



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA
INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Nota Técnica nº 50/2025/TAMAR-Vitoria- ES/DIBIO/ICMBio

Vitória-ES, 06 outubro de 2025

Assunto: Análise do 5º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente – PMBA/ES.

1. DESTINATÁRIO

1.1. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima - MMA

2. INTERESSADO

2.1. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA;

2.2. Instituto Estadual de Florestas - IEF;

2.3. Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - IEMA;

2.4. Instituto Chico Mendes de Conservação e Biodiversidade - ICMBio;

2.5. Ministério Público Estadual e Federal;

2.6. Atingidos pelo desastre da SAMARCO;

2.7. Assessoria Técnica Independente (ATI ASPERQD).

3. REFERÊNCIA

3.1 Dando Continuidade no Histórico do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática - PMBA, na porção capixaba:

18/10/2023 - Ofício Fundação Renova FR.2023.2591 (SEI 16501946) - Referente a Nova Proposta de Monitoramento da Biodiversidade Aquática de acordo com o item 2 da Deliberação CIF nº 726/2023 - Cláusula 165 do TTAC.

22/12/2023 - Ofício SEI nº 74/2023/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 17190026) - Solicitação de manifestação da Fundação Renova em relação a Carta dos Coordenadores da Chamada 10/2018 enviada por e-mail em 14 de dezembro de 2023.

04/01/2024 - Ofício Renova FR.2024.0002 (SEI 17502709) - Resposta ao Ofício nº 74/2023/CTBio/DIBIO/ICMBio - Manifestação da Fundação Renova em relação à Carta dos Coordenadores da Chamada FAPEMIG 10/2018.

10/01/2024 - Relatório N° 9/2023 - CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 17376510) - Relatórios de Campo - Vistorias do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática.

19/01/2024 - Nota Técnica nº 2/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 17573643) - Análise do 4º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I - Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira.

19/01/2024 - Nota Técnica nº 3/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 17576867) - Análise Plano de Trabalho de metilmercúrio em Minas Gerais – Deliberação CIF nº 727/2023.

22/01/2024 - Ofício SEI nº 4/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 17595073) - Encaminhamento de Nota Técnica nº 3/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio.

22/01/2024 - Ofício Renova FR.2024.0173 (SEI 17591737) - Plano de Trabalho da Nova Fase do Monitoramento da Biodiversidade Aquática na Região Dulcícola, Costeira e Marinha do Espírito Santo.

23/01/2024 - Ofício SEI Nº2/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 17590741) - Encaminhamento da Nota Técnica nº 2/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio.

04/03/2024 - Ofício Renova FR.2024.0600 - Resposta à Nota Técnica CTBio nº 2/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio de Avaliação do 4º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I - Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira (PMBA/FEST) e Solicitação de dilação de prazo para entrega do 5º Relatório anual e realização de Workshop de apresentação.

04/03/2024 - Informação Técnica nº 1/2024-CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 19106967) - Potenciais impactos na área do sul da Bahia relacionados ao rompimento da barragem de Fundão - Referência: Despacho nº 144982762022IF-GABIN de 23 de dezembro de 2023; Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática - PMBA.

19/03/2024 - Ofício SEI Nº12/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18109683) - Resposta ao ofício FR.2024.0600.

21/03/2024 - OFÍCIO n. 00028/2024/IAJ-CONT/IAJ-CIF/AGU (SEI 18213683) - Cumprimento de sentença - Desastre Mariana – Solicita o CIF manifestação quanto ao requerimento da Fundação Renova.

25/03/2024 - Ofício FEST (SEI 18307787) - Atualização de resposta à Nota Técnica nº 2/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio, de avaliação do 4º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I - Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira (PMBA/Fest) - RT43.

01/04/2024 - Ofício SEI Nº13/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18213687) - Resposta ao OFÍCIO n. 00028/2024/IAJ-CONT/IAJ-CIF/AGU.

01/04/2024 - Ofício Renova FR.2024.0858 (SEI 18307787) - Manifestação referente à Análise do 4º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I - Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira.

02/04/2024 - Ofício COTA n. 00029/2024/IAJ-CONT/IAJ-CIF/AGU (SEI 18301261) - Solicitação de esclarecimento da Câmara Técnica sobre a última devolutiva da Fundação Renova, referente a discussão sobre novo plano de monitoramento.

04/04/2024 - Ofício SEI Nº14/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18230755) - Análise do documento com versão preliminar do PAI Biodiversidade Aquática.

04/04/2024 - OFÍCIO SEI Nº15/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio(SEI 18245641) - Resposta ao ofício FR.2024.0600 - Após análise do documento CE SUP 039/2024 e consequentes discussões técnicas durante sua 3ª Reunião Extraordinária que ocorreu no dia 02 de abril de 2024, através do Microsoft teams, a CTBio manterá o posicionamento da Nota Técnica nº 2/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio frente ao Comitê Interfederativo - CIF.

05/04/2024 - [Deliberação nº 778](#) - Notifica a Fundação Renova pelo

descumprimento parcial do modelo de otimização do Relatório e do Plano de Trabalho aprovados pela CTBio, conforme Nota Técnica nº 2/2024/CTBio/DIBIO/GABIN, referente à análise do 4º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente.

09/04/2024 - Ofício SEI N°16/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18286405) - Novo escopo do PMBA.

17/04/2024 - Ofício Renova FR.2024.1008 (SEI 18384691) - Revisão da proposta de escopo metodológico para Nova Fase do Monitoramento da Biodiversidade Aquática de Acordo com o Item 2 da Deliberação CIF nº 726/2023 - Cláusula 165 do TTAC.

19/04/2024 - Ofício FEST CE SUP 061/2024 - Anexo 1 do Ofício FR.2024.1030 - Referente a solicitação de dilação complementar de prazo para entrega de Relatório Anual.

23/04/2024 - Ofício Renova FR.2024.1030 - Solicitação de dilação complementar de prazo para entrega de relatório anual e workshop.

30/04/2024 - Ofício SEI N°19/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18496197) - Resposta ao ofício FR.2024.0858 sobre a Manifestação referente à Análise do 4º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I - Informa que deve ser considerada a Deliberação nº 778/2024 do CIF.

30/04/2024 - Ofício SEI N°21/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18496437) - Resposta ao ofício FR.2024.1030 - Solicitação de Dilação Complementar de Prazo do 5º RA e Workshop_CL165 PMBA-ES.

03/05/2024 - Ofício SEI N°20/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18496329) - Resposta ao ofício FR.2024.1008 referente apresentação da revisão da proposta de escopo metodológico para a nova fase do monitoramento da biodiversidade aquática na porção capixaba na bacia do rio Doce e zona costeiro - marinha.

08/05/2024 - Ofício Renova FR.2024.1189 (SEI 18575171) - Resposta ao Ofício SEI nº 20/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio referente à proposta de escopo para a Nova Fase do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Porção Capixaba do Rio Doce e Região Costeira e Marinha Adjacente.

13/05/2024 - Ofício n. 00058/2024/IAJ-CONT/IAJ-CIF/AGU (SEI 18705743) - Solicitação de esclarecimento referente ao encerramento da análise e aprovação do novo escopo de monitoramento da biodiversidade aquática (Novo PMBA).

21/05/2024 - Nota Técnica nº 6/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18697959) - Andamento dos estudos pertencentes ao Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática no estado de Minas Gerais, Cláusula 165 do TTAC, e correções necessárias.

21/05/2024 - Ofício SEI N°31/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18702701) - Encaminhamento da Nota Técnica nº 6/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio.

27/05/2024 - Ofício SEI N°32/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18757943) - Encaminhamento do Plano de Trabalho de novo PMBA (SEI 18757931).

19/06/2024 - Ofício SEI N°34/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18804917) - Premissas para o seminário de 5 anos de monitoramento do PMBA/Fest.

19/06/2024 - Ofício SEI N°36/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18967727) - Solicitação de esclarecimentos à Renova e à FEST referente aos Laboratórios Acreditados.

20/06/2024 - Ofício SEI N°37/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 18986797) - Análise das ações para a região deltaica e planície costeira do baixo rio Doce, em atendimento a Deliberação CIF nº 740/2023.

03/07/2024 - Ofício SEI N°41/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio (SEI 19095113) - Aprovação do Plano de Trabalho da nova fase do Monitoramento da Biodiversidade Aquática nas regiões dulcícola, costeira e marinha do Espírito Santo. Documentos: Ofício nº 32/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio; Plano de Trabalho novo PMBA; e Minuta de Deliberação.

10/07/2024 - [Deliberação CIF ad Referendum nº 2](#) - Aprova o plano de trabalho: Nova fase do monitoramento da biodiversidade aquática nas regiões dulcícola, costeira e marinha do Espírito Santo.

11/07/2024 - Ofício FR.2024.1725, apresentação do 5º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente – PMBA/ES – CI 165.

25/10/2024 - Assinatura do Acordo de Repactuação.

06/11/2024 - Homologação do Acordo de Repactuação.

3.2 Bibliografia

Barraza AD, Young L, Smith CE, Booth DT, Hof CAM, Finlayson KA, Leusch FDL and van de Merwe JP (2023). Exploring contaminants as a disruptor of temperature-dependent sex determination in sea turtle hatchlings. *Front. Mar. Sci.* 10:1238837. doi: 10.3389/fmars.2023.1238837.

BAUER, A. B.; LINHARES, B. A.; NUNES, G. T.; COSTA, P. G.; ZEBRAL, Y. D.; BIANCHINI, A.; BUGONI, L. Temporal changes in metal and arsenic concentrations in blood and feather of tropical seabirds in the area impacted by one of the largest environmental disaster associated with mining. *Environmental Research*, v. 248, 118240, 2024.

BEARHOP, S., RUXTON, G. D., & FURNESS, R. W. Dynamics of mercury in blood and feathers of great skuas. *Environmental Toxicology and Chemistry: an International Journal*, v. 19, p. 1638–1643, 2000.

DEL HOYO, J.; HELLIOU A.; SARGATAL, J. Handbook of the birds of the world. Vol. 3. Hoatzin to Auks. Barcelona: Linx Edicions, 1996.

SARMENTO, R.; BRITO, D.; LADLE, R. M.; LEAL, G. R.; EFE, M. A. Invasive house (Rattus rattus) and brown rats (Rattus norvegicus) threaten the viability of red-billed tropicbird (Phaethon aethereus) in Abrolhos National Park, Brazil. *Tropical Conservation Science*, v.7, p. 614–627, 2014.

SICK, H. Ornitologia Brasileira. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 2001.

GUARI, E. B. Bioacumulação de mercúrio total (HgT) em tecidos de toninha, Pontoporia blainvillei, (Gervais & D Orbigny, 1844), no litoral de São Paulo e Rio Grande do Sul Brasil. Dissertação (Mestrado em Caracterização, Diagnóstico e Evolução de Ambientes Marinhos) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CORRÊA, C. de A. C. Compostos organoclorados em golfinho-rotador (Stenella longirostris Gray, 1828) da plataforma externa e talude continental das regiões sudeste e sul do Brasil. 2021. 98 f. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

NARA, P. A.; SECCHI, E. R.; CUNHA, H. A. Divergence, diagnosability, and description of a new subspecies of franciscana dolphin Pontoporia blainvillei (Gervais & d'Orbigny, 1844). *Journal of Mammalian Evolution*, v. 31, n. 3, p. 1–16, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10914-024-09718-3>.

4. FUNDAMENTAÇÃO/ANÁLISE TÉCNICA/PARECER

4.1. Objetivos

A presente Nota Técnica tem por finalidade apresentar ao Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima - MMA e aos órgãos ambientais estaduais, a avaliação do 5º Relatório Anual (RA2023 RT46) do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I - Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira Adjacente (PMBA/FEST), e entregue pela Fundação Renova em 28 de junho de 2024 - FR.2024.1725.

Esta avaliação traz principalmente:

- Verificação da aderência dos dados apresentados no Relatório Anual com o Plano de Trabalho da Fundação Espírito-Santense de Tecnologia - FEST (2022) para o PMBA, com o objetivo de identificar os direcionamentos quanto aos impactos do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana/MG na biodiversidade aquática e seus habitats estudados.

4.2. Analistas colaboradores:

Nome	Instituição
Adelino da Silva Ribeiro Neto	IEMA
Ana Kelly Simões Rocha	IEMA
Andreia Quandt Monteiro	ICMBio
Antônio de Pádua Leite Serra de Almeida	ICMBio
Cezar Neubert Gonçalves	ICMBio
Damiani Paolo Gomes Rocha	ATI ASPERQD - Degredo
Daniel Correia de Freitas	ICMBio
Eduardo Sosti Perini	IEMA
Emilia Brito	IEMA
Gabriel de Moura Schreiner	IBAMA
Gabriella Tiradentes Pizetta	ICMBio
Giulia Burle Costa	Pesquisadora voluntária Doutora em Ecologia e especialista em Ecotoxicologia
Hermes José Daros Filho	IEMA
Humberto Cotta Junior	IBAMA
João Alvarez de Sá	IBAMA
João Carlos Alciati Thomé	ICMBio
Juliana Lopes Segadilha	IBAMA
Juliano De Oliveira Barbirato	IEMA
Larissa Novaes Simões Bueno	IEMA
Ludimila Zotele Azeredo	IEMA
Luiz Francisco Ditzel Faraco	ICMBio
Marcelo Lourenço	ICMBio
Maria Regina Goncalves Souza Soranna	ICMBio
Marília das Graças Mesquita Repinaldo	ICMBio
Mônica Magalhães Barbosa	IBAMA
Mônica Maria Vaz	ICMBio

Patrick Calatroni Hemaidam	IEMA
Priscilla Nobres	Secretaria de Meio Ambiente de Aracruz
Roberto Cavalcanti Barbosa Filho	ICMBio
Roberto Sforza	ICMBio
Selma Samiko Miyazaki	ICMBio

4.3. Aderência ao Novo Plano de trabalho (2022)

O status de cumprimento quanto ao Novo Plano de Trabalho, ao histórico de ajustes do TR4, Plano de Trabalho da Rede Rio Doce Mar, Nota Técnica nº 15/2020/CTBio/DIBIO/GABIN, Nota Técnica nº 08/2022/CTBio/DIBIO/GABIN, Nota Técnica nº 5/2023/CTBio/DIBIO/ICMBio e suas modificações ao longo do processo, segue em planilhas Excel anexadas a esta Nota Técnica.

No âmbito dos ambientes analisados:

- Ambiente Dulcícola;
- Ambiente Marinho, e
- Ambiente Costeiro.

A aderência foi analisada em relação a malha amostral, periodicidade, metodologia e resultados, classificando-os em cumprido, não cumprido ou cumprido parcialmente, com uma breve justificativa.

A seguir apresenta-se análise técnica quanto à evolução ao longo dos resultados apresentados, pontuando-se destaques no entendimento e avaliação dos impactos e tendências observados através do monitoramento vigente.

4.4. Análises, Considerações, Conclusões e Proposições, quanto ao conteúdo do 5º Relatório Técnico

4.4.1 AMBIENTE DULCÍCOLA

4.4.1.1 Avaliação de Impactos Ambientais e Identificação de Tendências nos Parâmetros monitorados

a) Ecotoxicologia

Ao longo do monitoramento, houve a evidência da relação entre as condições climáticas-meteorológicas com os efeitos sobre a biota. Durante os períodos chuvosos há a remobilização de elementos Metálicos e As, com maior disponibilização para os processos biológicos. Já os períodos secos, com deposição do rejeito, apresentam melhoras nos índices ecológicos em diferentes assembleias monitoradas. As tendências de contaminação mostram um padrão cíclico e integrado, a partir do plâncton aos níveis tróficos superiores. O plâncton apresentou

as maiores alterações na estrutura da comunidade no começo do monitoramento, havendo uma estabilização nas últimas campanhas, embora com elevados índices de acumulação de elementos contaminantes, comparativamente aos valores pretéritos ao rompimento. Na cadeia trófica, a acumulação no músculo dos principais pescados - camarões e peixes - mostra um contínuo acréscimo ao longo da série temporal. Na última campanha realizada, foram registrados os maiores valores históricos de acumulação nos camarões, particularmente nos ambientes de lagoas e próximos à Foz do Rio Doce. Também se observa, com as alterações em marcadores biológicos, que o fitness da carcinofauna encontra-se comprometido, podendo ocorrer danos representativos na abundância da assembleia quando da ocorrência de perturbações simultâneas. Por sua vez, a guilda dos peixes - carnívoros e onívoros/herbívoros - segue a mesma tendência dos camarões. Há uma progressão temporal no acúmulo de Metais e As no músculo dos peixes, sendo as espécies nativas as mais afetadas. De acordo com os relatórios pretéritos, é justamente a guilda dos peixes que apresenta uma maior variabilidade espaço-temporal na estrutura da comunidade, com grande perda de espécies nativas e domínio de espécies exóticas. Isto se deve, como observado, às mudanças nos padrões de biomarcadores, os quais ainda apresentam alterações significativas que implicam em perda do fitness e na resiliência das espécies em ambientes alterados. Da mesma forma, a comunidade microbiana ainda mostra a predominância de táxons relacionados com perturbação ambiental por elementos metálicos. Estes grupos demonstram que a matriz do sedimento ainda se encontra com potencial para remobilização destes elementos na cadeia trófica, o que também é percebido pela contínua toxicidade observada nos testes realizados em laboratório. Assim, os principais pontos a serem destacados do anexo são:

- A contínua contaminação do ambiente dulcícola, com aporte ou ressuspensão do rejeito da calha do Rio Doce e fundo de lagoas;
- A remobilização de elementos metálicos ainda tem expressivo impacto sobre a comunidade biológica, com seus efeitos sendo observados ao longo da cadeia;
- O plâncton ainda apresenta elevados níveis de contaminação, comparativamente a níveis pretéritos;
- A carcinofauna apresenta níveis elevados de diferentes elementos, onde aqueles relacionados com o rejeito (Fe, Mn e Al) são observados em inconformidade aos níveis pretéritos, afetando assim, os índices dos marcadores biológicos;
- Tanto os peixes carnívoros quanto onívoros/herbívoros são altamente impactados pelo efeito do rejeito, tanto pela elevada concentração de elementos nos músculos, como pelo impacto nos biomarcadores. A perda de diversidade e desestruturação da comunidade são efeitos diretos da contaminação e redução do fitness das espécies.

b) Integração Fluvio-estuarina

Para o estudo da integração fluviomarinha foram utilizadas estações amostrais tanto de séries históricas longas quanto com dados diários recentes, tendo como banco de dados ANA, IGAM, CPRM, Incaper e INMET, totalizando 90 estações com mais de 30 anos de série e 122 estações telemétricas com dados diários.

Para além de dados de precipitação, foram também analisados dados sedimentométricos. Segundo o próprio relatório, em seu Material Suplementar sobre

o tema, *“a inclusão de dados de sedimentos em suspensão é crucial na modelagem, pois viabiliza a avaliação dos resultados obtidos, principalmente para calibração e validação do modelo matemático, assim como para ajuste de ressuspensão do rejeito depositado no leito do rio Doce”*. Buscando integração com dados gerados no extinto sistema CIF, foram utilizados dados de 26 estações amostrais do PMQQS, para sólidos suspensos totais e vazão, quando estes eram monitorados no mesmo dia. Os efeitos hidráulicos dos reservatórios presentes no trecho do rio Doce estudado foram também considerados na modelagem hidrossedimentológica.

Para a caracterização e análise das interrelações envolvendo ações na bacia no que tange a qualidade e quantidade da água e da biodiversidade aquática, foram observados os documentos que traziam lastros sobre avanços quanto a saneamento básico (eixo esgotamento sanitário), recuperação de APPs, proteção e recuperação de nascentes, reflorestamento e o manejo (no caso, a falta dele) de rejeitos nos reservatórios.

As campanhas amostrais para hidrologia e transporte de sedimentos foram feitas com o auxílio de um ADCP-River Ray, com o método de Integração Vertical. Também foram coletadas amostras de sedimentos de fundo, com o uso de uma draga, com o objetivo de identificação da distribuição granulométricas dos materiais de leito.

A modelagem matemática para produção de água foi realizada com o SWAT, usando modelos digitais de elevação disponibilizados pela ANA. Os dados foram rodados para os anos de 2004 a 2013 resultando em um coeficiente de NS de 0,75. Para validação e simulação, a simulação foi feita para o período de out/2018 a mar/2020. Para produção de sedimentos o modelo utilizado foi o MGB-SED.

Para o presente relatório, foram incluídas informações referentes a modelagem hidrossedimentológica para caracterização da geração e transporte de sedimentos da bacia do rio Doce. São elas: fonte dos dados coletados; descrição do modelo; criação do indicador de geração e transporte de sedimentos; modelagem da qualidade da água, incluindo informações de produção de esgoto, parâmetros hidráulicos e hidrológicos e; o detalhamento dos procedimentos metodológicos;

De acordo com os indicadores apresentados, os maiores produtores de sedimentos na bacia do rio Doce se alternaram ao longo do período analisados, destacando a influência direta nas intensidades e quantidades da precipitação para estes resultados. O Ano 1 foi o menos chuvoso, enquanto o Ano 4, têm-se registros de chuva acima da média histórica. Assim, temos:

- Ano 1 (2018/19): rio Piranga e rio do Carmo;
- Ano 2 (2019/2020): rio Santo Antônio e rio do Carmo;
- Ano 3 (2020/2021): rio Piranga e rio Santa Maria do Doce;
- Ano 4 (2021/2022): rio Piranga e rio do Carmo;
- Ano 5 (2022/2023): rio Suaçuí Pequeno e rio Santo Antônio

Nos reservatórios, é importante destacar que *“nas semanas que antecederam as campanhas de monitoramento, os tempos de detenção variaram de 0,8 a mais de 16 dias”*, reforçando as condições diferenciadas da bacia do Doce.

De acordo com o descrito no relatório, *“a sazonalidade hidrológica influenciou de forma significativa a geração de sedimentos na bacia do rio Doce, com contribuição média nos períodos chuvosos dos 5 anos de PMBA/Fest superior a 26,8 t/mês.km², equivalente a 2,22x10⁶ t/mês de sedimentos. Entre os anos do PMBA/Fest se destaca o período chuvoso do Ano 4 (out/21 a mar/22) com maior média na geração*

de sedimentos, de 44,61 t/mês.km², equivalente a 3,69x10⁹ t/mês de sedimentos". O relatório ainda estimou que a geração média entre os períodos secos na bacia foi de 1,51 t/mês.km². "Entre os tributários do rio Doce que mais transportam sedimentos encontram-se trechos no rio Piracicaba, Caratinga, Suaçuí Grande e Guandu. Porém, existe uma **elevada descarga sólida na bacia do rio do Carmo, associada à ressuspensão do rejeito e à sua alta geração de sedimentos**, que *"foram responsáveis pela descarga de aproximadamente 80 t/mês.km² no período chuvoso do Ano 4"*.

O relatório é claro em apresentar a influência negativa da presença dos rejeitos provenientes do rompimento da barragem de Fundão no transporte de sedimentos oriundos da bacia do rio Carmo, destacando o **"maior aumento de transporte de sedimentos em suspensão no período de cheias, quando comparados a resultados no cenário em que o rompimento é desconsiderado"**.

Ainda, foram comparados os percentuais de elevação de descarga sólida em suspensão devido a ressuspensão do rejeito por trecho do PMR (Plano de Manejo de Rejeitos). **"Os percentuais foram obtidos comparando os resultados da simulação que considera a ressuspensão do trecho proveniente do rompimento da barragem de Fundão, com os resultados da simulação que desconsidera o rompimento. Com base nos resultados segmentados pelos trechos do PMR, as alterações são superiores a 40% no período chuvoso e a 22% nos meses secos, com destaque para o Ano 4"**.

c) Limnologia

A metodologia aplicada segue as diretrizes do Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA), submetidas à Fundação Renova em 2022. Inclui amostragens e análises detalhadas realizadas em ecossistemas fluviais, lacustres e de reservatórios, abrangendo adaptações e melhorias ao longo do monitoramento.

As estações de amostragem incluem:

Rios:

- Rio Doce: Estações ampliadas para cinco (E0a, E0, E21, E26 e E26F), com E0a em Resplendor (MG) como referência pré-represas e E26F próximo à foz, sujeita à intrusão de cunha salina e deposição de sedimentos finos e processos químicos.
- Rio Manhuaçu (E2): Substituiu o Rio Guandu (E17), descontinuado devido a turbidez elevada.
- Monitoramento contínuo em estações estratégicas como Itapina (E0) e Linhares (E21).

Lagos e Lagoas:

- **Lagos:** Nova (E19), Juparanã (E20) e Palmas (E28), com amostragem em três profundidades (subsuperfície, 1% RFA e fundo).
- **Lagoas:** Areal (E24), Monsarás (E25) e Cacimbas (E27), com destaque para substituições como Areão (E23) pela Lagoa Cacimbas.

Reservatórios:

- Aimorés (ERA) e Mascarenhas (ERM), com estações próximas às barragens, respeitando as zonas de segurança.

A coleta de água foi realizada com garrafa de Niskin em sistemas fluviais (horizontal) e lacustres (vertical), em profundidades específicas: subsuperfície, 1% RFA e a um metro do fundo. Para sedimentos, foram utilizadas dragas de Ekman (sedimentos lamosos) e Van Veen (sedimentos arenosos), e os testemunhos de sedimento foram coletados com hammer corer.

Os parâmetros medidos incluíram temperatura, turbidez, transparência (disco de Secchi), pH, condutividade, oxigênio dissolvido e potencial redox.

As amostras foram transportadas em condições controladas para o LimnoLab (UFES), onde foram analisadas para determinar parâmetros físico-químicos e biológicos. Coletas de testemunhos de sedimento (2019) incluíram fatiação em campo para análises de camadas.

A análise das amostras da coluna d'água considerou parâmetros como Material Particulado em Suspensão (MPS), Alcalinidade Total, Clorofila-a, Fósforo Total e Nitrogênio Total, além de nutrientes inorgânicos dissolvidos como silicato, fosfato, nitrato, nitrito e íon amônio, determinados por espectrofotometria.

Para determinar o Índice de Estado Trófico (IET) dos rios e ecossistemas lacustres, foram utilizados os índices para fósforo (IET(PT)) e clorofila-a (IET(CL)), conforme as equações específicas para rios e reservatórios. Os ecossistemas foram classificados de acordo com o Índice de Carlson (1977) modificado, em categorias que variam de ultraoligotrófico a hipereutrófico.

A Resistência Térmica Relativa Integrada (RTRi) dos lagos e lagoas é calculada para classificar o padrão térmico em desestratificado, moderadamente estratificado e fortemente estratificado.

Para calcular o fluxo de nutrientes do Rio Doce, a vazão diária foi medida e os fluxos de nutrientes foram calculados com base nas concentrações de diversos compostos, como Ptotal e Ntotal.

No sedimento, foram determinados parâmetros físicos (densidade, granulometria), fração orgânica e hidroquímicos (fósforo total, fosfato na água intersticial). O Índice de Enriquecimento (IE) foi usado para avaliar a contribuição de cargas de sedimento natural e antrópica.

O relatório afirma que *“As concentrações de MPS e turbidez em todos os ecossistemas apresentaram significativa correlação ($p = 0,94$, Spearman $p < 0,05$)” e foram significativamente maiores durante os períodos chuvosos, especialmente no Rio Doce e seus reservatórios, com valores médios de turbidez superiores ao limite máximo admissível para Classe 2 da Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005 (100 UNT). A estação de Regência (E26) registrou os maiores valores de turbidez (987 UNT) e MPS (776,7 mg/L). E o ponto amostral E26F, localizado em área de remanso próximo da desembocadura do Rio Doce no mar, os valores de MPS e turbidez encontrados sugere a influência das marés com a ressuspensão de sedimentos e aporte de material fluvial depositado na região marinha defrontante a foz do Rio Doce.* O Rio Manhuaçu (E2) apresentou os maiores valores médios e máximos de turbidez (1213,90 UNT). Segundo o Relatório, esse padrão reflete o impacto das altas vazões no transporte de sedimentos. O monitoramento também evidenciou variações anuais, com

aumentos progressivos ao longo dos anos de estudo.

Lagoas

Segundo o Relatório, as lagoas monitoradas, as concentrações de MPS e turbidez não apresentaram diferenças relevantes entre os períodos seco e chuvoso. **No entanto, verificou-se uma variação significativa ao longo dos anos, com tendência de aumento em relação ao primeiro ano de monitoramento. Outra observação é que “..., no geral, os maiores valores de MPS ocorreram nas zonas litorâneas em relação ao meio das lagoas” esse incremento pode reduzir a penetração da luz e limitar a disponibilidade de nutrientes essenciais para os organismos aquáticos, afetando a dinâmica ecológica desses ecossistemas.**

Com relação ao pH, os dados revelaram alterações ao longo dos anos, com redução da alcalinidade e tendência à diminuição dos valores de pH (acidificação), implicando na especiação de metais como Fe e semimetais como As.

O Índice de Resistência Relativa Integrada (RTRi), oxigênio dissolvido (OD) e potencial de oxirredução (ORP) evidenciou valores elevados de RTRi correlacionados com condições hipóxicas e anóxicas no fundo da coluna d'água. Sabe-se que condições redutoras, favorecem a liberação de P, Fe, Al e Mn do sedimento para a coluna d'água.

Os metais alumínio (Al), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni) e cromo (Cr) foram identificados primariamente nos **testemunhos de sedimentos** dos ecossistemas lacustres monitorados. Além de sua concentração nos sedimentos, foi observado que o manganês (Mn), juntamente com fósforo (P), ferro (Fe) e alumínio (Al), podem difundir do sedimento para o **fundo da coluna d'água** sob condições redutoras, como ocorreu nos Lagos Nova (E19) e Limão (E18) durante períodos chuvosos de estratificação térmica. A presença desses elementos nos ecossistemas monitorados pode comprometer a saúde e a sobrevivência das comunidades aquáticas, com impacto mais severo nas **comunidades bentônicas**, que são particularmente sensíveis à contaminação por metais devido ao seu habitat no fundo aquático.

O aumento na concentração de nutrientes e matéria orgânica ao longo do tempo tem resultado em uma redução na qualidade da água. Essa condição também representa um risco para a manutenção da vida aquática, podendo comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas monitorados.

Essa análise reforça a importância de estratégias de gestão integrada para mitigar os impactos identificados e promover a recuperação da qualidade ambiental na área de estudo. O relatório é claro ao concluir que **“por muitos anos após o desastre, é possível identificar pulsos na remobilização e exportações de sedimentos durante eventos de alta vazão (Hatze et al., 2017; Magris et al, 2019; Miller et al, 2023). Nesse caso, por meio do monitoramento do indicador, nota-se aumento do aporte de material particulado em suspensão ao longo de cinco anos de monitoramento”.**

d) Mineralogia

As análises mineralógicas foram realizadas no Material Particulado em Suspensão (MPS) e em sedimentos, observando a difratometria de raios X, suscetibilidade magnética e realizando extrações seletivas de oxihidróxidos de ferro. De acordo com o relatório, *“a localização das estações na foz do rio Doce indica que são potenciais locais para acúmulos de rejeitos de mineração. Além disso, ambientes*

estuarinos naturalmente acumulam oxihidróxidos de ferro, devido a interações entre a água doce e salgada, decomposição da matéria orgânica, processos redox e precipitação de sulfetos de ferro”.

É sabido que durante as estações secas a quantidade de sedimentos que chegam aos rios diminui muito. E essa diferença é importante na bacia do Doce, visto que os solos possuem uma composição mineral com uma porção considerável de caulinita. Ao observar as estações amostrais, a represa de Mascarenhas apresenta os maiores teores médios de caulinita quando comparada com a represa de Aimorés. A Estação da Represa de Aimorés (ERA) expressou *“maior variação nos teores de caulinita ao longo do monitoramento, indicando mudança na entrada de sedimentos, relacionados ou não a estação seca e chuvosa entre 10/23 e 01/24, que acompanhou o aumento sutil de oxihidróxidos de ferro. Essa variação pontual pode estar associada a entradas externas de sedimentos ricos em oxihidróxidos de ferro, oriundos das áreas adjacentes”.* Nos demais períodos monitorados, as estações receberam pouca carga sedimentar rica em oxidróxidos de ferro.

No tocante a suscetibilidade magnética, *“os teores de Fe nas represas expressaram comportamentos similares aos ambientes lacustres e fluviais. Contudo, em ERA, a redução do Fe dissolvido não resultou em aumento da relação Fed/Feo como observado em ERM (Estação Reservatório de Mascarenhas)”.* *“A amplitude dos valores do índice de cristalinidade dos oxihidróxidos de ferro sugere variações nas condições físico-químicas dos ambientes dulcícolas, afetando assim a cristalinidade desses minerais e consequentemente, a dinâmica de sorção e liberação de metais associados”.*

O relatório ainda traz que *“as maiores médias móveis de manganês associados aos oxihidróxidos de ferro cristalinos (Mnd) e pobremente cristalinos (Mno) foram identificados em Regência (E26) e Linhares (E21) durante o período chuvoso 6. A maioria das estações amostrais nos ambientes fluviais, similarmente aos ambientes lacustres, também expressam maiores teores na última estação chuvosa, o que sugere uma mudança das condições ambientais em todo o baixo Doce, que promoveu a liberação do manganês associado. **Essas mudanças podem estar associadas a redução do potencial redox do meio, e consequentemente, do aumento das taxas de dissolução redutiva de oxidróxidos de ferro e manganês. Como consequência, além de ferro e manganês, outros elementos potencialmente tóxicos associados também podem ser liberados, aumentando os níveis de contaminação”.***

O relatório aborda que Camêlo et al (2024) detectaram níveis acima dos aceitáveis para As, Cr e Ni nos rejeitos da barragem de Fundão. Também identificaram que os oxihidróxidos de ferro cristalinos, principalmente goethita, são as fontes destes elementos. E reforçam que ***“apesar de não apresentarem risco imediato devido a sua alta estabilidade, a dissolução destes minerais em ambientes com processos redutivos ativos pode aumentar o risco de contaminação por elementos potencialmente tóxicos, especialmente em crianças”.*** ***“No entanto, as alterações na cristalinidade dos oxihidróxidos de Fe foram consistentemente registradas a partir de agosto/22, quando as concentrações de Feo e Fed foram incluídas no monitoramento do ambiente dulcícola, observando-se níveis preocupantes durante a última estação chuvosa”.***

e) Qualidade de Água e Sedimentos

A malha amostral e a frequência de amostragem variaram ao longo do monitoramento, configurando três ciclos distintos: Ano 1 (set/2018 a set/2019),

Transição (out/2019 a jul/2022) e novo ciclo (ago/2022 até o relatório atual). Apesar do detalhamento apresentado na Figura 21 do documento “*MS_Mapahistóricodamalhaamostral*”, inconsistências entre o mapa e o plano de trabalho dificultaram a identificação precisa dos pontos de análise, especialmente para estudos geoquímicos.

Nas coletas de água, foram adotadas as amostragens de superfície e meio para água em ambientes fluviais, 1% da luz e 1 metro do fundo para lagos; e meio da coluna d'água em lagoas e lagoas. **No que se refere às coletas de sedimentos, o documento “MS_Qualidadedaáguaesedimento” não apresenta informações sobre análises granulométricas, de matéria orgânica e de extração sequencial de fósforo, comprometendo a avaliação completa.** Para a preservação das amostras há ausência de informações sobre a adição de ácido para preservação dos analitos, antes ou após a filtração, o que compromete o entendimento de como foram realizadas as análises dos elementos químicos na fração total e dissolvida.

Os indicadores utilizados incluem o **CWQI** (*Canadian Water Quality Index*) para avaliação de metais e compostos orgânicos dissolvidos em água, analisados separadamente, e o **SQGG** (*Sediment Quality Guideline Quotient*) para metais e compostos orgânicos em sedimentos, também analisados separadamente, conforme descrito no documento “*MS_Qualidadedaáguaesedimento*”. Apenas a legislação **NOAA Crônico** foi considerada para metais dissolvidos no referido documento, enquanto a **CONAMA 357 não foi aplicada, comprometendo a adequação ao contexto da legislação nacional.** Na síntese integrativa, a aplicação do **CWQI** mesclou os parâmetros metálicos e orgânicos, dificultando interpretações detalhadas.

Destaca-se ainda no Material Suplementar do relatório (“*MS_Qualidadedaáguaesedimento*”), que o rio Guandu manteve uma qualidade de água variando entre razoável e boa durante a maior parte do período analisado. É relatado que “os dados mostram que o rio Guandu apresentou uma água variando entre razoável e bom em praticamente todo o período analisado. Já o rio Manhuaçu e os Reservatórios de Aimorés e Mascarenhas apresentaram indicadores acima de 80, indicando água de qualidade melhor. Nos períodos chuvosos estes ambientes tiveram uma queda significativa no indicador e na qualidade da água, provavelmente devido a ressuspensão de minério e/ou entrada de material rico em metais nesses subambientes”.

O relatório traz que ao comparar a qualidade das águas das lagoas e dos lagos, **“vê-se que as lagoas são mais impactadas e com indicadores flutuando do razoável a bom, havendo tendências de queda nos períodos chuvosos dos anos, possivelmente por serem ambientes abertos, com comunicação com os rios. A lagoa Monsarás mostrou ser a mais impactada, com menores índices de CWQI praticamente em toda a extensão do PMBA”.**

O relatório também analisa os dados dos anos 3 e 4, marcados pela pandemia de COVID-19, e aponta melhorias pontuais na qualidade da água em função da redução das atividades agrícolas e industriais, principalmente aquelas relacionadas à geração de PCBs, HPAs e fenóis. É reforçado que **“durante os cinco anos de PMBA destacou-se um comportamento padrão cíclico, ou seja, um aumento substancial dos teores de alguns metais totais importantes, como Fe, Al, V, Mn, Co e Cu nas águas dos rios, em especial na calha do rio Doce e nas lagoas, com o aumento das chuvas. Este aumento do teor de contaminantes foi proporcional ao volume de água da chuva derramada sobre a bacia, sugerindo se tratar de material advindo do rejeito depositado nas margens dos rios, e que provavelmente se refere ao rejeito**

derramado sobre a região com o desastre de Fundão”.

De forma geral, os períodos chuvosos ampliaram os impactos dos dados analisados revelando uma tendência clara de maior impacto na qualidade da água e dos sedimentos, especialmente em ambientes abertos e conectados aos rios, como as lagoas Monsarás e Areal.

f) Fitoplâncton

Os resultados mostraram que, com exceção do Rio Doce, todos os ambientes monitorados apresentaram variações significativas na riqueza taxonômica ao longo do período de monitoramento. Os rios tributários mostraram uma tendência de aumento na riqueza, enquanto os reservatórios apresentaram oscilações, mas uma “leve tendência” de aumento foi observada.

O índice de diversidade de Shannon-Weaver, que considera tanto a riqueza de espécies quanto à equitabilidade entre elas, indicou uma diversidade reduzida (inferior a 3), indicando um ecossistema em estresse, semelhante a relatórios anteriores. Não foram identificadas tendências sazonais claras, sugerindo que a dinâmica da diversidade é mais influenciada por mudanças pontuais nas condições abióticas, como por exemplo, eventos de chuva intensa.

Os indicadores de qualidade da água analisados no Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA/Fest) incluem a densidade do fitoplâncton, a riqueza de espécies, a densidade total de indivíduos, a densidade de células de cianobactérias, a diversidade da comunidade fitoplanctônica (medida pelo índice de diversidade de Shannon-Weaver) e a biomassa, calculada a partir da concentração de clorofila-a.

A densidade de células de cianobactérias apresentou valores excedentes aos limites máximos estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos Classe 2 (20 mil cel./mL), especialmente nos sistemas lacustres.

A densidade de células de cianobactérias constitui um indicador de impacto indireto por permitir avaliar a saúde do ecossistema em decorrência da proliferação de uma ou poucas espécies desta classe de organismos. É conhecido que o grupo das cianobactérias são bastante tolerantes e se desenvolvem bem em ecossistemas impactados, principalmente relacionados à eutrofização (Sperling e Jardim, 2009). Além disso, é um importante indicador relacionado aos possíveis problemas de saúde pública decorrentes do uso da água, devido ao potencial para produção de cianotoxinas (Panosso et al., 2007).

Devido aos baixos valores de diversidade planctônica, os reservatórios foram aqueles com maior grau de estresse, possivelmente em decorrência do represamento de água e do acúmulo de contaminantes. Os lagos apresentaram grau de estresse um pouco mais estável, devido a menor variação na diversidade entre os períodos sazonais.

O registro de padrões sazonais de respostas da comunidade fitoplanctônica em relação à variação ambiental, com efeito da concentração de metais mais acentuado no período de seca, principalmente para o Rio Doce, e ainda, incremento de novas espécies registradas com o aumento do número amostral é um indicativo da necessidade de continuação do monitoramento para consolidar as respostas sobre qual é a real estrutura e dinâmica do fitoplâncton do Baixo Rio Doce, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais.

g) Zooplâncton

Foram registradas 175 espécies de zooplâncton, com Rotífera sendo o grupo mais representativo.

A concentração de metais como Alumínio (Al), Bário (Ba), Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Zinco (Zn), característicos de rejeitos de mineração, foi **maior na coluna d'água** do Rio Doce e em lagoas. Essa alta concentração esteve **diretamente correlacionada a uma menor abundância de zooplâncton** nesses ambientes, indicando um impacto deletério.

O Rio Doce e os rios controles (Rio Guandu e Rio Manhuaçu) estão perdendo traços funcionais ao longo do tempo, sendo difícil prever um cenário de recuperação ambiental. Assim, embora esteja ocorrendo uma elevada troca de espécies e traços funcionais na calha fluvial, há um “*risco ambiental médio*” no cenário de perda de funções ecossistêmicas (Simões et al., 2020). O risco é classificado como médio, pois mesmo diante da simplificação taxonômica e dos traços funcionais, a calha fluvial ainda consegue manter uma elevada diversidade beta (Simões et al., 2020).

O Estudo contemplou a diversidade beta, que pode ser definida como a variação na composição das espécies (abordagem taxonômica) ou dos traços (abordagem funcional, que considera as funções que as espécies desempenham no ambiente) ao longo do espaço ou do tempo. Essas duas abordagens são importantes em estudos de conservação uma vez que podem dar indícios das condições ambientais.

