

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da  
Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região  
Marinha e Costeira Adjacente**

**RELATÓRIO SEMESTRAL – SEÇÃO 1:**

**Rede Rio Doce Mar / RRDM**

**RT-03 RRDM/JUN19**

**Coordenação Geral**

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Junho de 2019

## COORDENAÇÕES

### COORDENAÇÕES POR ANEXO

#### Anexo 1

Adalto Bianchini (FURG)

#### Anexo 3

Fabian Sá (UFES)

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

#### Subprojetos

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Björn Gücker (UFSJ)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Amado Filho (IPJB) *in memoriam*

Iola Gonçalves Boechat (UFSJ)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Rodrigo Leão de Moura (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

#### Anexo 4

Jacqueline Albino (UFES)

#### Subprojetos

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

#### Anexo 5

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

#### Anexo 6

Agnaldo Silva Martins (UFES)

#### Subprojetos

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

#### Anexo 7

Maurício Hostim (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

### **Subprojetos**

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Luis Fernando Duboc (UFV)

### **Anexo 8**

Heitor Evangelista (UERJ)

### **Coordenação Núcleo de Atuação Integrada em Rede**

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Karla Libardi Gallina (UFES)

Andressa Christiane Pereira (UFES)

Anna Paula Lage Ribeiro (UFES)

Caroline De Marchi Pignaton (UFES)

Paulo Eduardo Marques (UFES)

### **Coordenação Técnica**

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Laura Silveira Vieira Salles (UFES)

Tarcila Franco Menandro (UFES)

### **Coordenação Escritório de Projetos**

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro (UFES)

Patrícia Bourguignon Soares (UFES)

Armando Biondo Filho (UFES)

Paulo Roberto Filgueiras (UFES)

Valdemar Lacerda Junior (UFES)

Walter Luiz Alda Junior (UFES)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>SUMÁRIO EXECUTIVO</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS AGUDOS E CRÔNICOS NOS AMBIENTES</b> .....	<b>11</b>
3.1	AMBIENTE DULCÍCOLA/ESTUARINO.....	11
3.2	AMBIENTE MARINHO.....	14
3.3	PRAIAS.....	19
3.4	MANGUEZAIS E RESTINGA.....	20
<b>4</b>	<b>IDENTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS NAS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO</b> .....	<b>22</b>
4.1	ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DE SETIBA.....	22
4.2	REFÚGIO DE VIDA SILVESTRE SANTA CRUZ E ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL COSTA DAS ALGAS.....	23
4.3	RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL MUNICIPAL PIRAQUÊ-AÇU E PIRAQUÊ-MIRIM.....	24
4.4	RESERVA BIOLÓGICA DE COMBOIOS E RESERVA INDÍGENA DE COMBOIOS.....	24
4.5	ÁREA DE RELEVANTE INTERESSE ECOLÓGICO DO DEGREDADO.....	24
4.6	ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL CONCEIÇÃO DA BARRA.....	24
4.7	PARQUE NACIONAL MARINHO DE ABROLHOS, ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL PONTA DA BALEIA/ABROLHOS E RESERVA EXTRATIVISTA DE CASSURUBÁ.....	25
<b>5</b>	<b>COMPARAÇÃO COM OS IMPACTOS OBSERVADOS A PARTIR DA ANÁLISE DOS DADOS PRETÉRITOS</b> .....	<b>25</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Diferentes graus dos impactos agudos observados no ambiente dulcícola/estuarino.....	11
Quadro 2: Diferentes graus dos impactos crônicos observados no ambiente dulcícola/estuarino. ....	12
Quadro 3: Diferentes graus dos impactos agudos observados no ambiente marinho.....	14
Quadro 4: Diferentes graus dos impactos crônicos observados no ambiente marinho. ....	15
Quadro 5: Diferentes graus dos impactos agudos observados nas praias.....	19
Quadro 6: Diferentes graus dos impactos crônicos observados nas praias. ....	19
Quadro 7: Diferentes graus dos impactos agudos observados nos manguezais e restinga. ....	21
Quadro 8: Diferentes graus dos impactos crônicos observados nos manguezais e restinga.....	21
Quadro 9: Impactos agudos observados a partir da análise de dados pretéritos e acrescidos dos resultados de 6 meses de PMBA.....	26
Quadro 10: Impactos crônicos observados a partir da análise de dados pretéritos e acrescidos dos resultados de 6 meses de PMBA.....	27

## 1 SUMÁRIO EXECUTIVO

O Relatório Semestral produzido pela RRDM/FEST tem como objetivo apresentar os resultados produzidos nos primeiros 6 meses do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA), correspondendo ao período de 15/09/2018 a 31/03/2019, e apontar os impactos agudos e crônicos, direta ou indiretamente associados ao rompimento da barragem de Fundão, sobre a biodiversidade aquática. A elaboração do Relatório Semestral também prevê a utilização ou a comparação com dados pré-rompimento da barragem, bem como, com dados relativos aos 3 primeiros anos pós-rompimento, anteriores a assinatura do acordo com a RRDM. Os relatórios fornecidos e os dados existentes relativos aos 3 anos pós-rompimento foram avaliados e descritos no Relatório de Avaliação e Consolidação de Dados Pretéritos (RT-01 RRDM/OUT18).

O documento escrito do Relatório Semestral é composto por um conjunto de relatórios técnicos e gerenciais, organizado em 12 relatórios individualizados (RT-03 RRDM/ABR19 a RT-14 RRDM/ABR19). Em anexo aos documentos do Relatório Semestral estão inseridos o Protocolo de Amostragem e Protocolo de Análise que descrevem as metodologias utilizadas nos diversos projetos desde a coleta das amostras até as análises em laboratório.

A parte técnica é composta por três seções, sendo elas:

Seção 1 – Visão Geral do PMBA (RT-03 RRDM/ABR19): o objetivo desta seção é apresentar uma análise integrada das condições dos diferentes ecossistemas na área em estudo. Nesta seção serão considerados os impactos agudos e crônicos identificados pelo PMBA, com base no monitoramento em andamento e em dados pretéritos pré e pós-rompimento da barragem de Fundão. Elaboração: Coordenação geral da RRDM;

Seção 2 - Evidências dos impactos (RT-04 RRDM/ABR19): o objetivo desta seção é apresentar uma análise integrada dentro de cada Projeto (descrito no TR04 como Anexos), visando apontar os indicadores e as evidências de impacto na área. A premissa desses relatórios é indicar, até então, as alterações ambientais e biológicas observadas em cada compartimento estudado e, a depender das especificidades de cada Projeto, fazer a correlação dos dados bióticos com dados abióticos. Elaboração: Coordenadores de Anexos;

Seção 3 - Detalhamento dos Subprojetos (RT-05 RRDM/ABR19 a RT-13 RRDM/ABR19): apresenta os resultados dos subprojetos conforme o plano de trabalho. Esta seção é a mais extensa e permite avaliar técnica e cientificamente os resultados de cada variável ou parâmetro coletado e medido; forma a base científica de resultados para a elaboração das Seções 2 e 1. Elaboração: Coordenadores de Subprojetos.

O Relatório Gerencial de Acompanhamento do PMBA é apresentado no arquivo RT-14 RRDM/ABR19, nele está contido o detalhamento das atividades do Programa de Monitoramento e do Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR).

O desenvolvimento do Relatório Semestral em documentos separados foi idealizado para facilitar a leitura e organização das informações, mas, apesar de serem documentos individualizados, a análise de uma Seção deve levar em consideração as informações contidas nas demais Seções. Por exemplo, a leitura da Seção 1 é validada pelas Seções 2 e 3, portanto, não pode ser avaliada individualmente. A Seção 1 apresenta a análise final, com a indicação direta das evidências de impacto em cada ambiente estudado. Os resultados que levaram a esta análise estão apontados nas Seções 2 e 3.

É importante salientar que os documentos que compõem o Relatório Semestral podem sofrer modificações de acordo com possíveis comentários e sugestões advindos da realização do Workshop de Apresentação do Relatório Semestral - PMBA/RRDM, a ser realizada um mês após a data de entrega do documento escrito.

