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

Material Suplementar Ambiente Marinho

Tema: Zooplâncton

RT-55/OUT 26

RA2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2026

EQUIPE TÉCNICA

Luiz Fernando Loureiro Fernandes (coordenador)

Bianca Salvador

Gabriel Harley Costa Santos

Gustavo Martins Rocha

Laura Rodrigues da Conceição

Priscila Teixeira-Amaral

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL 4

2 METODOLOGIA 4

2.1 COLETA 5

2.1.1 Preparo pré-campo 5

2.1.2 Amostragem – Abundância, composição e biomassa 5

2.2 ANÁLISE 7

2.2.1 Procedimentos de preparo e manuseio de amostras em laboratório 7

2.2.2 Procedimentos de análise de contagem – Abundância e Composição 8

2.2.3 Procedimento para cálculo da densidade 9

2.2.4 Análise de dados e Estatística 9

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 11

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 12

3.1 ÍNDICES DE BIODIVERSIDADE 13

3.2 ÍNDICE DE PREVALÊNCIA DE INDICADORAS (IPI) 23

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO 28

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS 29

6 REFERÊNCIAS 29

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e a frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest-UFES) passaram por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento aos objetivos do Programa. Estas alterações foram orientadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) e aprovadas pelo Comitê Interfederativo (CIF), por meio de: (1) Ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição), (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o "Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES" e (3) Ofício SEI Nº 32/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio, Nota Técnica nº 1/2024-CTBio/DIBIO/ICMBio e Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024.

As modificações implementadas encontram-se nos seguintes Materiais Suplementares, os quais contemplam todo o período de execução do PMBA/Fest-UFES: 1) MS – Malha amostral, que apresentam as estações amostrais executadas ao longo do tempo por todos os Anexos/Temas, separados por cada marco temporal histórico mencionado acima ("Ano 1", "Transição", "Novo Ciclo" e "Deliberação 803"); 2) Frequência amostral, o qual contempla o histórico da periodicidade amostral (seguindo os mesmos Anexos/Temas contemplados no item 1) e 3) MS – Mapas históricos das malhas amostrais, que apresenta os mapas das malhas amostrais (incluindo as estações) executadas por todos os Anexos/Temas.

Segue o detalhamento temporal, como forma de esclarecer a execução dentro dos marcos históricos: "Ano 1" (setembro de 2018 e setembro de 2019); "Transição" (outubro de 2019 e julho de 2022); "Novo Ciclo" (agosto de 2022 a setembro de 2024) e "Deliberação 803" (outubro de 2024 a março de 2026). O grupo da Ecotoxicologia é uma exceção a esta historicidade, pois iniciou a amostragem referente ao "Novo Ciclo" em janeiro de 2023 e segue com a "Deliberação 803", na periodicidade já informada.

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento de entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA/Fest-UFES submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em agosto de 2022 (e dezembro de 2022 para o Tema Ecotoxicologia) e na Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024. Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest-UFES a fim de determinar os indicadores.

2.1 COLETA

2.1.1 Preparo pré-campo

Previamente à etapa de campo, foi feito o preparo de solução preservante a partir de formaldeído (CH_2O) 37% (considerado absoluto) e bórax (tetraborato de sódio decahidratado - $Na_2B_4O_7$. $10H_2O$) para fixação e preservação das amostras de zooplâncton (USEPA, 2016). O procedimento foi realizado em laboratório equipado com capela, pois o formaldeído é volátil e nocivo à saúde. Foram utilizados luvas, óculos e máscara com filtro, seguindo as orientações contidas na Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ) para formaldeído 37% P.A. e Tetraborato de Sódio P.A.

- Em um béquer foram adicionados aproximadamente 20 g de bórax em 1000 mL de formaldeído 37% P.A para formar a solução estoque;
- Utilizou-se um agitador magnético para acelerar a dissolução do bórax;
- Após dissolvida, a solução foi retornada para o frasco de formaldeído, tampada e registrada, que estava tamponada, utilizando uma etiqueta adesiva.

Preparo dos frascos com o preservante:

- Foi separado um número de frascos suficiente para toda a campanha com um excedente de 20% (capacidade individual de 500 mL);
- Na capela de exaustão, o frasco foi preenchido com a solução estoque;
- O volume da solução estoque foi obtido a partir da diluição de 9 partes de água para 1 parte de formaldeído (V=9:1).

2.1.2 Amostragem – Abundância, composição e biomassa

A coleta do zooplâncton foi realizada no período noturno (entre 18 horas e 6 horas), por meio de arrastos verticais estratificados, com rede do tipo WP-2 com abertura de malha de 200 µm (HARRIS *et al.*, 2000).

Um fluxômetro mecânico foi acoplado na abertura da boca da rede na região central, para medir o fluxo de água que passa pela rede. Esses dados são secundários e para fins de registro apenas, não sendo utilizados no cálculo de volume de água filtrada. O fechamento da rede WP-2 na profundidade desejada foi feito através do mecanismo de fechamento fixado no cabo que sustenta a rede, o qual foi liberado no cabo pela equipe de coleta. A profundidade do ponto amostral foi informada pela equipe de bordo antes de iniciar a coleta utilizando o equipamento (sonda) disponível na embarcação para determinação da profundidade dos estratos (h).

Em profundidades superiores a 5 m e inferiores a 30 m foram feitos 2 arrastos:

- 1 arrasto do fundo até metade da coluna d'água;
- 1 arrasto da metade da coluna d'água até a superfície.

Em profundidades superiores a 30 m foram feitos 3 arrastos:

- 1 arrasto do fundo até 30 m;
- 1 arrasto de 30 a 15 m da coluna d'água até a superfície;
- 1 arrasto de 15 m até a superfície.

Durante a coleta, entre cada procedimento amostral, foram realizadas a verificação e a limpeza da rede de arrasto, a fim de conferir a integridade dos equipamentos e do sistema de fechamento, para que pudesse ser realizado o próximo lançamento.

Para o preparo da rede WP-2, utilizou-se o procedimento a seguir: colocou-se o copo coletor, certificando-se de que todas as manilhas estavam fechadas e que o sistema de fechamento da rede estava acoplado e travado. O fluxômetro foi preso no aro da rede (diâmetro = 60 cm; raio(r) = 30 cm) com abraçadeiras de forma a ficar localizado no centro da boca da rede.

Os dados da estação e o número inicial do fluxômetro foram preenchidos a lápis, assim como as demais informações relevantes (pontos de coleta, hora, data, profundidade, etc.), na planilha de custódia impressa em papel vegetal, para garantir que nenhuma informação anotada fosse perdida.

A rede, presa no cabo, foi colocada na água com auxílio de um guincho, sendo o primeiro estrato amostrado sempre o mais profundo. Os arrastos sempre foram iniciados 5 metros acima da profundidade local, de acordo com a medição da sonda e a metragem lançada de cabo, para evitar que a rede tocasse no fundo. Um metro antes da rede WP-2 atingir a profundidade desejada para finalizar o arrasto, o mensageiro foi lançado para fechamento da rede. Logo após recolher a rede ao deck, com o cuidado de posicionar o copo coletor em pé, anotou-se o número final do fluxômetro na planilha de custódia.

A rede foi, então, posicionada na vertical para lavagem, sempre jogando o jato de água do lado de fora da rede, para evitar contaminação da amostra. O copo coletor da rede foi desacoplado e a amostra transferida para um frasco de polietileno de 500 mL contendo solução de formaldeído 4% tamponado, já com etiqueta padronizada contendo informações da amostra (código, ponto amostral, data, estrato, tipo de dado de bruto). Quando necessário, foi completado o volume do recipiente com água filtrada do local.

Após a operação de coleta, as amostras foram acondicionadas em caixas plásticas de transporte, em local protegido do sol, evitando a perda do formol por evaporação. Ao final de toda a etapa de amostragem, as amostras depositadas nas caixas plásticas de transporte foram enviadas pela equipe de logística por transporte terrestre para o LabZoo, para ser dado início à etapa de análises laboratoriais.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Procedimentos de preparo e manuseio de amostras em laboratório

As amostras recebidas no laboratório foram registradas na matriz de rastreabilidade de amostras, onde foram conferidas as quantidades e o estado dos potes, que por sua vez foram higienizados na parte externa e posteriormente acondicionados em prateleiras dentro de armário fechado com sistema de exaustão interno, até sua análise.

Devido à toxicidade do formaldeído usado para preservação das amostras, este foi substituído temporariamente por água destilada durante a identificação e contagem dos organismos. A amostra pode permanecer nesta condição por poucos dias (2 dias em temperatura ambiente ou 4 dias sob refrigeração) (USEPA, 2016).

O método de substituição do formaldeído por água consiste em filtrar diretamente a amostra em uma peneira circular com base contendo malha de náilon, com abertura menor que 200 µm, de modo a impedir a passagem dos organismos. Para garantir a qualidade do preparo da amostra, procedeu-se da seguinte maneira:

- Dentro da capela de exaustão ligada, utilizando luva nitrílica, óculos de proteção, máscara com respirador, sapato fechado e jaleco, despejou-se a amostra na peneira com malha de náilon sobre um béquer, de forma que os organismos ficassem retidos na malha e a solução com formaldeído a 4% passasse para o béquer. Lavou-se a borda interna do frasco que continha a amostra com uma pisseta contendo solução de formaldeído a 4% para que todos os organismos fossem transferidos para a peneira, evitando o risco de subquantificação e ressecamento dos organismos que possivelmente teriam ficado ali retidos;
- O formaldeído retirado da amostra foi descartado em bombona devidamente identificada para posterior recolhimento pela empresa coletora de resíduos.
- A peneira foi virada do lado avesso sobre um béquer de vidro graduado para transferência dos organismos. O procedimento foi realizado com cuidado para os organismos não caírem para fora do recipiente. Com auxílio de uma pisseta contendo água destilada, lavou-se a malha da peneira, de forma a transferir a totalidade dos organismos retidos na malha para o béquer para que pudessem ser analisados em microscópio estereoscópico;
- Após o fim da análise da amostra, reverteu-se o processo inicial onde a água foi retirada com a mesma peneira utilizada. A água ficou depositada em um béquer, a qual foi posteriormente descartada. Os organismos foram então transferidos da peneira para um vidro de boca larga devidamente etiquetado utilizando uma pisseta contendo solução de formaldeído 4% tamponado com tetraborato de sódio.