O investimento em reprodução é fundamental para manter as populações de zooplâncton estáveis ao longo do tempo e do espaço (Litchman et al., 2013). **O recrutamento do zooplâncton (aqui mensurado pela densidade e biomassa de formas jovens) do Baixo Rio Doce tem sido bastante reduzido. Como não constatamos nenhum incremento de jovens ao longo do tempo, isso indica que as vias tróficas que estruturam a comunidade ainda não mostram sinais de estabilidade e que o zooplâncton do Baixo Rio Doce permanece vulnerável. Assim, mesmo já tendo se passado nove anos do rompimento da barragem de Fundão, observamos que a comunidade zooplanctônica ainda não mostra sinais de estabilidade e a perda de traços funcionais ao longo dos cinco anos do monitoramento pode resultar na perda de funções ecossistêmicas importantes e alterar outros níveis tróficos do Baixo Rio Doce.**

A periodicidade sazonal no monitoramento contemplando a malha e frequência amostral, através dos mapas das malhas amostrais, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes, como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, deve ser mantida na continuidade do monitoramento do PMBA.

h) Perifíton

Durante os períodos do Ano 1 e de Transição, a amostragem da comunidade perifítica nas estações dos ambientes lóticos (Rio Doce e rio Guandu) foi realizada em ambas as margens. No Novo Ciclo, a amostragem nos ambientes lóticos e reservatórios foi feita em apenas uma margem, devido à similaridade entre as comunidades perifíticas das margens opostas e à determinação das variáveis ambientais apenas na calha do rio. A média dos valores das duas margens foi calculada para representar as variáveis nas estações amostrais, considerando a similaridade entre as comunidades e as condições ambientais da calha do rio, evitando confusões na interpretação dos resultados devido a pequenas diferenças

entre as margens.

A variação temporal na riqueza de espécies da comunidade perifítica pode estar relacionada com mudanças nas condições ambientais em escalas temporais, regionais e locais (tipo de ambiente analisado).

A partir da análise quantitativa foi verificada na curva de rarefação de espécies (ou curva do coletor) que, com a inclusão de novas amostragens, ainda é esperado o registro de novas espécies na Bacia do Baixo Rio Doce, visto que nenhum dos ambientes estudados apresentou tendência à estabilização do número de espécies.

Para o estudo do perifíton foram utilizados dados das coletas desde o Ano 1 (2018 a setembro de 2019), passando pelo Período de Transição (outubro de 2019 a julho de 2022), e os dados do novo ciclo, a partir de 2022. Entre os meses de março e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19.

A malha amostral foi modificada, com a exclusão da estação amostral no Rio Guandu. Originalmente destinada a atuar como ponto de controle, essa estação perdeu sua função devido ao alto grau de impacto observado na área, causado pelo intenso uso e ocupação da sua bacia de drenagem. Embora o Rio Guandu não tenha sido diretamente afetado pelos rejeitos da mineração de ferro provenientes do rompimento da Barragem do Fundão, em Mariana/MG, o comprometimento ambiental da região inviabilizou sua utilização como referência de controle. Como alternativa, o ponto de controle foi substituído pela estação amostral no Rio Manhuaçu.

Outro ponto amostral excluído foi o Lago do Limão, que foi substituído pelo Lago Palmas. Este último é considerado o lago mais profundo do Brasil, o que o torna altamente propenso a uma estratificação térmica duradoura. Essa característica resulta em uma forte estratificação química, aumentando significativamente o tempo de residência dos contaminantes. A escolha pelo Lago Palmas segue a lógica de incluir exemplos extremos na amostragem, abrangendo desde ambientes com pouca troca, como este lago, até ambientes lóticos, além de lagoas e uma laguna, que sofrem influência das marés. Essa abordagem busca representar uma ampla gama de condições ecológicas e hidrodinâmicas.

Foram também incluídos dois reservatórios, Mascarenhas e Aimorés, e um ponto de coleta a montante do reservatório de Aimorés, estes dois últimos localizados no Estado de Minas Gerais, por serem ecossistemas chave no estudo da dinâmica temporal de contaminantes e comunidades biológicas nos ecossistemas localizados no Baixo Rio Doce. O modo de operação dos reservatórios foi também incluído na análise, por interferir na dinâmica.

Houve apenas uma substituição de um ponto amostral localizado em uma lagoa, devido à dificuldade de acesso.

Em ambientes lóticos foram coletadas amostras em uma das margens das estações amostrais. Em ambientes lênticos as coletas foram realizadas na região litorânea de acordo com a disponibilidade de substratos colonizados. Em cada uma das estações foram coletadas, no mínimo, 3 unidades de um tipo de substrato. Dos substratos foram coletados seixos, ou rochas, macrófitas aquáticas fixas, macrófitas aquáticas flutuantes, normalmente as do gênero mais abundante e de mesma idade (do indivíduo ou da parte da planta, evitando folhas senescentes). Todas as amostras foram acondicionadas a baixa temperatura em malas térmicas.

O estudo analisou qualitativa e quantitativamente os parâmetros biológicos e ambientais relacionados às comunidades de algas, com foco em diatomáceas. Na análise qualitativa, foi avaliada a riqueza de espécies e elaborada a curva de rarefação, comparando diferentes grupos funcionais de diatomáceas (de baixo perfil,

móveis e outros grupos de algas). Na análise quantitativa, foram examinadas a dominância, equitabilidade entre espécies, diversidade beta taxonômica e variação funcional das diatomáceas.

A biomassa algal foi estimada pela quantificação de *clorofila a*, extraída com etanol 90%, e o peso seco (PS) e peso seco livre de cinzas (PSRC) foram usados para calcular a proporção de matéria orgânica e mineral.

Os resultados referentes à riqueza e diversidade de espécies foram utilizados como variáveis dependentes em uma análise de regressão linear múltipla, onde as variáveis independentes incluíram a concentração de metais (Al, Ba, Cr, Fe, Mn, V, As, Pb) e variáveis ambientais (temperatura, turbidez, condutividade elétrica, fósforo e nitrogênio total, entre outros).

Os efeitos individuais e compartilhados dessas variáveis preditoras foram analisados por meio de partição de variância, enquanto a multicolinearidade entre os grupos de variáveis foi avaliada. Finalmente, espécies indicadoras foram identificadas para monitorar a qualidade ambiental.

Quanto à riqueza de espécies, *“na análise qualitativa (outubro/2018 a janeiro/2024) foram registrados 1.227 táxons de algas perifíticas, muitos em processo de identificação. O levantamento florístico registrou 25 classes de algas, representadas principalmente por Bacillariophyceae (413 táxons), Zygnematomyceae (270 táxons), Chlorophyceae (167 táxons) e Euglenophyceae (153 táxons)”*.

Segundo o Relatório na análise quantitativa foram registrados 713 táxons, divididos em 23 classes, entretanto *“foi verificada na curva de rarefação de espécies (ou curva do coletor) que, com a inclusão de novas amostragens, ainda é esperado o registro de novas espécies na Bacia do Baixo Rio Doce, visto que nenhum dos ambientes estudados apresentou tendência à estabilização do número de espécies”*.

Na análise da diversidade beta, foi observada uma maior variação na composição de espécies nos rios e nas lagoas, tanto entre as estações quanto entre as campanhas. *“Esses ambientes, juntamente com os lagos, apresentaram os maiores valores de substituição de espécies. Durante o período chuvoso, foi detectada uma maior heterogeneidade da comunidade em todos os ambientes mencionados, indicando uma influência sazonal na substituição de espécies e na composição e estrutura da comunidade, que não se manteve estável ao longo dos anos e áreas estudadas.”*

No Rio Manhuaçu e reservatórios, foi observada uma heterogeneidade na composição de espécies entre o período chuvoso e seco, tal como no Rio Doce.

Na análise temporal do Rio Guandu, houve uma tendência de aumento de riqueza de espécies ao longo dos três anos de monitoramento, embora o maior crescimento tenha sido verificado nos períodos secos. Quanto à diversidade de espécies, o aumento foi menos intenso.

Já no Rio Doce, e similarmente no Rio Manhuaçu e reservatórios, houve uma variação sazonal cíclica de riqueza e diversidade de espécies, com um aumento na época seca, e perda de espécies na época úmida, sem um aumento de espécies ao longo dos anos.

Nos ambientes lênticos houve uma tendência de aumento da riqueza de espécies ao longo do ano, sendo que, nas lagoas esta tendência foi mais acentuada, com maiores valores de riqueza nos períodos chuvosos, ao contrário dos ambientes lóticos. Quanto à diversidade de espécies, nos lagos ela se manteve estável e nas lagoas a diversidade também aumentou.

“Assim, pode-se verificar que a variação temporal na riqueza de espécies da comunidade perifítica pode estar relacionada com mudanças nas condições ambientais em escalas temporais, regionais e locais (tipo de ambiente analisado).”

Quanto à análise do impacto dos metais na diversidade de espécies de algas perifíticas, alguns metais tiveram uma relação significativa, principalmente em ambientes lóticos. Os dois reservatórios e o Rio Manhuaçu (Rio Controle) ficaram fora da análise devido ao *baixo ‘n’ amostral*.

No trecho que analisa a Tabela 2 do *“MS_AD_Perifíton”* podemos encontrar a seguinte frase: *“Os efeitos dos metais foram observados principalmente em relação à riqueza de espécies. O bário total, ferro dissolvido e chumbo total se destacaram por apresentar efeitos negativos sobre as métricas de diversidade nos ambientes lóticos e nas lagoas em um ou ambos os períodos climáticos. Por outro lado, o manganês, o vanádio e o chumbo apresentaram relação positiva com um ou ambos os indicadores analisados nos ambientes lóticos e/ou lênticos.”*. No entanto, ao analisar a Tabela 2 do relatório, a frase não condiz com a informação apresentada na tabela 2 no que diz respeito ao chumbo, trazendo contradição e causando dificuldade na interpretação do dado.

No Rio Guandu, o perifíton mostrou um teor de matéria inorgânica maior do que 60%, e com uma tendência de aumento.

Já no Rio Manhuaçu, a matéria inorgânica tem apresentado valores acima de 50%, menores do que no Rio Doce, mas sem tendência de variação ao longo do tempo. No Rio Doce, assim como nos demais rios, houve maior contribuição de matéria inorgânica, acima de 55%, para a maioria das estações amostrais ao longo dos anos monitorados, e não houve tendência de variação temporal significativa. Os reservatórios demonstraram variações temporais de uma campanha para a outra, mas sem variações na média nos anos de coleta. Já nos lagos e lagoas, houve apenas valores abaixo de 50% de matéria inorgânica para a maioria das campanhas, com tendência significativa de redução ao longo dos anos.

A análise da contribuição de matéria inorgânica na comunidade perifítica revelou que, no Rio Manhuaçu, não houve tendência de variação significativa ao longo do tempo, assim como no Rio Doce, que também não apresentou variação temporal significativa. Os reservatórios mostraram variações temporais entre campanhas, mas sem variações na média nos anos de coleta. Em contraste, nos lagos e lagoas, a maioria das campanhas indicou uma tendência significativa de redução ao longo dos anos. *“O material inorgânico que compõe a massa total perifítica tem, provavelmente, origem alóctone que é incorporada aos corpos d’água por carregamento de material de solos descobertos (detritos inorgânicos). Esses resultados sugerem que partículas inorgânicas aderidas ao perifíton, provenientes da entrada de material inorgânico alóctone nos ambientes lóticos, podem conter elementos prejudiciais à biodiversidade aquática.”* e que *“o acúmulo de material particulado na comunidade perifítica, pode causar sombreamento e redução da biomassa fotossintética (matéria orgânica) (RODRIGUES et al. 2005) e interferir na estrutura da comunidade, principalmente nos ambientes lóticos.”*

As algas diatomáceas foram analisadas também em separado, e foram escolhidas como indicadores biológicos. No perifíton, elas compõem dois grupos funcionais:

- As diatomáceas de baixo perfil (diatomáceas sésseis), vivem aderidas diretamente ao substrato (rochas, seixos ou macrófitas aquáticas);
- As diatomáceas móveis, que se mantêm na matriz perifítica pela sua capacidade de mudar de posição dentro do emaranhado que forma a matriz de perifíton, mas sem aderir diretamente ao substrato.

A contribuição das diatomáceas de baixo perfil, na densidade de microalgas em geral foi baixa, exceto pontualmente, com contribuições acima de 19% no Rio Guandu (anos 1 e 3), Rio Manhuaçu (Ano 4) e lagoas (Ano 3).

Quanto à variação temporal, no Rio Guandu, rio controle nos dois primeiros ciclos, houve um aumento de densidade deste grupo ao longo dos 3 primeiros anos de monitoramento. No Rio Manhuaçu, rio controle no último ciclo, houve uma perda de densidade no período chuvoso, mas sem ser significativa. No Rio Doce, houve uma tendência de aumento da densidade em alguns períodos secos. Os reservatórios, segundo o relatório, seguiram aproximadamente o padrão do Rio Manhuaçu.

Quanto aos lagos, não houve uma tendência de variação temporal significativa, exceto em alguns períodos isolados. As lagoas apenas tiveram uma tendência de aumento da densidade deste grupo nos últimos anos.

As diatomáceas de baixo perfil (sésseis) são adaptadas a ambientes de águas correntes e com menor quantidade de nutrientes. Com uma maior correnteza, há uma maior remoção mecânica deste grupo do substrato, e uma grande quantidade de sedimentos em suspensão, que ao aderirem à matriz perifítica, sombreiam, diminuindo a população de organismos fotossintéticos.

As diatomáceas móveis destacaram-se na densidade de microalgas, sendo mais resistentes às variações sazonais devido à sua capacidade de migração na matriz perifítica. Em períodos chuvosos, deslocam-se para áreas mais estáveis e menos sombreadas; em períodos secos, buscam regiões mais ricas em nutrientes. Essa preferência por ambientes mesotróficos e eutróficos justifica seu aumento em ambientes lânticos e no Rio Guandu, com maior carga de material em suspensão. Essa observação foi confirmada pela análise de partição de variância. Nos ambientes lóticos, as diatomáceas sésseis foram favorecidas nas épocas secas, com menor disponibilidade de nutrientes, maior disponibilidade de luz e a reduzida remoção da matriz perifítica. Por outro lado, as diatomáceas móveis demonstraram maior adaptabilidade ao longo de ambas as estações, aproveitando sua capacidade de mobilidade para explorar e ocupar micro-habitats mais favoráveis, mesmo diante das adversidades do período chuvoso.

Na análise de partição de variância, **a concentração de metais apresentou influência negativa sobre ambos os grupos funcionais de diatomáceas. Observou-se uma correlação entre as variáveis ambientais e os níveis de metais, com períodos chuvosos intensificando a mobilização de nutrientes, material particulado, turbidez e condutividade.**

i) Macrófitas

O Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) passou por vários ajustes em sua malha e frequência amostral ao longo do tempo. Essas alterações foram todas aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio do ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de

2019 (para o período de transição) e da Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, para o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”. As modificações estão documentadas nos materiais suplementares “MS – Malha e Frequência amostral” e “MS – Mapas das malhas amostrais”, que detalham as malhas e frequência amostral para os períodos:

- "Ano 1" (setembro de 2018 a setembro de 2019)
- "Transição" (outubro de 2019 a julho de 2022)

- "Novo Ciclo" (iniciado em agosto de 2022, com a ecotoxicologia começando em janeiro de 2023).

Essas adaptações visaram tornar o monitoramento mais abrangente e representativo, refletindo as condições ambientais e a biodiversidade dos ecossistemas monitorados e a Fundação Renova atendeu ao solicitado nos referidos documentos.

O relatório "*MS_AD_Macrófitas*", informa que os espécimes de macrófitas coletadas foram identificadas por meio de comparação com vouchers depositados em herbários e bibliografias específicas.

Um guia ilustrado de campo com características diagnósticas das espécies, para auxiliar na identificação específica em diagnósticos ambientais rápidos será confeccionado utilizando a ferramenta de design gráfico gratuita Canva.

Segundo o relatório analisado, a densidade de macrófitas aquáticas apresentou variações significativas entre os diferentes ambientes, com um aumento geral ao longo do tempo em ambientes como os rios Doce e Guandu, além de lagos e lagoas. No entanto, nos reservatórios, observou-se uma tendência de decréscimo. A sazonalidade também influenciou a densidade, com aumentos durante períodos secos e diminuições em períodos chuvosos, refletindo a sensibilidade das macrófitas às mudanças nas condições ambientais

A riqueza de espécies de macrófitas variou entre os ambientes, com uma tendência à estabilidade em lagos e reservatórios. Em contrapartida, os rios Guandu e Doce mostraram um aumento temporal na riqueza de espécies, enquanto o rio Manhuaçu apresentou uma tendência de declínio. Nas lagoas, foi observada uma diminuição na riqueza ao longo do tempo, indicando uma dinâmica complexa influenciada por fatores ambientais e antrópicos

A uniformidade das comunidades de macrófitas variou entre os ambientes, com algumas estações apresentando uma distribuição mais uniforme das espécies. *"A dominância das espécies também variou entre os ambientes estudados, com algumas estações sendo dominadas por uma única espécie, enquanto outras apresentaram uma distribuição mais equitativa das espécies. Essas variações na dominância refletem a complexidade das interações biológicas dentro dos ecossistemas aquáticos e destacam a necessidade de considerar não apenas a diversidade, mas também a estrutura das comunidades ao desenvolver estratégias de conservação."*

A diversidade de Shannon apresentou padrões distintos entre os diferentes ambientes, com flutuações sazonais. A análise indicou que a composição das comunidades de macrófitas é influenciada mais por processos de colonização e extinção do que por mudanças na abundância relativa das espécies. Isso sugere que a dinâmica sazonal e a localização geográfica desempenham papéis importantes na estrutura das comunidades de macrófitas aquáticas.

As análises de absorção de metais pesados mostraram que as macrófitas atuam como bioacumuladores, uma vez que *"há uma maior concentração de metais nas raízes do que nas folhas, indicando que os metais se concentram mais na parte basal da planta que está diretamente em contato com a água ou com a água via sedimento, no caso de espécies fixas."*

O relatório destaca ainda que espécies como *Ludwigia octovalvis* e *Pistia stratiotes* mostraram altas concentrações de metais, destacando a importância das macrófitas na remediação de áreas contaminadas.

j) Ictiofauna Dulcícola (Ictiofauna, Ictioplâncton e Macroinvertebrados)

No que se refere ao tema de ictiofauna, no ambiente dulcícola, observou-se que permaneceram insatisfatórios algumas considerações que foram apontadas na Nota Técnica nº 02/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio, referente à análise do 4º Relatório Anual do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática - Porção Capixaba do Rio Doce e Região Marinha e Costeira (PMBA), semelhante ao ocorrido após análises dos Relatórios anuais anteriores.

Algumas metas estabelecidas no Plano de Trabalho da FEST 2022 não foram alcançadas no atual relatório como por exemplo, no tema de macroinvertebrados a meta 3 *“Estudo de deformidades estruturais em macroinvertebrados bentônicos”*, da página 105 do Plano. Assim como, no tema Ictiofauna onde parte da submeta 1.4 *“Avaliar a relação gonadossomática (RGS) de cada indivíduo, o índice gonadal (IG) e a variação temporal da RGS (limitadas às espécies mais abundantes), permitindo avaliar a adaptabilidade e sucesso reprodutivo das espécies nativas e não nativas, com o intuito de compreender os processos de colonização e recuperação do Rio Doce*, proposta no Plano de Trabalho na página 116, não foi localizado no relatório e tão pouco na planilha de dados brutos referência ao índice gonadal (IG) dos peixes.

j.i. Ictioplâncton

O ictioplâncton, como consumidor primário basal, pode ser considerado o estágio vital mais vulnerável da comunidade de peixes. O sucesso do recrutamento do ictioplâncton, seus padrões de desova e composição de espécies são essenciais para avaliar a qualidade ambiental, as conexões tróficas e a saúde dos ecossistemas.

Conforme material suplementar MS_AD_Ictiofauna_Ictioplâncton_Macroinvertebrados, as densidades de ovos e larvas mantiveram-se de forma mais significativa na calha do rio Doce, que também tem sido o principal local de desova, com maior ocorrência no período chuvoso, principalmente para espécies que liberam ovos à deriva na coluna d'água. **No entanto, a calha é também a região de maior dispersão de larvas de espécies introduzidas, o que favorece o sucesso reprodutivo dessas espécies.**

Em relação à integridade e viabilidade das larvas, foram identificados quatro tipos de alterações incomuns em larvas, classificadas como (i) RCA - rompimento da cavidade abdominal; (ii) SAC - presença de sedimento avermelhado ou partículas brilhosas aderidas ao corpo; (iii) SCI - ocorrência de sedimento avermelhado ou partículas brilhosas em cavidades internas, como boca e intestino; e (iv) DC - deformidades na região da cabeça, olhos e focinho.

Cabe destacar que as alterações observadas em larvas são motivos de atenção, pois são pouco documentadas na literatura científica e não há relatos semelhantes em outras bacias hidrográficas brasileiras.

As alterações observadas nas larvas ocorreram principalmente na calha do rio Doce, enquanto os registros em tributários foram escassos e isolados, sem demonstrar um padrão específico. A frequência de deformidades observadas tem mostrado tendência de aumento ao longo dos anos, com alterações registradas em um total de 13 táxons larvais distintos.

j.ii. Ictiofauna

No tema de Ictiofauna, apesar de pequenas alterações/ajustes metodológicos, como por exemplo, na página 12 do material suplementar *MS_AD_Ictiofauna_Ictioplâncton_Macroinvertebrados: “Diferentemente do proposto no Plano de Trabalho de 2022, o Índice de Importância Alimentar (IAI - conforme consta no TR4) não foi utilizado como método de análise estomacal, uma vez que a literatura aponta que o método volumétrico vem sendo bem empregado e que a conclusão geral utilizando volume (%V) é muito similar ao resultado obtido com o IAI...”*, não foi informado desde qual campanha ocorreu este ajuste metodológico. Outro exemplo, *“Quando comparamos os pontos amostrais atuais com os que constam do Plano de trabalho de 2022, alguns pontos apresentam discordâncias quanto às coordenadas geográficas”*. Entretanto, é importante destacar que todos os ajustes metodológicos observados não apresentam prejuízos aos estudos e nem aos resultados obtidos.

As análises da ecologia de peixes ao longo do monitoramento mantiveram a tendência histórica, com um declínio na riqueza de espécies, especialmente entre as nativas, em comparação com as introduzidas. Além disso, houve discreto aumento da biomassa proporcional das espécies introduzidas. A redução populacional das espécies nativas pode favorecer a expansão territorial das populações das espécies introduzidas na bacia do rio Doce.

Ficou evidente que dos cinco ambientes analisados, a calha do rio Doce é o que apresenta maior dissimilaridade e contém maior riqueza de espécies, e observa-se que a comunidade de peixes possui alta conectividade e recebe grande aporte de peixes de seus tributários, sendo esta troca fundamental para a resiliência das comunidades da ictiofauna desse ambiente. Por outro lado, os lagos destacam-se como verdadeiros reservatórios e/ou refúgio de espécies, pois compartilham espécies com todos os outros ambientes.

A riqueza taxonômica qualitativa é caracterizada por 77 espécies de peixes, das quais 53 são nativas e 24 introduzidas no baixo rio Doce. Além disso, 16 espécies de habitats marinhos ou estuarinos são encontradas no ambiente dulcícola, evidenciando a importância desse ambiente como berçário ou área de reprodução para essas espécies.

É importante destacar a ausência de registros de algumas espécies de relevância comercial e ambiental, como as espécies do gênero Brycon, que são bioindicadoras de qualidade de água e que eram encontradas no baixo rio Doce antes do rompimento da barragem. Evidenciando que estas espécies aparentemente não conseguiram restabelecer suas populações após o impacto.

Ao longo do monitoramento, foram analisados 6.985 estômagos pertencentes a 73 espécies de peixes, sendo 48 nativas e 25 introduzidas. No que diz respeito às guildas tróficas, uma análise espacial ao longo do monitoramento, em quase todos os ambientes analisados, mostrou a dominância das espécies de peixes bentófagos, que se alimentam de itens presente no sedimento, que possivelmente contaminado, pode servir como via de entrada de metais pesados na cadeia trófica, com a biomagnificação ao longo da cadeia alimentar, prejudicando a pesca comercial e de subsistência.

Nos lagos e na calha do rio Doce, as análises de biologia reprodutiva das espécies nativas mostraram a predominância de fêmeas em relação aos machos, mas por outro lado, para as espécies introduzidas a proporção é mais equilibrada entre os sexos (próxima de 1:1), evidenciando o estabelecimento das espécies introduzidas

nestes ambientes.

Ressalta-se que a ictiofauna do baixo rio Doce está comprometida, evidenciada pelas histopatologias observadas em diferentes espécies nativas e introduzidas, com perda dos padrões morfológicos na organização celular de ovários e testículos, características típicas de ambientes impactados, capazes de afetar o desenvolvimento gonadal a curto e longo prazo, prejudicando a reprodução dos peixes.

De forma geral, os índices de diversidade genética, obtidos por meio de marcadores microssatélites, mostraram uma tendência de baixa diversidade para todas as populações das sete espécies analisadas no baixo rio Doce. **Do ponto de vista da conservação da biodiversidade, este resultado é preocupante, pois compromete a resiliência das espécies a eventos estocásticos, como alterações ambientais crônicas e agudas, frequentemente observadas no trecho do baixo rio Doce.**

Adicionalmente, houve redução expressiva da diversidade filogenética das espécies nativas, com consequente simplificação da diversidade funcional. Em geral, espécies introduzidas são mais resilientes do que espécies nativas, competindo por recursos e podendo ainda atuar até mesmo como predadoras de algumas espécies nativas. Assim, o aumento na biomassa das espécies introduzidas pode ser um dos fatores que contribuíram para essa perda de diversidade filogenética das nativas, e isso pode contribuir para a aceleração do processo de extinção local.

j.iii. Macroinvertebrados bentônicos

Macroinvertebrados bentônicos são organismos estreitamente ligados ao sedimento aquático, desempenhando funções ecossistêmicas cruciais e apresentando uma grande diversidade trófica.

Os resultados apontaram que a menor riqueza taxonômica e abundância de macroinvertebrados ocorreram na calha do rio Doce, enquanto maiores valores foram observados nos tributários, mantendo a tendência histórica desses indicadores. A análise de guildas tróficas mantém a tendência de maior abundância de assembleias bentônicas classificadas como mais tolerantes a impactos.

Observou-se uma evolução positiva na riqueza e abundância entre os períodos chuvosos e secos, com destaque para o aumento oferecido nos períodos secos, que é o esperado, uma vez que chuvas intensas e o regime de cheias representam distúrbios naturais que podem impactar a dinâmica das assembleias de macroinvertebrados. O aumento da energia associado ao alto fluxo pode favorecer a deriva dos organismos, dificultando sua coleta, além de afetar a estrutura das comunidades. Também pode promover o revolvimento de sedimentos finos depositados no fundo do rio, eliminando habitats essenciais para a fixação dos organismos em outras áreas.

Nos cinco ambientes do baixo rio Doce estudados, foram registrados 217 táxons, dos quais 66 são comuns entre os lagos, tributários e o rio Doce, destacando a relevância dos lagos no fluxo de táxons de macroinvertebrados, e esse compartilhamento de táxons entre os lagos e a calha do rio Doce é frequentemente favorecido pela conectividade existente.

A distribuição dos dados revela a predominância de três principais grupos (Diptera Chironomidae, Gastropoda Hydrobiidae e Annelida Oligochaeta) tanto nos ambientes do rio Doce, tributários, reservatórios e lagos, quanto nos períodos chuvoso e seco do monitoramento do PMBA.

A **Matriz de Resultados do Ambiente Dulcícola**, revela que no compartimento abiótico os impactos mais frequentes foram observados no compartimento *água*, enquanto nos compartimentos bióticos o grupo mais impactado foi a ictiofauna, seguido por macroinvertebrados.

A categoria de Genética para o grupo da *ictiofauna* obteve o valor crítico máximo da Matriz Dulcícola no que se refere ao impacto de *Alterações da diversidade e estrutura genética*, um fator possivelmente associado à redução da conectividade ao longo da calha do rio Doce e à natureza parcialmente irreversível dos impactos genéticos.

A Ictiofauna é o grupo mais evidente entre os compartimentos bióticos, correlacionando-se a 11 dos 24 agrupamentos de impacto analisados (Alterações na estrutura de comunidade, Alterações da diversidade e estrutura genética, Alterações do nicho isotópico e diversidade trófica, Alterações na estrutura de população, Contaminação por metais e metaloides, Alterações do uso do habitat, Aumento nos valores de índice de resposta biológica, Redução da diversidade filogenética, Danos morfológicos e celulares, Aumento na abundância de táxons indicadores e impacto e Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia).

No caso da *Ictiofauna*, os efeitos dos metais podem ser identificados pela sua presença na coluna d'água ou bioacumulado no plâncton e crustáceos. Após a absorção, os metais podem interagir diretamente com componentes celulares gerando estresse oxidativo e bioacumulando em brânquias, fígados e músculos. Os impactos desses processos corroboram com os resultados apresentados do monitoramento do PMBA, que indicam danos histopatológicos, deformidades em estágios iniciais de vida, crescimento comprometido, redução da diversidade e abundância de espécies, culminando na desestruturação da comunidade de peixes.

O *Ictioplâncton*, grupo analisado apenas nos ambientes lóticos e nos reservatórios, apresentou impactos de grau médio, relacionados com alterações nos parâmetros de *saúde e fisiologia* e *danos morfológicos e celulares*.

Diante do exposto, verifica-se que o impacto persiste na região monitorada pelo PMBA, com evidências de que até mesmo os níveis ambientais/tróficos mais baixos ainda sofrem o efeito das alterações ambientais. Por isso, a manutenção do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática é de extrema importância, uma vez que permitirá em longo prazo registrar a permanência ou redução do impacto crônico, além de observar as tendências futuras das condições ambientais e da biodiversidade nos ecossistemas, assim como monitorar a eficiência das ações de recuperação ambiental implementadas na bacia do rio Doce e região costeira e marinha afetada.

4.4.1.2 Conclusões - Ambiente Dulcícola

a) Ecotoxicologia

No âmbito da ecotoxicologia, o que se conclui é que os resultados obtidos, tanto de concentração de elementos Metálicos e As quanto de alterações em biomarcadores, apontam uma resposta crônica de estresse fisiológico, cujos impactos podem ser observados através de mudanças nos parâmetros populacionais, índices de riqueza, diversidade e abundância, e no estado dinâmico de reestruturação da comunidade, que se principia já na comunidade microbiana.

Sendo assim, o monitoramento contínuo poderá trazer novos indicativos sobre os efeitos emergentes de toxicidade dos elementos presentes no rejeito sobre as comunidades, e como estes se relacionam com outras alterações antrópicas sobre os ambientes. Recomenda-se, para tal, a continuidade de monitoramento em todos os grupos analisados e aplicados dos marcadores até o presente utilizados, com especial atenção à carcinofauna e ictiofauna.

Por fim, a ecotoxicologia, enquanto anexo abrangente, demonstra que os efeitos de toxicidade são peça-chave para a compreensão de processos ecológicos, sendo os indicadores elencados relevantes para a construção de uma série completa de informações que subsidiem tomadas de decisão a respeito do uso, manejo e restauração ecológica dos ambientes diretamente impactados pelo evento ocorrido em 2015.

b) Integração Fluvio-estuarina

O relatório conclui que a integração dos dados de produção de sedimentos foi uma ferramenta importante para a análise integrada dos resultados. A análise dos impactos na bacia do rio Doce focou em ações de saneamento, recuperação de APPs e manejo de rejeitos.

Os maiores produtores de sedimentos na bacia do rio Doce variaram de acordo com a precipitação. A sazonalidade hidrológica influenciou significativamente a geração de sedimentos, com picos nos períodos chuvosos, especialmente no Ano 4. O período chuvoso do Ano 4 teve o maior volume de sedimentos gerados, com média de 44,61 t/mês.km². Os principais rios produtores de sedimentos foram o Piranga, Carmo e Santo Antônio, com destaque para a ressuspensão de rejeitos no rio Doce, especialmente no rio do Carmo, devido ao rompimento da barragem de Fundão.

A presença de rejeitos no rio do Carmo aumentou significativamente o transporte de sedimentos, especialmente durante as cheias, com elevação de mais de 40% na descarga sólida em suspensão. O estudo ressalta que a ressuspensão do rejeito gerou um aumento notável no transporte de sedimentos em comparação com o cenário sem o rompimento da barragem de Fundão.

c) Limnologia

Os altos níveis de turbidez e material particulado em suspensão (MPS) observados em várias estações indicam uma degradação da qualidade da água, que pode afetar a saúde dos ecossistemas aquáticos. e o relatório é claro ao concluir que *“por muitos anos após o desastre, é possível identificar pulsos na remobilização e exportações de sedimentos durante eventos de alta vazão (Hatze et al., 2017; Magris et al, 2019; Miller et al, 2023). Nesse caso, por meio do monitoramento do indicador, nota-se aumento do aporte de material particulado em suspensão ao longo de cinco anos de monitoramento”*.

A concentração de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, apresentou um aumento constante, evidenciando tendência à eutrofização.

A presença de contaminantes nos sedimentos mostrou uma tendência de aumento e tal fato requer medidas de mitigação uma vez que pode representar um risco para a biota aquática.

O relatório conclui que *“Considerando que desastres tecnológicos, como ocorreu em 2015 pelo rompimento da Barragem de Fundão (Mariana, MG), provocam um significativo fluxo de rejeitos de minério, que não ficam restritos apenas a fase aguda observáveis apenas logo após o desastre), têm efeitos crônicos que poderão*

permanecer por tempo indeterminado.”. Ou seja, desastres tecnológicos como o citado têm efeitos crônicos que se estendem além do evento inicial, com a remobilização de sedimentos e rejeitos que continuam impactando a qualidade da água e a biodiversidade por anos. Isso reforça a necessidade de estratégias de recuperação e monitoramento a longo prazo,

O relatório enfatiza a importância do monitoramento contínuo da qualidade da água e da biodiversidade aquática, especialmente em áreas afetadas por desastres como o rompimento da Barragem de Fundão. A coleta de dados ao longo do tempo é crucial para entender as dinâmicas ambientais e os impactos a longo prazo.

d) Mineralogia

O relatório aponta que alterações na cristalinidade dos oxihidróxidos de Fe foram constantemente registradas após essa análise ser incluída no monitoramento, observando-se níveis preocupantes após o período chuvoso monitorado. Deve-se acrescentar que os oxihidróxidos de Fe, como goethita e hematita, representam a principal fonte de elementos tóxicos na bacia do rio Doce e as variações nestas fases são indicativas de mudanças ambientais repentinas, relacionadas ou não a mudanças climáticas.

e) Qualidade de Água e Sedimentos

A avaliação da qualidade da água e sedimentos revela impactos significativos durante os períodos chuvosos, com implicações diretas para a saúde dos ecossistemas e das comunidades locais. A implementação dos encaminhamentos propostos será essencial para preencher lacunas metodológicas, melhorar a consistência das análises e subsidiar ações eficazes de monitoramento e mitigação.

f) Fitoplâncton

O relatório conclui que os ecossistemas estudados estão sob alto grau de estresse, especialmente os reservatórios, que apresentam baixos valores de diversidade em decorrência de ações na bacia capazes de promover impacto crônico na comunidade fitoplanctônica como represamento de água e o acúmulo de contaminantes, necessitando de continuidade no monitoramento.

O texto enfatiza ainda que *“a contribuição dos ambientes para o conhecimento da real riqueza de espécies da região ainda se encontra subestimada”*, indicando a necessidade de monitoramento contínuo para entender a estrutura e dinâmica do fitoplâncton do Baixo Rio Doce.

A periodicidade sazonal no monitoramento contemplando a malha e frequência amostral, através dos mapas das malhas amostrais, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos ambientes, como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, deve ser mantida na continuidade do monitoramento do PMBA.

g) Zooplâncton

O relatório *“MS_AD_Zooplâncton”* conclui que ao longo dos cinco anos de monitoramento, o recrutamento de zooplâncton foi reduzido indicando vulnerabilidade da comunidade zooplanctônica e enfatiza que ***“Mesmo já tendo se passado nove anos do rompimento da barragem de Fundão, observamos que a comunidade zooplanctônica ainda não mostra sinais de estabilidade***

e a perda de traços funcionais ao longo dos cinco anos do monitoramento pode resultar na perda de funções ecossistêmicas importantes e alterar outros níveis tróficos do Baixo Rio Doce"

Embora a calha fluvial (Rio Guandu, Rio Manhuaçu e Rio Doce) suportem uma maior substituição de espécies em ambos os períodos hidrológicos (seco e chuvoso), isso pode estar relacionado justamente a perda de espécies e funções ecossistêmicas desses ambientes. Assim deve ser mantido o monitoramento com a malha amostral, sazonalidade semestral dos períodos seco/chuvoso associado aos fatores abióticos de maneira a acompanhar os traços funcionais ao longo do tempo.

h) Perifíton

A comunidade perifítica desempenha um papel crucial no funcionamento dos ambientes aquáticos, sendo uma das principais comunidades primárias e base da cadeia alimentar. A avaliação da estrutura e dinâmica dessa comunidade pode fornecer informações valiosas sobre suas respostas às variações nas condições ambientais.

Considerando os processos de dispersão e colonização de habitats que sofreram perturbações, o relatório concluiu que a sazonalidade e a conectividade entre habitats são fatores importantes para a dinâmica das comunidades.

No rio Doce, tributários e reservatórios, a tendência à redução dos valores de diversidade nos períodos chuvosos indica um efeito alóctone dependente da precipitação, que pode estar relacionado com o uso do solo e efeitos físicos, como o aumento da vazão e correnteza, que podem aumentar o desprendimento das microalgas da matriz perifítica.

O Relatório, *"MS_AD_Perifíton"*, conclui que *"os resultados do modelo indicam que os efeitos dos metais sobre a riqueza e diversidade de algas perifíticas devem ser interpretados com cautela, considerando a influência das interações entre os diversos fatores ambientais, tais como físicos, químicos e biológicos, como também a composição de espécies da comunidade perifítica e a variação nas concentrações dos metais em escalas temporal e espacial"*.

Ao analisar espacial e temporalmente, o relatório concluiu que *"a riqueza apresentou variações ao longo dos períodos climáticos e padrões diferentes nos ambientes monitorados."* e a *"composição de espécies exibiu maior heterogeneidade nos períodos chuvosos para todos os ambientes, demonstrando o efeito da sazonalidade na substituição de espécies e na composição e estrutura da comunidade"*.

"De maneira geral, a escassez de dados pretéritos sobre a composição de espécies e estrutura da comunidade perifítica, principalmente do Rio Doce, dificulta o entendimento do quanto a passagem do rejeito impactou esta comunidade e o seu nível de recuperação ao longo dos 5 anos de monitoramento. Para alguns ambientes há indícios de melhora das condições ambientais conforme valores de riqueza e diversidade, mas ainda se observa fortes efeitos das variações nas condições ambientais entre os períodos climáticos sobre a comunidade."

i) Macrófitas

O Relatório, *"MS_AD_Macrófitas"*, destaca a importância de compreender as interações entre fatores ambientais, sazonais e antrópicos para a conservação e o

manejo eficaz dos recursos naturais. Ele aponta que interferências humanas, como barramentos e poluição, influenciaram diretamente a densidade de macrófitas aquáticas em ambientes lênticos e lóticos, evidenciando o impacto dessas pressões sobre os ecossistemas.

A riqueza de espécies apresentou flutuações significativas, refletindo a complexidade das interações ecológicas. Além disso, a diversidade das macrófitas mostrou-se sensível às mudanças sazonais, tanto climáticas quanto hidrológicas. O Relatório destaca que "as flutuações sazonais na diversidade indicaram uma resposta das comunidades de macrófitas aquáticas às alterações nas condições ambientais, como temperatura e disponibilidade de nutrientes".

Essas características reforçam o papel das macrófitas aquáticas como bioindicadoras eficazes das condições ambientais, permitindo avaliar as mudanças causadas por fatores naturais e antrópicos e subsidiar estratégias de gestão e recuperação ambiental.

O documento também conclui que "as descobertas destacaram a importância das macrófitas como bioacumuladores de metais e como potenciais agentes de remediação em áreas contaminadas" e que "Especificamente, as espécies Ludwigia octovalvis e Pistia stratiotes demonstraram altas concentrações de metais como Alumínio, Vanádio, Ferro e Bário. Este padrão sugere uma possível função das macrófitas na remoção e concentração de metais pesados, potencialmente mitigando a contaminação em certas áreas."

O relatório também enfatiza a necessidade de estudos de longo prazo e monitoramento contínuo para entender melhor os padrões de mudança na comunidade de macrófitas aquáticas e identificar os principais impulsionadores das mudanças.

j) Ictiofauna Dulcícola

O ictioplâncton é um componente vital e vulnerável da comunidade de peixes, essencial para avaliar a qualidade ambiental, conexões tróficas e saúde dos ecossistemas.

As densidades de ovos e larvas são mais significativas na calha do rio Doce, especialmente no período chuvoso. No entanto, essa região também favorece a dispersão de larvas de espécies introduzidas/invasoras.

Foram identificadas, principalmente na calha do rio Doce, quatro alterações incomuns em larvas de peixes: rompimento da cavidade abdominal, presença de sedimento avermelhado ou partículas brilhosas aderidas ao corpo, ocorrência de sedimento avermelhado ou partículas brilhosas em cavidades internas e deformidades na região da cabeça, olhos e focinho e o relatório conclui que a frequência dessas deformidades apresenta tendência de aumento ao longo dos anos, afetando 13 táxons larvais distintos.

Com relação a análise da ictiofauna ocorreram algumas alterações metodológicas, mas salvo melhor análise, não prejudicaram os estudos ou resultados obtidos.

O relatório mostrou um declínio na riqueza de espécies nativas de peixes e um discreto aumento na biomassa das espécies introduzidas, mostrando que a calha do rio Doce é o ambiente que apresenta maior dissimilaridade e riqueza de espécies, devido à alta conectividade com seus tributários, fato fundamental para a resiliência das comunidades da ictiofauna desse ambiente.

Algumas espécies de peixes de relevância comercial e ambiental, que eram encontradas no baixo rio Doce antes do rompimento da barragem, como as do gênero Brycon, não conseguiram restabelecer suas populações após o impacto.