De uma maneira geral, o Relatório Semestral apresenta resultados que apontam para diferentes níveis de impacto ao longo dos ambientes dulcícola, costeiros e marinhos. Vale ressaltar que o nível de conhecimento e dados coletados previamente nos diferentes ambientes estudados, leva a um não equilíbrio entre os relatórios. Essa falta de equilíbrio não é função da execução do PMBA, e sim, dos estudos que foram ou não foram conduzidos nos primeiros 3 anos. Estudos no ambiente marinho, incluindo análises ecotoxicológicas, possuem muito mais informação desde o rompimento do que estudos realizados em praias e manguezais. Nestes casos, muitos resultados formam praticamente uma primeira análise diagnóstica sobre o ambiente em questão.

Os impactos agudos já haviam sido discutidos no Relatório de Avaliação e Consolidação de Dados Pretéritos e são aqui apresentados de forma consolidada e clara. Uma síntese dos resultados do PMBA e da avaliação de dados pós-rompimento da barragem apontam para impactos crônicos ao longo de todos os ambientes estudados. Impactos esses que vão desde o indutor primário que seriam os indicadores físico-químicos, até o impacto a nível de organismo e população/comunidade. O resultado aponta para formas de identificação da deposição do rejeito de minério, da inequívoca importância da diminuição da granulometria e o aumento do potencial de ressuspensão dos sedimentos e posterior dispersão do rejeito, seja em direção norte ou sul. A ressuspensão influencia diretamente a qualidade da água e a fisiologia do plâncton. O aumento nos teores de metais nos sedimentos foi detectado, bem como alterações nas comunidades bentônicas de praias, mar e manguezal. Danos macromoleculares foram observados em invertebrados e peixes, e a bioacumulação de metais está presente em organismos planctônicos, bentônicos, pescados e aves.

É importante ressaltar que os resultados aqui apresentados ainda são preliminares no que diz respeito a um potencial impacto da sazonalidade nos processos físicos, químicos, geológicos e biológicos. Ao final de 12 meses de monitoramento, e inclusão de dados coletados nos 3 primeiros anos pós-rompimento da barragem, uma análise mais consolidada poderá ser realizada, principalmente em relação aos indicadores primários e secundários, ou seja, os indutores físico-químicos e a avaliação orgânica. Uma resposta mais consolidada a nível de população e comunidade, ou a nível ecológico,

pode não ser atingida em apenas 12 meses de monitoramento, ficando ainda uma lacuna em observações sobre comportamentos e respostas ao rompimento da barragem.

## 2 INTRODUÇÃO

O objetivo da Seção 1 é apresentar um relato geral da situação atual da execução do PMBA, das condições gerais dos diferentes ecossistemas na área em estudo e identificar as principais respostas obtidas no âmbito do PMBA, considerando-se os impactos agudos e crônicos identificados a partir dos primeiros 6 meses de monitoramento, bem como da análise de dados pretéritos.

Em função da maneira em que se encontra estruturado o PMBA, foi realizada uma abordagem analítica que conduziu à interpretação das informações geradas nos primeiros seis meses de atividades no âmbito do PMBA, considerando-se os dados físicos, químicos, geológicos e hidrológicos, em um **primeiro grau**; os dados biológicos em nível orgânico em um **segundo grau**; e os dados biológicos em nível de população e comunidade em um **terceiro grau**. Para isso, devem ser consideradas as seguintes definições:

- (a) **Parâmetro**: toda variável analisada (variáveis físicas, químicas, geológicas, hidrológicas e biológicas) durante a execução do PMBA e que gerou um dado bruto;
- (b) **Indicador**: todo parâmetro analisado que apresentou variação significativa quando comparado com dados pretéritos ao acidente ou dados gerados ao longo da execução do PMBA;
- (c) **Evidência**: todo indicador que tem relação indireta ou direta com alterações biológicas que podem interferir no status da biodiversidade aquática (por exemplo: sobrevivência, mortalidade, crescimento, reprodução, abundância, frequência de ocorrência, biomassa e diversidade de espécies, etc.).

Com base no descrito acima, o presente relatório elenca a(s) evidência(s) encontrada(s) até o momento que caracteriza(m) impacto(s) do rompimento da barragem de Fundão sobre a biodiversidade aquática. Para cada **evidência** indicada, foi feita uma descrição de como a variação observada no **indicador** está relacionada com o impacto indireto ou direto na biodiversidade aquática. Esta descrição foi feita tendo como referência **dados pretéritos pré-rompimento (A)** e **pós-rompimento da barragem (B)** no âmbito da RRDM (dados anteriores ao PMBA); **análise espacial dos resultados entre pontos amostrais impactados e não impactados (C)**; **correlação direta com a presença dos metais característicos do rejeito, como Fe e Mn (D)**; **dados disponíveis na literatura científica (E)** e **legislação vigente (F)**.

No que se refere à questão temporal, para cada **evidência** indicada, foi apontado se as alterações observadas no indicador se deram em curto prazo (**agudo**) ou em longo prazo (**crônico**). Alterações ocorridas em curto período de tempo e por influência de uma alta intensidade do agente estressor foram



consideradas como sendo de caráter **agudo**, enquanto aquelas observadas depois de decorrido um longo período de tempo e por influência de uma baixa intensidade do agente estressor, foram consideradas como sendo de caráter **crônico**.

Com relação ao fator sazonalidade, cabe destacar que no âmbito do PMBA estão sendo considerados os períodos **seco** (maio a setembro) e **chuvoso** (outubro a abril), característicos no Espírito Santo (<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-vitoria>). Considerando que o presente relatório trata apenas dos resultados obtidos durante os primeiros 6 meses de atividades do PMBA em campo (setembro/2018 a março/2019), destaca-se que o efeito da sazonalidade nos impactos observados e apresentados no presente relatório, será identificado apenas após a conclusão dos estudos a serem realizados ao longo dos 12 meses de execução das atividades do PMBA em campo. De fato, futuros eventos estocásticos, os quais somente um monitoramento de longo prazo poderá vir a detectar, podem causar a remobilização dos poluentes e manter ou intensificar os impactos observados.

Conforme apresentado na Seção 3 do Relatório Semestral (RT-05 RRDM/ABR19 a RT-13 RRDM/ABR19), os efeitos da sazonalidade são observados em todos os ambientes abordados no âmbito do PMBA. Sabe-se que a sazonalidade interfere na carga de sedimentos que aporta ao trecho final do rio Doce e área costeira adjacente. Nos períodos chuvosos ocorrem maiores fluxos de água e de concentrações de sedimentos suspensos na coluna d'água. Além disso, maiores velocidades apresentam maior capacidade de ressuspensão de material de fundo. Desse modo, qualquer constituinte que fique adsorvido nas partículas de sedimentos pode causar novos impactos com as variações sazonais. No que se refere à ictiofauna, espera-se uma biomassa maior de todas as espécies e perfis de dietas mais generalistas durante a estação chuvosa, em comparação ao observado na estação seca. Com relação ao ambiente marinho, pode-se inferir que os impactos relacionados à turbidez da coluna d'água têm uma relação direta com momentos de maior descarga do rio (estação chuvosa) e também com momentos de maior energia no sistema. Esse último relacionado principalmente a ventos e ondas com maior intensidade, ligadas a passagens de frente frias, que se intensificam nos períodos mais secos do ano. O aumento de turbidez estaria nesse último caso ligado a processos de ressuspensão do sedimento de fundo. Outro ponto, que também estaria relacionado a essa característica, é a dispersão espacial do sedimento. O aporte, a ressuspensão e a dispersão podem implicar tanto na resposta da comunidade biótica como também nos índices de nutrientes e poluentes, tanto numa escala temporal quanto espacial. Portanto, pode-se considerar que uma possível variabilidade nos impactos pode estar diretamente associada a eventos, que podem ou não estar condicionados a uma sazonalidade. Essa variabilidade nas condições meteorológicas e oceanográficas vai induzir o aporte de rejeito no mar e a ressuspensão de material com rejeito ao longo da plataforma. No que se refere ao ambiente de praia, a mobilidade da lama da antepraia para a praia pode ocorrer em eventos de maior energia de ondas associadas ao regime sazonal do clima de ondas, mais frequentes no outono e no inverno. Por sua vez, são esperadas variações sazonais (seco/chuvoso) nos organismos bentônicos, haja vista que o recrutamento da fauna e a remobilização de sedimentos