2.2.2 Procedimentos de análise de contagem – Abundância e Composição

Amostras com pequeno número de organismos (< 500 organismos) foram analisadas integralmente, enquanto as amostras que continham um número elevado de organismos foram subamostradas (BAIRD *et al.*, 2017).

Para garantir a qualidade do procedimento de contagem, este seguiu sempre a sequência abaixo descrita:

- O formaldeído foi retirado da amostra, transferindo-o para um béquer graduado com água (Item 2.2.1);
- A amostra contida no béquer graduado foi homogeneizada, com auxílio da Pipeta de Pasteur, em movimentos aleatórios, com cuidado para não danificar os organismos;
- Os organismos foram transferidos para o subamostrador de Folsom para homogeneizar e dividir a amostra. No subamostrador de Folsom foram feitos 40 movimentos semicirculares para completa homogeneização da amostra e posterior transferência do homogeneizado aos recipientes do equipamento. Cada recipiente conteve metade da amostra inserida no subamostrador. Este procedimento de fracionamento foi repetido até que se alcançasse uma quantidade satisfatória de organismos (aproximadamente 500 indivíduos) (BAIRD *et al.*, 2017). A fração final (1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, ...) foi anotada para o cálculo de densidade;
- Os organismos da subamostra obtida no subamostrador de Folsom foram transferidos para a peneira com malha de náilon;
- Com auxílio de uma pisseta, lavou-se com jatos de água destilada a malha da peneira, de forma a transferir os organismos retidos na malha para um béquer graduado;
- Os organismos do béquer foram transferidos para uma câmara de Bogorov, com auxílio de pipeta de Pasteur, para análise em microscópio estereoscópico. Este procedimento se repetiu até a finalização da subamostra;
- Todos os organismos do zooplâncton contidos na subamostra (alíquota) foram identificados e contados com o auxílio de bibliografia especializada (BOLTOVSKOY, 1999; BOLTOVSKOY, 1981), e os resultados foram anotados na ficha de análise, incluindo a fração da amostra que foi analisada.

Alguns organismos do mesozooplâncton tiveram necessidade de dissecção em microscópio estereoscópico, possibilitando que partes do corpo fossem observadas em microscópio óptico sob maiores aumentos (≥ 100X). Para isto, os organismos foram retirados da subamostra contida na câmara de Bogorov, com auxílio de uma pinça de ponta fina, e posicionados em uma gota de glicerina diluída com formalina 4% tamponada (proporção de 9 para 1 de formalina) em lâmina lisa ou escavada. A dissecção foi realizada utilizando agulha (Insect pins) de 0,15 mm, sob observação em microscópio estereoscópico.

2.2.3 Procedimento para cálculo da densidade

Os dados obtidos foram expressos de forma quantitativa (estimativa de densidade), por meio do número de organismos por unidade de volume (ind.m^{-3}) (HARRIS *et al.*, 2000), e serviram para compor os dados brutos. Esta extrapolação foi feita com base no volume de água filtrada em campo para obtenção de cada amostra, o qual foi calculado pela seguinte fórmula:

$$V = \pi.r^2.h$$

Sendo que:

V = volume de água filtrado pela rede (m^3)

π = 3,14

r = raio da boca da rede utilizada para coleta

h = distância percorrida pela rede em arrasto vertical (m)

Com base no volume de água filtrada calculado, a densidade de organismos (ind.m^3) foi então expressa segundo a fórmula a seguir:

$$N = (ni/a)/V$$

Onde:

N = densidade da espécie no ambiente

ni = número de indivíduos da espécie i na subamostra (ou na amostra, quando analisada na integralidade)

a = alíquota da amostra (fração correspondente)

V = volume de água filtrada pela rede (m^3)

2.2.4 Análise de dados e Estatística

A densidade de organismos obtida foi utilizada para o cálculo dos índices de biodiversidade pertinentes: Diversidade de Shannon (H') e Equabilidade de Pielou (J), selecionados a partir de embasamento bibliográfico, considerando a sua aplicação e eficácia em estudos de diagnóstico ambiental (BENEDETTI *et al.,* 2016; CAMPOS *et al.*, 2017; UTTAH *et al.,* 2013). Esses índices buscam avaliar o impacto direto na composição da comunidade zooplanctônica, bem como mudanças na dominância de espécies. Apenas os taxa identificados a nível de espécie foram considerados no cálculo dos índices de biodiversidade.

Com base na abundância relativa das espécies, calculada a partir da abundância total de organismos identificados, foi também calculado o Índice de Prevalência de Indicadoras (IPI), que expressa a dominância dos taxa resistentes frente às condições de maior ou menor concentração do Material Ligado ao Desastre (MLD). No presente relatório foram considerados os taxa *Paracalanus* spp. (juvenil),

Paracalanus cf. *parvus* e *Oikopleura* spp., que mostraram grande relevância ecológica nos diferentes setores e importância na estruturação da comunidade ao longo de todo o monitoramento. O índice foi calculado com base nos dados de abundância, onde: IPI = (AR *Paracalanus* spp. [juvenil] - AR *Paracalanus* cf. *parvus*) + AR *Oikopleura* spp. Onde AR = Abundância Relativa Percentual. Desta forma, quanto maior o valor de IPI, maior o indicativo de impacto na comunidade, pois denota maior dominância de espécies resistentes ao impactante.

Com o objetivo de identificar variações temporais para os índices ecológicos durante o monitoramento, foram realizadas análises estatísticas em todos os setores entre os períodos seco e chuvoso, considerando todas as campanhas, bem como entre os anos dentro de cada um dos períodos sazonais. No setor Foz do rio Doce foi feita uma subsetorização de acordo com a localização dos pontos amostrais situados ao norte, sul e transecto central, objetivando identificar a variação espacial das respostas da comunidade em relação à vazão do rio e ao deslocamento do MLD.

O teste de variância ANOVA foi aplicado aos índices ecológicos a fim de detectar variabilidades espaciais (entre os setores) e temporais (entre os períodos e entre os anos dentro de cada setor) de acordo com a comparação entre as médias calculadas para cada variável (TURNER & THAYER, 2001). Onde foram encontradas diferenças significativas, foi aplicado também o teste Tukey a fim de localizar os momentos em que essas diferenças estavam concentradas (TUKEY, 1977). Para essas análises, a matriz de dados foi transformada através da raiz quarta com o objetivo de atender os pressupostos de normalidade e homogeneidade.

A partir dos valores de Diversidade de Shannon-Wiener, Equitabilidade de Pielou e do IPI, foi realizada análise de modelos lineares generalizados (GLM) a partir de distribuição Gamma e link log, seguindo Critério de Informação de Akaike (AIC) para seleção do melhor modelo explicativo para os padrões de distribuição dos dados. As variáveis explicativas incluídas na análise foram: V, Co, Ni, Cu, As, Ag, Cd, Ba, Pb, Cr, Fe, Al, Mn, Zn, Hg, material particulado em suspensão (MPS), percentual de matéria orgânica particulada (MO%), Abundância de Fitoplâncton, Clorofila-a, Fluxo 15d (vazão média do rio Doce nos 15 dias que antecederam a coleta), temperatura potencial, e salinidade prática, após exclusão por multicolinearidade (Rho de Spearman > 0,8 e VIF > 5). Foram consideradas todas as estações amostrais da APA, Foz e Norte em conjunto na mesma análise.

Os dados de composição e abundância zooplanctônica do setor Foz do rio Doce também foram examinados através de análises multivariadas. As espécies e grupos taxonômicos que representaram ao menos 1% de abundância relativa neste setor foram selecionados para análise, transformados em raiz quadrada, e todos os procedimentos foram realizados com índice de dissimilaridade de Bray-Curtis. As relações entre a comunidade zooplanctônica e as variáveis ambientais obtidas foram investigadas através da Análise Canônica de Coordenadas Principais (CAP). Este procedimento combina duas técnicas multivariadas (Análise de Coordenadas Principais - PCO e análise canônica) e identifica os eixos da análise que apresentam correlações com o outro conjunto de variáveis (ANDERSON *et al.*, 2008). A CAP foi utilizada para avaliar as relações da comunidade zooplanctônica no setor Foz com as variáveis ambientais (MPS, MO%, Clorofila-*a*, temperatura, salinidade, fluxo médio de vazão do rio

Doce e altura média de ondas para os 15 dias anteriores à coleta) e os valores de concentração de metais totais na água (µg/L). Os valores de média de vazão e ondas dos 3 dias que antecederam a coleta foram retirados da análise por colinearidade com os dados de 15 dias. Para melhor identificação e visualização dessas relações, as análises foram realizadas separadamente para concentração de metais e o restante das variáveis ambientais. Foram consideradas para análise as estações amostrais localizadas até a isobata de 20m, por se tratar das que apresentam maior potencial de influência do efluente do rio Doce. Desta forma, foi possível investigar o padrão temporal do impacto, foco central da análise. Os taxa e os índices ecológicos (diversidade de espécies e IPI) que mais contribuíram para caracterização das assembleias foram identificados através de correlação (Spearman) entre os vetores e os eixos da análise.

Os dados de vazão do rio Doce foram obtidos do tema Bacia Integração do PMBA/Fest-UFES. Para as análises, foram utilizados os valores médios referentes ao período de 15 dias anteriores à coleta, levando em consideração o tempo de resposta dos organismos zooplanctônicos às alterações ocorridas no ambiente (HOOVER *et al.*, 2006; ROCHA *et al.*,2022).

