

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

**RELATÓRIO ANUAL:**

**Anexo 3 – Análise abiótica e biótica no Ambiente Marinho  
Discussão Integrada**

**RT-19K RRDM/NOV19**

**Coordenação Geral**

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Novembro de 2019

## COORDENAÇÕES

### **Anexo 1**

Adalto Bianchini (FURG)

### **Anexo 3**

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Fabian Sá (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

#### **Subprojetos**

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Björn Gücker (UFSJ)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Amado Filho (IPJB) *in memoriam*

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Iola Gonçalves Boechat (UFSJ)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Leonardo Tavares Salgado (IPJB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Rodrigo Leão de Moura (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

### **Anexo 4**

Jacqueline Albino (UFES)

#### **Subprojetos**

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

### **Anexo 5**

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

### **Anexo 6**

Agnaldo Silva Martins (UFES)

#### **Subprojetos**

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

### **Anexo 7**

Maurício Hostim (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

#### **Subprojetos**

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Luis Fernando Duboc (UFV)

### **Anexo 8**

Heitor Evangelista (UERJ)

#### **Coordenação Técnica (CTEC)**

Alex Cardoso Bastos

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

#### **Coordenação Escritório de Projetos**

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Paulo Roberto Filgueiras

Valdemar Lacerda Junior

Walter Luiz Alda Junior

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

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>8</b>
1.1	DISPERSÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO, SEDIMENTOS DE FUNDO E ABRANGÊNCIA ESPACIAL DOS SINAIS DO REJEITO NO AMBIENTE MARINHO .....	8
1.1.1	<b>Critério Mineralógico:</b> .....	<b>23</b>
1.1.2	<b>Critério Geoquímico:</b> .....	<b>24</b>
1.2	INTEGRAÇÃO ABIÓTICA X BIÓTICA .....	35
1.2.1	<b>Análise biótica Pré/PMBA</b> .....	<b>35</b>
1.2.2	<b>Análise biótica PMBA</b> .....	<b>38</b>
<b>2</b>	<b>RESUMO DO ANEXO</b> .....	<b>51</b>
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Evolução temporal da vazão média diária (em m<sup>3</sup>/s) do Rio Doce medida na estação da Ponte de Colatina (nº56994500 - ANA). As linhas azuis tracejadas horizontais limitam as diferentes faixas de classificação da vazão do rio propostas por Oliveira e Quaresma (2017). As áreas sombreadas verticais marcam aproximadamente os períodos nos quais foram realizadas as 10 primeiras campanhas do Anexo 3 no PMBA (referenciadas de C1 a C10). .....9
- Figura 2: Evolução temporal da altura significativa de ondas medida no Fundeio F3. A linha preta representa o máximo Hs diário (m). A linha azul representa o Hs horário (m). A linha tracejada em vermelho apresenta médias mensais climatológicas de Hs (m) descritas por Nogueira (2014) para a costa do Espírito Santo. As áreas sombreadas verticais marcam aproximadamente os períodos nos quais foram realizadas as 12 primeiras campanhas do Anexo 3 no PMBA (referenciadas de C1 a C12). ..... 10
- Figura 3: Variabilidade temporal por estações do material particulado em suspensão (mg/L) para os setores Foz Central, Norte e Sul. As cores denotam as diferentes campanhas realizadas. .... 12
- Figura 4: Evolução temporal das concentrações de Fe: a) dissolvido; b) total e c) MPS nos setores Foz Central, Foz Sul e Foz Norte, ao longo do Pré/PMBA e PMBA. .... 14
- Figura 5: Evolução temporal das concentrações de Fe no sedimento nos setores Foz Central, Foz Sul e Foz Norte, ao longo do Pré/PMBA e PMBA. .... 19
- Figura 6: Distribuição espacial do aumento (e.g., aumento de 2x representa 100% de incremento) das concentrações do Al no PMBA em relação a valores Pretéritos. .... 22
- Figura 7: Evolução temporal das concentrações de Al no sedimento nos setores Foz Central, Foz Sul e Foz Norte, ao longo do Pré/PMBA e PMBA. .... 23
- Figura 8: Distribuição espacial de sinais do rejeito no sedimento marinho superficial de acordo com os critérios mineralógicos e químicos estabelecidos. Os círculos vermelhos indicam que ambos os critérios foram satisfeitos para a estação e indicam a presença do sinal do rejeito. Os círculos verdes mostram ausência de sinal do rejeito. Os círculos amarelos indicam que apenas um dos critérios foi satisfeito, sugerindo possível presença de sinais do rejeito. As Unidades de Conservação são indicadas pelos polígonos tracejados. .... 26
- Figura 9: Média dos Elementos Terras Raras (ETR) normalizados pelo Folhelho Australiano Pós-Arqueano (PAAS) nas 3 camadas de base nos testemunhos T02 e T03 coletados na Plataforma Continental do Rio Doce (Cagnin, 2018). .... 28
- Figura 10: Distribuição por setor da frequência de ocorrência de concentração normal (verde), crônica (amarelo) e aguda (vermelho) de Fe dissolvido na matriz água em superfície. O tamanho dos círculos representa o número de campanhas que foram realizadas no setor. .... 31

- Figura 11: Distribuição por setor da frequência de ocorrência de concentração normal (verde), crônica (amarelo) e aguda (vermelho) de Fe dissolvido na matriz água no fundo. O tamanho dos círculos representa o número de campanhas que foram realizadas no setor. ....32
- Figura 12: Distribuição por setor da frequência de ocorrência de concentração normal (verde), crônica (amarelo) e aguda (vermelho) de Fe no sedimento. O tamanho dos círculos representa o número de campanhas que foram realizadas no setor. ....33
- Figura 13: Distribuição espacial do aumento (e.g., aumento de 2x representa 100% de incremento) das concentrações do Fe no PMBA em relação a valores Pretéritos .....34
- Figura 14: Diagrama de ordenação da Análise de Correspondência Canônica com base nos dados das estações do setor Foz, mostrando a relação entre as variáveis preditoras (parâmetros abióticos) e as variáveis respostas (Fitoplâncton - Estrato Superfície (a) e Fitoplâncton - Estrato Fundo (b)). Parâmetros abióticos: Concentração dos seguintes metais na fração dissolvida - Vanádio (V), Cobalto (Co) , Cobre (Cu), Bário (Ba), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Alumínio (Al), Manganês (Mn); Concentração dos seguintes metais na fração total - Cobalto (Co\_T) , Cobre (Cu\_T), Bário (Ba\_T), Cromo (Cr\_T), Ferro (Fe\_T), Alumínio (Al\_T), Manganês (Mn\_T); Concentração dos seguintes nutrientes dissolvidos Nitrogênio amoniacal, Silício Reativo Dissolvido(Si-D), Ortofosfato, Nitrito, Nitrato, Nitrogênio orgânico (N-org), Fósforo orgânico (P-org); Razão N:P; Razão NID:PID; Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) , Porcentagem de Matéria Orgânica no MPS (MO). Parâmetros da comunidade Fitoplanctônica: Densidade Numérica Total do Fitoplâncton (x [10<sup>3</sup> organismos.L<sup>-1</sup>]), Porcentagem de Diatomáceas, Algas Verdes, Haptophyta, Cianobactérias, Fitoflagelados, e Outros; Biomassa em Chl-a (µg/L), Feopigmentos (µg/L), Clorofila Ativa (%).....41
- Figura 15: Diagrama da Análise de Componentes Principais com base nas forçantes físicas e parâmetros da comunidade Zooplancônica das estações do setor Foz do Rio Doce. A análise inclui os seguintes parâmetros da comunidade Zooplancônica: Abundância de Paracalanus cf parvus, Abundância de Temora turbinata, Abundância de Penilia avirostris.; A análise incluiu como forçantes físicas a vazão do Rio Doce em m<sup>3</sup>/s (média de 30 dias Estação Fluviométrica de Colatina - código 56994500) e Altura Significativa de Ondas em m (média de 30 dias - Fundeio 3/SubProjeto Modelagem Numérica).....43
- Figura 16: Diagrama de ordenação da Análise de Correspondência Canônica com base nos dados das estações do setor Foz, mostrando a relação entre as variáveis preditoras (parâmetros abióticos) e as variáveis respostas (Zooplâncton - Estrato Superfície (a) e Zooplâncton - Estrato Fundo (b)). Parâmetros abióticos: Concentração dos seguintes metais na fração dissolvida - Vanádio (V), Cobalto (Co) , Cobre (Cu), Bário (Ba), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Alumínio (Al), Manganês (Mn); Concentração dos seguintes metais na fração total - Cobalto (Co\_T) , Cobre (Cu\_T), Bário (Ba\_T), Cromo (Cr\_T), Ferro (Fe\_T), Alumínio (Al\_T), Manganês (Mn\_T); Concentração dos seguintes nutrientes dissolvidos Nitrogênio amoniacal, Silício Reativo Dissolvido(Si-D), Ortofosfato, Nitrito, Nitrato, Nitrogênio orgânico

(N-org), Fósforo orgânico (P-org); Razão N:P; Razão NID:PID; Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) , Porcentagem de Matéria Orgânica no MPS (MO). Parâmetros da comunidade Zooplanctônica: Riqueza de Magalef (d), Diversidade de Shannon ( $H'$  (loge)), Abundância de Paracalanus cf parvus, Abundância de Temora turbinata, Abundância de Penilia avirostris, Abundância Total do Zooplâncton.....44

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Quadro síntese dos impactos abiótico e biótico encontrados no ambiente marinho (Anexo 3 – Marinho Integrado) .....	50
--	----

## **ANEXO 3 MARINHO – DISCUSSÃO INTEGRADA**

### **1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Ao término do primeiro ano do PMBA no Anexo 3 – Monitoramento Marinho, foram descritos e analisados diversos parâmetros físicos, químicos, biológicos e sedimentológicos nos respectivos relatórios dos sub-projetos. A discussão apresentada a seguir representa a continuação e aprofundamento das análises apresentadas no relatório semestral de maio de 2019.

A continuidade do monitoramento permitiu uma melhor compreensão do comportamento do material proveniente do rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), aportado na foz do Rio Doce e região marinha adjacente após o desastre e durante esse ano de monitoramento. Antes analisados de forma separada, e qualitativa no relatório semestral, alguns parâmetros foram unidos para a criação de critérios objetivos de mapeamento dos sinais de presença de rejeitos no sedimento marinho. Além disso, a repetição sistemática dos cruzeiros oceanográficos para coleta de amostras, e o aumento das séries temporais de diferentes parâmetros, permitiram significativos avanços na identificação dos impactos biológicos causados pelo aporte do rejeito no ambiente marinho.