ocorrem principalmente no período chuvoso. Quanto aos manguezais, sabe-se que a sazonalidade interfere na hidrodinâmica e no transporte de sedimentos a partir dos estuários. Com as variações de amplitude dos níveis d'água, ocorre maior ou menor inundação das regiões de manguezal. Em situações com maiores magnitudes de correntes, pode haver ressuspensão de material de fundo, e os mesmos serem transportados para o interior dos manguezais. Desse modo, algum constituinte que fique adsorvido nas partículas de sedimentos pode causar novos impactos com as variações sazonais. No caso dos estuários do rio São Mateus e rio Piraquê, as variações das vazões fluviais, entre períodos secos e chuvosos, interferem no alcance espacial de materiais oriundos da área costeira adjacente à sua foz, para o interior dos seus estuários. Quanto à restinga, vários parâmetros biológicos são dependentes da sazonalidade, como por exemplo, fotossíntese, atividade antioxidante, floração e frutificação das plantas, presença de polinizadores e dispersores de sementes. Estes fatores dependem da sazonalidade das chuvas, secas, maior ou menor comprimento do dia, bem como altas e baixas temperaturas. Alterações no processo fotossintético e no acúmulo de biomassa, principalmente quando associado ao déficit hídrico e à alta irradiância, tal qual a comunidade vegetal está sujeita, alteram o metabolismo primário, mesmo numa comunidade onde as variações ambientais são sempre de extremos. Por fim, no que se refere à região de Abrolhos, o transporte de sedimentos na plataforma continental obedece a padrões de correntes marinhas, que por sua vez são influenciados pelos ventos superficiais. Na área de atuação do PMBA, há uma clara sazonalidade nos padrões dos ventos superficiais em decorrência de haver no verão predominância de ventos do setor N-NE, ao passo que o inverno é caracterizado pela maior ocorrência da ação das frentes frias que trazem ventos mais fortes para a região do setor S-SE. Assim, é esperado que no inverno ocorresse maior probabilidade de deslocamento da pluma do Rio do Doce em direção ao Norte.

No que se refere à questão espacial, para cada **evidência** indicada, foi apontado o **ecossistema** (dulcícola/estuarino, marinho, praia, restinga ou manguezal) no qual foram verificadas as alterações no **indicador**. Além disso, foram elencados os impactos observados nas Unidades de Conservação.

O relato da situação atual da área de estudo, as principais respostas do PMBA como um todo, identificando os impactos agudos e crônicos observados nos primeiros 6 meses de monitoramento e na análise de dados pretéritos, bem como as respectivas evidências destes impactos, encontram-se sumarizados abaixo. De uma forma geral, denota-se que foram observadas evidências de impactos que podem ser considerados como agudos e/ou crônicos em todos os ambientes avaliados (dulcícola, estuarino, marinho, praias e manguezais). Além disso, estes impactos foram caracterizados como sendo de diferentes graus, ou seja, alterações na qualidade física, química, geológica e hidrológica do ambiente (**primeiro grau**); danos biológicos e/ou mudanças na condição de saúde dos organismos (**segundo grau**); e efeitos biológicos em nível de população e comunidade (**terceiro grau**). Destaca-se que os impactos de segundo e terceiro grau foram observados em organismos de diferentes níveis tróficos, desde decompositores, produtores até consumidores (primários, secundários e terciários), especialmente nos ambientes dulcícola/estuarino e marinho. Por fim, os impactos observados durante

os 6 meses de execução do PMBA foram comparados com aqueles identificados pela RRDM a partir da análise de dados pretéritos, conforme o relatório específico anteriormente apresentado.

Além das evidências de impactos observadas e elencadas abaixo, cabe ressaltar que vários dos parâmetros que se encontram em avaliação no âmbito do PMBA, nos diversos ambientes monitorados, têm se mostrado como potenciais indicadores de impacto em organismos dos diferentes níveis tróficos, desde a microbiota até mamíferos. Portanto, se fazem necessárias a análise e a integração dos dados gerados ao longo dos 12 meses de monitoramento em curso no âmbito do PMBA, para que sejam identificadas não somente as variações nos parâmetros físico-químicos, geológicos, hidrológicos e biológicos associados à sazonalidade, conforme relatado acima, mas também que sejam caracterizados os indicadores de impactos em longo prazo (crônicos) e as respectivas evidências associadas a estes impactos. Esta estratégia é fundamental para a avaliação dos impactos crônicos, especialmente aqueles em nível de população e comunidade (terceiro grau) de macroinvertebrados e vertebrados.

### 3 IDENTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS AGUDOS E CRÔNICOS NOS AMBIENTES

#### 3.1 AMBIENTE DULCÍCOLA/ESTUARINO

Os impactos agudos e crônicos observados nos ambientes dulcícola (porção capixaba do Rio Doce e lagoas) e estuarino estão apresentados no Quadro 1 e Quadro 2, respectivamente.

Quadro 1: Diferentes graus dos impactos agudos observados no ambiente dulcícola/estuarino.

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Contaminação da água e sedimento por metais	x			A, B, C, D, F
Acumulação de metais na comunidade planctônica		x		A, B
Danos em macromoléculas na biota		x		B, D, E
Mortalidade de dafnídeos e anfípodas			x	C, F
Redução na diversidade do fitoplâncton			x	B, C, E
Redução na diversidade do zooplâncton			x	E
Comprometimento da fecundidade e reprodução do zooplâncton			x	E
Redução da massa zooplânctônica			x	E
Alteração na composição da assembleia de zooplâncton			x	E
Alteração na composição da assembleia de peixes			x	A

Fonte: Autoria própria.

Quadro 2: Diferentes graus dos impactos crônicos observados no ambiente dulcícola/estuarino.

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Contaminação da água e sedimento por metais	x			A, B, C, D, F
Acumulação de metais em camarões, peixes e aves		x		B, D, E
Danos morfológicos em tecidos de peixes		x		C, D, E
Ocorrência de diatomáceas com formas teratológicas no perifíton		x		C
Presença de cianobactérias potencialmente tóxicas		x		B, C, E
Presença de organismos zooplanctônicos com indicação de má-formação morfológica		x		C
Presença de organismos zooplanctônicos com alto índice de parasitismo		x		F
Mortalidade de larvas de peixes e redução na reprodução de dafnídeos			x	C, F
Alteração na composição da microbiota da água e do sedimento			x	C, D, E
Presença de espécies de zooplâncton tolerantes e indicadoras de ambientes enriquecidos por metais, sobretudo Fe			x	C, E
Ocorrência de espécies do perifíton relacionadas com ambientes ácidos			x	C
Baixa biodiversidade de táxons em fitoplâncton, zooplâncton e macrófitas na calha do Rio Doce			x	C, E
Alteração na composição da assembleia de peixes			x	A, B, E
Aumento da biomassa de espécies exóticas de peixes em ambientes mais alterados			x	C
Alteração na riqueza de peixes estuarinos			x	C
Alteração na utilização do habitat por robalos (telemetria)			x	C

Fonte: Autoria própria.

As evidências dos impactos agudos e crônicos observados no ambiente dulcícola e estuarino são as seguintes:

- Impactos evidenciados em pontos do estuário do Rio Doce, através de ensaios de toxicidade. Os bioindicadores mais sensíveis foram os dafnídeos. As amostras coletadas no Baixo Rio Guandu, que é um afluente do Rio Doce, não se mostraram tóxicas, indicando que a toxicidade observada (mortalidade e comprometimento da reprodução) nas amostras oriundas dos demais pontos amostrais estão associados ao rompimento da barragem;
- Contaminação de Mn e Cd na água em níveis acima do preconizado pela legislação brasileira vigente;
- Concentrações de As, Cr, Pb, Cd, Cu, Mn e Fe maiores do que aquelas observadas em amostras de sedimento coletado em monitoramentos pretéritos ao rompimento da barragem (2014) e logo após a chegada da lama no ambiente marinho (2015);
- Bioacumulação de Cr, Cd, Zn e Fe nas diferentes espécies dos diversos níveis tróficos avaliados.

