

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

**RELATÓRIO ANUAL 2020 DO PMBA/Fest-RRDM**

**SÍNTESE INTEGRATIVA ENTRE AMBIENTES**

**RT-36E RRDM/DEZ 20**

**Coordenação Geral**

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius Ribeiro de Castro

Vitória,

Dezembro de 2020

## COORDENAÇÕES

### **Ambiente Dulcícola**

Jorge Abdala Dergam dos Santos (UFV)

### **Ambientes Marinho e Costeiro**

Fabian Sá (UFES)

### **Anexo 1**

Camila de Martinez Gaspar Martins (FURG)

### **Subprojetos**

Camila de Martinez Gaspar Martins (FURG)

Juliana Zomer Sandrini (FURG)

Marta Marques de Souza (FURG)

### **Anexo 3**

Daniel Rigo (UFES)

Paulo Sergio Salomon (UFRJ)

### **Subprojetos**

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Edmilson Teixeira (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Paulo Sergio Salomon (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

### **Anexo 4**

Jacqueline Albino (UFES)

### **Subprojetos**

Jacqueline Albino (UFES)

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

### **Anexo 5**

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

### **Anexo 6**

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

### **Subprojetos**

Aginaldo Silva Martins (UFES)

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

### **Anexo 7**

Maurício Hostim Silva (UFES)

Tomas Hrbek (UFAM)

### **Subprojetos**

Carlos W. Hackradet (UFSB)

Fabiana Felix Hackradet (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Jorge Abdala Dergam dos Santos (UFV)

Maurício Hostim Silva (UFES)

Tomas Hrbek (UFAM)

### **Anexo 8**

Heitor Evangelista (UERJ)

### **Coordenação Técnico-Científica (CTEC)**

Adalto Bianchini

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

### **Escritório de Projetos (EscPro)**

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Karla Pereira Rainha

Kennedy Gera Nishio

Luiz Otavio da Cruz de Oliveira Castro

Sidnei Vieira

Walter Luiz Alda Júnior

Wanessa da Costa Cruz

### **Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR)**

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

### **Núcleo de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (NADEC)**

Alex Cardoso Bastos

## SUMÁRIO

1	AMBIENTE DULCÍCOLA .....	5
2	AMBIENTE COSTEIRO.....	9
3	AMBIENTE MARINHO .....	14
4	REFERÊNCIAS .....	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distribuição espacial de sinais do rejeito de mineração no sedimento superficial marinho de acordo com os critérios mineralógicos e geoquímicos estabelecidos, apresentados por períodos sazonais (chuvoso 1 – outubro/2018 a março/2019; seco – abril a setembro/2019; chuvoso 2 – outubro/2019 a março/2020). Os círculos vermelhos representam que ambos os critérios foram satisfeitos para a estação e indicam a presença do sinal do rejeito. Os círculos laranja representam o critério mineralógico e indicam fortemente a presença do sinal do rejeito. Os círculos amarelos representam o critério geoquímico e indicam aumento das concentrações dos metais considerados, mas não necessariamente relacionados a presença do sinal do rejeito. Os círculos verdes representam ausência do sinal do rejeito. Círculos brancos não possuem dados conclusivos sobre a presença do sinal do rejeito. .... 20

## 1 AMBIENTE DULCÍCOLA

Em termos abióticos, as maiores médias pluviométricas anuais da Bacia do Rio Doce se concentraram nas regiões de cabeceira da bacia, nas bacias dos rios Piranga e Carmo, formadores do Rio Doce, e os rios Piracicaba e Santo Antônio, nos quais também ocorreram os maiores valores de deflúvios médios. Embora o período de Transição tenha apresentado acumulado de precipitações pluviométricas superior ao período úmido do Ano 1, ainda assim, tais valores acumulados foram inferiores ao registrado na série histórica (1984-2014). No Baixo Rio Doce, o menor índice de precipitação durante o período de monitoramento foi observado na bacia do rio São José.

O regime de vazões do Rio Doce é determinado pelas precipitações, com estação seca de abril a setembro e estação úmida de outubro a março. As vazões médias e máximas diárias apenas para períodos chuvosos do Ano 1, 519 e 2.584 m<sup>3</sup>/s, foram muito inferiores às obtidas no período de Transição, 988 e 5.179 m<sup>3</sup>/s. Essas vazões médias foram inferiores à vazão média de período chuvoso, 1.229 m<sup>3</sup>/s, para a série histórica da estação fluviométrica Colatina (56994500) para os anos 1938-2014.

Na bacia como um todo, os indutores de pressão ambiental mais relevantes foram: agropecuária, urbanização e mineração. Verificou-se que esses indutores produzem pressões que interferem na qualidade e quantidade dos corpos hídricos da bacia, tais como: presença de barragens para fins diversos; consumo de água; lançamento de efluentes e de cargas difusas; supressão vegetal; disposição de resíduos sólidos; aporte de resíduos da mineração; e disposição de rejeitos em barragem. Com o rompimento da barragem novas pressões ambientais surgiram estressando ainda mais os ambientes aquáticos. Das 266 barragens cadastradas na bacia do Rio Doce, 36% são destinadas à contenção de rejeitos, e estão concentradas na porção mineira da bacia. Essas pressões ambientais demandam ações de resposta para minimizá-las.

Nesse contexto, foram identificadas e mapeadas ações de resposta (compensação, reparação e recuperação) relacionadas à recuperação de APPs e reflorestamento, à melhoria da infraestrutura de saneamento básico, ao controle da produção e aporte de sedimentos e ao manejo de rejeitos. Na porção mineira da bacia, especialmente nos municípios de Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado, concentram-se ações relacionadas à recuperação de APPs, reflorestamento e manejo de rejeitos (como a dragagem do rejeito no reservatório da UHE Risoleta Neves), implementadas por meio de programas socioambientais da Fundação Renova. Na porção espírito-santense, as ações relacionadas ao reflorestamento ocorrem em grande medida por meio de incentivos do Programa Reflorestar/ES. Até agosto de 2020, 2,5% do total de recursos previstos para ações de esgotamento sanitário e resíduos sólidos foram repassados pela Fundação Renova, para municípios da bacia. Também foram identificadas ações estruturais relacionadas a obras de ampliação ou aperfeiçoamento dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário, conduzidas por prefeituras municipais.

Outro estressor relevante na bacia é o efluente doméstico não tratado, o qual tem profundos efeitos na biodiversidade aquática. Por ora, ações de saneamento básico estão restritas a 5 municípios mineiros e 5 municípios espírito-santenses, mas existem perspectivas de melhoras associadas às ações de programas da Fundação Renova e do PIRH Rio Doce. A dragagem do rejeito ocorre no reservatório da UHE Risoleta Neves, onde já foram retirados 959 mil m<sup>3</sup>, por meio do Programa de Recuperação do Reservatório da UHE Risoleta Neves. É relevante a necessidade de planejar o monitoramento dos efeitos sobre a biodiversidade aquática da retirada, do rejeito de 17 trechos impactados e já definidos para esse manejo.

Em relação aos fluxos, a estação E21 foi definida como representativa de todo aporte que ocorre da bacia para a área costeira. Durante o monitoramento do PMBA/Fest-RRDM, nessa seção, foram observados expressivos valores médios e máximos de descargas sólidas totais, 5.328

t.d<sup>-1</sup> e 190.000 t.d<sup>-1</sup>, respectivamente. O mesmo ocorreu para fluxos de nutrientes e metais, cujos valores instantâneos médios e máximos estimados nas datas das campanhas foram: 15,7 t.d<sup>-1</sup> e 161 t.d<sup>-1</sup> para fósforo total (P), 1,0 t.d<sup>-1</sup> e 3,3 t.d<sup>-1</sup> para fósforo inorgânico dissolvido (PID), 168,0 t.d<sup>-1</sup> e 641,1 t.d<sup>-1</sup> para nitrogênio total (N), 93,0 t.d<sup>-1</sup> e 286,3 t.d<sup>-1</sup> para nitrogênio inorgânico dissolvido (NID), 49,5 t.d<sup>-1</sup> e 247,9 t.d<sup>-1</sup> para alumínio total (Al), 184,9 t.d<sup>-1</sup> e 1063,6 t.d<sup>-1</sup> para ferro total (Fe) e, 3,2 t.d<sup>-1</sup> e 13,9 t.d<sup>-1</sup> para manganês total (Mn). Cabe ressaltar que esses valores poderão ser muito superiores em eventos hidrológicos com maiores valores de precipitações e vazões, durante os quais há ressuspensão e carreamento desses elementos, juntamente com sedimentos, para a foz do Rio Doce e área costeira adjacente.

Os valores de turbidez (10,70 e 369,76 UNT) e de MPS (27,20 e 310,00 mg/L) foram significativamente superiores aos registrados tanto no período chuvoso de 2018/19 (9,55 e 209,00 UNT; 2,50 e 145,00 mg/L) quanto no período seco de 2019 (0,62 e 24,30 UNT; 0,13 e 17,00 mg/L). Os maiores valores de turbidez, assim como os de MPS, foram registrados em Regência (E26) em dezembro de 2019, sendo esses estes valores acima do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 (100 UNT), aplicada como referência para águas doce de Classe 2.

No sistema fluvial, durante o Período de transição, não foram registradas diferenças significativas entre a estações amostrais nos parâmetros físicos (turbidez, material particulado em suspensão, sólidos totais dissolvidos e temperatura), físico-químico (salinidade, oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica e potencial Redox), químicos (alcalinidade total, fósforo total e fosfato) e biológico (clorofila a), resultado esse semelhante ao registrado no Ano 1.

As análises de Terras Raras confirmaram a condição de referência negativa do Rio Guandu em relação à presença do rejeito, enquanto os lagos Nova e Limão e a calha do Rio Doce apresentaram sinais claros da presença do rejeito.

Na abordagem ecotoxicológica, a fração dissolvida de metais e de arsênio (As) na água demonstrou que a Lagoa do Areal, Lagoa Monsarás, Lagoa do Areão, Lago Nova e os pontos na calha do Rio Doce em Colatina e na foz do Rio Doce apresentaram os níveis mais críticos de contaminação. Os

resultados dos parâmetros abióticos indicam um padrão temporal de aumento dos metais e metaloide na água e sua diminuição no substrato. Esse aumento foi evidente no Rio Guandu, Rio Doce e Lagoas, para As, Bário (Ba), Cr, Fe, Mn, Pb, Vanádio (V) e Zn.

Durante o período de Transição, os maiores níveis de bioacumulação de metais e As em camarões e peixes, foram encontrados no setor Lagoas, com destaque também para o setor Rio. Os metais mais abundantes nestes organismos foram Fe, Mn, Pb, Zn e Cu, todos associados aos rejeitos de mineração. Esse padrão não foi tão evidente no fito e no zooplâncton, o qual pode ser explicado pelo fato de que a acumulação é intensificada em organismos com ciclos de vida mais longos, como no caso dos camarões e peixes.

Os sistemas lacustres de menor profundidade (lagoas) apresentaram aumento dos impactos, expressos pelo aumento nos teores de metais no sedimento das lagoas durante o período de Transição, particularmente em relação ao Fe. Os teores de Fe e outros elementos, como As, Cd, Cr, Cu, Mn e Pb foram bastante elevados no zooplâncton do ambiente dulcícola, quando comparados com amostras de zooplâncton coletadas em novembro de 2015, antes da chegada da pluma na região marinha mais próxima à foz do Rio Doce.

Camarões de água doce podem ser importantes indicadores ambientais no Baixo Rio Doce, uma vez que são espécies bentônicas e detritívoras, constantemente expostas à contaminação por metais via sedimento. Dessa forma, a bioacumulação de metais nestes organismos, em especial daqueles elementos característicos do rejeito, é um indicativo da contaminação dos sedimentos. Os resultados do Índice de Bioacumulação de metais evidenciaram um aumento temporal e gradual no teor de metais em camarões e peixes, principalmente nas lagoas. Além disso, peixes de ambas as guildas tróficas (onívoros/herbívoros e carnívoros) mostraram concentrações muito superiores àquelas encontradas para peixes coletados em novembro de 2015 antes da chegada do rejeito na porção estuarina e marinha mais próxima à foz do Rio Doce, particularmente com relação aos teores de Cd, Cr, Cu, Fe, Mn e Pb, indicando maior presença de metais no ambiente após o rompimento da barragem de Fundão.

O Índice de Resposta Biológica é consistente com o observado nas análises de bioacumulação, indicando também aumento de efeito biológico no período de Transição em relação ao Ano 1. Este padrão foi mais evidente nos setores Lagoas e Rio. Em camarões houve um aumento acentuado nos níveis de danos lipídicos (lipoperoxidação) e no teor de proteínas associadas com a detoxificação de metais (metalotioneínas) durante o período seco do Ano 2 (set/out 2019), em relação às demais campanhas, com destaque para o setor Rio. Adicionalmente, nos camarões, assim como nos peixes, foi notável o aumento de danos no DNA e danos oxidativos em proteínas durante o período de Transição.

Os ensaios de toxicidade indicaram que o afluente Rio Guandu não apresentou toxicidade na maior parte do monitoramento, em contraste com o estuário do Rio Doce, onde foram encontrados os maiores valores de toxicidade em comparação aos demais pontos, em todas as campanhas

realizadas. No entanto, durante todo o período de monitoramento, a maior toxicidade esteve associada ao sedimento em comparação com a água, sugerindo um efeito crônico dos metais associados a esse compartimento.

