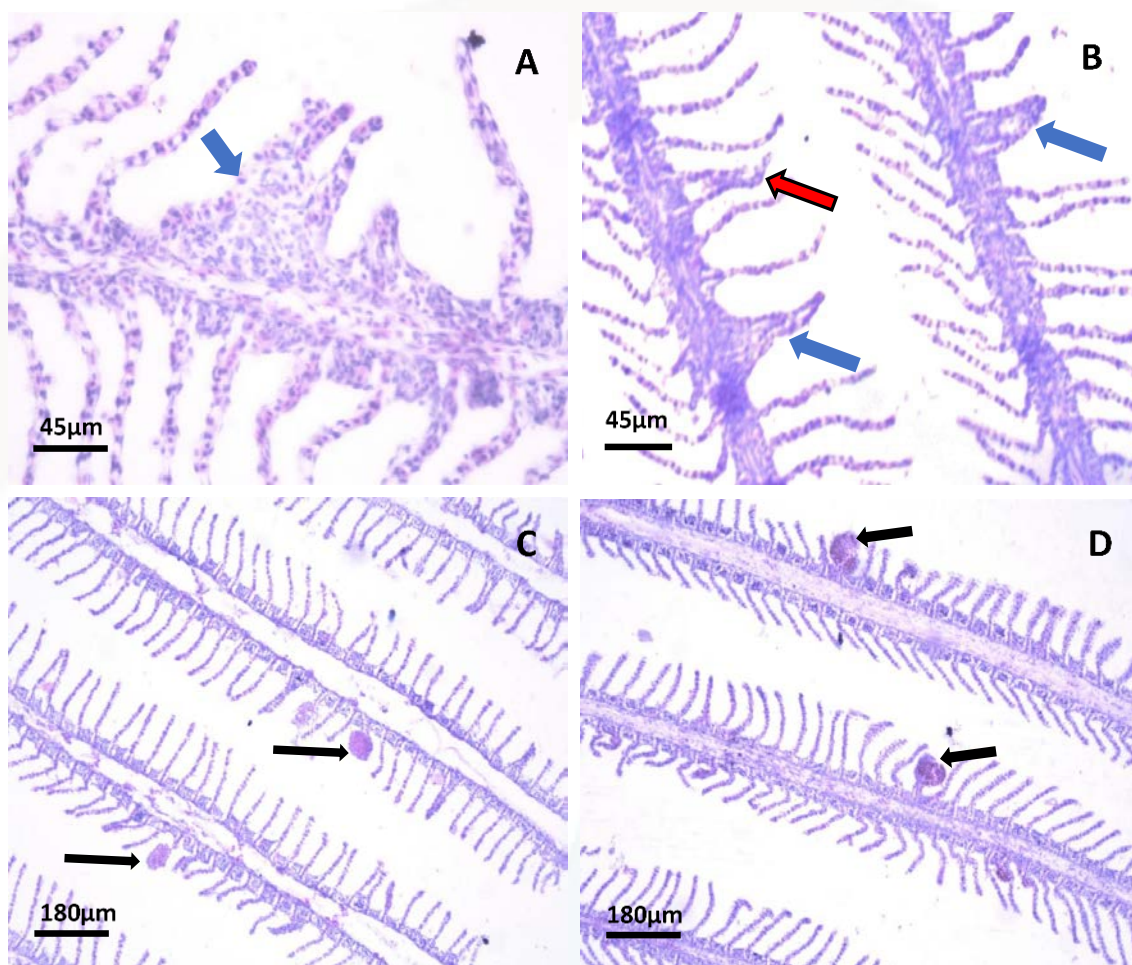
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta azul = deslocamento de epitélio, seta verde = hiperplasia, estrela amarela = fusão parcial de lamelas, estrela roxa = proliferação celular, estrela azul = fusão total de lamelas. Fonte: LACTEC

Figura 22. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 1 durante a campanha 1



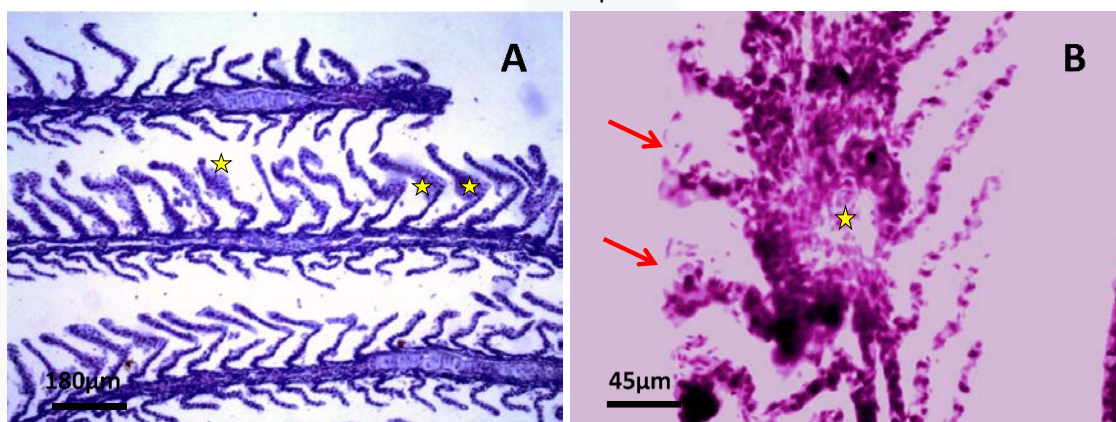
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta vermelha = desestruturação do filamento branquial, seta verde = fusão de lamelas, seta azul = aneurisma, estrela amarela = proliferação celular. Fonte: LACTEC

Figura 23. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 1 durante a campanha 2



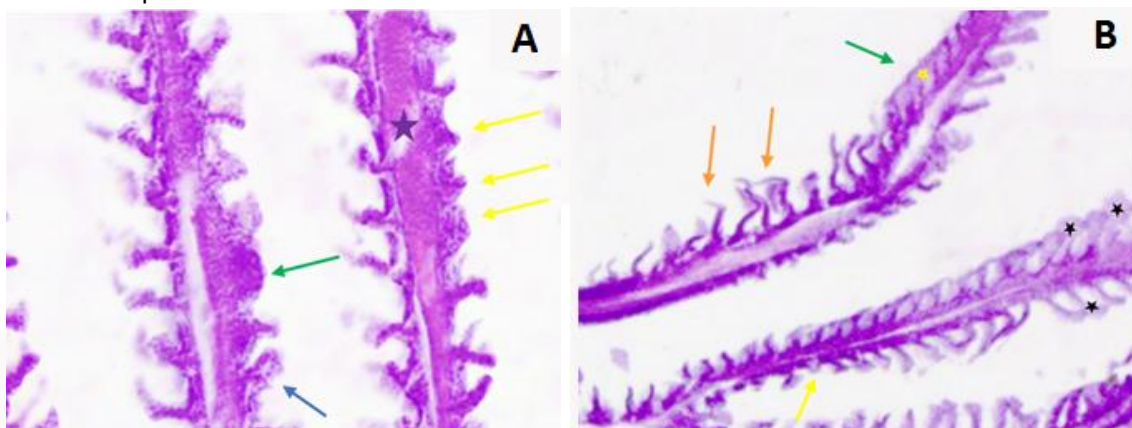
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta preta = hiperplasia lamelar, seta vermelha = fusão lamelar. Seta azul = aneurisma. Fonte: LACTEC

Figura 24. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 1 durante a campanha 3