As análises estatísticas foram realizadas através dos softwares PRIMERv6 com o pacote complementar PERMANOVA+ adicionado (CLARKE & GORLEY, 2006; ANDERSON *et al.*, 2008) e STATISTICA 12 (HILL & LEWICKI, 2007).

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Com o objetivo de realizar uma análise temporal mais robusta, a partir do RA2022 o fator Ano foi incluído nos testes estatísticos e nas análises descritivas dos índices ecológicos aplicados à comunidade zooplanctônica. Além das análises comparativas entre os períodos seco e chuvoso, que já eram realizadas, a inclusão desse fator permite observar tendências de aumento ou diminuição dos índices frente aos impactos do MLD no decorrer do tempo do monitoramento. Desta forma, foi possível otimizar as análises referentes à comunidade zooplanctônica sem impacto financeiro.

Buscando atender às demandas do novo formato dos Relatórios Anuais e consolidar os resultados expressos pelas espécies indicadoras ao longo do monitoramento, foi realizada uma adaptação na apresentação de dois indicadores anteriormente utilizados: a dinâmica populacional entre juvenis e adultos de *Paracalanus* cf. *parvus* e a abundância relativa de *Oikopleura*. Ambos agora integram o Índice de Prevalência de Indicadoras (IPI), detalhado nas seções anteriores, visando aprimorar e categorizar os impactos através das respostas das espécies consideradas tolerantes ou sensíveis ao aporte de material do rio Doce.

Tendo como base a observação dos efeitos dos impactos na comunidade zooplanctônica através da heterogeneidade espacial da malha amostral, a análise canônica (CAP) passou a diferenciar e incluir como fator a distância dos pontos amostrais em relação à costa, sendo estes agora agrupados em pontos internos (até a isóbata de 20 metros) e pontos externos (além da isóbata de 20 metros).

Por fim, outra adaptação importante realizada na metodologia de análise diz respeito aos taxa inclusos no cálculo dos índices de biodiversidade (J e H', anteriormente citados). A partir do Novo Ciclo, apenas indivíduos identificados a nível de espécie estão sendo considerados no cálculo da diversidade e da equabilidade. Essa alteração se fez necessária para atender os pressupostos da aplicação desses índices.

3 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest-UFES e obtidos ao longo de todo monitoramento na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui 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, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest-UFES vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva.

Para o presente relatório, vale considerar que, durante a campanha amostral de abril de 2025, foi registrada atividade contínua de transporte e disposição de material dragado entre o canal de acesso da Portocel e uma área de despejo situada a aproximadamente 360 m da estação SDS19. Diante da possibilidade de interferência sobre as condições ambientais e os resultados do monitoramento, a FEST encaminhou ao IEMA o Ofício CE GP nº 173/2025 (05 de agosto de 2025), sendo respondida por meio do Ofício nº 056/2025-DT/IEMA (27 de agosto de 2025), que confirmou o histórico de utilização da região para atividades de dragagem e disposição de sedimentos desde o ano 2000. Posteriormente, no Ofício CE GP nº 24/2026 (20 de março de 2026), a FEST oficializou as alterações relevantes encontradas nos resultados da estação SDS19.

Considerando o comportamento discrepante observado nos resultados da estação SDS19, a possível influência das atividades de dragagem e a necessidade de garantir um tratamento homogêneo entre os Temas do Ambiente Marinho do PMBA/Fest-UFES, cujos resultados também contemplam essa estação, a Coordenação do Ambiente Marinho deliberou pela desconsideração dos dados da SDS19 obtidos a partir de abril de 2025 no RA2025. Essa medida visa preservar a consistência metodológica e a comparabilidade das análises.

3.1 ÍNDICES DE BIODIVERSIDADE

Figura 1: Valores do Índice de diversidade de Shannon da comunidade zooplanctônica amostrada nos setores **(a)** APA, **(b)** Foz e **(c)** Norte para os períodos chuvoso e seco entre as campanhas de outubro/2018 e janeiro/2026. Ano 1: entre outubro de 2018 e setembro de 2019, Ano 2: entre outubro de 2019 e setembro de 2020, Ano 3: entre outubro de 2020 e setembro de 2021, Ano 4: entre outubro de 2021 e setembro de 2022, Ano 5: entre outubro de 2022 e setembro de 2023, Ano 6: entre outubro de 2023 e setembro de 2024, Ano 7: entre outubro de 2024 e setembro de 2025, Ano 8: entre outubro de 2025 e janeiro de 2026. **(d)** Variação temporal (por campanha) das médias do Índice de Shannon (± EP) nos setores APA, Foz e Norte ao longo do período de estudo. **(e)** Variação temporal (por campanha) das médias do Índice de Shannon (± EP) nos subsetores norte, central e sul do setor Foz, ao longo do período de estudo. **(f)** Valores médios do fluxo de vazão do rio Doce durante os 15 dias anteriores às campanhas amostrais ($m^3.s^{-1}$). NA: período não amostrado devido às restrições durante a pandemia de COVID-19.



Tabela 1: GLM para análise de efeito das variáveis ambientais sobre os valores de diversidade de Shannon-Wiener da comunidade zooplanctônica amostrada nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026, considerando todas as estações amostrais dos Setores: APA, Foz e Norte. (Estimativa) = Efeito estimado da variável preditora sobre a variável resposta após controle pelo efeito das demais variáveis; (EP) = Erro padrão; (IC) = Intervalo de Confiança. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

Variáveis	Estimativa	EP	IC (95%) inferior	IC (95%) superior	z	p
V (T)	-0,0015	9,44E-04	-0,00336	3,82E-04	-1,59391	0,112
Co (T)	0,01978	0,01276	-0,00507	0,04479	1,54999	0,122
Ni (T)	-0,00729	0,00118	-0,0094	-0,00511	-6,16894	**< ,001**
Cu (T)	-6,02e−5	6,46E-05	-1,81e−4	6,37E-05	-0,93231	0,352
As (T)	0,00129	3,33E-04	6,53E-04	0,00194	3,88997	**< ,001**
Ag (T)	0,00413	0,00654	-0,00846	0,01704	0,63105	0,528
Cd (T)	0,00659	0,01253	-0,01622	0,03117	0,52603	0,599
Ba (T)	-9,18e−5	0,001	-0,00205	0,00188	-0,0915	0,927
Pb (T)	6,76E-04	0,00261	-0,00441	0,00586	0,25916	0,796
Cr (T)	0,00135	0,00192	-0,00236	0,00509	0,70217	0,483
Fe (T)	-1,48e−6	1,98E-05	-3,88e−5	3,64E-05	-0,07454	0,941
Al (T)	-3,91e−8	5,72E-06	-1,13e−5	1,13E-05	-0,00684	0,995
Mn (T)	0,00143	8,68E-04	-2,50e−4	0,00312	1,64599	0,101
Zn (T)	-2,91e−4	1,28E-04	-5,37e−4	-3,80e−5	-2,27515	**0,023**
Hg (T)	-0,00516	0,00402	-0,01264	0,00261	-1,28345	0,2
MPS	-5,13e−6	2,01E-04	-3,82e−4	4,16E-04	-0,02552	0,98
MO%	5,53E-04	4,17E-04	-2,65e−4	0,00137	1,32674	0,185
Fitoplancton	-2,17e−8	1,64E-08	-5,29e−8	1,06E-08	-1,32168	0,187
Clorofila-a	-0,00952	0,0212	-0,05112	0,03266	-0,449	0,654
Fluxo 15d	2,18E-05	1,46E-05	-6,48e−6	5,03E-05	1,49008	0,137
Temp. Potencial	-9,56e−4	0,0048	-0,01049	0,00857	-0,19918	0,842
Sal. Pratica	0,00622	0,00779	-0,00948	0,0214	0,79837	0,425

Figura 2: Valores do Índice de equabilidade de Pielou da comunidade zooplanctônica amostrada nos setores **(a)** APA, **(b)** Foz e **(c)** Norte para os períodos chuvoso e seco entre as campanhas de outubro/2018 e janeiro/2026. Ano 1: entre outubro de 2018 e setembro de 2019, Ano 2: entre outubro de 2019 e setembro de 2020, Ano 3: entre outubro de 2020 e setembro de 2021, Ano 4: entre outubro de 2021 e setembro de 2022, Ano 5: entre outubro de 2022 e setembro de 2023, Ano 6: entre outubro de 2023 e setembro de 2024, Ano 7: entre outubro de 2024 e setembro de 2025, Ano 8: entre outubro de 2025 e janeiro de 2026. **(d)** Variação temporal (por campanha) das médias do Índice de equabilidade de Pielou (± EP) nos setores APA, Foz e Norte ao longo do período de estudo. **(e)** Variação temporal (por campanha) das médias do Índice equabilidade de Pielou (± EP) nos subsetores norte, central e sul do setor Foz, ao longo do período de estudo. **(f)** Valores médios do fluxo de vazão do rio Doce durante os 15 dias anteriores às campanhas amostrais ($m^3.s^{-1}$).