Grupos bacterianos analisados em amostras de água demonstraram a presença de táxons (hgcl clade, *Polynucleobacter*, *Sediminibacterium* e *Sporichthyaceae*) sugeridos como bioindicadores de metais e do rejeito da barragem de Fundão em todas as campanhas avaliadas. Estes táxons foram também relatados em rios da bacia do Rio Doce impactados poucos dias após ao rompimento da barragem e não foram encontrados em um rio considerado como não-impactado, localizado na mesma bacia. Adicionalmente, em janeiro e fevereiro de 2020, observou-se um aumento dos táxons *Acinetobacter* e *Exiguobacterium*, conhecidos bioindicadores de metais por possuírem elevada tolerância à altos níveis de diversos elementos metálicos. Em relação ao sedimento, os táxons sugeridos como bioindicadores da presença de metais e do rejeito da barragem de Fundão, como *Anaerolineacea* e *Pirellulaceae*, mantiveram-se em grande abundância.

Sob a perspectiva ecotoxicológica, o setor Rio (calha principal do Rio Doce) representa-se como uma região criticamente impactada por metais proveniente dos rejeitos, refletido na contaminação da biota (IBR bioacumulação) nas diferentes campanhas realizadas e considerando-se os diferentes grupos de organismos avaliados. Este setor se destaca também em termos de efeitos biológicos, tanto no que se refere à resposta de biomarcadores quanto à toxicidade das amostras de água e sedimento para os organismos-teste. O setor Lagoas também se apresenta como uma região criticamente impactada, principalmente, para o período de Transição.

Em relação às comunidades bióticas dulcícolas, observou-se alta riqueza total de espécies de fitoplâncton, com alto grau de *turnover* entre ambientes e alta contribuição dos lagos Nova, Juparanã e Monsarás. Em alguns ambientes lacustres, há dominância de cianobactérias, com concentrações que acompanham o aumento dos teores de Fe e P.

O perífíton também mostrou alta riqueza de espécies, com muitos táxons exclusivos presentes nos lagos e lagoas. Foram identificadas espécies marcadoras de presença de Fe e Mn, as quais aumentaram sua presença com o aumento desses metais na água.

O estudo das macrófitas do Baixo Rio Doce indicou a presença de novos registros para o Baixo Rio Doce e a ocorrência de uma espécie considerada como Vulnerável. O Lago Monsarás apresentou altos níveis de riqueza, assim como o Rio Guandu, enquanto que a menor riqueza foi observada no setor Rio. Três espécies de macrófitas foram consideradas invasivas.

Várias das espécies de zooplâncton foram compartilhadas pelos 4 ambientes e foi detectada uma espécie exótica; a calha do Rio Doce apresentou baixos valores de biomassa e recrutamento e as lagoas se mostraram ambientes fundamentais para a diversidade zooplanctônica no Baixo Rio Doce.



De forma geral, os habitats aquáticos do Baixo Rio Doce foram fortemente influenciados pelos pulsos sazonais de cheia, com incremento da concentração de marcadores do rejeito (sobretudo Fe e Al) e aumento na riqueza de espécies nas estações de foz.

As análises exploratórias identificaram os elementos Al, Fe, Va, Pb, Cr, Ba, Mn e Zn como os principais marcadores do rejeito na área estudada, com destaque para a expressiva correlação desses indicadores abióticos e as comunidades biológicas em todos os pontos amostrais do Rio Doce, sobretudo nas estações próximas à foz, que podem ser consideradas como áreas deposicionais integrativas da presença do rejeito e da condição ambiental do Rio Doce. Esses resultados confirmam a contínua transferência de elementos da área continental para a região marinha adjacente.

Os macroinvertebrados do Baixo Rio Doce foram analisados pela primeira vez dentro do contexto do PMBA/Fest-RRDM. Foi aplicado o protocolo de avaliação de condições ecológicas e os pontos de coleta foram classificados em impactado, alterado e natural. Em geral predominaram quironomídeos e poliquetos, ambos característicos de locais impactados. Os locais mais degradados e os menos degradados diferenciam-se pela abundância das espécies e não pela composição taxonômica das comunidades.

A comunidade de peixes do Baixo Rio mostra a provável extirpação de espécies hoje restritas aos rios tributários da calha, um aumento da abundância e da biomassa de espécies introduzidas em locais mais impactados; o recrutamento das nove espécies mais abundantes envolve seis espécies introduzidas. Dados secundários de outros projetos permitiram elaborar uma relação de espécies intolerantes aos ambientes impactados pelo rejeito de minério. As análises genéticas com barcoding auxiliaram na avaliação taxonômica e os microsatélites indicaram endogamia de uma das espécies e diminuição da diversidade filogenética das espécies nativas, do Ano 1 para o período de Transição.

## 2 AMBIENTE COSTEIRO

Ambientes costeiros ou de transição, como praias, restingas, manguezais, deltas e estuários, são caracterizados pela transição continente-oceano e refletem variações ocorrentes nos ambientes dulcícola e marinho, pois recebem tanto a carga fluvial transportada através da bacia hidrográfica como o material retrabalhado constantemente na plataforma continental. Além disso, as características abióticas de cada ecossistema abordado são de extrema importância para a compreensão dos processos atuantes em cada local. As praias, restingas e manguezais compreendidos nos estudos do PMBA/Fest-RRDM estão localizados em uma porção da linha de costa brasileira que abrange distintos setores geomorfológicos, como os tabuleiros da Formação Barreira formando falésias e, em geral associados a terraços de abrasão, e planícies costeiras quaternárias, como é o caso da planície deltaica do Rio Doce. Em todos os ambientes costeiros foram pesquisados aspectos geológicos, físicos, químicos, biológicos, ecotoxicológicos e ecológicos,

demonstrando as variações ambientais observadas, possíveis alterações relacionadas ao rejeito de mineração, usos e condições biológicas.

Na plataforma continental e nas praias adjacentes à desembocadura do Rio Doce ocorreu o enriquecimento das concentrações de alguns elementos químicos durante o impacto agudo proveniente do aporte do rejeito de mineração (COSTA et al., 2017; APLYSIA, 2016) , tornando-se necessário o monitoramento de possíveis impactos do aporte de rejeitos sobre a fauna bentônica e o ambiente praiar, sendo para isto, definidos indicadores morfodinâmicos, geoquímicos e biológicos. As praias pesquisadas no presente monitoramento compreendem os terraços de abrasão e planície costeira do Rio Doce, setores potencialmente atingidos pela lama do rejeito. A partir da integração da morfodinâmica da praia, da distribuição dos elementos químicos e da diversidade da comunidade bentônica, seja pela tipologia das praias, seja pelos impactos em função da concentração elementar nos sedimentos, é adotada uma compartimentação definida por 3 setores praias (Compartimentos A, B e C). O compartimento A compreende as praias Mole, Formosa e Putiti; o compartimento B as praias do Riacho, Terra Indígena, Rebio Comboios, Regência e Povoação; e o compartimento C as praias de Degredo, Pontal do Ipiranga, Barra Nova, Guriri e Itaúnas. Estes compartimentos apresentam influências distintas em relação ao aporte de sedimentos do rio Doce e, conseqüentemente, potencial contaminação pelos rejeitos de mineração.

De uma forma geral, nos ambientes praias os sedimentos finos (lama), assim como o material proveniente do rompimento da barragem de rejeito de mineração, são depositados predominantemente na antepraia. Como consequência desse comportamento, o sedimento da antepraia apresentou as maiores concentrações dos elementos químicos associados aos rejeitos de mineração, destacando-se Al, Fe e Pb. Al e Fe tiveram uma alta biodisponibilidade, o que pode indicar um aporte mais recente desses elementos.

Vale ressaltar que, considerando a localização da desembocadura do Rio Doce e o predomínio das correntes de deriva litorânea, denota-se que o potencial de transporte e deposição do material lamoso segue no sentido norte, a partir da desembocadura do rio. Tal fato reflete nos resultados observados, onde o Compartimento C, composto pelas localidades de Degredo (N2), Pontal do Ipiranga (N3), Barra Nova (N4), Guriri (N5) e Itaúnas (N6), é a área mais afetada pelo aporte do rejeito oriundo do rompimento da barragem. O transporte longitudinal favorece a deposição da fração fina do material proveniente do aporte do Rio Doce, onde as maiores concentrações de elementos químicos são verificadas neste Compartimento. Junto à desembocadura, os processos deltaicos interagem com a costa permitindo uma segunda área da deposição de sedimento finos e, conseqüentemente, os elementos químicos associados. A presença de lama e areia fina na antepraia, em combinação com perfis praias de menor inclinação favorecem a permanência e distribuição transversal dos elementos químicos, desde a antepraia, restingas e ao longo dos manguezais. Conseqüentemente, as praias apresentaram baixos valores de densidade, riqueza e diversidade de organismos da macrofauna bentônica, contrariando a literatura, enquanto os valores dos parâmetros da meiofauna e nematofauna foram maiores.

As isóbatas de 5 e 10 metros do Compartimentos C e, nas localidades de Regência e Regência Farol, do Compartimento B apresentam depósitos de sedimentos finos com as maiores concentrações de elementos químicos, destacando o Al, As, Ba, Fe, Mn, Ni e Pb, sendo alguns destes com fonte relacionada ao rejeito de mineração proveniente do rompimento da barragem. Entretanto, as características da porção emersa das praias do Compartimento B, aliada a uma fauna bentônica adaptada aos estresses atuantes, favorecem o recrutamento e permanência dos organismos da macrofauna bentônica.

O Compartimento B abrange as localidades de Barra do Riacho (S4), Comboios (S5), Regência (S6), Regência Farol (S7), ao sul da foz do rio Doce, e Povoação (N1), na foz do rio Doce, logo ao norte. As praias pertencentes a este Compartimento apresentam areias grossas, grande capacidade de percolação e exfiltração na face da praia, características responsáveis pelos baixos teores de elementos químicos na praia emersa, onde a comunidade bentônica apresentou menores evidências de impactos. Entretanto, a deposição de lama na antepraia influencia no aplainamento dos perfis praias, nos processos erosivos e inundacionais, bem como na concentração de elementos químicos.

No litoral sul, Compartimento A, há a probabilidade de o material resultante do rompimento da barragem alcançar as praias, por transporte em suspensão e sob condições de ondas de nordeste. Contudo, fontes locais, associadas aos terraços de abrasão da Formação Barreiras e aporte fluvial do rio Piraquê-Açu, se relevam também potenciais para os elementos químicos verificados. As maiores densidade e riqueza da macrofauna registradas nesse compartimento possivelmente são consequências das relações positivas com os teores de carbonato de cálcio registrados nessas praias, enquanto o aumento da diversidade da macrofauna está relacionado aos grãos mais finos. Dentre os elementos químicos determinados, não houve nenhuma relação significativa com os parâmetros ecológicos da macrofauna.

Alterações no ajuste morfodinâmico decorrentes de alterações granulométricas na antepraia, podem aumentar do espriamento das ondas e o transporte da lama para a praia alta, reduzindo a permeabilidade dos sedimentos e, consequentemente, permitir o alcance do material do rejeito na restinga adjacente. A restinga localizadas ao norte da foz do Rio Doce (Compartimento C – praias) apresentaram maiores alterações quanto aos indicadores: atividade fotossintética, dos metabólitos, reserva de carboidratos, atividade antioxidante e processos reprodutivos. Somado a esta observação espacial, destaca-se, como tendência temporal do monitoramento da vegetação da restinga, o período seco quando comparado a ambos os períodos chuvosos, no qual o Alerta de Perigo (integração de sete indicadores) está presente em maior número de estações e formações amostrais. Esse resultado representa não somente a tendência discutida para os indicadores biológicos, mas também é reafirmada pelo Índice Integrado de Poluição no sedimento (IPI), o Fator de Bioacumulação (BAF) e para os teores de elementos traços na superfície foliar, podendo estar relacionado a uma possível contribuição do “spray” marinho. No período seco, a ocorrência de frentes frias e eventos de tempestades podem promover a ressuspensão de sedimentos próximo à costa, constituindo-se como um fator expressivo para variações nas concentrações de metais, e outras partículas ligadas ao

rejeito, na coluna d'água. Dependendo das condições meteoceanográficas, ou seja, aumento na energia de ondas e ação do vento, regiões marinhas próximas a costa tem participação expressiva na formação de gotículas de água (spray), os quais podem adentrar o continente.

Em relação a perspectiva para a recuperação da vegetação de restinga, os resultados obtidos até o momento, mostram importantes variações espaciais entre as estações amostrais monitoradas, possibilitando assim o mapeamento dos aspectos que poderão influenciar a sobrevivência da flora deste ecossistema e subsidiar as perspectivas futuras. Por exemplo, foram observadas baixas taxas de germinabilidade nas estações ao norte da Foz do Rio Doce, somadas a redução, ao longo do monitoramento, da viabilidade dos grãos de pólen e ao comprometimento do tecido da antera dessas espécies, indicando uma redução da capacidade reprodutiva.