- Aumento temporal na bioacumulação de Fe no zooplâncton. A concentração de Fe acumulado no zooplâncton coletado no presente monitoramento é maior do que aquela observada antes da chegada da lama de rejeitos na foz do Rio Doce (novembro/2015);
- Bioacumulação de Fe marcadamente maior no zooplâncton e nos tecidos dos camarões coletados na estação amostral da foz do Rio Doce (RDF), quando comparada àquela observada nas demais estações amostrais;
- Alterações de biomarcadores, especialmente aqueles associados a danos oxidativos (peroxidação lipídica), detoxificação de metais (metalotioneínas) e danos morfológicos associados a diferentes metais no ambiente e no organismo;
- Alteração na composição da microbiota da água e do sedimento;
- Presença de bioindicadores microbiológicos de metais pesados e grande descarga em rios em todas as amostras de sedimentos e em grande abundância nas amostras de água;
- Ocorrência de diatomáceas com formas teratológicas no perífiton, as quais têm uma correlação positiva com concentrações de metais;
- Ocorrência de espécies relacionadas com ambientes ácidos, os quais são citados na literatura como presentes em locais com mineração;
- Baixos valores de diversidade de táxons do fitoplâncton, zooplâncton e macrófitas na calha do Rio Doce, considerando-se a distribuição quantitativa das espécies, em relação à comunidade;
- As evidências de impacto registradas no conjunto de dados obtidos a partir da análise das amostras de zooplâncton dos ambientes dulcícolas estudados foram as seguintes: baixa riqueza, diversidade e abundância do zooplâncton, especialmente na calha do Rio Doce; ocorrência de cladóceros e copépodes com parasitas epibiontes; baixa ocorrência de cladóceros com embriões e copépodes com sacos ovígeros; e registro de algumas anomalias presentes na carapaça de cladóceros;
- Espécies indicadoras de ambientes com pH ácido que ocorrem em locais impactados pela a atividade da mineração;
- Abundância alta de espécies indicadoras de ambientes enriquecidos com contaminantes e com elevada turbidez.
- O rompimento da barragem funcionou como um estresse adicional num ecossistema já impactado pela influência das barragens ao longo da calha do Rio Doce. É possível que as espécies detritívoras ou raspadores de fundo tenham sofrido declínios populacionais e que as espécies naturalmente raras tenham se tornado ainda menos frequente. A ausência de espécies ameaçadas é bastante ilustrativa, indicando que a assembleia de peixes é formada apenas por espécies tolerantes, com forte componente de espécies exóticas;

- Composição desequilibrada da assembleia de peixes e o perfil das guildas funcionais, as quais refletem de forma direta as alterações ocorridas no fundo do rio;
- Desaparecimento agudo de espécies de ampla distribuição na bacia do Rio Doce;
- Impacto crônico na abundância de classes de tamanho de peixes exóticos, como a tilápia *Oreochromis niloticus*, do tucunaré *Cichla cf. monoculus*, e até mesmo da espécie nativa *Poecilia vivipara*;
- A biomassa relativa das espécies exóticas em relação à biomassa das espécies nativas é sempre maior em locais mais impactados, como a calha na proximidade da UHE Mascarenhas. A biomassa das espécies nativas é maior em locais não impactados diretamente pelo rejeito de minério, como as lagoas do Óleo e Limão e um canal de drenagem da Lagoa Palminhas;
- Alteração na riqueza de peixes estuarinos, uma vez que nos rios Piraquê-Açu, São Mateus e Caravelas foram observados aumentos de riqueza na área interna nos meses de maior pluviosidade (novembro e dezembro), enquanto no rio Doce foi observada uma redução desta riqueza;
- No que se refere à alteração na utilização do habitat por robalos (telemetria), foi observado que entre os pontos amostrados no rio Doce, estes organismos utilizaram mais as áreas que não apresentaram assoreamento pela lama de rejeito, preferindo utilizar as áreas de maior profundidade;
- Níveis elevados de Mn, As e Zn, tanto no sangue quanto nas penas das aves estuarinas avaliadas;
- Acumulação crônica de Fe e As nas penas das aves estuarinas.

### 3.2 AMBIENTE MARINHO

Os impactos agudos e crônicos observados no ambiente marinho estão apresentados no Quadro 3 e Quadro 4, respectivamente.

Quadro 3: Diferentes graus dos impactos agudos observados no ambiente marinho.

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Afinamento da granulometria do sedimento de fundo	x			A, B, E
Aumento da quantidade de material particulado em suspensão	x			A, B,
Diminuição na densidade do depósito sedimentar	x			A, B
Contaminação da água e sedimento por metais	x			A, B, C, D, F
Acumulação de metais no plâncton		x		B, D
Redução na saúde fisiológica do fitoplâncton		x		A, B
Acumulação de metais em camarões e peixes		x		B, C, D, E
Danos em macromoléculas em invertebrados e peixes		x		B, C, D
Redução na fertilização de ouriços do mar			x	C, F
Aumento na biomassa do fitoplâncton			x	A, B

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Aumento na abundância do zooplâncton			x	A, B
Diminuição na riqueza de espécies no zooplâncton			x	A, B
Aumento na mortalidade (presença de vestígios) de organismos bentônicos			x	A
Diminuição na densidade de organismos bentônicos			x	A, B

Fonte: Autoria própria.

Quadro 4: Diferentes graus dos impactos crônicos observados no ambiente marinho.

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Afinamento da granulometria do sedimento de fundo	x			A, B
Diminuição na densidade do depósito sedimentar	x			A, B
Dispersão dos rejeitos ao longo da costa	x			A, B, C
Contaminação da água e sedimento por metais	x			A, B, D, F
Acumulação de metais no plâncton		x		B, C, D, E
Redução na saúde fisiológica do fitoplâncton		x		A, B
Acumulação de metais em camarões e peixes		x		B, C, D, E
Danos em macromoléculas em invertebrados e peixes		x		B, C, D
Danos morfológicos em tecidos de peixes		x		C, D, E
Redução no desenvolvimento embrio-larval de ouriços do mar e na reprodução de copépodes			x	C, F
Impacto na microbiota associada aos corais em Abrolhos			x	C, E
Diminuição na densidade de organismos fitoplanctônicos			x	A, B
Diminuição da riqueza e composição do fitoplâncton			x	A, B
Alteração na estrutura da comunidade zooplanctônica			x	A, B
Aumento na mortalidade (presença de vestígios) de organismos bentônicos			x	A
Aumento na densidade de poliquetas			x	A
Alteração na composição da assembleia de crustáceos			x	B
Alteração na composição da assembleia larval de peixes recifais			x	C
Alteração na composição da fauna de ambientes recifais			x	C
Alteração no uso do habitat de ave marinha			x	A
Alta incidência de encalhes de mamífero marinho			x	A
Ocorrência de viroses e processos infecciosos em mamífero marinho			x	A

Fonte: Autoria própria.

As evidências dos impactos agudos e crônicos observados no ambiente marinho são as seguintes:

- Diminuição da granulometria com tendência de aumento de sedimentos finos, principalmente em estações próximo a foz do Rio e em maiores profundidades;
- Diminuição da densidade de fundo em estações mais rasas e próximas a foz, proporcionando uma maior suscetibilidade a ressuspensão;

- Ocorrência de maiores volumes de fases minerais contendo Fe em comparação a valores anteriores ao rompimento da barragem, apresentando uma dispersão preferencial (domínio de ventos do setor N e NE) a partir da foz em direção a sul, atingindo a região da APA Costa das Algas. O mesmo sendo observado para suscetibilidade magnética. Dessa forma, observa-se que aqui está se considerando estas observações como uma assinatura da presença do rejeito (sem quantificação do volume de rejeito), desde a APA Costa das Algas, passando por Degredo, Barra Nova e Itaúnas, com indícios de aumento da suscetibilidade magnética para a região de Abrolhos e a não observação de aumento das fases minerais de Fe ou de susceptibilidade magnética na plataforma sul (Vitória e Guarapari);
- Dispersão do rejeito para norte e sul, com presença na APA Costa das Algas, Foz do Rio Doce e Norte do ES, com indícios da presença na estação rasa adjacente a Nova Viçosa, região de Abrolhos;
- Evidências de plumas sedimentares se dispersando para Sul e Norte, obtidas através da modelagem numérica de dispersão de sedimentos e sensoriamento remoto;
- Correlação positiva entre o aumento da energia de onda, aumento na concentração de material particulado em suspensão, aumento nos teores de metais na fração particulada em suspensão e impacto no fitoplâncton. Esse processo é um indicador importante da ressuspensão e dispersão do rejeito;
- Aumento das concentrações dos elementos Al, Fe, Mn, Ba, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr e V, inicialmente na coluna d'água, tanto na fração dissolvida como particulada, e posterior reflexo no aumento das concentrações nos sedimentos superficiais, associados à chegada da lama de rejeitos na foz do Rio Doce;
- Persistência de elevadas concentrações de elementos como Fe, Al, As, Cr, Cu, Ni e Zn, nas principais áreas influenciadas inicialmente pelo aporte de rejeitos, setores Foz do Rio Doce (Central, Sul e Norte) e APA Costa das Algas;
- Persistência de variações nas concentrações de metais na coluna d'água, devido tanto ao aporte do Rio Doce quanto a flutuações nas comunidades planctônicas, sendo estas também verificadas para nutrientes;
- Contaminação de Fe, Mn, Cu, Hg na água em níveis acima do preconizado pela legislação brasileira vigente, com padrão espacial relacionado à distância com a foz do Rio Doce;
- Maiores concentrações de Fe, Mn e Cr nas amostras coletadas nas estações próximas a foz do Rio Doce;
- Concentrações elevadas de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos em algumas amostras, principalmente defronte à foz do Rio Doce, porém sem uma possível inferência direta ou uma relação intrínseca da presença destes contaminantes orgânicos no material de rejeito;