A análise espacial realizada ao longo do monitoramento, evidenciou que em quase todos os ambientes analisados, ocorre dominância das espécies de peixes bentófagos, hábito alimentar que provavelmente favorece a introdução de metais pesados na cadeia trófica, com a biomagnificação ao longo da cadeia alimentar, prejudicando a pesca comercial e de subsistência.

Desta forma o relatório conclui que a ictiofauna do baixo rio Doce está comprometida, evidenciada pelas histopatologias observadas em diferentes espécies nativas e introduzidas, com perda dos padrões morfológicos na organização celular de ovários e testículos, características típicas de ambientes impactados, capazes de afetar o desenvolvimento gonadal a curto e longo prazo, prejudicando a reprodução dos peixes. Não obstante, houve redução expressiva da diversidade filogenética das espécies nativas, com consequente simplificação da diversidade funcional.

4.4.1.3 Propostas de Encaminhamentos - Ambiente Dulcícola

a) Ecotoxicologia

1. Implementar ações para contenção da remobilização de rejeitos, especialmente em períodos de maior precipitação.
2. Priorizar o monitoramento contínuo dos níveis tróficos inferiores e superiores para compreender melhor os efeitos cumulativos.
3. Investir em programas de recuperação ambiental que promovam a reestruturação das comunidades biológicas e a redução de contaminantes ativos no sistema.
4. Necessidade de Ajustes nos Métodos Analíticos e amostrais:
 - i. A limitação dos métodos de detecção utilizados compromete a confiabilidade das análises de tendências.
 - ii. Ajustes nos métodos de monitoramento, com o uso de técnicas mais sensíveis, são essenciais para uma avaliação mais precisa da contaminação e seus efeitos nos ambientes, além de proporcionar dados mais consistentes para subsidiar a tomada de decisões e políticas públicas de mitigação da contaminação.
 - iii. Manter a integralidade do monitoramento para todos os grupos até o presente amostrados, de modo a constituir um embasamento com dados históricos para compreensão das alterações em comunidades, e fundamentando, quando pertinente, ações de recuperação.
5. **Conforme Notas Técnicas anteriores, ressalta-se que ainda não foram apresentados dados de monitoramento para o metil-mercúrio, dado fundamental para a compreensão de processos fisiológicos como resposta ao efeito de toxicidade, recomendando-se fortemente a sua inclusão no rol de análises.**
6. Apresentar nos relatórios uma maior integração dos dados, inserindo relações de causa-efeito de toxicidade entre os níveis tróficos, bem como dos efeitos crônicos

de toxicidade esperados sobre a biota, a partir das conclusões obtidas nos ensaios laboratoriais com matrizes de água e elutriato.

b) Integração Fluvio-estuarina

Para uma análise com maior riqueza de detalhes, é recomendado usar os dados de transporte de sedimentos e balanço de massas que serão produzidos no previsto Plano de Monitoramento Integrado. Nesse plano, que deverá ser implementado pela Samarco e fiscalizado pela União, há o monitoramento mensal de transporte de sedimentos em suspensão e de fundo, além de modelagem hidrossedimentológica dos dados em modelo já calibrado para a bacia do rio Doce. Também terá o monitoramento de transectos em diversas seções do rio Doce e afluentes, tanto de água, sedimentos quanto solo das margens e calha maior dos corpos hídricos em análise. Também é recomendado uso dos dados do IBAMA, SEAMA-ES e CBH-Doce sobre os programas de reflorestamento na bacia, que agora, vão para além daqueles números disponibilizados pela antiga Fundação Renova.

c) Limnologia

Os resultados do monitoramento limnológico evidenciam a importância da manutenção um acompanhamento contínuo da qualidade da água, atualmente pelo PMQQS, especialmente em áreas impactadas por atividades antrópicas. Desta forma, recomenda-se desenvolver e implementar estratégias de recuperação e manter e aprimorar o monitoramento a longo prazo

Como recomendado na Nota Técnica nº 2/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio, após a análise do presente Relatório, reiteramos a necessidade de implementação de medidas de recuperação e conservação dos ecossistemas, como ações de reflorestamento e a criação de unidades de conservação baseadas em modelos que considerem a hidrologia e os processos de conectividade com os ambientes costeiros e marinhos, sendo essa estratégia fundamental para a recuperação dos ambientes afetados.

Implementação de estratégias de controle de poluição, especialmente em áreas de alta carga de nutrientes.

d) Mineralogia

Manutenção dos monitoramentos descritos e coleta de maior volume amostral de água, para que a quantidade de MPS seja suficiente para a realização de todos os parâmetros listados.

e) Qualidade de Água e Sedimentos

Revisar e atualizar o mapa apresentado no documento “MS_Mapahistóricodamalhaamostral”, garantindo consistência com o plano de trabalho.

Identificar claramente os pontos utilizados para análises geoquímicas, com detalhes específicos sobre as diferentes frentes de estudo.

Incluir no documento “MS_Qualidadedaáguaesedimento” informações detalhadas sobre as coletas destinadas às análises granulométricas, de matéria orgânica e de extração sequencial de fósforo.

Reavaliar a aplicação do CWQI, separando os parâmetros orgânicos e metálicos para maior precisão na análise.

Incluir a legislação CONAMA 357 no cálculo do CWQI, juntamente com a NOAA Crônico, para melhor alinhamento às diretrizes nacionais.

Utilizar ambas as legislações (CONAMA e NOAA) na avaliação de qualidade dos sedimentos para maior abrangência e representatividade.

Especificar nos relatórios futuros a metodologia de coleta e preservação, incluindo o uso de ácido antes ou após a filtração para metais totais e dissolvidos.

f) Fitoplâncton

Os indicadores apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, necessitando, portanto, de continuidade do monitoramento.

g) Zooplâncton

O Estudo contemplou a diversidade beta, que pode ser definida como a variação na composição das espécies (abordagem taxonômica) ou dos traços (abordagem funcional, que considera as funções que as espécies desempenham no ambiente) ao longo do espaço ou do tempo. Essas duas abordagens são importantes em estudos de conservação uma vez que podem dar indícios das condições ambientais.

A periodicidade sazonal no monitoramento contemplando a malha e frequência amostral, através dos mapas das malhas amostrais, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes, como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, deve ser mantida na continuidade do monitoramento do PMBA.

h) Perifíton

Considerando que “Os estudos referentes aos efeitos de diferentes concentrações da maioria destes metais sobre a riqueza e diversidade de espécies na comunidade perifítica são escassos”, recomenda-se a realização de estudos adicionais para aprofundar os conhecimentos dos efeitos dos metais sobre a comunidade perifítica.

Considerando que a comunidade perifítica exerce grande importância no funcionamento dos ambientes aquáticos, sendo uma das principais comunidades primárias e base da cadeia alimentar nos mais diversos ambientes, que os resultados obtidos até o momento indicam que a riqueza de espécies de microalgas perifíticas ainda pode estar subestimada, a análise dos impactos ambientais dos metais, a variação temporal e sazonal na riqueza e diversidade de espécies, e a importância da continuidade do monitoramento para a gestão e conservação dos recursos hídricos, recomenda-se a continuidade dos trabalhos de monitoramento da comunidade perifítica e das variáveis ambientais associadas.

i) Macrófitas

Desenvolver e implementar estratégias de conservação específicas para os ambientes mais impactados, priorizando a recuperação de áreas com baixa diversidade de macrófitas.

Promover a integração dos dados de macrófitas com outras análises, como fitoplâncton e sedimentos, para uma compreensão ampla da saúde dos ecossistemas aquáticos.

j) Ictiofauna Dulcícola

Considerando que as alterações observadas em larvas de peixes são pouco documentadas na literatura científica e não possuem relatos semelhantes em outras bacias hidrográficas brasileiras, recomenda-se a realização de estudos adicionais para aprofundar a compreensão dessas anomalias. O objetivo é avaliar como essas deformidades podem comprometer o desempenho funcional dos peixes em seus estágios iniciais de vida, impactando negativamente as taxas de sobrevivência. Essas alterações podem gerar consequências ecológicas significativas e, em longo prazo, afetar a produtividade da pesca, ressaltando a necessidade de um maior esforço de pesquisa nessa área.

4.4.2 AMBIENTE COSTEIRO

4.4.2.1 Avaliação de Impactos Ambientais e Identificação de Tendências nos Parâmetros monitorados

a) Praias

O relatório informa que a área amostral do Ambiente Costeiro foi subdividida, em função das características geomorfológicas, geoquímicas e sedimentológicas de cada trecho, nos compartimentos A, abrangendo as praias associadas às falésias e terraços de abrasão, localizadas ao sul da planície deltaica do rio Doce, no litoral dos municípios de Serra/ES e Aracruz/ES (Estações S1, S2 e S3); B, praias localizadas no extremo sul da planície do rio Doce e inclui as praias de Barra do Riacho e da Terra Indígena de Comboios (Estação S4* e S5); B', praias da REBIO de Comboios e Regência, ao sul da desembocadura, e Povoação, ao norte da desembocadura do rio Doce (Estações S6, S7 e N1); e C, abrangendo as praias ao norte da planície deltaica do rio Doce (Estações N2, N3*, N4, N5 e N6). *As estações S4 e N3 foram suprimidas a partir de agosto/2023, conforme justificativas apresentadas pela FEST e acatadas pela CT-BIO.

A metodologia apresentada contempla o escopo, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA. O relatório apresenta uma síntese do histórico de alterações e adaptações da metodologia, conforme abaixo:

- Exclusão das análises de identificação de carbonato e morfoscopia – Morfodinâmica (muita estabilidade, sem refletir mudanças);
- Inserção mapeamento de lama na antepraia – Morfodinâmica;
- Inserção da análise da variação da linha de costa – Morfodinâmica;
- Inserção das análises de MPS – Geoquímica (MPS e elementos químicos no MPS);
- Inserção das análises geoquímicas na água do mar – Geoquímica (elementos químicos na água do mar em sua fração total e dissolvida);
- Exclusão das análises da fração biodisponível do sedimento– Geoquímica (por inclusão das análises de água na fração total e dissolvida);

- Inserção das análises de ETRs (elementos terras raras) no sedimento – Geoquímica.

As amostragens, ao longo do perfil praial emerso, abrangeram os trechos da berma, face da praia superior, face da praia inferior até o limite praia/antepraia (zona de arrebentação das ondas). No perfil praial submerso (antepraia), as amostragens ocorreram nas profundidades de 5 m e 10 m.

Os resultados alcançados são resumidos a seguir por tópicos:

Morfodinâmica

As praias do **Compartmento A** são pouco desenvolvidas em termo de volume de sedimento e apresentam a menor variação no Volume praial (m^3/m) e na alteração da Linha de Costa (m), podendo ser consideradas praias estáveis temporalmente. As **praias dos Compartimentos B e B'** apresentam alta mobilidade, com tendência erosiva ao longo do monitoramento, mas com grande capacidade de recuperação do volume de areia, com exceção da estação S6 Rebio Comboios, que apresenta uma tendência de avanço da linha da costa. No **Compartmento C**, a resultante da deriva litorânea rumo a norte transporta os sedimentos mais finos trazidos para a costa pelo rio Doce e os depositam na extremidade norte da planície. O sedimento mais fino determina praias com menores inclinações, bermas mais baixas e com características dissipativas e com mobilidade morfológica mais restrita.

Resume-se que as praias localizadas nas proximidades da foz do Rio Doce apresentam maior mobilidade morfológica, pois são diretamente influenciadas pela carga sedimentar sazonal do rio, enquanto as praias de terraço apresentam estabilidade morfológica, uma vez que na ocasião da chegada de contaminantes tendem a ficar retidos nesse compartimento. De modo geral, o litoral associado à foz do Rio doce apresenta uma tendência erosiva, porém com intensidades diferentes. **O destaque relevante é a erosão dos perfis nas estações S7 Regência, N1 Povoação, e N2 Degredo.**

A inserção dos temas mapeamento de lama na antepraia e análise da variação da linha de costa (LC), proporcionaram elementos demonstrativos importantes da dispersão e acumulação de sedimentos lamosos, com elementos associados ao MLD, ao longo da plataforma interna da porção norte da planície costeira do Rio Doce.

Presença de lama:

A distribuição longitudinal da lama parece indicar uma situação crônica no **Compartmento C**, com altas quantidades de lama terrígena na antepraia, em 5 m e principalmente 10 m, o que não é esperado para um ambiente praial, especialmente nas porções mais rasas da antepraia. O **Compartmento B'** é influenciado diretamente pela vazão do rio, o que reflete nos altos teores de lama, principalmente em 10 m, em especial a estação N1 Povoação. **Importante ressaltar que as três estações que apresentaram tendência de aumento no**

teor de lama estão localizadas no flanco norte da Planície. A presença de altos valores de lama ocorre também no **Compartimentos A**, que apesar da composição majoritariamente carbonática, há uma fração terrígena que eventualmente supera a carbonática, principalmente em S2 Formosa e S3 Putiri. O **Compartimento B** não apresenta valores significativos de lama. **O incremento de lama dentro do sistema praial tipicamente arenoso pode trazer alterações a médio e longo prazo como aplainamento da praia e consequente aumento dos eventos inundacionais, além de interrupção do transporte das frações arenosas da antepraia para a praia emersa devido ao trapeamento ocasionado pela lama, desencadeando processos erosivos ocasionados por déficit sedimentar.**

Alteração morfológica da praia:

Na análise de evolução espaço-temporal da linha de costa (LC), fica explícita a inversão do comportamento progradante/retrogradante em determinadas seções da LC, quando comparados os períodos pré e pós-rompimento. À norte da desembocadura, há, em geral, uma inversão do padrão anterior ao Rompimento da Barragem, onde apresentava progradação (avanço da linha de costa), passou a apresentar, após 2014, retrogradação (reco da linha de costa). Há dois trechos que chamam atenção pela magnitude da retrogradação: 1) o trecho correspondente aos transectos 200 e 270 (inserida estação N1 Povoação), que apresenta taxa de erosão de até -10 m/ano no período pós-Rompimento e 2) na margem imediatamente ao norte da foz (entre os transectos 300 e 315) com variação máxima acima de -15 m/ano. Mais ao norte da planície, a estação N2 Degredo, apresenta tendência significativa de reco da LC na análise de microescala, com taxa de -13,38 m/ano.

A avaliação de possíveis modificações dos principais processos hidrológico e oceanográficos (vazão do Rio Doce e clima de ondas) responsáveis pela variação da LC nesta região apresentou resultados significativos de diferença de distribuição apenas para direção predominante da entrada de ondas (Dm) e da vazão do rio Doce. Quanto ao primeiro, as alterações não representam uma mudança que pudesse gerar uma modificação no sentido da deriva litorânea, o que indica que as modificações da LC não estão associadas às modificações no clima de ondas. A vazão, por outro lado, apresentou modificação significativa, com valor médio pós-Rompimento (545,8 m³/s) muito inferior a ambos os períodos pré-rompimento (888,3 m³/s) e série histórica (772,4 m³/s), o que pode ter ocorrido devido ao assoreamento do rio dado à presença do rejeito lamoso. Valores menores de vazão significam menor potencial de transporte de sedimento, o que pode estar diretamente ligado às modificações da LC observadas pós-Rompimento da Barragem, com tendência retrogradante no flanco norte da planície, trecho do litoral.

Concluindo, o padrão de mobilidade da linha de costa ao longo da planície do Rio Doce mudou de progradacional para retrogradacional e de maior magnitude após o Rompimento da Barragem na margem sul da desembocadura (Regência) e em praticamente todo flanco norte da planície, podendo estar associado à diminuição no *input* de sedimentos naturalmente aportados pelo rio, incluindo frações mais grossas, e o aumento de sedimentos mais finos, especialmente as frações lamosas, após o rompimento da barragem.

Geoquímica

Concentração de elementos químicos no sedimento:

Os resultados obtidos nas análises geoquímicas indicam que a descarga do rio Doce e a direção predominante da deriva litorânea para o Norte, resultam em concentrações mais acentuadas de elementos químicos nas praias do Compartimento C. Apesar da marcante influência da descarga do rio Doce na concentração de elementos químicos nas praias do setor norte (N2 Degredo até N6 Itaúnas), é importante frisar que as praias do Compartimento B' (S6 Regência até N1 Povoação), localizadas nas imediações da desembocadura, também exibem níveis significativos de elementos químicos, em virtude do aporte direto de sedimentos do Rio Doce.

As isóbatas de 5 metros nos compartimentos analisados geralmente proporcionam condições favoráveis para uma menor deposição de lama e, por conseguinte, para a não fixação de elementos químicos potencialmente tóxicos. Isso ocorre devido ao seu elevado dinamismo e à maior interação das ondas com o sedimento de fundo. **Por outro lado, as isóbatas de 10 metros em praticamente todos os compartimentos têm se mostrado moderadamente impactadas. Esse fato evidencia a influência do rio Doce, uma vez que a deriva litorânea é responsável por direcionar aproximadamente 70% do material para o norte, afetando de maneira mais significativa o compartimento C.**

Em relação às concentrações dos elementos químicos nos sedimentos coletados na antepraia adjacente à desembocadura do Rio Doce em 2023, os resultados confirmam a intensa dinâmica nas adjacências da foz do rio Doce e períodos de predominância no transporte de lama do rio em direção ao norte, o que resulta em consideráveis incrementos nos teores dos elementos químicos nos sedimentos.

Quanto à concentração de Elementos de Terras Raras (ETR) no ambiente costeiro, foram observados valores superiores aos dados pretéritos, tanto nas isóbatas de 10 metros (zona de transição entre o ambiente praiial e a plataforma continental) quanto na face superior (praia emersa), sugerindo um aporte recente desses elementos.

Concentração de elementos químicos na água

Ao analisar as concentrações totais dos elementos químicos na água, observou-se que os compartimentos A, B/B' e C mantiveram-se abaixo dos limites estipulados pela Resolução CONAMA nº357 para águas salinas de classe 1. No entanto, na fração dissolvida, a maioria das amostras apresentou concentrações de Fe que ultrapassaram o limite crônico estabelecido pelo NOAA (50 µg L-1). Além disso, os valores de Fe dissolvido excederam o limite agudo (300 µg L-1) definido pelo NOAA nas estações amostrais do Compartimento C, especialmente nas isóbatas de 5 metros (agosto de 2022 e janeiro de 2023) e 10 metros (janeiro de 2023).

Ao considerar os elementos Fe, Mn, Cu e Co no cálculo do PLI (Índice de Carga Poluente) para a região de estudo (Compartimentos A, B e C), os valores resultantes indicam uma área não poluída. No entanto, ao restringir a análise aos elementos mais significativos, Fe e Mn, os valores de PLI foram significativos no compartimento C, especialmente nas isóbatas de 5 metros das estações N2 e N4, indicando uma possível área poluída.

Em relação ao Material Particulado em Suspensão (MPS), nos compartimentos A, B e B' foi observada uma distribuição uniforme do MPS ao longo do monitoramento, sem tendências significativas, salvo em situações pontuais em campanhas e estações específicas. Já o **compartimento C apresentou, de maneira geral, as maiores concentrações de MPS, sendo que nos períodos chuvosos registrou maiores teores de MPS em 10 metros, devido ao aporte de sedimento fino**

proveniente do rio Doce, e no período seco exibe teores mais elevados na isóbata de 5 metros, indicando que uma maior atuação das ondas pode remobilizar o fundo e colocar materiais mais finos em suspensão. O aumento sazonal das vazões do rio Doce se mostrou como uma variável determinante no aumento dos teores de MPS, cuja distribuição em direção ao norte (compartimento C) ocorre devido à atuação da deriva litorânea no transporte de sedimentos. **Além disso, períodos de maior energia de onda também possuem a capacidade de elevar pontualmente os teores de MPS nos compartimentos estudados.**

Bentos

Parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica

A análise das variações dos parâmetros ecológicos ao longo dos anos aponta como principal resultado, para o ambiente praia emersa, que a densidade da macrofauna continua maior no Compartimento B', onde as praias apresentam características mais refletivas, contrariando a literatura mundial para padrões de distribuição de macrofauna bentônica. Nas praias do Compartimento C, que possuem características mais dissipativas, a deriva litorânea sentido norte favorece a deposição dos sedimentos provenientes do rio Doce, com retenção de diferentes elementos químicos, resultando numa menor densidade de macrofauna bentônica observada nesse compartimento. No ambiente antepraia, o Compartimento B' apresenta os menores valores de índices ecológicos para a macrofauna bentônica, padrão que vem se mantendo ao longo do monitoramento, possivelmente em resposta ao aporte direto de sedimentos do rio Doce nesse compartimento, seja por alterar a granulometria do local ou devido aos elementos químicos associados.

O grupo Oligochaeta apresenta maiores densidades no Compartimento B' do que nos demais. Já o crustáceo Amphipoda segue apresentando maiores densidades no Compartimento A, região onde a complexidade estrutural do ambiente promove abrigo e alimento que favorecem a presença desse grupo. **O fato dos anfípodas serem considerados bons indicadores e por serem sensíveis a poluentes no sedimento, indicam que as praias emersas do compartimento A não estão afetadas pelo rejeito do rio Doce.**

As praias do Compartimento C são do tipo dissipativa, por isso sendo esperados altos valores de densidade e riqueza da macrofauna, o que não ocorreu desde o início do monitoramento, provavelmente devido a maior presença de lama associada aos elementos químicos nesse setor, provenientes da descarga do rio Doce. A análise dos parâmetros da macrofauna entre os compartimentos, apontou que não é possível observar estabilidade ou alguma tendência de melhora ao longo do tempo.

A diversidade da macrofauna bentônica na antepraia do compartimento C não apresentou relação negativa com maiores porcentagens de lama verificadas nesse local. **No entanto, no Compartimento B' foram registrados os menores valores de diversos parâmetros ecológicos da macrofauna bentônica, apresentando relação significativa negativa com o aumento do teor de lama em ambas as isóbatas.** Essa diferença de resposta da macrofauna pode ter relação com a composição dos organismos e o comportamento destes na presença de lama.

A avaliação da densidade dos grupos chave da macrofauna bentônica (oligochaeta, polichaeta e amphipoda) frente à presença de lama nos compartimentos, indica o efeito negativo do rejeito, causando a redução da densidade dos grupos-chave macrofaunais, principalmente no compartimento C.

Apesar das variações temporais recorrentes nos parâmetros da macrofauna de Degredo, as últimas campanhas (Ano 4 e Ano 5) vem mostrando um aumento dos valores de densidade e riqueza, acima dos reduzidos valores dos parâmetros ecológicos registrados logo após a chegada da lama de rejeitos.

A análise da estrutura da macrofauna aponta que a campanha realizada em 2016, meses após a chegada dos rejeitos, apresentou a estrutura da macrofauna bem dissimilar às campanhas realizadas antes do rompimento. No entanto, ao longo do monitoramento do PMBA, diversas campanhas mostraram similaridades da fauna com o período pré-rompimento, o que demonstra a oscilação da estrutura da macrofauna ao longo desses anos. A variação temporal entre o período seco e chuvoso também foi testada, não sendo verificada uma diferença significativa entre os dois períodos. **Logo após o rompimento (04/16) é possível ver reduções das abundancias de todos os táxons da macrofauna. A partir daí, fica claro a troca de dominância de organismos, onde, nas campanhas pré-rompimento, havia uma dominância de poliquetas, que foram drasticamente reduzidos nas campanhas seguintes à chegada da lama, não mostrando recuperação até o presente. Após o rompimento, os isópodes e, eventualmente, os oligoquetas têm dominado a macrofauna no local.**

Parâmetros ecológicos da meiofauna bentônica

Nos Compartimentos A e C foram verificadas as maiores densidades significativas da meiofauna. No entanto, no compartimento C foi verificada uma dominância de poucos organismos, que possivelmente são tolerantes e/ou oportunistas, justamente no compartimento que recebe a deposição dos sedimentos provenientes do rio Doce, com retenção de diferentes elementos químicos trazidos pela deriva litorânea sentido norte, o que pode ser uma resposta aos rejeitos presentes no sedimento desses locais. Quanto à variação temporal, a riqueza e densidade da meiofauna apresentam uma tendência de aumento ao longo do tempo, que pode ser decorrente de animais oportunistas e tolerantes, que se adaptam nas condições alteradas.

Em todos os compartimentos, as porcentagens de lama presentes na antepraia afetam negativamente a riqueza taxonômica da meiofauna bentônica. No entanto, no Compartimento C, onde tem as maiores concentrações de lama, a riqueza chega a ser significativamente menor do que nos demais, o que evidencia o efeito deletério da lama na meiofauna, atuando no desaparecimento ou evitando a chegada e/ou permanência de novos táxons no local.

As alterações na diversidade ecológica da meiofauna bentônica, após o rompimento da Barragem de Fundão, continuam indicando o impacto do rejeito na praia. Os valores da densidade e riqueza da meiofauna continuam maiores que o período pré-rompimento. O grupo chave Nematoda apresentava tendência de aumento ao longo do tempo, mas os dados da última campanha sugerem uma estabilização. Contudo, esse resultado requer cautela. **O aumento da densidade de Nematoda pós-rompimento pode ser uma resposta a entrada e permanência dos rejeitos no sedimento, visto que diversas espécies desse filo são conhecidas por sua característica tolerante e oportunista.**

A análise da abundância dos grupos da meiofauna na estação amostral N2-Degredo, que dispõe de dados pretéritos para comparação, mostra o aumento das densidades de Nematoda, Copepoda, Platyhelminthes e Oligochaeta, além da presença de diferentes grupos taxonômicos não presentes antes do rompimento. De acordo com a hipótese ecológica do

distúrbio intermediário (HUSTON, 1979), as perturbações podem enriquecer, empobrecer ou devastar as assembleias da meiofauna e sua diversidade. A entrada de frentes frias, o aumento de volume da descarga do rio Doce no período chuvoso e a frequência de ondas maiores que ocorre no período seco, causam um distúrbio, ou seja, a remobilização do sedimento e ressuspensão de elementos químicos provenientes do rejeito, que possivelmente são os responsáveis pela variação na densidade da fauna observada ao longo do monitoramento.

b) Manguezal

Os manguezais são ecossistemas estuarinos que podem receber materiais como contaminantes, nutrientes e sedimento tanto do aerossol marinho, como provenientes de processos de transporte pelas águas dos estuários, a partir de aportes fluviais e marinhos. Os manguezais são capazes de reter sedimentos e, conseqüentemente, os contaminantes a eles associados. Estes contaminantes podem ser incorporados aos tecidos das árvores de mangue e, via cadeia alimentar, sofrerem bioacumulação, chegando a componentes da fauna, como os caranguejos. Estas características, associadas ao relevante papel ecológico desempenhado pelos manguezais nos ambientes costeiros, fazem com que esse ecossistema seja importante no monitoramento de impactos como os decorrentes do rompimento da barragem de Fundão.

As análises previstas no Plano de Trabalho englobam três metas, relacionadas aos impactos na estrutura e funcionamento da flora (Meta 1), na fauna de caranguejos (Meta 2) e aos efeitos da contaminação por metais nas folhas e sedimentos de manguezal (Meta 3). Inicialmente será apresentada uma síntese dos resultados para as metas 1 e 3, por se tratar de temas mais integrados, e, posteriormente para a meta 2.

- **Meta 1 - Estrutura e Funcionamento da flora do Rio Doce e dos Manguezais de Aracruz (Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim), Barra Nova (Rio Mariricu) e Conceição da Barra (Rio São Mateus) e Meta 3 - Diagnóstico de contaminação por metais da vegetação dos manguezais de Aracruz (Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim), Barra Nova (Rio Mariricu) e Conceição da Barra (Rio São Mateus)**

Com relação à aderência ao Plano de Trabalho no que foi previsto para as Metas 1 e 3, as amostragens foram realizadas de acordo com o cronograma (frequência semestral; no caso da descrição da estrutura dos bosques de mangue, foi feita uma amostragem ao final do período de monitoramento), malha amostral e metodologia indicados. As análises de dados propostas foram todas realizadas, com a seguinte exceção. **Não foram localizadas no relatório as informações sobre a taxa de mortalidade nos experimentos *ex situ* com *Rhizophora mangle* (análise prevista no Plano de trabalho - “Determinação da taxa de mortalidade nos experimentos e taxa de crescimento”; as informações sobre taxas de crescimento constam da Figura 108). Por consequência, também não constam as análises referentes ao item “Correlação entre mortalidade e toxicidade, bem como potencialidade com relação aos dados de metais obtidos em campo”.**

Com relação à amostragem, destaca-se que o monitoramento é realizado em bosques dos tipos **franja e bacia**, nas margens esquerda e direita dos estuários, e vem ocorrendo desde janeiro de 2019, com coletas analisadas até janeiro de 2023.

Com relação à Meta 1, foram feitas coleta de dados e análises referentes a:

estrutura da vegetação; produção primária; atividade antirradicalar; e, concentração de metais em folhas e sedimentos (com inclusão de um ponto de amostragem no Rio São Mateus). Para a Meta 3, foram feitas coleta de dados e análises referentes a: experimentos *in situ* (variabilidade espacial); experimentos *ex situ*; e, variabilidade espacial e correlação de metais pesados em sedimentos e vegetação de mangue na região atingida pelos rejeitos de mineração na foz do Rio Doce.

Com relação à estrutura das florestas de mangue, os resultados indicam redução do DAP médio até o terceiro ano de monitoramento, especialmente nos manguezais de Barra Nova, São Mateus e Piraquê-açu. A redução do DAP médio, que pode ser consequência de uma densidade de troncos menor do que a esperada para uma determinada classe de DAP, é um indicativo de que estão ocorrendo mudanças na estrutura das florestas e na capacidade de sequestro de carbono, como possível consequência de impactos naturais ou antrópicos.

Quanto à **contaminação por metais nos sedimentos dos manguezais**, analisando-se os diferentes compartimentos, observou-se que o **Compartimento B (foz do rio Doce)** abriga as maiores concentrações de metais em todos os períodos, indicando contaminação crônica para os metais Pb, Co, Ba, Al, Mn, Fe, Cr e As, e atuando como área fonte crônica de diversos metais para os compartimentos A e C. Os manguezais localizados no **Compartimento A (CA, PA e PM)** possuem os maiores teores de areias, carbonato de cálcio e concentrações de arsênio quando comparados com as demais áreas estudadas, mas apresentam concentrações mais baixas de metais do que os compartimentos B e C, ainda que também demonstre concentrações que indicam contaminação simultânea para diversos metais, como observado nos períodos chuvoso 20/21 e seco/23. O Compartimento C (UR, BN e SM) por sua vez, recebe **maiores aportes das concentrações de metais e dos teores de lama do Rio Doce; a granulometria mais lamosa neste compartimento contribui para a adsorção dos metais na matriz sedimentar.**

Quanto à **contaminação por metais nas plantas**, os resultados indicam o Ferro e o Manganês como os principais metais acumulados nas folhas das árvores de manguezal analisadas. **As concentrações de Ferro excederam os limites estabelecidos pelos órgãos ambientais em todos os compartimentos analisados, com o Ferro causando impacto em todos os estuários simultaneamente pela primeira vez ao longo do monitoramento PMBA/Fest.**

A principal consequência desta contaminação é a redução da atividade fotossintética, observada ao longo dos cinco anos de monitoramento, e comprometimento da produtividade primária final da floresta, resultando em danos para a saúde das plantas e do ecossistema. A redução da atividade fotossintética foi observada em todas as espécies analisadas (*Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, *Avicennia schaueriana* e *Talipariti pernambucense*), com diferenças entre os compartimentos e períodos. **O Compartimento C foi o que apresentou menor desempenho fotossintético, devido à presença de Cu, Mn, Pb e Fe nas folhas.**

A contaminação por outros metais também trouxe impactos negativos para as espécies de plantas como, por exemplo, a contaminação por Pb nas folhas, identificada a partir do Ano 4, tendo efeitos deletérios sobre a fotossíntese e sobre a atividade antirradicalar de *R. mangle*; a redução da atividade fotoquímica em *L. racemosa* em Barra Nova no Ano 5, relacionada ao efeito do Pb foliar e causando estresse oxidativo; a redução da atividade fotossintética em *T. pernambucense*, principalmente nos Compartimentos B e C, associada à concentração de Fe, Mn e Pb nas folhas; e, alteração da atividade fotossintética e maior estresse oxidativo em *A. schaueriana* ao longo do

monitoramento, com forte correlação com o elemento Cu, principalmente nos períodos chuvosos.

Além disso, a bioacumulação dos metais nas folhas e outras partes das plantas tornam os manguezais fontes persistentes de contaminação, uma vez que grande parte deste material é continuamente introduzido no ambiente estuarino e na cadeia alimentar, podendo chegar às populações humanas. **Impactos já são observados, por exemplo, sobre a densidade e o tamanho médio da carapaça de caranguejos (ver item específico sobre a fauna).**

Analizando-se os **resultados por espécie vegetal**, temos para *R. mangle* a alteração da atividade fotossintética ao longo dos cinco anos de monitoramento e tendência de queda nos valores de clorofila-a nos compartimentos A (a partir do período Seco_22) e C (a partir do período Seco_21), enquanto para clorofila-b e carotenóides houve redução de valores a partir do Ano 4 do monitoramento (Out/2021 a Set/22) em todos os compartimentos analisados. **Ao longo dos cinco anos de monitoramento, os parâmetros fotossintéticos de *R. mangle* indicam que em todos os compartimentos houve redução dos processos bioquímicos e fotoquímicos ao longo de todo o monitoramento, com breve recuperação nos anos 3 e 4 nos estuários de Piraquê-Açu e Piraquê-Mirim, voltando a reduzir no ano seguinte.** Nos experimentos ex-situ com plântulas da espécie, para o Fe, estas não apresentaram diferença significativa na taxa de crescimento. **Entretanto, para o Mn, houve uma redução significativa na taxa de crescimento nas maiores concentrações do metal.**

Os resultados registrados para *L. racemosa* mostram que os indivíduos da espécie exibem alterações em sua produção primária e na sua atividade antirradicalar, associada ao aumento dos metais (Fe, Mn, Zn e Cu) nas folhas, principalmente no período seco. No período chuvoso, destaca-se a ação do Fe na redução do desempenho fotoquímico. **Em síntese, os dados apontam que Mn, Fe e Pb são os principais responsáveis pela variabilidade dos dados biológicos de *L. racemosa*, com Fe e Mn causando redução na produção primária desta espécie.**

Em relação a *T. pernambucense*, houve tendência de redução da atividade fotossintética, principalmente nos Compartimentos B e C, efeito associado à concentração de Fe, Mn e Pb na folha. **Foi observada também aumento do estresse oxidativo na espécie no último período analisado, sendo que no Rio Doce os valores de DPPH são os maiores já encontrados durante toda a série histórica.** Quanto aos pigmentos, observou-se aumento nos valores de clorofila-a e clorofila-b no Rio Doce no último período analisado (Seco_23) e tendência de estabilidade na concentração de carotenóides, enquanto no estuário de São Mateus houve diminuição dos três pigmentos no período Seco_23, possivelmente associada à maior concentração de Mn nas folhas desta espécie.

Para *A. schaueriana*, na área da APA de Costa das Algas observou-se redução da assimilação de carbono ao longo de todo o monitoramento, e, no manguezal de Caravelas, houve recuperação da atividade fotossintética no período seco a partir de Seco 2021. Além disso, no manguezal de Caravelas e Costa das Algas foi observado tendência de recuperação do índice de desempenho fotoquímico nos períodos secos. Houve aumento de DPPH de *A. schaueriana* em Costa das Algas no período Seco_22, com os maiores valores registrados em todo o monitoramento, o que pode estar relacionado ao acúmulo de Mn, Zn e Cu neste período. Quanto aos pigmentos fotossintetizantes, houve tendência de redução de clorofila-a, clorofila-b e carotenoide na espécie a partir do período Chuvoso 20_21 em Costa das Algas (CA) e Caravelas (CR), corroborando os resultados do estresse oxidativo e dos maiores valores de Fe, Mn, Zn e Cu foliar neste período.

Por fim, destaca-se que os períodos chuvosos são os que trazem maior risco para a comunidade biológica, devido ao aumento da vazão dos rios e consequente aumento da concentração de metais depositados nos sedimentos. **No entanto, o último período analisado, mesmo sendo seco (seco/23), apresentou concentrações de metais que geram impactos biológicos, em diversos estuários amostrados, inclusive com aumento da concentração de metais como cromo, chumbo e vanádio, cujas concentrações vinham diminuindo em períodos anteriores, além de manganês, bário, arsênio e alumínio.** Nos dois períodos analisados é possível observar a predileção de metais pelas áreas de franja, definindo este tipo fisiográfico como a entrada principal da contaminação para os manguezais.

• Meta 2 - Fauna Caranguejos

As análises referentes à fauna de caranguejos do manguezal contemplam coletas realizados até o período seco de 2023. De forma geral, o ambiente costeiro possui maiores impactos observados nas proximidades da desembocadura do rio Doce e no litoral norte da área estudada, sendo que essa última área (compartimento C) sofre bastante influência da ação da deriva litorânea. **Para os caranguejos, foi identificado alteração no tamanho da carapaça e densidade dos organismos, além de destacado que a exposição de larvas de caranguejo ao ambiente contaminado compromete o estoque desse recurso e o potencial de extração futuro (PEF). Além disso, foi destacado que em todos os estuários avaliados foi observado baixa frequência de indivíduos com tamanho comercial (Largura da Carapaça > 60 mm) impactando diretamente o estoque comercial do caranguejo-uçá.** Em relação aos períodos de coleta, no período chuvoso tem-se aporte direto de material contaminado no sistema costeiro em função do incremento da vazão no rio Doce; já no período seco, com incremento da frequência de eventos meteorológicos, ocorre a remobilização do material, com consequente alcance do material contaminado às porções mais altas da praia e adentramento no manguezal e restinga. **Considerando a compartimentação realizada no litoral, o compartimento C (planície norte do rio Doce - Degredo a São Mateus) é reconhecido como o mais impactado.**

Especificamente sobre os caranguejos, há variações espaciais e sazonais na densidade populacional de *Ucides cordatus* em todos os compartimentos, tendo o compartimento C os mais altos teores de lama e as maiores concentrações de elementos químicos associados ao desastre. A densidade populacional de indivíduos dessa espécie no compartimento C foi superior à observada no compartimento A durante os cinco anos de monitoramento. O compartimento C apresenta populações mais densas e mais indivíduos jovens no seco e chuvoso, comparadas ao compartimento A, e estão associadas aos bosques com maiores concentrações de metais no sedimento, tanto no período seco quanto no chuvoso. O compartimento A registra a menor densidade e maiores tamanhos de carapaça, sendo observada estabilidade na densidade e tamanho da carapaça, com populações jovens registrando menores médias no período chuvoso; é destacado que indivíduos jovens estão mais suscetíveis à assimilação de metais no ambiente em função da maior frequência de troca de carapaça. Por sua vez, o compartimento B registrou ocorrência da espécie no rio Doce após o rompimento da barragem, com densidade similar ao compartimento C durante o chuvoso do ano 2; nos anos seguintes, declinou significativamente, mas o tamanho médio dos indivíduos aumentou indicando recrutamento para classes de tamanho superiores.

Para *Cardisoma guanhumi*, em todos os estuários, foi observada densidade

inferior ou próxima de 1 indivíduo/m². Compartimentos A e C não registraram diferenças significativas entre os períodos sazonais, sendo que o compartimento B' apresentou registro de declínio acentuado. Foi destacado que a captura ilegal de indivíduos adultos também pode influenciar os resultados do monitoramento em longo prazo.

Sobre os índices IBR, o IBR bioacumulação sofreu aumento dos níveis de Metal e As nos caranguejos no compartimento A e B no ano 4, com recuperação dos valores posteriores à campanha. Para IBR marcadores os maiores valores foram identificados nos compartimentos C e B; chuvoso do ano 4 também sofreu aumento. **Em síntese, todos os compartimentos tiveram aumento no período chuvoso, com destaque para os compartimentos B e C.** A variabilidade de metais nas folhas (Cu, Fe e Zn) e no sedimento (Cr Mn e Pb) explicou significativamente a variabilidade da densidade média e tamanho médio da carapaça das populações de *U. cordatus* nos manguezais do compartimento C.

O quadro 1 reúne informações sobre os agrupamentos de impactos e classificação correspondente que afetam o ambiente manguezal, considerando os diferentes alvos de estudo: sedimento, vegetação e caranguejos.

Quadro 1. Impactos identificados para o ambiente manguezal.

Categoria	Agrupamento de Impactos	Sedimento de Manguezal	Vegetação de Manguezal	Caranguejo de Manguezal
Sedimentologia	Alterações nas características físicas da praia	-	-	-
Química	Contaminação por metais e metaloides	-17	-15	-17
Ecotoxicologia	Aumento nos valores de índice de resposta biológica	-	-	-9
Ecologia	Alterações na estrutura de população	-	-	-15
	Alterações na estrutura comunidade	-	0	-14
	Alterações nos parâmetros reprodutivos	-	0	-12
Saúde	Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia	-	-15	-
Legenda:				

-	Não se aplica / não realizado no PMBA/Fest
0	Impacto nulo
-5 a -8	Baixo
-9 a -12	Médio
-13 a -16	Alto
-17 a -21	Crítico

c) Restinga

Análises de contaminantes no sedimento, material depositado sobre as folhas ("Spray") e tecidos vegetais (Pág. 4)

Coleta de Sedimentos

- **Cobertura limitada em alguns compartimentos:** As estações amostrais do Compartimento A, por exemplo, estão restritas a apenas um ponto (E9), o que pode não ser suficiente para representar a variabilidade sedimentar dessa área. Recomenda-se aumentar o número de pontos de amostragem para garantir uma cobertura mais uniforme e representativa em todos os compartimentos.
- **Parâmetros físico-químicos e granulometria:** A descrição não menciona quais parâmetros do sedimento serão analisados, mas recomenda-se incluir uma análise granulométrica (distribuição do tamanho de grãos), bem como parâmetros físico-químicos (pH, condutividade, teor de matéria orgânica, entre outros). Essas informações são cruciais para entender a composição e qualidade dos sedimentos e sua relação com o ecossistema.
- **Consistência temporal:** Garantir que a coleta siga rigorosamente os mesmos pontos e condições ao longo do tempo é essencial para permitir uma análise temporal adequada. Qualquer variação na metodologia pode dificultar a comparação dos dados ao longo dos anos.