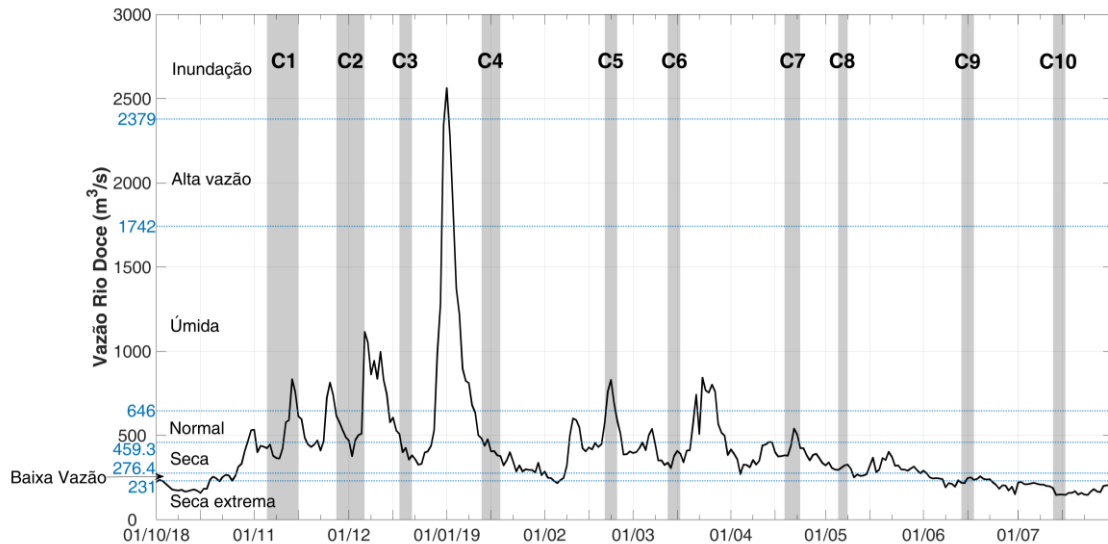
#### **1.1 DISPERSÃO DO MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO, SEDIMENTOS DE FUNDO E ABRANGÊNCIA ESPACIAL DOS SINAIS DO REJEITO NO AMBIENTE MARINHO**

Nesta seção é apresentado e discutido um estudo dos processos que determinam e/ou influenciam a dispersão do material aportado pelo Rio Doce no ambiente marinho que condicionam mudanças na qualidade da água e do sedimento, e suas consequências na cadeia alimentar marinha. Apresenta-se uma análise integrada de fatores abióticos e bióticos e, quando possível, discutem-se as relações de causa e efeito entre os diferentes parâmetros medidos e analisados.

Ao longo do primeiro ano de PMBA, as campanhas de campo foram realizadas em diferentes momentos de vazão do Rio Doce (Estação Ponte de Colatina 56994500 – Agência Nacional das Águas). Seguindo a classificação proposta por Oliveira e Quaresma (2017), a vazão média diária até julho de 2019 permaneceu sob condição seca em aproximadamente 40% do período (Figura 1). Destaca-se na série de vazão fluvial que a Campanha 4 (Jan/2019) foi realizada alguns dias após o maior pico de vazão (que atinge uma condição de inundação – 2562 m<sup>3</sup>/s em 1 de janeiro de 2019) e que as amostragens entre as campanhas 8 (Mai/2019) a 12 (Set/2019), foram realizadas em momentos em que a vazão fluvial oscilou de seca a seca extrema (Figura 1). Nota-se que as amostragens entre as Campanhas 1 a 4 há maior frequência de ocorrência do aumento da vazão fluvial, enquanto que para as demais campanhas de amostragem ocorre o inverso. Cabe ainda ressaltar que, especialmente durante eventos hidrológicos na bacia do Rio Doce, a vazão instantânea pode ser significativamente superior às médias diárias.



Figura 1: Evolução temporal da vazão média diária (em m<sup>3</sup>/s) do Rio Doce medida na estação da Ponte de Colatina (nº56994500 - ANA). As linhas azuis tracejadas horizontais limitam as diferentes faixas de classificação da vazão do rio propostas por Oliveira e Quaresma (2017). As áreas sombreadas verticais marcam aproximadamente os períodos nos quais foram realizadas as 10 primeiras campanhas do Anexo 3 no PMBA (referenciadas de C1 a C10).

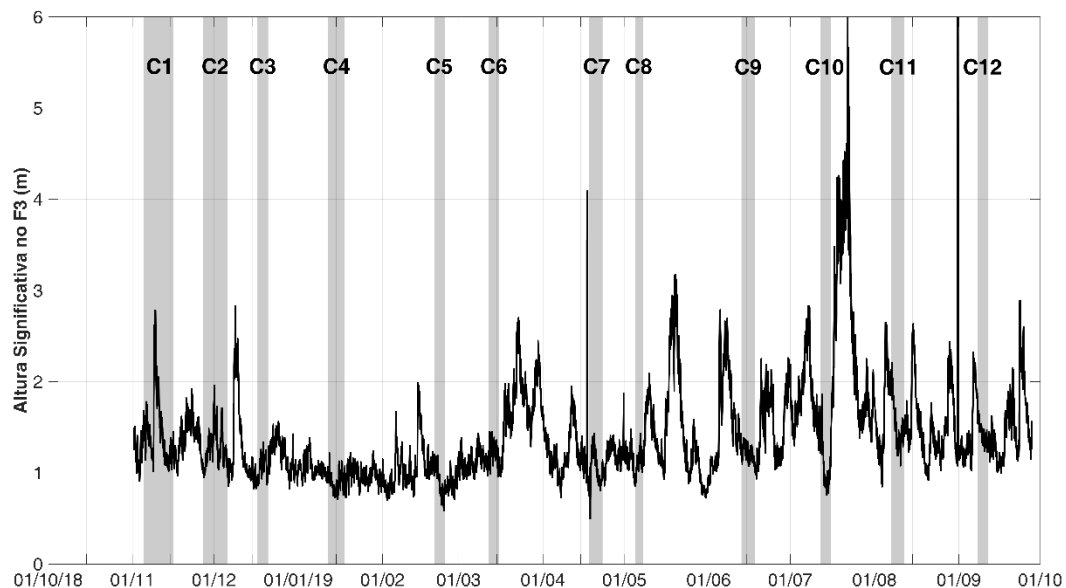


Enquanto os valores de vazão fluvial mostraram uma progressiva diminuição com o avanço do outono e do inverno, a energia das ondas na região costeira adjacente à foz do Rio Doce mostra um comportamento inverso. A altura significativa ( $H_s$ ) e período de pico ( $T_p$ ) de ondas (usados nesse contexto para ilustrar simplificadamente a energia no sistema) mostram um progressivo aumento médio mensal (RT-19D RRDM/NOV19) com o início do outono e inverno. As médias mensais, no entanto, não evidenciam claramente os eventos de entradas de ondulações remotas dos quadrantes S-SE, responsáveis pelos maiores valores de  $H_s$  e  $T_p$  do registro. A evolução temporal do  $H_s$  máximo diário medido no Fundeio 3 (Figura 2) mostra a recorrência de eventos de aumento de  $H_s$ , com algumas campanhas sendo realizadas imediatamente antes ou após eventos de aumento da energia das ondas.

A Campanha 4, realizada após o maior pico de vazão do PMBA, aconteceu num momento de baixa energia de ondas ( $H_s \approx 1\text{m}$ ). Já a Campanha 7 foi realizada logo após a passagem da Tempestade Tropical Iba em março de 2019, que foi precedida pela entrada de uma frente fria. O Iba se formou e se intensificou nas proximidades do limite norte do Banco de Abrolhos e do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, apresentando translação para sul-sudeste nos dias seguintes até desaparecer. A combinação da passagem do Iba após a frente fria fez com que o  $H_s$  da região próxima à foz do rio permanecesse cerca de 17 dias acima dos valores médios mensais (valores retirados de Nogueira, 2014) para a região (Figura 2), com picos acima de 2,5m. Embora os  $H_s$  máximos desse período não sejam os maiores da série, a duração dessa energia maior se destacou na série medida nos fundeios. De fato, os maiores valores de  $H_s$  foram registrados em julho de 2019, dias após a realização da Campanha 10, com valores máximos de  $H_s$  chegando a 6 metros e ondas individuais superando 8m, devido a entrada de ondulações remotas em conjunto com a passagem de uma frente fria. Nessa

ocasião, o Hs medido permaneceu acima dos valores médios climatológicos para o mês de julho durante 9 dias.

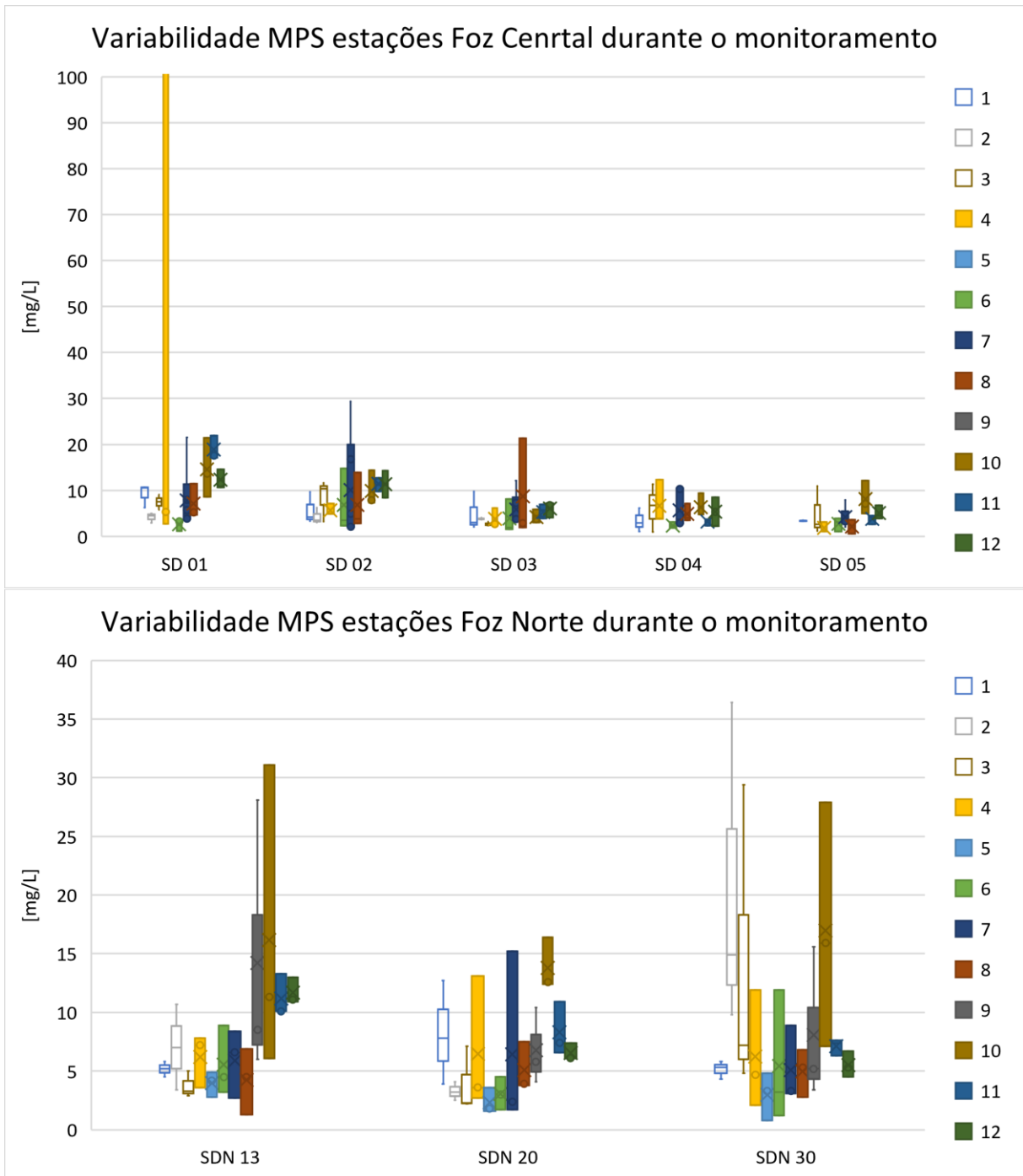
Figura 2: Evolução temporal da altura significativa de ondas medida no Fundeio F3. A linha preta representa o máximo Hs diário (m). A linha azul representa o Hs horário (m). A linha tracejada em vermelho apresenta médias mensais climatológicas de Hs (m) descritas por Nogueira (2014) para a costa do Espírito Santo. As áreas sombreadas verticais marcam aproximadamente os períodos nos quais foram realizadas as 12 primeiras campanhas do Anexo 3 no PMBA (referenciadas de C1 a C12).