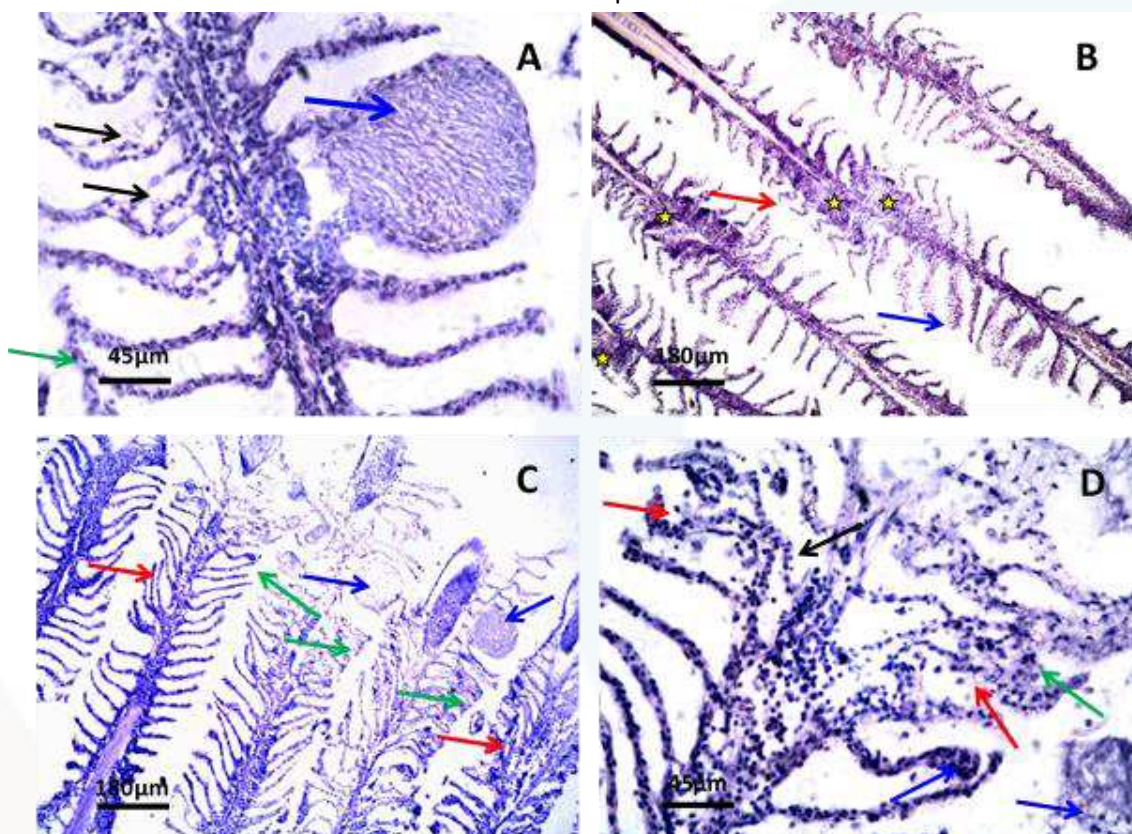
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta vermelha = desestruturação do filamento branquial, estrela amarela = proliferação celular. Fonte: LACTEC

Figura 25. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto CP do compartimento 1 durante a campanha 4



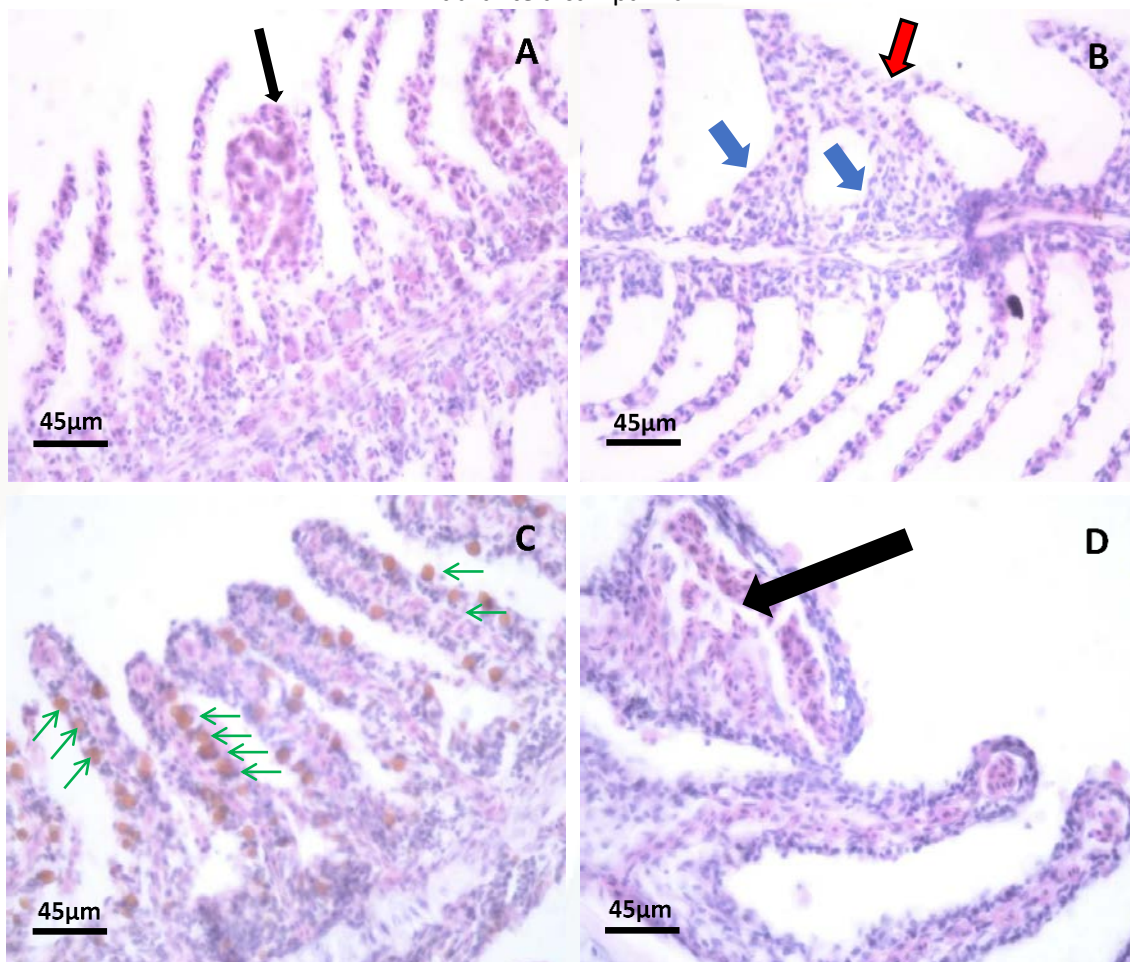
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta azul = deslocamento de epitélio, estrela preta = hipertrofia, seta verde = hiperplasia, estrela roxa = proliferação celular, seta laranja = desestruturação do filamento branquial, seta amarela = atrofia. Fonte: LACTEC

Figura 26. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 1 durante a campanha 1