- Impactos evidenciados em pontos da foz do Rio Doce e APA Costa das Algas, através de ensaios de toxicidade. Os bioindicadores mais sensíveis foram ouriços e *Nitokra* ssp.;
- Aumento na bioacumulação de Fe no zooplâncton nas amostras coletadas nos pontos localizados na APA Costa das Algas e na foz do Rio Doce, em relação àquela observada 360 e 840 dias após a chegada da lama na foz do Rio Doce;
- Maiores acumulações de Fe, Cr e Hg no zooplâncton, camarões e peixes em pontos localizados na foz do Rio Doce e na APA Costa das Algas;
- Maior indução de dano oxidativo em lipídios (lipoperoxidação) e proteínas (carbonilação de proteínas) nos tecidos de peixes coletados nos pontos localizados na foz do Rio Doce, seguido daqueles localizados na APA Costa das Algas;
- Maiores níveis dos índices de dano histopatológico nas amostras de peixes coletados nos pontos localizados na foz do Rio Doce, seguido daqueles localizados na Costa das Algas e na área de Degredo;
- Indução da atividade de enzimas antioxidantes e da concentração de metalotioneínas, atuantes no metabolismo antioxidante e no metabolismo de metais, nas amostras coletadas na APA Costa das Algas;
- Impactos por metais nas Unidades de Conservação localizadas na Costa das Algas;
- Influência de metais associados ao rompimento da barragem nas amostras coletadas no Parque Nacional Marinho de Abrolhos, haja vista os níveis de bioacumulação e efeitos biológicos associados ao Fe, Cr e Hg;
- Alteração na microbiota dos corais nos recifes de Abrolhos, revelando um impacto na saúde destes organismos;
- Presença de grupos microbianos indicadores de estresse em corais nos pontos de coleta ABR01 (Reserva Extrativista de Cassurubá) e ABR02 (Parque Nacional Marinho de Abrolhos);
- Presença do bioindicador para o impacto do rompimento da barragem (gênero *Candidatus Scalindua*) em corais coletados nos pontos ABR01 e ABR02;
- Impactos evidenciados em pontos da foz do Rio Doce e REVIS Santa Cruz, através de ensaios de toxicidade, indicando efeitos na fertilização e desenvolvimento embrio-larval de ouriços do mar e na reprodução de copépodes;
- Mudanças na composição da comunidade fitoplanctônica que, por sua vez, geraram um aumento da abundância e diminuição da biomassa;
- Aumento da densidade de organismos fitoplanctônicos e zooplanctônicos e diminuição do número de espécies e favorecimento de espécies oportunistas;

- Diminuição na densidade de organismos bentônicos com partes moles no corpo (nematodas, platelmintos, crustáceos e poliquetas) na fase aguda do impacto;
- Aumento no número de vestígios de organismos bentônicos (conchas de gastrópodes e valvas de bivalves);
- Aumento no número de tubos e capturas de poliquetas na fase crônica do impacto;
- Retorno dos organismos do filo Bryozoa e aumento na captura de esqueletos destes organismos nas estações mais profundas, indicando ciclos de mortalidade desses organismos devido à perturbação de curto período (remobilizações, aumento no aporte fluvial, etc.);
- Alteração na composição da assembleia de crustáceos: no presente estudo foram observadas espécies diferentes daquelas observadas por CTA (2017). O presente estudo coletou composição diferente de espécies de crustáceos que CTA (2017), mas mantendo a riqueza de espécies muito semelhantes entre si;
- Alteração na composição da assembleia larval de peixes recifais: menor abundância de larvas e menor biomassa foram registradas na zona de Impacto (em frente ao Rio Doce). A maior abundância, riqueza, diversidade e biomassa de larvas foi registrada no ponto “Controle 2 (São Mateus)”;
- Mudança persistente na composição (ou lenta recuperação) das assembleias de peixes recifais e no aporte larval na área de impacto em comparação com as demais. Observa-se uma fauna menos abundante, mais pobre em espécies e com menor tamanho, tanto para larvas quanto adultos de peixes recifais, nos locais próximos a foz do rio Doce. Porém, mais dados são necessários para identificar a variabilidade natural associada às variações temporal e espacial das assembleias de peixes e aqueles atribuídos ao impacto do rompimento da barragem;
- A ave Rabo-de-palha, *Phaethon aethereus*, rastreada em período pré- e pós-rompimento da barragem, apresentou alteração do uso do habitat, sendo que sua área de distribuição aumentou e mudou drasticamente a direção de forrageio em relação à colônia em Abrolhos. Antes do rompimento da barragem, esta espécie de ave forrageava a sul/sudeste, sendo que após o ocorrido o forrageio foi para norte/leste-nordeste. Aparentemente, os indivíduos evitaram a área utilizada pela espécie em 2012, mostrando assim uma mudança no comportamento, que pode ser devido à contaminação da área antes utilizada, ou a variações sazonais normais;
- Ocorrência de viroses no boto-cinza (*Sotalia guianensis*), que podem ser causadas por efeito de poluentes;
- Alta incidência de encalhes de toninha (*Pontoporia blainvillei*), que consta na Lista Nacional Oficial das Espécies de Fauna Ameaçada de Extinção como “ criticamente em Perigo”. De fato, esta espécie apresentou 12 indivíduos encalhados em apenas cinco meses, sendo um alerta preocupante, pois esta quantidade de animais mortos nesta fase crônica de monitoramento é quase quatro vezes superior aos

encalhes da espécie na fase considerada aguda e acima de três vezes em relação à fase anterior ao acidente;

- Processos infecciosos associados a enfermidades sabidamente relacionadas com imunodeficiência, como morbilivírus, foram considerados como sendo a segunda maior causa de mortalidade entre os cetáceos encalhados, compreendendo 10 registros (30%).

### 3.3 PRAIAS

Os impactos agudos e crônicos observados nas praias estão apresentados no Quadro 5 e Quadro 6.

Quadro 5: Diferentes graus dos impactos agudos observados nas praias.

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Deposição de lama na antepraia rasa	x			E
Alteração no diâmetro médio e na composição mineralógica dos sedimentos	x			A, E
Contaminação da água e dos sedimentos por metais	x			A, C, D, E
Bioacumulação de metais em invertebrados		x		C, D
Danos em macromoléculas em invertebrados		x		C, D

Fonte: Autoria própria.

Quadro 6: Diferentes graus dos impactos crônicos observados nas praias.

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Presença de lama na antepraia rasa	x			E
Alteração no diâmetro médio e na composição mineralógica dos sedimentos	x			A, E
Contaminação da água e dos sedimentos por metais	x			A, C, D, E
Bioacumulação de metais em invertebrados e aves		x		C, D, E
Danos em macromoléculas em invertebrados		x		C, D
Redução da riqueza, densidade e diversidade da macrofauna			x	A, C, D
Aumento da riqueza, densidade e diversidade da meiofauna e nematofauna			x	A, C, D
Alteração na distribuição e densidade dos organismos			x	A, C, E

Fonte: Autoria própria.