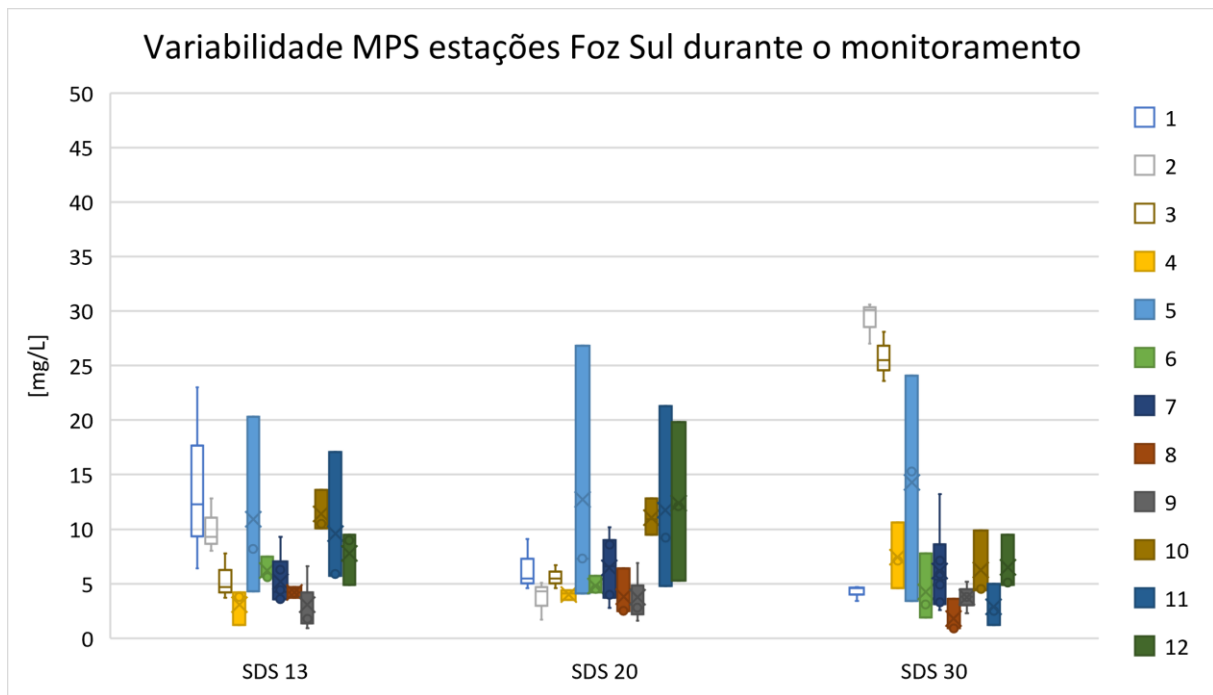


A entrada de frentes frias geralmente muda não somente as ondulações que atingem a região da foz do Rio Doce como também os ventos que atuam na área. Em média, os ventos mais frequentes na região são dos quadrantes N-NE durante a primavera, verão e inverno. Apenas no outono a entrada recorrente de frentes frias cria uma frequência relativa equivalente de ventos de N-NE e S-SE (RT-19D RRDM/NOV19). Os ventos de N-NE na região são favoráveis ao desenvolvimento da ressurgência costeira na região, com a entrada da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) sobre a plataforma continental e eventual afloramento. A entrada da ACAS sobre a plataforma interna e média cria uma estratificação vertical e horizontal que influencia a circulação regional e a dispersão do aporte fluvial. Nesses momentos, as correntes na região são preferencialmente paralelas às linhas batimétricas (RT-19D RRDM/NOV19) e direcionam para sul o material particulado em suspensão (MPS) proveniente do aporte fluvial, especialmente durante eventos hidrológicos na bacia do Rio Doce. Valores de MPS superiores a 1000 mg/L foram registrados próximo à foz (SD01) durante a Campanha 4 (janeiro de 2019), que ocorreu após o maior pico de vazão fluvial (>2500 m<sup>3</sup>/s) de todo o PMBA (Figura 1). Picos de MPS semelhantes foram registrados somente em novembro de 2015, no momento da chegada da onda de rejeitos à foz do rio, demonstrando que alguns eventos hidrológicos apresentam capacidade de aporte de MPS comparáveis ao aporte primário de rejeitos, mesmo após mais de 3 anos do rompimento da barragem. A partir da Campanha 7, quando a maior energia das ondas prevaleceu na região e a frequência de inversão de direção do vento aumentou, ocorre também um aumento dos

valores medianos de MPS principalmente nos sub-setores Foz Norte e Foz Central (Figura 3). No sub-setor Foz Norte, esse aumento foi verificado principalmente sobre as isóbatas de 13m e 30m de profundidade, reforçando as evidências de transporte para o norte da foz com as sucessivas entradas de ondulações remotas e frentes frias do período.

Figura 3: Variabilidade temporal por estações do material particulado em suspensão (mg/L) para os setores Foz Central, Norte e Sul. As cores denotam as diferentes campanhas realizadas.

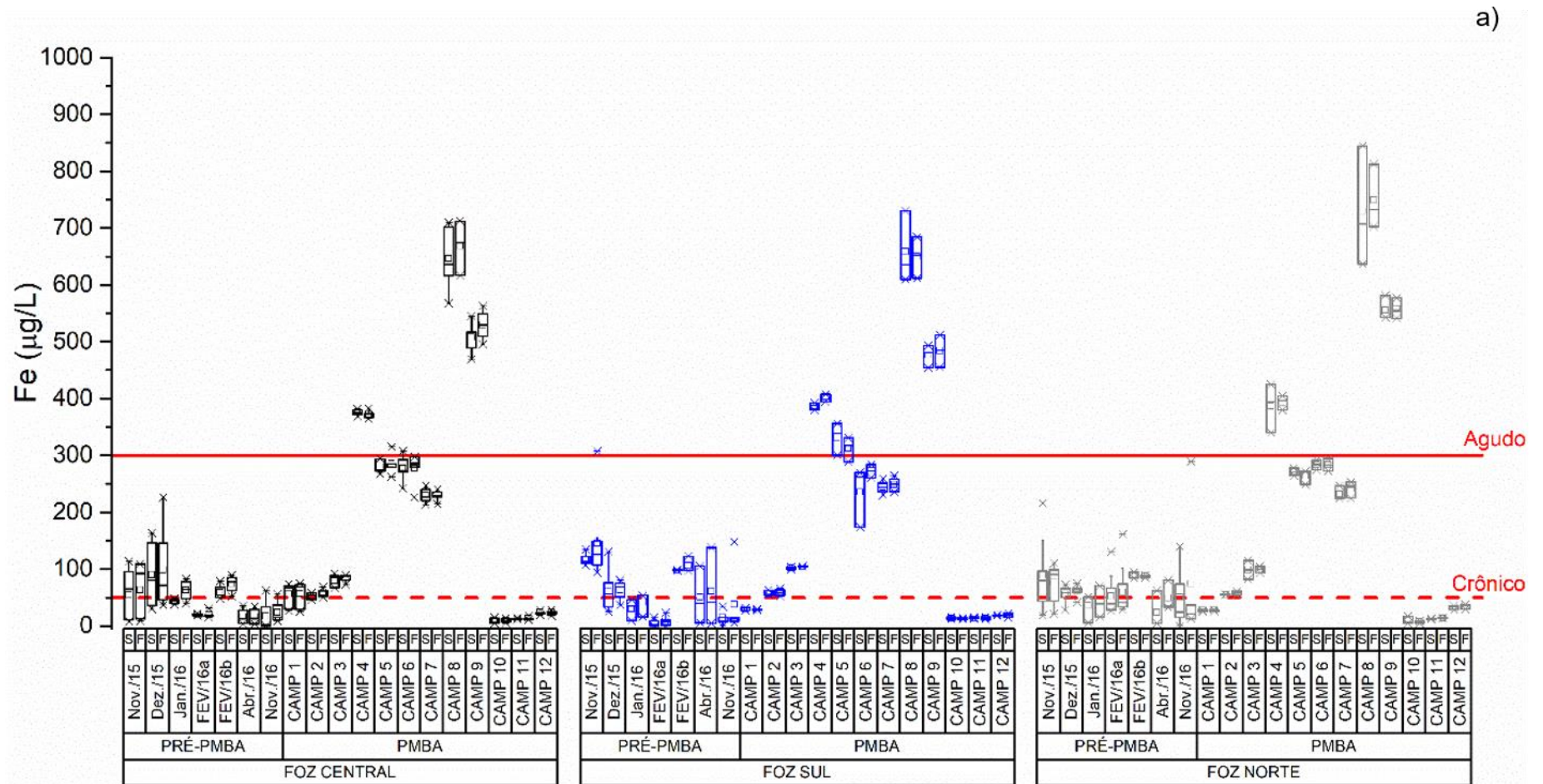




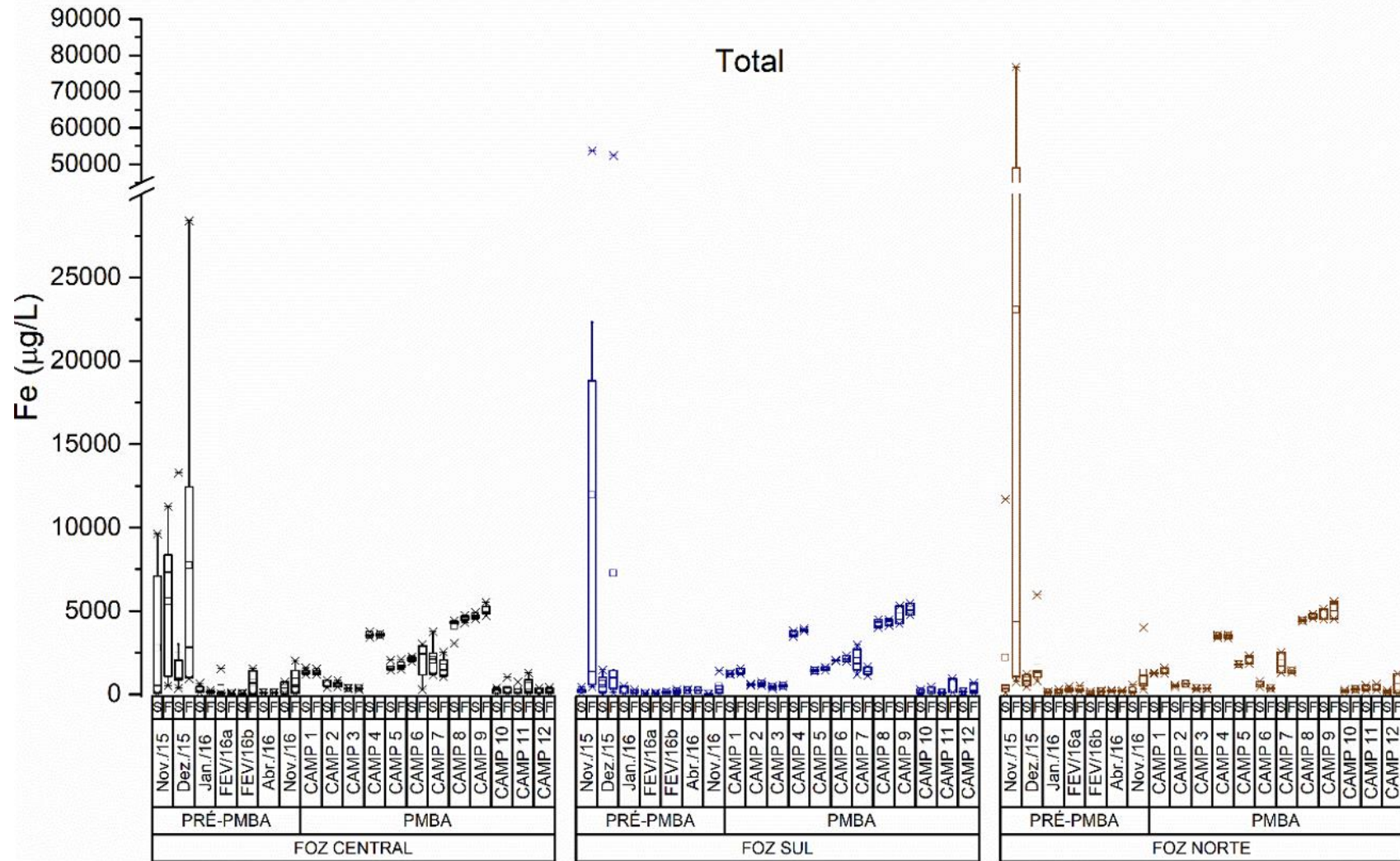
Mais do que aumentar ou disponibilizar materiais particulados na coluna d'água, os eventos hidrológicos e de ressuspensão foram responsáveis por um expressivo aumento da concentração de diversos metais no sedimento de fundo e na coluna d'água, especialmente nos sub-setores da Foz do Rio Doce. As concentrações nas frações dissolvida e total da coluna d'água apresentaram um aumento a partir da Campanha 4 para a maioria dos elementos analisados no setor Foz, ou seja, aumento nas concentrações na maior vazão fluvial registrada durante o PMBA. Por exemplo, para os elementos Fe e Al dissolvidos (Figura 4 e Figura 7) os valores encontrados na campanha 4 na matriz água (Fe: ~400µg/L e Al: ~250µg/L, ambos em todos os setores da Foz) estão na mesma faixa de concentração ou maiores que as medições realizadas logo após a chegada dos rejeitos à foz do Rio Doce, em novembro e dezembro de 2015. Tal influência também pode ser verificada nos setores Norte e APA/RVS, neste último sendo mais evidente nas estações de amostragem mais rasas. Esses valores são superiores a valores de referência crônicos e agudos de tabelas do NOAA (Screening Quick Reference Tables – SquiRTs), indicando a importância do aumento da vazão do Rio Doce no aporte de metais à região oceânica. O valor orientador como agudo na tabela da NOAA para ferro, de 300µg/L, é o mesmo apresentado na Resolução CONAMA 357/05, enquanto o valor crônico é de 50 µg/L.