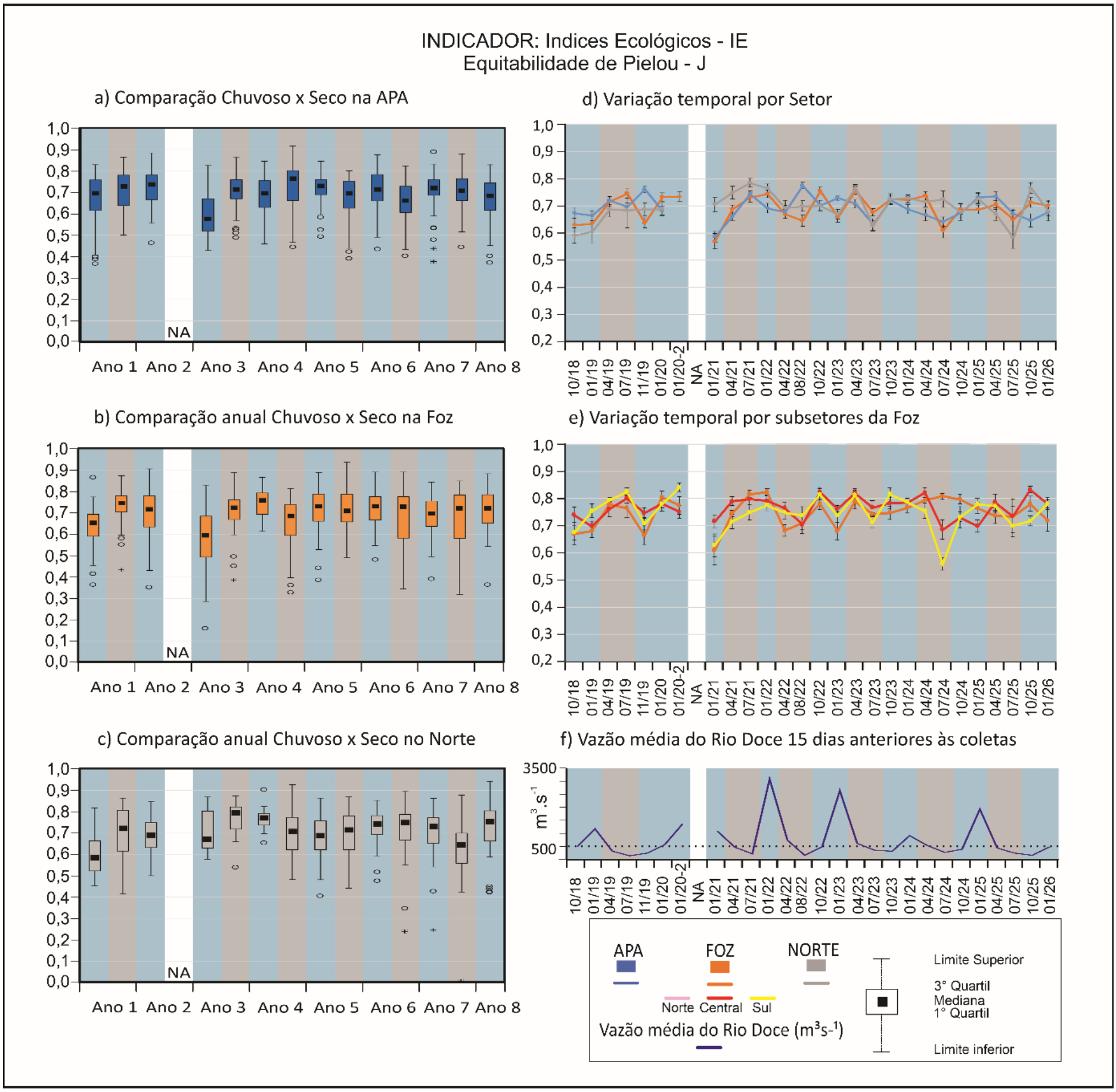


Tabela 2: GLM para análise de efeito das variáveis ambientais sobre os valores de Equitabilidade de Pielou da comunidade zooplanctônica amostrada nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026, considerando todas as estações amostrais dos Setores: APA, Foz e Norte. (Estimativa) = Efeito estimado da variável preditora sobre a variável resposta após controle pelo efeito das demais variáveis; (EP) = Erro padrão; (IC) = Intervalo de Confiança. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

Variáveis	Estimativa	EP	IC (95%) inferior	IC (95%) superior	z	p
V (T)	-9,43e−4	7,69E-04	-0,00246	5,88E-04	-1,2266	0,221
Co (T)	0,00571	0,0104	-0,01452	0,02604	0,5488	0,583
Ni (T)	-0,00504	9,62E-04	-0,00682	-0,00322	-5,2406	**< ,001**
Cu (T)	3,99E-05	5,26E-05	-6,08e−5	1,42E-04	0,758	0,449
As (T)	7,88E-04	2,71E-04	2,63E-04	0,00132	2,9071	**0,004**
Ag (T)	0,00502	0,00533	-0,00531	0,01557	0,942	0,347
Cd (T)	0,00836	0,01021	-0,01083	0,02876	0,8192	0,413
Ba (T)	-2,33e−4	8,17E-04	-0,00183	0,00137	-0,2846	0,776
Pb (T)	4,28E-04	0,00212	-0,00373	0,00465	0,2013	0,841
Cr (T)	0,00395	0,00156	9,08E-04	0,00701	2,5261	**0,012**
Fe (T)	1,62E-06	1,61E-05	-2,92e−5	3,27E-05	0,1002	0,92
Al (T)	-9,20e−6	4,66E-06	-1,83e−5	-7,34e−9	-1,9732	**0,049**
Mn (T)	0,00226	7,07E-04	8,91E-04	0,00364	3,2007	**0,001**
Zn (T)	-1,93e−4	1,04E-04	-3,95e−4	1,39E-05	-1,8523	0,065
Hg (T)	-0,00256	0,00328	-0,00881	0,0039	-0,78	0,436
MPS	-5,90e−6	1,64E-04	-3,14e−4	3,31E-04	-0,036	0,971
MO%	5,96E-04	3,40E-04	-6,98e−5	0,00126	1,7555	0,08
Fitoplancton	-1,89e−8	1,34E-08	-4,43e−8	7,22E-09	-1,4161	0,158
Clorofila-a	0,00104	0,01727	-0,03293	0,0354	0,0605	0,952
Fluxo 15d	1,96E-05	1,19E-05	-3,60e−6	4,29E-05	1,642	0,101
Temp. Potencial	-0,0029	0,00391	-0,01062	0,0048	-0,7433	0,458
Sal. Pratica	0,00131	0,00635	-0,01141	0,01368	0,2067	0,836

Tabela 3: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade da comunidade zooplanctônica dentro do setor APA considerando o fator Período (Seco/Chuvoso), nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. (GL) = Graus de liberdade; (SS) = Soma dos quadrados; (MS) = Média dos quadrados. Resultados em negrito referem-se aos valores de p estatisticamente significativos.

ANOVA

			GL	SS	MS	F	p
APA	**J**	Intercept	1	594,48	594,48	489480,79	**0,00000**
		Período	1	0,00	0,00	1,45	0,22847
		Error	719	0,87	0,00		
	H'	Intercept	1	1026,63	1026,63	285661,25	**0,00000**
		Período	1	0,05	0,05	12,75	**0,00038**
		Error	719	2,58	0,00		
	Densidade	Intercept	1	30068,23	30068,23	15057,26	**0,00000**
		Período	1	5,05	5,05	2,53	0,11232
		Error	719	1435,79	2,00		

Tabela 4: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade da comunidade zooplanctônica dentro do setor Norte considerando o fator Período (Seco/Chuvoso), nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. (GL) = Graus de liberdade; (SS) = Soma dos quadrados; (MS) = Média dos quadrados. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA

			GL	SS	MS	F	p
NORTE	**J**	Intercept	1	387,31	387,31	117610,87	**0,00000**
		Período	1	0,00	0,00	0,88	0,347854
		Error	466	1,53	0,00		
	H'	Intercept	1	624,23	624,23	128734,31	**0,00000**
		Período	1	0,00	0,00	0,49	0,48493
		Error	466	2,26	0,00		
	Densidade	Intercept	1	19707,99	19707,99	5122,76	**0,00000**
		Período	1	68,61	68,61	17,83	**0,00003**
		Error	466	1792,77	3,85		

Tabela 5: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade da comunidade zooplanctônica dentro do setor Foz e seus respectivos subsetores (Norte, Central e Sul) considerando o fator Período (Seco/Chuvoso), nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. (GL) = Graus de liberdade; (SS) = Soma dos quadrados; (MS) = Média dos quadrados. Resultados em negrito referem-se aos valores de p estatisticamente significativos.

ANOVA

			GL	SS	MS	F	p
FOZ	**J**	Intercept	1	623,71	623,71	376827,	**0,0000**
		Periodo	1	0,00	0,00	0,02	0,89
		Error	759	1,26	0,00		
	H'	Intercept	1	1037,81	1049,01	247680,45	**0,0000**
		Periodo	1	0,11	0,11	26,91	**0,0000**
		Error	759	3,18	0,00		
	Densidade	Intercept	1	32964,59	33375,39	15539,82	**0,0000**
		Periodo	1	9,17	7,82	4,32	**0,0379**
		Error	759	1610,07	2,13		
FOZ NORTE	**J**	Intercept	1	180,44	180,44	104473,60	**0,0000**
		Periodo	1	0,00	0,00	1,03	0,3109
		Error	217	0,37	0,00		
	H'	Intercept	1	296,73	296,73	83807,63	**0,0000**
		Periodo	1	0,07	0,07	19,13	**0,0000**
		Error	217	0,77	0,00		
	Densidade	Intercept	1	9830,40	9830,40	4682,93	**0,0000**
		Periodo	1	21,95	21,95	10,45	**0,0014**
		Error	217	455,53	2,10		
FOZ CENTRAL	**J**	Intercept	1	230,52	230,52	171574,97	**0,0000**
		Periodo	1	0,00	0,00	0,38	0,5375
		Error	276	0,37	0,00		
	H'	Intercept	1	387,92	387,92	95710,62	**0,0000**
		periodo	1	0,04	0,04	10,51	**0,0013**
		Error	276	1,12	0,00		
	Densidade	Intercept	1	11387,87	11387,87	5081,96	**0,0000**
		periodo	1	13,97	13,97	6,23	**0,0131**
		Error	276	618,47	2,24		
FOZ SUL	**J**	Intercept	1	198,83	198,83	106203,00	**0,0000**
		Período	1	0,01	0,01	3,67	0,0567
		Error	244	0,46	0,00		
	H'	Intercept	1	330,80	330,80	73387,18	**0,0000**
		Período	1	0,00	0,00	0,97	0,3262
		Error	244	1,10	0,00		
	Densidade	Intercept	1	10802,11	10802,11	5843,70	**0,0000**
		Período	1	13,01	13,01	7,04	**0,0085**
		Error	244	451,04	1,85		

Tabela 6: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade da comunidade zooplanctônica dentro do setor APA considerando o fator Período-Ano (Seco/Chuvoso), nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. (GL) = Graus de liberdade; (SS) = Soma dos quadrados; (MS) = Média dos quadrados. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA

			GL	SS	MS	F	p
APA	**J**	Intercept	1	523,99	523,99	466193,95	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,08	0,01	5,50	**0,00000**
		Error	707	0,79	0,00		
	H'	Intercept	1	902,04	902,04	281682,18	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,37	0,03	8,79	**0,00000**
		Error	707	2,26	0,00		
	Densidade	Intercept	1	26255,61	26255,61	13731,65	**0,00000**
		Ano-Período	13	89,02	6,85	3,58	**0,00002**
		Error	707	1351,82	1,91		

Tabela 7: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade da comunidade zooplanctônica dentro do setor Norte, considerando o fator Período-Ano (Seco/Chuvoso), nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. (GL) = Graus de liberdade; (SS) = Soma dos quadrados; (MS) = Média dos quadrados. Resultados em negrito referem-se aos valores de p estatisticamente significativos.