As evidências dos impactos agudos e crônicos observados nas praias são as seguintes:

- Presença da lama na antepraia rasa das estações próximas à desembocadura do Rio Doce, área de atuação intensa de ondas. Pelas ondas, até a profundidade de 10 m, observa-se o perfil de fechamento. No entanto, era esperada a ocorrência de areias nesta região;

- Leve afinamento do diâmetro médio dos sedimentos nas estações da planície deltaica do rio Doce;
- Ausência de indicadores de deposição de lama proveniente do rio Doce na costa das falésias e tabuleiros e falésias, entre Barra do Saí e Mole;
- Composição mineralógica com predominância de até 95% de minerais pesados opacos (minerais de Fe) nos sedimentos depositados pela deriva litorânea para norte;
- Elevados teores de Fe e Al, especialmente nos sedimentos submersos da antepraia;
- Padrão espacial de resposta do biomarcador de estresse utilizado (lipoperoxidação) coincidente com os padrões observados de bioacumulação dos metais analisados (principalmente Fe, Mn, Cu e Hg) indicando que aqueles associados ao evento do rompimento da barragem de Mariana ainda se encontram disponíveis para assimilação pelos organismos analisados;
- Níveis elevados de acumulação de Mn, As e Zn no sangue e penas das aves;
- Redução da riqueza, densidade e diversidade da macrofauna em Degredo, em relação aos dados pretéritos, apesar da composição ser a esperada de acordo com as referências para fauna bentônica de praia. Essa redução dos valores dos índices pode ser um indicador para as demais praias;
- Aumento nos índices para meiofauna e nematofauna na praia de Degredo, após o rompimento da barragem;
- Discrepância na distribuição de alguns organismos característicos de praia com aquela descrita na literatura. Por exemplo, não foi observada diferença significativa na densidade do isópoda *Excirrolana* entre praias refletivas e dissipativas, sendo que o esperado é que este organismo seja mais abundante nas praias refletivas. Por outro lado, eram esperados maiores índices para os indivíduos do filo Nemertea nas praias dissipativas, sendo que os maiores valores foram observados nas praias refletivas;
- Discrepância na densidade de organismos, haja vista que as maiores densidades de organismos não foram observadas nas praias dissipativas e sim nas praias refletivas, principalmente devido à alta densidade de *Saccocirrus*, em Barra do Riacho, e de indivíduos do filo Nemertea, em Povoação e Comboios.

### 3.4 MANGUEZAIS E RESTINGA

Os impactos agudos e crônicos observados nos manguezais e restingas estão apresentados no Quadro 7 e Quadro 8, respectivamente.

Quadro 7: Diferentes graus dos impactos agudos observados nos manguezais e restinga.

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Deposição de lama nos manguezais	x			A, B
Desaparecimento de espécies de restinga			x	C

Fonte: Autoria própria.

Quadro 8: Diferentes graus dos impactos crônicos observados nos manguezais e restinga.

Impacto	Grau			Referência
	1º	2º	3º	
Bioacumulação de metais em caranguejos e aves de manguezal		x		E
Danos em macromoléculas nos caranguejos de manguezal		x		D
Redução na fecundidade de caranguejos		x		A
Alteração na composição da fauna de manguezais			x	A
Redução na fecundidade de caranguejos			x	A
Desaparecimento de espécies de restinga			x	C
Clorose em plantas de restinga			x	C, D
Inibição da etapa fotoquímica da fotossíntese em plantas da restinga			x	D, E
Alterações na taxa de fotossíntese líquida e na condutância estomática em plantas da restinga			x	D, E
Ausência de floração em plantas da restinga			x	C, E
Redução na taxa de germinação de sementes em plantas da restinga			x	C, E

Fonte: Autoria própria.

As evidências dos impactos agudos e crônicos observados nos manguezais e restinga são as seguintes:

- Relatos de depósito de lama pela comunidade e observações da equipe de campo, nos manguezais das seguintes áreas: Rio Urussuquara, Rio Mariricu, Rio Riacho, Rio Laranjeiras (Aracruz) e Rio Piraquê-Açú.;
- Altas concentrações de Fe, Mn e Cr nos tecidos (brânquias, hepatopâncreas e músculo) dos caranguejos *Ucides cordatus*, *Cardisoma guanhumi* e *Goniopsis cruentata*;
- Dados de fecundidade de *U. cordatus* coletados nos manguezais do Rio São Mateus no ano de 2018 indicaram uma redução de 20% quando comparados a dados pretéritos (2015 e 2016) coletados no mesmo estuário, sendo que avaliações temporais deverão contribuir para o diagnóstico da causa da redução de fecundidade observada.
- A fauna da planície lamosa sujeita a influência do sal na foz do Rio Doce se caracterizava pela ocorrência de *C. guanhumi* como a espécie de decápode típica destas áreas intertidais. No entanto, após o monitoramento, foram coletados exemplares de *G. cruentata* nesta região. De acordo com relatos da comunidade local, esta espécie não ocorria anteriormente na planície de inundação. Mais recentemente, houve também relatos da ocorrência de *U. cordatus*, espécie cuja ocorrência não havia

sido registrada em algumas localidades na foz do Rio Doce, as quais estão sendo monitoradas atualmente. Destaca-se que as espécies mencionadas acima são típicas da zona intertidal, mas que não possuíam registro de ocorrência na referida localidade;

- Níveis elevados de Mn, As e Zn no sangue e penas das aves coletadas nos manguezais;
- Ocupação de nichos por espécies de manguezais que não se encontravam anteriormente presentes no sistema Rio Doce (foz);
- Ausência de algumas espécies em uma ou duas estações de amostragem na região de restinga. Porém, mais dados são necessários para confirmar se esta ausência foi provocada pela salinidade ou alteração da densidade do solo provocada pelos resíduos de mineração ou ainda por outro tipo de ação antrópica;
- Altas concentrações de Fe e Mn no solo e nas plantas podem inibir a biossíntese de clorofila em folhas. Consequentemente poderia provocar também a queda da eficiência fotoquímica e da fotossíntese líquida. Essas alterações foram observadas em algumas espécies nas diferentes estações de amostragem (clorose, alteração da etapa fotoquímica e da fotossíntese líquida) e são potenciais indicadores dos efeitos dos rejeitos no ambiente;
- Algumas espécies ainda não floresceram, enquanto em outras espécies não foram observados frutos durante o período de amostragem. Estes parâmetros são indicadores de vários estresses abióticos, conforme relatado na literatura científica, sendo que pelo menos os 12 meses de observação serão necessários para avaliar os aspectos da anualidade de floração da maioria das espécies em estudo;
- Constatação de uma taxa muito baixa de germinação das sementes (<20%), sendo este um forte indicador de estresse mineral.

#### **4 IDENTIFICAÇÃO DOS IMPACTOS NAS UNIDADES DE CONSERVAÇÃO**

A seguir, são descritas as principais evidências de impactos observados nas Unidades de Conservação localizadas na área do monitoramento realizado no âmbito do PMBA.

##### **4.1 ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DE SETIBA**

As principais evidências de impactos observados durante o monitoramento marinho na APA de Setiba estão associados à estação amostral Guarapari 2 (GUA2). Nesta estação amostral foram detectados níveis de concentração de Cu dissolvido na água acima do permitido pela legislação vigente (CONAMA 357/2005). Além disto, os valores de atividade da enzima lactato desidrogenase (LDH) e o índice de lesão hepática em peixes coletados nesta estação amostral se encontraram acima da média observada durante o monitoramento.

#### 4.2 REFÚGIO DE VIDA SILVESTRE SANTA CRUZ E ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL COSTA DAS ALGAS

Os dados obtidos na primeira campanha do PMBA evidenciaram a ocorrência de maiores volumes de fases minerais contendo Fe, em comparação a valores anteriores ao rompimento da barragem. Neste caso, foi observada uma dispersão preferencial (domínio de ventos do setor N e NE), a partir da foz em direção a sul, atingindo a região da APA Costa das Algas. O mesmo foi observado para a suscetibilidade magnética. Dessa forma, observou-se uma assinatura da presença do rejeito (sem quantificação do volume de rejeito) na APA Costa das Algas. Além disso, foi observado o afinamento da granulometria do sedimento de fundo na APA Costa das Algas, bem como uma quantidade de material particulado em suspensão muito superior (na ordem de 10 vezes) à média local pré-rompimento da barragem, com consequente diminuição da densidade do depósito. No que concerne à contaminação química, foram observadas elevadas concentrações de Fe, Al, As, Cr, Cu, Ni e Zn. De fato, algumas estações amostrais na área da APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz apresentaram níveis de concentrações de metais na água em não conformidade com a legislação CONAMA 357/2005, principalmente para Fe e Hg. Os metais Fe e Mn também apresentaram valores de concentração relativamente altos em amostras de sedimentos coletadas no REVIS Santa Cruz e na APA Costa das Algas. Entretanto, estes metais não possuem limites máximos estabelecidos para amostras de sedimento na legislação brasileira (CONAMA 454/2012).