O monitoramento dos manguezais demonstrou que, nos estuários da costa capixaba, as maiores concentrações de metais observada no período avaliado no PMBA-Fest-RRDM, estão presentes nas regiões a jusante, ou seja, próximas a foz dos estuários, sugerindo uma influência marinha na contribuição destes elementos. Isto ocorre principalmente durante períodos chuvosos, não sendo diferente no período seco, porém há aumento das concentrações de metais mais a montante, indicando, portanto, que esta contribuição marinha adentra ainda mais no sistema, se deslocando até as porções mais distantes no estuário superior. No estuário do Rio Caravelas há menor evidência para assumir que a fonte de contaminação sejam metais relacionados com a presença do rejeito de mineração.

Dados de produtividade das florestas de manguezais identificam estresse causado por metais relacionados ao rejeito de mineração, já indicando forte comprometimento em várias florestas como observado para as áreas do rio São Mateus e no sistema Piraquê-Açu e Mirim. Os estuários menores, como Barra do Riacho, Urussuquara e Barra Nova, assim como, nos manguezais na APA Costa das Algas, também apresentam comprometimento, mas restrito a um número menor de floresta e de localização no estuário.

Em relação a fauna, todos os estuários apresentam problemas conforme pode ser constatado nas análises ecotoxicológicas com contaminação. Entretanto, destacamos preocupação com as áreas onde está ocorrendo contaminação com Pb, uma vez que a biomagnificação deste elemento para o homem pode causar sérios problemas neurológicos. Reforçamos que a população nestas localidades, e ainda mais nas áreas mais isoladas, alimenta-se cotidianamente destes produtos do manguezal. Houve agravamento nas populações de *Ucides cordatus* para o sistema Piraquê-Açu e Mirim uma vez que as variações sazonais não identificaram um retorno em torno da média para o ambiente, diferentemente das demais áreas estudadas. Existem duas explicações para isto: pressão de captura (principalmente para o rio Piraquê-Açu) e efeitos residuais do Fe já existente em grandes concentrações na área que foram agravadas com o aumento deste elemento e de outros metais associados interferindo no fitness da espécie e resultando em perdas que podem ser irreparáveis em longo prazo. Apesar de não termos dados pretéritos, a fecundidade com base nas amostragens para

o Rio São Mateus é preocupante para a conservação da espécie em todos os estuários, haja vista, menores taxas de fertilidade observada em alguns estuários nos dois anos de monitoramento.

A relação de avaliação da susceptibilidade e vulnerabilidade dos manguezais estudados, 50% deles apresentaram melhoras nos sinais de agravos, indicando a diluição dos tensores provocados pelos metais ao longo do tempo, entre 2018 e 2020. Por outro lado, Piraquê-Açú, Costa das Algas, Barra do Riacho e São Mateus apresentaram maior vulnerabilidade nesta análise.

Pelas análises ecotoxicológicas realizadas no ambiente costeiro observa-se uma concordância entre os maiores valores de IBR bioacumulação e IBR biomarcador, mostrando que, de fato, os padrões de contaminação observados nos diferentes organismos foram refletidos no grau de estresse fisiológico, indicando que os metais/metaloide encontrados nos tecidos causaram impactos biológicos claros na biota costeira avaliada. Esta relação é verificada com maior intensidade no Compartimento B, ou seja, nos locais ao entorno da foz do Rio Doce, sendo esta portanto, a região mais impactada e estressante, tanto para organismos coletados nas praias quanto para aqueles capturados nos mangues. A co-ocorrência estabelecida entre acumulação e danos biológicos ocorre majoritariamente nas áreas diretamente associadas à foz do Rio Doce, fortalece a tese de que esta região continua a ser impactada mesmo tendo se passado 5 anos do rompimento da barragem.

No que se refere aos resultados relativos ao índice IBR bioacumulação (metais) para as aves, é possível observar um padrão espacial diferente do citado anteriormente, visto que os maiores valores foram obtidos nos animais coletados nas regiões mais ao sul da foz do Rio Doce (mangue), e não naquelas situadas no entorno desta localidade.

Ressalta-se que algumas diferenças específicas entre praias e manguezais em relação a ecotoxicologia, como, por exemplo, os caranguejos de mangue apresentaram uma melhor relação entre os dois índices utilizados (IBR bioacumulação e IBR biomarcador) quando comparados aos animais de praia. Isto sugere que a bioacumulação observada em crustáceos de mangue atingiu níveis mais prejudiciais em comparação à biota capturada no ambiente praias. Anfípodes e isópodes de praia apresentaram uma consonância maior entre os dois índices em comparação ao caranguejo de praia, mostrando que estes organismos foram mais prejudicados pelos metais/metaloide acumulados. Este resultado pode estar relacionado ao fato de que anfípodes e isópodes ocorrem na região entre marés, a qual estabelece contínuo contato com a água do mar, o que pode potencializar o processo de obtenção de contaminantes provenientes desta matriz. Por outro lado, o caranguejo de praia permanece majoritariamente em áreas emersas, portanto, com menos contato com a água, o que pode acarretar um menor acúmulo de metais e As. Com relação ao comportamento temporal dos índices de IBR, não houve um padrão compartilhado entre os animais avaliados nos diferentes ambientes (mangues e praias).

### 3 AMBIENTE MARINHO

O ambiente marinho estudado é marcado por um mosaico de habitat que refletem as diferentes forças que atuam na plataforma continental em escalas temporais e espaciais distintas. A plataforma adjacente à foz do rio Doce é marcada por um habitat lamoso, de morfologia plana, mas com escarpas e sulcos que apontam processos erosivos significativos, que muda para um habitat arenoso com cristas e bancos a partir de 25m de profundidade. Na região mais próxima à quebra da plataforma nesse setor, observamos a presença de bancos de rodolitos. Em direção sul, o Setor da APA é marcado por uma distribuição de fundos rígidos marcados por terraços de abrasão submersos, vales incisos e construções recifais marcadas por algas calcárias vermelhas. De uma forma geral, esse setor apresenta uma heterogeneidade de habitat marcada por fundos arenosos e lamosos com composição terrígena e carbonática, porém marcado pela grande irregularidade de sua morfologia (vales incisos) e a presença de extensos bancos de rodolitos e estruturas recifais a partir de 45m de profundidade. Ao norte da foz do Rio Doce, os habitat da plataforma continental de Abrolhos são marcados por um mosaico de fundos inconsolidados mistos, com a presença de lama terrígena mais junto à costa e sedimento carbonáticos mais em direção offshore. Cerca de 80km ao norte da foz do Rio Doce foi mapeado um conjunto de estruturas recifais conhecido como Recifes Esquecidos. Os resultados apontam para mais de 900 estruturas recifais com profundidade de topo variando entre 12 e 22m e alturas que alcançam 12m. A área estimada, até o momento para este fundo recifal, é de pelo menos 100km<sup>2</sup>, mas muito pouco ainda é sabido sobre esse habitat, desde sua distribuição até a sua importância ecológica e de serviços ecossistêmicos específicos. Ao norte dos recifes esquecidos, a cerca de 70-100km, estão as UCs da região de Abrolhos, que abrangem um fundo recifal de grande importância para a biodiversidade marinha.

Como vem sendo apresentado e discutido, a variabilidade no ambiente marinho está bastante relacionada à variação temporal e espacial de suas forças, principalmente ondas e vazão fluvial. Estas forças são as principais forças geradoras de mudanças da turbidez e da clorofila *a* no ambiente marinho. Combinando medições *in situ*, sensoriamento remoto e modelagem acoplada hidrodinâmica, ondas e transporte de sedimentos, foi possível quantificar e correlacionar relações de causa e efeito nos indicadores, que anteriormente tinham sido apresentadas de maneira qualitativa.

Do ponto de vista físico, os aumentos de vazão fluvial e da energia de ondas são geralmente acompanhados por padrões distintos da circulação atmosférica e da plataforma continental. A vazão fluvial apresentou diferenças importantes entre o Ano 1 e o período de Transição (Ano 2) do PMBA. Embora tenha apresentado um evento de inundação no mês de janeiro de 2019, o período chuvoso do Ano 1 apresentou vazões medianas mensais menores que valores climatológicos em todos os meses. Já no segundo período chuvoso (Transição), a vazão do Rio Doce apresentou um crescimento expressivo a partir do final de janeiro de 2020, chegando a registrar em março de 2020 uma vazão fluvial mediana mensal 93% superior a climatológica. Por outro lado, os períodos chuvosos foram marcados pelos menores valores mensais de altura significativa de ondas na região,



ventos N-NE e correntes predominantemente sul. Inversamente, o período seco apresenta recorrentes eventos de aumento da energia de ondas, com entradas de frentes frias, inversões para norte de ventos e correntes.

Os resultados apresentados neste relatório foram apresentados sob uma perspectiva de análise de processos durante eventos nos quais a vazão fluvial ou a energia de ondas se destacou. Tanto as medições *in situ* como os resultados numéricos apontaram a importância de correntes geradas pelo vento como transportadoras tanto da pluma fluvial como dos sedimentos ressuspensos na plataforma continental.

O período chuvoso, quando os ventos tipicamente na região geram correntes para sul, mostraram a pluma fluvial sendo transportada para sul, atingindo os setores Foz Sul e APA Costa das Algas/REVIS de Santa Cruz. Em momentos de inversão de ventos e correntes, a pluma atinge o Setor Norte. A salinidade superficial, utilizada como um traçador da influência fluvial no ambiente marinho, mostrou que a pluma do Rio Doce pode atingir profundidades de aproximadamente 1,5m de profundidade, caracterizando uma pluma advectada em superfície. A pluma de água doce se correlaciona positivamente com o incremento nos valores de turbidez e concentração de clorofila *a*, sendo que o Setor Foz apresenta os maiores valores médios desses parâmetros entre outubro de 2019 e abril de 2020.

Os resultados de modelagem de transporte de sedimentos durante eventos quando houve aumento da energia das ondas mostraram que os depósitos de lama na plataforma continental são remobilizados pela ação das ondas no fundo, promovendo aumentos de turbidez e concentrações de sedimento em suspensão que são transportados pelas correntes geradas pelo vento. Os sedimentos remobilizados podem ser transportados até a APA Costa das Algas/REVIS de Santa Cruz ao sul da foz e atingir o Setor Norte durante entradas de frentes frias na região. A maré possui um papel secundário na variabilidade espacial da pluma de sedimentos em suspensão, sendo mais importante ao norte da foz. Os resultados da estimativa da deriva litorânea mostraram que o transporte longitudinal no litoral da planície deltaica do Rio Doce ocorre com maior intensidade de sul para norte, como resultado da frequência direcional das ondas, e com maiores magnitudes durante os meses de outono e inverno.

As imagens de cor verdadeira foram analisadas de forma a analisar as mudanças de coloração sob a perspectiva da variabilidade temporal de turbidez e clorofila *a* estimadas por sensoriamento remoto. Embora a análise tenha sido, neste momento, qualitativa, os resultados indicam que durante períodos de aumento da vazão fluvial, a foz do Rio Doce apresenta valores de turbidez superiores a 5 NTU, porém restrito aos primeiros km de distância da foz. Nos momentos quando a energia de ondas cresce na plataforma continental, uma mudança de coloração de imagens de cor verdadeira pode ser percebida desde o Espírito Santo até o Banco de Abrolhos. Nesses momentos, tanto a turbidez quanto a clorofila *a* mostram sinais em toda a plataforma continental, inclusive atingindo a plataforma externa e talude.

A evolução espaço-temporal dos indicadores sedimentológicos, como qualidade ambiental da coluna de água através da Concentração de Material Particulado em Suspensão – MPS, e a mobilidade do sedimento de fundo (transporte e deposição sedimentar) em conjunto com a tensão crítica de ressuspensão são respostas às alterações nas propriedades físicas do sedimento e as condições hidrometeoceanográficas atuantes na região monitorada. Vale salientar ainda que o sinal de rejeito no sedimento de fundo através de indicadores mineralógicos também é uma resposta às alterações físicas do sedimento após o rompimento da barragem.

Em relação às concentrações de MPS, nos setores Abrolhos, Norte, Foz Central e Foz Sul foi observado um aumento do MPS no Ano 2 em relação aos valores observados no Ano 1. Esse aumento nas concentrações de MPS decorre do fato de Dezembro de 2019 e Janeiro de 2020 terem sido mais chuvosos que Dezembro de 2018 e Janeiro de 2019 para todo centro – norte do Espírito Santo e sul da Bahia. Nos setores Abrolhos e Norte, o aumento das concentrações de MPS foi fortemente influenciado por eventos hidrológicos dos rios que deságuam nesses setores, e não necessariamente devido a descarga fluvial do Rio Doce. No setor Foz Norte, enquanto em superfície foi observado uma tendência temporal de aumento nas concentrações de MPS, no meio e próximos ao fundo as concentrações foram próximas aos observados durante o Ano 1. Nos setores Foz Central e Foz Sul as maiores concentrações de MPS estão associadas diretamente à variabilidade temporal da vazão do Rio Doce. No setor APA Costa das Algas, no geral, foi observada uma diminuição na concentração de MPS no Ano 2 em relação ao observado no Ano 1.