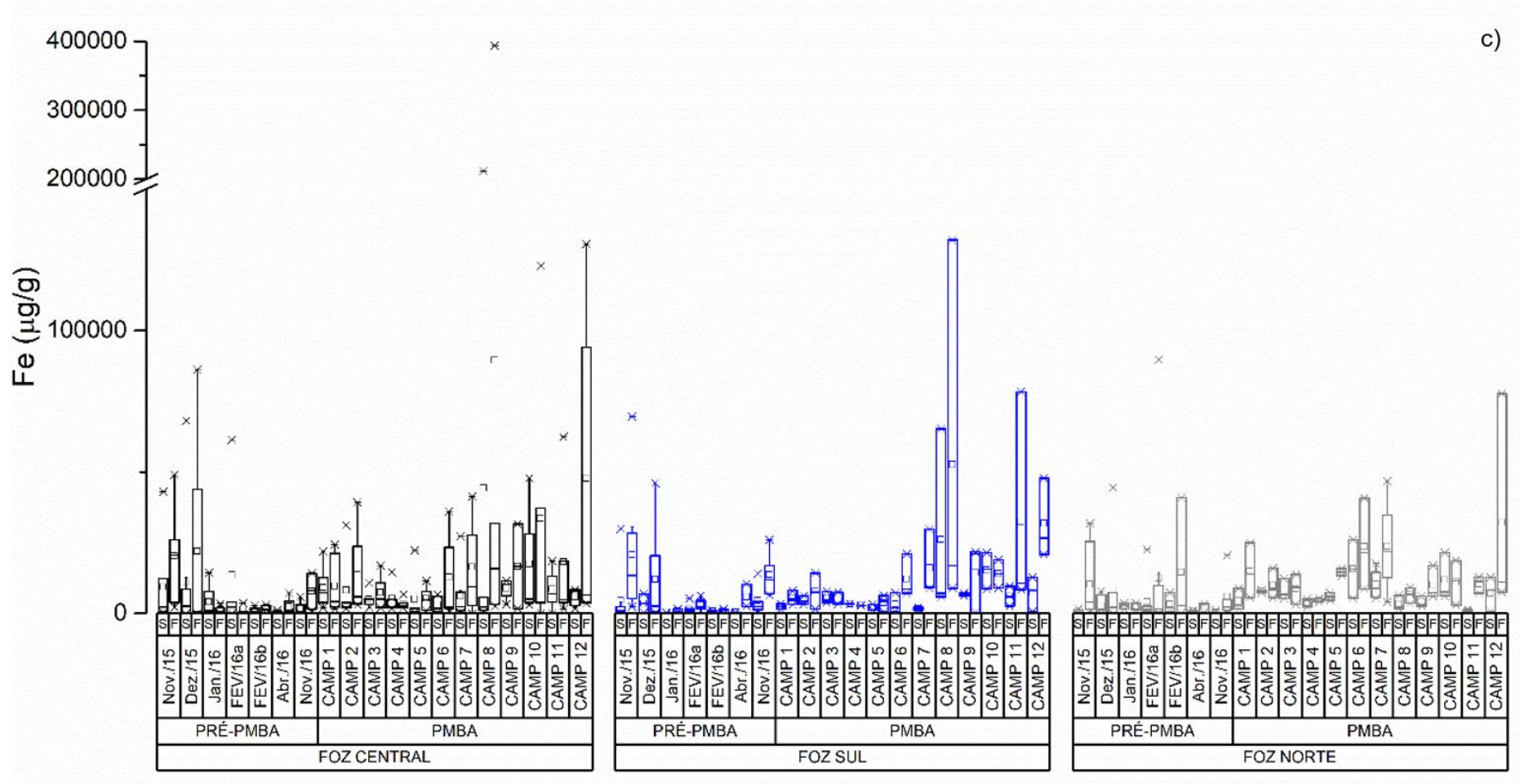
Este aumento das concentrações não é evidente na fração particulada, sugerindo que o aporte de metais, por exemplo o ferro, está diferente do que o observado durante o desastre e chegada do material a foz do Rio Doce. Esse comportamento pode indicar mudança de fase dos elementos que apresentam maior aporte na fração dissolvida nos momentos atuais. É importante destacar que outros parâmetros como, por exemplo nutrientes e aminas, não apresentam aumento nas concentrações na campanha 4 durante a maior vazão fluvial.

Figura 4: Evolução temporal das concentrações de Fe: a) dissolvido; b) total e c) MPS nos setores Foz Central, Foz Sul e Foz Norte, ao longo do Pré/PMBA e PMBA.



b)







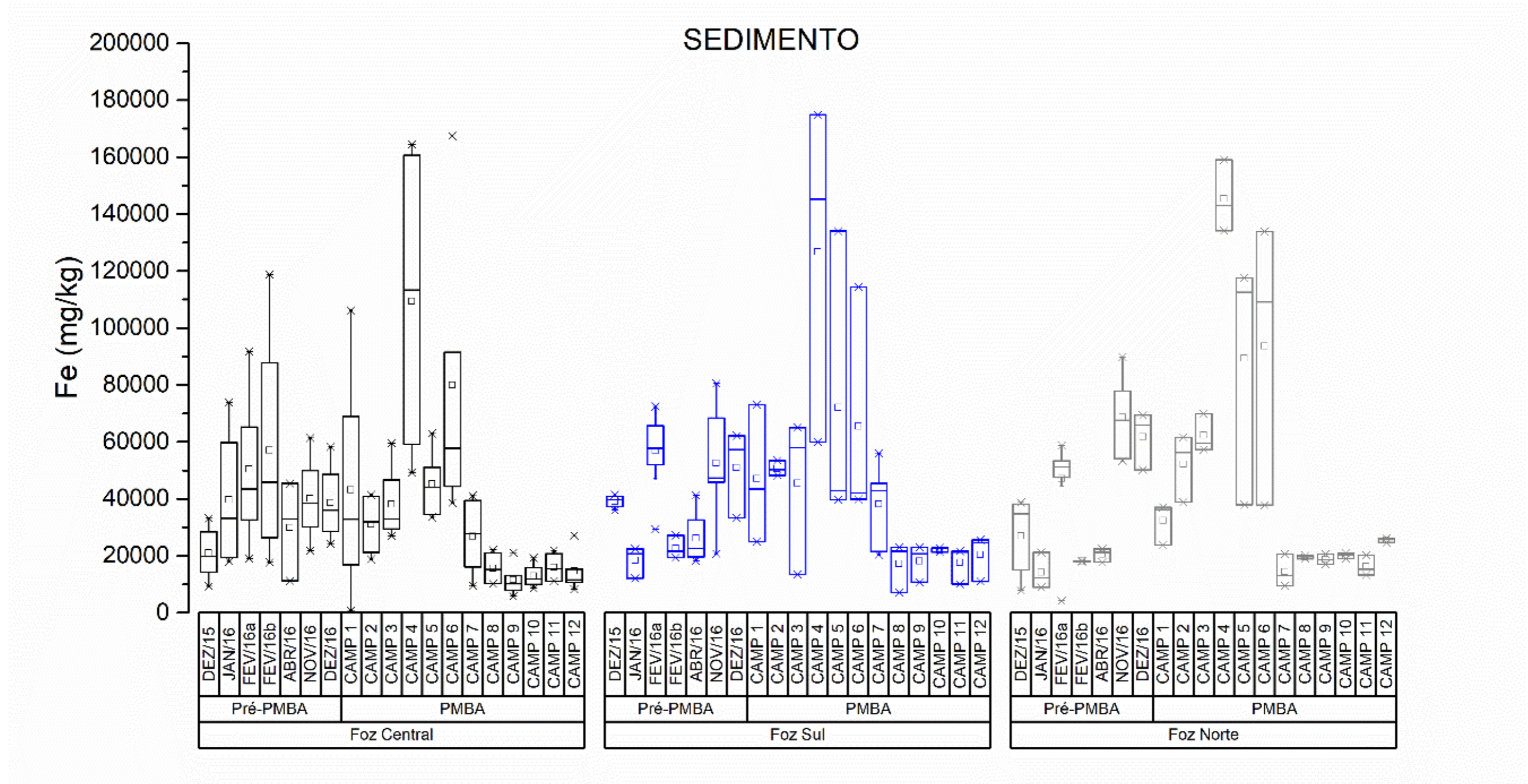
Os aumentos da concentração de metais durante a campanha 4 não ficaram restritos à matriz água, sendo observados também expressivos crescimentos dos valores no sedimento superficial do Setor Foz (Figura 5). Concentrações medianas de Fe no sedimento de aproximadamente 30000 mg/kg no Setor Foz Central na campanha 3 cresceram uma ordem de magnitude e ultrapassaram 110000 mg/kg no mesmo setor na campanha 4. Os setores Foz Sul e Norte apresentaram valores medianos de concentração de Fe ainda maiores, superiores a 140000 mg/kg. Este aumento das concentrações de ferro nos sedimentos superficiais relacionado ao maior aporte deste elemento, principalmente, na fração dissolvida reflete nos resultados do fracionamento de ferro no sedimento. Na campanha 4 há um aumento da fração redutível de ferro, ou seja, ferro na forma de óxidos. Entretanto, vale ressaltar que nesta fração o ferro está principalmente na forma de ferrihidrita, um hidróxido de ferro originalmente coloidal, podendo tornar-se parcialmente cristalina durante o ressecamento. Este mineral é mais estável em pH 7,5, resultando em concentrações de ferro dissolvido, porém possui solubilidade menor em pH alcalino, o que poderia estar favorecendo sua rápida deposição no ambiente marinho e enriquecimento de ferro nos sedimentos superficiais. A possível presença deste material coloidal favoreceria a adsorção de outros elementos explicando o aumento de suas concentrações. O destacado aumento de metais no sedimento, associado ao evento hidrológico de janeiro de 2019 na campanha 4, foi acompanhado por uma progressiva diminuição nos meses seguintes, com o aumento da energia das ondas.