Análises do material depositado sobre as folhas ("Spray") (Pág. 5)

- **Área foliar coletada:** Seria interessante especificar a área total ou número de folhas por amostra, pois isso pode impactar o volume de material "spray" depositado. Além disso, a variação na área foliar poderia introduzir um viés nas comparações entre diferentes amostras.
- **Volume de lavagem foliar fixo:** O uso de 50 mL de água ultrapura é mencionado, mas seria importante reforçar se essa quantidade foi utilizada de forma padronizada para todas as amostras, independentemente do tamanho das folhas ou da quantidade de material depositado. Caso contrário, pode ocorrer uma diluição desigual dos depósitos entre amostras, comprometendo a comparabilidade dos resultados.
- **Coletas em diferentes períodos:** Não é mencionado se as coletas foram feitas em diferentes épocas do ano (períodos seco e chuvoso, por exemplo) ou sob

diferentes condições atmosféricas (vento, temperatura, etc.), o que poderia ser relevante para entender a variabilidade do material depositado sobre as folhas ao longo do tempo.

Coleta de Recursos Florais (Pág. 5)

- **Cobertura espacial limitada:** A coleta foi feita apenas na Comunidade Quilombola de Degredo. Para garantir maior representatividade do ecossistema Restinga, recomenda-se a inclusão de mais áreas amostrais distribuídas em diferentes pontos dos Compartimentos A, B e C, evitando que os resultados reflitam apenas uma localidade específica.
- **Amostragem Florística e Análises de Dados:** O inventário florístico é realizado por meio de caminhamento aleatório e coleta de apenas um indivíduo fértil por espécie em cada fitofisionomia. Amostragens adicionais podem incluir uma coleta mais representativa da diversidade, por exemplo, coletando mais de um indivíduo por espécie em diferentes pontos da estação. Isso ajudaria a reduzir a variação na representatividade das espécies e a melhorar as análises estatísticas subsequentes.
- **Metodologia de Levantamento da Estrutura da Vegetação:** seria interessante avaliar a possibilidade de inclusão de técnicas de sensoriamento remoto ou drones, isso poderia melhorar a precisão espacial e temporal das avaliações, ajudando a capturar a vegetação em maior escala, fornecendo uma visão mais abrangente das mudanças nas formações.
- **Análise da Dinâmica de Espécies de Importância:** Seria relevante realizar uma análise detalhada das espécies mais importantes, especialmente aquelas ameaçadas de extinção ou de interesse de conservação. Isso inclui a análise de seus padrões de distribuição, sucesso reprodutivo, regeneração e resposta a variações climáticas. As conclusões podem guiar ações de conservação mais específicas.

Coleta de sedimento e material vegetal para ensaios *in vitro* (Pág. 9)

- **Microbiota do sedimento:** O texto menciona que as amostras foram armazenadas sob refrigeração, mas não especifica as condições de temperatura, nem por quanto tempo, o que é importante para garantir a viabilidade dos microrganismos até a análise.

Estudos *ex situ* de espécies da restinga (Pág 10)

- **Baixa Taxa de Sucesso em Espécies Arbustivas e Arbóreas:** O estudo menciona o baixo sucesso sem explicar as causas potenciais. Seria relevante uma análise mais profunda das condições que podem ter impactado negativamente a propagação (temperatura, umidade, tipo de substrato, etc.).
- **Uso Limitado de Substratos:** Embora seja positivo o uso de um substrato orgânico (Terra Vegetal - Nutri&Verde®), seria interessante explorar outros substratos e suas combinações, principalmente para as espécies arbustivas e arbóreas, já que estas apresentaram baixa taxa de sucesso.

Contaminação do sedimento, do material depositado sobre as folhas (“Spray”) e dos tecidos vegetais, e granulometria (Pág. 11)

- **Análise dos elementos químicos:** Os resultados de concentração de elementos químicos poderiam ser mais eficazmente integrados a uma análise de risco ecotoxicológico, discutindo o impacto dos níveis encontrados em termos da saúde do ecossistema das áreas costeiras. A simples caracterização de

concentrações sem uma contextualização de risco pode limitar a aplicabilidade dos dados para a gestão ambiental.

- **Análise física do sedimento:** O procedimento menciona a lavagem das amostras para a retirada do sal, mas não especifica o uso de água destilada ou desionizada, que é recomendada para evitar a introdução de contaminantes. Garantir o uso dessas águas melhoraria a precisão da análise.

Inventário Florístico e da Estrutura, e Fenologia da vegetação (Pág. 12)

- **Fenologia da vegetação:** Considerar variações entre espécies. Como a definição dos estágios fenológicos pode variar entre diferentes espécies, seria interessante detalhar os critérios específicos para cada espécie mais representativa das fitofisionomias estudadas. Isso garantiria que a caracterização seja precisa em diferentes tipos de vegetação. (Pág 14)

Microbiota do sedimento associado à vegetação (Pág 15)

- **Teste de germinação de sementes:** Além do potencial germinativo, o acompanhamento de outros parâmetros, como vigor das plântulas, taxa de crescimento e biomassa acumulada, poderia fornecer uma visão mais detalhada do impacto dos tratamentos.

Ensaio com extrato solubilizado em espécies modelos (Pág 17)

- **Temperatura de Secagem das Amostras de Sedimento:** A temperatura de secagem das amostras (42°C) pode estar alta para certos compostos orgânicos voláteis e contaminantes químicos que podem se degradar ou volatilizar a essa temperatura. Seria mais seguro avaliar a possibilidade de utilizar uma temperatura mais baixa, como 30–35°C, para minimizar a perda de compostos potencialmente relevantes para o bioensaio.
- **Distribuição das Sementes nas Placas de Petri:** O número de sementes (50) por placa de Petri não é questionado, mas seria recomendável explicitar como foi feita a distribuição das sementes, a fim de evitar superlotação e competição por espaço, o que poderia influenciar o crescimento radicular e os resultados de germinação.

Resultados dos indicadores(Pág 27)

As mudanças estruturais observadas, especialmente nas comunidades arbustivas e arbóreas, parecem estar relacionadas tanto a fatores antrópicos quanto a dinâmicas naturais. Ainda que a contaminação tenha sido detectada, seus efeitos sobre a organização da comunidade parecem lentos e requerem estudos de longo prazo para maior entendimento. As flutuações nos valores de importância e diversidade das espécies, especialmente em áreas sob maior pressão antrópica, refletem a vulnerabilidade das formações vegetais de restinga, com algumas espécies ameaçadas de extinção enfrentando declínio contínuo.

Os resultados indicam uma tendência geral de melhora nas comunidades arbustiva e arbórea ao longo do tempo, com aumento na floração e frutificação, mas com algumas discrepâncias associadas a fatores antrópicos e variações ambientais. A comunidade herbácea apresentou padrões fenológicos alterados, especialmente no período seco, com impacto na dispersão de frutos.

Considerações finais (Pág 45)

- **Sazonalidade e Impactos Ambientais:** A vegetação da restinga é altamente sensível às condições sazonais, com impactos mais fortes observados nos períodos chuvosos, devido à vulnerabilidade às condições ambientais. Durante o período seco, houve maior bioacumulação de contaminantes nos tecidos vegetais, com destaque para os impactos nos primeiros anos de monitoramento (Anos 1 a 3).
- **Contaminação e Respostas Biológicas:** Estações como Degredo, Cacimbas e REBio Comboios mostraram respostas agudas mais marcantes devido à proximidade com a foz do Rio Doce, denotando forte influência da dinâmica do rio e da morfodinâmica das praias. O acúmulo de elementos como Zn, Cu e Mn afetou o desenvolvimento das mudas, especialmente nas formações herbáceas, resultando em reduções na produtividade primária e aumento da atividade antioxidante.
- **Impacto Regional e Ecológico:** A área de Cacimbas apresentou condições desfavoráveis ao longo dos 5 anos de monitoramento, com respostas crônicas nos compartimentos B' e C. A estação Mar Azul, no sul, apresentou padrões peculiares devido à influência da Formação Barreiras, contribuindo para níveis elevados de poluição, apesar de uma melhora ambiental no último ano.
- **Respostas Genotóxicas e Contaminação dos Tecidos Vegetais:** Bioensaios mostraram potencial genotóxico do sedimento das restingas, com alterações toxicogenéticas em várias espécies vegetais, principalmente associadas a extratos de sedimentos ricos em contaminantes. Elementos tóxicos encontrados no pólen de abelhas indicam níveis preocupantes de contaminação, afetando o desenvolvimento das larvas.
- **Estratégias Adaptativas e Perda de Cobertura Vegetal:** A vegetação herbácea demonstrou maior capacidade adaptativa devido ao crescimento rápido e resposta fenológica flexível, enquanto a comunidade arbustiva e arbórea apresentou maior sensibilidade estrutural e reprodutiva. O declínio de espécies ameaçadas e a perda de cobertura vegetal nas dunas, resultante da abrasão costeira e do assentamento de rejeitos, são questões críticas, especialmente no compartimento C.
- **Implicações Socioeconômicas e Necessidade de Monitoramento:** O impacto nos recursos vegetais das restingas pode prejudicar as comunidades que dependem desses ecossistemas para subsistência, reforçando a importância do monitoramento contínuo. A oferta de elementos minerais via aerossol marinho é essencial para a vegetação costeira, o que torna a avaliação de contaminantes nos componentes abióticos e bióticos (tecidos foliares e órgãos reprodutivos) fundamental para a gestão e conservação da área.

Esses resultados destacam a necessidade de continuidade no monitoramento e na mitigação dos impactos, principalmente para garantir a recuperação ecológica e a proteção das comunidades vegetais e animais dependentes da Restinga.

Texto destacado do relatório:

O texto apresenta uma análise detalhada sobre os impactos ambientais e as respostas da vegetação de restinga ao desastre associado ao rompimento da barragem de Fundão, com foco nos diferentes compartimentos costeiros.

O impacto do desastre na vegetação de restinga é complexo e multifatorial, envolvendo tanto contaminação química quanto alterações climáticas e geomorfológicas. As respostas variam entre os compartimentos, com melhorias pontuais, mas persistência de efeitos negativos na vitalidade e estrutura das comunidades. Elementos como Mn, As e Zn desempenham papel central nos impactos, afetando funções metabólicas e reprodutivas. Estratégias de manejo e

recuperação devem focar na mitigação dos efeitos da poluição e na preservação de espécies-chave das comunidades vegetais.

Abaixo estão os principais impactos destacados:

- **Acúmulo de Elementos Minerais e Poluição:** Altas concentrações de metais como As, Mn, Fe, Cu e Zn nos sedimentos e tecidos foliares das plantas, indicando bioacumulação. A poluição está relacionada ao aporte fluvial e marinho, afetando a eficiência fotossintética e aumentando o estresse oxidativo da vegetação. Impactos mais severos observados nos Compartimentos B' (próximo à foz do rio Doce) e A (influência geomorfológica distinta).
-
- **Alterações na Vitalidade Vegetal:** Reduções na produtividade primária e no metabolismo fotossintético foram associadas à presença de elementos tóxicos como Mn e As. Tendências de recuperação foram pontuais, sem uma melhora consistente ao longo do tempo.
-
- **Alterações Fenológicas:** Mudanças no padrão de floração e frutificação, com transição de um ciclo subanual para contínuo em alguns casos, devido a tensores ambientais. A floração prolongada indica perturbações nos processos reprodutivos.
-
- **Alterações na Estrutura das Comunidades Vegetais:** Perda de espécies importantes, como *Scaevola plumieri*, nos cordões litorâneos do Compartimento C, sugerindo fragilidade da vegetação frente aos impactos. Redução na importância de espécies fixadoras de dunas, como *Panicum racemosum*.
- **Respostas da Microbiota do Solo:** Alterações na composição bacteriana, com aumento de bactérias promotoras de crescimento em alguns compartimentos, mas efeitos deletérios associados a elementos tóxicos (Ni, Mn, Pb e V).
-
- **Efeitos Morfo-Dinâmicos e Climáticos:** Influência de fatores como exposição ao aerossol marinho, inundações e erosão na distribuição e bioacumulação de elementos químicos. Impactos maiores em períodos secos devido à mobilidade de contaminantes e redução da matéria orgânica no solo.
-
- **Mudanças no Uso e Cobertura da Terra:** Expansão de áreas agrícolas e supressão de formações florestais, principalmente nos Anos 3 e 4, agravando as condições ambientais locais.
-
- **Monitoramento e Indicadores:** Índices como o Índice Integrado de Poluição (IPI) mostram uma redução gradual na poluição em algumas áreas, embora os níveis ainda sejam preocupantes. Análises remotas confirmam tendências sazonais e melhorias pontuais, mas não uma recuperação total.

Impactos nos compartimentos e na vegetação:

Compartimento C:

- **Bioacúmulo:** Elementos químicos como As, Mn e outros foram associados à redução da produtividade primária e aumento do estresse oxidativo na vegetação.
-
- **Morfologia e dinâmica vegetal:** Apesar de tendências de melhoria em cobertura vegetal, espécies como *Scaevola plumieri* enfrentaram declínio

contínuo, indicando vulnerabilidade.

-
- **Respostas fenológicas:** Alterações nos padrões de floração e frutificação indicam que fatores ambientais, como contaminação e mudanças climáticas, estão alterando os ciclos naturais.

Compartimento B':

- **Influência do Rio Doce:** A proximidade da desembocadura do rio resulta em maiores impactos devido ao aporte de contaminantes e variações hidrodinâmicas.
- **Vitalidade Vegetal:** Embora o indicador "Vitalidade" tenha mostrado melhora, não houve recuperação consistente, com oscilações nos valores observados.

Compartimento A:

- **Impactos severos:** Composição química dos sedimentos, rica em Fe, Mn e Al, resultou em comprometimento metabólico e aumento do estresse oxidativo.
- **Fenologia:** Alterações na reprodução, com redução da floração e frutificação, estão associadas à contaminação por Mn e Zn.

d) Ecotoxicologia

Quanto ao objetivo descrito, a apresentação dos resultados e suas discussões atenderam, e apresentaram os possíveis efeitos biológicos decorrentes da contaminação ambiental por metais e As e a consequente acumulação desses elementos nos organismos de diferentes níveis tróficos e diferentes habitats.

A Campanha 7 se destacou por apresentar os valores máximos de IBR Bioacumulação para todos os setores analisados, ao longo de todo o período de monitoramento. Esta maior biodisponibilidade pode estar associada a um maior aporte continental de contaminantes depositados ao longo da calha do Rio Doce durante a maior vazão observada no período de execução da Campanha 7. Considerando-se todos os Setores em conjunto, os contaminantes que apresentaram maior ocorrência na composição do IBR Bioacumulação, ao longo de todo o monitoramento, foram o As, Fe, Hg, Cd, Cr, Cu, Mn e Pb, ressaltando-se que, os elementos As, Cd, Hg e Pb são altamente tóxicos, mesmo em pequenas concentrações

Ao longo do período de monitoramento, a bioacumulação de metais e As nos pequenos invertebrados de praia destacou-se nos Setores A e C, à exceção da Campanha 10, onde ocorreu um pico no valor do IBR Bioacumulação nos organismos coletados no Setor B. Vale lembrar que os Setores A e C são aqueles onde ocorre a maior deposição do material e contaminantes oriundos da drenagem da Bacia do Rio Doce, ao sul (Setor A) e ao norte (Setor C) da foz desse rio, como resultado das forçantes meteorológicas e oceanográficas vigentes na desembocadura do Rio Doce. Os contaminantes que apresentaram maior ocorrência na composição do IBR Bioacumulação ao longo de todo o monitoramento foram o Fe, As, Zn e Mn.

Para caranguejos de praia, durante todas as Campanhas do monitoramento, há um pico no valor deste índice na Campanha 7, na qual foram observados os maiores valores do IBR Bioacumulação para os três Setores avaliados, com destaque para o Setor C. A partir da Campanha 8, os valores do índice diminuíram consideravelmente

em todos os setores avaliados e demonstraram uma tendência de estabilização até a Campanha 10. Porém, na Campanha 11, foi observado novamente um aumento nos valores deste índice para todos os setores.

Em caranguejos, os dados indicam uma importante bioacumulação destes três metais (Cd, Hg e Zn) nos organismos avaliados, a qual se mantém ao longo do período do monitoramento realizado e, conseqüentemente, um possível impacto crônico destes elementos na biota aquática em questão. Por sua vez, os valores elevados de As, Cd, Hg e Pb observados na Campanha 7 requerem atenção e indicam a possibilidade de uma redistribuição dos contaminantes já presentes nos sedimentos da praia para a coluna d'água e, conseqüentemente, para a biota.

Em aves, observa-se que há uma tendência das variações do IBR Bioacumulação serem similares nestes diferentes grupos de organismos, à exceção dos resultados obtidos para o Setor C na Campanha 5. Esta relação pode estar associada ao fato de que as aves costeiras tem um comportamento de forrageamento e são predadores de topo de cadeia trófica, podendo se alimentar de vários organismos, incluindo caranguejos, pequenos invertebrados e peixes. Portanto, estas evidências apontam para uma contaminação do Ambiente Costeiro com metais e As, bem como a bioacumulação e biomagnificação destes contaminantes nos organismos que habitam ou utilizam este ambiente para forrageamento. Mn e Pb ocorreram com maior importância em 60% das Campanhas realizadas

Em caranguejo, nas Campanhas 7 e 10 se destacaram por apresentarem os maiores valores do IBR Biomarcador, indicando a presença de um significativo impacto fisiológico, já que os biomarcadores responsáveis pela geração deste índice refletem estresse oxidativo (lipoperoxidação e proteínas carboniladas), ativação de mecanismos celulares de proteção contra metais e metalóides (metalotioneínas) e danos ao DNA (sítios AP).

Em caranguejos, valores do IBR Biomarcador nas primeiras campanhas realizadas durante o período de monitoramento foram a LPO_{hep} e a PCO. Ao longo do monitoramento pronunciou-se a Metalotioneína. E nas últimas campanhas está mais pronunciado os danos do sítio AP, nas Campanhas 9, 10 e 11, demonstrando assim uma ocorrência importante de danos, especialmente oxidativos, no material genético dos organismos analisados.

Há uma tendência de estabilização nos valores de IBR Biomarcador nos pequenos invertebrados de praia ao longo do período de monitoramento, salvo para o Setor C, o qual demonstrou aumento relevante nos valores do índice nas Campanhas 5, 6 e 9. **Os valores de IBR Biomarcador nos Setores A e C foram, em geral, mais altos que no Setor B. Com base nos resultados obtidos, sugere-se que o estresse fisiológico observado nos pequenos invertebrados da praia foi maior nos indivíduos coletados nos Setores A e C, com destaque principalmente para aqueles oriundos do Setor C.** A partir da Campanha 5, especialmente nas Campanhas 8, 9, 10 e 11, os valores de contribuição da MT para a composição do IBR Biomarcador começaram a se mostrar mais relevantes.

Em caranguejos, é possível inferir que houve estresse fisiológico e, possivelmente, danos genéticos, com um aumento destes efeitos biológicos na Campanha 10, já que os biomarcadores responsáveis pela geração do IBR Biomarcador são aqueles que refletem o estresse oxidativo (lipoperoxidação - LPO e proteínas carboniladas - PCO), a proteção contra o efeito dos metais (metalotioneínas - MT) e os danos ao DNA (sítios AP), efeitos estes associados à contaminação ou perturbações no Ambiente Costeiro. Cabe ressaltar que os valores do IBR Biomarcador voltaram a níveis basais na Campanha 11, mas mesmo assim, o setor C segue sendo relativamente o mais impactado.

Banco de dados

Alguns metais e metaloides apresentaram valores abaixo do limite de detecção estipulado, o que compromete a análise de tendências por meio dos dados obtidos. Esse cenário afeta diretamente a proposta central do monitoramento, que é identificar e avaliar tendências relacionadas à causa e efeito de elementos traço no ambiente.

Por exemplo, no caso da água, os valores de mercúrio registrados apresentam o seguinte resultado: “<0,000075 µg/L”. Em contrapartida, o Limite de Quantificação do Método (LQM), conforme listado nos anexos, é de “0,000009 mg/L”. Contudo, o método de leitura das amostras não foi suficientemente sensível para detectar concentrações abaixo do LQM, restringindo a confiabilidade e a completude da análise.

Diante disso, é imperativo que ajustes sejam realizados nas próximas campanhas e no ciclo subsequente de monitoramento. Recomenda-se a revisão dos métodos analíticos, priorizando técnicas mais sensíveis, como a espectrometria de absorção atômica por geração de vapor frio (CV AAS) ou a espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS), para garantir maior precisão e limites de detecção mais adequados aos níveis esperados no ambiente monitorado.

Esse ajuste não apenas permitirá uma análise de tendências mais robusta, mas também possibilitará que os resultados sejam apresentados de maneira mais clara e acurada aos tomadores de decisão, facilitando interpretações e subsidiando políticas públicas mais eficazes e embasadas em evidências científicas consistentes

4.4.2.2 Conclusões - Ambiente Costeiro

a) Praias

Os Compartimentos B' e C apresentaram inversão da tendência histórica (1970 a 2015) na dinâmica das praias, que se mostrava progradante e de baixa magnitude, para um padrão erosivo e de alta magnitude no período pós-Rompimento, especialmente as estações de Regência (S7), Povoação (N1) e Degredo (N2). O Compartimento B mostrou-se morfologicamente o mais dinâmico e assumiu um padrão progradante nos 5 anos do monitoramento, diferentemente da tendência histórica retrogradante e de menor magnitude. O Compartimento A apresentou pequenas variações morfológicas típicas de praias precedidas por terraços de abrasão.

A porção submersa (5 e 10 metros de profundidade) das praias localizadas nas adjacências da desembocadura e flanco norte da planície do rio Doce (Compartimentos B' e C), registrou uma tendência significativa de enriquecimento das concentrações de lama ao longo do período monitorado. Os Compartimentos B' e C demonstram consistentemente as maiores concentrações de todos os elementos químicos nas isóbatas de 10 m durante todo o período de monitoramento, sendo o Compartimento C a região mais severamente impactada pelo aporte do MLD, onde maiores concentrações dos elementos químicos (Al, Ba, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb e V) são encontradas na isóbata de 10 metros.

As praias emersas do Compartimento A estão moderadamente impactadas, principalmente devido à alta concentração de As, que superam os valores orientadores internacionais, assim como os dados prévios ao rompimento da barragem de Fundão. Além do As, outros elementos, como Mn e Ni,

exibem concentrações acima das diretrizes internacionais, enquanto o Fe ultrapassa os dados pré-rompimento. Devido às alternâncias entre aportes fluviais do rio Doce e mobilidade do MLD depositado na antepraia e plataforma continental, as praias dos Compartimentos B' e C não apresentam tendência de diminuição do impacto causado pelas altas concentrações de elementos químicos, exceto a estação REBio Comboio (S6).

Durante os 5 anos de monitoramento, a densidade de organismos na praia emersa se manteve maior nos Compartimentos B e B', onde as praias apresentam características mais refletivas. Por outro lado, as praias do Compartimento C, com características mais dissipativas, continuamente apresentaram baixos valores de densidade e riqueza da macrofauna, o que está em desconformidade com a literatura mundial para padrões de distribuição de macrofauna bentônica, visto que é esperado maiores valores em praias mais dissipativas. A meiofauna e macrofauna bentônica são afetadas pela lama e concentração elementar, tanto na antepraia quanto na praia emersa dos Compartimentos B' e C.

b) Manguezal

De forma geral, no ambiente costeiro foram observados maiores impactos nas proximidades da desembocadura do rio Doce e no litoral norte da área estudada, sendo que essa última área (compartimento C) sofre bastante influência da ação da deriva litorânea. O ambiente é exposto ao material ligado ao desastre tanto no período chuvoso como no período seco. No período chuvoso tem-se aporte direto de material contaminado no sistema costeiro em função do incremento da vazão no rio Doce; já no período seco, há incremento da frequência de eventos meteorológicos, que promove a remobilização do material.

c) Restinga

O relatório destaca a persistência e os impactos do Material Ligado ao Desastre (MLD) no ambiente costeiro ao longo de cinco anos de monitoramento. Observou-se que a mobilização e o transporte de sedimentos, intensificados em períodos chuvosos e secos, têm afetado significativamente os ecossistemas locais, com maior concentração de lama e elementos químicos próximos à desembocadura e margem norte do rio Doce. Esses fatores têm gerado impactos mais intensos na biota desses compartimentos.

Os diferentes ecossistemas analisados — praia, manguezal e restinga — apresentam níveis variados de impacto, com destaque para alterações ecológicas nos bentos de praia, redução de densidade e tamanho dos caranguejos em manguezais, e comprometimento da vitalidade da vegetação de restinga, apesar de sinais de recuperação ao final do período. A bioacumulação nos caranguejos também mostra variações relacionadas a eventos climáticos.

Por fim, ressalta-se que o monitoramento contínuo é essencial para compreender a resiliência e adaptação do ambiente costeiro aos impactos abióticos e bióticos. A síntese apresentada sugere que os resultados mais detalhados estão disponíveis em materiais suplementares, reiterando a complexidade do cenário estudado.

d) Ecotoxicologia

Os resultados do monitoramento apontam para uma contaminação

significativa no ambiente costeiro por metais e metaloides, como arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb), reconhecidamente tóxicos mesmo em pequenas concentrações. A bioacumulação e a biomagnificação desses elementos nos organismos de diferentes níveis tróficos demonstram impactos biológicos relevantes, com destaque para espécies que habitam ou utilizam o ambiente costeiro para forrageamento.

A Campanha 7 apresentou os maiores valores de bioacumulação, especialmente no Setor C, reflexo do aumento do aporte de contaminantes durante períodos de maior vazão do Rio Doce. Nos pequenos invertebrados de praia, a bioacumulação foi mais expressiva nos Setores A e C devido à deposição de contaminantes vindos da drenagem do Rio Doce, enquanto nos caranguejos destacou-se a presença crônica de Cd, Hg e Zn. Já nas aves costeiras, a relação direta com outros organismos aponta para a biomagnificação ao longo da cadeia trófica. Além disso, os elevados valores de estresse fisiológico e danos genéticos nos caranguejos, associados a biomarcadores como lipoperoxidação (LPO) e danos ao DNA (sítios AP), reforçam os impactos causados pelos contaminantes.

Outro ponto relevante foi a redistribuição de contaminantes nos sedimentos para a coluna d'água, especialmente na Campanha 7, quando foram observados altos níveis de As, Cd, Hg e Pb. Essa dinâmica intensifica os impactos na biota costeira, reforçando a importância do monitoramento contínuo para entender essas redistribuições e seus efeitos no ecossistema.

Por fim, limitações nos métodos analíticos utilizados, como a baixa sensibilidade para detecção de concentrações abaixo do limite estipulado, comprometeram parcialmente a análise de tendências. Para superar esses desafios, recomenda-se a implementação de técnicas mais precisas, como espectrometria de absorção atômica por geração de vapor frio (CV AAS) ou espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS). Esses ajustes são essenciais para garantir análises mais robustas e subsidiar políticas públicas eficazes, promovendo a recuperação ambiental e a proteção desse importante ecossistema costeiro.

4.4.2.3 Proposta de Encaminhamento - Ambiente Costeiro

a) Praias

Alguns pontos dos temas Geoquímica e Morfodinâmica demandam complementações de informações ou esclarecimentos, como apontado na planilha de análise de aderência, sendo recomendada a apresentação destas informações no próximo relatório anual do PMBA.

Quanto ao tema Bentos, recomenda-se aprimorar a análise integrativa dos resultados apresentados para os diversos parâmetros estudados, evidenciando de forma mais objetiva as condições e tendências dos grupos chave da macrofauna e meiofauna em cada compartimento e no conjunto da área de estudo, frente aos cenários de evolução da dispersão do MLD, o que também pode ser atendido no próximo relatório anual do PMBA.

b) Manguezal

Em relação ao mapeamento do ambiente manguezal, vinculado a Meta 2, recomendamos refinamento do produto buscando identificação das feições do ecossistema manguezal para melhor entendimento das áreas de ocorrência dos

caranguejos estudados.

Apresentação dos dados índicos no Anexo com análise da aderência do relatório.

c) Restinga

As principais recomendações concentram-se em aprimorar a coleta e análise dos sedimentos, ampliando a área de amostragem para abranger diferentes microhabitats e garantindo uma representatividade adequada dos dados. Recomenda-se analisar um espectro mais amplo de parâmetros, incluindo granulometria, matéria orgânica, metais pesados, contaminantes emergentes e características físico-químicas, assegurando a padronização dos métodos de coleta e a consistência temporal das amostragens para permitir comparações ao longo do tempo.

Para o material depositado nas folhas ("spray"), é essencial especificar a área foliar coletada, padronizar o volume e o tipo de água utilizado na lavagem (exemplo: destilada ou deionizada) e realizar coletas em diferentes épocas do ano e sob variadas condições climáticas, incluindo períodos de seca e de chuvas intensas, para avaliar a influência das mudanças sazonais na deposição de partículas.

No estudo dos recursos florais, recomenda-se expandir a coleta para um maior número de áreas e habitats, aumentando a representatividade espacial e a diversidade de espécies analisadas. Deve-se ampliar o número de indivíduos por espécie amostrada, considerando variações genéticas e ambientais. A utilização de técnicas avançadas, como sensoriamento remoto, drones e imagens de alta resolução, pode otimizar o mapeamento da vegetação e identificar padrões de distribuição de espécies-chave. Além disso, análises detalhadas devem ser conduzidas sobre as espécies de maior importância ecológica, considerando aspectos como interações polinizador-planta, fenologia floral e composição química do néctar e do pólen.

Nos ensaios in vitro e ex situ, é crucial definir detalhadamente as condições de armazenamento das amostras, incluindo temperatura, umidade e tempo de conservação, para evitar a degradação dos materiais coletados. Deve-se investigar as causas da baixa taxa de sucesso na propagação de espécies, testando diferentes tipos de substratos, condições de luz e umidade, além da aplicação de bioestimulantes ou reguladores de crescimento. Métodos de micropropagação e cultivo de tecidos podem ser explorados para aumentar a taxa de viabilidade das plântulas.

No âmbito das análises laboratoriais, propõe-se integrar a análise de elementos químicos com a avaliação de risco ecotoxicológico, permitindo uma compreensão mais aprofundada dos impactos ambientais. A utilização de água destilada ou desionizada na análise dos sedimentos deve ser padronizada para evitar contaminações externas. Além disso, recomenda-se detalhar os critérios fenológicos para cada espécie estudada, incluindo estágios de desenvolvimento e fatores ambientais que influenciam a germinação. Nos testes de germinação, sugere-se acompanhar parâmetros adicionais além do potencial germinativo, como taxa de emergência, tempo médio de germinação e vigor das plântulas. Para otimizar os ensaios com extrato solubilizado, deve-se ajustar a temperatura de secagem, padronizar a distribuição das sementes e considerar a influência de diferentes solventes na extração de compostos bioativos.

Por fim, as considerações finais reforçam a necessidade de conduzir estudos de longo prazo, garantindo um monitoramento contínuo da área para detectar tendências e variações ambientais. A mitigação dos impactos ambientais deve ser

priorizada, com a implementação de estratégias sustentáveis de conservação e manejo ecológico, promovendo a recuperação de ecossistemas degradados e a preservação da biodiversidade local.

c) Ecotoxicologia

Recomenda-se a revisão dos métodos analíticos, priorizando técnicas mais sensíveis, como a espectrometria de absorção atômica por geração de vapor frio (CV AAS) ou a espectrometria de massas com plasma acoplado indutivamente (ICP-MS), para garantir maior precisão e limites de detecção mais adequados aos níveis esperados no ambiente monitorado.

4.4.3 AMBIENTE MARINHO

4.4.3.1 Avaliação de Impactos Ambientais e Identificação de Tendências nos Parâmetros monitorados

a) Ecotoxicologia:

No presente relatório, houve uma adequação metodológica visando ao atendimento da solicitação de análises por laboratórios certificados, tal qual requerido pelos representantes da Samarco. Em um espectro mais amplo, é possível inferir que as análises requeridas foram cumpridas, seguindo as metodologias previamente adotadas em anos anteriores. Todos os protocolos se mostraram adequados, e respeitaram os procedimentos historicamente adotados neste levantamento de dados.

Contudo, neste relatório, estavam ausentes as informações sobre a metodologia de calibração entre as instituições, de modo a assegurar que não houve divergências significativas entre os resultados das campanhas. Desta forma, recomenda-se que relatórios futuros, considerem este aspecto metodológico prioritariamente, visando a transparência e idoneidade das empresas prestadoras de serviço, e respeitando o trabalho já realizado por instituições públicas, nominalmente a UFRG e UFES.

A malha amostral e as estações de coleta foram observadas e as coletas seguiram o cronograma espaço temporal planejado, representando ambas as estações chuvosas (janeiro-março) e seca (julho-setembro). Da mesma forma, também foram cumpridas as especificações de replicagem das amostras, e do seu processamento até a realização das análises laboratoriais. Ainda, em relação aos objetivos e metas delimitados para o ambiente, estes foram cumpridos ou, quando não cumpridos em sua totalidade, as justificativas se fazem pertinentes e devidamente aprovadas em acordo para o não cumprimento - tais como ajustes metodológicos nos procedimentos de coleta e análise.

Por fim, considerando os aspectos gerais dos dados apresentados, houve uma melhora significativa na apresentação dos dados e na descrição dos resultados, comparativamente aos anos anteriores. Ainda assim, alguns problemas são persistentes, como a **não descrição completa de siglas nas legendas das imagens, tamanho diminuto dos gráficos e dos eixos (especialmente nos dados de microbiota associada a corais) e a pouca integração com outros temas**. Sugere-se que, futuramente, na apresentação dos resultados e conclusões, sejam apresentados elementos gráficos e ilustrativos para ilustrar a síntese dos dados e a comparação temporal do monitoramento.

Análise por grupo trófico

I. Plâncton

A análise de plâncton (frações do fitoplâncton e zooplâncton), historicamente, mostrou estabilidade nos índices e IBR bioacumulação entre as campanhas 4 a 6, após a fase aguda de contaminação com a chegada da pluma de rejeitos. Contudo, o que se observa é que as campanhas 7, 9 e 11 - todas no período chuvoso - mostraram valores elevados de IBR bioacumulação, e a maior diversidade de elementos contribuindo para o incremento do índice. Em todos os setores e campanhas, os elementos Cd, Fe e Pb foram identificados com maior contribuição, enquanto a partir da campanha 6 os elementos As, Pb, Cd e Hg também se tornaram expressivos na composição de elementos que resultam em um maior IBR bioacumulação. Ainda, entre os setores amostrados, há uma pequena variação na composição de elementos mais representativos dos impactos crônicos sobre a assembleia, sendo eles: APA Costa das Algas - Mn, Fe, Zn e Cr; Foz do Rio Doce - Cu, As, Cd, Zn e Pb; Setor Norte - Fe, Cd, Cu, Pb e Zn; e Setor Sul - Fe, Hg, Mn e Pb. **Por fim, o extrato do zooplâncton mostrou, na campanha 11, a maior concentração de metais na série histórica, reiterando que, além das variações sazonais, que influenciam no potencial de bioacumulação destes elementos, também há um efeito acumulativo demarcado interferindo na saúde da assembleia, com consequentes reflexos nas guildas tróficas imediatamente superiores.**

No tocante à análise de biomarcadores, os maiores índices de IBR Biomarcador foram delimitados pela sazonalidade, observando-se incrementos nos valores das amostras coletadas nos setores APA Costa das Algas e Foz do Rio Doce na estação chuvosa, e no setor Norte no período seco. Entre as campanhas, o descritor de peroxidação lipídica mostrou-se altamente relevante para a caracterização do estresse crônico sobre a fisiologia destes organismos, enquanto metalotioneínas foram relevantes para caracterização nos setores APA Costa das Algas e setor Norte. Ainda assim, as campanhas 7-8 e 10 mostraram que todos os marcadores foram relevantes na composição do índice para caracterização do impacto.

II. Plâncton em Abrolhos

Similarmente, os valores de IBR Bioacumulação para o plâncton (zooplâncton e fitoplâncton) nas estações amostrais no PARNA Abrolhos mostram um aumento médio progressivo na série histórica. Ainda que pontualmente as campanhas apresentem redução do índice, a exemplo da campanha 10, na última amostragem realizada foi obtida a maior diversidade de elementos contributivos ao índice. Ao longo do monitoramento, os elementos Cu e Mn foram os mais significativos na contribuição ao índice, sendo a estação ABR04 a que apresenta os maiores impactos e maior concentração de metais em suas amostras.

Para o IBR Biomarcador, a partir da campanha 5 se observa um incremento progressivo do índice em todas as estações amostrais. Os setores ABR02 e ABR04 são aqueles em que se observa, ao longo de todo monitoramento, os maiores índices de reposta biológica, sendo que os índices se correlacionam em suas flutuações sazonais: no período seco ocorre predominantemente o processo de bioacumulação, enquanto na estação chuvosa sequente se evidenciam os impactos na fisiologia. **Também o marcador de lipoperoxidação foi relevante para caracterização de impactos em todas as estações, sendo metalotioneínas**

contributiva para a estação ABR01.

III. Carcinofauna

As tendências de IBR bioacumulação observadas para o plâncton mostram-se similares na análise de carcinofauna. A partir da campanha 7 houve um aumento no índice IBR bioacumulação em todos os setores, comparativamente à estabilização e redução registradas nas campanhas 4 a 6. Também para este grupo foi na campanha 11 que se registraram os maiores valores históricos de concentração de metais no músculo, especialmente na estação APA Costa das Algas. Destaca-se que, na campanha 10, foi observado o aumento na concentração do elemento Hg, o qual passa a ser relevante na composição do índice em todas as estações, resguardadas as proporções de contribuição entre os elementos, da mesma forma que o metaloide As na campanha 11. Por setor, os elementos mais representativos são: APA Costa das Algas - Zn, Cu, Cr e Hg; Foz do Rio Doce - Fe, Cu, Pb e As; Setor Norte - Pb, Hg e Cd; e Setor Sul - Mn, Cd. **Ainda, na campanha 11, houve a maior concentração histórica dos elementos As, Cd, Cr e Cu em todas as estações.**

Para os índices de IBR Biomarcador, o que se observa é um incremento progressivo já a partir da campanha 3. Apesar da redução do índice na campanha 11, sendo marcada a campanha 9 como a de maiores valores médios na série histórica, os dados demonstram que os indicadores fisiológicos atuais estão acima dos valores registrados na guilda pretéritos à chegada do rejeito no ambiente marinho. Os marcadores mais contributivos por setor, historicamente, foram: APA Costa das Algas - PCO, MT, LPObrânquia e LPOhepatopâncreas; Foz do Rio Doce - AP, LPObrânquia, PCO; Setor Norte - AP, LPObrânquia; e Setor Sul - PCO, LPObrânquia. **Para estas populações, os indicadores e a composição do índice são relevantes para a caracterização do estresse crônico e, principalmente, os seus efeitos no *fitness* dos indivíduos, com impactos à capacidade reprodutiva, dinâmica populacional e perda da variabilidade genética.**

IV. Ictiofauna

A guilda é composta pelos peixes carnívoros e onívoros/herbívoros, assim estruturadas as análises desde o primeiro relatório elaborado. Contudo, na campanha 11, houve uma redução no quantitativo total de espécies amostradas, tal como apresentado na seção de metodologia do Material Suplementar para o Ambiente Marinho. Tal fato chama a atenção pois, ainda que mantidas as réplicas, há uma menor representação para caracterização dos efeitos dos elementos metálicos nas espécies que compõe a guilda. Estes grupos são de grande relevância para a avaliação dos efeitos tardios dos impactos, uma vez que os índices de IBR bioacumulação vêm aumentando, em média, progressivamente entre as campanhas e os anos de amostragem. Também as campanhas 7 e 9 se destacam como aquelas em que os índices foram mais elevados em todas as estações, seguindo tendência similar ao plâncton. Também é possível afirmar que as estações chuvosas são aquelas em que o efeito de acumulação se faz mais pronunciado para os peixes carnívoros e onívoros/herbívoros, com o maior valor histórico sendo registrado na campanha 11 na estação APA Costa das Algas.

A respeito dos elementos contribuintes, as campanhas com maiores valores de IBR Bioacumulação são as campanhas 1, 7 e 11, e entre aquelas que apresentam a maior diversidade de elementos contribuindo ao índice

são as campanhas 1-2, 7 e 11. Historicamente, os elementos mais relevantes ao índice em cada estação são: APA Costa das Algas - Fe, As, Mn, Cu, Cr; Foz do Rio Doce - Pb, Cr, Cu, Zn, Mn; Setor Norte - Cu, Cr, As, Zn, Mn; e Setor Sul - Fe, Cd. **Para o grupo dos carnívoros, as campanhas de 4 a 11 mostraram um aumento na concentração média de elementos no músculo do pescado em todas as estações amostrais, sendo Cd, Cr, Cu, Fe, Mn e Pb presentes em todas as campanhas e As apenas na campanha 11. Já para os onívoros a tendência de acumulação é similar aos carnívoros, sendo que a partir da campanha 8 se observa o incremento nas concentrações de As.**

Na análise dos biomarcadores para este grupo, não foi possível uma análise mais aprofundada, uma vez que os dados foram pouco descritos e há falhas na apresentação gráfica dos índices. Foram problemáticas identificadas no material MS_AM_Ecotoxicologia: ausência de dados do setor sul na página 79 (dados históricos pretéritos ao “novo ciclo”); descrição na página 80 como “carnívoros”, mas apresentar análise da guilda; síntese comparativa histórica entre os dados do monitoramento. Ainda assim, o que se compreende é que os marcadores fisiológicos seguem tendências similares de resposta, considerando as flutuações nos grupos tróficos imediatamente inferiores, mas sempre com uma resposta tardia, com os impactos sendo caracterizados alternadamente àqueles mensurados para demais grupos. Historicamente, os indicadores mais contributivos foram atividade da enzima catalase no fígado, mensuração de sítios apurínicos/pirimídicos e lesões histopatológicas de brânquia e fígado (sem que sejam mostrados resultados para estes indicadores ou a indicação de qual anexo são apresentados). Há uma variação entre as contribuições de cada um dos marcadores por setor, não sendo possível indicar um padrão ou mesmo elencar apenas um descritor como representativo para caracterização dos danos; sendo assim, o contínuo monitoramento de descritores que dialogam e se complementam viabiliza uma melhor compreensão sobre a evolução do *fitness* e o impacto sobre a fisiologia.