O indicador Mobilidade do sedimento de fundo foi avaliado para os setores Norte, Foz Norte, Foz Central e Foz Sul. Para os setores Abrolhos e APA Costa das Algas, somente a densidade úmida e/ou a anomalia da tensão crítica de ressuspensão foram analisadas. No setor Abrolhos, a estação mais próxima ao continente (ABR 01) tem apresentado um aumento da densidade úmida do sedimento superficial, e consequentemente na tensão crítica de ressuspensão. Para o setor Norte, ao longo do PMBA foi observado um aumento do potencial de mobilidade em resposta à diminuição da anomalia de tensão crítica de ressuspensão, com o menor valor em Dezembro de 2018 (aproximadamente 40% do tempo) e o maior valor em Janeiro de 2020 (>50% do tempo).

No setor Foz Norte, apesar da ausência de tendência temporal da anomalia normalizada da tensão crítica de ressuspensão, foi observado um aumento da mobilidade do sedimento, observando-se apenas os meses de Outubro/2019 a Março/2020. O potencial de mobilidade de fundo passou de 30.5% no Ano 1 para 39.9% no Ano 2 (considerando os meses de Outubro/2019 a Março/2020). Esse aumento foi associado a ocorrência de eventos de maior energia próximo ao fundo. O período seco do Ano 1 (Abril a Setembro de 2019) apresentou, em média, menor mobilidade do sedimento superficial (29.9% do tempo) que o período chuvoso de ambos Ano 1 e 2. Nos setores Foz Central e Foz Sul, foi observada uma diminuição da anomalia da tensão crítica de ressuspensão ao longo do PMBA. Entretanto, essa diminuição somente foi significativa no setor Foz Sul ( $p < 0.05$ ). Em resposta à redução da anomalia da tensão crítica de ressuspensão, o potencial de mobilidade do fundo aumentou ao longo do PMBA para ambos os setores. No setor Foz Central, ocorreu mobilidade do



sedimento de fundo em 31% do tempo no período chuvoso do Ano 1, durante cerca de 39% do tempo ao longo do período seco do Ano 1, e durante 66% do tempo no período chuvoso do Ano 2. No setor Foz Sul, ocorreu mobilidade do sedimento de fundo durante 33.4% do tempo no período chuvoso do Ano 1, durante cerca de 46.3% do tempo ao longo do período seco do Ano 1 e durante 60.3% do tempo no período chuvoso do Ano 2.

No setor APA Costa das Algas, tendências temporais para a anomalia normalizada da tensão crítica de ressuspensão foram ausentes ao longo do PMBA ( $p > 0.05$ ). Os maiores valores sendo observados em Janeiro e Abril de 2019 e os menores valores em Novembro de 2019 e Janeiro de 2020.

A presença do sinal do rejeito foi observada nos setores: Norte (Degredo), Foz Norte, Foz Central, Foz Sul e Setor APA Costa das Algas (estação CA 06 e CA13) apresentou sinal do rejeito. A evolução espaço-temporal do sinal de rejeito responde ao padrão de longo-termo do transporte de sedimento na região marinha adjacente à foz do Rio Doce, com os maiores volumes sendo observados na porção rasos dos setores onde o sinal foi identificado. Além disso, juntamente com a fração lamosa, o material oriundo da Barragem de Fundão apresenta direção preferencial de transporte para norte/nordeste, sendo transportado preferencialmente em profundidades inferiores a 20 m, a partir da Foz do Rio Doce.

Apesar do tempo decorrido (Novembro de 2015 a Março de 2020), os dados mostram que as concentrações do IMS na Foz do Rio Doce não apresentaram redução de seus valores (análise comparativa com dados pré-rompimento). Ademais, é possível identificar a existência de um patamar dinâmico da concentração de IMS no sedimento na região próxima à foz do Rio Doce (estação SD 01), ou seja, o material que chega à foz apresenta um regime de fluxo contínuo. Esse patamar dinâmico também é possível de ser identificado nas estações do Setor Foz Norte. Portanto, os resultados obtidos ao longo do PMBA mostram que os indicadores respondem bem as alterações nas propriedades físicas do sedimento e às condições hidrometeorológicas atuantes na região. Assim como observado em estudos prévios, o material oriundo do Rio doce se deposita inicialmente nos setores Foz Sul e Foz Central, sendo posteriormente transportado para norte/nordeste, direção preferencial de transporte na região. Dados observados em testemunhos corroboram essa tendência de padrão de acúmulo de sedimento na região estudada. Dados do testemunho no Setor Foz Central (T13), mostram a presença de rejeito (índice mineralógico IMS) até 30cm abaixo da superfície do fundo marinho, evidenciando o acúmulo e a potencial mobilidade do rejeito nesse habitat, visto que sua localização está na direção offshore dos sulcos erosivos e escarpamentos, sendo estas feições indicativas de regiões preferenciais de transporte junto ao fundo. A tendência de transporte e acúmulo de rejeito em direção ao setor Norte também foi indicada pelo aumento do índice IMS no topo dos testemunhos T6, T7 e T11, que estão no setor Foz Norte, até Degredo. Entretanto, os testemunhos ao norte de Degredo não tiveram o valor de IMS que estatisticamente indique a presença do rejeito, embora o IMS esteja acima dos valores do *background*.

O estudo específico realizado nas UCs de Abrolhos apontaram que a partir das assinaturas radiométricas por isótopos radiogênicos, a partir das razões  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  e  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ , em sedimentos coletados em Abrolhos, e considerando tais assinaturas de outros rios que aportam na região, como também sua condição pristina (anterior ao desastre da Samarco), foi possível detectar a presença de sedimentos caracterizados pela mistura dos rejeitos da Barragem de Fundão e do material sedimentar do leito do Rio Doce naquela região. Tal presença se manteve constante para as localidades monitoradas no arco interno da zona recifal (corroborado por modelos de dispersão) e fortemente dependente das condições meteo-oceanográficas atuantes no arco externo de Abrolhos. Uma comparação entre os dados de frequência de frentes e frias, cujo máximo ocorreu nos meses de julho e agosto, e os períodos com maior influência dos traços dos rejeitos da Samarco em Abrolhos, mostrou que estas não são totalmente coincidentes. Os períodos onde detectamos maiores influências ocorreram no outono e início de inverno em condições de ventos moderados e não em condições de ventos intensos. Acreditamos que os períodos de alta turbulência decorrente da passagem dos sistemas frontais promovem alta ressuspensão dos depósitos sedimentares que são compostos por várias fontes de sedimentos depositados na plataforma continental durante milhares de anos. Os sistemas frontais também promovem, generalizadamente, mais aporte sedimentar de todos os rios que influencia a sedimentação em Abrolhos.

Os resultados da eliminação de diferentes matrizes nas concentrações de metais e arsênio em sedimentos superficiais, através da normalização por Fe e comparação com amostras do rejeito da Barragem de Santarém, juntamente com resultados de outros estudos de caracterização de amostras de rejeito de mineração (PEREIRA et al, 2008; LACTEC, 2018), foram utilizados como forma de fortalecer o uso de alguns elementos (Fe, Al, Mn, Ba, Cr, Zn e Pb) para um critério de avaliação geoquímica associada a presença do rejeito de mineração. Portanto, o critério geoquímico foi aperfeiçoado com base em análises estatísticas e comparativas, aprimorando os resultados apresentados no Ano 1. Através da aplicação deste critério geoquímico juntamente com o IMS (critério mineralógico) é possível confeccionar o mapa de sinal da presença do rejeito de mineração junto ao sedimento marinho, os quais são apresentados por períodos chuvosos (outubro/2018 a março/2019 e outubro/2019 a março/2020) e seco (abril/2019 a setembro/2019) (Figura 1). Ressalta-se que o IMS é uma intrínseca relação com o rejeito de mineração, enquanto o critério geoquímico verifica se há aumento das concentrações dos elementos químicos fortemente associados ao rejeito de mineração. É importante destacar que para ser considerado presente, o critério geoquímico necessita que 5 dos 7 elementos considerados tenham aumento de 20% nas suas concentrações em relação a dados pretéritos. Desta forma, o critério mineralógico (IMS) é mais próximo ao rejeito de mineração, enquanto o critério geoquímico é influenciado por mais fatores ambientais e ainda não determinado como um único índice e, sim, uma variação de concentração de um conjunto de elementos químicos fortemente associados ao rejeito de mineração.

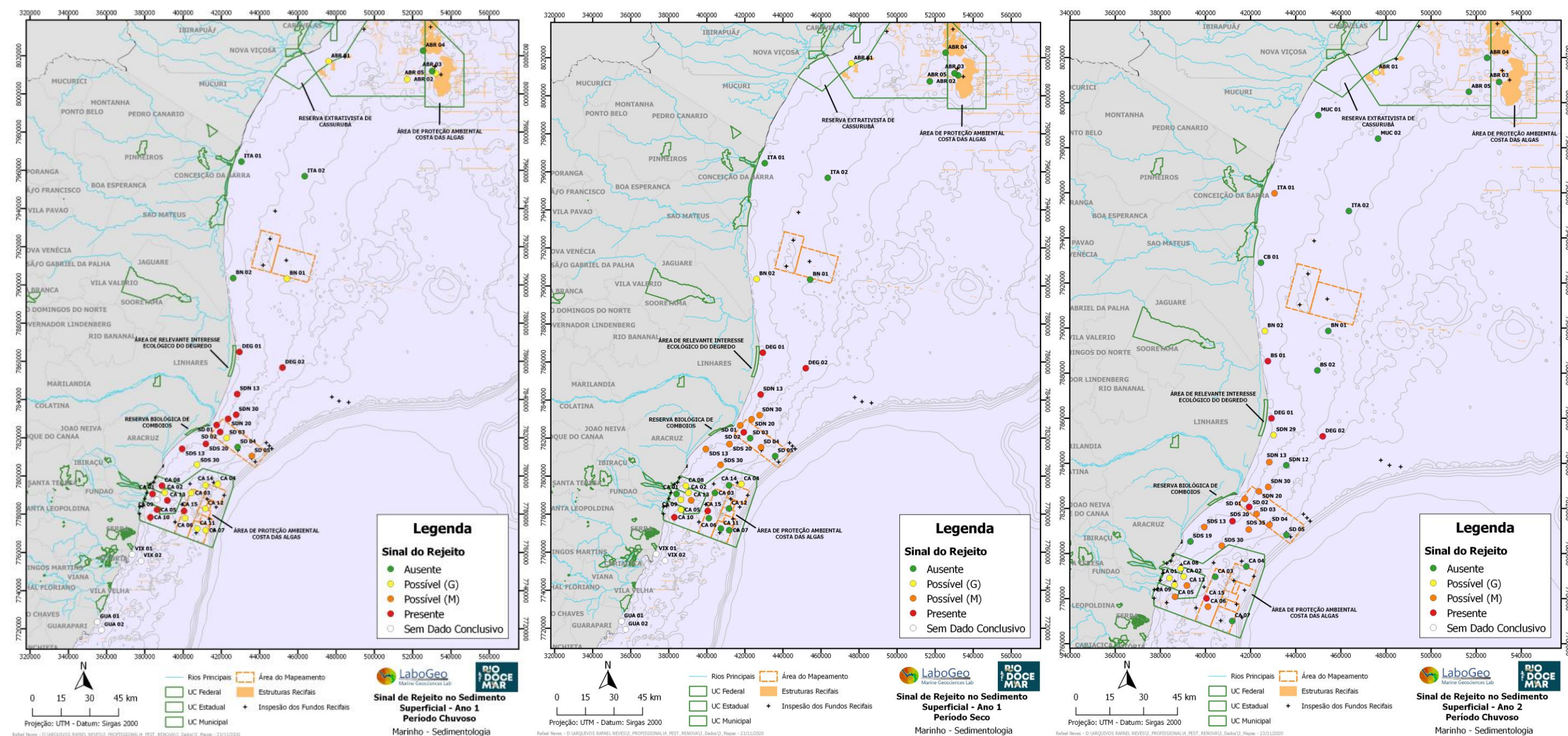
Quando os dois critérios ocorrem em uma mesma amostra é indicado a presença do sinal de rejeito de mineração em amostras de sedimento superficial, quando apenas um deles ocorre, é indicado

como possível, sendo a representatividade da cor (laranja ou amarelo) no mapa referente a maior proximidade da presença, e quando nenhum ocorre é indicada a ausência do sinal do rejeito de mineração. A interpretação dos mapas seria que pontos destacados em vermelho e laranja com presença mineralógica e/ou química do sinal de rejeito de mineração, amarelo com possibilidade química e verde com ausência de sinal.

Principalmente no setor Foz, nota-se que durante o período seco do Ano 1 (mês a mês 2019) há a presença do critério mineralógico, enquanto o critério geoquímico perde sua intensidade. Isto ocorre devido a diminuição das concentrações de metais nos sedimentos superficiais no mesmo período, que está diretamente relacionado ao aumento da energia de ondas na plataforma continental e, conseqüentemente, ressuspensão e partição dos elementos para a coluna d'água, como apresentado no monitoramento da hidrogeoquímica marinha. Já no período chuvoso de dez 2019 a mar 2020 (Período de Transição) pode-se observar no setor Foz que, por exemplo, a estação SDS 20 apresenta novamente o critério geoquímico associado ao mineralógico, influenciado pela maior vazão do Rio Doce observada neste período. A análise temporal ainda mostra o potencial da presença de rejeito em isóbatas de 30 a 40m adjacentes à foz do Rio Doce, durante o período chuvoso. O Setor Norte, mais precisamente ao norte de Degredo, também apresenta alternância da possível presença e ausência de rejeito, considerando a metodologia aqui usada.