É importante observar que, especialmente entre as campanhas 7 e 9, as matrizes água e sedimento mostraram um comportamento inverso na evolução temporal de concentrações de metais. Ilustrado aqui pelas concentrações de Fe, esse comportamento inverso dos metais na água e sedimento reflete principalmente a capacidade da energia das ondas na mobilização do fundo e na disponibilização de materiais dissolvidos e particulados para a coluna d'água. Estes aumentos das concentrações na coluna d'água devido a ressuspensão de sedimentos também foi observado para nutrientes e amins totais, indicando que os sedimentos marinhos ainda atuam como fonte para estes parâmetros. Dentre os nutrientes é importante destacar as variações observadas para nitrogênio amoniacal durante os eventos ressuspensivos. Os eventos de maior energia na plataforma continental influenciaram na diminuição dos valores de densidade superficial encontrados para fundos com lama fluida. As medições realizadas pelos subprojetos Sedimentologia (RT-19C RRDM/NOV19V) e Mapeamento de Habitats (RT-19E RRDM/NOV19) mostraram que em todo o Setor Foz (Central, Norte e Sul) foi possível observar em diferentes campanhas a presença de lama fluida. Embora já houvesse registros anteriores de presença desse tipo de característica na área estudada, a lama fluida não é considerada um depósito e sim um material em suspensão de elevada concentração (até 1.200 kg.m<sup>-3</sup>). Esse material pode ser facilmente remobilizado na plataforma continental durante eventos de alta energia. (Mehta, 2013; Winterwerp, 1999; Winterwerp, 2002; Winterwerp e Van Kesteren, 2004; Vinzon et al., 2009).

Durante o monitoramento do PMBA se observou tendências de redução significativa (*p-value* < 0.05) da densidade do sedimento superficial (estações SD01, SD02 e SD03) e dos teores de sedimentos

coesivos, principalmente argila (estações SD 01, SD 02, SD 04, SDS 20, SDS 13, SDN 13, SDN 20, SDN 30, DEG 01, DEG 02 e CA 03). Essas diminuições (especialmente a partir da campanha 5) têm como consequência a redução dos limiares de erodibilidade do sedimento, tornando o fundo mais susceptível a mobilização e erosão (van Kereste, 2004; Mehta, 2013; Winterwerp, 1999; Winterwerp, 2002), disponibilizando na coluna d'água os metais e outros elementos acumulados no fundo. Uma das evidências que comprovam isso é que os levantamentos batimétricos consecutivos realizados pelo Mapeamento de Habitats, antes e após a tempestade tropical Iba em março de 2019 (que foi precedida por uma frente fria), indicaram um alto potencial de ressuspensão do fundo. Esse levantamento é realizado de forma que haja sobreposição das linhas de levantamento para possibilitar o recobrimento total. Parte do levantamento foi realizado antes da passagem do Iba e parte após. No momento de integração das linhas de levantamento, a equipe observou que as profundidades registradas na mesma área apresentavam variações de mais de 25cm entre as áreas levantadas, indicando um forte processo erosivo, quando observamos a taxa de sedimentação para área pré desastre que era entre 0,34 e 0,43 cm/ano (Cagnin et al., 2017).

Figura 5: Evolução temporal das concentrações de Fe no sedimento nos setores Foz Central, Foz Sul e Foz Norte, ao longo do Pré/PMBA e PMBA.



A partir da Campanha 10 houve uma mudança na qualidade da água e do sedimento nos Setores Foz, APA/RVS e Norte. As concentrações de metais dissolvidos na coluna d'água diminuíram significativamente (valores menores que 50 µg/L no setor Foz), enquanto no sedimento a tendência de diminuição persistiu. Embora a malha amostral não permita um detalhamento do destino dos elementos metálicos que diminuíram a concentração na matriz água a partir da campanha 10, é possível apontar diferentes processos que podem ser responsáveis pelas mudanças observadas. Um dos caminhos possíveis é a exportação dos metais para regiões mais profundas da plataforma continental e talude, para áreas além do domínio de monitoramento do PBMA. Também podem ter ocorrido processos como a adsorção dos metais ao material particulado em suspensão ou até mesmo a assimilação dos elementos metálicos pela biota em diferentes níveis tróficos. Embora no momento a quantificação relativa desses diferentes processos ainda não seja possível, é esperado que possa ocorrer uma combinação desses efeitos para explicar a diminuição dos metais na matriz água. A transferência entre as fases dissolvida e particulada é nítida uma vez que o aumento das concentrações de metais no MPS foi observado, principalmente nas amostras de água de fundo. Isto fica mais evidente no setor Foz devido as campanhas serem mensais, enquanto nos setores APA/RVS e Norte, são campanhas trimestrais. Mesmo assim, podemos verificar que as concentrações de metais no MPS na água de fundo durante a campanha 10 são maiores no setor Norte, principalmente na região de Barra Nova, coincidindo com a alteração no sentido das correntes associadas a passagem de sistemas frontais.

O aporte fluvial anterior à campanha 4 provocou ainda aumento na concentração de nutrientes. Os maiores valores de nitrato foram encontrados no Setor Foz Central, quase sempre ocorrendo no ponto SD 01. As médias de concentração de nitrato na coluna d'água variaram entre 0 e 5 µmol/L, com valores máximos superiores a 20 µmol/L na campanha 5. Um comportamento semelhante foi observado para o nitrito e para o n-amoniacal, o que indica que existe uma importante e recorrente fonte de nutrientes nitrogenados oriunda do aporte fluvial. A oxidação dos íons de nitrogênio pelo processo de nitrificação faz com que sejam geradas espécies mais oxigenadas e por isso o nitrato ocorre em concentrações significativas. Já as análises de nitrogênio amoniacal nas amostras de água mostraram que as concentrações médias encontradas neste monitoramento estão acima das reportadas previamente ao desastre (0,47 µmol/L) e próximas ou mais altas que as medições logo após o rompimento da barragem (0,98 µmol/L), com valores superiores a 8,5 µmol/L no SDN30 na campanha 7, após a passagem da tempestade tropical Iba na região de estudo. As concentrações elevadas de amônia na água, especialmente para os setores Foz Central e Norte, apontam para um desequilíbrio na região, com valores acima do que naturalmente se encontra em ecossistemas costeiros.

A importância dos eventos de entradas de frente fria e ressuspensão para uma resultante para norte do material proveniente do Rio Doce já havia sido sugerido por Quaresma et al. (2015). Tendências de transporte preferencial para norte foram observadas ao longo do monitoramento nos teores de  $FeO_{total}$  no MPS, na distribuição granulométrica do sedimento superficial e na hidrogeoquímica do sedimento de fundo. O teor de  $FeO_{total}$  no MPS mostrou que os valores observados no período 2015/2016 mostram

maiores concentrações na Foz do Rio Doce, com dispersão predominante para sul, semelhante aos resultados de modelagem numérica de deposição primária do sedimento proveniente do rompimento da barragem (RT-19D RRDM/NOV19). Já na Campanha 1 (PMBA), essa dispersão ocorre para N/NE, com significativo aumento de seus teores. A direção preferencial de dispersão desses minerais para N/NE também foi confirmada pela distribuição espacial de fases minerais susceptíveis à magnetização. Além disso, foi constatado que o setor Norte apresenta uma granulometria mais fina, mantendo ainda uma tendência geral de afinamento nas estações mais rasas e ao longo de 30m de profundidade em acordo com o destacado por Quaresma et al. (2015). Além dessas evidências diretas, a presença de formas de fundo erosivas do tipo *furrows* (RT-19E RRDM/NOV19) também pode ser associada a características hidrodinâmicas, uma vez que como bem descrito nos resultados do mapeamento, as mesmas são formas de fundo dispostas paralelamente à ação de correntes (Belderson, 1982; Davis and Darlymple, 2012). Os *furrows* foram mapeadas na região mais ao norte da área de levantamento, próximo a região de Barra Nova, próximo a região dos recifes esquecidos (Vieira et al., 2019). Os *furrows* se apresentam de forma oblíqua à costa indicando a existência de correntes orientadas na direção SE/NW. Análises das elipses de maré na região a partir de fundeios virtuais (RT-19D RRDM/NOV19) mostram uma direção semelhante às formas de fundo.

As análises químicas do sedimento merecem importante destaque na discussão do destino dos materiais provenientes do Rio Doce. Na comparação entre os valores médios de concentração de diferentes elementos nos setores da Foz, o sub-setor Foz Norte se destaca como a área de maiores valores dos elementos ferro, níquel, cromo, chumbo, cobre, zinco, manganês e alumínio. Os valores de concentração vêm progressivamente aumentando ao longo do monitoramento, e apresentam ainda picos máximos nos pontos mais rasos do setor norte (SDN13). Esses resultados sugerem que o sub-setor Foz Norte não é somente a área preferencial de transporte dos materiais como é uma área de acumulação dos metais no sedimento de fundo. Alguns resultados evidenciam este transporte de material para o sub-setor Foz Norte e setor Norte, principalmente pela água de fundo, como já comentado anteriormente. Elementos como o ferro e o alumínio podem inferir sobre esta hipótese, pois tendem a apresentarem aumento de suas concentrações na água de fundo e nos sedimentos superficiais, devido à ação das ondas ou posterior deposição, respectivamente. Isso se dá em função do alumínio apresentar maior estabilidade e associação aos argilo-minerais do que aos óxidos e hidróxidos. O mapa do número de vezes que ocorre o aumento da sua concentração em relação a dados pretéritos evidencia o incremento no sub-setor Foz Norte e setor Norte (Figura 6; Figura 13). Nota-se um incremento nas concentrações de alumínio na Foz Norte de até 8 vezes em relação a dados pretéritos ao desastre e nas campanhas atuais do PMBA concentrações similares ou superiores no setor Norte, principalmente em Degredo e Barra Nova.

Figura 6: Distribuição espacial do aumento (e.g., aumento de 2x representa 100% de incremento) das concentrações do AI no PMBA em relação a valores Pretéritos.