Considerando os ensaios de toxicidade com organismos marinhos, as estações amostrais Costa das Algas 1 (CA1) e Costa das Algas 2 (CA2) foram classificadas como "moderadamente tóxicas", embora os valores médios de toxicidade tenham ficado na margem do nível "moderadamente tóxico" para o "tóxico", principalmente para a estação amostral CA2. Estes ensaios também mostraram maior toxicidade associada ao sedimento do que à água superficial. No que se refere à biota, o plâncton, base da cadeia trófica, apresentou acumulação de Fe e Cr em níveis semelhantes ou maiores que aqueles observados na foz do Rio Doce (FRD). Os resultados do índice Integrado de Resposta de Biomarcadores (IBR), os quais integram a resposta de todos os biomarcadores avaliados, indicam níveis importantes de resposta dos biomarcadores nas estações amostrais do REVIS Santa Cruz e da APA Costa das Algas. Estes resultados podem ser observados tanto pelo IBR calculado para plâncton, quanto pelo IBR total. Em camarões e peixes, a bioacumulação de Fe e Cr foi similar ao observado nos indivíduos coletados na estação amostral FRD, e maiores que aqueles encontrados em indivíduos coletados em UCs distantes da foz do Rio Doce. Além disso, foi observado um nível considerável de danos em macromoléculas (lipoperoxidação) nestes animais. Algumas amostras de caranguejos e peixes apresentaram concentrações de As, Cd e Pb no músculo acima dos limites estabelecidos pela legislação (Resolução 042/2013 da ANVISA). Quanto aos ambientes recifais, foi observado um menor número de espécies de peixes na APA Costa das Algas, em comparação com as demais áreas estudadas. Nas áreas de manguezais, foi observada a deposição de lama e a ocupação de nichos por espécies de manguezais que não se encontravam anteriormente presentes no sistema da foz do Rio Doce.

#### 4.3 RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL MUNICIPAL PIRAQUÊ-AÇU E PIRAQUÊ-MIRIM

Foi observada deposição de lama nos manguezais, bem como a ocupação de nichos por espécies de manguezais que não se encontravam anteriormente presentes no sistema da foz do Rio Doce.

#### 4.4 RESERVA BIOLÓGICA DE COMBOIOS E RESERVA INDÍGENA DE COMBOIOS

Com relação às análises de metais na biota, pode-se destacar que algumas amostras de músculo dos caranguejos da espécie *Ocypode quadrata* coletados na estação amostral Doce Sul 2 - Comboios (DSC) apresentaram concentração de As superior àquela estabelecida pela Resolução 042/2013 da ANVISA. No monitoramento da restinga, foram observadas alterações no valor de importância de algumas espécies e alterações na atividade fotossintética das plantas.

#### 4.5 ÁREA DE RELEVANTE INTERESSE ECOLÓGICO DO DEGREDO

Em Degredo, foi observada uma assinatura da presença do rejeito oriundo do rompimento da barragem de Fundão, porém sem quantificação do volume deste rejeito. Em geral, as praias e regiões costeiras adjacentes apresentaram concentrações de Fe, Mn e Hg acima dos limites estabelecidos pela Resolução 357/2005 do CONAMA. Os resultados do monitoramento biológico das praias indicaram que os caranguejos da espécie *Ocypode quadrata* coletados na estação amostral Doce Norte 2 – Vila de Cacimbas (DNC) apresentaram os maiores níveis dos biomarcadores de estresse (lipoperoxidação e proteínas carboniladas). Além disto, estes animais também apresentaram os maiores valores de acumulação de Cu e Hg no hepatopâncreas, bem como de Hg no músculo. Por fim, uma comparação com dados pretéritos mostra que, em Degredo, houve uma redução dos índices de riqueza, densidade e diversidade da macrofauna, bem como um aumento destes índices para a meiofauna e a nematofauna, após o rompimento da barragem.

#### 4.6 ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL CONCEIÇÃO DA BARRA

Para a estação amostral Rio São Mateus (RSM), foram observadas amostras de músculo de caranguejos com concentrações de Pb acima dos valores permitidos pela legislação (Resolução 042/2013 da ANVISA). Estes resultados foram observados para os caranguejos das espécies *Ucides cordatus* e *Cardisoma guanhumi* coletados na estação amostral RSM. No monitoramento da restinga foram observadas alterações no valor de importância e na atividade fotossintética de algumas plantas.



#### 4.7 PARQUE NACIONAL MARINHO DE ABROLHOS, ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL PONTA DA BALEIA/ABROLHOS E RESERVA EXTRATIVISTA DE CASSURUBÁ

De maneira geral, pôde-se observar uma diminuição das concentrações ambientais de metais na região, em comparação com aquelas relatadas em campanhas anteriores. Entretanto, os níveis de concentração de Fe dissolvido e Hg total na água estão acima do limite aceitável para a conservação da biodiversidade marinha, de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005. Considerando-se os efeitos fisiológicos observados na comunidade zooplânctônica coletada na região de Abrolhos, observa-se um aumento na lipoperoxidação e uma indução na concentração de metalotioneínas nas estações amostrais com maior contaminação por Hg, Cu, Cr, Zn e Pb na água e na biota. O IBR calculado para o plâncton reforça este resultado, demonstrando maiores respostas de biomarcadores nos organismos coletados na região. Em corais, foi observada uma correlação negativa entre a atividade de enzimas envolvidas nos processos de calcificação e fotossíntese com a concentração de alguns metais na água e no sedimento. A análise da microbiota associada a corais revelou uma grande presença de grupos bacterianos que são possíveis patógenos de coral, assim como indicadores de estresses ambientais, nos corais dos recifes não controle, principalmente nas estações amostrais Abrolhos 1 (ABR01) e Abrolhos 2 (ABR02). Somente nestes mesmos recifes (ABR01 e ABR02), foi encontrado o gênero *Candidatus Scalindua*. Este gênero foi o único relatado no sedimento de todas as estações de coleta do Rio Doce e com abundância relativamente alta na água do rio. Cabe ressaltar que este é um gênero conhecido por indicar a presença de metal pesado e o aumento da descarga em rios. Resultados de estudo pretérito, baseado nos isótopos radiogênicos de Sr e Nd, realizado por pesquisadores da RRDM mostram uma assinatura sedimentar de mistura entre os sedimentos de Abrolhos e da foz do Rio Doce. Tais sedimentos referem-se ao material particulado suspenso na coluna d'água, e que foram coletados em armadilhas de sedimentos instaladas no Parque Nacional Marinho de Abrolhos.

## 5 COMPARAÇÃO COM OS IMPACTOS OBSERVADOS A PARTIR DA ANÁLISE DOS DADOS PRETÉRITOS

Conforme já apresentado pela RRDM em relatório específico, foram identificados, a partir da análise de dados pretéritos, os impactos agudos e crônicos listados no Quadro 9 e 10, respectivamente. De uma forma geral, quando estes impactos são comparados com aqueles observados a partir das análises realizadas nos 6 meses de execução do PMBA (Quadro 1 a 8), denota-se ainda a persistência da grande maioria dos mesmos, tais como toxicidade letal e subletal das amostras ambientais (água e sedimento) oriundas da região estuarina do Rio Doce, impacto na comunidade bentônica das praias, alteração nas comunidades do plâncton (fitoplâncton e zooplâncton), acumulação de metais nos pescados, impacto no equilíbrio da produção primária, impacto na vegetação ripária, impacto na comunidade bentônica marinha, biodisponibilidade de metais a partir dos sedimentos e acumulação de

metais nos organismos bentônicos. Por outro lado, durante a execução do PMBA foram detectados impactos em fundos de rodolitos e recifais, que não haviam sido previamente observados nos poucos estudos realizados preteritamente. Além disso, os resultados gerados pela RRDM nos primeiros 6 meses de execução do PMBA identificaram evidências de impactos que constavam anteriormente como sem diagnóstico claro nos relatórios de dados pretéritos, especialmente aqueles sobre os manguezais, ictiofauna e megafauna, bem como da dispersão, extensão da ocorrência e impacto do rejeito ao longo da região costeira adjacente à foz do Rio Doce.