Figura 1: Distribuição espacial de sinais do rejeito de mineração no sedimento superficial marinho de acordo com os critérios mineralógicos e geoquímicos estabelecidos, apresentados por períodos sazonais (chuvoso 1 – outubro/2018 a março/2019; seco – abril a setembro/2019; chuvoso 2 – outubro/2019 a março/2020). Os círculos vermelhos representam que ambos os critérios foram satisfeitos para a estação e indicam a presença do sinal do rejeito. Os círculos laranja representam o critério mineralógico e indicam fortemente a presença do sinal do rejeito. Os círculos amarelos representam o critério geoquímico e indicam aumento das concentrações dos metais considerados, mas não necessariamente relacionados a presença do sinal do rejeito. Os círculos verdes representam ausência do sinal do rejeito. Círculos brancos não possuem dados conclusivos sobre a presença do sinal do rejeito.





As principais observações acerca dos nutrientes no âmbito do PMBA/Fest-RRDM foram a ocorrência de nitrogênio amoniacal em níveis acima dos dados pretéritos para toda a malha amostral do período seco do Ano 1 (de abril a setembro de 2019). Esta condição provavelmente foi derivada da ressuspensão do sedimento em virtude do aumento da energia por ventos e ondas neste período, o que favorece a reciclagem de nutrientes e a produção regenerada por algas não silicosas. Por outro lado, o aumento significativo da vazão no período chuvoso 2019-2020 promoveu um importante incremento de sílica dissolvida, fazendo com que este nutriente fosse menos limitante e possibilitando a produção primária recente por diatomáceas e demais grupos fitoplanctônicos.

A principal resposta da especiação do fósforo no PMBA/Fest-RRDM para o sedimento foram relativas as frações ligadas aos óxidos de Fe (III) cristalinos e amorfos. Nota-se a presença de P associado a Fe cristalino ao longo do Ano 1 em todos os setores monitorados, porém na Transição as espécies de P estavam majoritariamente ligadas a fração de óxidos amorfos de Fe e presentes apenas no setor da Foz e na APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz. Sabendo que o rejeito é tipicamente constituído de oxi-hidróxidos Fe (III) na forma de hematita e goethita (cristalino), as espécies de P ligada a esta fração durante o Ano 1 pode indicar o aporte e/ou remobilização de um material semelhante ao da Barragem de Fundão na plataforma (QUEIROZ et al., 2020). Os óxidos amorfos seriam, portanto, um material mais reativo trazido pelo Rio Doce na Transição que podem ser um subproduto dos óxidos cristalinos originários do rejeito, como sugere Queiroz et al. (2020). Tendo em vista que essas frações ocorrem em detrimento uma da outra, quanto maior for o conteúdo de P ligado aos óxidos de Fe amorfos, mais transformados foram os oxi-hidróxidos de Fe (III) cristalinos. Embora a contribuição fluvial tenha sido mais significativa a partir da campanha de novembro de 2019, houve a presença de P ligado a Fe amorfo em outubro e novembro de 2019, ainda em períodos de baixa vazão. Portanto, deve-se considerar também um retrabalhamento destas espécies pela mobilização do fundo e transformação em fase mais reativa (amorfa). Uma outra hipótese para a manutenção destes óxidos amorfos na Transição, em detrimento do cristalino típico do rejeito visto no Ano 1, é que tenha havido alguma mudança na qualidade do sedimento em virtude de ações mitigadoras na bacia do Rio Doce, que podem ter tornado a característica do material mais semelhante ao pré-Rompimento da Barragem (não há dados pretéritos de especiação de fósforo na bacia hidrográfica do Rio Doce).

A presente avaliação mostra que as concentrações de metais lábeis, especialmente  $Fe_{Lábil}$  e  $Zn_{Lábil}$ , aumentaram nos setores Foz Central, Foz Norte e Foz Sul, em comparação às condições registradas no PMBA – Ano 1. Nos setores Abrolhos e Norte, foram registrados durante o período de Transição os maiores níveis de  $Al_{Lábil}$  ao longo de todo o monitoramento, além do incremento de  $Fe_{Lábil}$  e  $Zn_{Lábil}$ . Em geral, o aumento das concentrações dessas formas metálicas no Setor Norte e Foz Sul seguiu o padrão de transporte da pluma de turbidez do Rio Doce. Durante a campanha 01-20/2 (emergencial), os incrementos de metais lábeis foram similares ou até inferiores às variações observadas durante o PMBA - Ano 1 em condições de menor descarga do Rio Doce. Considerando que os metais lábeis correspondem às formas solubilizadas na coluna d'água, esse resultado indica um possível efeito de diluição, tendo em vista o elevado volume hídrico transportado em condições de vazão extrema

(superior a 5000 m<sup>3</sup>/s durante essa campanha). A análise do percentual de metais lábeis na fração dissolvida, mostrou pouca variação entre os metais quantificados, com maior taxa de labilidade associada ao Zn. O padrão de distribuição espaço-temporal em função das concentrações de carbono orgânico dissolvido indica pouca associação das formas lábeis com compostos orgânicos e possível maior influência de formas inorgânicas, conforme previamente observado para a área de estudo. Aumento concomitante para Fe<sub>Lábil</sub>, Al<sub>Lábil</sub> e Zn<sub>Lábil</sub> ocorreu na campanha de 11-19, marcada pelo predomínio de eventos ressuspensivos após a passagem da tempestade Iba. Assim, é provável que para metais lábeis, os eventos de ressuspensão e ciclagem interna na plataforma continental assumam maior importância para a remobilização do material proveniente do rejeito do que novos aportes decorrentes da descarga do Rio Doce. Complementando a fração lábil, os principais resultados de metais do monitoramento da hidrogeoquímica marinha na matriz água (frações total, dissolvida e MPS) apontam que as regiões dos setores Foz, APA/REVIS e Norte (Degredo) são as mais impactadas em relação aos metais mais associados à presença do sinal do rejeito de mineração.

Em Abrolhos, elementos dissolvidos apresentaram concentrações similares ou menores aos encontrados no período pré-PMBA. Durante o monitoramento, maiores concentrações observadas durante o período seco do Ano 1. Em relação aos elementos no MPS, estes apresentaram concentrações médias maiores que o pré-PMBA, sendo que os elementos Al, As, Ba, Fe, Pb, V e Zn foram maiores no período de transição. Já para sedimento do setor Abrolhos, as maiores concentrações foram observadas durante o Ano 1.

Os setores Norte e APA/REVIS apresentaram variações similares, onde os elementos dissolvidos As, Ba, Co, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn apresentaram tendências semelhantes aos observados na Foz, com aumentos nos períodos chuvosos, durante campanhas de maiores vazões, e período seco, durante aumento da energia de ondas na plataforma continental. Todos esses, exceto Cr, também apresentaram tendência de aumento da fração particulada da campanha 10 em diante (mês 07-19). Ressalta-se que os elementos analisados desses setores apresentaram uma tendência de decréscimo das concentrações após o período chuvoso do Ano 1.

Os resultados dos compostos nitrogenados (aminas) apresentaram uma diminuição significativa em todos os pontos amostrais da coluna d'água. Os resultados foram similares aos registros durante o período chuvoso do Ano 1, porém bem inferiores quando comparadas ao período seco. Com exceção dos pontos mais crítico, tais como as estações SDN 13, SD 03 que ainda apresentaram concentrações elevadas de aminas durante a campanha emergencial (01-20), não se observa de forma geral para os demais pontos, uma grande contribuição no input de aminas, mesmo com o evento de chuvas e grande aporte do Rio Doce em função do aumento da vazão. Hidrocarbonetos alifáticos e HPAs apresentaram aumento durante o período chuvoso da Transição na estação ABR 01.

No setor Foz foi observado uma elevação da concentração de hidrocarbonetos alifáticos em comparação às últimas campanhas do Ano 1 (período seco), porém inferiores quando comparadas ao período chuvoso. Isso denota a importância da contribuição do Rio Doce no aporte desse material e, que devido à maior vazão durante o período chuvoso 2019-2020, observa-se a diminuição das concentrações muito provavelmente por efeito de diluição. O regime de chuvas é um fator importante da remobilização de HPAs para esta região, seja via deposição atmosférica por precipitação ou por meio de material terrígeno, como sugerem as concentrações de HPAs totais registradas com aumento no setor Foz e setor Norte (Transição), bem como na estação amostral de Mucuri.

As concentrações de esteróis apresentaram um aumento significativo no período de Transição em decorrência do regime de chuvas e consequentemente em um maior aporte de material continental, tanto na coluna d'água quanto no sedimento, em todos os setores monitorados. Houve um incremento da concentração de esteróis provenientes de plantas vasculares e um maior aporte de nutrientes, aumentando a produção primária e, consequentemente, incrementando a concentração de esteróis referentes a fitoplâncton, zooplâncton, cianofíceas e dinoflagelados em boa parte das áreas estudadas, principalmente nos pontos de maior proximidade continental ou sob influência da descara do Rio Doce. Corroborando com estes resultados os ácidos graxos mais predominantes foram C<sub>16</sub> e C<sub>18</sub>, indicando assim que a principal fonte de matéria orgânica é autóctone, como por exemplo, de produtividade primária. Observa-se uma mudança na concentração do perfil de ácidos graxos insaturados, o que denota uma mudança na mistura da coluna d'água, provavelmente em função da uma maior entrada de nutrientes, por exemplo em função do efeito de ressuspensão de material. Ácidos graxos poli-insaturados PUFAs, apresentaram um incremento significativo em todas as áreas monitoradas, principalmente na campanha de janeiro/20, reafirmando assim a importância do regime de chuvas na deposição de MO recente (fresh OM).

Com relação aos critérios estabelecidos para a qualidade da água, observou-se degradação da qualidade para nutrientes (principalmente silício e N-amoniaco) e metais dissolvidos (Co, Cu, Hg, Fe, Ni e Hg) durante o período seco do Ano 1. Essas condições foram verificadas predominantemente nos setores Norte, Foz do Rio Doce e APA/RVS Costa das Algas. Para HPAs, condições de desconformidade com a legislação vigente foram associadas ao período chuvoso da Transição em todos os Setores avaliados. Quanto aos critérios de qualidade para sedimento, observou-se condições moderadamente a altamente impactadas para metais e concentrações acima das médias pretéritas em todas as condições avaliadas, havendo maior degradação no período chuvoso do Ano 1. Similar ao que foi observado para a coluna d'água, para HPAs ocorreu a degradação da qualidade do sedimento (moderadamente a altamente impactado) no período chuvoso da Transição para os Setores Foz do Rio Doce e APA/RVS Costa das Algas. Esses resultados indicam o carreamento de contaminantes orgânicos a partir da remobilização de material novo com o incremento da vazão média total no período chuvoso da Transição.

A discussão integrada entre a distribuição de metais e as forçantes físicas mostraram que a vazão (associada ao aporte do Rio Doce) e a altura de ondas (associada aos eventos ressuspensivos)

tiveram relação diferenciada, a depender da matriz ambiental e fração considerada para os metais. Em geral, a vazão apresentou associação com um maior número de metais na fração particulada (e.g. Ba, Cu, Zn, Al e Zn), especialmente no período chuvoso da Transição, em que foi observado um aumento da vazão média total em relação ao Ano 1. Essas relações marcam o aporte de metais associados ao material particulado em suspensão em momentos de maior influência continental. A altura de ondas mostrou relação com a liberação de As e Pb da matriz sedimentar, enquanto os mesmos foram relacionados a essa forçante física para a fração particulada e dissolvida (no caso do As), representando os eventos de transferência de fases do sedimento para a coluna d'água, principalmente no período Seco do Ano 1. Os metais Fe e V dissolvidos, também associados ao rejeito de minério de ferro, correlacionam-se principalmente aos fatores de ressuspensão, com consequente resposta aos processos internos de reciclagem na plataforma continental.

A comunidade fitoplanctônica era típica de ambiente oligotrófico antes da chegada do rejeito de mineração no ambiente marinho e após, o ambiente sofreu uma fertilização em relação aos nutrientes e metais traço, favorecendo o aumento da biomassa (clorofila-*a*) e densidade numérica. Isso ocasionou a redução da diversidade e favoreceu espécies oportunistas, imediatamente após a chegada dos rejeitos (impacto agudo). Ademais, grupos específicos como as diatomáceas penadas, dinoflagelados e haptófitas - especificamente os cocolitofórideos - deixaram de aparecer nas amostras. Logo após o período inicial, houve o aumento dos feopigmentos, uma vez a comunidade não se sustentou, ficando senescente. Em seguida iniciou-se um período de impacto crônico, o qual se mantém até o momento presente. Nesse estágio, os eventos de enchente do Rio Doce ou de ressuspensão do sedimento estuarino e marinho criaram ciclos de oscilação de saúde fisiológica sobre a comunidade fitoplanctônica, culminando na variação no estágio de sucessão ecológica. Nota-se uma sutil recuperação das diatomáceas, que foram retornando aos poucos e voltando a ter representatividade, todavia dinoflagelados e cocolitofórideos continuaram em reduzida proporção.