ANOVA

			GL	SS	MS	F	p
NORTE	**J**	Intercept	1	312,39	312,39	100461,26	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,13	0,01	3,11	**0,00019**
		Error	454	1,41	0,00		
	H'	Intercept	1	503,63	503,63	113811,71	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,25	0,02	4,40	**0,00000**
		Error	454	2,01	0,00		
	Densidade	Intercept	1	15526,43	15526,43	4365,21	**0,00000**
		Ano-Período	13	246,56	18,97	5,33	**0,00000**
		Error	454	1614,81	3,56		

Tabela 8: Resultados da ANOVA para os Índices Ecológicos (H' e J) e Densidade da comunidade zooplanctônica dentro do setor Foz e seus respectivos subsetores (Norte, Central e Sul), considerando o fator Período-Ano (Seco/Chuvoso), nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. (GL) = Graus de liberdade; (SS) = Soma dos quadrados; (MS) = Média dos quadrados. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

ANOVA

			GL	SS	MS	F	p
FOZ	**J**	Intercept	1	578,64	578,64	388063,87	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,14	0,01	7,35	**0,00000**
		Error	747	1,11	0,00		
	H'	Intercept	1	959,71	959,71	260131,82	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,54	0,04	11,20	**0,00000**
		Error	747	2,76	0,00		
	Densidade	Intercept	1	30897,75	30897,75	16802,25	**0,00000**
		Ano-Período	13	245,58	18,89	10,27	**0,00000**
		Error	747	1373,66	1,84		
FOZ NORTE	**J**	Intercept	1	150,63	150,63	105753,38	**0,00000**
		Ano-Período	12	0,08	0,01	4,87	**0,00000**
		Error	206	0,29	0,00		
	H'	Intercept	1	246,53	246,53	88899,89	**0,00000**
		Ano-Período	12	0,26	0,02	7,96	**0,00000**
		Error	206	0,57	0,00		
	Densidade	Intercept	1	8205,16	8205,16	4483,76	**0,00000**
		Ano-Período	12	100,50	8,37	4,58	**0,00000**
		Error	206	376,97	1,83		
FOZ CENTRAL	**J**	Intercept	1	214,22	214,22	173141,97	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,04	0,00	2,78	**0,00099**
		Error	264	0,33	0,00		
	H'	Intercept	1	359,69	359,69	98467,91	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,20	0,02	4,15	**0,00000**
		Error	264	0,96	0,00		
	Densidade	Intercept	1	10532,97	10532,97	5772,57	**0,00000**
		Ano-Período	13	150,73	11,59	6,35	**0,00000**
		Error	264	481,71	1,82		
FOZ SUL	**J**	Intercept	1	183,34	183,34	119503,78	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,11	0,01	5,40	**0,00000**
		Error	232	0,36	0,00		
	H'	Intercept	1	304,34	304,34	82544,46	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,25	0,02	5,19	**0,00000**
		Error	232	0,86	0,00		
	Densidade	Intercept	1	10285,38	10285,38	6505,00	**0,00000**
		Ano-Período	13	97,22	7,48	4,73	**0,00000**
		Error	232	366,83	1,58		

Em relação ao padrão temporal de resposta dos índices de diversidade da comunidade zooplanctônica, tanto o índice de Diversidade de Shannon-Wiener (Figura 1) quanto o índice de Equitabildade de Pielou (Figura 2) são consistentes com a indicação de impacto dentro do Setor Foz até o terceiro ano de monitoramento a partir da comparação entre os períodos secos e chuvosos. Essa tendência temporal, portanto, não é linear, mas associada com os períodos de maior e menor intensidade de vazão do rio Doce. Este padrão é consistente com impacto e recuperação da comunidade zooplanctônica entre os períodos com maior influência do aporte do rio Doce, devido à alta vazão associada ao período de chuvas, em relação ao período com menor influência. A manutenção deste padrão até o terceiro ano de monitoramento ocorre possivelmente devido ao maior potencial impactante do MLD até este momento em relação aos anos subsequentes. A comunidade zooplanctônica é impactada diretamente pela maior concentração de metais associada ao período de maior vazão do rio Doce. (Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3, Tabela 4, Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8).

Este impacto pode se dar tanto através da absorção diretamente da água como através da ingestão a partir da matéria orgânica particulada (ROCHA *et al.*, 2025). Além disso, mudanças na comunidade fitoplanctônica, associadas ao período de maior vazão do rio Doce, podem impactar o zooplâncton por interações tróficas e estratégias de defesa como: seleções por herbivoria relacionadas ao tamanho da célula, composição nutricional, a presença de mucilagem, baixa palatabilidade e presença de toxinas (LÜRLING, 2021; TITOCCI & FINK, 2024; BRONZONI-OLIVEIRA *et al.*, 2026). Por outro lado, passado o impacto agudo, a comunidade zooplanctônica tende a se recuperar, pelo menos parcialmente, em período relativamente curto, principalmente quando da proximidade de regiões menos impactadas que possam servir de repositório de espécies. Este é o caso da APA Costa das Algas em relação ao Setor Foz (SALVADOR *et al.*, 2026), principalmente durante o período seco, quando a região apresenta maior frequência de condições de frente fria, associada com inversão do sentido da corrente, que permitiria o deslocamento de espécies planctônicas da APA (mais ao sul) em direção à Foz (mais ao norte) (AMORIM *et al.*, 2013).

A partir do quarto ano de monitoramento, a diferença entre os períodos de alta e baixa vazão deixa de ser significativa, indicando que, em certa medida, a vazão do rio Doce reduz o seu potencial impactante para a comunidade zooplanctônica. Por outro lado, o patamar de estabilização dos valores de Diversidade e Equitabilidade não é significativamente mais elevado em comparação com o registrado anteriormente na série histórica, indicando que a aparente redução dos sinais de impacto, a partir da comparação entre os períodos secos e chuvosos, não é o suficiente para atestar a resiliência da comunidade zooplanctônica. Em junho de 2025 foi criada a Área de Proteção Ambiental da Foz do Rio Doce e, apenas com um monitoramento continuado, poderemos investigar a eficácia desta medida em relação à melhoria da saúde ambiental da região a partir do registro consistente de valores significativamente maiores do que os que foram registrados antes da sua criação. Espera-se que isso possa ser identificado ao longo dos próximos anos uma vez que ambientes costeiros próximos da desembocadura de rios preservados tendem a ter efeito positivo na diversidade zooplanctônica, visto que são utilizados como berçário para espécies de grupos como: decápodes, poliquetas, briozoários,

equinodermatas, entre outros, que liberam larvas que passam a enriquecer a comunidade zooplanctônica local (SCHWAMBORN *et al.*, 1999).

Espacialmente, os padrões dos índices de biodiversidade são muito claros em indicar o Setor Foz (Figura 1 B, D, E e Figura 2 B, D, E) como o mais impactado ao longo do monitoramento. O setor APA apresenta a maior média de valores de Diversidade de Shannon-Wiener, enquanto na Foz foram registrados os menores valores de diversidade da série histórica, chegando a ser registrados abaixo de 0,4 dentro do espectro de valores não discrepantes (outliers). Além disso, foi no Setor Foz onde foi registrada a maior quantidade de períodos amostrais com valores não discrepantes abaixo de 1,0, sendo cinco no total, em comparação com três no setor Norte e apenas um no setor APA (Figura 1). Em relação aos valores de Equitabilidade, somente na Foz (Figura 2 B, D, E) foram registrados abaixo de 0,4 dentro do espectro de valores não discrepantes, chegando inclusive a ser registrado abaixo de 0,3 durante o período chuvoso do terceiro ano de monitoramento. Além disso, o setor Foz é o único com registro de Equitabilidade significativamente menor nos períodos chuvosos, de maior vazão do rio Doce, durante os primeiros anos de monitoramento, padrão consistente com impacto a partir da maior influência do seu efluente contaminado com MLD. Dentro do setor Foz, a região mais próxima da costa e da foz do rio Doce, até a isóbata de 20 metros, é a que apresenta maior indicativo de impacto, apresentando os menores valores de Equitabilidade dentre as estações amostrais ali localizadas.