V. Corais e Hidrocorais

O índice IBR bioacumulação, na série histórica, foi mais elevado nas quatro primeiras campanhas, inclusive na área considerada controle (ABRC01). Relativamente ao índice, a estação amostral ABR01 é a mais impactada, em todas as campanhas amostrais, e ainda que o valor médio do índice tenha sido incrementado em todas as estações na campanha 11, ABR04 foi o ponto mais impactado nesta última, demonstrando ainda não haver uma estabilidade na comunidade para identificação dos padrões de resposta diante das mudanças sazonais de biodisponibilidade dos elementos oriundos do rejeito.

Para a análise dos biomarcadores, há uma demarcação histórica de efeito tardio nestes parâmetros. Houve um acréscimo nos biomarcadores na campanha 1, mas com declínio e redução nos índices históricos até a campanha 6. Para a análise dos efeitos sobre corais e hidrocorais, todos os descritores aplicados são relevantes historicamente e para todos os setores amostrados. O resultado mais relevante deste monitoramento é que, entre as estações amostradas, aquela que apresenta maior impacto sobre o IBR biomarcador é ABR02, e que mesmo que ABR04 e ABRC01 tenham menor impacto, os descritores apresentam valores mais elevados que os dados pretéritos à contaminação. **Sendo assim, há a demonstração de que o estresse sobre estes organismos se torna crônico, e considerando as flutuações nos parâmetros enzimáticos relacionados com as rotas de calcificação e fixação de carbono, há um comprometimento palpável sobre o desenvolvimento destes organismos ao longo do tempo.**

VI. Diversidade Microbiana

Os dados demonstram que os táxons indicadores de presença de metais continuam sendo representativos em todas as campanhas e setores amostrados. Anaerolinaceae, Pirellulaceae e Planctomycetes são os táxons mais citados ao longo do monitoramento, e são os mais representativos na campanha atual não pela sua frequência, mas principalmente por serem diretamente relacionados com as repostas da comunidade microbiana frente à presença de elementos contaminantes metálicos.

Há uma demarcação sugerida da importância dos táxons de acordo com o extrato amostrado. O grupo Anaerolinaceae é sugerido como indicador da coluna de água e, em particular, da água de superfície, com relação à variação de temperatura tolerada. Já nas amostras de fundo predomina o grupo Pirellulaceae que, em todas as campanhas em que se analisou a comunidade microbiana, se fez presente e, especialmente, na Foz do Rio Doce. **Também é a Foz do Rio Doce a estação amostral que, ao longo de todo monitoramento, apresentou não apenas a maior diversidade microbiana, como a maior proporção dos táxons indicadores da presença de contaminantes.** Ainda que pouco mencionado nos relatórios pretéritos, o grupo Planctomycetes foi destacado quanto a sua presença juntamente aos dois grupos supracitados. Este, por sua vez, é um indicador não apenas da presença dos contaminantes, mas de uma mudança estrutural na comunidade. **Sendo assim, os resultados sobre a caracterização da comunidade microbiana reforçam a interpretação de que, diante de um cenário contínuo de remobilização dos contaminantes, por efeitos climático-meteorológicos e de correntes marinhas, há ainda uma instabilidade na sua reestruturação, com um equilíbrio dinâmico onde predominam grupos e táxons relacionados com alterações nos parâmetros ambientais abióticos.** Desta forma, o contínuo monitoramento da comunidade ou, especificamente, dos táxons indicadores, pode ser um caminho viável para verificação da saúde e da qualidade ambiental do ambiente marinho.

VII. Ensaios Ecotoxicológicos e Matriz de Toxicidade

Diferentemente de relatórios anteriores, os dados dos ensaios ecotoxicológicos não foram apresentados a contento. Poucas foram as inferências apresentadas, sendo estruturado um comparativo ao longo da série histórica no escopo da elaboração das matrizes de toxicidade, e não em seção apropriada para a descrição dos resultados com os organismos-teste, como até então foram conduzidos os ensaios com as matrizes sedimento e elutriato.

Já em relação à matriz, essa demonstra que há uma melhora global nos índices de toxicidade comparativamente às amostragens realizadas nos três primeiros anos de monitoramento. Contudo, na campanha 11, houve uma redução de cinco estações com ao menos uma matriz não tóxica, para apenas duas estações com uma matriz (água) não tóxica. **Ainda que sejam relacionados fatores climáticos, meteorológicos e oceanográficos com a disponibilidade do rejeito, há que se considerar que a contaminação possui um efeito crônico persistente, com o aporte de material oriundo da bacia do Rio Doce o qual, continuamente, contribui para as flutuações na concentração de metais e As biodisponíveis para processos biológicos.** Ademais, ainda que as matrizes apresentem as melhoras apontadas, há que se considerar que cada guilda amostrada possui, intrinsecamente, particularidades em sua biologia e ecofisiologia, as quais se refletem diretamente na estruturação da comunidade, na perda da

biodiversidade, no *fitness*, na capacidade reprodutiva e de conectividade genética, além dos próprios processos de bioacumulação observados ao longo da cadeia trófica.

b) Modelagem numérica:

Na matriz de resultados (p.118, Figura 13 do RA2023) e em particular na lista de impactos (p.113, Tabela 1) não há impactos categorizados no tema modelagem numérica (e oceanografia física). Contudo, fica subentendido que os impactos mediados e modulados pelas forçantes meteocenográficas estão relacionados ao tema.

Nesta perspectiva, avaliamos, considerando a mediação meteocenográfica, os seguintes impactos: i) Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez, ii) Aumento do potencial de mobilização do fundo.

A evolução espaço-temporal da turbidez, MPS e salinidade superficial, ainda que indicadores indiretos do MLD, permitiram compreender a dinâmica da dispersão da pluma do Rio Doce e da ressuspensão do material lamoso depositado na plataforma continental (p.29, §1 do MS-AM-Modelagem). Assim, a partir destes indicadores é possível afirmar o seguinte:

Aumentos significativos da vazão do rio Doce aumentam o aporte de MLD para plataforma continental, sendo que as maiores áreas de influência ocorreram da combinação de elevadas vazões com inversões de ventos associado à passagem de sistemas transientes (p.29, §2 do MS-AM-Modelagem).

Após sua chegada à plataforma continental o MPS floclula e sedimenta, formando bancos lamosos. A ressuspensão é promovida sobretudo por ondas e marés, sendo as ondas de gravidade superficiais com Hs maiores do que 2m o principal mecanismo do banco lamoso adjacente à foz do Rio Doce (p.29,§3 do MS-AM-Modelagem).

O MPS (e MLD) em suspensão torna-se disponível para transporte por correntes geradas por vento, pelas correntes residuais de maré ou pela deriva litorânea (p.30,§1 do MS-AM-Modelagem). Os mecanismos de aporte fluvial e ressuspensão interferem na disponibilidade do MPS, na turbidez e na salinidade superficial como eventos crônicos ou agudos, gerando respostas distintas dos indicadores no ambiente dependendo da combinação de forçantes atuando (p.30,§2 do MS-AM-Modelagem).

A deriva litorânea atua como importante mecanismo de transporte, de forma geral, independente da sazonalidade, para a direção norte no subsetor Foz Norte e para sul no subsetor Foz Sul (p.31,§4 do MS-AM-Modelagem).

A corrente costeira e a deriva litorânea podem ser os processos mais relevantes de transporte de sedimentos e MLD para as imediações do Parque Nacional Marinho de Abrolhos (p.32,§1 do MS-AM-Modelagem).

Portanto, a partir destas constatações sobre os indicadores, com relação aos impactos no ambiente marinho, podemos afirmar que:

Todos os setores analisados no Ambiente Marinho foram impactados pelo MLD, sendo o setor foz o mais impactado, seguido dos setores norte e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (p.57 do RA2023).

Ainda há presença do MLD no sedimento, especialmente próximo da foz do rio Doce, sendo que as maiores áreas de influência do aporte fluvial na plataforma continental ocorrem durante eventos que combinam elevadas vazões simultâneas a inversões de ventos (p.61, §3 do RA2023).

A análise da densidade do sedimento superficial e do indicador potencial de mobilidade do fundo mostra que o material aportado à plataforma continental pelo rio Doce decorrente do rompimento da barragem de Fundão alterou as propriedades físicas do sedimento local (p.62, §1 do RA2023).

Os indicadores da presença do MLD evidenciam a deposição e acúmulo tanto no fundo marinho não consolidado quanto em fundos recifais. Há indicação de que o material chega à Foz em um fluxo contínuo, e que, de forma geral, o sinal de MLD no sedimento de fundo tende a ser menor a partir do Ano 2. (p.62, §2 do RA2023).

No setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, a porção rasa dos habitats de lama e areia são os mais impactados. Há evidência da presença do MLD em fundos não consolidados, na região central em direção à plataforma externa. Ressalta-se que foi afetado o habitat de fundo de rodólito, um ambiente ecologicamente muito importante e ambientalmente vulnerável ao aporte de material fino (p.63, §1 do RA2023).

c) Hidrogeoquímica:

Qualidade da água do mar

- **Análise de nutrientes**

Conforme o relatório, os métodos utilizados para a avaliação da qualidade da água e do sedimento foram baseados na composição de índices, cujos cálculos integraram os resultados obtidos durante o PMBA/Fest em comparação aos níveis de referência para os respectivos parâmetros de interesse. Os valores de referência compreenderam tanto limites estabelecidos pela legislação nacional e internacional quanto dados pretéritos publicados para as condições pré-Rompimento da Barragem.

Ainda conforme o relatório, o Ano 1 do PMBA/Fest apresentou aumento no Índice de Incremento de Nutrientes (IIN) na água quando comparado aos demais anos do PMBA/Fest (Figura 1), especialmente no período seco. Em geral, os períodos secos têm maior IIN que os períodos chuvosos, provavelmente em decorrência da ressuspensão do sedimento pela energia das ondas.

O relatório destaca ainda o reconhecimento de um gradiente do IIN ao longo do PMBA/Fest o qual se dá na seguinte direção: Setor Foz > Setor Norte = Setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz. Ainda conforme este, o IIN mostra a persistência da alteração ambiental provocada pelo rejeito até o Ano 4 (Figura 1B). O nutriente que apresenta o maior IIN é a sílica reativa dissolvida, o qual é o principal mineral constituinte do rejeito. O documento indica que o rejeito de minério alterou também as concentrações de nitrogênio, que pode ser mais facilmente fixado pelas bactérias por intermédio do ferro, e que as espécies nitrogenadas podem ser ainda afetadas pelo uso de flocculantes a base de aminas na Barragem (Costa *et al.*, 2022). Outro efeito do rejeito de minério indicado pelo relatório é a alteração da disponibilidade do fósforo a longo prazo no estuário e na plataforma continental devido à sua adsorção aos óxidos de ferro e posterior dessorção com o aumento da salinidade, afirmando que os nutrientes variam constantemente de acordo com a hidrodinâmica da plataforma continental. O relatório destaca também a tendência de restabelecimento das concentrações de nutrientes a valores menores ou iguais ao pré-Rompimento da Barragem a partir do período seco no Ano 4.

Sobre os dados de nutrientes das campanhas do período seco do Ano 5 (abril e julho

de 2023) e da campanha de outubro de 2023, correspondente ao início do período chuvoso do Ano 6, o relatório informa que o IIN permaneceu inalterado em relação aos valores de referência, observando, no entanto, ocorrências pontuais associadas ao aumento do N-amoniaco na estação CA09 S em julho de 2023 (6,97 μM) e do aumento médio do nitrogênio total no Setor Norte em abril de 2023 (média 18,27 μM).

Ainda sobre o período mais recente, o relatório informa que em termos das relações inorgânicas, os Anos 5 e 6 foram majoritariamente limitados em fósforo e nitrogênio, sugerindo um maior equilíbrio na disponibilidade e assimilação de sílica no ambiente marinho.

O indicativo de melhoria do IIN para o período do ano 5 e 6 é um resultado importante, havendo potencial para uma tendência de continuidade, no entanto esta necessita ser acompanhada por série temporal maior para confirmação da estabilidade do padrão de ocorrência. Nesse sentido, verifica-se a necessidade de continuidade do monitoramento por maior tempo para a compreensão em maior profundidade do efeito de eventos climáticos de maior intensidade, seja de anos chuvosos com maiores índices de precipitação na bacia hidrográfica do Rio Doce como quando da entrada de frentes frias e respectivo efeito de ressuspensão e retrabalhamento de sedimentos na zona marinha/costeira por ação de ondas de maior altura.

Nos próximos relatórios, recomenda-se que sejam apresentadas informações sobre a ocorrência de eventos de precipitação ou entrada frentes frias com ondulação durante ou nos dias anteriores a execução de cada uma das campanhas de coleta do PMBA. Esta informação busca dar mais detalhes da condição do ambiente no período de coletas e possíveis efeitos na variação dos resultados, devendo esta análise e discussão ser apresentada nos futuros relatórios.

- **Orgânicos**

HPAs

Em atenção ao acompanhamento de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) em amostras de água com o objetivo de avaliar o indicador de Qualidade de Água proposto para o Tema Hidrogeoquímica, o relatório informa que este parâmetro foi descontinuado no Novo Ciclo do PMBA/Fest, tendo sido, portanto, realizado o reporte dos resultados até agosto/2022.

Dado a interrupção do acompanhamento, as informações apresentadas não serão objeto de verificação pela presente análise dado tratar-se do conteúdo de relatórios pretéritos já oportunamente apreciados em avaliações anteriores.

Recomenda-se, no entanto que as informações em caráter resumido sejam mantidas também nos futuros relatórios para fins de contextualização e de manutenção da série histórica gerada para o período.

Aminas

Inicialmente, o relatório informa que os dados referentes à concentração de aminas ao longo dos anos de monitoramento apresentaram uma grande variação espaço-temporal, sendo principalmente influenciados pela ação de mecanismos hidrodinâmicos e meteoceanográficos. Resgata ainda que os maiores níveis de aminas foram registrados durante o período seco do durante o Ano 1, atingindo os níveis máximos reportados durante todo o monitoramento na foz central do Rio Doce.

Posteriormente, o documento informa uma redução significativa na concentração destes contaminantes para o Ano 2, sendo os maiores registros no Setor Foz do Rio Doce, em especial nos subsetores Central e Norte. Nos períodos chuvosos dos anos 3 e 4 houve registro de máximos de concentração em dezembro/2020 e março/2022. Durante o Ano 4, a partir de março/2022, essa tendência de aumento foi confirmada. Os dados para o período chuvoso do Ano 5 apresentam uma continuidade do perfil observado para o setor Foz do Rio Doce em relação ao registrado durante os períodos chuvosos do Ano 4. **As concentrações de compostos orgânicos nitrogenados continuaram aumentando principalmente na Foz Central, onde os valores médios atingiram patamares similares aos encontrados durante o período chuvoso do Ano 1.**

Ainda conforme o relatório, o padrão de aumento durante os períodos de chuva e diminuição no período seco, com exceção para o Ano 1, denota a importância dos processos meteoceanográficos e hidrodinâmicos na dispersão desse material que em decorrência da vazão do Rio Doce, continua adentrando na região da foz do Rio Doce e plataforma adjacente. Essa contínua tendência de aumento denota a importância de avaliação deste parâmetro no que diz respeito a sua relação com o rejeito. **Embora os níveis remanescentes de concentração desses compostos sejam inferiores em relação aos registros observados próximos ao rompimento da barragem, o documento ressalta a persistência desses poluentes nas lamas de rejeitos de minério de ferro, que por sua vez ainda são remobilizados e disponibilizados ao meio ambiente. O documento destaca ainda a importância da continuidade deste monitoramento devido à escassez de estudos relacionados à toxicidade desses compostos e à falta de limites regulatórios no país.**

Por fim, conforme os resultados dos anos 5 e 6, verifica-se a necessidade de continuidade do presente acompanhamento dado a notável persistência dos sinais do rejeito no ambiente, conforme concluído pelo monitoramento para a ocorrência de Aminas.

Nos próximos relatórios, recomenda-se que sejam apresentadas informações sobre a ocorrência de eventos de precipitação ou entrada frentes frias com ondulação durante ou nos dias anteriores a execução de cada uma das campanhas de coleta do PMBA. Esta informação busca dar mais detalhes da condição do ambiente no período de coletas e possíveis efeitos na variação dos resultados, devendo esta análise e discussão ser apresentada nos futuros relatórios.

Metais

Inicialmente, o relatório indica que os índices CWQI tiveram melhora durante o período de monitoramento. No que se refere anos mais recentes, o Ano 5 registrou para o período chuvoso e seco uma melhora nos índices de qualidade, com índices excelentes, os quais se mantiveram também para o período chuvoso do Ano 6. Conforme o documento, a melhora nos índices de qualidade da água pode estar associada à baixa concentração de metais dissolvidos e totais, assim como a fatores climáticos na região.

O relatório conclui ainda que ao longo do período de monitoramento ficou evidente a influência do rejeito, principalmente para o Ano 1 onde ocorreram vários episódios de índices razoáveis e dois momentos com índice marginal. Destaca ainda que o Ferro é o principal elemento responsável pelo decaimento nos índices de qualidade CWQI bom, e essa concentração de Ferro dissolvido está diretamente ligada ao rejeito. Indica que quando os níveis do elemento estão dentro do referencial, os índices CWQI registram uma melhora, como observado para os Ano 5 e 6. Assim, conclui ainda que a melhora na qualidade da água pode estar associada a baixa concentração de metais dissolvidos e totais, bem como, associados a fatores

climáticos na região.

Ainda sobre a qualidade da água, o relatório aponta que “o principal responsável pela diminuição dos índices de qualidade para a região foram as concentrações de Arsênio na fração total para todos os períodos, variando de 29,948 a 179,000 $\mu\text{g.L}^{-1}$, e apresentando valores acima dos limites de referência ($< 10 \mu\text{g.L}^{-1}$). Além disso, as concentrações de Ferro ($2,145 > \text{Fe} \leq 339,919 \mu\text{g.L}^{-1}$) e Zinco ($0,118 > \text{Zn} \leq 120,052 \mu\text{g.L}^{-1}$) dissolvido e, Chumbo ($0,507 > \text{Pb} \leq 28,844 \mu\text{g.L}^{-1}$) e Zinco ($2,515 > \text{Zn} \leq 1.019,475 \mu\text{g.L}^{-1}$) na fração total foram os principais responsáveis pelos índices classificados como razoável.”

Conforme o relatório, a análise da linha de tendência indica uma sensível melhora nos índices de qualidade de água para a região da foz do Rio Doce. Destaca ainda que no Ano 5 a região teria atingido uma melhora, passando de Bom para Excelente entre os períodos chuvosos e se estabilizando no período seco, o que também foi observado para o Ano 6. Conclui ainda que a melhora é reflexo do registro de menores concentrações de metais dissolvidos e totais para a água ao longo do período de monitoramento.

Por fim, conforme os resultados dos anos 5 e 6, verifica-se a necessidade de continuidade do presente acompanhamento dado a notável persistência dos sinais do rejeito no ambiente.

Nos próximos relatórios, recomenda-se que sejam apresentadas informações sobre a ocorrência de eventos de precipitação ou entrada frentes frias com ondulação durante ou nos dias anteriores a execução de cada uma das campanhas de coleta do PMBA. Esta informação busca dar mais detalhes da condição do ambiente no período de coletas e possíveis efeitos na variação dos resultados, devendo esta análise e discussão ser apresentada nos futuros relatórios.

Qualidade do sedimento marinho

• Orgânicos

Conforme o relatório, para a avaliação da qualidade do sedimento foi aplicado o índice SQG-q para metais e compostos orgânicos com base na legislação nacional vigente e valores norteadores internacionais, bem como em relação aos dados Pré-Rompimento da Barragem (Petrobrás, 2015) e Pós-Rompimento da Barragem no âmbito do PMBA (anterior ao PMBA/Fest - UFES, 2016). A seguir comenta-se os principais resultados obtidos para o período.

Conforme o relatório, de forma geral, os níveis deste tipo de contaminante seguem elevados no sedimento. Para os períodos seco e chuvoso do Ano 5 as concentrações de HPA totais aumentaram significativamente, atingindo níveis similares aos observados no período seco do Ano 1 e superiores ao período chuvoso do mesmo ano, porém os níveis mais elevados ocorreram sempre no período seco. O relatório destaca que os níveis de concentração ainda excedem os dados pretéritos ao rompimento da barragem de rejeitos. Salienta também sobre a contribuição continental e sobre a redistribuição de material depositado em hotspots do leito, onde condições físicas e geológicas favorecem o acúmulo.

• Metais

Inicialmente, o relatório apresenta um resgate para o período total do monitoramento (anos 1, 2, 3, 4, 5 e 6) apontando para a ocorrência de

estabilidade de índices na categoria moderadamente impactados para a qualidade do sedimento, com alternância de episódios de índices não impactados em alguns meses ao longo dos anos. O relatório destaca ainda que os principais elementos que determinaram o decaimento nos índices de qualidade do sedimento para a estação Abrolhos foram as concentrações de Mercúrio e Arsênio para o período chuvoso do Ano 1 e do Ano 3. Já para a Região Sul e para a APA Costa das Algas foram os elementos Arsênio, Níquel e Mercúrio enquanto para a Região Norte foram as concentrações de Níquel, Arsênio, Prata e Mercúrio, e para a região da Foz do Rio Doce as concentrações dos elementos Arsênio, Prata e Mercúrio.

Em atenção aos anos mais recente, o relatório indica que para o Ano 5, durante o período chuvoso houve registro de índices moderadamente impactados, com valores variando de 0,11 a 0,14 e média $0,12 \pm 0,02$ e no período seco variando de 0,07 a 0,28 com média de $0,17 \pm 0,06$. Destaca ainda que durante o período chuvoso do Ano 6 houve registro da média de $0,42 \pm 0,001$.

Especialmente para a região da foz, o relatório destaca a alta variabilidade em relação aos valores de metais dos índices de qualidade de sedimentos durante o período de monitoramento, informando, de forma geral, o predomínio da categoria moderadamente impactado para todo o período de monitoramento, porém com registro de episódios de índices altamente impactados.

Ainda conforme o relatório, no período chuvoso do Ano 5 a região da Foz apresentou uma melhora na qualidade de sedimentos, variando de 0,06 a 0,21 e média de $0,13 \pm 0,04$, enquanto para o período seco a variação foi de 0,07 a 0,28 com média de $0,17 \pm 0,06$. Destaca ainda que para o período chuvoso do Ano 6 ocorreu incremento dos índices SQG-q, com variação de 0,34 a 0,65 e média de $0,42 \pm 0,07$. **O documento destacou que apesar do aumento na última coleta do monitoramento, verifica-se uma melhora nos índices de qualidade de sedimentos na Região da Foz do Rio Doce, como observado pelo cálculo da linha de tendência constante na Figura 10, a qual apresentou declividade levemente negativa, com tendência de valores de SQG-q menores que a 0,1.**

Em conclusão, sobre o comportamento dos dados, o relatório salienta que os maiores picos nos índices SQG-q ocorrem nos períodos chuvosos, momento em que os altos índices pluviométricos contribuem para o aumento da vazão do Rio Doce, que por consequência amplifica o carreamento de sedimentos para a Região da Foz, sendo este fator evidenciado principalmente pelo aumento nas concentrações de metais e consequentemente na diminuição dos índices de qualidade dos sedimentos.

Quanto às ações de acompanhamento do elemento Fe (indicadores % ADP – Fe e IR – Fe) para as concentrações de Fe no sedimento, o relatório destaca que as condições mais degradadas ocorreram durante os períodos chuvosos para os setores Foz do Rio Doce e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, padrão o qual indica aportes externos de Fe com o aumento da vazão do Rio Doce nas estações chuvosas, e consequentemente a transferência de metais do sedimento para a coluna d'água nos períodos secos (LONGHINI et al., 2022). Sobre as ocorrências, o documento resgata que as condições mais degradadas ocorreram no período chuvoso do Ano 1 para o Setor Foz do Rio Doce, em que o % ADP se enquadrou na categoria altamente alterada (% ADP - Fe ≥ 75 %), enquanto o IR – Fe alcançou o nível 2,0, indicando que as concentrações médias avaliadas foram o dobro dos valores registrados no momento pré-Rompimento da Barragem.

Nos anos seguintes, o relatório informa a ocorrência gradual de melhora

dos índices, destacando que para o período seco do Ano 5 e chuvoso do Ano 6 (coleta de Out/2023), essa condição de melhora da qualidade foi ainda mais marcante, com a ocorrência da categoria não alterada (% ADP - Fe = 0) no Setor Foz do Rio Doce e muito pouco alterada (% ADP - Fe \leq 25 %) na APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, enquanto o IR - Fe alcançou o valor mínimo de 0,4. Ainda conforme o relatório, a melhora da qualidade do sedimento quanto aos níveis de Fe pode refletir o decréscimo do aporte externo de rejeito pela calha do rio, além da assimilação biológica e efeitos de dispersão por processos hidrodinâmicos na plataforma continental, ocasionando transporte de sedimento para áreas mais externas.

O relatório destaca ainda que apesar das melhoras acima citadas, foi detectado piora dos índices para a região de Abrolhos, conforme a seguir reproduzido:

“Para o setor Abrolhos, no entanto, observa-se uma tendência de piora da qualidade para o Fe sedimentar do Ano 1 (categoria % ADP - Fe pouco alterada) ao Ano 4, com o cenário mais degradado durante o período seco do Ano 3 (altamente alterado; % ADP - Fe \geq 75 %). Sedimentos provenientes do Rio Doce e do rejeito enriquecido com minério de Ferro foram identificados no Banco de Abrolhos principalmente no período seco, cujo transporte foi associado à passagem de sistemas frontais e ventos do quadrante sul (EVANGELISTA et al., 2022). O transporte sedimentar líquido na região da foz do Rio Doce ocorre em direção Norte devido à ação de ondas de maior altura (QUARESMA et al., 2015). Considerando a elevada energia hidrodinâmica e intensificação da deriva litorânea no período seco, é provável que, ao longo do tempo, o sedimento alterado pela deposição do rejeito de minério de ferro tenha sido transportado cada vez mais ao norte (i.e., do Rio Doce para o Banco de Abrolhos). Com a descontinuidade do monitoramento da Hidrogeoquímica para o Setor Abrolhos no Novo Ciclo do PMBA/Fest não é possível acompanhar a evolução desse processo ao longo do espaço e tempo.”

Fonte: Material Suplementar Ambiente Marinho Tema: Hidrogeoquímica RT- 46/ JUN 24. Página 41. Grifo nosso.

Sobre o texto acima reproduzido, o relatório apresenta como possível causa para a piora na qualidade do sedimento para o elemento Ferro no setor Abrolhos o transporte gradual do material para o Norte ao longo do tempo de monitoramento. No entanto, não são apresentadas informações e discussão em maior detalhe sobre os efeitos do aumento do Fe no sedimento para o setor Abrolhos ou sobre a eventual necessidade de retomada do monitoramento após sua descontinuidade no Novo Ciclo do PMBA/Fest.

Nesse sentido, recomenda-se que o presente aspecto seja aprofundado no próximo relatório, apresentando informações e eventuais justificativas sobre a necessidade de retomada ou não do monitoramento de Fe no setor Abrolhos no contexto do conjunto de demais ações de monitoramento em curso no PMBA.

Assinatura geoquímica dos elementos Terras Raras

Em atenção às informações envolvendo a distribuição dos elementos ETR/PAAS nas amostras de sedimento superficial marinho do PMBA/Fest, o relatório constatou a ocorrência de um padrão similar com a assinatura do rejeito de minério no Ano 1, 2 e 3 do monitoramento. Para os anos mais recentes (agosto de 2022 a outubro de 2023, Anos 5 e 6) o relatório aponta não haver similaridade da assinatura mineral do rejeito com o dados dos setores monitorados, trazendo o exemplo dos resultados para a campanha de janeiro de 2020 (Ano 2) como um ambiente potencialmente

contaminado pelo rejeito - incluindo a região de Abrolhos, ficando evidente a diferença nos resultados para o período atual na comparação realizada.

Desta forma, o relatório aponta que a partir de novembro de 2021 o ambiente marinho vem se mostrando igual para este marcador, com incremento significativo dos elementos terras raras leves Ce e Nd. Destaca, no entanto que os referidos elementos são constituintes da areia monazita, a qual é comumente encontrada nas praias da costa do ES, sendo este um fator que pode estar mascarando um possível resultado positivo para a presença do rejeito, ressaltando a necessidade de interpretação dos resultados juntamente aos achados dos demais marcadores propostos pelo PMBA/Fest. Destaca ainda que a ausência de similaridade entre as assinaturas geoquímicas no período recente não indica ausência de rejeito.

d) Sedimentação Marinha:

- Os indicadores relacionados à identificação e avaliação de impactos, adotados na seção que trata da sedimentação marinha, foram os seguintes:
- Material particulado em suspensão - MPS,
- Mobilidade do sedimento de fundo e
- Sinal do rejeito - IMS (Iron Mineralogical Set- o marcador de rejeito no sedimento).

Estes indicadores foram apresentados de forma setorizada, considerando as similaridades hidrodinâmicas e sedimentológicas do compartimento marinho.

Outros indicadores (não diretamente relacionados aos impactos) também foram apresentados e discutidos:

- Teor de matéria orgânica (%MO),
- Integridade do habitat.

Potencial de mobilidade do sedimento superficial de fundo

Foram identificados fundos com lama fluída nos setores: Foz Norte, Foz Central, Foz Sul e APA Costa das Algas, com destaque para os setores Foz Central e Foz Sul. Este último setor foi o com maior número de observações de fundos com lama fluída (figuras 21 a 24 do MS-SM).

Houve um aumento do número de ocorrências de lama fluída no ano 2 e redução no ano 3. Nos anos 4 e 5 a ocorrência de fundos de lama fluída foram maiores que o ano 3, porém a ocorrência continuou menor que os primeiros anos do monitoramento.

Foi observado aumento no potencial de mobilização do sedimento associado à redução da densidade superficial do sedimento de fundo (p. 25 do Material Suplementar - Sedimentologia Marinha).

Valores de IMS (IRON MINERALOGICAL SET) e presença do sinal do rejeito no sedimento de fundo

• Setor Abrolhos

O relatório afirma que a presença do sinal de rejeito para esse setor é inconclusiva, uma vez que foi observado aumento da susceptibilidade magnética acima do valor de referência (indicativo da presença de rejeito) apenas no período chuvoso do Ano 04, onde a presença do sinal do rejeito foi registrada em apenas uma estação amostral (p. 26).

Contudo a figura 25 (p. 45 do Material Suplementar - Sedimentação Marinha) dá a entender que há, com a passar dos anos, aumento progressivo do IMS e um sinal crescente da Susceptibilidade Magnética no Setor Abrolhos.

- **Setor Norte**

O Setor Norte apresenta concentrações de IMS e susceptibilidade magnética pouco acima dos valores de referência (Figura 27). Na comparação entre período seco e chuvoso, não foram observadas variações significativas.

A presença do sinal do rejeito (Figura 28) foi observada em todas as campanhas e ocorreu com maior frequência nas estações mais ao sul e próximas à costa.

Na figura 27 (p. 47 do Material Complementar - Sedimentologia Marinha) é possível identificar um grupo de 'outliers' que se destacam acima da distribuição, tanto para os dados de susceptibilidade magnética quanto para os dados de IMS. Estes dados carecem de interpretação, entendemos que pode tratar-se de algum processo de transporte que ainda não foi considerado.

- **Setor Foz**

A evolução espaço-temporal do sinal de rejeito para o Setor Foz do Rio Doce continua respondendo ao padrão de transporte de sedimento na região marinha adjacente à foz do Rio Doce, com os maiores volumes sendo observados na porção rasa dos setores.

O transporte do material apresenta direção preferencial para norte/nordeste, preferencialmente em profundidades inferiores a 20 m.

Os maiores valores de IMS (%) e susceptibilidade magnética foram observados no setor Foz Central.

Os indicadores permanecem acima dos valores de referência, ainda que uma redução em relação aos primeiros anos tenha sido observada.

Nos pontos mais rasos e próximos à foz do Rio Doce o sinal de rejeito permanece consideravelmente alto, indicando que o aporte de MLD tem sido constante (p. 54 do MS - SM).

- **Setor APA Costa das Algas**

Os valores de IMS e susceptibilidade magnética para o Setor APA Costa das Algas ficaram, em sua grande maioria, próximos ao valor de referência.

Os indicadores permaneceram no mesmo patamar ao longo do período de monitoramento.

As escalas dos gráficos apresentados nas figuras 25 a 30 dificultam a interpretação e comparação entre os diferentes setores. Também há falha na escolha das escalas como no caso da figura 29, que usa uma escala de 0 a 100, quando os dados variam no intervalo ~0 a 50. Para corrigir estes problemas os dados deveriam ser apresentados em gráficos para cada um dos setores, com os intervalos correspondentes aos seus mínimos e máximos. Também deveria ser apresentado um gráfico com o comparativo dos dados de todos os setores.

Acumulação de rejeito no fundo marinho

Os índices de IMS (%) continuam evidenciando a presença de sinal de rejeito.

O relatório infere que o MLD inicialmente se deposita nos setores Foz Sul e Central, sendo posteriormente deslocado para a direção norte/nordeste.

Extensão e integridade do *habitat* marinho

• Setor Foz:

Nas estações de coleta em frente à foz do Rio Doce e em direção norte, até a profundidade de ~30m, há reincidência do valor do IMS acima do nível de referência indicando que o habitat lamoso da plataforma interna adjacente à foz do Rio Doce está impactado.

As regiões lamosas em frente à Foz do Rio Doce e a Degredo são as mais impactadas com o sinal do rejeito, observado em mais de 75% dos estratos de testemunhos nessa localidade.

Nas estações ao norte de Degredo o impacto na comunidade bentônica só foi observado no ano 4 do monitoramento.

Na porção externa da plataforma adjacente à foz do Rio Doce, as estações mais associadas ao habitat arenoso indicam sinais descontínuos de presença de rejeito entre os anos de monitoramento ou nenhum sinal.

• Setor APA Costa das Algas:

A porção rasa de habitat de lama e areia foi a mais afetada ao longo dos anos, nesta há a ocorrência de fundos rígidos associados a possíveis terraços de abrasão onde não ocorre, necessariamente, monitoramento do impacto

Na região ao sul, atingindo a parte rasa da APA Costa das Algas, a porcentagem dos estratos acima do valor de referência ultrapassa 35%.

Apesar de serem encontradas apenas uma única evidência da presença do sinal do rejeito, a região em questão apresenta uma alta complexibilidade e importância em termos ecológicos.

• Setor Abrolhos:

Foi observado, no ano 4, impacto na comunidade bentônica em um habitat de cascalho. Contudo o resultado é consistente com o dos demais setores.

Considerações finais sobre os 5 anos de monitoramento acerca dos indicadores observados e o ambiente monitorado

Os valores da concentração de MPS continuam maiores que os valores de referência (dados pretéritos de 2013 e 2014 nos setores Foz), ainda que se tenha observado uma tendência de redução das concentrações de MPS a partir do primeiro ano pós-rompimento.

Durante eventos hidrológicos extremos do Rio Doce ou eventos de alta energia na plataforma continental ocorrem picos de MPS (§1 a 3, p. 66 do MS-SM).

- **Setor Foz:**

A foz do Rio Doce é a região mais afetada pelo aporte de rejeito de minério de ferro. O material aportado à Plataforma Continental pelo Rio Doce alterou as propriedades físicas do sedimento local (§4, p. 66 do MS-SM).

Na plataforma interna do setor Foz Central observa-se, de forma consistente, a presença do sinal de rejeito nos sedimentos e uma tendência de aumento significativo (p-valor < 0,05) da razão calculada - IMS% (§5 a 3, p. 66 do MS-SM).

Análise conjunta, do IMS, potencial de mobilidade e impacto na comunidade bentônica, mostrou que o habitat lamoso em frente à foz do Rio Doce, e em direção ao norte (até a profundidade de ~30m), encontra-se impactado (§1 a 3, p. 67 do MS-SM).

- **Setor REVIS/APA Costa das Algas:**

Nas estações rasas até 36m, a análise conjunta revela que a porção rasa dos habitats de lama e areia são os mais impactados (§2, p. 67 do MS-SM).

Na região central em direção à plataforma externa da APA Costa das Algas, há indícios da presença de sinal de rejeito e do impacto na comunidade bentônica, ainda que os resultados não são constantes (§3, p. 67 do MS-SM).

- **Setor Norte:**

Na região dos Recifes Esquecidos e região de Barra Nova e Itaúnas, foram identificados aumento significativo do MPS e da mobilidade do sedimento superficial de fundo (§1 a 3, p. 68 do MS-SM).

Os resultados de integridade do habitat mostraram impactos no ano 4 do monitoramento no habitat arenoso e de rodolito, bem como de cascalho em Abrolhos. Entretanto, o resultado não tem consistência espaço-temporal ao longo dos anos neste setor (§2 a 5, p. 68 do MS-SM).

e) Fitoplâncton

A análise das últimas informações sobre a comunidade fitoplanctônica, principal produtora primária dos ecossistemas aquáticos marinhos, apresenta uma informação relevante: **o fitoplâncton da região de estudo tem apresentado melhoria de qualidade em termos de densidade e saúde. Entretanto, para a região da Foz, a diversidade local ainda tem sido impactada. Ou seja, apesar da melhoria ambiental, a comunidade fitoplanctônica ainda se encontra influenciada pelas variações do rio Doce.** Esta afirmação é corroborada pela acumulação de metais e arsênio demonstrada pelo indicador IBR bioacumulação referente à biomassa do plâncton (fitoplâncton e zooplâncton). Essa acumulação tem sido crescente na comunidade planctônica a partir da estação chuvosa do ano 4. **Em seu relatório, a FEST destaca que no “período chuvoso do Ano 4 foi observado o maior nível de bioacumulação de metais e arsênio registrado em todo o monitoramento no setor Norte, enquanto no período**

chuvoso do Ano 6 foi observado o maior nível de bioacumulação de metais e arsênio registrado em todo o monitoramento para os setores da APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e da Foz.”

Quando analisada, a variação espaço-temporal do Índice Ambiental do Fitoplâncton Marinho apresenta melhora em relação a quantidade (densidade total) e, especialmente, na qualidade (clorofila ativa) ao longo do monitoramento. Adicionalmente, notamos que o setor Abrolhos pode ser considerado o mais impactado nas primeiras campanhas e nas últimas, o menos impactado. Ou seja, é razoável o entendimento de que, para este indicador, o setor teve o melhor índice de melhora ambiental dentre todos.

Por fim, com relação à diversidade, apesar da tendência de melhora, esta ainda é considerada impactada, especialmente no setor foz.

f) Zooplâncton:

Para o zooplâncton, assim como para o fitoplâncton, o IBR bioacumulação se destacou nos anos 4 e 6, com os maiores índices de bioacumulação de metais e arsênio para comunidade planctônica (fitoplâncton e zooplâncton). Enquanto no período chuvoso do ano 4, quando foram encontrados os maiores índices para todos os setores, houve um pico no setor NORTE, no período chuvoso do ano 6 o pico ficou evidenciado para os setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e da Foz. Considerando-se apenas o zooplâncton, as concentrações de metais e arsênio continuam superiores aos valores pré-rompimento para todos os setores, o que tem gerado efeitos considerados crônicos neste grupo. **Acredita-se que, neste ambiente, a maior parte dos impactos encontrados no zooplâncton seja originária do fitoplâncton, caracterizando a biomagnificação descrita em vários momentos do relatório. Neste contexto é relevante destacar que, frente aos dados, a FEST afirma que os contaminantes evidenciados pelo IBR bioacumulação são característicos do MLD.**

Estes contaminantes geraram alterações na estrutura e composição da comunidade zooplanctônica, apesar de aparentarem melhora a partir do ano 4. Neste contexto, naturalmente os indicadores para o setor Foz mostraram uma relação direta dos impactos na estrutura da comunidade com o fluxo do Rio Doce e, principalmente, com as concentrações de metais na água. **Nesta região, estes impactos se traduziram no estabelecimento de uma comunidade dominada por espécies resistentes a condições ambientais adversas.**

É relevante destacar que, de forma aparentemente contrastante com os indicadores para fitoplâncton, o setor da APA Costa das Algas foi o que apresentou indicadores de impacto menos expressivos quando analisado apenas o zooplâncton. Estes resultados podem estar ligados a questões temporais ou mesmo estarem sendo atenuados pelas características de proteção ambiental da região.

Finalmente, o atual relatório fez uma comparação de composição de comunidade entre os dados do PMBA e do projeto de Caracterização Ambiental da Bacia do Espírito Santo e porção norte da Bacia de Campos (AMBES) (Petrobras, 2015). Nesta comparação com dados considerados pretéritos ao rompimento, segundo a FEST, “a comunidade zooplanctônica ainda está longe de atingir o patamar de conservação observado antes do rompimento da barragem de minério e chegada do material de rejeito na região costeira”.

g) Ictioplâncton:

Para as amostras obtidas neste relatório, nos quatro setores estudados, e ao longo de todo o monitoramento, foi registrado um maior percentual de ovos não viáveis, representando em média mais de 50% da amostra em cada campanha, acarretando uma redução na diversidade dos táxons.

Além disso, foi registrado aumento da quantidade de material em suspensão, o que provavelmente prejudicou a respiração das larvas dos peixes.

Os testes estatísticos (ACP e GLM) realizados com os parâmetros ambientais e as densidades de ovos de peixes mostraram que os ovos não viáveis tiveram relação direta com a alta disponibilidade de metais/semi-metais, principalmente manganês, cromo, ferro, bário e cobalto, oriundos do rompimento da barragem, indicando a influência destes rejeitos na comunidade ictioplanctônica marinha.

Em relação à integridade morfológica das larvas de peixes, ao longo de todo o monitoramento foram observadas larvas de peixes com trato digestório danificado, e em todas as campanhas. Nos estágios iniciais de desenvolvimento dos peixes a toxicidade dos metais é mais acentuada e tem diversos efeitos sobre as larvas.

Importante observar que as larvas com trato digestório danificado foram encontradas bem distantes da costa (até a aproximadamente 35 km) demonstrando o efeito do rejeito da SAMARCO em ambientes marinhos profundos.

h) Bentos de fundos inconsolidado:

Os bentos de fundos inconsolidados são uma fração biológica importante para o monitoramento do ambiente marinho, pois estão intimamente associados aos sedimentos e podem trazer respostas rápidas a perturbações físicas e químicas, havendo diversas espécies que funcionam como bioindicadoras destas perturbações.