É nítido que há uma forte contribuição do material aportado pela Foz do Rio Doce na atenuação da luz, RFA – radiação fotossinteticamente ativa, pois os maiores valores do coeficiente de atenuação da luz  $K_d$  (RFA) se localizam nesta região, e que as vazões fluviais contribuem para aumentar o coeficiente, entretanto volumes muito altos, como nos eventos de inundação, parecem diluir as propriedades que alteram o  $K_d$  (RFA) aumentando a área de abrangência. Essas alterações podem ser as responsáveis por determinados cenários observados, como a ausência do grupo Haptophytes e o favorecimento das cianobactérias em determinados momentos, em relação à composição da comunidade fitoplanctônica mas, que só poderão ser confirmados com a continuidade do monitoramento.

Em relação a setorização, as alterações deletérias sobre a comunidade fitoplanctônica foram maiores nas estações próximas ao Rio Doce (Setor da Foz), mas se apresentaram para toda a área estudada, reduzindo em magnitude a medida em que se afasta da Foz em ambos os anos do PMBA/Fest-RRDM. As regiões adjacentes ao sul e ao norte parecem ser afetadas de forma diferente, possivelmente relacionada à distribuição e posicionamento da pluma do rio Doce. Os resultados



apontados pelos indicadores do fitoplâncton sugerem que todos os setores estão com a maioria das coletas e estações amostrais altamente alteradas. No caso da densidade numérica, a mesma segue alterada em todos os setores. Os indicadores ambientais do fitoplâncton não apresentaram recuperação para condições anteriores ao rompimento e nem melhoria do ano 1 para o período de Transição (Ano 2), tendo até piorado sua qualidade em alguns setores, uma vez que os eventos de alta vazão aumentam a área de abrangência dos efeitos sobre o fitoplâncton, demonstrado pela campanha amostral ocorrida no evento de maior vazão do Rio Doce (fevereiro 2020). Os dados coletados nas estações MUC 01 e MUC 02, recentemente incluídas no Setor Abrolhos, aparentam piorar a saúde fisiológica do Setor, o que deve ser confirmado com um período maior de monitoramento.

Assim como os eventos de enchente do Rio Doce, eventos de maior hidrodinamismo, como a tempestade tropical IBA, provocam grande ressuspensão de sedimentos e consequente efeito sobre a comunidade fitoplanctônica, o que sugere que o momento imediato a tais eventos deve ser monitorado por evidenciar possíveis impactos. Eventos de El Niño e La Niña também devem ser considerados por se tratarem de eventos naturais periódicos, que podem contribuir com o impacto e sua propagação no ambiente, uma vez que alteram os regimes de chuvas da região.

Em síntese, ao longo do PMBA/Fest-RRDM é possível observar, através dos bioindicadores de qualidade ambiental: variações quali-quantitativa e da saúde fisiológica, que a comunidade fitoplanctônica prossegue sob a influência dos constantes distúrbios do ambiente e que não retornou às condições prévias.

Os indicadores zooplanctônicos sugeridos para o presente monitoramento provaram-se efetivos como sinalizadores dos impactos causados pela lama de rejeitos. Todos apontaram para uma mesma resposta em relação ao momento de maior fragilidade da comunidade ao longo do monitoramento e sua correlação com o aumento de vazão do Rio Doce.

Todos os Índices Ecológicos avaliados apresentaram valores significativamente menores nos períodos de maior vazão do Rio Doce (Setor Foz), com destaque negativo para a campanha de janeiro de 2019.

Paracalanidae é um grupo do zooplâncton considerado resistente à diferentes alterações ambientais, tanto de origem antrópica quanto natural, tais como: poluição e turbidez. *Paracalanus cf parvus* foi a espécie dominante no Setor Foz durante todo o período amostral. Nas campanhas realizadas em janeiro de 2019 e campanha Emergencial, de janeiro de 2020, essa espécie chegou a apresentar mais de 70% de abundância relativa em alguns pontos, somando-se adultos e juvenis. Outra espécie que predominou na região, principalmente durante o período de maior vazão, foi *Oikopleura longicauda*. Esses organismos apresentam picos populacionais em locais com elevada concentração de MPS, além de aumento populacional significativo após incremento de ferro, inclusive com tempo de reposta mais rápido do que o da comunidade zooplanctônica como um todo.

Em adição aos parâmetros biológicos, que apontam para um ambiente mais impactado no período chuvoso, também existem os dados da concentração de metais dissolvidos na água, que apresentaram maior correlação com as campanhas do período chuvoso de janeiro e abril de 2019 e a campanha emergencial, realizada em janeiro de 2020. *Paracalanus cf parvus* não teve sua distribuição afetada por nenhum dos metais analisados ao longo do monitoramento, o que reforça sua condição de espécie resistente aos efeitos deletérios destes elementos. Por outro lado, *Penilia avirostris*, espécie sensível à diferentes condições ambientais, teve sua distribuição significativamente determinada pelas concentrações de cádmio e alumínio dissolvido e vanádio e cobre particulados no Setor Foz do Rio Doce, indicando uma sensibilidade da espécie frente às maiores concentrações de metais na região da Foz do Rio Doce em períodos de maior vazão. Apesar de se tratar de uma espécie comum e de pico reprodutivo nos meses de verão e outono, nenhum indivíduo foi observado no Setor Foz durante a campanha realizada em janeiro de 2019 e apresentou abundância irrisória na campanha de janeiro de 2020, as duas campanhas com maior vazão do Rio Doce.

Após dois anos de monitoramento, é possível afirmar que o material proveniente da calha do Rio Doce, que é despejado na costa em maior intensidade nos momentos de maior vazão, causa efeitos agudos sazonais na comunidade costeira, principalmente no Setor Foz. Os efeitos no Setor APA e no Setor Norte foram observados em períodos distintos, e com maior clareza no Setor Norte. Devido à dinâmica costeira de remobilização e disponibilização dos contaminantes provenientes da lama de rejeitos de mineração, esses padrões são mais complexos de serem determinados, necessitando um monitoramento continuado para o melhor entendimento do padrão de seus efeitos sobre a comunidade zooplânctônica. Em relação ao Setor Abrolhos, os indicadores de distúrbios na comunidade existem em determinados momentos e locais, mas sua correlação com os efeitos da lama de rejeitos de mineração não pôde ser confirmada.

É importante salientar que monitoramentos em séries temporais curtas (1-2 anos contínuos) são importantes para a determinação de alguns padrões, no entanto, séries de médio (> 3 anos) e longo prazo (> 10 anos contínuos) são necessárias para o entendimento das flutuações de uma dada comunidade biológica e como estas se relacionam com fatores antrópicos e climáticos nas oscilações sazonais ou interanuais em regiões costeiras.

Para a comunidade ictioplânctônica, do total de ovos de peixes coletados na superfície, 53% das amostras, apresentaram concentrações abaixo de 100 ovos.100 m<sup>-3</sup>, enquanto que, na coluna de água, 89% ficaram abaixo deste valor. As maiores densidades de ovos ocorreram nas campanhas de abril e julho de 2019, influenciado pelo sistema de ventos e baixa vazão do rio. Especialmente o setor APA Costa das Algas/REVIS de Santa Cruz diferiu significativamente dos setores Foz e Norte. Em relação às densidades de larvas de peixes, tanto na superfície quanto na coluna de água, mais de 90% dos valores registrados ficaram abaixo de 100 larvas.100 m<sup>-3</sup>.

O padrão temporal foi semelhante ao de ovos de peixes, mas somente a campanha de janeiro/2019 foi diferente das demais. Foi observada diferença significativa entre o setor Foz do Rio Doce, onde

ocorreram as menores densidades médias, e APA Costa das Algas/REVIS de Santa Cruz, com as maiores densidades médias. Altas concentrações de turbidez e disponibilidade dos metais na coluna de água devido à maior contribuição do Rio Doce interferiram nas densidades e diversidade do ictioplâncton, como mostraram as análises integradas com os parâmetros ambientais. A maioria dos ovos de peixes registrados foi classificado como “inviáveis”, ou seja, já estavam mortos no momento da coleta. Foram registradas também larvas de peixes com trato digestório danificados e larvas com sedimento alaranjado aderido. Tanto os ovos “inviáveis” quanto as larvas com trato digestório danificados tiveram relações com a alta disponibilidade de metais, principalmente manganês, cromo, ferro e bário, mostrando uma consequência direta e/ou indireta da pluma de resíduos sobre esses organismos.

A curva de acumulação de espécies mostrou que ainda não houve uma estabilização dos táxons possíveis de ocorrerem. Esse fato é corroborado pela ausência de 24 táxons que foram registrados na área durante o pré-PMBA/Fest-RRDM em 2016 e que não foram observados ao longo do monitoramento. Através da análise das comunidades ictioplanctônicas em relação a dominância e frequência, foram selecionadas quatro famílias, sendo duas com hábitos pelágicos (Engraulidae e Clupeidae) e duas com hábitos demersais (Sciaenidae e Haemulidae). Os engraulídeos (manjubas) e os cianídeos (corvinas/pescadas) têm sido tolerantes aos estresses ambientais, encontrados em densidades mais altas, principalmente na Foz, quando ocorreu alta vazão do rio, altas concentrações de MPS e metais. Já os clupeídeos (sardinhas) e os haemulídeos (cocoroca) foram encontrados em condições com alta vazão do rio, altas concentração de MPS, mas baixos níveis de metais, sendo mais sensíveis ao estresse. Sugere-se que seja dada atenção a essas famílias, com importância comercial, e acompanhar as distribuições e abundâncias das mesmas na área de estudo. Deve-se ter atenção também para as larvas de *Chloroscombrus chrysurus*. Dentre as larvas com trato digestório danificados, esta espécie foi frequente e, de acordo com a literatura, é bioacumuladora de cádmio, chumbo e zinco. Portanto, é importante ser monitorada junto com os demais táxons que também foram registrados com o trato digestório danificado. Dessa forma, os resultados obtidos ao longo do PMBA/Fest-RRDM mostraram a importância de acompanhar a evolução dos efeitos da pluma do Rio Doce sobre a comunidade ictioplanctônica em toda a área de estudo e ressaltam a importância da continuidade do monitoramento desses organismos.

A densidade média de organismos bentônicos em todo período amostral foi de  $9,71 \pm 1,06$  ind/ml, sendo as maiores densidades médias encontradas no Setor da Foz ( $13,16 \pm 2,33$  ind/ml), e a menor no Setor APA Costa das Algas/REVIS de Santa Cruz ( $6,09 \pm 0,89$  ind/ml). Os organismos foram identificados em 16 filos distintos, incluindo o registro de vestígios de organismos, como as conchas e esqueletos, seguindo critérios propostos na literatura. Como descritores da macrofauna bentônica foram analisados a abundância de organismos, riqueza de espécie e índice de diversidade, bem como a influência das variáveis abióticas.

Os resultados mostram que existe uma variação espacial significativa na comunidade bentônica, refletida nos descritores da comunidade. Para todos os descritores, o setor Foz apresenta os

menores valores médios, em contraste com os demais setores. Esse resultado pode indicar que o rejeito teve impacto negativo na riqueza, diversidade e abundância do bentos, dados evidenciados também pela relação negativa entre o IMS e os descritores, que diminuem conforme aumenta a probabilidade de presença de rejeito. Foi observada também que as estações mais profundas apresentaram maiores valores médios de riqueza, diversidade e abundância. Os modelos mais ajustados para todos os descritores indicaram, em especial, as variáveis: Carbonato de Cálcio, Silte e Argila, Chumbo e Manganês como principais variáveis a influenciar os descritores. Destas, as variáveis silte e argila, Manganês e Chumbo são descritos na literatura como característicos ao rejeito da barragem de Fundão. Na análise restrita (incluindo apenas estações rasas e próximas da Foz), houve um aumento da importância do chumbo e manganês para a explicação da riqueza, mostrando que nessa região a biota está ainda sob maior influência da concentração de metais no meio. Dessa forma, ficou evidenciado que a concentração dos metais provenientes do rejeito da barragem de Fundão está interferindo diretamente na fauna bentônica, mesmo após passados cinco anos de sua chegada no ambiente marinho.

Para verificar a estruturação da comunidade bentônica foram realizadas análises de permutação (PERMANOVA) e ordenação (nMDS). Dois conjuntos de análises foram realizadas: 1) contendo dados do ano 1 de monitoramento e com os táxons identificados no menor nível taxonômico possível; 2) análise dos dados dos anos 1 e 2, com informação dos táxons em grandes grupos (Filos, Classes e Ordens). Nas duas análises foi demonstrado que a comunidade bentônica está significativamente estruturada nos Setores, nas Campanhas e nas diferentes profundidades. Porém, a variação temporal foi menos informativa. Também foram conduzidas análises de redundância (RDA) para verificar a relação de fatores abióticos com a estruturação da comunidade. Os resultados da RDA mostraram que as estações da Foz e estações de baixa profundidade se apresentam mais estruturadas nas maiores concentrações de metais. Por outro lado, estações de Abrolhos e APA/REVIS com maiores profundidades tenderam a se estruturar na dependência de variáveis sedimentológicas. Os resultados, tanto da estruturação da comunidade quanto da relação desta com as variáveis abióticas, também permitem concluir que o efeito observado no Setor Foz, ligado ao rejeito, pode ser expandido para explicar a variação em estações próximas, como Degredo e estações mais rasas do setor APA, sugerindo que essas regiões também estão sob efeito do rejeito. Assim, podemos concluir que a variação encontrada nas diferentes métricas da estrutura da comunidade bentônica, é explicada pelo conjunto de variáveis ambientais e contaminantes que possuem ligação com o rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão, principalmente metais e sedimentos finos.