Das variáveis ambientais consideradas para análise de modelos lineares generalizados (Tabela 1 e Tabela 2) (com controle pela vazão dos últimos 15 dias do rio Doce), as concentrações de Níquel e Zinco tiveram efeito negativo significativo sobre os valores do índice de Diversidade de Shannon-Wiener, enquanto a concentração de Arsênio teve efeito significativamente positivo. Já em relação aos valores de Equitabilidade de Pielou, as concentrações de Níquel e Alumínio tiveram efeito negativo significativo, enquanto as concentrações de Arsênio, Cromo e Manganês tiveram efeito positivo significativo. As concentrações de metais têm sido as principais variáveis ambientais de impacto sobre a comunidade zooplanctônica desde o início do monitoramento ambiental. Metais podem impactar o zooplâncton tanto de forma direta, através da absorção da água do mar, quanto de forma indireta, através da alimentação de células fitoplanctônicas enriquecidas com os metais absorvidos da água (FERNANDES *et al.*, 2020; ROCHA *et al.*, 2022. ROCHA *et al.*, 2025).

3.2 ÍNDICE DE PREVALÊNCIA DE INDICADORAS (IPI)

Figura 3: Valores do Índice de IPI da comunidade zooplanctônica amostrada nos setores **(a)** APA, **(b)** Foz e **(c)** Norte para os períodos chuvoso e seco entre as campanhas de outubro/2018 e janeiro/2026. Ano 1: entre outubro de 2018 e setembro de 2019, Ano 2: entre outubro de 2019 e setembro de 2020, Ano 3: entre outubro de 2020 e setembro de 2021, Ano 4: entre outubro de 2021 e setembro de 2022, Ano 5: entre outubro de 2022 e setembro de 2023, Ano 6: entre outubro de 2023 e setembro de 2024, Ano 7: entre outubro de 2024 e setembro de 2025, Ano 8: entre outubro de 2025 e janeiro de 2026. **(d)** Variação temporal (por campanha) das médias do IPI (± EP) nos setores APA, Foz e Norte ao longo do período de estudo. **(e)** Variação temporal (por campanha) das médias do IPI (± EP) nos subsetores norte, central e sul do setor Foz, ao longo do período de estudo. **(f)** Valores médios do fluxo de vazão do rio Doce durante os 15 dias anteriores às campanhas amostrais ($m^3.s^{-1}$).

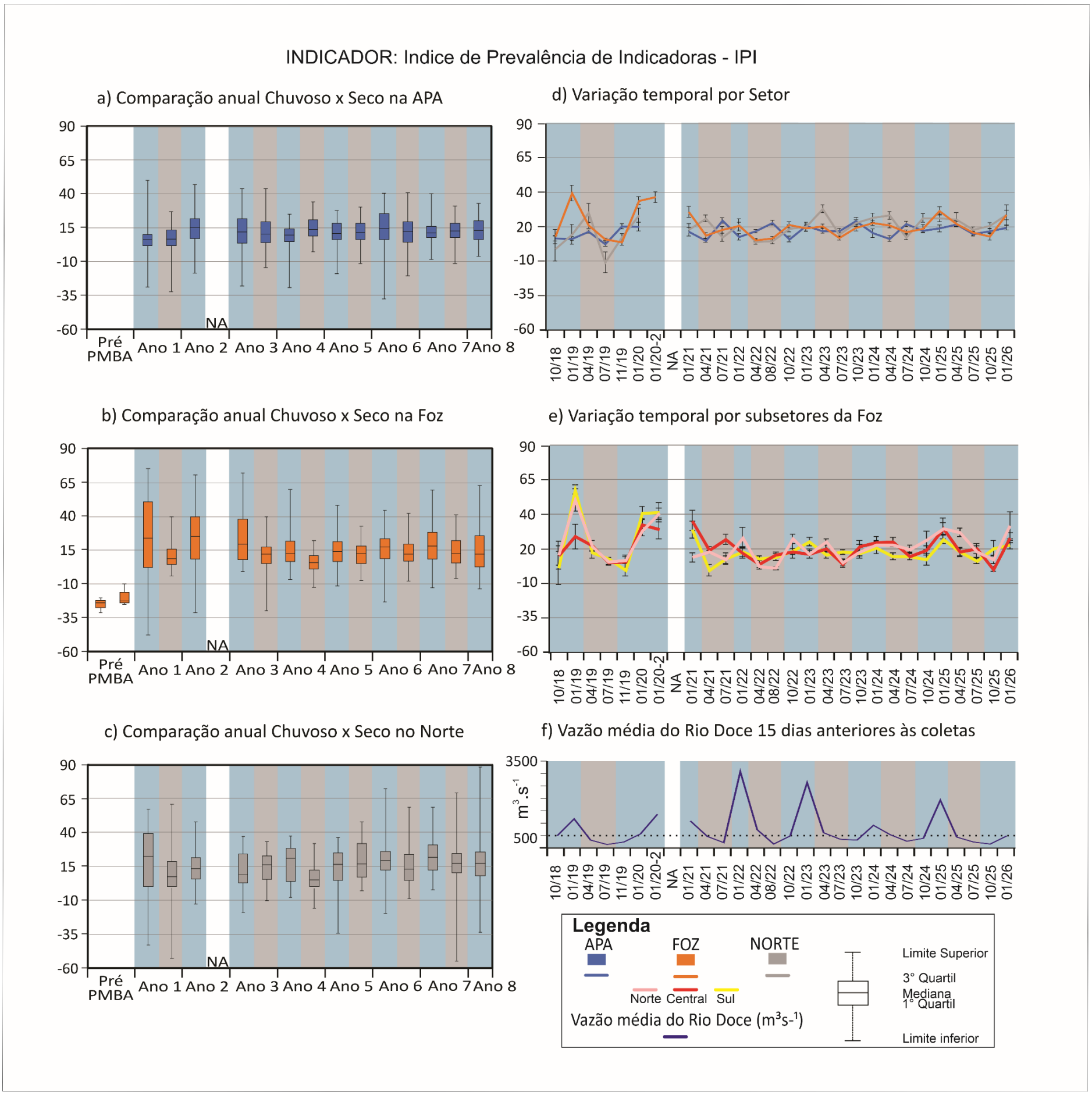


Tabela 9: GLM para análise de efeito das variáveis ambientais sobre os valores do IPI da comunidade zooplanctônica amostrada nas campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026, considerando todas as estações amostrais dos Setores: APA, Foz e Norte. (Estimativa) = Efeito estimado da variável preditora sobre a variável resposta após controle pelo efeito das demais variáveis; (EP) = Erro padrão; (IC) = Intervalo de Confiança. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

Variáveis	Estimativa	EP	IC (95%) inferior	IC (95%) superior	Z	p
V (T)	-0,00146	0,0011	-0,00367	7,83E-04	-1,3242	0,186
Co (T)	-0,04926	0,01493	-0,07757	-0,02069	-3,3002	**0,001**
Ni (T)	0,00397	0,00138	0,00121	0,00681	2,8764	**0,004**
Cu (T)	1,91E-04	7,55E-05	4,16E-05	3,45E-04	2,5302	**0,012**
As (T)	4,39E-04	3,89E-04	-3,12e−4	0,0012	1,1273	0,26
Ag (T)	-0,0027	0,00765	-0,01727	0,0123	-0,353	0,724
Cd (T)	0,00278	0,01466	-0,02642	0,03463	0,1896	0,85
Ba (T)	-0,00109	0,00117	-0,00347	0,0013	-0,9291	0,353
Pb (T)	0,0061	0,00305	5,78E-05	0,01227	2,001	**0,046**
Cr (T)	0,0122	0,00224	0,00782	0,01661	5,4374	**< ,001**
Fe (T)	-6,53e−6	2,32E-05	-5,16e−5	3,93E-05	-0,2816	0,778
Al (T)	-7,13e−6	6,69E-06	-2,04e−5	6,20E-06	-1,0654	0,287
Mn (T)	0,00232	0,00102	3,49E-04	0,0043	2,2841	**0,023**
Zn (T)	1,90E-04	1,50E-04	-1,02e−4	4,93E-04	1,2711	0,205
Hg (T)	6,87E-04	0,0047	-0,00859	0,01039	0,1461	0,884
MPS	2,22E-04	2,35E-04	-1,95e−4	6,94E-04	0,9453	0,345
MO%	3,34E-04	4,88E-04	-6,26e−4	0,0013	0,6846	0,494
Fitoplancton	-1,65e−8	1,92E-08	-5,37e−8	2,22E-08	-0,8631	0,389
Clorofila-a	4,05E-04	0,0248	-0,04775	0,04936	0,0163	0,987
Fluxo 15d	6,32E-05	1,71E-05	2,93E-05	9,73E-05	3,6919	**< ,001**
Temp. Potencial	-0,01282	0,00561	-0,02371	-0,00195	-2,2849	**0,023**
Sal. Pratica	0,00439	0,00912	-0,01419	0,02221	0,4811	0,631

Tabela 10: Resultados da ANOVA para o Índice de Prevalência de Indicadoras (IPI) da comunidade zooplanctônica nos setores APA, Norte, Foz e seus respectivos subsetores (Norte, Central e Sul), considerando os fatores Período (Seco/Chuvoso) e Período-Ano, entre as campanhas de outubro/2018 a janeiro/2026 no âmbito do PMBA/Fest-UFES. Resultados em negrito referem-se aos valores de *p* estatisticamente significativos.