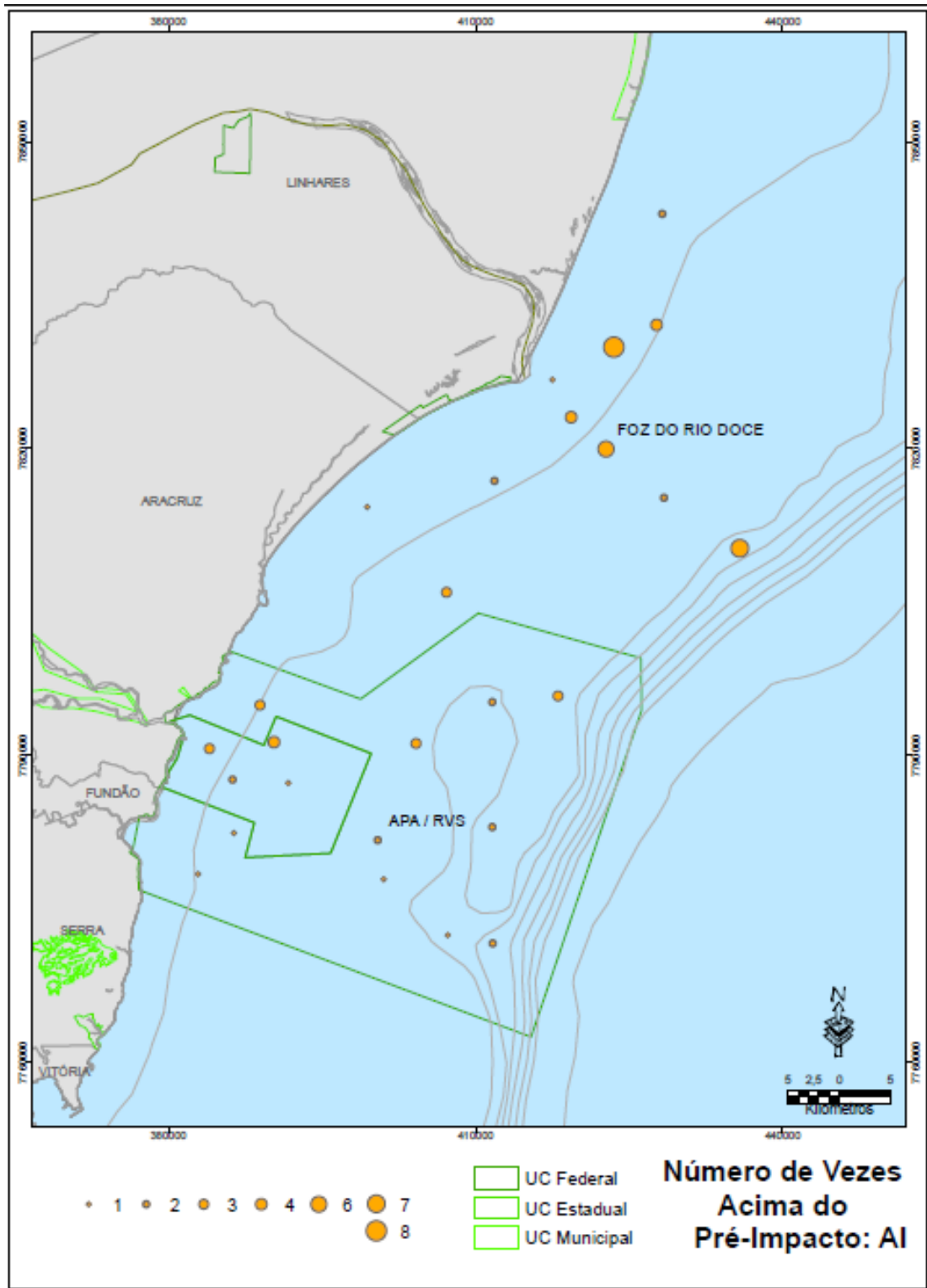
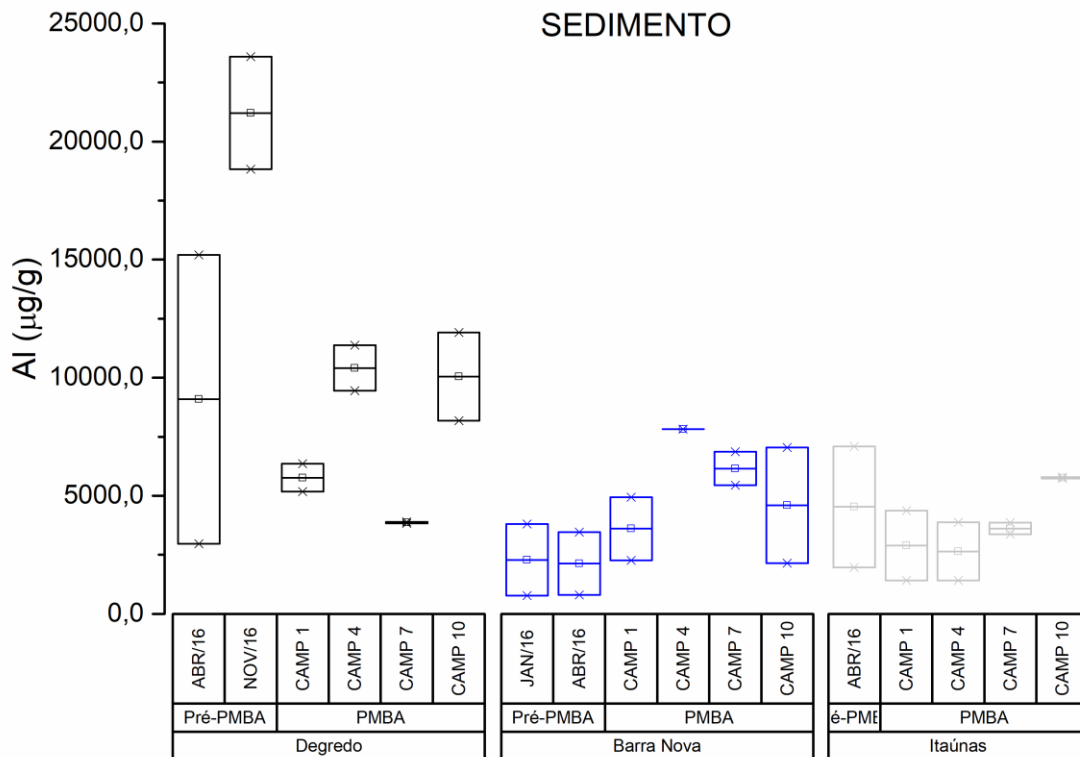


Figura 7: Evolução temporal das concentrações de Al no sedimento nos setores Foz Central, Foz Sul e Foz Norte, ao longo do Pré/PMBA e PMBA.



Os resultados discutidos até aqui apresentaram principalmente a importância de diferentes processos físicos e sedimentológicos para mudanças na qualidade da água e do sedimento no Setor Foz. A partir desses resultados, faz-se necessária uma distinção entre os rejeitos provenientes do rompimento da barragem de outros elementos e propriedades monitorados ao longo das campanhas. Uma vez que o material proveniente do aporte fluvial é transportado para regiões remotas ao Setor Foz, foram utilizados **dois critérios** complementares que indicaram **sinais do rejeito** em diferentes áreas a fim de avaliar a abrangência espacial da dispersão dos rejeitos no ambiente marinho:

#### 1.1.1 Critério Mineralógico:

**Aumento de volumes totais de fases minerais de ferro** (hematita, magnetita, grenalita-T, magmita e goethita), **aumento da susceptibilidade magnética** dessas fases minerais e **aumento dos teores de óxido de ferro ( $FeO_{total}$ ) no sedimento de fundo em comparação aos dados pretéritos**. Como a presença exclusiva de volumes dessas fases minerais não é suficiente para caracterizar uma evidência de presença de rejeito é necessário analisar em conjunto os valores de susceptibilidade magnética e os teores de  $FeO_{total}$ . As análises do sedimento associado ao rejeito da barragem de Fundão mostraram mineralogia composta principalmente por minerais compatíveis com a composição

do minério de ferro (a suíte mineralógica destacada acima). No entanto, a análise de DRX é imprecisa abaixo dos 5%, podendo mascarar os resultados. A análise da susceptibilidade magnética é mais robusta e precisa, podendo afirmar o aumento do volume da suíte mineral, mesmo que a DRX não consiga detectar ou a faça abaixo do que realmente ocorre. (ver subprojeto sedimentologia) Dessa forma o resultado alcançado é mais preciso e seguro.

#### 1.1.2 Critério Geoquímico:

A definição do critério geoquímico foi baseada nos resultados de Pereira et al. (2008), que identificaram os principais metais presentes na água e no sedimento de locais diretamente influenciados pelas operações de mineração na região de Germano/MG (barragens de rejeitos e rios próximos), e nos resultados de Bastos et al. (2017), que monitoraram os níveis de Al, Fe, Mn, Mg, As, Cd, Ba, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr e V com a aproximação e chegada da lama de rejeitos na região estuarina da foz do Rio Doce em Novembro de 2015. Pereira et al. (2008) concluíram que a mineração e o processamento de minério de ferro possuem forte influência (intervalo de confiança superior a 95%) nos níveis de Fe, Mn, Cu, Hg, Cr, e Ni para os locais investigados. Bastos et al. (2017) observaram que a chegada da lama de rejeitos na região estuarina da foz do Rio Doce em Novembro de 2015 resultou em um aumento das concentrações dos elementos Al, Fe, Mn, Ba, Cu, Ni, Zn, Pb, Cr e V. Bastos et al. (2017) concluíram que o aumento ocorreu tanto em resposta direta ao rompimento da barragem de rejeitos da mineração de ferro, como devido a processos secundários erosivos dos solos ou abertura de comportas das hidrelétricas ao longo do percurso percorrido. Assim, tendo como base os resultados dos estudos *op. cit.* foi definido que **o critério geoquímico** para a identificação da ocorrência do sinal de rejeito de minério nas estações monitoradas **é baseado nas concentrações dos seguintes metais: Ni, Cu, Pb, Cr, Fe, Al, Mn, Zn.**

A identificação das estações que apresentaram o sinal de rejeito de minério, com base no critério geoquímico, foi realizada em duas etapas:

- 1º) Para as estações dos Setores APA Costa das Algas e Foz do Rio Doce, que apresentam estudos prévios de monitoramento de metais no sedimento (Julho de 2013 e Março de 2014), foi calculado um valor de médio de *background* com base nesses estudos. Para o cálculo do valor médio de *background* foram consideradas as estações com localização próxima às estações monitoradas no PMBA. Nesse caso, para cada metal e para cada estação, foi calculada a razão entre as concentrações de metais observadas nas campanhas do PMBA e as concentrações observadas nos estudos pretéritos. Realizado o cálculo da razão para todas as estações e para todas as campanhas, foi então calculada uma razão média considerando todas as campanhas para cada estação. **Quando para uma determinada estação esta razão é superior a 1,1 para ao menos 6 dos 8 metais considerados, ou seja, um aumento médio de ao menos 10%, foi definido que essa estação apresenta o sinal do rejeito de minério.**



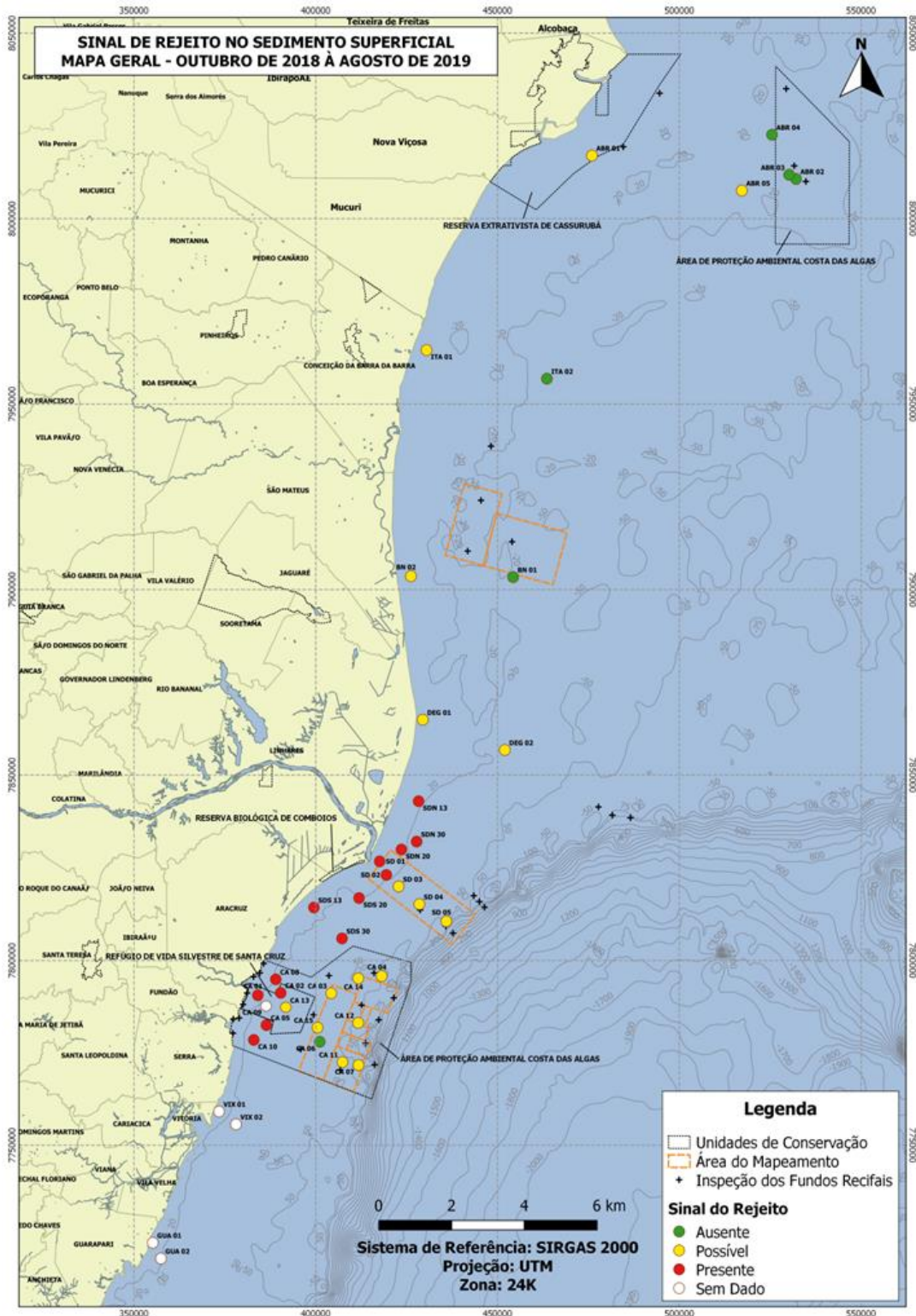
Foram realizados testes de sensibilidade do critério a diferentes porcentagens de aumento médio de concentração dos diferentes metais. A análise da ocorrência do sinal do rejeito de minério no sedimento mostrou que no setor APA Costa das Algas 80% das estações apresentam sinal do rejeito de minério e no setor Foz do Rio Doce 100% das estações apresentam sinal do rejeito. Quando consideramos um aumento de 50% das concentrações dos metais, no setor APA Costa das Algas 73.3% das estações apresentam sinal do rejeito de minério, enquanto no setor Foz do Rio Doce 81.88% das estações apresentam sinal do rejeito. Dessa forma, mesmo que seja estabelecido um maior incremento das concentrações dos metais para definir que uma determinada estação apresenta o sinal do rejeito de minério, a maior parte das estações dos setores APA Costa das Algas e Foz do Rio Doce continuam apresentando o sinal do rejeito. No caso do setor Foz do Rio Doce, as duas estações que deixaram de apresentar o sinal do rejeito de minério foram a SDS 13 e SD 01