No monitoramento dos fundos recifais, rodólitos e macroalgas foram constatados possíveis efeitos do rompimento da barragem em espécies (e.g. integridade celular de macroalgas) e comunidades bêmicas (e.g. alterações espaço-temporais na estrutura de comunidades), em processos ecológicos característicos dos recifes e bancos de rodólitos (e.g. mineralização de  $\text{CaCO}_3$ , recrutamento, fotossíntese), e também na natureza sedimentar do fundo recifal (e.g. mineralogia), mas a

complexidade desses sistemas, em conjunto com a circulação oceânica e o próprio evento. Entretanto, as alterações observadas nesses sistemas biológicos podem não ser exclusivamente em função do rompimento da barragem, porque não há um indicador que aponte a influência única do rejeito.

Demonstra-se efeitos inequívocos do rompimento da barragem em nível de organismos e comunidades, incluindo presença de contaminantes, inclusive metais e/ou partículas metálicas oriundos do rompimento, em macroalgas, corais e algas coralináceas formadoras de rodólitos, confirmando que os efeitos do evento são de maior magnitude nas áreas recifais mais próximas da foz do rio Doce, mas se estendem até a região adjacente ao Parque Nacional Marinho de Abrolhos. Por exemplo, foram observadas alterações na estrutura de comunidades de macroalgas na área da APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, com aumento na abundância de algas mais tolerantes a rejeitos de mineração após o rompimento.

O monitoramento de áreas de referência (controle), tanto nos estudos da ictiofauna e carcinofauna estuarina/marinha, quanto da ictiofauna recifal, propiciou a distinção dos padrões de variação natural daqueles que foram causados pela lama de rejeito na área de impacto. De maneira geral, pode-se evidenciar uma grande heterogeneidade na composição específica de cada ambiente amostrado, além de indicações de estruturação espacial e temporal de comunidades e populações associadas aos potenciais efeitos do impacto sobre a ictiofauna e a carcinofauna.

Em termos de abundância, como componente majoritário da ictiofauna estuarina na área de estudo, destacaram-se a sardinha-dentuça *Chirocentron bleekermani* e duas espécies de cangoás *Stellifer brasiliensis* e *S. rastrifer*. A dominância destas três espécies de peixes é esperada, pois elas são comuns na composição da fauna acompanhante da pesca de arrastos de fundo do camarão sete-barbas (*X. kroyeri*). Além das espécies dominantes, podemos destacar a ocorrência de espécies de peixes ameaçadas de extinção nas áreas monitoradas, tais como: *Atlantoraja platana* (vulnerável - VU), *Hippocampus erectus* (VU), *Hippocampus reidi* (quase ameaçado - NT) e *Pseudobatos percellens* (NT).

Quanto à carcinofauna estuarina, os camarões *Xiphopenaeus kroyeri* e *Peisos petrunchevitchi* e os siris *Callinectes ornatus* e *C. danae* foram as espécies que mais contribuíram em abundância. Devido à falta de estudos da carcinofauna na região, o monitoramento PMBA/Fest-RRDM proporcionou o primeiro registro para a grande maioria das espécies que ocorrem na região.

No decorrer do Ano 1 e no período de Transição, a partir da metodologia do DNA *Barcoding* foram identificados 95% dos espécimes avaliados (considerando um percentual de homologia entre 99 a 100% em pelo menos um dos bancos de dados), solucionando dúvidas taxonômicas importantes tanto para peixes estuarinos/marinhos como recifais, especialmente entre espécies de peixes das famílias Gerreidae e Sciaenidae.

Foi observada uma alta variabilidade espacial na composição e abundância de pós-larvas de peixes estuarinos/marinhos, onde as amostras da foz do Rio Doce apresentaram os menores valores médios de abundância, riqueza e diversidade em relação aos demais estuários analisados (controles). Isto indica claramente um impacto sobre a composição e estrutura da assembleia de pós-larvas de peixes estuarinos, cujo efeito incide na manutenção dos estoques. Os possíveis efeitos da lama são mais perceptíveis no nível de população. O bagre-guri é uma espécie resistente às variações ambientais, capaz de dominar habitats que estão sob efeito de diversos tipos de impactos antropogênicos, como poluição orgânica e por metais, trânsito de embarcações, entre outros, enquanto os cangoás suportam grandes variações de salinidade e apresentam tendência *r*-estrategista, com pequeno porte e atividade reprodutiva ao longo de todo o ano. A maior biomassa de *G. genidens* na área interna do Rio Doce e a alta frequência de ocorrência (presença em mais de 70% dos arrastos) é provavelmente o reflexo das más condições ambientais do local, que propiciam o desenvolvimento de uma espécie resiliente como *G. genidens*, em detrimento de outras.

Análises das assinaturas de isótopos estáveis ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$ ) de seis espécies de peixes estuarinos coletadas antes (novembro/2015) e depois (junho/2016) da passagem da lama de rejeitos pela foz do Rio Doce constataram mudança no nicho isotópico de todas as espécies estudadas, bem como alterações no funcionamento ecossistêmico da assembleia de peixes por meio da perda de diversidade dos recursos basais do ambiente e diminuição da diversidade trófica. Utilizando análises microquímicas do otólito, o ferro (Fe), principal elemento presente na lama do rejeito, foi mais abundante apenas em *C. parallelus* capturado no Rio Doce, enquanto manganês (Mn) apresentou as maiores concentrações no Rio Doce para ambas as espécies. Os demais elementos analisados variaram suas concentrações em relação aos locais e espécies, e poderão auxiliar no entendimento da conectividade entre os rios estudados. A incorporação dos elementos químicos nos otólitos ocorre de diversas formas e por diferentes fatores bióticos e abióticos, de modo que varia de espécie para espécie, explicando assim as diferentes concentrações dos elementos químicos nos otólitos das três espécies, principalmente do Rio Doce.

Quanto aos peixes recifais, dado a ausência de dados pretéritos e referências na literatura, com a adoção do desenho amostral *beyond-BACI*, foi possível detectar nas áreas próximas a foz do Rio Doce e APA Costa das Algas, atingidas diretamente pela lama de rejeito, alterações na assembleia de pós-larvas e de peixes recifais para os indicadores de abundância, biomassa, riqueza, composição e diversidade de espécies quando comparadas a áreas sob menor efeito (denominada zonas Controles). Adicionalmente foi possível constatar a perda de espécies raras associadas às áreas diretamente impactadas, assim como uma menor abundância e biomassa de grupos funcionais importantes ecologicamente como herbívoros-detritívoros, piscívoros e omnívoros-planctívoros, o que contribui para a perda de resiliência ecossistêmica. O indicador diversidade genética se mostrou de extrema importância na verificação da capacidade de adaptação dos peixes estuarinos e recifais às mudanças ambientais ocasionadas pelo Rompimento da Barragem de Fundão, com baixos valores



de riqueza alélica e grande número de locus em desvio do equilíbrio de Hardy-Weinberg (HWE), principalmente para as espécies estuarinas estudadas.

Com relação a ocorrência de cetáceos na área que abrange a região da foz do Rio Doce até a foz do Rio Piraquê-Açu, presença de filhotes na composição dos grupos e registro de comportamento de alimentação pode-se dizer que o número de avistagens de cetáceos (por monitoramento embarcado) reduziu em 21,26% durante o Período de Transição, em relação ao mesmo período do Ano 1, no entanto, a região da foz do Rio Doce continua a apresentar uma grande importância para os botos-cinzas (*Sotalia guianensis*).

Analisando a razão isotópica de C e N em amostras de *S. guianensis* e *P. blainvillei*, é possível observar uma clara separação entre os indivíduos coletados nas regiões estudadas. Os resultados das análises de isótopos estáveis apontam que o uso de área para forrageio e alimentação do boto-cinza esteja associado, pelo menos em parte da distribuição, a desembocadura e/ou entorno dos rios, com certa fidelidade de sítio. Em relação a toninha, os resultados foram diferentes em relação aos botos-cinza, sugerindo que essas espécies não ocupam os mesmos nichos ecológicos. Dados dos índices de diversidade e estruturação genética de cetáceos no litoral do Espírito Santo, a partir de marcadores moleculares mitocondriais, evidenciaram estruturação genética para *S. guianensis*, indicando a presença de três populações no litoral do Espírito Santo.

Os resultados de encalhes de cetáceos dos dois anos de PMBA/Fest-RRDM comparados com mais seis anos de dados anteriores ao monitoramento cedidos pelas ONGs, foram analisados diferentes indicadores apresentados para avaliação do impacto nas populações de cetáceos do ES referente ao desastre de Mariana. Em quatro desses indicadores foram detectados eventos anormais tanto no período agudo do desastre (Pré-PMBA) quanto crônico (PMBA). As taxas de encalhes anuais sugerem impacto sobre as populações de boto-cinza e toninha, com aumento de encalhes para o boto-cinza mais acentuado na fase aguda (Pré-PMBA) e para toninha na fase crônica (PMBA). Em relação a distribuição sazonal dos encalhes das toninhas foi observado algo atípico que pode sinalizar a possibilidade do impacto mais incidente na fase aguda imediatamente após o rompimento da barragem de Fundão (fase Pré-PMBA), uma vez que, na série histórica analisada (fase Pretérita) a tendência de encalhes para a espécie acontecia no verão e após a chegada dos dejetos houve predominância de encalhes totalmente fora da época, no inverno e com grandeza na ordem de 3,5 vezes maior que a fase Pretérita. A determinação da taxa de óbito para cetáceos encalhados por diagnóstico de morte demonstrou que as principais causas envolvendo todas as espécies foram emalhes e processos infecciosos, afetando principalmente o boto-cinza e as toninhas. Os maiores índices de emalhes se localizaram na região norte do estudo, em Conceição da Barra, São Mateus e Linhares, enquanto que os óbitos por processos infecciosos, os locais de maior ocorrência foram Linhares e São Mateus e em terceiro lugar Marataízes.

Com relação ao estado de saúde desses animais podemos destacar em relação as concentrações de elementos-traço, que as concentrações medianas de HgT em *Sotalia guianensis* estão acima do

limite de tolerância estabelecido na literatura que pode causar danos hepáticos nos mamíferos marinhos ( $100$  a  $400 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ , p. u.) para todas as regiões de estudo, exceto para a região do Rio Doce. As concentrações hepáticas médias dos 24 meses do PMBA/Fest-RRDM encontram-se na mesma ordem de grandeza que as médias mais elevadas do Brasil, encontradas em botos-cinza da costa do Rio de Janeiro. As concentrações hepáticas em botos-cinza região Barra do Riacho (mediana de  $0,88 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  foi para  $11,80 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) e as concentrações musculares em botos-cinza da Região Metropolitana (mediana de  $0,63$  foi para  $1,96 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) aumentaram em relação ao Relatório Anual anterior. Em relação a dados pretéritos, 32 indivíduos de *Pontoporia blainvillei* da costa do Espírito Santo coletados de 2004 a 2015 apresentaram concentrações de HgT similares ao PMBA/Fest-RRDM, exceto pelas concentrações hepáticas, que foram cerca de 1,5 vezes mais elevadas no presente monitoramento.

Concentrações elevadas de Fe, Mn e Cd foram encontradas. É importante levar em consideração que tais elementos também são destacados nos principais resultados de outros subprojetos, indicando altas concentrações próximo à foz do Rio Doce e ligação com a lama de rejeitos. Algumas concentrações medianas de elementos-traço permanecem acima daquelas reportadas para diferentes estados da costa brasileira, inclusive comparando com áreas mais urbanizadas e industrializadas. A região Barra do Riacho apresentou concentrações medianas maiores de Fe no fígado, músculo e rim, e a Região Metropolitana apresentou maiores medianas de Fe no fígado e no rim de botos-cinza comparadas com o primeiro ano do PMBA/Fest-RRDM. No rim, tecido de maior acúmulo de Cd, os anos mais próximos ao rompimento da barragem tiveram as maiores concentrações deste metal (2016> 2018/2019> 2019/2020).

Para as toninhas as concentrações de Fe e Mn encontradas no fígado e a concentração de Cd no rim estão acima daquelas reportadas por alguns estudos. A concentração mediana de As em amostras pretéritas (32 toninhas coletadas de 2004 a 2015) é maior do que as do presente estudo, porém, as concentrações medianas de Fe e Mn no fígado e de Cd no rim são maiores nos animais pós-rompimento da barragem de Fundão. Esta observação, embora limitado pelo número amostral de seis indivíduos pós-rompimento da barragem, corrobora o aumento nas concentrações de Fe, Mn e Cd após o rompimento da barragem e a chegada da lama de rejeitos na costa do Espírito Santo, como reportado em subprojetos deste PMBA/Fest-RRDM.

Outros contaminantes analisados, como compostos organoclorados, organobromados e HPAs apresentam variações em suas concentrações em diferentes regiões monitoradas, algumas vezes com valores elevados, podendo ter consequências adversas para a manutenção das populações.