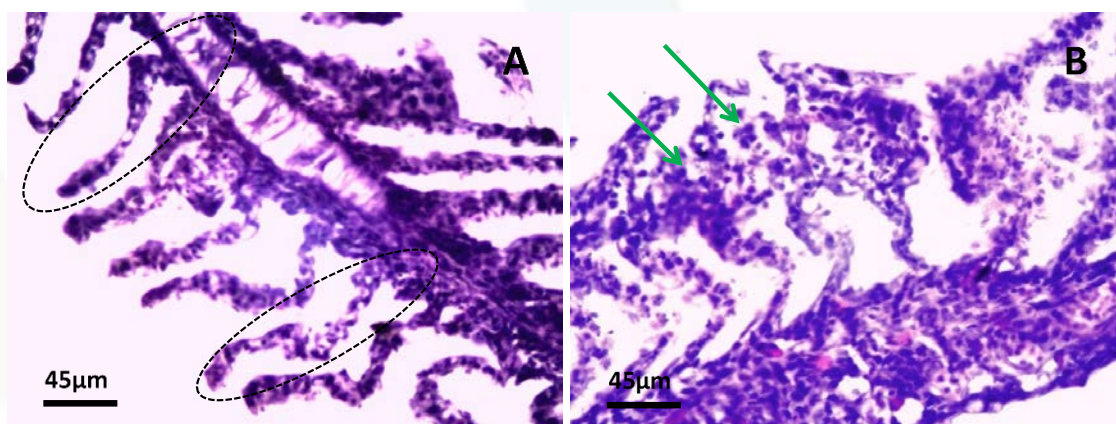
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta vermelha = desestruturação do filamento branquial, seta verde = fusão de lamelas, seta azul = aneurisma, seta preta = descolamento do epitélio branquial, estrela amarela = proliferação celular. Fonte: LACTEC

Figura 27. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 1 durante a campanha 2



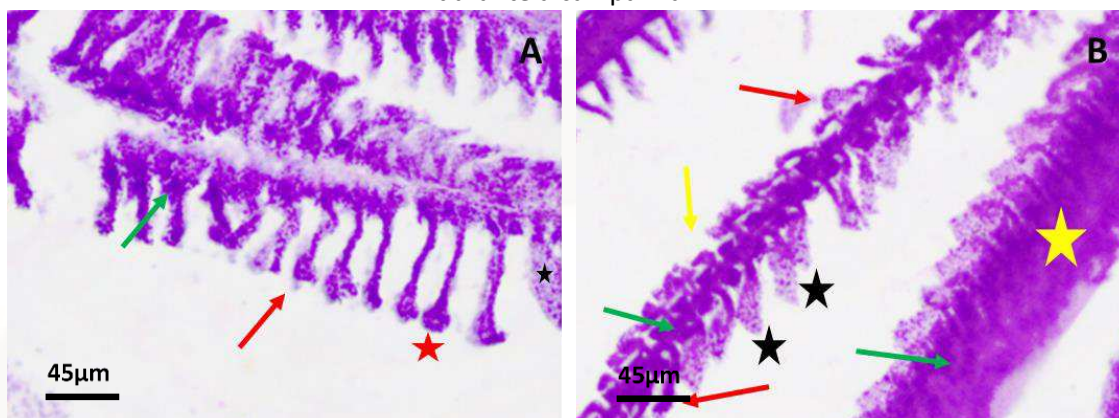
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta preta = aneurisma, seta azul = hiperplasia lamelar, seta vermelha = fusão lamelar, seta verde = material de cor castanha aderida ao epitélio lamelar. Fonte: LACTEC

Figura 28. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 1 durante a campanha 3



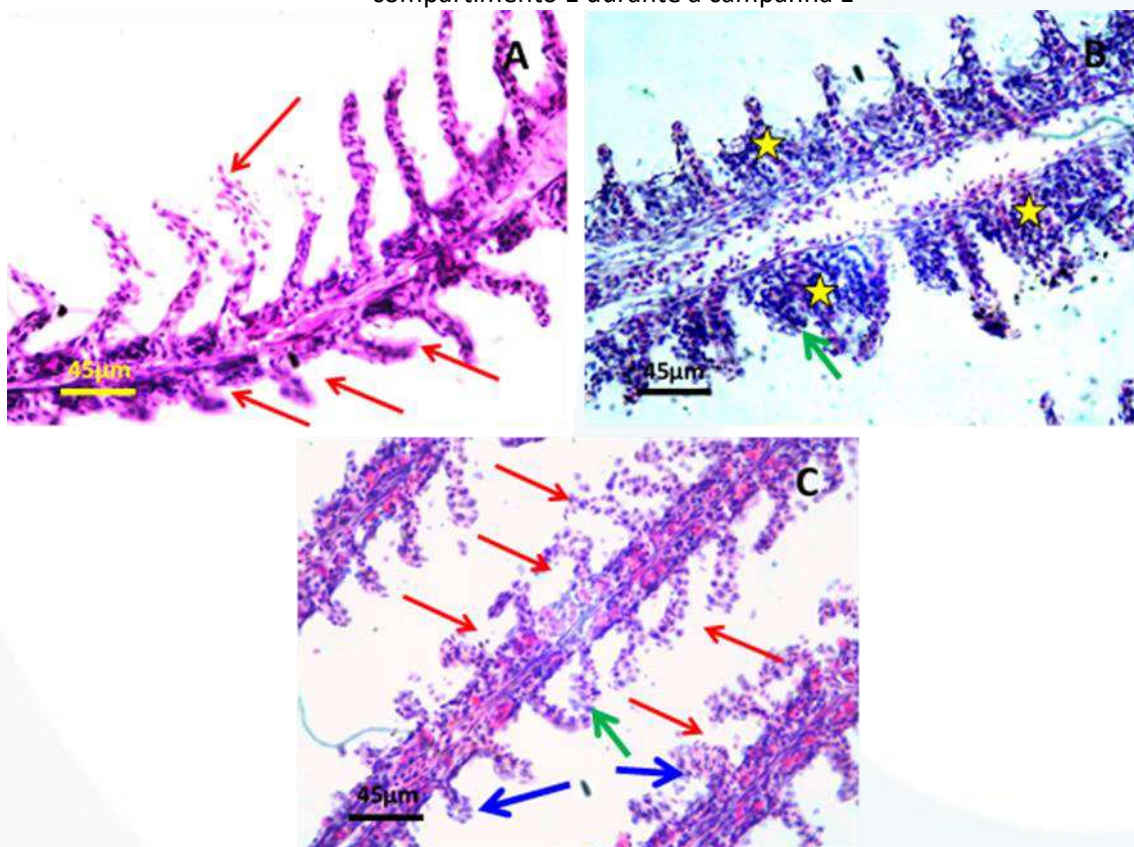
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta verde = fusão de lamelas, área circundada pela linha pontilhada preta = hipertrofia de células do epitélio branquial. Fonte: LACTEC

Figura 29. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DA do compartimento 1 durante a campanha 4