Assim como em anos anteriores, neste relatório os grupos taxonômicos Mollusca e Polychaeta foram definidos como indicadores por serem encontrados em altas densidades em diversas estações amostrais, além de serem táxons consagrados como bioindicadores de impactos em ambientes marinhos. Para Mollusca, foram feitas análises separadas, considerando a presença de partes moles (indicando presença de organismos vivos na amostra) ou de vestígios (conchas). Quando os vestígios foram considerados na análise, Mollusca, Arthropoda (subfilo Crustacea, Classe Ostracoda) e Bryozoa se destacaram como os grupos mais abundantes ao longo dos 6 anos de monitoramento, especialmente os vestígios. Se os vestígios são retirados da análise, Polychaeta, passa a ser o grupo mais abundante, seguido por Nematoda, Crustacea e Bryozoa. Os organismos coletados foram triados e identificados até o menor nível taxonômico possível, não sendo objetivo deste monitoramento a identificação até o nível de gênero ou espécie.

Com relação à aderência ao Plano de Trabalho, as amostragens foram realizadas de acordo com o cronograma (frequência trimestral), malha amostral e metodologia indicados. As análises de dados propostas foram todas realizadas, com exceção dos mapas mencionados no item *“Construção de mapas de ocorrência e abundância dos organismos associados aos fatores ambientais na área amostral”*, que não constam do relatório (Material Suplementar – Bentos de Fundos Inconsolidados).

Com relação às métricas utilizadas para a análise dos dados (Abundância/Densidade – número de indivíduos de cada táxon presentes em um volume de amostra triado; Riqueza – número de táxons em determinada amostra; Diversidade – índice de diversidade de Shannon-Wiener; Equitabilidade – índice de Equitabilidade de Pielou; e, Dominância – índice de dominância de Simpson), destacamos os seguintes resultados.

A abundância da macrofauna bêntica foi maior em Abrolhos, seguido dos setores Foz e APA, e menor no setor Norte; e, foi menor nas amostras mais rasas (entre 7 – 20 metros). Com relação à evolução temporal dos valores de abundância, a partir da campanha de 08-22 ocorreu um progressivo aumento, com os maiores valores observados em 10-23. No entanto, esse aumento esteve associado a alta presença de vestígios de Mollusca, o que indica aumento na mortandade de organismos, e não a recuperação da macrofauna. Essa situação se reflete também nos menores valores de riqueza e diversidade observados na última campanha (10-23). No geral, ao longo de todo o monitoramento, os menores valores de diversidade foram encontrados nas campanhas 01-23 e 10-23, e o maior valor na campanha 01-19.

As análises foram apresentadas também separadamente para cada grupo dos mais abundantes, com os seguintes destaques.

Foi observada maior riqueza e diversidade de Mollusca com partes moles em Abrolhos e menor na Foz, região que recebe o maior aporte de rejeito. Os maiores valores de riqueza para esse grupo foram observados no período chuvoso do Ano 1, diferindo significativamente da última campanha (período chuvoso, 10-23). Em síntese, os maiores valores de abundância, riqueza e densidade de Mollusca com partes moles estão associados ao setor Abrolhos e às maiores profundidades.

Para os Polychaeta, destaca-se a maior abundância e menor diversidade no setor Foz, associadas à presença da família Spionidae (tolerante a metais, enriquecimento orgânico e baixas concentrações de oxigênio) e Magelonidae (indicadores de poluição; tolerantes a eventos de estresse), consideradas tolerantes aos impactos. Em termos temporais, a diversidade foi maior no primeiro ano de monitoramento, com a campanha de 04-22 (período seco) apresentando os menores valores. Por outro lado, a riqueza foi maior nas maiores profundidades.

Outro grupo importante e indicador de perturbação antrópica é o Filo Nematoda, que apresentou aumento na abundância ao longo do monitoramento, passando a ser o segundo mais abundante no geral e o mais abundante no quinto ano de monitoramento (desconsiderando-se os vestígios de Mollusca). Estudos indicam que abundância, riqueza e composição de assembleias de Nematoda podem ser afetados por contaminantes encontrados no rejeito, como Cromo e Mercúrio.

i) Fundos Recifais:

Para fundos recifais, a análise dos indicadores para as comunidades mostrou alteração significativa na sua estrutura após o rompimento. Na maioria das regiões monitoradas do setor Abrolhos, a cobertura por corais do Grupo Funcional (GF) Agaricias, relativamente pequenos, de crescimento mais rápido e vida mais curta, tendeu a aumentar após o rompimento. Em caráter contrastante, houve declínio do GF Milleporas, hidrocorais ramificados de crescimento rápido. Adicionalmente, A cobertura do GF Montastraeas, que abrange corais longevos de

crescimento lento e esqueletos mais densos, tendeu a diminuir em todas as regiões após o evento.

Cumprimento de metas, avaliação de impactos e identificação de tendências

O tema de “fundos recifais” inserido no âmbito do Ambiente Marinho do PMBA compreende coletas de dados, análises e interpretações de áreas compostas majoritariamente por recifes coralíneos. Nota-se que a malha amostral proposta no plano de estudo (A: PARNAM Abrolhos, B: Recifes Esquecidos, C: Foz do Rio Doce, D: Costa das Algas) compreende os principais sistemas recifais desde a foz do Rio Doce (onde desaguaram os rejeitos do desastre) até o norte do Banco dos Abrolhos, sendo uma malha robusta para se realizar uma avaliação do gradiente de impacto dos rejeitos. Apesar da dificuldade de se ter um controle ao iniciar um projeto após o desastre do qual se pretende medir o impacto, a malha temporal desse tema abrange datas pretéritas, o que permite sólida base de comparação.

De uma forma geral, os resultados apresentados no relatório mostram que corais pertencentes a grupos funcionais de crescimento lento e massivo (MONTASTRAEAS e MUSSISMILIAS) sofreram um declínio de cobertura, enquanto corais de crescimento mais rápido (MILLEPORAS e AGARICIAS) tiveram um aumento, o que pode indicar que esteja acontecendo uma mudança gradual na comunidade semelhante ao que se conhece como mudança de fase (“*phase shift*”). Embora o termo costume ser usado para a substituição de uma comunidade rica em corais por uma comunidade dominada por macroalgas, na prática o que acontece são organismos de crescimento mais rápido ganhando vantagem competitiva em relação a organismos de crescimento mais lento, que contribuem mais para a formação do recife. Nesse sentido, é apropriada a estratégia complementar apresentada de se utilizar ortomosaicos a fim de avaliar os recifes a nível de paisagem.

Duas das espécies de corais mais representativas dos grupos MUSSISMILIA E MONASTRAEA também sofreram diminuição em sua densidade de zooxantelas, decorrente do aumento de temperatura.

O banco de rodolitos, ao contrário dos recifes coralíneos, não possui uma linha de base anterior ao rompimento da barragem, o que torna mais difícil a interpretação da presença ou não de impacto decorrente desse evento. De fato, isso ocorre devido ao baixo conhecimento que se tem sobre os bancos de rodolitos, o que torna necessária uma visualização em escala temporal maior e, portanto, continuidade em seu monitoramento.

A área de estudo da “Costa das Algas” foi intensamente afetada pelo rompimento da barragem no que se refere à mudança da composição da comunidade, embora tenha se notado uma recente recuperação que necessita ser monitorada.

j) Ictiofauna e Carcinofauna Marinha:

Considerando todas as análises da ictiofauna, foram identificados 28 impactos dentre diretos, indiretos e sem relação direta definida com o rompimento. **Corroborando os indicadores para outros grupos, a zona de impacto no setor Foz foi a região mais severamente impactada quando se analisa a biomassa de pós-larvas. Entretanto, apresentou maior diversidade**

específica (a partir do ano 3) e riqueza quando comparada aos demais setores. Segundo a FEST, este pode ser um indicativo de que a região apresenta traços de regeneração gradativa. Em contrapartida, as análises de diversidade genética mitocondrial reforçam que espécies estuarinas têm sido mais suscetíveis aos impactos do Material Ligado ao Desastre (MLD), o que aponta para um impacto específico da região sobre as características genéticas das espécies estudadas.

Além das alterações genéticas, quando analisada a razão entre Carbono e Nitrogênio elementar nos tecidos de várias espécies estuarinas foi identificada uma redução da concentração de lipídeos. Isto provavelmente reflete, indiretamente, um impacto crônico do MLD que é a redução da disponibilidade de recursos alimentares, especialmente na região da foz. Neste setor também foi registrada ao longo do monitoramento a alteração da movimentação e do uso do habitat por robalos que tem utilizado poucos canais profundos que restaram após o assoreamento do rio.

Neste contexto, segundo os dados da FEST, **as espécies estuarinas foram as que mais sofreram impactos dentre a ictiofauna. Para o grupo foram identificados e categorizados 22 impactos, sendo que a lama aderida ao corpo das pós-larvas e o aumento da concentração de metais e metalóides nos otólitos, ambos ao longo de todo o monitoramento, foram considerados diretamente ligados ao desastre.** Outros 16 impactos foram considerados indiretamente ligados ao desastre.

Para os peixes marinhos de outros setores, o aumento das concentrações de Cd, Cu, Cr, Fe, Mn e Pb no músculo também foi considerado um impacto diretamente ligado ao desastre.

Para a ictiofauna estuarina, é relevante destacar que a dominância de poucas espécies, a diminuição de riqueza e abundância, as alterações da biologia reprodutiva e a redução da condição corporal de sete espécies de peixes foram impactos identificados, mas que ainda não possuem relação definida com o rompimento.

Quando analisada a ictiofauna recifal, os impactos do MLD são claros, apesar de descritos como indiretamente ligados ao desastre. O setor Foz, mais impactado pelo material, possui a menor abundância de peixes dentre os setores analisados, além de composição de espécies e espécies raras diferenciada em relação aos demais setores. Apesar disto, não houve detecção de variações genéticas significativas entre essas populações e as demais.

Para a carcinofauna, o indicador de maior destaque, e preocupação, é o IBR bioacumulação em camarões, que vem indicando aumento nos níveis de metais e arsênio ao longo do monitoramento, indicando contaminação crônica também neste grupo. Curiosamente, os maiores valores referem-se ao setor APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz, mostrando que a eventual conservação das áreas pode não ser um fator tão significativo frente aos impactos do rompimento.

Apesar da piora do IBR bioacumulação para os camarões, a análise da diversidade genética mitocondrial tem demonstrado evidências de expansão populacional após um evento de redução recente.

Um indicador importante identificado para siris (*C. bocourti*) e camarões-sete-barbas foi a maior frequência de lesões no tecido gonadal das fêmeas destas espécies. Isto poderia indicar uma disfunção do órgão reprodutor com potencial redução populacional no futuro. Entretanto, os dados disponíveis não elucidam a questão.

k) Tartarugas Marinhas:

Os impactos ambientais sobre a população de tartarugas marinhas, descritos na Matriz de Resultados, são:

- Contaminação por metais e metalóide - Grau crítico
- Contaminação por compostos orgânicos - Grau médio
- Alterações nos parâmetros reprodutivos - Grau alto
- Alterações da diversidade e estrutura genética - Grau crítico
- Alterações nos parâmetros de saúde e fisiologia - Grau crítico
- Doenças e presença de agentes infecciosos - Grau crítico

Em relação aos resultados apresentados no relatório anterior, houve piora na Matriz, em especial para as alterações da diversidade e estrutura genética, que eram classificados como Grau alto e atualmente são classificados como Grau crítico. Não foi observada melhora para demais impactos.

Os impactos relacionados à contaminação de metais e metalóides na tartaruga verde e tartaruga cabeçuda; a alterações nos parâmetros reprodutivos, de saúde e fisiologia; e a doenças e presença de agentes infecciosos foram classificados como diretamente vinculados ao rompimento da barragem de rejeitos; as alterações de diversidade e estrutura genética; e a contaminação de metais e metalóides para os ovos da tartaruga cabeçuda e tartaruga de couro foi definido como impacto indireto; e para a contaminação por compostos orgânicos não há relação definida ainda.

Diversidade Genética

No geral, as alterações da diversidade e estrutura genética foram classificadas como críticas para tartarugas marinhas na região afetada do ES.

De acordo com os dados apresentados no relatório, os juvenis de *C. mydas* (tartaruga-verde) e as populações de *Dermochelys coriacea* (tartaruga-de-couro) e de *Caretta caretta* (tartaruga-cabeçuda) do Espírito Santo evidenciaram perda de haplótipos mitocondriais de linhagens exclusivas do Atlântico Sudoeste e consequentemente menor diversidade haplotípica quando comparadas com as populações da Bahia, e entre os períodos Pré e Pós desastre no ES. Para todas as espécies foi constatado também gargalo populacional recente.

O relatório apresenta ainda, o Índice Genético de Ameaças às Tartarugas – IGAT, **que constatou piora na saúde genética da tartaruga-cabeçuda e tartaruga-verde na área atingida pós desastre, com índice de ameaça classificado como “baixo”, enquanto a área controle na Bahia apresentou risco de ameaça “mínimo”.** Concluem que o indicador de diversidade genética para ambas as espécies demonstra que as populações da área afetada do ES ainda apresentam sinais de vulnerabilidade genética.

Já para a tartaruga-de-couro, o IGAT exibiu valores extremamente baixos tanto no período ES-Pré (IGAT= 5,51) quanto no ES-Pós (IGAT=3,62), sendo categorizados como “severo” e indicam uma piora de 34,3% na saúde genética da população durante o intervalo de tempo analisado no monitoramento. Concluem que o referido indicador demonstra que a população apresenta sinais muito altos de vulnerabilidade genética.

Avaliação da Saúde

Chelonia Mydas

Para as tartarugas-verdes juvenis que alimentam na APA Costa das Algas em Santa Cruz (ES), os parâmetros continuam indicando que os animais estão menos saudáveis que os indivíduos da área controle da BA (Coroa Vermelha), com alterações em parâmetros clínicos, bioquímicos e hematológicos, com destaque para maior prevalência da fibropapilomatose e de ectoparasitas. Para o Ano 6 foi observado a percentagem mais alta de animais com fibropapilomatose (76%) já encontrada ao longo dos 6 anos de monitoramento do PMBA/Fest. Comparado com o Ano 5, observa-se um aumento de 110% da prevalência da doença na população.

No que se refere aos metais pesados, as tartarugas apresentaram variações nas concentrações de metais no plasma, ao longo dos 6 anos de monitoramento do PMBA/Fest. O As aumentou suas concentrações do Ano 1 ao Ano 4 e se manteve elevado nos Anos 5 e 6. O Cd, Hg, Fe e Mn apresentaram diminuição dos níveis do Ano 4 ao Ano 6. Já o Cu e o Cr apresentaram aumentos significativos ao longo dos anos de monitoramento, sendo os maiores níveis observados no Ano 6. O Pb diminuiu suas concentrações no Ano 6 comparado com o Ano 5, e o Zn se manteve constante nos últimos dois anos (Ano 5 e 6).

Caretta caretta

Com relação aos parâmetros de saúde, não foi constatada melhora em relação aos dados apresentados no relatório anterior. No Ano 6, as tartarugas-cabeçudas que utilizam as praias da Foz do Rio Doce para desovar, continuam a apresentar uma pior condição corporal e maior prevalência de epibiontes e ectoparasitas, se comparadas com as tartarugas da área controle (Praia do Forte e Areembepe-BA). **Foi registrada a maior percentagem de animais com a presença de parasitas registrada ao longo dos 6 anos de monitoramento do PMBA/Fest (63%) e também a maior porcentagem encontrada de animais com escore severo.**

Tal piora também foi constatada para lesões oculares, que vêm aumentando ao longo dos anos na área impactada, tendo alcançado no último ano o maior número de animais afetados. Do Ano 5 ao Ano 6 este aumento foi de 63%. Os animais da área impactada também continuam a apresentar fibropapilomas, enquanto na área controle não foram encontrados animais com lesão ocular e nem com fibropapilomas nos 6 anos de monitoramento.

Nos anos 5 e 6 de monitoramento constatou-se que as concentrações de As, Cr, Fe, Pb e Zn no plasma das tartarugas-cabeçudas da área impactada estão significativamente mais elevadas do que nos demais anos.

Assim como apresentado no relatório anterior, os ovos recém colocados apresentaram concentrações detectáveis de todos os metais analisados, demonstrando que houve transferência materna para a espécie. Foi possível observar ainda a transferência de contaminantes do sedimento para os ovos das tartarugas, durante o período de incubação, uma vez que os natimortos apresentaram níveis mais elevados de alguns metais pesados do que os ovos recém colocados.

Para a análise de dados reprodutivos foi observado que a porcentagem de eclosão se correlacionou negativamente com os metais não essenciais (As, Cd, Hg e Pb), e de acordo com o relatório, os níveis mais elevados desses metais nos ovos e natimortos pode contribuir para a diminuição do sucesso

de eclosão.

É informado ainda que o tempo de incubação se correlacionou positivamente com o cádmio e negativamente com o ferro, e concluem que níveis mais altos de metais essenciais nos ovos diminuem o tempo de incubação enquanto os metais não essenciais podem ser tóxicos e atrasar e/ou prejudicar a formação dos embriões, aumentando o período de incubação.

Dermochelys coriacea

Assim como para a tartaruga-cabeçuda, os ovos recém colocados da tartaruga-de-couro também apresentaram concentrações detectáveis de todos os metais analisados e os natimortos apresentaram níveis mais elevados de alguns metais pesados do que os ovos recém colocados.

No âmbito dos dados reprodutivos apresentados pelo relatório, foram encontradas correlações positivas entre os metais não essenciais e o número de ovos não eclodidos e natimortos, assim, quanto maior a concentração desses metais nos ovos e natimortos, maior o número de natimortos e ovos não eclodidos no ninho.

Assim como a tartaruga-cabeçuda, a porcentagem de eclosão correlacionou-se negativamente com os metais não essenciais (As, Cd, Hg e Pb), o que pode contribuir para a diminuição do sucesso de eclosão. Já o tempo de incubação correlacionou-se positivamente com o chumbo, indicando que níveis mais altos do metal aumenta o tempo de incubação.

Síntese Integrativa

Assim como no relatório anterior, para as VDAs (Vias de Desfechos Adversos), foi feito um modelo para tartarugas marinhas, representando um nível trófico mais elevado.

De acordo com o relatório, as Vias de Desfecho Adversos são construções conceituais desenvolvidas para apoiar a avaliação de risco, por meio da descrição da sequência de eventos biológicos que se relacionam a partir da exposição a um estressor ambiental até um efeito adverso específico de interesse regulatório, em um organismo ou população.

O modelo gerado para tartarugas aponta como os dados de saúde das tartarugas estão relacionados em uma sequência de eventos a partir de fontes de exposição (ex. água, crustáceos e peixes) e consequente bioacumulação de metais, encontrados em natimortos, ovos (cascas e inteiros) e no plasma, que pode levar à geração de espécies reativas de oxigênio (EROs).

O relatório detalha os processos que podem estar ocorrendo nas tartarugas marinhas a partir do desdobramento de eventos chave organizados em sequência lógica a nível de células e tecidos até o alcance de indivíduos e população. É informado que o estresse oxidativo induzido por metais pode causar danos moleculares e celulares, que podem levar à morte celular e respostas inflamatórias. Segundo o modelo, quando persistentes, esses efeitos a nível molecular e celular são traduzidos em alterações do desenvolvimento e comprometimento da imunidade, que sucedem o desfecho adverso de interesse regulatório, que seria a perda da diversidade genética e tamanho da população.

É destacado também que metais e outros contaminantes aumentam a demanda metabólica dos indivíduos afetados, e que esse desgaste energético (constatado

para as tartarugas marinhas a partir de alterações em marcadores como glicemia/glicose, colesterol total, albumina e proteínas totais) pode vulnerabilizar os indivíduos, comprometendo a imunidade e o desenvolvimento adequado e consequentemente, levando ao desfecho adverso de interesse regulatório. Além disso, é informado que alguns metais e outros contaminantes podem agir como desreguladores endócrinos, comprometendo o desenvolvimento reprodutivo das tartarugas. Como consequência, pode ocorrer uma redução da fecundidade e postura de ovos associada a presença de metais, afetando significativamente o tamanho da população e diversidade genética.

Como as sequências apresentadas no modelo serão validadas e atualizadas conforme o avanço analítico, faz-se importante a continuidade do monitoramento reprodutivo, de saúde e genética das tartarugas marinhas, inclusive com maior integração dos dados reprodutivos.

I) Cetáceos

A matriz de resultados apresenta os indicadores e respectivos graus dos impactos ambientais sobre os cetáceos na região afetada, cujos resultados e discussões foram percorridos no Material Suplementar Ambiente Marinho, Tema: Cetáceos (RT- 46/ JUN 24 RA2023 PMBA/Fest). A malha e frequência amostral foram modificadas ao longo da evolução do PMBA/FEST, sendo os indicadores adaptados e analisados conforme descritos na presente análise.

Taxa anual de encalhes, de distribuição sazonal e espacial e de óbitos de cetáceos na costa do Espírito Santo

Em relação aos encalhes, o presente estudo concentra-se em duas espécies de cetáceos consideradas alvo, por serem costeiras e estuarinas: o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) e a toninha (*Pontoporia blainvilei*). As alterações na taxa de encalhe foram consideradas críticas, conforme descrito na matriz de resultados, as quais utilizaram três indicadores para avaliar o impacto do rompimento da barragem de Fundão em Mariana/MG: taxa anual de encalhes por espécie de cetáceos; taxa de distribuição sazonal de encalhes; e taxa de óbito, determinada pelo diagnóstico da causa da morte.

Ao longo dos 5 anos e quatro meses de PMBA/FEST, foi registrada a ocorrência de 14 gêneros de cetáceos na costa do Espírito Santo, o mesmo observado em levantamento de estudo realizado antes do rompimento da barragem de Fundão/MG.

Os resultados do período Pré-PMBA (23/11/2015 e 30/9/2018), período agudo, depois da chegada do material oriundo do rompimento da barragem de Fundão-MG ao mar) mostraram **um aumento estatístico altamente significativo nos encalhes de botos-cinza** após o rompimento da barragem de Fundão-MG em comparação com a fase Pré-rompimento (1/1/2012 até 22/11/2015). As taxas de encalhe Pós-rompimento não apresentaram diferenças significativas nos encalhes em relação à fase pretérita, corroborando com outros estudos (Da Cunha Ramos, 2024). **Entretanto, levando em consideração o primeiro quadrimestre do Ano 6 (01/10/2023 a 31/01/2024), as taxas do quadrimestre da fase Pré-PMBA e da fase crônica do Ano 3 estão em consonância com as taxas anuais, com aumentos altamente significativos de encalhes.**

As taxas anuais de encalhes de toninhas apresentaram variações, mas não houve significância estatística nas diferenças entre as fases após o rompimento da barragem de Fundão-MG em comparação ao período anterior. A redução de encalhes de toninhas durante a fase aguda, também

observada por Da Cunha Ramos (2024), pode estar relacionada à proibição de pesca na costa Norte do ES, decorrente do rompimento da barragem de Fundão MG. Embora o primeiro quadrimestre do PMBA Ano 6 não tenha mostrado diferenças significativas no número de encalhes, a média de encalhes continua superior aos índices históricos do período anterior ao rompimento, quando já apresentavam altos índices de mortalidade, particularmente preocupante para a pequena população no norte do Espírito Santo, conhecida por ser geneticamente distinta e geograficamente isolada. É alarmante que, de acordo com informações (info. pessoal) da Rede de Encalhe, até outubro /2024, o número de encalhes de cetáceos na região tenha superado os totais nos últimos 5 anos, com um aumento preocupante especialmente nas ocorrências de toninhas. **Essa situação gera sérias preocupações sobre a viabilidade a longo prazo dessa população, uma vez que esses encalhes podem ser um reflexo das condições as quais a espécie está sendo submetida na região.**

Com relação a **distribuição de encalhes de botos-cinza**, no Ano 1 (01/10/2018 a 30/09/2019) e Ano 3 (01/10/2020 a 30/09/2021) houve aumento significativo dos encalhes no período chuvoso (outubro a março) e diminuição significativa no período seco (abril a setembro). Observou-se ainda aumentos significativos na proporção de encalhes de botos-cinza no verão dos Anos 1 e 3 do PMBA e no outono na fase PMBA Ano 5. No caso das **toninhas**, foi constatado encalhes mais frequentes no período chuvoso em todas as fases do monitoramento, assim como na fase pretérita ao acidente, com exceção na fase aguda, que apresentou maior proporção de encalhes no período seco. Além disso, houve um aumento significativo de encalhes no verão nas fases crônicas do monitoramento. Essas alterações nos padrões sazonais apontam a possível influência de uma perturbação ambiental significativa e abrupta afetando essas espécies e, portanto, relacionada ao rompimento da barragem.

O diagnóstico de óbito por emalhe accidental em botos-cinza apresentou diminuição proporcionalmente significativa em todas as fases após o rompimento, dando lugar aos diagnósticos de processos infecciosos principalmente, com exceção dos últimos anos analisados no relatório (Ano 4 e 5). Apesar do curto período de monitoramento, no Ano 6 (01/10/2023 a 31/01/2024) todos os animais diagnosticados vieram a óbito devido ao emalhe accidental. Esse mesmo cenário foi observado em relação as toninhas nos períodos Pré-rompimento, Pré-PMBA, Ano 3, Ano 5 e Ano 6, quando todos os animais diagnosticados faleceram devido ao emalhe.

As causas de óbito, como traumatismos e processos infecciosos, apresentaram um aumento significativo desde a fase Pré-PMBA até o Ano 4 nos botos-cinza, sugerindo o impacto das doenças provocadas pelos rejeitos nas fases aguda do monitoramento, principalmente sobre os animais mais fracos e vulneráveis. Do mesmo modo, nas toninhas, observou-se aumento significativo dos índices de óbitos por traumatismo e por processos infecciosos nos primeiros anos de PMBA/FEST, indicando também impactos consideráveis sobre a sobrevivência dos indivíduos afetados.

Na análise do **código de decomposição dos botos-cinza**, os animais vivos (COD I) apresentaram um aumento significativo de encalhes na fase Pré-PMBA (período agudo do desastre), os quais podem ter sido afetados diretamente pelo material no mar oriundo do rompimento da barragem do Fundão. Nas **toninhas**, não houve diferenças significativas ao longo dos anos de monitoramento.

Na comparação das **frequências sexuais**, a frequência de encalhes das fêmeas de **boto-cinza** foi mais elevada em todas as fases do estudo, com exceção do quadrimestre do Ano 6. Em relação a razão sexual das **toninhas**, observou-se uma

inversão estatisticamente significativa na proporção de óbitos, aumentando sete vezes a mortalidade de machos durante toda a fase Pós-rompimento. Esses achados necessitam de melhor discussão e acompanhamento.

Os botos-cinza adultos apresentaram maior frequência de encalhes durante todo o período de monitoramento, mas observou-se um aumento significativo entre os indivíduos imaturos logo após o rompimento da barragem, indicando impactos mais severos sobre os jovens. Da mesma forma, embora os dados das toninhas não apresentem valores estatisticamente significativos, eles indicam maior vulnerabilidade dos animais jovens, reforçando a tendência observada nos botos-cinza.

Saúde dos cetáceos

Foram analisadas todas as espécies que encalharam até o Ano 4, e a partir do Ano 5 somente foram mantidas as análises de *S. guianensis* e *P. blainvillei*. Todos os espécimes examinados apresentaram problemas de saúde, sem variações anuais significativas. Os órgãos mostraram debilidade e mau desempenho funcional, indicando uma alteração sistêmica negativa. **Assim, mesmo animais cuja morte foi atribuída a emalhes apresentaram infecções e danos respiratórios, indicando que sua saúde estava previamente comprometida.** Isso sugere que a debilidade geral dos animais pode torná-los mais suscetíveis a emalhes e outros estresses ambientais.

Lesões como enfisema e atelectasia foram achados pulmonares que indicam insuficiência respiratória, e podem afetar consequentemente o funcionamento de outros órgãos, aumentando a vulnerabilidade a infecções por patógenos como parasitas, vírus, fungos e bactérias. A análise revelou que processos inflamatórios, congestão e mineralização foram frequentes, especialmente nas amostras dos Anos 3, 4 e 5. Também foram observadas lesões crônicas como dilatação de vasos, cálculos proteicos, cistos, infartos, abscessos e fibrose, indicando debilidade renal e comprometimento da saúde geral dos animais. **Todos esses achados sugerem uma deterioração geral da saúde dos espécimes, evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo e análise das condições ambientais que afetam esses animais.**

As alterações ósseas encontradas durante os anos de monitoramento de PMBA/FEST não puderam ser relacionadas aos achados histopatológicos e as condições de saúde dos espécimes. Porém, a alta frequência de ocorrência de espécimes com uma ou mais vértebras apresentando arco neural aberto durante os anos de monitoramento do PMBA/FEST precisa ser mais investigada, pois pode se tratar de uma característica genética das populações analisadas, como pode ser uma resposta a fatores ambientais.

Até o Ano 4, todas as espécies encalhadas foram avaliadas nos exames microbiológicos através da coleta de swabs das cavidades naturais, sendo que a partir do Ano 5 somente as espécies foco foram monitoradas. O pulmão, identificado como o órgão com o maior número de espécies detectadas, enfatiza a vulnerabilidade do sistema respiratório desses animais. A presença de microrganismos em órgãos vitais sugere um potencial impacto direto na saúde dos cetáceos, principalmente quando se considera a patogenicidade de algumas espécies identificadas, como *Staphylococcus spp.* e *Klebsiella spp.*, e que podem indicar problemas ambientais mais amplos, como em toda a sua cadeia trófica, e a necessidade de análises mais integradas com os resultados encontrados nos diferentes temas desse monitoramento.

Alterações nas concentrações de contaminantes em *Sotalia guianensis* e *Pontoporia blainvillei*

A análise das concentrações de mercúrio total (HgT) em fígado de botos-cinza mostra níveis elevados, com máximas que superam os limites de tolerância estabelecidos e os associados a danos hepáticos em outras espécies, como o golfinho nariz-de-garrafa. Na Região 1 (São Mateus), a média de concentrações hepáticas ultrapassa esse limite, e no músculo, as concentrações também são significativamente mais altas, possivelmente devido ao impacto do rompimento da barragem de Fundão. Os primeiros anos de monitoramento revelaram níveis elevados em todos os tecidos analisados, e são consistentes com as médias mais altas documentadas no Brasil, conforme referenciado no relatório. Essa exposição ao mercúrio pode resultar em danos significativos relacionados ao sistema nervoso central, além de comprometer o funcionamento do sistema imunológico nos mamíferos (GUARI, 2016).

Foram encontradas variações nas concentrações hepáticas de cobre (Cu) e manganês (Mn) entre as regiões amostradas, assim como variações significantes nas concentrações renais de zinco (Zn). Concentrações medianas de cádmio (Cd) nos rins superiores às reportadas na literatura foram observadas na região Barra do Riacho/Metropolitana. Além disso, as análises sugerem a influência da pluviosidade na remobilização de As e outros contaminantes, o que é preocupante diante dos aumentos de temperatura e pluviosidade devido às mudanças climáticas. As elevadas concentrações de As e as tendências temporais observadas reforçam os impactos crônicos do rompimento da barragem do Fundão em cetáceos da região. Esse padrão também foi identificado nas Regiões 1 e 5, onde as análises das concentrações de zinco (Zn) nos rins mostraram valores mais altos durante os verões chuvosos de 2018 e 2020.

As análises das **toninhas** durante o PMBA Fest revelaram tendências temporais significativas, com concentrações de mercúrio total (HgT) no fígado, músculo e rim. Em comparação com dados anteriores na costa do Espírito Santo, os resultados no presente relatório indicam a mesma ordem de grandeza dos indivíduos coletados antes e depois do rompimento da barragem de Fundão, porém devem ser interpretados com cautela, pois são similares à de estudos prévios realizados em regiões com alto impacto antrópico, como a costa do Rio de Janeiro e São Paulo. Entretanto, as concentrações de ferro (Fe) e manganês (Mn) foram notavelmente elevadas, considerando então a presença desses elementos na lama de rejeitos. **As medianas das concentrações de Mn e Fe no fígado e de cádmio (Cd) nos rins das toninhas analisadas ao longo do PMBA/Fest permanecem maiores que as dos animais Pré e Pós-rompimento da barragem de Fundão (período entre 2015 e 2019), e indicam o impacto contínuo e significativo dos resíduos da barragem sobre os cetáceos na região, refletidos nas condições gerais de saúde desses animais.**

Com relação aos **compostos organoclorados** (Σ PCB, Σ DDT, HCB, mirex e Σ HCH), foram detectadas altas concentrações de bifenilas policloradas (Σ PCB) em **botos-cinza** de todas as regiões monitoradas, superando o limite sugerido para efeitos prejudiciais em mamíferos marinhos, com declínios populacionais em cetáceos associados, segundo estudos. Quanto aos pesticidas organoclorados (DDT, HCB, HCH e Mirex), as concentrações foram semelhantes entre as regiões, mas apresentaram variações temporais.

O perfil de contaminação dos **botos-cinza** é predominantemente composto **PCBs**, seguido por DDTs, mirex, HCB e HCHs. Os botos-cinza da Região 1 sofreram uma maior influência do rompimento da barragem de Fundão, refletindo uma maior presença de pesticidas organoclorados remobilizados, especialmente na área

próxima ao Rio Doce. Houve um aumento na contribuição de DDTs nos Anos 3 e 4 nas Regiões 1 e 2, as mais afetadas pelo desastre, com as demais regiões também apresentando esse aumento no Ano 4. Contudo, o predomínio do metabólito p.p'-DDE nos botos-cinza indica uma contaminação histórica por DDTs nas teias tróficas desses cetáceos, em vez de um uso recente do pesticida, sendo as mesmas observações feitas em cetáceos costeiros do sudeste do Brasil. Já nas **toninhas** analisadas ao longo do PMBA-Fest, o perfil de contaminação é predominantemente composto por **DDTs**, seguido por PCBs, mirex, HCB e HCHs. **Antes do rompimento da barragem, os PCBs apresentavam uma contribuição percentual mais significativa em relação aos DDTs, sugerindo que essa foi uma alteração causada pelo evento.**

Segundo o relatório, as concentrações dos compostos organobromados antrópicos PBDEs e PBEB nas Regiões 1 e 3/4 são semelhantes às observadas em áreas altamente impactadas, como a Baía de Guanabara, no Rio de Janeiro, sendo que seus reconhecidos efeitos adversos à saúde, como hormonais e neurotóxicos, ressaltam a possibilidade da contribuição dos contaminantes nos desafios enfrentados pela espécie na região.

A análise da variação espacial das concentrações de **hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs)** nas amostras de **botos-cinza** não revelou diferenças significativas, no entanto, essas concentrações são comparáveis ou superiores às de áreas com altos impactos ambientais, como a Baía de Guanabara. Quanto à variação temporal, foram observados aumentos nas concentrações totais de HPAs na região 5 (Extremo Sul) entre o primeiro e o quarto ano do monitoramento. Essa remobilização, que pode ter ocorrido devido o rompimento da barragem, pode aumentar a disponibilidade de HPAs nas teias tróficas dos botos-cinza. Além disso, o perfil de HPAs em botos-cinza foi majoritariamente de compostos de alto peso molecular (4-6 anéis), exceto para a Região 5 (Extremo Sul). Comparado com as concentrações detectadas em toninhas na costa Sudeste do Brasil (Santos-Neto et al., 2024), e que representam regiões de alto impacto antrópico, as concentrações de HPAs do presente RA2023 são mais elevadas. O perfil de HPAs de alto peso molecular segue o mesmo padrão dos botos-cinza, e são reconhecidos por suas propriedades mutagênicas e carcinogênicas, além do potencial de bioacumulação, o que gera subsídios para a realização de monitoramentos a longo prazo.

Estrutura etária e sexual das populações

Os dados mostram um aumento na idade média dos botos-cinza encalhados, com médias de 11,50 anos para fêmeas e 11,39 para machos, em comparação com os padrões pré-rompimento que variavam de 5,01 a 10,28 anos. Esse aumento é muito preocupante, pois sugere uma maior mortalidade de indivíduos em idade reprodutiva, o que pode comprometer a persistência da espécie na região. Apesar do pequeno tamanho amostral de toninhas passíveis de análise ao longo desse monitoramento, a comparação com dados de um projeto anterior do FUNBIO revela uma redução na média de idade dos indivíduos removidos da população (3,93 anos) em relação aos dez anos anteriores ao rompimento da barragem, o que pode causar mudanças demográficas preocupantes para as toninhas dessa região e que necessitam ser acompanhadas.

Índices de diversidade e estruturação genética

O relatório aponta a diminuição da diversidade genética no período Pós-rompimento para os **botos cinza**, com perda de haplótipos em relação ao período Pré-

rompimento, o que reflete a menor diversidade genética encontrada para as populações, indicando possível relação causal com a chegada do rejeito no litoral do Espírito Santo. Ocorreu uma oscilação de diversidade haplótica entre os anos de monitoramento após o Ano 2, o que indica a necessidade de acompanhamento a longo prazo para poder ter uma melhor interpretação dessa situação. **Além disso, através da análise de marcadores do DNA nuclear, foi constatado que essa população passou por um evento de gargalo (redução recente), refletindo em dificuldades nos processos adaptativos a novas pressões seletivas as quais atualmente se submetem.**

Para as toninhas, não foi possível evidenciar diferenciação populacional em análises espaciais quanto temporais através de marcadores de DNA mitocondrial, porém observou-se baixíssima diversidade haplótica (apenas dois haplótipos) na população analisada. Os dados apontam a presença de uma única população com grau de ameaça vivendo em área criticamente impactada pelos rejeitos provenientes da barragem do Fundão. As análises dos marcadores do DNA nuclear confirmam a presença de uma população, com índice de diversidade baixos e que também passaram por um evento de gargalo.

Razão isotópica de C e N em amostras de *Sotalia guianensis* e *Pontoporia blainvillei*

Os resultados indicam a identificação de grupos ecológicos distintos do boto-cinza monitorados ao longo de seis anos. As análises de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ sugerem que esses grupos têm ecologias alimentares e áreas de forrageamento distintas na costa do Espírito Santo, possivelmente influenciadas pela proximidade de rios, embora os grupos mostrem alguma sobreposição nas áreas de forrageio e nas espécies consumidas.

A comparação do nicho isotópico entre o boto-cinza e a toninha foi feito somente para as regiões Norte e Foz, devido ao baixo n amostral das toninhas na região Sul (n=1). O resultado evidencia segregação trófica em ambas as regiões, com os botos-cinza apresentando uma maior amplitude e largura de nicho isotópico, enquanto a toninha apresenta ecologia alimentar mais especialista com área de nicho isotópico reduzido, aumentando a sua vulnerabilidade as mudanças ambientais e impactos sobre recursos alimentares.

m) Aves Marinhas

Distribuição Espacial / Área de Forrageio

Aves nas praias e no mar

Ao longo dos 5 anos e 4 meses de contagens de aves nas praias, foram registradas 48 espécies de aves aquáticas (marinhas e costeiras), pertencentes a 17 famílias e 8 ordens, utilizando a foz do Rio Doce e a costa adjacente. Deste total, 31 são residentes e 17 são espécies migratórias neárticas, as quais se reproduzem no Hemisfério Norte e invernam no Hemisfério Sul (del Hoyo *et al.*, 1996; Sick, 2001). Entre as espécies registradas, sete estão classificadas como ameaçadas em nível nacional (Portaria MMA 148/2022), sendo duas classificadas como 'Em Perigo' (*Thalasseus maximus* e *Calidris pusilla*), três como 'Vulnerável' (*Numenius hudsonicus*, *Thalasseus acutiflavus*, *Sterna hirundinacea* e *Sterna dougallii*) e outras duas classificadas como 'Quase Ameaçada' (*Arenaria interpres* e *Haematopus palliatus*). As 48 espécies de aves aquáticas registradas, incluindo espécies migratórias que utilizam a área para alimentação e descanso, demonstram a

importância da região da Foz do Rio Doce e costa adjacente. Essa importância é reforçada pela presença de espécies ameaçadas em nível nacional ou mesmo em nível global, como no caso da espécie *Calidris pusilla*. O número total de aves aquáticas registradas foi de 41.743 indivíduos. As duas espécies mais abundantes, *Thalasseus acuflavidus* (n=11.527) e *Sterna hirundo* (n= 10.478), corresponderam a 67% do número total de indivíduos. As 7 espécies mais abundantes (n>600) corresponderam a 87% dos registros, que além das duas espécies supracitadas, incluem *Phaetusa simplex* (n=1.886), *Calidris alba* (n=1.565), *Charadrius semipalmatus* (n=1.371), *Charadrius collaris* (n=994) e *Thalasseus maximus* (n=803). Durante o período chuvoso, foi registrado o maior número de aves aquáticas (71%), quando comparado ao período seco (29%), o que aparentemente está associado com a maior presença de espécies migratórias como *Sterna hirundo*.

Censos de aves no mar registraram 32 espécies longo de todo o período das amostragens, sendo 11 consideradas residentes no Brasil, 13 espécies são migrantes do Hemisfério Sul, enquanto 8 são migrantes do Hemisfério Norte. Do total de espécies registradas, 5 são classificadas como ameaçadas em nível global, sendo 4 destas também ameaçadas em nível nacional, além de outras 5 espécies ameaçadas em nível nacional apenas. Foram registradas 5.942 aves, no total. As espécies mais abundantes foram *Sterna hirundo*, *Sula dactylatra*, *Anous stolidus*, *Thalasseus acuflavidus* e *Fregata magnificens*, respectivamente. *Sterna hirundo* é uma espécie migratória, já *Anous stolidus*, *Sula dactylatra* e *Fregata magnificens* são espécies residentes, e o arquipélago dos Abrolhos onde se reproduzem. Da mesma forma, *Thalasseus acuflavidus* é residente e utiliza inclusive ilhas costeiras do Espírito Santo para se reproduzir. A densidade de aves variou entre as transecções, com densidade maior de aves próximo à foz do Rio Doce e na região do Arquipélago de Abrolhos. O mesmo padrão espacial foi observado para a diversidade de aves (índice de diversidade).

A presença massiva de aves na região costeira da foz do Rio Doce (41.743 registros distribuídos em 48 espécies), bem como na região marinha (5.942 registros distribuídos em 32 espécies), indica que há disponibilidade de alimento para essas aves, o que pode funcionar como uma armadilha ecológica, considerando que há grande chance de as presas estarem contaminadas. É possível ainda que as aves migratórias estejam funcionando como biovetores de contaminantes para suas áreas reprodutivas. Em geral, a densidade de aves marinhas se concentrou na costa, mais especificamente próxima a Abrolhos e à foz do Rio Doce.