Os resultados encontrados com relação as prevalências de histopatologias, aliados com as análises de contaminantes, bacteriológicas e fungicidas puderam identificar diversos espécimes com a saúde comprometida, indicando principalmente enfermidades sistêmicas crônicas e processos infecciosos com quadro séptico, que podem ser associadas à qualidade do ecossistema. Mesmo para os



indivíduos que tiveram como indicativo de causa de morte o emalhe em redes de pesca, ainda foi possível observar que a saúde estava comprometida, com indício de pneumonia.

Para o monitoramento de aves, o qual contempla dados coletados antes do rompimento da barragem, indica que as aves marinhas e costeiras permanecem utilizando o espaço e os recursos alimentares na foz do Rio Doce e adjacências, sem alterações substanciais nas áreas de alimentação e no nicho trófico entre os períodos pré e pós rompimento da barragem de Fundão. Um conjunto adicional de evidências de que as aves seguem utilizando o espaço e os recursos alimentares na área contaminada vêm das análises de contaminantes inorgânicos nos tecidos das espécies analisadas. Ao comparar as concentrações dos elementos traço entre os períodos pré e pós rompimento da barragem de Fundão, o estudo revela um aumento significativo na concentração de elementos não essenciais (e.g. Cd e As), diminuição na concentração de elementos essenciais (e.g. Cu e Zn), quadros de desidratação, baixo sucesso reprodutivo e falhas reprodutivas de espécies ameaçadas (e.g. *Phaethon aethereus* e *Sterna hirundinacea*, respectivamente). As aves mais impactadas são as que nidificam no arquipélago dos Abrolhos, *S. leucogaster* e *P. aethereus*, com destaque para a diminuição de até 96 vezes para [Cu] na corrente sistêmica de *S. leucogaster*. As concentrações Cr e de Zn também decresceram nos organismos, detectadas no sangue de *S. leucogaster* em níveis 14 e 6,6 vezes menores, respectivamente, e 8,5 e 3,9 vezes menores nas penas. O único elemento que apresentou aumento nas concentrações sistêmicas, mesmo não significativo, foi o Fe. Mesmo sendo um elemento essencial para a manutenção das atividades metabólicas, como a respiração e o transporte dos nutrientes, o aumento nas concentrações de Fe no organismo é potencialmente tóxico, podendo levar à hematoxiderose e à hemocromatose, prejudicando também o funcionamento do fígado e rins.

O rastreamento remoto das aves marinhas que utilizam a foz do Rio Doce e adjacências indica uma continuidade no uso da região, dependendo da escala espacial que o fenômeno é observado. A contaminação das aves que se reproduzem em Abrolhos não dependeria, exclusivamente, do seu movimento em direção à foz, mas também do movimento das presas em direção ao arquipélago. Os dados do Anexo 3 (Marinho – Ictioplâncton) do presente PMBA demonstram uma alta atividade de desova de peixes entre Abrolhos e a foz do Rio Doce, inclusive das famílias predadas pelas aves marinhas, indicando um desenvolvimento ontogenético em águas contaminadas. Os resultados do monitoramento sugerem que a disponibilidade de alimento para as aves na região foi mantida, ao menos parcialmente, o que explicaria a continuada utilização da região para alimentação com ligeiras alterações no nicho isotópico entre os períodos pré e pós rompimento. No entanto, esses dados apontam para um maior impacto em médio e longo prazo, pois as malformações em larvas de peixes podem comprometer os estoques, e a continuada exposição aos contaminantes pode comprometer as populações de aves marinhas.

Impactos na diversidade genética das espécies de tartarugas demonstram que, além do fato delas terem sido sofrido declínio populacional recente podem refletir em uma maior dificuldade em se

manter geneticamente saudáveis para lidar com os efeitos recorrentes e a longo prazo impostos pelo rompimento da barragem de Fundão. Além das ameaças à diversidade genética ainda foram detectadas efeitos sobre a saúde e nos padrões reprodutivos, que podem interferir ainda mais na capacidade de resiliência das mesmas.

Diversas correlações foram encontradas entre os metais pesados e os dados reprodutivos indicando que os metais estão influenciando no sucesso de incubação e eclosão e no tempo de incubação dos ovos na área de influência direta dos rejeitos de mineração, na praia de Povoação. Esse aumento de metais pesados nos ovos, perdas de ninhos bem como redução da taxa de eclosão, podem interferir diretamente no tamanho populacional ( $N$ ) e no tamanho populacional efetivo ( $N_e$ ) das populações.

As populações de tartarugas marinhas (*C. mydas*, *D. coriacea* e *C. caretta*) avaliadas apresentam baixa diversidade genética independentemente do período ou local coletado, o que significa que são indivíduos com menor resiliência e capacidade de lidar com impactos antrópicos, como é o caso do rompimento da barragem de Fundão. Isso se reflete nas evidências de comprometimento da saúde das tartarugas nas áreas impactadas como foi observado tanto para *C. caretta*, quanto para *C. mydas*. A situação para *D. coriacea* é ainda mais delicada. Além de ser uma espécie criticamente ameaçada de extinção, pouquíssimo abundante e possuir na Foz do Rio Doce a única localidade regular de desova no Brasil, ela possui os menores índices de diversidade para marcadores biparentais encontrados para espécie na literatura. Aliado a isso, mudanças no perfil praiar, condições climáticas e outros fatores estocásticos comprometem ainda mais a sobrevivência do pool reprodutivo de tartarugas cabeçudas e gigantes do Espírito Santo, a longo prazo. A presença periódica dos rejeitos remobilizados pelas condições oceanográficas e hidrológicas, conforme relatado pelo Anexo 3 (RRDM, 2019, RT23), expõem constantemente as tartarugas verdes da APA Costa das Algas aos metais pesados característicos do rejeito, bem como a outros contaminantes mobilizados pelo seu fluxo, sendo este um dos fatores que, juntamente com os aspectos inerentes a biologia da espécie na fase juvenil, tornam a região estudada um *hotspot* de ameaças à conservação.

Quanto ao uso do hábitat da megafauna costeira nas áreas mais impactadas pela lama de rejeito (até 3 km da costa), a comparação dos resultados de monitoramentos bioacústicos e sobrevoos tripulados mostrou que entre 2019 e 2020 a população remanescente da toninha (*Pontoporia brainvillei*) da área de manejo FMA I concentrou-se ao sul da foz do Rio Doce.

O monitoramento com drones mostra a condição do ambiente e da megafauna marinha em áreas mais atingidas pela lama do desastre de Mariana e reforça essa hipótese devido ao aumento gradual dos índices de avistagens ao longo dos trimestres desde o início da amostragem. Isso indica uma maior dependência da população remanescente da espécie já altamente ameaçada de uma pequena área dentro da região mais impactada pela lama de rejeito. Embora a proporção de juvenis seja relativamente pequena (entre 9 e 14%), verificou-se que quase a totalidade dos indivíduos encontra-se em atividade de alimentação, indicando que biomassa derivada da absorção de elementos derivados da lama de rejeito na cadeia alimentar está sendo incorporada na população.

Para a abundância da megafauna costeira na plataforma continental do ES, incluindo as áreas mais impactadas pela lama de rejeito, foram confirmados as maiores concentrações da biomassa da megafauna (cetáceos, aves e quelônios) nos três “hotspots” identificados em resultados apresentados anteriormente a saber: 1) área costeira da foz do Rio Doce e cerca de 30 km ao sul desta (aves e cetáceos), 2) áreas recifais costeiras e de plataforma continental da APA Costa das Algas (quelônios), 3) plataforma continental norte do Espírito Santo associada provavelmente à área dos Recifes Esquecidos (quelônios). Ressalta-se que as maiores concentrações da megafauna se encontram próximos ou dentro das áreas mais impactadas pela lama de rejeito.

Os estudos ecotoxicológicos apresentam respostas espaciais e sazonais similares às variações de parâmetros abióticos na coluna d’água com possíveis efeitos deletérios, que por sua vez estão associados, principalmente, aos setores onde há a presença do sinal do rejeito de mineração nos depósitos sedimentares. Setores como a Foz do Rio Doce, APA/REVIS e Norte, destacando a região de Degredo, corroboram com esta expectativa apresentando os maiores níveis de bioacumulação e valores de IBR. O efeito sazonal está associado ao regime de chuvas, vazão do Rio Doce e fluxo de sedimento, influenciando na variação espacial da concentração de metais na biota em diferentes níveis tróficos do ambiente marinho. Com relação à concentração de metais na biota, os níveis de Fe nos organismos base da cadeia trófica (plâncton) continuam elevados em relação aos dados pretéritos ao rompimento. Outros elementos, como As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn e Pb, ainda são encontrados em níveis elevados no zooplâncton.

O relativo curto ciclo de vida e os altos níveis de metais acumulados no zooplâncton no presente monitoramento, em comparação com valores pretéritos à chegada dos rejeitos de mineração no ambiente marinho, sugerem biodisponibilização constante na região marinha, sendo acumulados por difusão através da água e/ou pelo alimento, ou mesmo pela ligação/aderência de partículas com metais nas paredes das células/superfície externa. Tal observação e relação com as áreas mais impactadas pelas variações nas concentrações de metais também são observadas em níveis tróficos superiores, onde os resultados de bioacumulação de metais em camarões também indicaram uma forte associação com os elementos característicos do rejeito, nas mesmas três regiões destacadas para o plâncton (APA/REVIS, Foz e Norte).

Os peixes, de ambas guildas tróficas (onívoros e carnívoros), coletados ao longo do presente monitoramento, também apresentaram níveis elevados de metais quando comparados à resultados de antes da chegada do rejeito na foz do Rio Doce, principalmente para Cd, Cr, Cu, Fe e Mn.

Os maiores valores de IBR biomarcador foram observados nos setores Foz e Norte, sendo possível observar uma nítida tendência de aumento dos efeitos biológicos para a comunidade planctônica no sentido Sul → Norte, sendo os setores Foz e Norte os mais impactados, corroborando os resultados do IBR bioacumulação que também apontam os setores Foz e Norte como os mais impactados. Entretanto, de maneira similar ao plâncton, o IBR biomarcador nos camarões indicou uma diminuição temporal nos níveis de efeito biológico, com menores valores associados ao Período de Transição em

comparação ao Ano 1, apesar deste grupo ter apresentado um padrão espaço-temporal um pouco mais difuso que o padrão observado para o plâncton.

No que diz respeito à análise da microbiota da água e do sedimento na foz do Rio Doce e região marinha adjacente, foram encontradas alterações na água do mar relacionadas às alterações na água do Rio Doce durante a campanha 4 (jan/fev 2020). O gênero bacteriano *Acinetobacter*, que aumentou drasticamente sua abundância nas águas do Rio Doce durante a campanha 4 (jan/fev 2020) (ver Anexo 1 – Ambiente Dulcícola), seguindo o aumento na concentração de metais na água, também aumentou drasticamente na água do mar. Estes resultados demonstram que alterações na água do Rio Doce ligadas ao rompimento da barragem de Fundão, mesmo anos após o desastre, continuam afetando a microbiota marinha, inclusive em áreas de proteção e conservação ambiental, onde *Acinetobacter* foi encontrado em grande abundância inclusive na APA Costa das Algas e no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. Alterações na qualidade da água de grandes rios estão diretamente ligadas a alterações na microbiota da região marinha adjacente, que são de suma importância nos ciclos biogeoquímicos, produção primária, degradação de compostos orgânicos e na ciclagem de nutrientes. Ou seja, a saúde do ambiente marinho depende da saúde dos rios.

As alterações na água do Rio Doce observadas durante a campanha 4 (jan/fev 2020) parecem afetar de forma drástica também a comunidade bacteriana associada aos corais, visto que ocorreu um aumento na concentração das bactérias mais abundantes no Rio Doce (hgcl clade, *Anaerolineaceae*, *Pirellulacea*, *Exiguobacterium* e *Acinetobacter*) nos corais de Abrolhos. Estes resultados revelam que o rompimento da barragem de Fundão está afetando a saúde dos corais do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos mesmo anos após o rompimento da barragem, sendo que após períodos de elevada pluviosidade o impacto pode ser ainda maior.

#### 4 REFERÊNCIAS

APLYSIA SOLUÇÕES AMBIENTAIS. **Monitoramento Ambiental dos efeitos da pluma de turbidez sobre o ecossistema de praia (REBIO COMBOIOS)**. Relatório técnico nº 1763/2016, rev.1, 2016

COSTA, E. S.; SÁ, F.; SILVA, C. A.; LERHBACK, B. D.; NETO, R. R. Monitoramento hidrogeoquímico da foz do rio doce: metais: total, dissolvido, material particulado em suspensão e sedimentos superficiais. In: BASTOS, A. C. (Co). **Monitoramento da Influência da Pluma do Rio Doce após o rompimento da Barragem de Rejeitos em Mariana/MG – novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados**. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil, p.121-163, 2017.

LACTEC – Instituto LACTEC. **Caracterização parcial do rejeito de mineração do Complexo de Germano**. Relatório técnico - Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce. 965p. 2018.

PEREIRA, A. A., VAN HATTUM, B., BROUWER, A., van BODEGOM, P. M., REZENDE, C. E., SALOMONS, W. **Effects of iron-ore mining and processing on metal bioavailability in a tropical coastal lagoon**. J. Soil Sediment 8, 239-252, 2008.