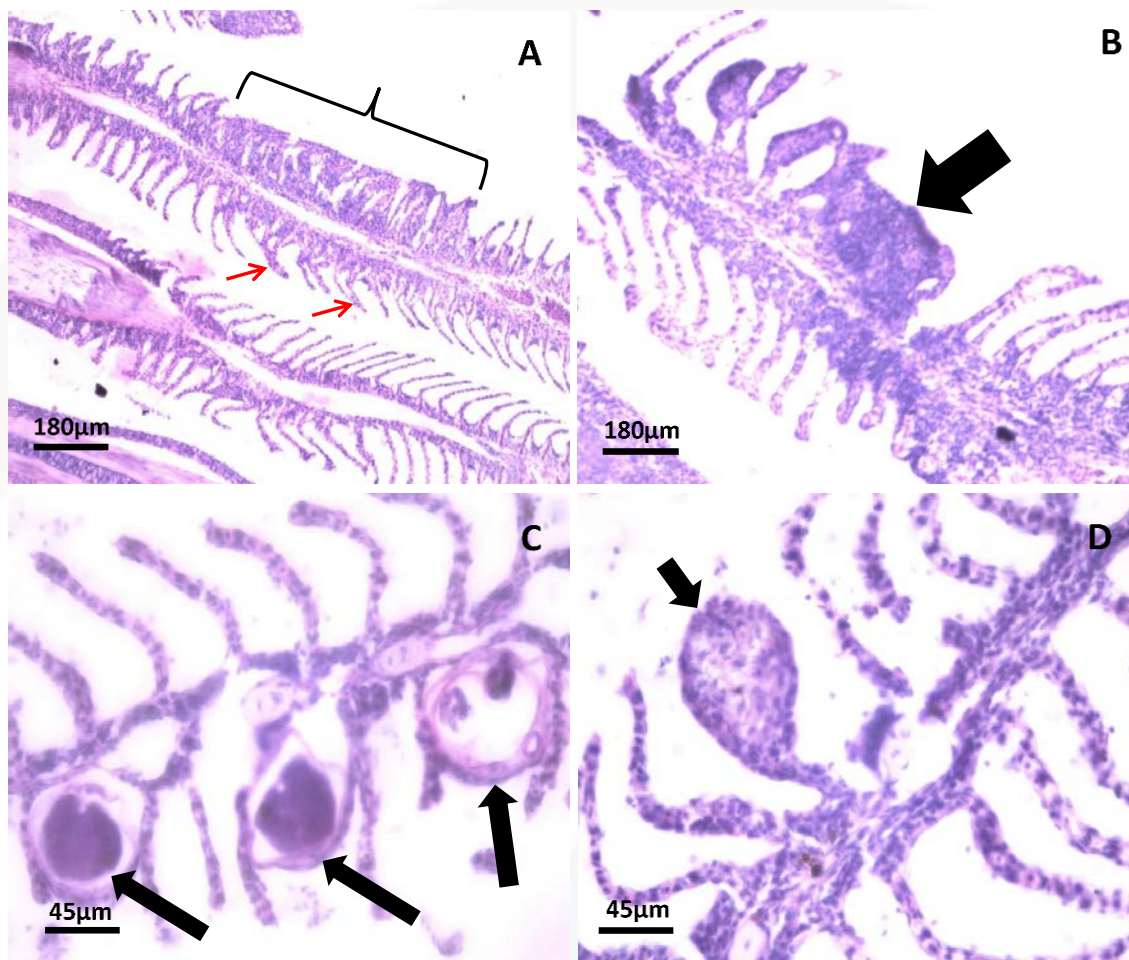
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta verde = hiperplasia, seta vermelha = aneurisma leve, seta amarela = atrofia, estrela vermelha = aneurisma moderado, estrela preta = hipertrofia, estrela amarela = fusão parcial das lamelas. Fonte: LACTEC

Figura 30. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DQ S4 do compartimento 1 durante a campanha 1



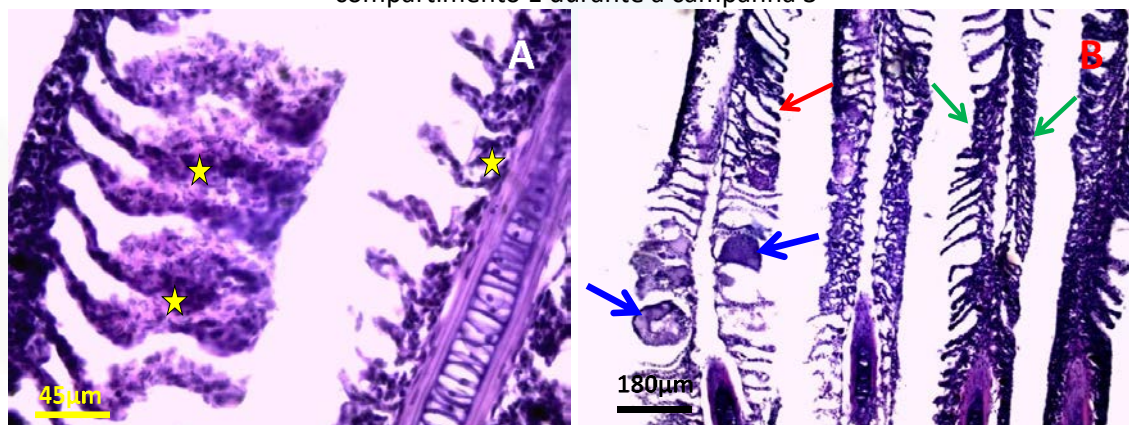
Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta vermelha = desestruturação do filamento branquial, seta verde = fusão de lamelas, seta azul = aneurisma, estrela amarela = proliferação celular. Fonte: LACTEC

Figura 31. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DQ S4 do compartimento 1 durante a campanha 2



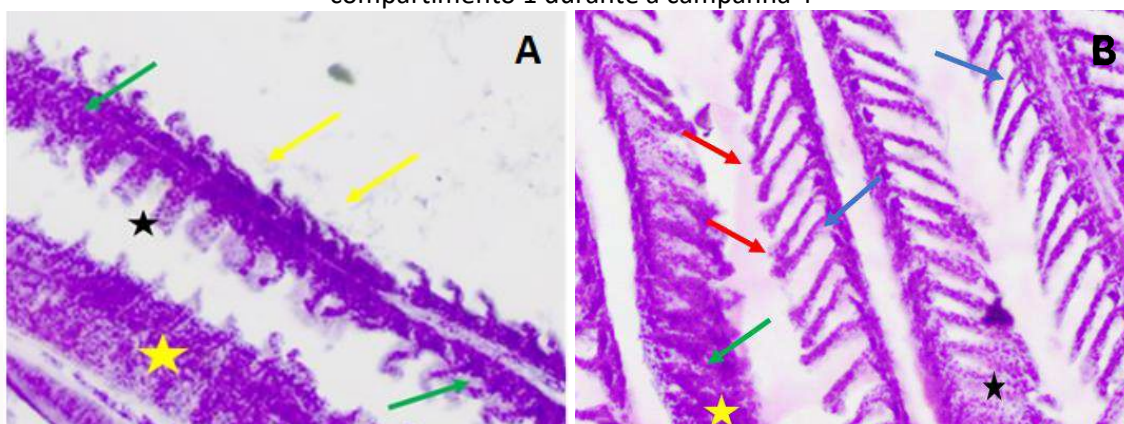
Coloração Hematoxilina-Eosina. Área demarcada por colchete indica região de hiperplasia lamelar, de edema e de fusão lamelar, setas vermelhas = fusão lamelar; seta preta = região de hiperplasia e fusão lamelar, seta cinza = parasitas e seta azul = aneurisma. Fonte: LACTEC

Figura 32. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DQ S4 do compartimento 1 durante a campanha 3



Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta vermelha = desestruturação do filamento branquial, seta verde = fusão de lamelas, seta azul = aneurisma, estrela amarela = proliferação celular. Fonte: LACTEC

Figura 33. Cortes histológicos de brânquias de espécies capturadas no ponto DQ S4 do compartimento 1 durante a campanha 4



Coloração Hematoxilina-Eosina. Seta verde = hiperplasia, seta vermelha = aneurisma leve, seta azul = deslocamento de epitélio, seta amarela = atrofia, estrela preta = hipertrofia, estrela amarela = fusão parcial das lamelas. Fonte: LACTEC

Tabela 7. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) em cada ponto de cada uma das campanhas ao longo do período amostral

	Campanha 1	Campanha 2	Campanha 3	Campanha 4	Média IB
CN	44,3	28,5	30,5	37,9	35,31
CP	46,0	31,8	31,4	28,0	34,31
DA	46,9	34,0	30,9	38,0	37,43
DQ	47,0	22,2	30,3	36,9	34,09

A coloração das células indica o gradiente entre as médias do índice de Bernet (IB) determinadas para cada um dos pontos. A célula vermelha corresponde ao ponto com a presença de maiores danos no tecido branquial, a célula amarela o ponto com danos intermediários e a célula verde com os menores danos no tecido branquial. CN = controle negativo; CP = controle positivo; DA = dentro da APDL e DQ = Dique S4.