Alimentação

O monitoramento de aves por satélite revelou que, após o rompimento da barragem, *Phaeton aethereus* permaneceu utilizando o entorno do Arquipélago de Abrolhos durante viagens de alimento durante o período reprodutivo da espécie. No entanto, houve uma tendência de maior uso do talude continental e das áreas oceânicas após o desastre, resultando em maiores distâncias percorridas e gasto energético. Os resultados indicam que *Sula leucogaster* permanece consumindo as presas no entorno de Abrolhos, com a tendência de rumar em direção ao continente para se alimentar. **As variações interanuais sugerem um deslocamento das áreas de forrageio de noroeste para sudoeste do Arquipélago, de modo que *Sula leucogaster* explorou, nos últimos anos, mais ativamente a região entre Abrolhos e a foz do Rio Doce.** As variações interanuais estão, possivelmente, associadas a variações naturais na distribuição das presas, as quais são, em sua maioria, pequenos peixes epipelágicos.

A comparação entre os períodos secos e chuvosos durante o período de execução do PMBA/Fest indica uma permanência de *Phaeton Aethereus* na região de Abrolhos

para alimentação durante ambos os períodos, com ampla sobreposição. Em todos os anos amostrados após o rompimento da barragem, *Sula leucogaster* permaneceu utilizando o entorno do arquipélago de Abrolhos durante viagens de alimento em período reprodutivo, sempre com a mesma tendência de rumar em direção ao continente. **Nos últimos anos, nos períodos secos explorou mais ativamente a região entre Abrolhos e a foz do Rio Doce, área de exposição aos contaminantes, conferindo o conceito de armadilha ecológica.**

A variação de valores de isótopos estáveis de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{15}\text{N}$ entre os períodos pré e pós rompimento, detectadas em amostras de sangue de *Phaethon aethereus* e *Sula leucogaster* no Arquipélago dos Abrolhos, indica possíveis mudanças nas áreas de forrageio ($\delta^{13}\text{C}$) e/ou no nível trófico das presas ($\delta^{15}\text{N}$). Para *Sula leucogaster* as diferenças dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram significativas entre antes e depois do rompimento da barragem, considerando os períodos chuvoso e seco; e para valores de $\delta^{15}\text{N}$ as diferenças foram significativas apenas quando comparados os períodos seco e chuvoso. Para *Phaethon aethereus* as diferenças dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ foram significativas entre antes e depois do rompimento da barragem, considerando os períodos chuvoso e seco, assim como valores de $\delta^{15}\text{N}$.

A análise de peixes consumidos pelas aves, obtidos através de regurgitos, demonstrou que houve uma variação nas principais presas de indivíduos de *Phaethon aethereus* que reproduzem em Abrolhos entre os períodos pré e pós-rompimento. As principais famílias no período pré-rompimento eram, principalmente, Sciaenidae, Exocoetidae e Carangidae. Atualmente, a dieta de *P. aethereus* no arquipélago dos Abrolhos é composta, principalmente, por Hemiramphidae, Dorosomatidae e Exocoetidae. As variações nas dietas podem estar associadas a uma necessidade de diversificação das presas consumidas, a partir de uma potencial diminuição na disponibilidade das presas preferenciais no entorno do arquipélago. Diferenças nas espécies de presas de *Sula leucogaster* também foram verificadas entre os períodos citados. Atualmente, a dieta de *Sula leucogaster* no arquipélago dos Abrolhos é composta, principalmente, por Hemiramphidae, Exocoetidae e Dorosomatidae. Hemiramphidae se manteve como principal família que compõe a dieta de *Sula leucogaster*, embora as demais famílias com maior contribuição no período pré-rompimento eram Exocoetidae e Belonidae.

Contaminação por metais

A análise das concentrações de metais e Arsênio (As) nas penas e sangue de *Phaethon aethereus* e *Sula leucogaster* que reproduzem no Arquipélago dos Abrolhos indicou a contaminação das aves pelos rejeitos. Nas penas, elementos não-essenciais e tóxicos (As, Mercúrio - *Hg*, Cádmio - *Cd* e Chumbo - *Pb*) apresentaram variação semelhante entre si e com Manganês (*Mn*). *Mn* é o segundo elemento mais abundante na barragem do Fundão, sugerindo que este traçador dos rejeitos é relacionado com metais e um metaloide tóxicos. Ferro (*Fe*), o elemento mais abundante nos rejeitos, variou de forma mais independente, com pouca influência nos agrupamentos, sugerindo a regulação sistêmica de *Fe* pelo organismo.

As penas refletem os metais acumulados pelo organismo durante o período de síntese, que pode ter ocorrido meses antes da amostragem (Bearhop *et al.*, 2000). O sangue reflete a concentração de metais e As na circulação sanguínea, o que está relacionado com a ingestão recente e com a remobilização desses elementos nos órgãos internos do indivíduo por diferentes razões fisiológicas, sendo sensível à dieta recente do indivíduo, ao jejum, e aos níveis de metais em outros órgãos internos. **O aumento nos valores dos elementos essenciais bem como de As**

e Hg observados no Ano 6 (Jan/2024) sugere a ocorrência de um evento de contaminação nesse período, evidenciado pelos valores altos desses elementos no sangue das aves marinhas.

Foi realizada a comparação das concentrações de metais e Arsênio no sangue, penas e cascas de ovos de aves marinhas (*Phaethon aethereus* e *Sula leucogaster*) e no tecido muscular de peixes das famílias Belonidae, Dorosomatidae, Exocoetidae, Hemiramphidae e Scombridae, coletados ao longo do período de monitoramento no Arquipélago dos Abrolhos. **Os resultados evidenciam que as presas das aves de Abrolhos estão contaminadas pelos rejeitos da barragem de Fundão, e que representam a principal via de contaminação das aves através da sua ingestão. Adicionalmente, os resultados indicam uma influência diferencial, entre as presas, na contaminação das aves, visto que alguns grupos de presas estão mais contaminados do que outros.**

Bauer *et al.* (2024) evidenciaram a bioacumulação de metais e metaloides em *Sula leucogaster* ao longo de um período de quatro anos após o colapso da barragem de Fundão (2019-2022), lançando luz sobre a persistência da contaminação no ecossistema marinho. Os pesquisadores mostraram que a detecção de eventos de contaminação aguda coincidiu com eventos climáticos extremos, como temporadas de chuvas intensas. Isso é especialmente relevante no contexto da observação de que essas aves continuam se alimentando em áreas contaminadas e, portanto, que a população utiliza uma área que sofre de contaminação crônica a partir dos rejeitos da barragem de Fundão.

Houve maiores concentrações de metais não-essenciais e Arsênio nas penas das aves de Abrolhos (*P. aethereus* e *S. leucogaster*) no período chuvoso do Ano 3 (Fev/2021), possivelmente refletindo um aumento na biodisponibilidade de metais a partir da alta vazão do Rio Doce no ano anterior, seguido da remobilização do sedimento contaminado na plataforma continental pelo vento, ondas e correntes, mais fortes no período seco. **Considerando o sangue das aves marinhas, no entanto, destaca-se as concentrações elevadas de Hg e As no período chuvoso do Ano 6 (Jan/2024), maiores do que nas campanhas anteriores, assim como foi observado para os metais essenciais.** Este resultado sugere um evento de assimilação aguda de metais pelas aves no Ano 6, o que reforça a ocorrência de eventos de recontaminação no ambiente marinho adjacente à foz do Rio Doce e a necessidade do monitoramento a longo prazo. Importante ressaltar que a presença dos metais no sangue indica uma contaminação recente, enquanto a presença desses metais nas penas indica contaminação de quando elas foram sintetizadas (entre 2-12 meses antes da amostragem). **As concentrações de metais e As nas cascas de ovos foram, em geral, menores do que nas penas e no sangue do que, sugerindo uma baixa detoxificação de metais pelas fêmeas através da postura. Os dados evidenciam que as presas das aves de Abrolhos estão contaminadas pelos rejeitos da barragem de Fundão, representando a principal via de contaminação das aves através da sua ingestão, exemplificando na prática o conceito de armadilha ecológica e contribuindo para biomagnificação de contaminantes inorgânicos nos tecidos das aves.**

Condições Sanitárias, Demografia e Genética

Tendências populacionais

A população reprodutiva de *P. aethereus* monitorada no arquipélago em Abrolhos variou entre 696 e 1064 adultos, mostrando um incremento em uma população que já oscilou entre 200 e 700 aves até 2012. As taxas de eclosão (38% e 53%) e de

sucesso (58% e 69%) aumentaram. É provável que a desratização do arquipélago, ocorrida em 2022, tenha contribuído com esse aumento. **Por outro lado, o tamanho populacional de *S. leucogaster*, que já esteve entre 700 e 1200 adultos reprodutores até 2011, mostra uma diminuição preocupante com uma população de cerca de 300 adultos.** As taxas de eclosão (100% para 42%) e de sucesso (92% e 60%) sofreram decréscimo, mesmo com a maior postura de ovos acontecendo no ano de 2023. Além de estarem sendo afetados pela contaminação de metais provenientes da barragem de Fundão, alguns indivíduos analisados têm apresentado problemas de saúde (anemia e desidratação), o que pode causar impactos diretos de curto prazo nos indivíduos (debilidade e/ou mortalidade) e indiretos na população. O tamanho populacional de *Sterna hirundinacea* segue oscilando de forma patente, provavelmente em função do comportamento de alternância de sítios reprodutivos deste grupo de aves migratórias ao longo dos anos. **O declínio populacional é possivelmente outro fator, uma vez que a espécie vem diminuindo suas populações ao longo dos anos em toda a costa brasileira. A série das taxas de eclosão e sucesso são pouco elucidativas, uma vez que houve proibições de desembarque em função da gripe aviária. Estes indivíduos de *S. hirundinacea*, que se reproduzem no Espírito Santo, fazem parte de uma das populações mais devastadas pela Influenza Aviária em todo o Brasil 2023, o que pode estar associado com uma queda na imunidade ocasionada pela exposição crônica aos contaminantes presentes no rejeito.**

Genética populacional

Parâmetros de diversidade genética foram estimados para *Sula leucogaster* e *Phaethon aetereus* antes do rompimento e ao longo dos cinco anos amostrados. Para a primeira espécie, três indicadores apresentaram variações expressivas (maiores que 10%), quando foram comparados os períodos pré e pós-rompimento: o Coeficiente de endogamia (FIS), a Proporção de Loci Polimórficos dada em porcentagem (P) e a Diversidade nucleotídica (π). Em *Phaethon aetereus*, também três indicadores apresentaram variações importantes (maiores que 10%): Heterozigosidades observada (HO), Heterozigosidades Esperada (HE) e Coeficiente de endogamia (FIS).

Para diversidade genética foi observada flutuação dos valores dos parâmetros estudados ao longo dos anos, tanto para *P. aethereus*, quanto para *S. leucogaster*. As flutuações são menos acentuadas para *S. leucogaster*, sugerindo uma maior estabilidade genética nesta espécie. Em contraste, *P. aethereus* apresenta uma leve diminuição nos valores descritivos da diversidade genética (i.e. média de alelos encontrados, riqueza alélica e diversidade gênica) em relação ao período pré-rompimento.

Análise de amostras biológicas (sangue e suabes)

Amostras de sangue e suabes foram coletadas anualmente no Arquipélago de Abrolhos e em Regência (Foz do Rio Doce) durante o período chuvoso e seco, até o quinto ano de monitoramento e período chuvoso do sexto ano, incluindo as seguintes espécies: *Phaethon aethereus* (Abrolhos), *Sula leucogaster* (Abrolhos), *Sterna hirundo* (Foz do Rio Doce) e *Thalasseus acuflavidus* (Foz do Rio Doce). Em *Phaethon aethereus* e *Sula leucogaster*, os resultados das contagens das hemácias e leucócitos incluem alterações significativas durante os anos de monitoramento. Logo no primeiro ano, algumas aves apresentaram a contagem de hemácias abaixo dos valores de referência para uma ave hígida, na estação seca. Contudo, depois do

primeiro ano, até o sexto ano de monitoramento, alguns indivíduos, apresentaram esses valores abaixo também na estação chuvosa. Foram diagnosticados indivíduos, no segundo ano, na estação chuvosa, no terceiro ano em ambas as estações, no quarto ano na estação chuvosa, e no quinto ano, estação chuvosa, que apresentaram uma contagem superior de leucócitos e heterófilos, configurando uma leucocitose por heterofilia. Em *Sterna hirundo* e *Thalasseus acuflavidus*, os resultados das contagens das hemácias e leucócitos realizados não mostraram alterações significativas durante os anos de monitoramento.

A análise de microrganismos isolados em cultura de *Phaethon aethereus* identificou 23 bactérias e dois fungos, totalizando 25 grupos de microrganismos, tendo a estação chuvosa com a maior frequência de bactérias e fungos positivos. Foram isoladas 17 bactérias provenientes de *Sula leucogaster*, tendo a estação seca com a maior frequência de bactérias positivas. Foram isoladas 11 bactérias de *Sterna hirundo* durante o quinto ano, e na estação chuvosa do sexto ano; e em *Thalasseus acuflavidus* amostrados no período chuvoso e seco do quinto ano de monitoramento, foram registrados 09 grupos de microrganismos. As amostras de suabe de orofaringe e cloaca coletadas, das espécies *Phaethon aethereus* e *Sula leucogaster*, apresentaram resultados negativos para os vírus testados (Influenza, Newcastle, Herpesvírus, Adenovírus, Circovírus e Avulavírus) nos anos 1 e 2. A partir do terceiro ano, o painel viral foi alterado, sendo pesquisados: Herpesvírus, Metapneumovírus e Coronavírus, e a partir do quinto ano de monitoramento começaram as análises de *Sterna hirundo*, *Sternula supercililaris* e *Thalasseus acuflavidus*, sendo todos os resultados negativos. Todas as amostras de sangue de todas as aves testadas apresentaram resultados negativos para o parasita *Borrelia* spp.

n) Monitoramento remoto da megafauna

Aspectos introdutórios

Na análise de megafauna observa-se que, assim como outros anexos, adequações amostrais e de protocolos de coleta e/ou análise foram procedidas. Contudo, as metodologias adotadas se mostraram adequadas ao seu propósito, sendo cumpridos tanto os protocolos de amostragem quanto o respeito à malha amostral previstos no plano de trabalho.

Foram realizadas a captura de imagens tanto por imagens aéreas, através do drenomonitoramento, quanto por captura submersa, utilizando rov-monitoramento. A simplificação amostral cumpriu o previsto no novo ciclo de monitoramento, sendo as metodologias anteriores (sobrevoo embarcado, avistamento embarcado e bioacústica) utilizados como balizadores na tomada de decisão sobre os ajustes metodológicos a serem procedidos. Também foram inclusas as análises e determinação da integridade de habitat, considerando a estrutura de fundo, a presença de outros grupos biológicos e aspectos de perturbação antrópica. Este cuidado serve para atender à necessidade de avaliação dos processos ecológicos e a qualidade ambiental na área de distribuição da toninha.

Todas as estações amostrais previstas foram cobertas, de modo a manter a continuidade espaço-temporal do monitoramento sobre as populações focais. Os objetivos de monitoramento foram cumpridos, respeitando a sazonalidade das amostragens, e sendo representativo diante da série histórica de dados.

Recomendações de melhorias na apresentação do relatório:

- Adequar as legendas das imagens, pois o agrupamento dificulta a leitura e

interpretação, especialmente imagens 24 e 25 do MS_AM_Monitoramento Megafauna;

- Maior integração com outros anexos e ao relatório principal, indicando relações de causa e efeito sobre a distribuição das populações com base em aspectos físico-químicos, ecotoxicológicos e sazonais. O texto traz poucas correlações entre os achados do monitoramento com os aspectos ambientais dos demais anexos do relatório, sendo as conclusões pouco embasadas e fundamentadas nos dados históricos;
- Apresentar, nas imagens, maior clareza nas unidades de medida das legendas (e.g., na Figura 5 não está explícito se a distância está em metros ou quilômetros).

Análise dos resultados de monitoramento

O monitoramento de megafauna tem enfoque na população da toninha (*Pontoporia blainvillei*), uma espécie com elevada taxa de endemismo e potencialmente ameaçada de extinção devido à combinação de uma série de estressores antrópicos aos efeitos do derrame de rejeitos, resultando em alterações no seu habitat e espaço de forrageio. A espécie possui comportamento gregário, e a população monitorada se distribui, como observado ao longo de toda a série histórica, majoritariamente entre a Foz do Rio Doce e a Estação de Comboios, ao norte. Esta distribuição se mantém ainda no último monitoramento realizado, corroborando o uso destas estações como espaço de forrageio, refúgio e reprodução. Durante o dronemonitoramento, fica evidente que há um maior adensamento e número de avistamentos na área da Foz do Rio Doce e adjacências, tanto a sul quanto a norte. Por sua vez, no período seco, a população se distribui no sentido sul-norte, quando predominam os avistamentos em Comboios.

Devido ao seu comportamento, a toninha é um animal que apresenta grande fidelidade aos seus pontos preferenciais de forrageio e reprodução. Este comportamento não parece ter sido majoritariamente afetado pelo derrame de rejeitos, com a população ainda utilizando as mesmas áreas já reconhecidas como seu habitat preferencial. A maior frequência de avistamentos continua sendo a uma distância de até 150 metros da costa (Figura 5, MS_AM_Monitoramento Megafauna). Contudo, o derrame de rejeitos teve impactos representativos sobre os índices ecológicos e o fitness da espécie, devendo ser mencionados como pontos relevantes de monitoramento:

- A espécie tem distribuição preferencial em áreas de fundo inconsolidado e lamoso. Devido ao aporte de rejeitos e, especialmente, da presença da matriz sedimentar com elementos contaminantes nestas áreas de ocorrência, a população apresenta uma maior vulnerabilidade, refletida nos demais índices ecológicos;
- O comportamento alimentar mostra uma alternância de área de forrageio entre a Foz do Rio Doce e Comboios, com forte influência sazonal, provavelmente relacionada com a ressuspensão do rejeito e o aporte de novo material sedimentar devido ao carreamento superficial. Preferencialmente, a espécie realiza forrageio nas áreas de fundo lamoso, estendendo-se ao sul da Foz do Rio Doce. Ao longo do monitoramento, houve mais avistamentos de comportamento alimentar em Comboios, em todas as estações, na Foz do Rio Doce no período seco, e nas regiões lamosas no entorno sul da Foz do Rio Doce em todas as estações;
- **Na série temporal, há uma redução na densidade de toninhas avistadas, em ambas as estações amostrais, mas mais expressivamente na Foz do**

Rio Doce. Tal fato está relacionado com a estrutura populacional, sendo que há uma redução no recrutamento de novos indivíduos. A estação de Comboios é preferencialmente utilizada como área reprodutiva, e ao longo de todo monitoramento, apresentou um maior avistamento de filhotes na série histórica. Por outro lado, não são avistados filhotes na Foz do Rio Doce desde o primeiro trimestre de 2022, indicando uma restrição na área reprodutiva da espécie que viabilize a sobrevivência de filhotes e juvenis;

- Os dados de monitoramento de fundo marinho evidenciam uma redução na integridade da estrutura de habitats, especialmente nas estações amostrais ao sul da Foz do Rio Doce. A APA Costa das Algas, Conceição da Barra e Itaúnas foram as áreas em que os índices de integridade ambiental se mostraram mais baixos e com tendência de piora ao longo da série histórica. Por outro lado, a estação de Comboios mostrou uma progressiva melhora no índice, e considerando a preferência de forrageio em áreas lamosas, justifica a maior ocorrência de indivíduos e comportamento reprodutivo nesta área.

o) Sedimentação Costeira:

A malha amostral passou por modificações para aperfeiçoamento e atendimento aos objetivos do PMBA. **A metodologia contemplou o escopo em vigência para o Novo Ciclo do PMBA e teve como eixo central a assinatura geoquímica dos sedimentos coletados a partir da coluna d'água, sob o ponto de vista da geologia isotópica.** Ofereceu assim uma resposta assertiva sobre a presença/ausência de traços de rejeitos de minério, especialmente considerando que a região dos Abrolhos, principalmente o arco interno de recifes, possui naturalmente um elevado índice de turbidez, dificultando análises baseadas em imagens aéreas. **Nesta etapa, o monitoramento concentrou as atividades em áreas mais próximas à foz do Rio Doce, visto que os sinais isotópicos em Abrolhos estão próximos da condição pré-rompimento da barragem de rejeitos, de acordo com a técnica de geologia isotópica utilizada.**

As coletas sedimentológicas foram contínuas, com as armadilhas ininterruptamente expostas, ou seja, as amostras avaliam o efeito do transporte oceânico durante uma sequência temporal de processos meteoceanográficos. Foi desenvolvida uma armadilha de sedimentos baseada nas taxas de sedimentação regional e no tempo de amostragem proposto. A armadilha foi confeccionada com plástico de alta durabilidade, não gerando contaminações nas amostras, como com metais provenientes de ferrugem de materiais da estrutura. As atividades visaram o monitoramento de “sedimentos armadilhados” em duas novas regiões de interesse nas adjacências da Foz do Rio Doce: nos Recifes Esquecidos, ao norte; e na APA Costa das Algas, ao sul. O grupo realizou 15 campanhas no Banco dos Abrolhos e 5 campanhas entre a APA Costa das Algas e os Recifes Esquecidos.

A análise de proveniência correlacionou as características mineralógicas e isotópicas dos sedimentos já depositados com as características de outras áreas fonte representadas pela composição de suas rochas aflorantes. Como áreas fontes de sedimentos em Abrolhos são consideradas as bacias hidrográficas dos rios que deságuam próximos a essa região, as bacias do rio Doce e dos rios entre o norte do ES e o Sul da Bahia (rios São Mateus, Mucuri, Alcobaça, Caravelas, Jucuruçu, Jequitinhonha e Pardo). Foram analisadas variáveis meteorológicas e oceanográficas de superfície. Linhas de mistura foram traçadas para identificar a componente do rio Doce em relação às demais fontes de plumas fluviais. **De 2019 a 2021, a contribuição do rio Doce variou de 0 a 94 % nas amostras do Arco Interno, de 0 a 74 % nas amostras do Arco Intermediário e de 0 a 72 % nas amostras do Arco Externo.**

Foram postulados dois mecanismos físicos responsáveis pelo transporte sedimentar do material particulado da foz do Rio Doce para a região dos Abrolhos: o primeiro a ação das frentes frias quando os ventos superficiais atuam do Sul para o Norte, responsáveis por intensos processos de ressuspensão dos sedimentos em águas rasas. O segundo o aumento da vazão do Rio Doce, durante a estação chuvosa, que disponibiliza maior volume de material terrígeno para a região oceânica. **Além do traçador isotópico de proveniência mineral, utilizou-se um segundo traçador de características independentes, o ferro em excesso.** Enriquecimentos em Fe foram analisados nos sedimentos de Abrolhos em razão deste elemento representar um dos maiores contaminantes dos rejeitos da Samarco. Analisou-se também a incorporação de Fe em bandas de crescimento de carbonato de cálcio em corais. **A análise desses dados mostrou a ocorrência de um “pulso sedimentar” caracterizado por um aumento após 2015, atingindo um máximo em 2019 e seguido por decréscimo a partir de 2020 até o final de 2022. Este comportamento corrobora o padrão observado pelos isótopos radiogênicos de Sr e Nd.**

Os modelos climáticos aplicados para o Atlântico tropical Sul projetam aumento na energia dos ciclones extratropicais que atuam nesta região, responsáveis pelo transporte Sul-Norte de sedimentos ao longo da plataforma continental. Assim as projeções futuras de sedimentação em Abrolhos exigem atenção e monitoramento, uma vez que o cenário futuro é favorável a novos “pulsos”.

4.4.3.2 Conclusões - Ambiente Marinho

a) Ecotoxicologia

Após a leitura do relatório presente, e consideradas as suas adequações metodológicas, obteve-se que houve alinhamento das atividades desenvolvidas com o plano de trabalho, e o alcance das metas estabelecidas. Quando da ocorrência de impeditivos, estes foram devidamente justificados, sendo que pequenos comprometimentos à análise se devem, em si, à descrição dos dados, redação do relatório e apresentação gráfica dos resultados de análise.

Tornam-se pontos de atenção para análises futuras sobre os resultados elaborados:

- **Todos os descritores fisiológicos e elementos analisados mostram o impacto significativo sobre o plâncton, de modo que devem ser, prioritariamente, analisados estes descritores como via de interpretação das alterações nas guildas superiores e na própria estruturação da comunidade;**
- **A carcinofauna apresenta um claro padrão de impacto do rejeito no sentido sul a norte, com perda da *fitness* e alterações relevantes em sua fisiologia, que podem ter impacto direto no desenvolvimento e resiliência das populações.** Ademais, os camarões apresentam, em um crescente histórico, **aumento nas concentrações de metais no músculo**, o que se recomenda atenção e cautela, por outras câmaras técnicas, a respeito do consumo humano destes organismos;
- **A ictiofauna, seguindo a mesma tendência, apresenta maiores concentrações históricas no músculo na última campanha realizada. Ainda assim, os parâmetros de monitoramento não mostram tendências claras, sendo relevante, para melhor caracterização, a manutenção dos principais indicadores enzimáticos, além da própria dosagem de metais no músculo, fazendo-se a mesma recomendação a respeito do consumo**

humano destes grupos;

- **O PARNA Abrolhos, ainda que com monitoramento iniciado tardiamente na série histórica, demonstra a ocorrência de um impacto crônico no plâncton e nos corais e hidrocorais.** Chama atenção que há uma redução do *fitness* dos corais e hidrocorais, de modo que as enzimas relacionadas aos processos fisiológicos de crescimento e fixação de carbono são comprometidas, particularmente nos setores ABR02 e ABR04. Este dado é relevante para monitoramentos integrados, uma vez que outras mudanças ambientais, relacionadas ao clima, por exemplo, podem ter efeitos aditivos ao estresse crônico da contaminação, com impactos diretos à resiliência e sobrevivência destes grupos;
- Indiscutivelmente, os dados históricos apresentados demarcam os efeitos crônicos e, por suas vezes, nocivos à saúde de grupos específicos ou mesmo na estruturação das comunidades. **No âmbito da ecotoxicologia, o que se conclui é que os resultados obtidos, tanto de concentração quanto de alterações em biomarcadores, apontam uma reposta crônica de estresse fisiológico, cujos impactos podem ser observados através de mudanças nos parâmetros populacionais, índices de riqueza, diversidade e abundância, e no estado dinâmico de reestruturação da comunidade, que se principia já na comunidade microbiana.** Sendo assim, o monitoramento contínuo poderá trazer novos indicativos sobre os efeitos emergentes de toxicidade dos elementos presentes no rejeito sobre as comunidades, e como estes se relacionam com outras alterações antrópicas sobre os ambientes. Por fim, a ecotoxicologia, enquanto anexo abrangente, demonstra que os efeitos de toxicidade são peça-chave para a compreensão de processos ecológicos, sendo os indicadores elencados relevantes para a construção de uma série completa de informações que subsidiem tomadas de decisão a respeito do uso, manejo e restauração ecológica dos ambientes marinhos diretamente impactados pelo evento ocorrido em 2015.

b) Modelagem numérica

O Relatório e seus anexos, com relação à construção e apresentação do indicador TURBIDEZ/ CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO NA COLUNA D'ÁGUA, em seu tema Modelagem Numérica, atingiu satisfatoriamente os objetivos e as metas propostas no Plano de Trabalho.

Os dados, informações geradas e conhecimento adquirido no tema Modelagem Numérica corroboram a avaliação do impacto 'Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez' apresentada no Relatório.

Entendemos que está correta a 'Matriz de Resultados para o Ambiente Marinho'(p. 118 do RA2023) onde é apresentado o impacto 'Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez' que foi classificado com o valor =-13, que é categorizado como Alto.

c) Hidrogeoquímica

O padrão e tendência de melhoria de diversos índices e parâmetros associados às ações deste monitoramento foi identificado pelo relatório para os anos mais recentes, principalmente Anos 5 e 6. Este resultado referente ao conteúdo do tema hidrogeoquímica pode ser considerado um indicador positivo da resposta do ambiente no contexto do recorte temporal deste monitoramento, no entanto este constitui ainda uma série histórica curta e recente.

Nesse sentido, verifica-se a necessidade de continuidade do monitoramento, viabilizando a construção de séries temporais de dados de maior tempo, de forma a aprofundar o entendimento do comportamento do ambiente e confirmar a tendência de melhoria detectada para alguns dos parâmetros acompanhados para os últimos anos deste monitoramento.

A continuidade do monitoramento é ainda condição necessária para a compreensão em maior profundidade do efeito de eventos climáticos de maior intensidade na remobilização e disponibilização do rejeito ainda presente nas diversas partes dos ambientes atingidos, seja pela ocorrência de anos chuvosos com maiores índices de precipitação na bacia hidrográfica do Rio Doce como quando da entrada de frentes frias e respectivos efeitos de ressuspensão e retrabalhamento de sedimentos na zona marinha/costeira por ação de ondas de maior altura.

Nos próximos relatórios, recomenda-se que sejam apresentadas informações sobre a ocorrência de eventos de precipitação ou entrada frentes frias com ondulação durante ou nos dias anteriores a execução das campanhas de coleta do PMBA. Esta informação busca dar mais detalhes da condição do ambiente no momento das coletas e possíveis efeitos na variação dos resultados. Estas informações devem ser trabalhadas de forma integrada na interpretação dos resultados das futuras campanhas.

d) Sedimentação Marinha

O Relatório e seus anexos, com relação à construção e apresentação dos indicadores: material particulado em suspensão - MPS, mobilidade do sedimento de fundo e sinal do rejeito - IMS (Iron Mineralogical Set- o marcador de rejeito no sedimento), em seu tema Sedimentologia Marinha, atingiu satisfatoriamente os objetivos e as metas propostas no Plano de Trabalho.

Os dados, informações geradas e conhecimento adquirido no tema Sedimentologia Marinha corroboram a avaliação dos impactos '**Alterações na composição sedimentológica**', '**Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez**' e '**Aumento do potencial de mobilização do fundo**' apresentada no Relatório.

Entendemos que está correta a 'Matriz de Resultados para o Ambiente Marinho (p. 118 do RA2023) onde são apresentados os impactos, sua classificação (valoração) e categorização:

- **Alterações na composição sedimentológica:** -17 = crítico,
- **Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez:** -13 = alto,
- **Aumento do potencial de mobilização do fundo:** -14 = alto.

Por fim, registramos que cerca de 9% da área planejada para o mapeamento de habitats não foi mapeada. Contudo foram apresentadas justificativas técnicas e metodológicas. Foi indicado que as áreas não mapeadas não impactam a análise final do relatório.

e) Fitoplâncton

Após os cinco anos de monitoramento, é possível afirmar que o fitoplâncton da região de estudo tem apresentado melhoria de qualidade em termos de densidade e saúde. Entretanto, para a região da Foz, a diversidade local ainda tem sido impactada, caracterizando o impacto crônico. Isto afeta toda a cadeia trófica, que

tem estes organismos em sua base (biomagnificação).

f) Zooplâncton

Além da alta concentração de metais e metalóides, os contaminantes do material ligado ao desastre geraram alterações na estrutura e composição da comunidade zooplanctônica, estabelecendo uma comunidade dominada por espécies resistentes a condições ambientais adversas. Apesar da aparente melhora da condição geral do ambiente, as evidências mostram que esta comunidade ainda se encontra longe da situação pré-rompimento devido aos impactos crônicos.

g) Ictioplâncton

Para o ictioplâncton, os impactos do rompimento são óbvios e notadamente significantes. A baixa viabilidade de ovos e as deformidades em larvas podem comprometer, especialmente nos médio e longo prazos, a dinâmica populacional das espécies, sua diversidade e abundância.

h) Bentos de fundos inconsolidado

Como síntese geral dos resultados, destaca-se a existência de dois cenários distintos em termos espaciais e temporais:

- A. Nas áreas mais próximas à foz do Rio Doce e em menores profundidades** observa-se um ambiente mais homogêneo, com maior proporção de sedimentos finos, como silte e argila, que possuem maior afinidade com metais oriundos do MLD. Nestas condições, observou-se tendência de maior densidade e dominância de organismos e menor riqueza e diversidade (especialmente em amostras com MLD), características que indicam predominância de um menor número de espécies, provavelmente aquelas resistentes aos impactos da contaminação. Os indicadores mostram a continuidade da exposição da macrofauna bentônica nesta região à chegada de contaminantes presentes na calha do rio Doce, especialmente no período chuvoso (quando a vazão do rio aumenta), e ao soterramento pelo sedimento carregado, mesmo após oito anos do evento do rompimento da barragem de Fundão.

Este cenário descrito é reforçado quando se observam os dados de riqueza de organismos da macrofauna, com o setor Foz apresentando o menor número de táxons, enquanto no setor Abrolhos foi registrado o maior valor para esse parâmetro; e, as amostras da faixa de profundidade 7-20 m também apresentando riqueza significativamente menor em relação às demais.

- B. Em áreas com maior profundidade e situadas ao norte da malha amostral, observa-se um ambiente mais heterogêneo, com substratos de maior granulometria, tais como cascalho e areia grossa, ricos em carbonato de cálcio, compostos principalmente por sedimento biodetrítico e bancos de rodolitos.** Estas áreas apresentam maior diversidade de espécies e poucos sinais de impacto sobre a densidade de organismos bentônicos.

De modo geral, os resultados indicam continuidade da exposição da fauna bentônica de fundos inconsolidados aos contaminantes provenientes do rejeito, com indícios de contaminação crônica, especialmente nos setores Foz e Norte. Esse impacto continuado do rejeito foi observado também na riqueza dos organismos indicadores,

que diminui significativamente nas amostras com presença do rejeito, apontada pelo IMS (Índice Mineralógico do Ferro), que tem valores mais altos associados às maiores concentrações de silte-argila, e metais como Cobre e Chumbo. A diversidade, especialmente dos táxons mais raros, também diminui drasticamente nas amostras com presença do rejeito. Estas conclusões aparecem de maneira sintética na Matriz de Resultados, na qual constam com nível alto e crítico os seguintes impactos sobre o Bentos de Fundos Inconsolidados: **contaminação por metais e metalóides; alterações na estrutura de comunidade; aumento na abundância de táxons indicadores de impacto; e, mortalidade de organismos.**

Este cenário tem sido demonstrado ao longo de todo o monitoramento, e os resultados do último relatório, integrando dados da composição faunística e de estrutura da comunidade bentônica com dados sedimentológicos, geoquímicos e mineralógicos, **reforçam que passados oito anos do rompimento da barragem e chegada dos rejeitos ao ambiente marinho, a fauna bentônica de fundos inconsolidados segue sofrendo impactos, notadamente com a redução da riqueza e diversidade nas áreas mais próximas à Foz e ao Norte dela, substituição de espécies sensíveis e estabelecimento de espécies resistentes (Polychaeta das famílias Spionidae e Magelonidae; Nematoda), além do aumento da mortalidade de organismos, em especial, Mollusca.**

i) Fundos Recifais

Conclusões – sobre resultados:

Muitas das metodologias empregadas nesse tema detectaram alterações significativas nas dinâmicas das comunidades. Algumas, como na cobertura do ponto A (PARNAM Abrolhos) ou do ponto D (Costa das Algas) são mais fáceis de visualizar devido à existência de dados pretéritos. Mas mesmo para pontos sem essa linha de base (ex: Recifes Esquecidos), é possível observar tendências como, por exemplo, uma queda drástica na cobertura de MILLEPORAS.

Vale ressaltar o cumprimento da malha amostral disposta no plano de trabalho. O plano de trabalho também apresentou 14 metas, das quais todas foram cumpridas, conforme a seção de metodologia no material suplementar de fundos recifais do relatório anual.

Salientamos que não houve referência à coleta de amostras de matéria orgânica particulada (MOP) no relatório RA2023 PMBA/Fest, a qual está contida no Plano de Trabalho 2022-2024 na Meta 10 (Obter amostras de matéria orgânica particulada (MOP), corais, outros invertebrados e macroalgas recifais, nas quatro áreas amostrais, disponibilizando esse material para análises de concentração de metais, a serem feitas pelo grupo de hidrogeoquímica, semestralmente, com dados interpretados anualmente), apesar do resultado desses dados serem encontrados no relatório de hidrogeoquímica. Também não existem resultados de comparação entre a diversidade de fotoendosimbiontes e parâmetros físicos e/ou químicos da coluna d'água, a qual está incluída na Meta 14 (Modelar, de forma integrada, dados de saúde e diversidade de fotoendosimbiontes de corais e variáveis da d'água, anualmente), sendo analisado somente a diversidade genética de zooxantelas e bactérias simbiotes de corais em novembro de 2018 e setembro de 2022 (Fig. 14 do RA2023 PMBA/Fest).

j) Ictiofauna e carcinofauna Marinha:

As análises de diversidade genética mitocondrial reforçam que espécies estuarinas têm sido mais suscetíveis aos impactos do Material Ligado ao Desastre (MLD), incluída a potencial redução da disponibilidade de fontes alimentares adequadas, sinalizadas pela menor concentração de lipídeos nos indivíduos, especialmente na foz. Neste contexto, segundo os dados da FEST, as espécies estuarinas foram as que mais sofreram impactos dentre a ictiofauna. Para o grupo foram identificados e categorizados 22 impactos, sendo que a lama aderida ao corpo das pós-larvas e o aumento da concentração de metais e metalóides nos otólitos, ambos ao longo de todo o monitoramento, foram considerados diretamente ligados ao desastre.

Para a carcinofauna, as questões ecotoxicológicas são destacadas pelo IBR bioacumulação e são o principal fator de impacto atual. Entretanto, há evidências, ainda não vinculadas diretamente ao desastre, de alterações gonadais em siris e camarões-sete-barbas. Isto pode vir a gerar diminuição da capacidade reprodutiva da espécie no futuro, impactando o recurso pesqueiro e as dinâmicas populacionais.

k) Tartarugas Marinhas:

As tartarugas marinhas foram impactadas em diferentes níveis (individual e populacional) e estágios de vida (ovos, recém-nascidos, juvenis e adultos), indicando que a qualidade do ambiente na área impactada está comprometida e a contaminação pode estar afetando tanto a saúde quanto a genética das tartarugas, tornando-as ainda mais suscetíveis e diminuindo a capacidade adaptativa diante dos recentes impactos ambientais.

A comparação entre as populações do Espírito Santo pré- e pós-rompimento da barragem mostra piora nos índices de diversidade genética após a chegada do material ligado ao desastre no Ambiente Marinho.

O relatório conclui que os juvenis de tartaruga-verde analisados estão mais suscetíveis aos malefícios causados pelos contaminantes, como os encontrados nas áreas monitoradas no ES, por permanecerem mais tempo na região que os animais adultos em processo reprodutivo. A prevalência crescente da fibropapilomatose e sua presença constante entre os animais recapturados, juntamente com a prevalência de ectoparasitas na população indicam que há problemas ambientais que estão afetando a saúde das tartarugas na região monitorada. Para as tartarugas-cabeçudas, a maior prevalência de lesões oculares e parasitas, pior condição corporal e a presença de animais com fibropapilomas registrada também indica que a qualidade do ambiente na área impactada está comprometida e a contaminação pode estar afetando a saúde dos indivíduos, tornando-os mais suscetíveis a essas condições.

Com relação aos dados reprodutivos, concluem que os ovos estão sendo expostos aos contaminantes ambientais, o que pode prejudicar o desenvolvimento embrionário, um dos estágios mais sensíveis e vulneráveis aos poluentes ambientais, com efeitos disruptivos que podem se manifestar ao longo do desenvolvimento do indivíduo, mesmo após a eclosão. A longo prazo, esse fator pode comprometer a sobrevivência das espécies, reforçando a importância de se avaliar conjuntamente os demais fatores que influenciam no sucesso reprodutivo considerando a contaminação por metais pesados entre eles.

Os resultados do relatório são preocupantes, com impactos comprovados sobre as tartarugas marinhas. Importante destacar que as tartarugas possuem ciclo de vida longo, e alterações no processo reprodutivo podem demorar anos para serem constatadas, como uma possível redução no tamanho populacional das tartarugas. Tal impacto é ainda mais crítico para

a *D. coriacea*, que tem uma população reduzida e classificada como criticamente em perigo.

I) Cetáceos:

A matriz de resultados do ambiente marinho indica altos impactos, diretos e indiretos, e relacionados ao encalhe de cetáceos decorrente do rompimento da barragem do Fundão em Mariana. A análise das taxas de encalhes de cetáceos na costa do Espírito Santo revela mudanças significativas em resposta ao rompimento da barragem de Fundão/MG. O estudo destaca um aumento estatístico nos encalhes de botos-cinza logo após o desastre, enquanto as taxas de encalhe para toninhas, que diminuíram durante a fase aguda, podem estar ligadas à proibição de pesca na região. Porém, as médias altas de encalhes de toninhas observadas durante o monitoramento continuam superiores aos índices históricos do período anterior ao rompimento com altos índices de mortalidade, e evidencia a sinergia de impactos sofridas pela espécie. Taxas elevadas de mortalidade por emalhe podem refletir a recuperação de atividades pesqueiras na região ou a persistência de problemas de saúde que tornam os animais mais propensos a se envolver em situações que levam ao emalhe. Uma análise crítica desse diagnóstico de óbito deve considerar a necessidade de um monitoramento mais extenso e sistemático, pois o período de observação é relativamente curto para se tirar conclusões definitivas sobre as tendências de mortalidade.

A constatação de que todos os espécimes avaliados apresentaram problemas de saúde, com ausência de variações anuais significativas, mesmo aqueles cujo diagnóstico de causa morte foi o emalhe, indica uma deterioração crônica da saúde dos animais. Patologias encontradas nos pulmões sugerem que os fatores estressantes são persistentes e afetam o sistema respiratório, impactando também outros órgãos. Processos inflamatórios e lesões crônicas nos rins e fígado encontrados neste estudo podem estar associados a contaminantes ambientais que, em níveis elevados como identificados nos espécimes deste estudo, afetam diretamente o funcionamento adequado do organismo animal e a saúde dos indivíduos, levando conseqüentemente a um valor de médio a alto de impactos na matriz de resultados decorrentes do rompimento da barragem do Fundão.