			ANOVA				
Setor	**Fator**		**Degr. of**	**SS**	**MS**	**F**	**p**
FOZ	**Período**	Intercept	1	6254,67	6254,67	231165,39	**0,00000**
		Periodo	1	1,09	1,09	40,19	**0,00000**
		Error	759	20,54	0,03		
	Ano-Período	Intercept	1	5842,51	5842,51	221115,44	**0,00000**
		Ano-Período	13	1,89	0,15	5,53	**0,00000**
		Error	747	19,74	0,03		
FOZ NORTE	**Período**	Intercept	1	1963,93	1963,93	64865,28	**0,00000**
		Periodo	1	0,29	0,29	9,69	**0,00208**
		Error	235	7,12	0,03		
	Ano-Período	Intercept	1	1772,90	1772,90	61383,82	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,97	0,07	2,58	**0,00242**
		Error	223	6,44	0,03		
FOZ CENTRAL	**Período**	Intercept	1	2289,97	2289,97	92929,32	**0,00000**
		Periodo	1	0,19	0,19	7,53	**0,00648**
		Error	276	6,80	0,02		
	Ano-Período	Intercept	1	2139,69	2139,69	92605,73	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,89	0,07	2,95	**0,00048**
		Error	264	6,10	0,02		
FOZ SUL	**Período**	Intercept	1	1999,16	1999,16	75250,86	**0,00000**
		Período	1	0,72	0,72	27,14	**0,00000**
		Error	244	6,48	0,03		
	Ano-Período	Intercept	1	1860,27	1860,27	73145,71	**0,00000**
		Ano-Período	13	1,30	0,10	3,94	**0,00001**
		Error	232	5,90	0,03		
APA	**Período**	Intercept		5821,25	5821,25	368517,55	**0,00000**
		Periodo	1	0,00	0,00	0,12	0,72482
		Error	719	11,36	0,02		
	Ano-Período	Intercept	1	5150,41	5150,41	343726,41	**0,00000**
		Ano-Período	13	0,77	0,06	3,93	**0,00000**
		Error	707	10,59	0,01		
NORTE	**Período**	Intercept	1	3854,19	3854,19	82804,19	**0,00000**
		Periodo	1	0,16	0,16	3,46	0,06353
		Error	466	21,69	0,05		
	Ano-Período	Intercept	1	3079,63	3079,63	69979,53	**0,00000**
		Ano-Período	13	1,87	0,14	3,27	**0,00009**
		Error	454	19,98	0,04		

O Índice de Prevalência de Indicadoras (IPI), desenvolvido com base nas observações realizadas ao longo do PMBA/Fest-UFES, leva em consideração a proporção da abundância de espécies e gêneros ecologicamente relevantes e representativos durante toda a série temporal, como é o caso dos copépodes *Paracalanus*, que já demonstraram possuir uma alta plasticidade fisiológica que os permite colonizar ambientes degradados (CHEW & CHONG, 2016), e dos tunicados do gênero *Oikopleura*, que possuem ciclo de vida rápido e alta capacidade de filtração de material particulado (ALLDREDGE & MADIN, 1982; TROEDSSON *et al.*, 2009). A dominância desses grupos, sobretudo dos juvenis de *Paracalanus* spp., mostra-se diretamente associada aos efeitos de contaminação por metais na coluna d'água e refletem em maiores valores de IPI, como demonstrado nos relatórios apresentados anteriormente e estudos onde o índice foi aplicado (ROCHA *et al.*, 2022; ROCHA *et al.*, 2025).

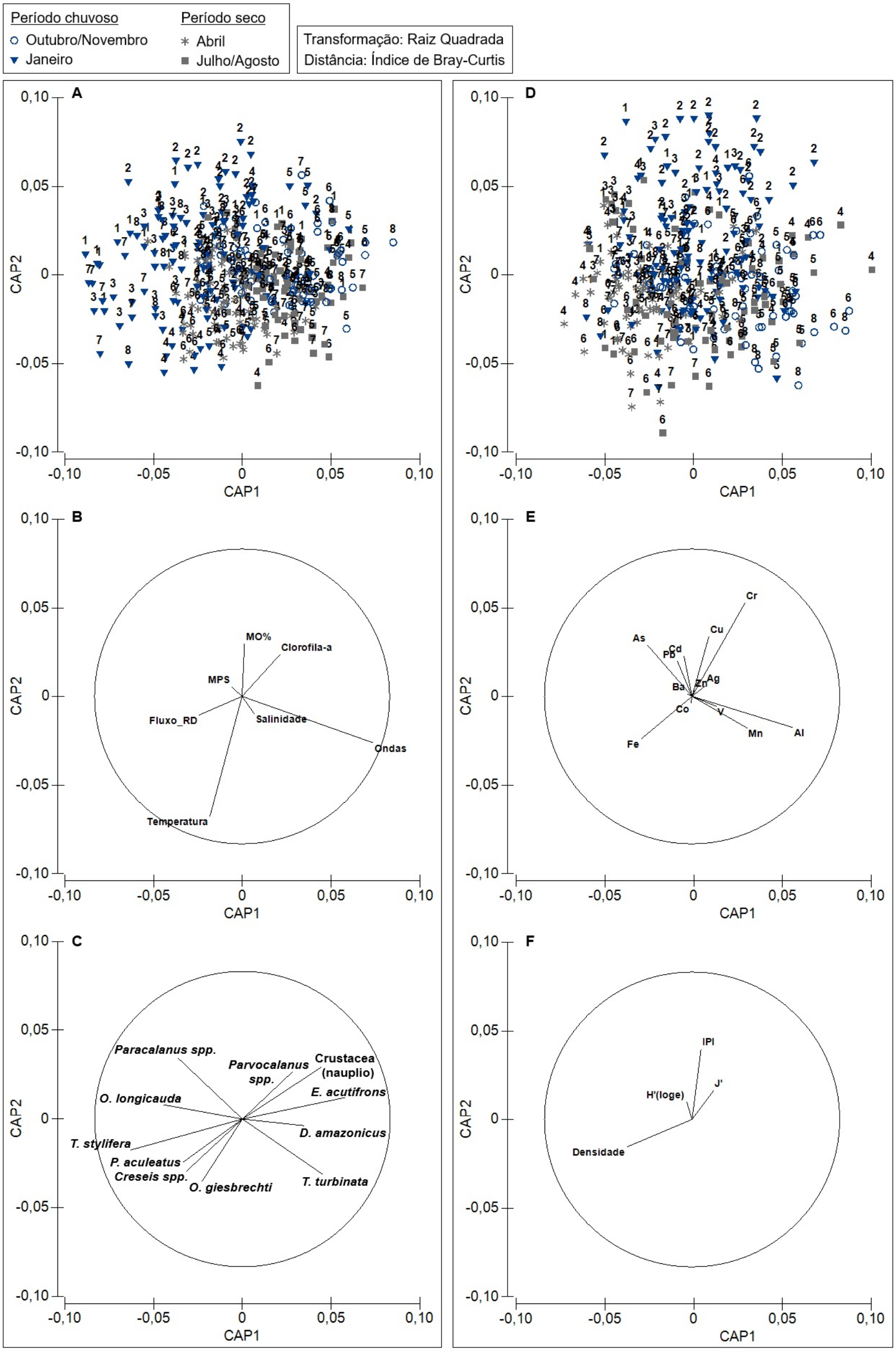
De acordo com a variação do IPI ao longo dos anos de monitoramento (Figura 3), é possível observar que os maiores valores estiveram concentrados majoritariamente no setor Foz, sobretudo nas campanhas realizadas nos meses de janeiro (Figura 3 B, D), onde historicamente também se observa maior aporte de MLD por influência das maiores vazões do rio Doce, associadas ao período chuvoso (Figura 3 F). Diferenças significativas entre os períodos seco e chuvoso foram encontradas apenas no setor Foz (Tabela 9 e Tabela 10), concentradas principalmente nos três primeiros anos de monitoramento, onde a variabilidade sazonal do índice mostrou-se acentuada, como reflexo das pioras ambientais encontradas nos períodos de alta vazão. A partir do Ano 5 até a última campanha analisada pelo monitoramento, é possível perceber a diminuição das diferenças entre os períodos de alta e baixa vazão, onde as diferenças dos valores médios dos índices deixam de ser significativas em relação à sazonalidade.

Esse efeito de variação também é observado de forma menos intensa no setor Norte e está ausente no setor APA, ambos setores onde não são encontradas diferenças significativas entre os períodos seco e chuvoso para o IPI (Figura 3 A, C, Tabela 10).

É importante ressaltar que, levando em consideração os dados pré-rompimento obtidos pelo projeto de Caracterização Ambiental da Bacia do Espírito Santo e porção norte da Bacia de Campos (AMBES) (PETROBRAS, 2015), que permite realizar comparações dentro do setor Foz, os valores do IPI encontrados após o rompimento da barragem são muito maiores que os encontrados previamente na região, o que sugere que a comunidade zooplanctônica ainda é cronicamente afetada pela descarga de MLD.

Reforçando os resultados já expostos, a análise GLM aplicada ao IPI demonstra que o índice é significativamente influenciado pela vazão média do rio Doce nos 15 dias anteriores à coleta e pelas concentrações dos metais Cr, Ni, Cu, Mn, Pb (Tabela 9). A associação positiva do índice com esse grupo de metais, que ao longo dos anos do PMBA/Fest-UFES vem sendo associado às campanhas de maior vazão (FEST, 2025), demonstra a capacidade destes de impactar o zooplâncton e favorecer a dominância das espécies tolerantes. De forma geral, esses resultados corroboram a hipótese de que o aporte fluvial e a biodisponibilidade de metais associados ao MLD continuam influenciando a estrutura da comunidade zooplanctônica na região da foz do rio Doce.

Figura 4: Análises multivariadas dos dados zooplanctônicos obtidos pelo PMBA/Fest-UFES entre outubro/2018 e janeiro/2026 nos pontos internos (isóbatas < 20 m) do setor Foz. **(a)** e **(b)** Análise Canônica de Coordenadas Principais (CAP) relacionando a comunidade zooplanctônica às variáveis ambientais MPS (material particulado em suspensão), MO% (percentual de matéria orgânica particulada), clorofila-a, temperatura, salinidade, fluxo médio de vazão do rio Doce e altura média de ondas para os 15 dias anteriores à coleta. **(c)** vetores de correlação (Spearman) dos taxa representativos da comunidade (r > 0,4). **(d)** e **(e)** Análise Canônica de Coordenadas Principais (CAP) relacionando da comunidade zooplanctônica as concentrações de metais totais na coluna d'água (µg/L). **(f)** vetores de correlação dos índices ecológicos (H': Índice de Shannon; J: Índice de Pielou; IPI: Índice de Prevalência de Indicadoras) e densidade zooplanctônica. Os pontos amostrais estão agrupados de acordo com o mês de amostragem e o número ao lado de cada símbolo indica o ano de monitoramento. Os dados de abundância foram transformados em raiz quadrada e a distância calculada através do Índice de Bray-Curtis.