Tabela 8. Determinação dos valores médios do Índice de Bernet (IB) para as ordens mais representativas em cada ponto ao final do período amostral

Representativas em cada ponto do mar ao longo do período amostral						
		Campanha 1	Campanha 2	Campanha 3	Campanha 4	Média IB
CN	Characiformes	48,0	25,7	32,2	36,7	35,6
	Perciformes	42,8	30,0	27,3	40,7	35,2
	Siluriformes	-	28,9	32,2	-	30,5
CP	Characiformes	-	33,0	35,0	-	34,0
	Perciformes	46,0	31,7	24,7	-	34,1
	Siluriformes	-	31,0	33,5	-	32,3
DA	Characiformes	-	-	29,4	37,0	33,2
	Perciformes	48,0	-	29,2	37,3	38,1
	Siluriformes	46,0	34,0	33,1	45,0	39,5
DQ	Characiformes	-	-	28,8	35,1	32,0
	Perciformes	-	22,2	34,43	38,3	31,6
	Siluriformes	-	-	-	-	-

A coloração das células indica o gradiente entre os valores médios do IB para cada uma das ordens mais representativas em cada um dos pontos. As células vermelhas correspondem às ordens que apresentaram maiores danos no tecido branquial, as células amarelas as que apresentaram danos intermediários e, as células verdes as ordens que apresentaram os menores danos no tecido branquial. Traço corresponde a ordens não coletadas em determinado ponto ou campanha. CN = controle negativo; CP = controle positivo; DA = dentro da APDL e DQ = Dique S4.

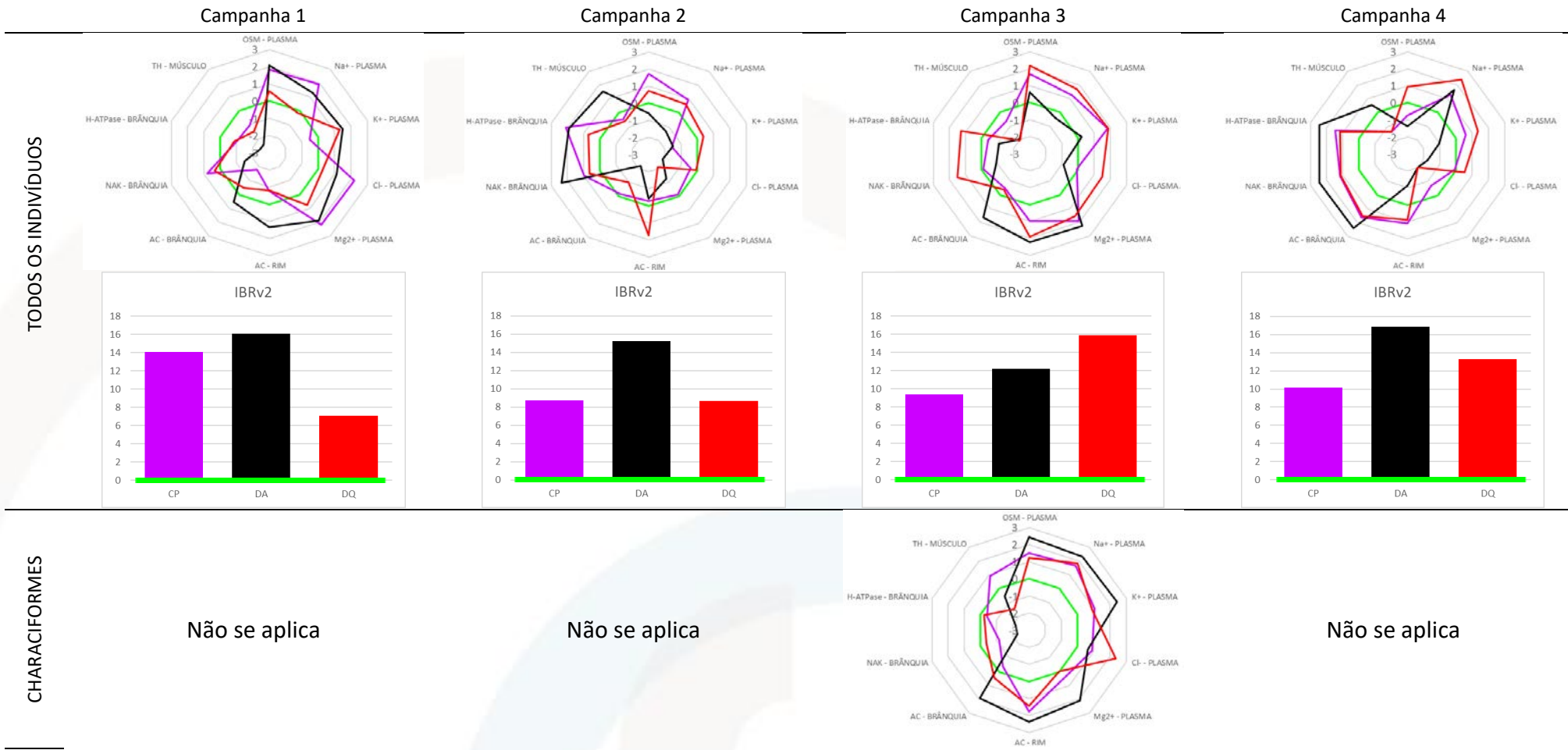
3.1.1.1.2. Biomarcadores fisiológicos – OSM, íons plasmáticos, TH, AC branquial e renal, Na^+/K^+ -ATPase e H^+ -ATPase