- 2º) Para as estações do Setor Norte e Abrolhos, para os quais não existem dados pretéritos a Novembro de 2015, foram analisadas as concentrações dos metais ao longo das campanhas do PMBA. **Quando uma determinada estação apresentar tendência de aumento da concentração de ao menos 6 dos 8 metais considerados, foi definido que essa estação apresenta o sinal do rejeito de minério.**

A partir da ocorrência de ambos os critérios para um determinado ponto, considerou-se presente (Figura 8- vermelho) o sinal do rejeito naquele local. Com a ausência de ambos critérios, considera-se que não há sinal do rejeito no ponto (Figura 8- verde). Quando apenas um dos critérios (mineralógico ou geoquímico) é confirmado, o ponto foi marcado com possível sinal do rejeito (Figura 8- amarelo).

O mapeamento de sinais da presença de rejeito no sedimento marinho mostra a presença de indícios em praticamente toda a área monitorada, desde a APA Costa das Algas e Revis de Santa Cruz, passando por todo o setor da Foz do Rio Doce e chegando ao Setor Norte (Figura 8). O Setor Abrolhos apresenta sinais do rejeito para apenas 1 dos critérios para a estação mais rasa, sendo inconclusivo. Os sinais do rejeito apresentam uma relação com a batimetria local, apresentando sinais de ambos os critérios nas estações mais rasas até aproximadamente a isóbata de 30 m de profundidade. No Setor Norte, apenas os pontos mais rasos mostraram a presença de sinais do rejeito (exceto Degredo), não sendo observada a presença do rejeito sobre o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. Na região ao sul da foz, a APA Costa das Algas mostra sinais geoquímicos da presença do rejeito em profundidades maiores que 30 m, porém os parâmetros mineralógicos não mostraram alterações significativas que indicassem a assinatura mineralógica do rejeito ao longo da área.

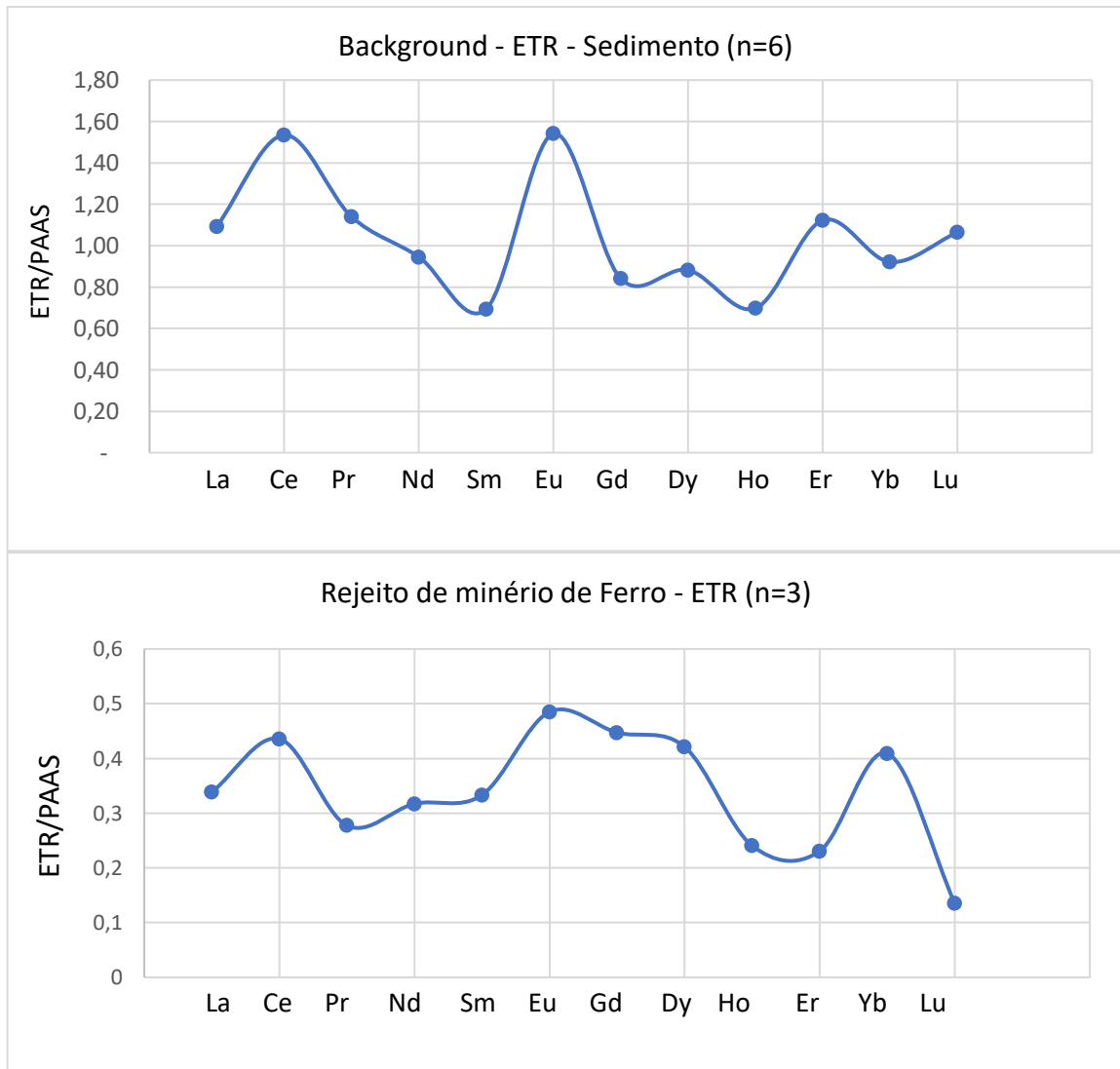
Figura 8: Distribuição espacial de sinais do rejeito no sedimento marinho superficial de acordo com os critérios mineralógicos e químicos estabelecidos. Os círculos vermelhos indicam que ambos os critérios foram satisfeitos para a estação e indicam a presença do sinal do rejeito. Os círculos verdes mostram ausência de sinal do rejeito. Os círculos amarelos indicam que apenas um dos critérios foi satisfeito, sugerindo possível presença de sinais do rejeito. As Unidades de Conservação são indicadas pelos polígonos tracejados.



O mapeamento do depósito contendo sinal do rejeito nos testemunhos, mostrou a presença desse sinal no setor Foz do Rio Doce. No T 06 o sinal foi identificado no estrato superior (0-1 cm) e no T 13 nos três estratos analisados (0-1 cm; 14-15 cm; 29-30 cm). Como para o sedimento superficial, para os testemunhos também foram adotados os critérios geoquímico e mineralógico. O critério geoquímico considerou o aumento em pelo menos 10% dos metais Zn, Cu, Pb, Cr, Ni, Mn e Fe em comparação à concentração desses metais no estrato da base do testemunho. O critério mineralógico considerou o aumento de volumes totais de fases minerais de ferro (hematita, magnetita, grenalita-T, magmita e goethita) e da susceptibilidade magnética usando como fator comparativo as análises do Testemunho 01, onde não foi detectado sinal da presença do rejeito. É importante destacar que também foi identificado o aumento dos volumes totais de fases minerais de ferro e da susceptibilidade magnética no setor Norte (T 09). Isso corrobora o padrão preferencial de transporte sedimentar para norte/nordeste identificado para o sedimento superficial. Não foi encontrada a presença do sinal de rejeito no setor APA Costa das Algas, conforme os critérios acima mencionados.

Outro indicador que se mostrou positivo em termos de identificação da presença do rejeito no sedimento de fundo marinho foi Elementos Terras Raras (ETRs). Através da análise de ETRs em amostras pretéritas da Plataforma Continental do Espírito Santo e do rejeito de mineração, obteve-se duas assinaturas geoquímicas distintas (Figura 9), sendo ambos os resultados normalizados pelo Folhelho Australiano Pós-Arqueano (PAAS). Dessa forma, os ETRs se mostraram um parâmetro muito importante, juntamente com os critérios mineralógico e geoquímico, como traçador do sinal da presença de rejeito da mineração no ambiente marinho. Como será discutido abaixo.

Figura 9: Média dos Elementos Terras Raras (ETR) normalizados pelo Folhelho Australiano Pós-Arqueano (PAAS) nas 3 camadas de base nos testemunhos T02 e T03 coletados na Plataforma Continental do Rio Doce (Cagnin, 2018).



Comparando estas assinaturas às obtidas nos diferentes setores monitorados seja no sedimento superficial ou no MPS, podemos indicar algumas afirmações referentes a origem e mistura dos materiais presentes nos depósitos sedimentares superficiais. Na plataforma de Abrolhos, aparentemente a assinatura dos ETRs herda características específicas. Estas características podem estar ligadas a mistura de material carbonático e siliciclástico, especialmente para o sedimento, não sendo possível responder precisamente sobre a presença do rejeito por meio da utilização dos ETR como indicador, nesta parte da Plataforma. No setor Norte, na campanha 7, o padrão de distribuição dos ETR no sedimento é muito similar ao encontrado em Abrolhos. Apesar de possuir características similares, não há uma correlação direta entre o MPS e o rejeito na campanha 7. No setor Norte, ainda, esta assinatura variou ao longo do período monitorado, demonstrando que a região possui mais de uma fonte para o aporte de material sedimentar. No entanto, na campanha 10 (julho de 2019), nota-se muita coerência entre o perfil dos ETRs do sedimento com o do rejeito de minério, incluindo as

concentrações. Esta informação está de acordo com o modelo de transporte sedimentar proposto e discutido anteriormente, inclusive o conseqüente aumento das concentrações de metais neste setor. Provavelmente a presença do rejeito neste setor durante essa campanha, pode ser resultado tanto do aporte direto do rejeito pelo rio, como da remobilização e dispersão do sedimento junto ao fundo. A mesma abordagem não se aplica ao MPS, onde não é possível observar a presença do rejeito nesta campanha, o que confirma que a configuração observada no fundo é proveniente de eventos anteriores que carregaram e depositaram o rejeito mais ao norte.