De acordo com as tendências observadas ao longo do período de execução do PMBA/Fest-UFES, a variação temporal da comunidade zooplanctônica amostrada nos pontos internos do setor Foz (profundidades inferiores a 20 m) está fortemente relacionada às mudanças ambientais decorrentes de variações meteoceanográficas sazonais e anuais. Entretanto, diferenças significativas de composição e abundância da comunidade zooplanctônica entre as diferentes campanhas classificadas dentro de cada período considerado para a análise (seco e chuvoso) impossibilitam a identificação de uma comunidade característica para cada regime de precipitação devido a sua alta variabilidade. Essas diferenças se devem ao tempo de resposta dos organismos zooplanctônicos frente às alterações ambientais, que dependem de uma cadeia de eventos como o aumento da produtividade primária e disponibilidade de alimento, além do tempo de reprodução dos organismos e adaptação à nova estrutura da cadeia trófica que sucede o impacto ambiental (Kiørboe, 1993). Desta forma, uma estrutura de comunidade típica de condição de impacto ambiental pode ser observada dias após a supressão da fonte impactante.

De forma geral, a comunidade amostrada durante os meses de outubro/novembro, embora sejam classificados como início do período chuvoso, ainda está sujeita às condições ambientais associadas à intensa ação de ondas e menor influência fluvial característica do período seco, e por isso apresenta maior similaridade com o agrupamento referente às campanhas de julho/agosto (Figura 4 A, B). Por outro lado, a variação temporal das taxas de vazão do rio Doce e sua influência durante os meses de janeiro reflete na elevada variabilidade zooplanctônica observada nas amostras deste período, caracterizado pela dominância de organismos tolerantes e adaptados a condições de stress ambiental (Figura 4C). Desta forma, não é possível distinguir nitidamente um gradiente de variação da comunidade zooplanctônica quando a taxa de vazão do rio Doce é relativamente baixa durante o período chuvoso, como foi observado nas campanhas correspondentes ao Ano 8 do PMBA/Fest-UFES.

Com relação a influência da concentração de metais totais na distribuição dos organismos, as maiores correlações foram observadas para os elementos Cr, Al, Fe e As (Figura 4 D e E). Os resultados da análise canônica indicam correlações positivas entre a maioria dos elementos e os agrupamentos referentes ao período chuvoso, principalmente durante as campanhas de janeiro, que também foram caracterizadas por maiores valores de IPI (Figura 4 D e F). Por outro lado, a concentração de Fe apresentou correlação negativa com essas campanhas, sendo associada principalmente aos agrupamentos de abril e julho/agosto (período seco) e também às maiores densidades zooplanctônicas. Já a comunidade referente aos meses de outubro/novembro e julho/agosto foi principalmente influenciada pelas maiores concentrações de Al e Mn.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO

As evidências de maior impacto ambiental na região monitorada concentram-se espacialmente no setor Foz e temporalmente nos três primeiros anos de monitoramento, padrão confirmado de forma

convergente pelos três índices zooplanctônicos, reforçando a sua aplicabilidade como ferramenta de monitoramento continuado na região. O IPI em especial, que foi desenvolvido no âmbito do presente monitoramento, agrega valor complementar aos índices tradicionais de diversidade de Shannon-Wiener e de Equitabilidade de Pielou. Foi demostrado pela análise de GLM, adicionada como análise complementar para o presente relatório, que o IPI responde de forma mais específica ao impacto por metais e ao efeito da vazão do rio Doce.

Os indicativos de melhora das condições ambientais a partir do quarto ano de monitoramento referem-se à comparação interna em relação à série histórica do PMBA/Fest-UFES. Desta forma eles não devem ser interpretados como indicativos de resiliência do ambiente e da comunidade zooplanctônica, ou seja, recuperação em relação às condições anteriores ao rompimento da barragem.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos pelo Tema.

6 REFERÊNCIAS

Alldredge, A. L., & Madin, L. P. 1982. Pelagic tunicates: unique herbivores in the marine plankton. *Bioscience*, *32*(8), 655-663.

Amorim, F. N. D., Cirano, M., Marta-Almeida, M., Middleton, J. F., & Campos, E. J. D. (2013). The seasonal circulation of the Eastern Brazilian shelf between 10 S and 16 S: a modelling approach. Continental Shelf Research, 65, 121-140.

Anderson, M. J.; Gorley, R. N.; Clarke, K. R., 2008. PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to software and statistical methods. Plymouth: Primer-E Ltd.

Baird, R.B.; Eaton, A.D.; Rice, E.W. (Eds.) 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Washington DC: APHA Press.

Benedetti, F.; Gasparini, S.; Ayata, D., 2016. Identifying copepod functional groups from species functional traits. Journal of Plankton Research 38: 159-166.

Boltovskoy, D. 1981. Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino.

Boltovskoy, D. 1999 (Ed.). South Atlantic Zooplankton. Backhuys Publishers, Leiden.

Bronzoni-Oliveira, F., Crossetti, L. O., Eskinazi-Sant'Anna, E., Diniz, L. P., Barroso, G. F., Delazari-Barroso, A., ... & Zorzal-Almeida, S. (2026). Functional diversity of freshwater phytoplankton under multiple environmental filters and seasonal variability in contrasting tropical ecosystems. Aquatic Sciences, 88(2), 47.

Campos, C.C.; Garcia, T.M.; Neumann-Leitão, S.; Soares, M.O., 2017. Ecological indicators and functional groups of copepod assemblages. Ecological Indicators, 83, 416-426.

Chew, L. L., & Chong, V. C. 2016. Response of marine copepods to a changing tropical environment: winners, losers and implications. *PeerJ*, *4*, e2052.

Clarke, K.R.; Gorley, R.N., 2006. PRIMER v6: User Manual/Tutorial. Plymouth: PRIMER-E.

Fernandes, L. F. L., Paiva, T. R. M., Longhini, C. M., Pereira, J. B., Ghisolfi, R. D., Lázaro, G. C. S., ... & Rocha, G. M. (2020). Marine zooplankton dynamics after a major mining dam rupture in the Doce River, southeastern Brazil: Rapid response to a changing environment. Science of the Total Environment, 736, 139621.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Semestral de Evolução do PMBA/Fest-UFES – RT-52, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 16 pag. 2025.

Harris, R.; Wiebe, P.; Lenz, J.; Skjoldal, H.-R.; Huntley, M. 2000 ICES Zooplankton Methodology Manual; Academic Press.

Hill, T. & Lewicki, P., 2007. STATISTICS: Methods and Applications. StatSoft, Tulsa.

Hoover, R. S., Hoover, D., Miller, M., Landry, M. R., DeCarlo, E. H., Mackenzie, F. T. 2006. Zooplankton response to storm runoff in a tropical estuary: bottom-up and top-down controls. Marine Ecology Progress Series, 318, 187-201.

Kiørboe, T. 1993. Turbulence, Phytoplankton Cell Size, and the Structure of Pelagic Food Webs. *Advances in Marine Biology*, 29, 1-72.

Lürling, M. (2021). Grazing resistance in phytoplankton. Hydrobiologia, 848(1), 237-249.

Petrobras. 2015. Relatório Final do Projeto de Caracterização Ambiental Regional da Bacia do Espírito Santo e Parte Norte da Bacia de Campos (PCR-ES/AMBES). Anexo II.2.2-6 – Estrutura da Comunidade Zooplanctônica: Descritores espaciais e temporais.

Rocha, G. M., Salvador, B., de Souza Laino, P., Santos, G. H. C., Demoner, L. E., da Conceição, L. R., ... & Fernandes, L. F. L. 2022. Responses of marine zooplankton indicators after five years of a dam rupture in the Doce River, Southeastern Brazil. Science of The Total Environment, 806, 151249.

Rocha, G. M., Salvador, B., Santos, G. H. C., da Conceição, L. R., Teixeira-Amaral, P., Di Domenico, M., ... & Fernandes, L. F. L. 2025. A novel zooplankton-based environmental monitoring tool for coastal impacted areas: The case of the Doce River dam rupture. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 320, 109301.

Salvador, B., da Conceição, L. R., Ghisolfi, R. D., Mendes, M. S., Paiva, T. R. M., da Silva Quaresma, V., ... & Fernandes, L. F. L. (2026). Too close for comfort? Mesozooplankton dynamics in Marine Protected Areas adjacent to mining tailings on the Southeastern Brazilian Shelf. Marine Environmental Research, 107992.

Schwamborn, R., Ekau, W., Silva, A. P., Silva, T. A., & Saint-Paul, U. (1999). The contribution of estuarine decapod larvae to marine zooplankton communities in North-East Brazil. Archive of Fishery and Marine Research, 47(2/3), 167-182.

Troedsson, C., Bouquet, J. M., Skinnes, R., Acuña, J. L., Zech, K., Frischer, M. E., & Thompson, E. M. 2009. Regulation of filter-feeding house components in response to varying food regimes in the appendicularian, Oikopleura dioica. *Journal of plankton research*, *31*(12), 1453-1463.

Tukey, J. W., 1977. Exploratory data analysis. Reading, MA: Addison -Wesley.

Turner, J. R.; Thayer, J. F., 2001. Introduction to analysis of variance: Design, analysis, & interpretation. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.

USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2016. Standard Operating Procedure for Zooplankton Analysis. LG403. Revision.

Uttah, E.; Ogbeche, J.; Ukpong, G.I.; Ajang, R.; Iboh, C.; Ayanda, O.I., 2013. The Taxa Structure and Composition of Zooplankton Communities of Bonny Estuary: A Bio-indication of Anthropogenic Activities. The Pacific Journal of Science.