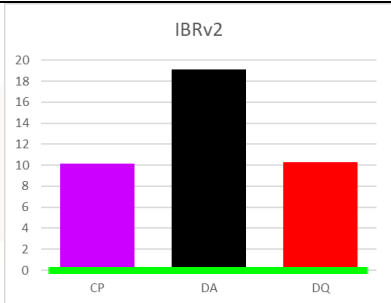
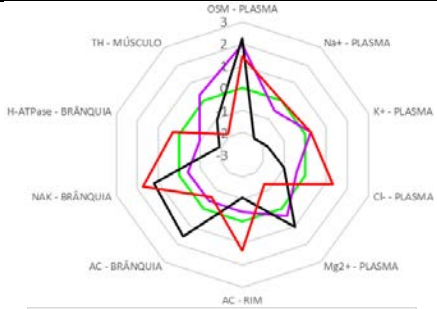
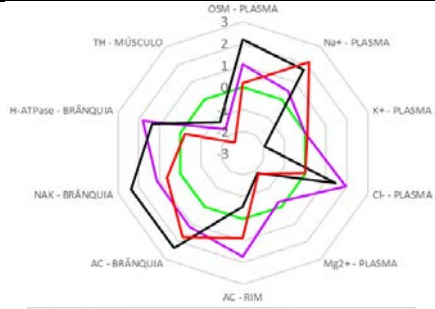
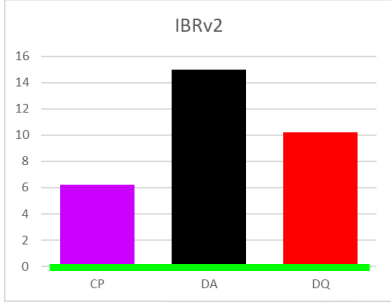
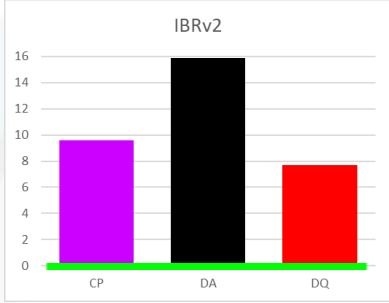
Ao integrar os biomarcadores associados às funções fisiológicas de osmorregulação e equilíbrio ácido-base, no compartimento 1, considerando todos os peixes amostrados bem como todos os pontos avaliados (CN, CP, DA e DQ), observou-se, na Tabela 1, que o ponto DA foi o que apresentou os maiores valores de IBRv2 nas campanhas 1, 2 e 4, ao passo que na 3ª campanha o maior IBRv2 foi observado no ponto DQ, seguido pelo ponto DA. Ao agruparmos apenas os indivíduos da ordem Characiformes, apenas a 3ª campanha foi avaliada, sendo o ponto DA o que apresentou maiores alterações em relação ao ponto CN, enquanto CP e DQ apresentaram valores menores de IBRv2, sendo estes valores próximos entre si. Já para os indivíduos da ordem Cichliformes, tanto a 3ª quanto a 4ª campanhas foram avaliadas, e em ambas as campanhas o ponto DA apresentou os maiores valores de IBRv2, seguido do ponto DQ na campanha 3 e do ponto CP da campanha 4. Ao agrupar os peixes de acordo com seu hábito alimentar observou-se que os ictiófagos, embora apenas avaliados na 3ª campanha, aqueles do ponto DA foram os que apresentaram as maiores alterações em relação aos animais do ponto CN. Por fim, na avaliação dos peixes de hábito alimentar invertívoro bentônico, avaliados apenas na 1ª e 3ª campanhas, nota-se que na 1ª campanha os IBRv2 dos pontos CP e DA foram os mais elevados, já na 3ª campanha o ponto DQ apresentou o maior valor de IBRv2, seguido do ponto DA (Tabela 9).

Destaca-se nesta integração de biomarcadores, especialmente pela avaliação dos diferentes agrupamentos de peixes na 3ª campanha, que embora os peixes do ponto DA e /ou DQ tenham apresentado os maiores valores de IBRv2, o que representa as maiores alterações em relação às respostas observadas nos peixes do ponto CN, tais valores de IBRv2 refletem diferentes alterações nos biomarcadores avaliados, indicando que o sistema fisiológico de osmorregulação e equilíbrio ácido-base está sendo afetado pelos contaminantes presentes no meio, porém, de maneiras distintas em cada um dos agrupamentos de peixes. Como exemplo os íons plasmáticos, que no geral se apresentaram em concentrações maiores do que no ponto CN para os peixes Characiformes de DA e menores para os Cichliformes deste mesmo ponto (Tabela 9).



Tabela 9. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes dos pontos amostrais CN, CP, DA e DQ do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.



	Campanha 1	Campanha 2	Campanha 3	Campanha 4
	Não se aplica	Não se aplica		Não se aplica
CICHLIFORMES	Não se aplica	Não se aplica		
	Não se aplica	Não se aplica		