As alterações ósseas, especialmente em relação ao arco neural aberto, suscitam questões sobre a genética versus fatores ambientais, que precisam ser melhor investigadas. Além disso, a identificação de espécies como *Staphylococcus* spp. e *Klebsiella* spp. sugere que esses animais não apenas enfrentam desafios de saúde intrínsecos, mas também estão expostos a ameaças externas que podem comprometer sua sobrevivência.

De acordo com a matriz de resultados, os impactos da contaminação por metais, metalóides e compostos orgânicos nos cetáceos atingiram níveis elevados. Os cetáceos da costa do Espírito Santo apresentam concentrações significativas desses contaminantes, além de evidências de lesões e processos infecciosos que comprometem o funcionamento de seus órgãos e sistemas. Esses danos levam à debilidade dos animais e aumentam sua vulnerabilidade a infecções, o que, por sua vez, eleva os riscos de interação com embarcações e equipamentos de pesca, sugerindo um cenário de associação entre a concentração de contaminantes, a saúde dos cetáceos e os indicadores de encalhes.

A ecologia alimentar observada na toninha sugere um nicho isotópico reduzido, ou seja, tem um padrão de forrageio mais estreito, e indica maior vulnerabilidade a mudanças no ambiente. Somados aos resultados apresentados no relatório de

Monitoramento da Megafauna, o qual destaca a alta fidelidade da toninha às regiões com maior depósito de rejeitos tóxicos e suscetíveis a remobilização, reforçam a preocupação com a saúde e a sobrevivência dessa espécie, e consequentemente a necessidade de monitoramento contínuo e de ações de conservação, em condições que podem ser agravadas pelas mudanças climáticas.

Um estudo recente (Nara, Secchi & Cunha, 2024) indica que a FMA I possui a menor população de toninhas entre todas as FMAs e que as evidências genéticas e morfológicas, respaldadas por pesquisas recentes, mostram diferenças na abundância e nas preferências ecológicas, indicando que as toninhas estão em processo de especiação. Assim, os autores recomendam que a população da FMA I seja classificada como *Pontoporia blainvillei pukusi*, destacando a necessidade de atenção especial para essa subpopulação. Os resultados do presente relatório, por sua vez, indicam baixos valores de diversidade mitocondrial e nuclear com intensificação após a chegada do rejeito de minério, um alto índice de endogamia e evidências de um recente evento de gargalo. Essas condições, somadas às várias pressões enfrentadas pela espécie, dificultam significativamente a manutenção de sua população na região.

m) Aves Marinhas

Nos relatórios pregressos, obteve-se a tendência de acumulação de metais nos adultos, conforme resultados da análise das penas e desvios dos parâmetros de saúde (hemograma). Ainda, houve um aumento nas concentrações de As, Cd, Pb e Hg entre os períodos pré e pós-rompimento da barragem para as espécies que usam a área do PARNA Abrolhos como refúgio reprodutivo, sugerindo um processo de contaminação crônica incluso pela menor viabilidade de prole. A utilização das áreas contaminadas pelas espécies alvo, além da presença massiva de aves marinhas nessas regiões, indicam que há disponibilidade de alimento (ainda que contaminado), tornando as mesmas em biovetores de contaminantes para suas áreas reprodutivas.

As aves marinhas costeiras e oceânicas ainda utilizam de forma significativa a região impactada pelo material ligado ao desastre (Rompimento da barragem do Fundão), especialmente a Foz do Rio Doce e o Arquipélago de Abrolhos. Os números de espécies (dezenas) e de indivíduos (dezenas de milhares) são expressivos, incluindo ameaçadas e migratórias contempladas em Planos de Ação Nacionais para Conservação. Grupos de hábitos costeiros e oceânicos são registrados. No entanto, houve mudanças no padrão de uso do espaço por algumas espécies, especialmente a utilização de novos locais de captura de presas, incluindo áreas mais distantes das colônias de reprodução. Outras espécies mantiveram seus locais habituais de pesca, possivelmente por características de sua biologia (vôo) e ecologia, determinando a continuidade da exposição ao ambiente impactado. As espécies monitoradas quanto à dieta apresentaram mudanças nos principais grupos de peixes (Famílias) capturados.

Foi constatada a presença de metais (As, Hg, Cd, Pb) e Arsênio nas penas e sangue de *Phaethon aethereus* e *Sula leucogaster* que reproduzem no Arquipélago dos Abrolhos, indicando a contaminação das aves pelos rejeitos. As maiores concentrações desses contaminantes observadas nos tecidos de aves ocorrem durante o período chuvoso, condizente com o aumento da vazão do Rio Doce. Detecções recentes (janeiro/2024) indicam a persistência da contaminação. Os resultados evidenciam que as presas das aves de Abrolhos estão contaminadas pelos rejeitos da barragem de Fundão, e que representam a principal via de contaminação das aves através da sua ingestão. Estimativas populacionais indicam espécies impactadas, com redução dos números de indivíduos, com destaque para

Sula leucogaster em Abrolhos e *Sterna hirundinacea* na costa do Espírito Santo. A análise de indicadores da estrutura genética populacional das aves que nidificam em abrolhos (*Sula leucogaster* e *Phaethon aetereus*) revelou mudanças em parâmetros avaliados quando foram comparados os períodos pré e pós-rompimento;

A avaliação de saúde das aves, realizada com base em amostras de sangue e suaves, em duas espécies que ocorrem principalmente na região de Abrolhos (*Phaethon aethereus* e *Sula leucogaster*) e na Foz do Rio Doce (*Sterna hirundo* e *Thalasseus acutiflavus*) mostrou alterações significativas durante os anos de monitoramento. A análise de microrganismos isolados em cultura identificou bactérias e fungos nas espécies avaliadas, variando entre 09 e 25 grupos de organismos (fungos e bactérias). Não foram verificados vírus acometendo as aves.

Parâmetros sanitários das aves reforçam o impacto causado pela alimentação em áreas contaminadas. Nessas regiões, as aves apresentaram maior ocorrência de processos inflamatórios, quadros de desidratação e anemia, e de bactérias de prioridade para a saúde pública presentes em listas da Organização Mundial de Saúde, assim como bactérias multirresistentes a antibióticos. As aves que se reproduzem no Espírito Santo (e.g. *Sterna hirundinacea*) foram umas das mais impactadas pela Influenza Aviária em 2023, levando a um declínio populacional. Essa fragilidade pode estar relacionada à queda na imunidade causada pela exposição crônica aos contaminantes. Considerando que esses resultados podem ser extrapolados para as dezenas de espécies registradas na região, outras populações podem estar afetadas, inclusive de espécies ameaçadas de extinção. Durante o PMBA foi possível observar a influência da passagem (e persistência) do MLD no Ambiente Marinho, desde alterações no comportamento, forrageamento, saúde, população e genética. Estes efeitos podem estar relacionados diretamente com as condições ambientais ou por meio de cascata trófica, uma vez que foram observadas alterações nos organismos de níveis tróficos de base.

Os indicadores mostram que as aves enfrentam ameaças à sua conservação na região impactada, uma vez que a exposição aguda e crônica aos contaminantes tem comprometido a saúde e reprodução das populações. Há evidências de que os rejeitos da barragem do Fundão afetaram significativamente as aves marinhas na região da Foz do Rio Doce e nas áreas adjacentes atingidas pelos rejeitos, com impactos verificados até a região do Parque Nacional Marinho de Abrolhos, situado a mais de 200 Km.

As aves marinhas são classificadas como organismos de topo de cadeia e, pela posição em altos níveis na cadeia trófica, estão vulneráveis aos efeitos de contaminantes acumulados e possivelmente magnificados durante a transferência trófica. Além disso, a ampla área de forrageamento e o frequente hábito migratório permitem que eles sejam usados como sentinelas da contaminação em grandes escalas.

n) Monitoramento remoto da megafauna

A abundância de toninhas apresenta uma discreta redução ao longo do monitoramento, com uma restrição de uso de habitats bem demarcada entre áreas imediatamente ao sul da Foz do Rio Doce e a estação de Comboios. Com isso, percebe-se a vulnerabilidade da espécie diante de possíveis perturbações antrópicas, bem como do aporte e ressuspensão do rejeito nas áreas lamosas onde realiza o forrageio. Devido ao pequeno quantitativo de indivíduos, associado ao menor recrutamento, a espécie pode sofrer com processos de perda de variabilidade genética, levando a população ao declínio. Da mesma forma, os indivíduos estão

sujeitos ao estresse crônico, o que pode ter impacto direto sobre seu fitness, com menor resistência a doenças e parasitoses que venham a acometer a população. Desta forma, o monitoramento de longo prazo deve priorizar a atenção sobre a estrutura populacional, verificando a evolução da qualidade ambiental dos habitats de preferência da espécie, assegurando a identificação e conservação de áreas prioritárias à sobrevivência da toninha.

o) Sedimentação Costeira

Resultados - PARCIALMENTE CUMPRIDO

O plano de trabalho previu a obtenção de dados e análises que permitissem investigar e monitorar os processos de aporte, dispersão e sedimentação na foz do Rio Doce e na plataforma continental adjacente, além de caracterizar os habitats marinhos impactados. O relatório final apresenta resultados quantitativos (porcentagens, concentrações, razões isotópicas) e qualitativos (descrições mineralógicas, interpretações de mapas). Demonstra a integração de dados de diferentes fontes (isótopos, geoquímica, mineralogia, dados climáticos e oceanográficos), como proposto no plano de trabalho e utiliza os resultados para a análise do impacto do desastre de Mariana nos habitats marinhos. Porém, em alguns casos, a análise de dados foi limitada pela perda ou dano de equipamentos e amostras. O relatório menciona essas limitações e as justifica, mas indica que os dados obtidos não fornecem uma imagem completa da situação. Além disso não foi considerada a recomendação anterior de avaliar a dragagem no canal do Tomba, ocorrida entre dezembro de 2019 e março de 2020, na análise.

Estudos demonstraram transportes de sedimentos com rejeitos identificados nas armadilhas de sedimentos, assim como nas estruturas dos corais, tanto ao norte quanto ao sul da Foz do Rio Doce, desde Abrolhos ate APA Costa das Algas

4.4.3.3 Propostas de encaminhamentos - Ambiente Marinho

a) Ecotoxicologia:

- Implementar ações para contenção da remobilização de rejeitos, especialmente em períodos de maior precipitação.
- Priorizar o monitoramento contínuo dos níveis tróficos inferiores e superiores para compreender melhor os efeitos cumulativos.
- Investir em programas de recuperação ambiental que promovam a reestruturação das comunidades biológicas e a redução de contaminantes ativos no sistema.
- **Necessidade de Ajustes nos Métodos Analíticos:** A limitação dos métodos de detecção utilizados compromete a confiabilidade das análises de tendências. Ajustes nos métodos de monitoramento, com o uso de técnicas mais sensíveis, são essenciais para uma avaliação mais precisa da contaminação e seus efeitos nos ambientes, além de proporcionar dados mais consistentes para subsidiar a tomada de decisões e políticas públicas de mitigação da contaminação.
- incluir a análise de metil-mercúrio dentre os descritores analisados, viabilizando não apenas o entendimento do efeito do contaminante sobre as guildas amostradas, como também para explicitar os efeitos de biomagnificação na cadeia trófica.

b) Modelagem numérica:

Na apresentação da metodologia (no Material Suplementar – Modelagem Matemática) são feitas diversas menções a materiais e resultados, que estariam disponíveis, mas não são indicados os nomes de pastas, arquivos ou diretórios onde estariam as tabelas, figuras, gráficos ou *shapefiles*. Em particular não pudemos encontrar onde estão os materiais citados referentes aos resultados do sensoriamento remoto (p.5, §5 do MS-MM) da ‘Modelagem numérica hidrodinâmica’ (p. 6) e da ‘Modelagem numérica de transporte de sedimentos’

Por fim, recomendamos a continuidade do monitoramento para todos os parâmetros em acompanhamento para o tema da Modelagem Matemática e Oceanografia Física, mas entendemos que o plano de trabalho deve ser revisado e ajustado conforme o conhecimento já acumulado até agora.

c) Hidrogeoquímica:

Conforme exposto no item acima referente à conclusão, faz-se necessário a continuidade do monitoramento para todos os parâmetros em acompanhamento para este tema.

Sobre a forma de exposição das informações no relatório, destaca-se a necessidade de otimização da apresentação dos resultados e conclusões, o qual não raro inicia suas seções diretamente com figuras contendo resultados, porém sem contextualização suficiente do conteúdo a que se dedica e dos valores de referência e demais índices utilizados nos gráficos. Apesar das legendas junto às figuras, nem sempre as informações são suficientes para a completa exposição de aspectos necessários à compreensão dos resultados obtidos com o trabalho. Assim, dado a natureza diversificada do público e de atores a que o relatório é direcionado, os quais possuem necessidade de análise e compreensão do documento, recomenda-se que os futuros relatórios sejam aperfeiçoados com técnicas de exposição do conteúdo, maior esforço de explicação das imagens com resultados e maior contextualização de fatores necessários a clara compreensão dos resultados do monitoramento.

Por fim, recomenda-se que nos próximos relatórios seja reproduzida no relatório a malha de pontos das estações de coletas para os diferentes setores da área marinha, referentes a todas as linhas de ação deste monitoramento.

d) Sedimentação Marinha:

Recomendamos reforçar o cuidado com a indicação de fontes e referências. Por exemplo, conceitos técnicos, como na seguinte afirmação: "A razão isotópica entre estrôncio e neodímio, juntamente com as concentrações desses elementos, permitem estabelecer curvas de mistura sedimentar em configurações binárias ou ternárias de forma a inferir as contribuições relativas dos diferentes termos-fonte sedimentares postulados"(p.56, §1) carecem de referência.

Também entendemos que é importante fazer referências ao próprio documento, como no caso do destaque "As avaliações dos indicadores abióticos e bióticos mostram que todos os setores analisados no Ambiente Marinho foram impactados pelo Material Ligado ao Desastre (MLD). O setor foz pode ser classificado como o mais impactado, seguido dos setores norte e APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz."(p. 57, §2) que deveria indicar a seção onde as afirmações são demonstradas. Outro exemplo de assertiva que necessita de referência: "As maiores áreas de influência do aporte fluvial na plataforma continental ocorrem durante eventos que

combinam elevadas vazões simultâneas às inversões de ventos."(p.61, §3)

Sugerimos, para a ampliação do público-alvo, que se invista na facilitação da interpretação do texto, com frases e parágrafos mais objetivos e concisos. Como exemplo de oportunidade para aprimoramento citamos o seguinte trecho:

"A variabilidade espaço-temporal dos indicadores propostos pelos Temas do Ambiente Marinho no âmbito do PMBA/Fest descreve a dinâmica das forçantes oceânicas e atmosféricas que condicionam o aporte, a dispersão e a sedimentação de materiais particulados e dissolvidos no Ambiente Marinho pela chegada do Material Ligado ao Desastre (MLD) após o rompimento da barragem de Fundão; assim como seus principais efeitos na dinâmica da biodiversidade, contemplando desde produtores primários a consumidores de topo de cadeia."

O parágrafo acima poderia ser sintetizado da seguinte forma:

"A variabilidade dos indicadores descreve a dinâmica das forçantes que condicionam o aporte, dispersão e sedimentação de MPS no ambiente pela chegada do MLD; assim como seus principais efeitos na dinâmica da biodiversidade, desde produtores primários a consumidores de topo de cadeia."

Por fim, recomendamos a continuidade do monitoramento para todos os parâmetros em acompanhamento para o tema da Sedimentologia Marinha, mas entendemos que o plano de trabalho deve ser revisado e ajustado conforme o conhecimento já acumulado até agora.

e) Fitoplâncton:

Considerando os impactos ainda existentes, a continuidade do monitoramento de uma forma otimizada é necessária ainda por período indefinido.

f) Zooplâncton:

Considerando os impactos ainda existentes, a continuidade do monitoramento de uma forma otimizada é necessária ainda por período indefinido.

g) Ictioplâncton:

Considerando os impactos ainda existentes, a continuidade do monitoramento de uma forma otimizada é necessária ainda por período indefinido.

h) Bentos de fundos inconsolidado:

A necessidade de monitoramento contínuo é reforçada, dada a persistência dos impactos após oito anos. Este monitoramento deve integrar dados faunísticos, sedimentológicos, geoquímicos e mineralógicos.

i) Fundos Recifais:

Os processos ecológicos que conduzem as comunidades de recifes de coral, tais quais o crescimento dos organismos construtores e a competição por espaço, são lentos e observáveis, em sua maioria, em uma escala de anos. Separar padrões e forçantes naturais daquelas causadas pelo rompimento da barreira pode demandar ainda mais tempo. As diferentes metodologias também são importantes para observar o impacto em escalas diferentes, desde a fisiologia de uma colônia de coral até padrões a nível de comunidade.

Destarte, sugiro continuidade do monitoramento com as metodologias já empregadas. Também acho que há de se discutir, em sinergia com o que for observado em outros temas e com comunidades locais, a importância e possibilidade da criação de um regime de proteção de áreas que antes não eram bem compreendidas, mas que foram postas à luz com o desastre.

j) Ictiofauna e carcinofauna Marinha:

Considerando os impactos ainda existentes, a continuidade do monitoramento de uma forma otimizada é necessária ainda por período indefinido.

Deve-se atenção específica à condição populacional e sua relação com a gestão pesqueira da região.

k) Tartarugas Marinhas:

Manter o monitoramento e realizar as atividades de campo e análises dos diferentes monitoramentos de tartarugas marinhas de forma integrada, a fim de otimizar recursos, reduzir impactos sobre a praia pelas equipes, diminuir incertezas e padronizar metodologias de campo e de análises.

l) Cetáceos:

Todos os espécimes avaliados apresentaram problemas de saúde que indicam uma deterioração crônica, com patologias pulmonares, em fígado e rins que sugerem a presença de estressores ambientais persistentes. Essa situação é alarmante, pois revela que o estado de saúde dos animais está comprometido, mas o período de observação atual é insuficiente para estabelecer conclusões definitivas sobre as tendências de mortalidade. Portanto, um monitoramento mais extenso e sistemático é imprescindível para compreendermos melhor a dinâmica e evolução de como esses impactos continuarão afetando a saúde dessas populações.

Além disso, a longevidade dos cetáceos e sua posição como animais de topo de cadeia tornam ainda mais urgente a necessidade de monitoramento, especialmente em relação aos contaminantes que têm potencial de bioacumulação e biomagnificação. Esses contaminantes não apenas afetam a saúde dos indivíduos, mas também podem ter repercussões significativas para todo o ecossistema.

A situação da toninha, como espécie criticamente ameaçada de extinção, somada à vulnerabilidade dessa população que vive nas áreas altamente impactadas pelo desastre, demanda atenção especial. Os indicadores de estresse que impactam sua sobrevivência, como a interação com a pesca e as causas de emalhes, precisam ser investigados de maneira mais aprofundada nessa região. Essa compreensão é fundamental para a implementação de medidas mitigadoras que possam ser elaboradas e controladas e que visem proteger as espécies impactadas.

A presença de uma população de toninhas no litoral do Espírito Santo, identificada por meio da análise de marcadores mitocondriais, revela baixos índices de diversidade genética, evidenciando a vulnerabilidade dessa espécie vivendo em uma área altamente impactada pelo desastre. Além disso, a população sofre com as diversas perturbações antrópicas no ambiente e pelas mudanças climáticas que afetam o ambiente marinho, resultando em altas taxas de encalhes registradas. Portanto, a continuidade do monitoramento dos cetáceos e análises subsequentes são importantes para identificar os efeitos continuados do desastre, das tendências e avaliar a viabilidade populacional da toninha.

m) Aves Marinhas:

Propomos a continuidade do monitoramento dos impactos do desastre sobre a avifauna marinha, mantendo o conjunto abrangente de métodos e indicadores utilizados, os quais demonstram sensibilidade aos efeitos do material proveniente da barragem na região. O grupo pode ser utilizado como indicador da saúde ambiental do ecossistema marinho, permitindo a análise da desejável recuperação dos processos ecológicos dos quais participam. Novos métodos e abordagens necessitam ser continuamente avaliados, pois podem acrescentar informações valiosas para a compreensão das dinâmicas ambientais locais e regionais, bem como dos efeitos da biomagnificação, além da dispersão dos contaminantes através dos organismos das aves para os locais de reprodução.

n) Monitoramento remoto da megafauna:

Manter a malha amostral, periodicidade e descritores utilizados no monitoramento, e integrar os dados com os demais anexos, especialmente ecotoxicologia, para inferir os impactos na população considerando a contaminação observada nos organismos que são forrageados pela megafauna.

o) Sedimentação Marinha:

Para buscar o enriquecimento dos estudos nos próximos anos, sugere-se que as análises de sedimentação marinha extrapolem a plataforma continental em direção ao talude continental. Com o passar dos 5 anos do monitoramento do PMBA e com os dados trazidos, principalmente na região da foz do rio Doce, é possível perceber um indicativo de locomoção dos rejeitos para a porção do talude continental e, por isso, a necessidade de se analisar esta região, que também, possui uma biodiversidade importante, principalmente de bentos.

Realizar análise das limitações e consequências devida a ausência da área monitorada dos habitats marinhos. Quais as perdas e os impactos para o estudo.

5. CONCLUSÃO E/OU PROPOSIÇÃO

Ambiente Dulcícola

O rompimento causou efeitos crônicos que persistem por tempo indeterminado, muito além da fase aguda inicial e a remobilização de sedimentos e o rejeito continua a impactar a qualidade da água e a biodiversidade.

Os ecossistemas estudados demonstram alto grau de estresse com impactos observados em diversas comunidades aquáticas, desde a microbianas até peixes.

No âmbito da **ecotoxicologia**, o que se conclui é que os resultados obtidos, tanto de concentração de elementos metálicos e As quanto de alterações em biomarcadores, apontam uma resposta crônica de estresse fisiológico, cujos impactos podem ser observados através de mudanças nos parâmetros populacionais, índices de riqueza, diversidade e abundância, e no estado dinâmico de reestruturação da comunidade, que se principia já na comunidade microbiana.

O relatório “*MS_AD_Zooplâncton*” conclui que ao longo dos cinco anos de

monitoramento, o recrutamento de zooplâncton foi reduzido indicando vulnerabilidade da comunidade zooplanctônica e enfatiza que ***“Mesmo já tendo se passado nove anos do rompimento da barragem de Fundão, observamos que a comunidade zooplanctônica ainda não mostra sinais de estabilidade e a perda de traços funcionais ao longo dos cinco anos do monitoramento pode resultar na perda de funções ecossistêmicas importantes e alterar outros níveis tróficos do Baixo Rio Doce”***

Perifíton: *“De maneira geral, a escassez de dados pretéritos sobre a composição de espécies e estrutura da comunidade perifítica, principalmente do Rio Doce, dificulta o entendimento do quanto a passagem do rejeito impactou esta comunidade e o seu nível de recuperação ao longo dos 5 anos de monitoramento. Para alguns ambientes há indícios de melhora das condições ambientais conforme valores de riqueza e diversidade, mas ainda se observa fortes efeitos das variações nas condições ambientais entre os períodos climáticos sobre a comunidade.”*

Macrófitas: O documento também conclui que *“as descobertas destacaram a importância das macrófitas como bioacumuladores de metais e como potenciais agentes de remediação em áreas contaminadas”* e que ***“Especificamente, as espécies Ludwigia octovalvis e Pistia stratiotes demonstraram altas concentrações de metais como Alumínio, Vanádio, Ferro e Bário. Este padrão sugere uma possível função das macrófitas na remoção e concentração de metais pesados, potencialmente mitigando a contaminação em certas áreas.”***

Ictiofauna Dulcícola: Foram identificadas, principalmente na calha do rio Doce, quatro alterações incomuns em larvas de peixes: rompimento da cavidade abdominal, presença de sedimento avermelhado ou partículas brilhosas aderidas ao corpo, ocorrência de sedimento avermelhado ou partículas brilhosas em cavidades internas e deformidades na região da cabeça, olhos e focinho e o **relatório conclui que a frequência dessas deformidades apresenta tendência de aumento ao longo dos anos, afetando 13 táxons larvais distintos.**

O relatório mostrou um declínio na riqueza de espécies nativas de peixes e um discreto aumento na biomassa das espécies introduzidas, mostrando que a calha do rio Doce é o ambiente que apresenta maior dissimilaridade e riqueza de espécies, devido à alta conectividade com seus tributários, fato fundamental para a resiliência das comunidades da ictiofauna desse ambiente.

Algumas espécies de peixes de relevância comercial e ambiental, que eram encontradas no baixo rio Doce antes do rompimento da barragem, como as do gênero Brycon, não conseguiram restabelecer suas populações após o impacto.

Desta forma o relatório conclui que a ictiofauna do baixo rio Doce está comprometida, evidenciada pelas histopatologias observadas em diferentes espécies nativas e introduzidas, com perda dos padrões morfológicos na organização celular de ovários e testículos, características típicas de ambientes impactados, capazes de afetar o desenvolvimento gonadal a curto e longo prazo, prejudicando a reprodução dos peixes. Não obstante, houve redução expressiva da diversidade filogenética das espécies nativas, com consequente simplificação da diversidade funcional.

Ambiente Costeiro

Os diferentes ecossistemas analisados — praia, manguezal e restinga — apresentam níveis variados de impacto, com destaque para alterações ecológicas nos bentos de praia, redução de densidade e tamanho dos caranguejos em manguezais, e comprometimento da vitalidade da vegetação de restinga, apesar de sinais de recuperação ao final do período, além de alteração nos processos sedimentares e de estabilidade da linha de costa.

Ecotoxicologia: Os resultados do monitoramento apontam para uma contaminação significativa no ambiente costeiro por metais e metaloides, como arsênio (As), cádmio (Cd), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb), reconhecidamente tóxicos mesmo em pequenas concentrações. A bioacumulação e a biomagnificação desses elementos nos organismos de diferentes níveis tróficos demonstram impactos biológicos relevantes, com destaque para espécies que habitam ou utilizam o ambiente costeiro para forrageamento.

Por fim, limitações nos métodos analíticos utilizados pelos laboratórios acreditados solicitados pelas empresas, como a baixa sensibilidade para detecção de concentrações abaixo do limite estipulado na acreditação dos mesmos, comprometeram parcialmente a análise de tendências.

Praias: Os Compartimentos B' e C apresentaram inversão da tendência histórica (1970 a 2015) na dinâmica das praias, que se mostrava progradante e de baixa magnitude, para um padrão erosivo e de alta magnitude no período pós-Rompimento, especialmente as estações de Regência (S7), Povoação (N1) e Degredo (N2). **O Compartimento B mostrou-se morfologicamente o mais dinâmico e assumiu um padrão progradante nos 5 anos do monitoramento, diferentemente da tendência histórica retrogradante e de menor magnitude.**

As praias emersas do Compartimento A estão moderadamente impactadas, principalmente devido à alta concentração de As, que superam os valores orientadores internacionais, assim como os dados prévios ao rompimento da barragem de Fundão. **Além do As, outros elementos, como Mn e Ni, exibem concentrações acima das diretrizes internacionais, enquanto o Fe ultrapassa os dados pré-rompimento.** Devido às alternâncias entre aportes fluviais do rio Doce e mobilidade do MLD depositado na antepraia e plataforma continental, as praias dos Compartimentos B' e C não apresentam tendência de diminuição do impacto causado pelas altas concentrações de elementos químicos, exceto a estação REBio Comboio (S6).

Manguezal: De forma geral, no ambiente costeiro foram observados maiores impactos nas proximidades da desembocadura do rio Doce e no litoral norte da área estudada, sendo que essa última área (compartimento C) sofre bastante influência da ação da deriva litorânea. O ambiente é exposto ao material ligado ao desastre tanto no período chuvoso como no período seco. No período chuvoso tem-se aporte direto de material contaminado no sistema costeiro em função do incremento da vazão no rio Doce; já no período seco, há incremento da frequência de eventos meteorológicos, que promove a remobilização do material.

Em caranguejos, os dados indicam uma importante bioacumulação destes três metais (Cd, Hg e Zn) nos organismos avaliados, a qual se mantém ao longo do período do monitoramento realizado e, conseqüentemente, um possível impacto crônico destes elementos na biota aquática em questão. As campanhas 7 e 10 se

destacaram por apresentarem os maiores valores do IBR Biomarcador, indicando a presença de um significativo impacto fisiológico, já que os biomarcadores responsáveis pela geração deste índice refletem estresse oxidativo (lipoperoxidação e proteínas carboniladas), ativação de mecanismos celulares de proteção contra metais e metaloides (metalotioneínas) e danos ao DNA (sítios AP). **É possível inferir que houve estresse fisiológico e, possivelmente, danos genéticos, com um aumento destes efeitos biológicos.**

Para os caranguejos, foi identificado ainda alteração no tamanho da carapaça e densidade dos organismos, além de destacado que a exposição de larvas de caranguejo ao ambiente contaminado compromete o estoque desse recurso e o potencial de extração futuro (PEF). Além disso, foi destacado que em todos os estuários avaliados foi observado baixa frequência de indivíduos com tamanho comercial (Largura da Carapaça > 60 mm) impactando diretamente o estoque comercial do caranguejo-uçá.

Restinga: O impacto do rompimento da barragem na vegetação de restinga é complexo e multifatorial, envolvendo tanto contaminação química quanto alterações climáticas e geomorfológicas. As respostas variam entre os compartimentos, com melhorias pontuais, mas persistência de efeitos negativos na vitalidade e estrutura das comunidades. Elementos como Mn, As e Zn desempenham papel central nos impactos, afetando funções metabólicas e reprodutivas.

Estratégias de manejo e recuperação devem focar na mitigação dos efeitos da poluição e na preservação de espécies-chave das comunidades vegetais **Altas concentrações de metais como As, Mn, Fe, Cu e Zn nos sedimentos e tecidos foliares das plantas, indicando bioacumulação.** A poluição está relacionada ao aporte fluvial e marinho, afetando a eficiência fotossintética e aumentando o estresse oxidativo da vegetação.

Ambiente Marinho

Os dados históricos revelam efeitos crônicos e danosos em diversas comunidades, com estresse fisiológico e impacto significativo no plâncton, crucial para entender as alterações em níveis tróficos superiores. O monitoramento contínuo é essencial para avaliar a toxicidade, a influência climática e as tendências de melhoria. **Os impactos abrangem diversos grupos - plâncton, carcinofauna, ictiofauna, corais, bentos, tartarugas, cetáceos e aves - com alterações fisiológicas, genéticas, de abundância e diversidade.**

Ecotoxicologia: Todos os descritores fisiológicos e elementos analisados mostram o impacto significativo sobre o plâncton, de modo que devem ser, prioritariamente, analisados estes descritores como via de interpretação das alterações nas guildas superiores e na própria estruturação da comunidade;

- **A carcinofauna apresenta um claro padrão de impacto do rejeito no sentido sul a norte, com perda da *fitness* e alterações relevantes em sua fisiologia que podem ter impacto direto no desenvolvimento e resiliência das populações;**
- **A ictiofauna, seguindo a mesma tendência, apresenta maiores concentrações históricas no músculo na última campanha realizada.** Ainda assim, os parâmetros de monitoramento não mostram tendências claras, sendo relevante, para melhor caracterização, a manutenção dos principais

indicadores enzimáticos, além da própria dosagem de metais no músculo, fazendo-se a mesma recomendação a respeito do consumo humano destes grupos;

- O PARNA Abrolhos, ainda que tardiamente na série histórica, demonstra a ocorrência de um impacto crônico no plâncton e nos corais e hidrocorais. Chama atenção que há uma redução do *fitness* dos corais e hidrocorais, de modo que enzimas relacionadas aos processos fisiológicos de crescimento e fixação de carbono são comprometidas, particularmente nos setores ABR02 e ABR04;
- No âmbito da ecotoxicologia, o que se conclui é que os resultados obtidos, tanto de concentração quanto de alterações em biomarcadores, apontam uma resposta crônica de estresse fisiológico, cujos impactos podem ser observados através de mudanças nos parâmetros populacionais, índices de riqueza, diversidade e abundância, e no estado dinâmico de reestruturação da comunidade, que se principia já na comunidade microbiana.

Hidroggeoquímica: O padrão e tendência de melhoria de diversos índices e parâmetros associados às ações deste monitoramento foi identificado pelo relatório para os anos mais recentes, principalmente Anos 5 e 6. Este resultado pode ser considerado um indicador positivo da resposta do ambiente no contexto do recorte temporal deste monitoramento, no entanto este constitui ainda uma série histórica curta e recente.

Sedimentação Marinha: 'Alterações na composição sedimentológica', 'Aumento da concentração do material particulado em suspensão e turbidez' e 'Aumento do potencial de mobilização do fundo' são apresentados no Relatório.

Fitoplâncton: Após os cinco anos de monitoramento, é possível afirmar que o fitoplâncton da região de estudo tem apresentado melhoria de qualidade em termos de densidade e saúde. **Entretanto, para a região da Foz, a diversidade local ainda tem sido impactada, caracterizando o impacto crônico. Isto afeta toda a cadeia trófica, que tem estes organismos em sua base (biomagnificação).**

Zooplâncton: Além da alta concentração de metais e metaloides, os contaminantes do material ligado ao desastre geraram alterações na estrutura e composição da comunidade zooplânctônica, estabelecendo uma comunidade dominada por espécies resistentes a condições ambientais adversas. Apesar da aparente melhora da condição geral do ambiente, as evidências mostram que esta comunidade ainda se encontra longe da situação pré-rompimento devido aos impactos crônicos.

Bentos de fundos inconsolidado: Passados oito anos do rompimento da barragem e chegada dos rejeitos ao ambiente marinho, a fauna bentônica de fundos inconsolidados segue sofrendo impactos, notadamente com a redução da riqueza e diversidade nas áreas mais próximas à Foz e ao Norte dela. Estas conclusões aparecem de maneira sintética na Matriz de Resultados, na qual constam com nível alto e crítico os seguintes impactos sobre o Bentos de Fundos Inconsolidados: **contaminação por metais e metaloides; alterações na estrutura de comunidade; aumento na abundância de táxons indicadores de impacto; e, mortalidade de organismos.**

Fundos Recifais: Foram detectadas alterações significativas nas dinâmicas das comunidades. Algumas, como na cobertura do ponto A (PARNAM Abrolhos) ou do ponto D (Costa das Algas) são mais fáceis de visualizar devido à existência de dados pretéritos. Mas mesmo para pontos sem essa linha de base (ex: Recifes Esquecidos), é possível observar tendências como, por exemplo, uma queda drástica na cobertura de MILLEPORAS.

Ictiofauna e carcinofauna Marinha: As análises de diversidade genética mitocondrial reforçam que espécies estuarinas têm sido mais suscetíveis aos impactos do Material Ligado ao Desastre (MLD), incluída a potencial redução da disponibilidade de fontes alimentares adequadas, sinalizadas pela menor concentração de lipídeos nos indivíduos, especialmente na foz. Para o grupo foram identificados e categorizados 22 impactos, sendo que a lama aderida ao corpo das pós-larvas e o aumento da concentração de metais e metalóides nos otólitos dos peixes, ambos ao longo de todo o monitoramento, foram considerados diretamente ligados ao rompimento da barragem.

Tartarugas Marinhas: As tartarugas marinhas foram impactadas em diferentes níveis (individual e populacional) e estágios de vida (ovos, recém-nascidos, juvenis e adultos), indicando que a qualidade do ambiente na área impactada está comprometida e a contaminação pode estar afetando tanto a saúde quanto a genética das tartarugas, tornando-as ainda mais suscetíveis e diminuindo a capacidade adaptativa diante dos recentes impactos ambientais. **Importante destacar que as tartarugas possuem ciclo de vida longo, e alterações no processo reprodutivo podem demorar anos para serem constatadas, como uma possível redução no tamanho populacional das tartarugas.**

Cetáceos: A matriz de resultados do ambiente marinho indica altos impactos, diretos e indiretos, e relacionados ao encalhe de cetáceos associados ao rompimento da barragem do Fundão em Mariana. A constatação de que todos os espécimes avaliados apresentaram problemas de saúde, com ausência de variações anuais significativas, mesmo aqueles cujo diagnóstico de causa morte foi o emalhe, indica uma deterioração crônica da saúde dos animais.

Os resultados destacam a alta fidelidade da toninha às regiões com maior depósito de rejeitos tóxicos e suscetíveis a remobilização, reforçam a preocupação com a saúde e a sobrevivência dessa espécie. Considerando que *Franciscana Management Area I* (FMA) [\[la1\]](#) [\[MM2\]](#) possui a menor população de toninhas entre todas as FMAs e que as evidências genéticas e morfológicas, respaldadas por pesquisas recentes, mostram diferenças na abundância e nas preferências ecológicas, indicando que as toninhas estão em processo de especiação, destaca-se a necessidade de atenção especial para essa subpopulação.

Aves Marinhas: Os indicadores mostram que as aves enfrentam ameaças à sua conservação na região impactada, uma vez que a exposição aguda e crônica aos contaminantes tem comprometido a saúde e reprodução das populações. Há evidências de que os rejeitos da barragem do Fundão afetaram significativamente as aves marinhas na região da Foz do Rio Doce e nas áreas adjacentes atingidas pelos rejeitos, com impactos verificados até a região do Parque Nacional Marinho de Abrolhos, situado a mais de 200 Km.

Nos relatórios pregressos, obteve-se a tendência de acumulação de metais nos

adultos, conforme resultados da análise das penas e desvios dos parâmetros de saúde (hemograma). Ainda, houve um aumento nas concentrações de As, Cd, Pb e Hg entre os períodos pré e pós-rompimento da barragem para as espécies que usam a área do PARNA Abrolhos como refúgio reprodutivo, sugerindo um processo de contaminação crônica incluso pela menor viabilidade de prole.

As aves que se reproduzem no Espírito Santo (e.g. *Sterna hirundinacea*) foram umas das mais impactadas pela Influenza Aviária em 2023, levando a um declínio populacional. Essa fragilidade pode estar relacionada à queda na imunidade causada pela exposição crônica aos contaminantes.

De forma integrada podemos concluir que os três ambientes, Dulcícola, Costeiro e Marinho, após 10 anos do rompimento da Barragem da Samarco em Fundão, seguem de forma aguda e crônica impactados pelo MLD-Material Ligado ao Desastre, variando os indicadores de acordo com os próprios ambientes, e os diferentes comportamentos dos Metais e Arsênio nestes.

Variam também com a sazonalidade, seca ou chuvosa, e a resposta dos organismos a um impacto não finalizado, pois os elementos contaminantes seguem no meio, na calha do rio e no mar, ora no sedimento, ora na água, se biodisponibilizando em ciclos, e bioacumulando nos níveis superiores da cadeia trófica.

Os indicadores apontam uma resposta crônica de estresse fisiológico das espécies monitoradas, cujos impactos podem ser observados através de mudanças nos parâmetros populacionais, índices de riqueza, diversidade e abundância, e no estado dinâmico de reestruturação das comunidades, que se principia já na comunidade microbiana até a megafauna.

Impactos físicos também são observados, com mudanças das características dos habitats, da turbidez das águas, e o consequente impacto na biota. Incluindo a alteração da linha de costa e seus processos erosivos, ocasionados por milhões de toneladas de sedimentos finos depositados no rio e no mar.

Monitoramento contínuo permitirá acompanhar a tendência dos indicadores, assim como avaliar se as medidas de reparação e mitigação estarão atingindo seus objetivos.

Sedimentação Costeira: A análise desses dados mostrou a ocorrência de um “pulso sedimentar” caracterizado por um aumento após 2015, atingindo um máximo em 2019 e seguido por decréscimo a partir de 2020 até o final de 2022. Este comportamento corrobora o padrão observado pelos isótopos radiogênicos de Sr e Nd. Além destas análises altas concentrações de Ferro caracterizaram a deposição dos rejeitos nas armadilhas de sedimentos e nas estruturas dos corais, desde o setor Abrolhos ate Costa das Algas.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Sosti Perini, Usuário Externo**, em 13/10/2025, às 10:57, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Larissa Novaes Simões, Usuário Externo**, em 13/10/2025, às 11:13, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Francisco Ditzel Faraco, Coordenador(a)**, em 13/10/2025, às 12:21, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Sforza, Analista Ambiental**, em 13/10/2025, às 12:41, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Marcello Vicente Lourenço, Chefe**, em 13/10/2025, às 13:09, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Emilia Brito, Usuário Externo**, em 13/10/2025, às 14:01, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Correia de Freitas, Analista Ambiental**, em 13/10/2025, às 14:51, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Antonio De Padua Leite Serra De Almeida, Chefe**, em 13/10/2025, às 15:33, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Hermes José Daros Filho, Usuário Externo**, em 13/10/2025, às 15:59, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **MÔNICA MAGALHÃES BARBOSA, Usuário Externo**, em 14/10/2025, às 12:02, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Selma Samiko Miyazaki, Analista Ambiental**, em 14/10/2025, às 13:06, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JULIANO DE OLIVEIRA BARBIRATO, Usuário Externo**, em 14/10/2025, às 17:52, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Maria Regina Gonçalves De Souza Soranna, Servidor Cedido**, em 15/10/2025, às 10:46, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Cezar Neubert Goncalves, Analista Ambiental**, em 15/10/2025, às 12:41, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Ana Kelly Simões Rocha, Usuário Externo**, em 15/10/2025, às 15:04, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Giulia Burle Costa, Usuário Externo**, em 15/10/2025, às 15:20, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Roberto Cavalcanti Barbosa Filho, Analista Ambiental**, em 20/10/2025, às 11:42, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Mônica Maria Vaz, Analista Ambiental**, em 20/10/2025, às 14:36, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Paolo registrado(a) civilmente como Damiani Paolo Gomes Rocha, Usuário Externo**, em 20/10/2025, às 15:42, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Juliana Lopes Segadilha, Usuário Externo**, em 20/10/2025, às 16:46, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Quandt Monteiro, Analista Ambiental**, em 21/10/2025, às 10:52, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Patrick Calatroni Hemaidam, Usuário Externo**, em 21/10/2025, às 15:22, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Gabriella Tiradentes Pizetta, Analista Ambiental**, em 21/10/2025, às 16:12, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Marília das Gracas Mesquita Repinaldo, Analista Ambiental**, em 21/10/2025, às 17:24, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Joao Carlos Alciati Thome, Coordenador(a)**, em 29/10/2025, às 15:52, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Humberto.Cotta Júnior, Usuário Externo**, em 17/11/2025, às 12:29, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.icmbio.gov.br/autenticidade> informando o código verificador **022221795** e o código CRC **119FF96B**.