Quadro 9: Impactos agudos observados a partir da análise de dados pretéritos e acrescidos dos resultados de 6 meses de PMBA.

	<b>Indicativos de impactos físicos e químicos</b>	<b>Resposta-Impacto na biodiversidade</b>	<b>Sem diagnóstico claro nos relatórios Dados Pretéritos</b>	<b>Novos resultados a partir do PMBA – 6 meses</b>
<b>IMPACTOS AGUDOS</b>	Fluxo de lama com alta concentração, soterramento, altas taxas de sedimentação no mar, pluma de alta densidade da granulometria na praia e no mar, deposição de lama nas antepraias.	Mortandade de peixes e fauna de água doce; Rápido acúmulo de sedimento sobre a vegetação ripária; Percolação de lama ao longo das praias impactando a comunidade bentônica; Soterramento e impacto nos organismos bentônicos do estuário e região marinha adjacente.	Impacto nos manguezais, impacto na megafauna e extensão do impacto nas praias.	Aumento na mortalidade (presença de vestígios) de organismos bentônicos; Diminuição na densidade de organismos bentônicos.
	Aumento no teor de metais na água (fração dissolvida e particulada) e no sedimento, alguns acima dos valores permitidos na legislação.	Alteração na comunidade fitoplanctônica, com a diminuição do número de espécies; Explosão no número de indivíduos jovens no zooplâncton, com a diminuição do número de espécies e elevação na dominância de duas espécies; Bioacumulação do pescado com índices de	Impacto nos manguezais, impacto na megafauna, impacto na ictiofauna e extensão do impacto nas praias.	Acumulação de metais no plâncton; Redução na saúde fisiológica do fitoplâncton; Acumulação de metais em camarões e peixes; Danos em macromoléculas em invertebrados e peixes (rio, praias e mar); Aumento na biomassa do fitoplâncton; Aumento na abundância do zooplâncton; Diminuição na riqueza de espécies no zooplâncton;

	<b>Indicativos de impactos físicos e químicos</b>	<b>Resposta-Impacto na biodiversidade</b>	<b>Sem diagnóstico claro nos relatórios Dados Pretéritos</b>	<b>Novos resultados a partir do PMBA – 6 meses</b>
		toxicidade acima da legislação; Impacto no equilíbrio da produção primária.		Acumulação de metais na comunidade planctônica; Mortalidade e redução no desenvolvimento embriol larval; Comprometimento da fecundidade e reprodução; Redução na diversidade do fitoplâncton; Alteração na composição da assembleia de peixes dulcícolas; Bioacumulação de metais em invertebrados nas praias; Desaparecimento de espécies de restinga.

Fonte: Relatório de Avaliação e Consolidação de Dados pretéritos (RT-01 RRD/OUT18).

Quadro 10: Impactos crônicos observados a partir da análise de dados pretéritos e acrescidos dos resultados de 6 meses de PMBA.

	<b>Indicativos de impactos físicos e químicos</b>	<b>Resposta-Impacto na biodiversidade</b>	<b>Sem diagnóstico claro nos relatórios Dados Pretéritos</b>	<b>Novos resultados a partir do PMBA – 6 meses</b>
IMPACTOS CRÔNICOS	Extensão do Rejeito Acumulado nas regiões costeira e marinha	Relatório único indica nenhum impacto em fundos de rodólitos; Relatório único indica nenhum impacto em fundos recifais	Impacto nos bentos de sedimento inconsolidado, inconclusivo na extensão de ocorrência de rejeito, com indicativo de dispersão para o norte, indicativo de presença em Abrolhos (porém inconclusivo)	Indicadores de deposição de rejeito entre a APA Costa das Algas e o limite Norte do ES, com potencial aporte diluído na região costeira de Abrolhos (a ser definido nos 6 meses seguintes); Indicador claro de redução da riqueza, densidade e diversidade da macrofauna de praias em Degredo, em função de comparação com dados pretéritos (único ponto com dados pretéritos disponíveis);

	Indicativos de impactos físicos e químicos	Resposta-Impacto na biodiversidade	Sem diagnóstico claro nos relatórios Dados Pretéritos	Novos resultados a partir do PMBA – 6 meses
				<p>Observação da presença de minerais indicadores do rejeito em sedimentos associados a fundos de rodólitos;</p> <p>Aumento na mortalidade (presença de vestígios) de organismos bentônicos marinhos entre APA e Degredo;</p> <p>Aumento da riqueza, densidade e diversidade da meiofauna e nematofauna nas praias;</p> <p>Alteração na distribuição e densidade dos organismos.</p>
	<p>Influência da sazonalidade no aporte de lama de rejeito e elevação nos teores de metais na água nos ambientes estudados</p>	<p>Impacto na vegetação ripária;</p> <p>Elevação nos valores de toxicidade no pescado;</p> <p>Impacto na comunidade bentônica na região estuarina e marinha;</p> <p>Impacto contínuo na produção primária e consequentemente nas comunidades de fito e zooplâncton.</p>	<p>Impacto nos manguezais, impacto na megafauna, extensão do impacto nas praias e não conclusivo sobre impactos na ictiofauna.</p>	<p>Rio:</p> <p>Acumulação de metais em camarões, peixes e aves;</p> <p>Danos merfológicos em tecidos;</p> <p>Ocorrência de diatomáceas com formas teratológicas no perifiton relacionadas com ambientes ácidos;</p> <p>Redução na diversidade do fitoplâncton;</p> <p>Alteração na composição da assembleia de peixes.</p>
	<p>Aumento nos níveis de metais e sedimento ao longo do tempo</p>	<p>Processos biogeoquímicos no sedimento depositado levando à biodisponibilização de metais e impactado a comunidade bentônica;</p> <p>Impacto no aumento de metais na comunidade bentônica;</p>	<p>Impacto nos manguezais, impacto na megafauna, extensão do impacto nas praias e não conclusivo sobre impacto na ictiofauna.</p>	<p>Mar:</p> <p>Acumulação de metais no plâncton;</p> <p>Redução na saúde fisiológica do fitoplâncton;</p> <p>Danos em macromoléculas em invertebrados e peixes;</p> <p>Danos morfológicos em tecidos de peixes;</p>

Indicativos de impactos físicos e químicos	Resposta-Impacto na biodiversidade	Sem diagnóstico claro nos relatórios Dados Pretéritos	Novos resultados a partir do PMBA – 6 meses
	Potencial aumento na contaminação do pescado ao longo do tempo.		<p>Impacto na microbiota associada aos corais em Abrolhos;</p> <p>Diminuição na densidade de organismos fitoplanctônicos;</p> <p>Diminuição da riqueza e composição do fitoplâncton;</p> <p>Alteração na estrutura da comunidade zooplanctônica;</p> <p>Aumento na mortalidade (presença de vestígios) de organismos bentônicos;</p> <p>Aumento na densidade de poliquetas no bentos marinho;</p> <p>Alteração na composição da fauna de ambientes recifais;</p> <p>Alteração no uso do habitat de ave marinha;</p> <p>Alta incidência de encalhes de mamífero marinho;</p> <p>Ocorrência de viroses e processos infecciosos em mamíferos marinhos.</p>
Potencial recontaminação devido à ressuspensão do sedimento de fundo por períodos de maior energia de ondas	Recontaminação na coluna d'água e dos organismos associados; Potencial dispersão de sedimentos com elevados teores de metais para regiões mais afastadas, impactando a biota.	Nenhum relatório anterior ao PMBA	Resultados mostram que esse processo é contínuo ao longo da plataforma e as análises até o momento indicam uma relação direta com a fisiologia do fitoplâncton, a mudança na composição da fauna bentônica e explica a dispersão do rejeito mais limitada ao sul e mais extensa ao norte da foz do Rio Doce.

Fonte: Relatório de Avaliação e Consolidação de Dados pretéritos (RT-01 RRDM/OUT18).