Campanha 1

Campanha 2

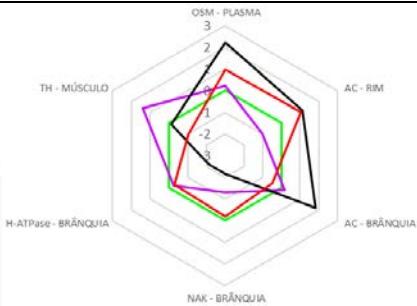
Campanha 3

Campanha 4

ICTIÓFAGOS

Não se aplica

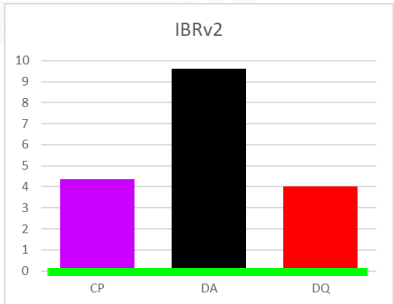
Não se aplica



Não se aplica

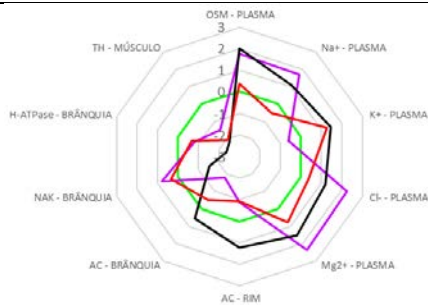
Não se aplica

Não se aplica

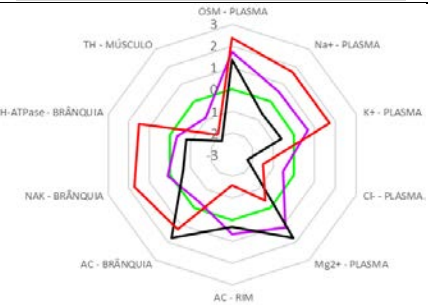


Não se aplica

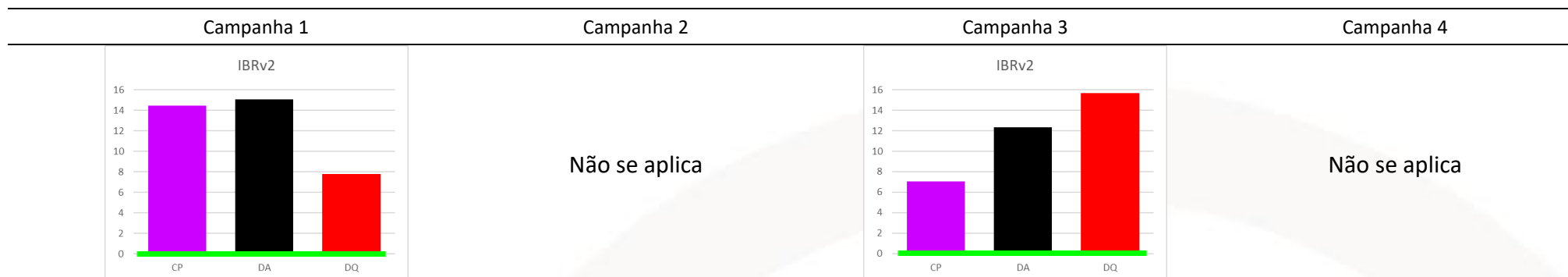
INVERTÍVOROS
BENTÔNICOS



Não se aplica



Não se aplica



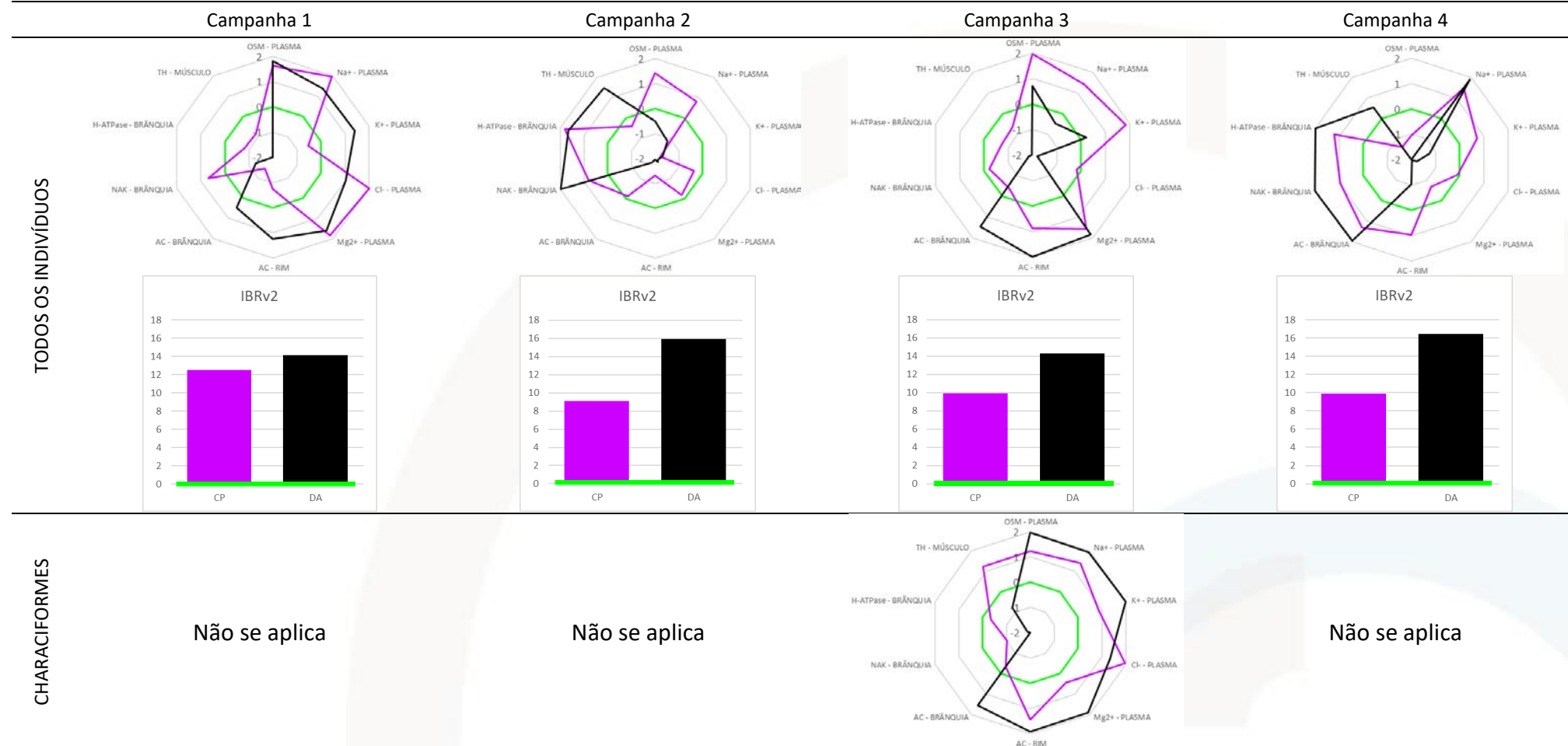
Não se aplica: indica que o IBRv2 não foi aplicado no agrupamento seja por ausência ou insuficiência de **n** amostral na campanha em questão.

Para cada agrupamento (todos os indivíduos, Characiformes, Cichliformes, ictiófagos e invertívoros bentônicos) e campanha, as respostas dos biomarcadores integrados estão representados por um gráfico de radar no qual as respostas dos peixes de CN estão representadas em verde (—), de CP em violeta (—), de DA em preto (—) e de DQ em vermelho (—), seguidos de um gráfico de barras no qual está representado o valor do Índice de Integração de Respostas de Biomarcadores versão 2 (IBRv2), sendo neste gráfico a linha verde representativa dos peixes do ponto CN, e as barras violeta, preta e vermelha dos pontos CP, DA e DQ, respectivamente.

OSM-PLASMA: osmolalidade plasmática; Na⁺ - PLASMA: concentração do íon Na⁺ no plasma; K⁺ - PLASMA: concentração do íon K⁺ no plasma; Cl⁻ - PLASMA: concentração do íon Cl⁻ no plasma; Mg²⁺ - PLASMA: concentração do íon Mg²⁺ no plasma; AC – RIM: atividade da anidrase carbônica renal; AC – BRÂNQUIA: atividade da anidrase carbônica renal; NAK – BRÂNQUIA: atividade da Na⁺/K⁺-ATPase branquial; H-ATPase – BRÂNQUIA: atividade da H⁺-ATPase branquial; TH – MÚSCULO: teor de umidade muscular.

Ao avaliarmos apenas os pontos CN, CP e DA, nota-se que, quando calculado o IBRv2 para todos os indivíduos, o ponto DA apresentou as maiores alterações nos biomarcadores avaliados (maior valor de IBRv2) em todas as campanhas. Do mesmo modo, o ponto DA foi o que apresentou o maior valor de IBRv2, para os peixes da ordem Characiformes, apenas avaliados na 3ª campanha; para os peixes a ordem Cichliformes, avaliados nas campanhas 1, 3 e 4, para os peixes de hábito alimentar ictiófago, avaliados também apenas na 3ª campanha e para os peixes de hábito alimentar invertívoro bentônico, avaliados em todas as campanhas, embora neste último agrupamento, na campanha 1, a diferença entre CP e DA tenha sido menos expressiva (Tabela 10).

Tabela 10. Índice integrado de Respostas dos Biomarcadores (IBRv2) Fisiológicos dos peixes dos pontos amostrais CN, CP e DA do compartimento 1, comparação entre os pontos em cada uma das campanhas amostrais.





Campanha 1

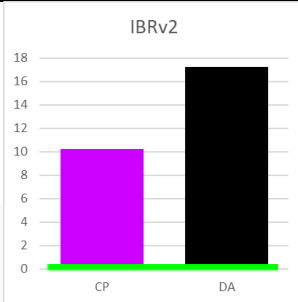
Campanha 2

Campanha 3

Campanha 4

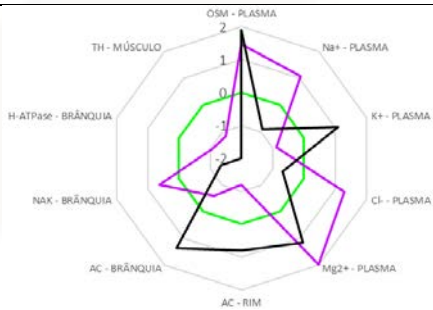
Não se aplica

Não se aplica

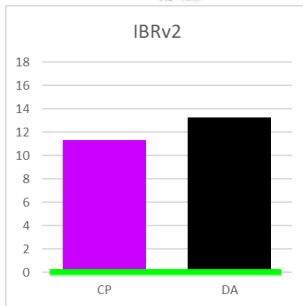


Não se aplica

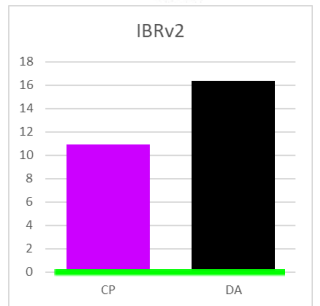
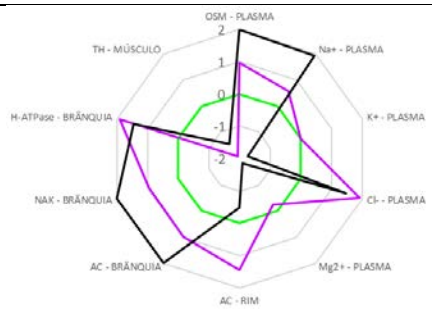
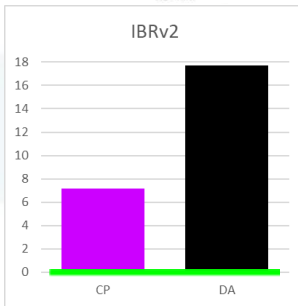
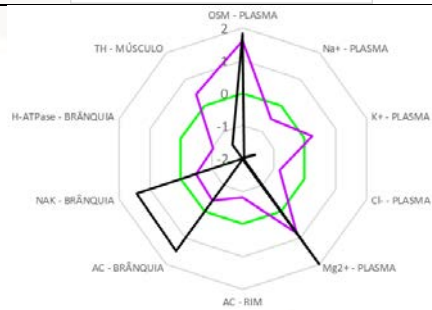
CICHLIFORMES

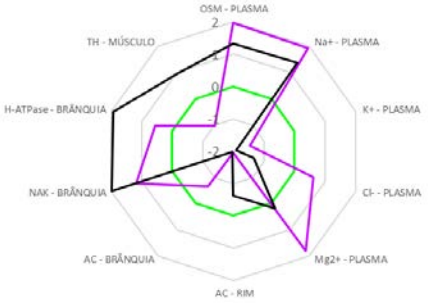
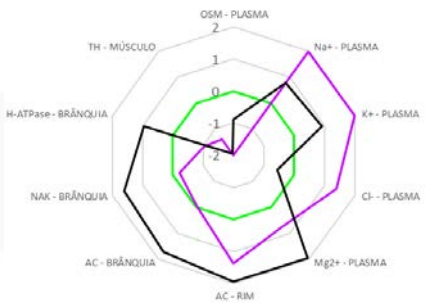
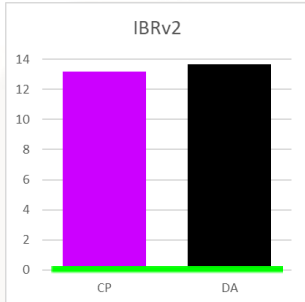
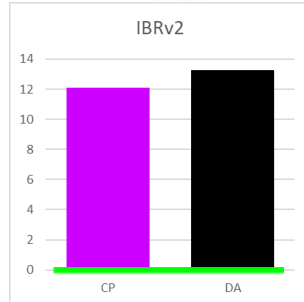


Não se aplica



Não se aplica



		Campanha 1	Campanha 2	Campanha 3	Campanha 4
SILURIFORMES	Não se aplica				Não se aplica
	Não se aplica				Não se aplica
ICTIÓFAGOS	Não se aplica		Não se aplica		Não se aplica



Campanha 1

Campanha 2

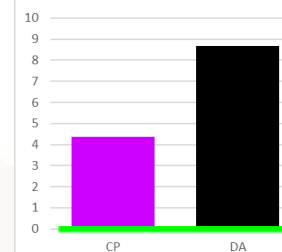
Campanha 3

Campanha 4

Não se aplica

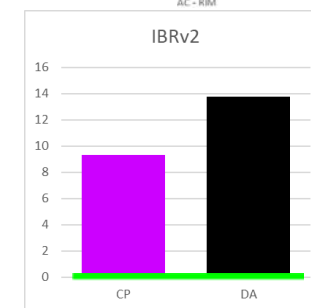
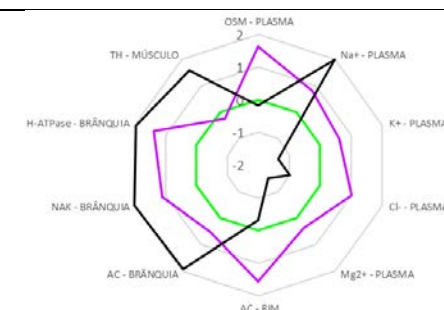
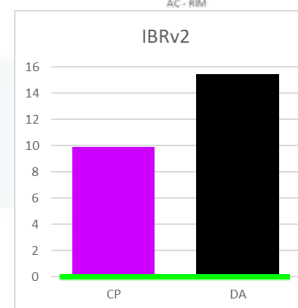
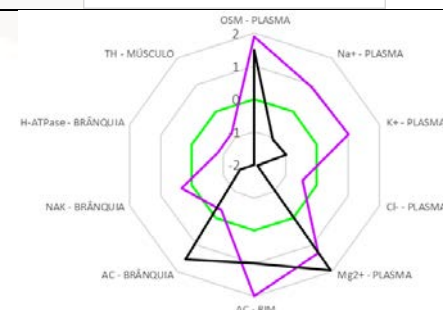
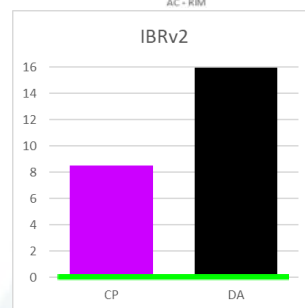
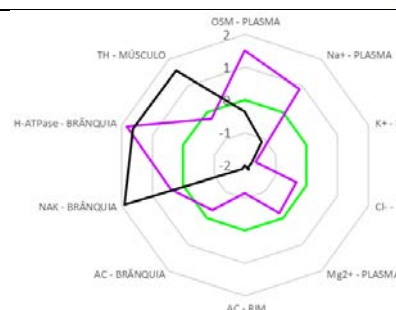
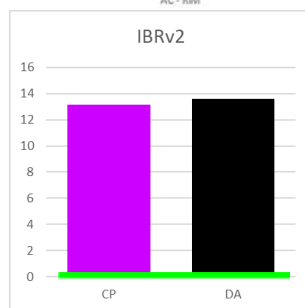
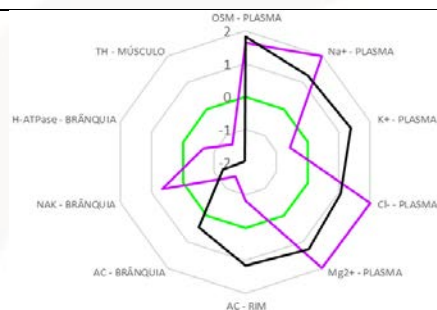
Não se aplica

IBRv2



Não se aplica

INVERTÍVOROS BENTÔNICOS



Não se aplica: indica que o IBRv2 não foi aplicado no agrupamento seja por ausência ou insuficiência de n amostral na campanha em questão.

Para cada agrupamento (todos os indivíduos, Characiformes, Cichliformes, Siluriformes, ictiófagos e invertívoros bentônicos) e campanha, as respostas dos biomarcadores integrados estão representados por um gráfico de radar no qual as respostas dos peixes de CN estão representadas em verde (--), de CP em violeta (--) e de DA em preto, seguidos de um gráfico de barras no qual está representado o valor do Índice de Integração de Respostas de Biomarcadores versão 2 (IBRv2), sendo neste gráfico a linha verde representativa dos peixes do ponto CN, e as barras violeta e preta dos pontos CP e DA, respectivamente.

OSM-PLASMA: osmolalidade plasmática; Na⁺ - PLASMA: concentração do íon Na⁺ no plasma; K⁺ - PLASMA: concentração do íon K⁺ no plasma; Cl⁻ - PLASMA: concentração do íon Cl⁻ no plasma; Mg²⁺ - PLASMA: concentração do íon Mg²⁺ no plasma; AC – RIM: atividade da anidrase carbônica renal; AC – BRÂNQUIA: atividade da anidrase carbônica renal; NAK – BRÂNQUIA: atividade da Na⁺/K⁺-ATPase branquial; H-ATPase – BRÂNQUIA: atividade da H⁺-ATPase branquial; TH – MÚSCULO: teor de umidade muscular.