No setor Foz a presença da assinatura geoquímica dos ETRs já foi evidente desde a primeira campanha, principalmente no sedimento superficial, com variações na intensidade do sinal ao longo do monitoramento. As campanhas 4 e 5 são muito similares e apresentam a assinatura de ETR no sedimento, porém menos concentrado. Já o MPS, apesar de possuir certa correspondência, não é totalmente similar ao sinal de ETR do rejeito. Na campanha 7 são observadas características semelhantes dos ETR entre o sedimento e o MPS, porém com maior concentração no MPS, indicando ressuspensão do sedimento de fundo, processo já discutido anteriormente. Nas demais campanhas a assinatura se mantém tanto no sedimento quanto no MPS, com exceção da campanha 10 para o MPS. Estes resultados reafirmam que o setor Foz ainda é o mais influenciado pelo aporte, deposição e remobilização do material oriundo do rompimento da barragem.

No setor da APA/RVS apenas é possível fazer uma relação direta com o rejeito no sedimento na campanha 7 e 10, provavelmente devido ao processo de remobilização do sedimento de fundo. Já no setor Sul há correspondência da assinatura dos ETRs do rejeito no sedimento nas campanhas 4, 7 e 10, e também com o MPS nas campanhas 4 e 10. Apesar da assinatura, a presença do Porto de Tubarão, exportador de minério oriundo justamente da área da Barragem de Fundão, impossibilita relacionar de forma direta a presença do rejeito neste setor. Neste caso o que podemos estar observando é apenas a presença de minério já processado e que chega à área em função da presença do Porto.

Embora a presença do rejeito leve em conta não somente critérios geoquímicos, a distribuição espacial dos sinais de rejeitos apenas reforça as observações de concentrações de metais característicos do rejeito para todos os setores. Em uma análise de frequência de ocorrência de concentrações de Fe e outros elementos na água e sedimento acima de valores crônicos e agudos (usando os valores do NOAA como referência ou dados pretéritos), o mapeamento mostrou que a fase aguda de deterioração da qualidade da água e sedimento no ambiente marinho continua ocorrendo, praticamente, 4 anos após o rompimento da barragem. Para o Fe, utilizado aqui como exemplo, momentos agudos no sedimento e na água foram verificados para os setores APA Costa das Algas, Foz e Norte. Embora com uma quantidade menor de amostras (e campanhas), os setores Abrolhos e Sul mostraram ainda momentos de concentrações de Fe superiores a valores crônicos, tanto para a água como para o sedimento. O interessante desta análise é que valores acima do valor orientador como agudo pela NOAA ou pela CONAMA 357/05 para água salina, só foram observados nos locais onde a aplicação dos critérios

geoquímicos e mineralógicos, além da melhor definição da assinatura geoquímica de ETRs, indicaram a presença do sinal do rejeito de mineração, ou seja, setores Foz, APA/RVS e Norte (Figura 11; Figura 12). Como não há valores orientadores para ferro em sedimentos, os dados do PMBA foram comparados a dados pretéritos, entretanto estes não existem para todos os setores (Figura 12). Quando se considera como referência, valores medidos na região anteriores ao rompimento da barragem, as concentrações de ferro ainda se encontram até 4 vezes superiores. Outros elementos, como por exemplo o alumínio, apresentam enriquecimento ainda maior, de 8 vezes.

Figura 10: Distribuição por setor da frequência de ocorrência de concentração normal (verde), crônica (amarelo) e aguda (vermelho) de Fe dissolvido na matriz água em superfície. O tamanho dos círculos representa o número de campanhas que foram realizadas no setor.

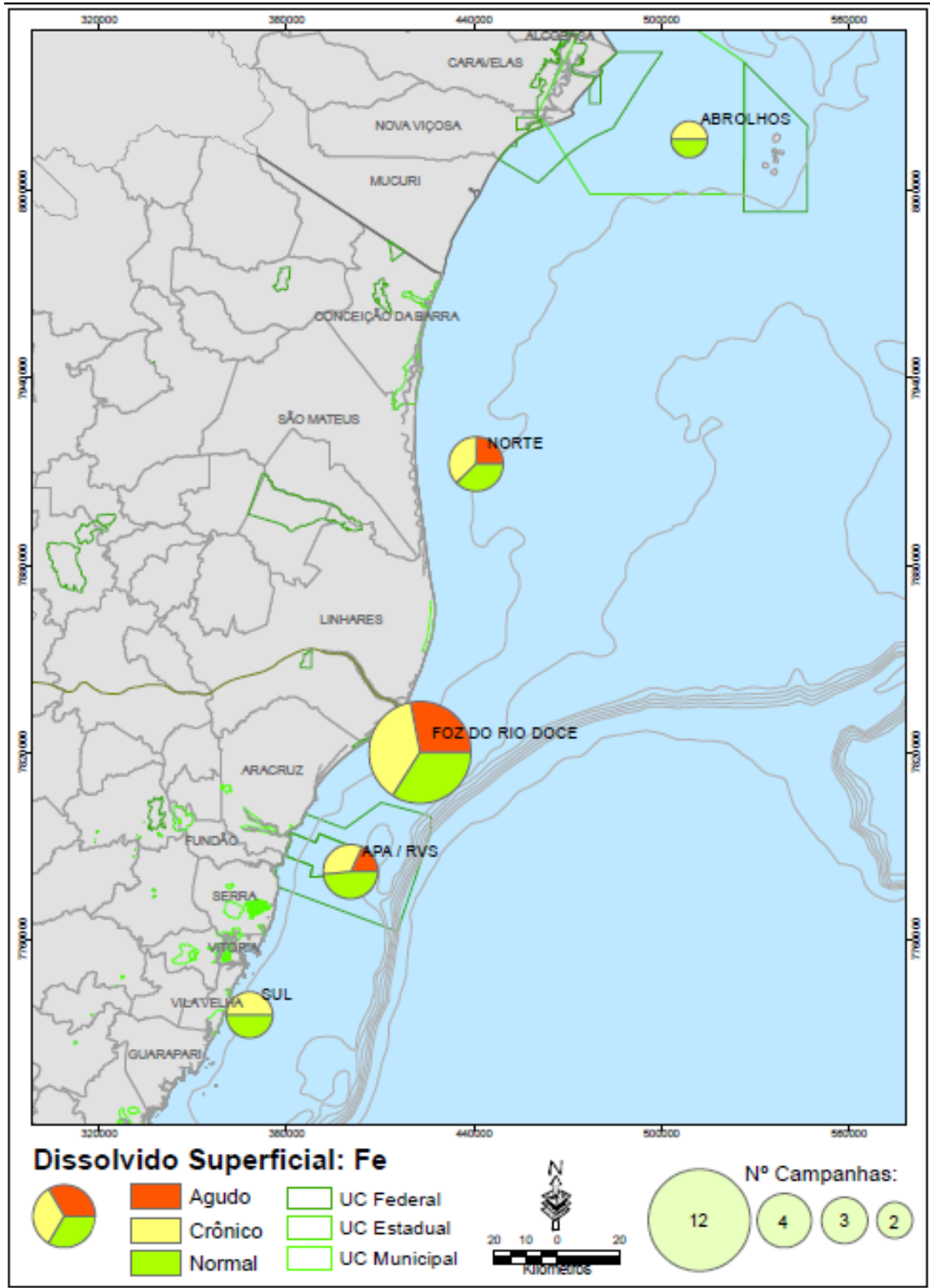


Figura 11: Distribuição por setor da frequência de ocorrência de concentração normal (verde), crônica (amarelo) e aguda (vermelho) de Fe dissolvido na matriz água no fundo. O tamanho dos círculos representa o número de campanhas que foram realizadas no setor.

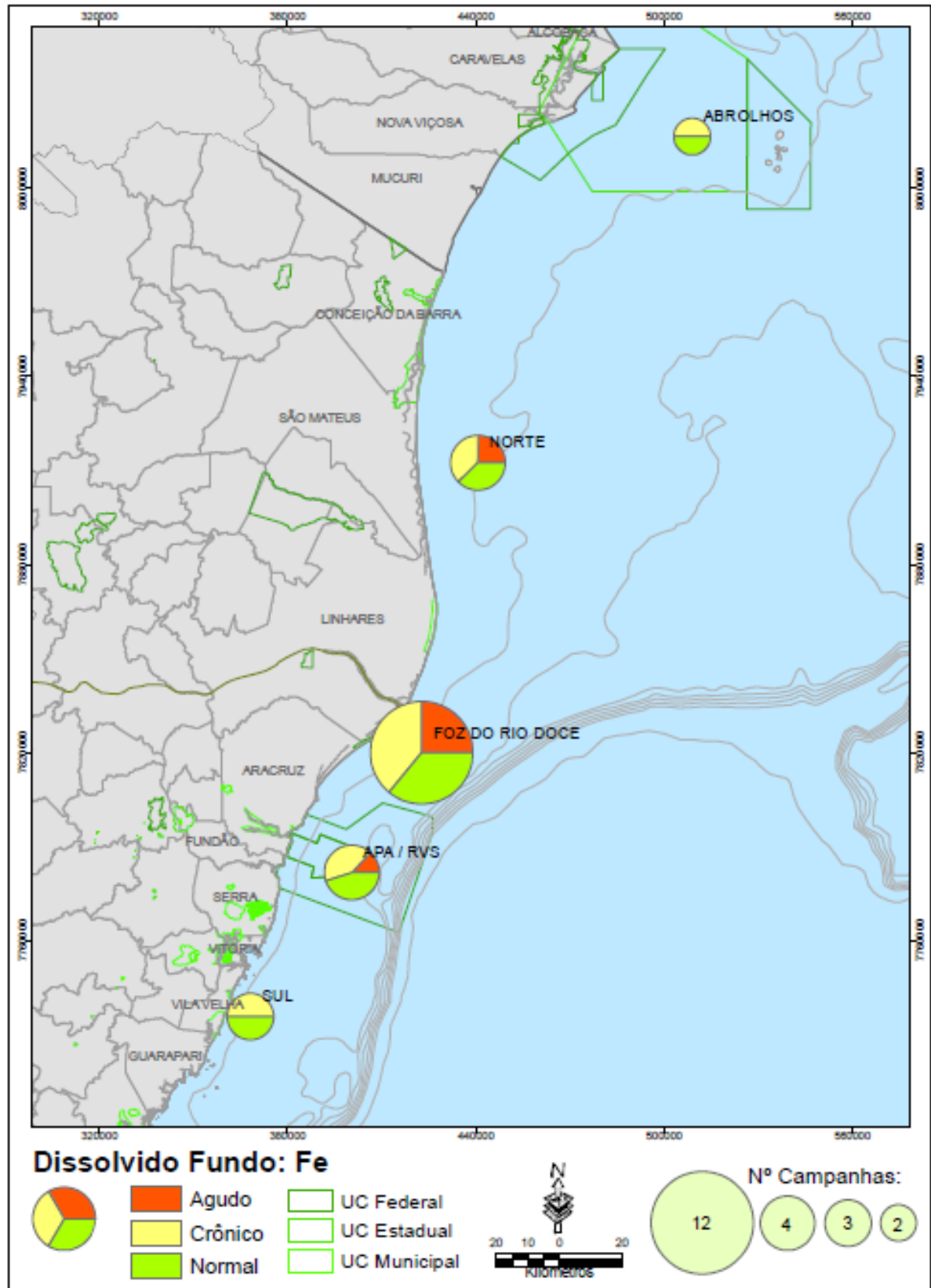




Figura 12: Distribuição por setor da frequência de ocorrência de concentração normal (verde), crônica (amarelo) e aguda (vermelho) de Fe no sedimento. O tamanho dos círculos representa o número de campanhas que foram realizadas no setor.

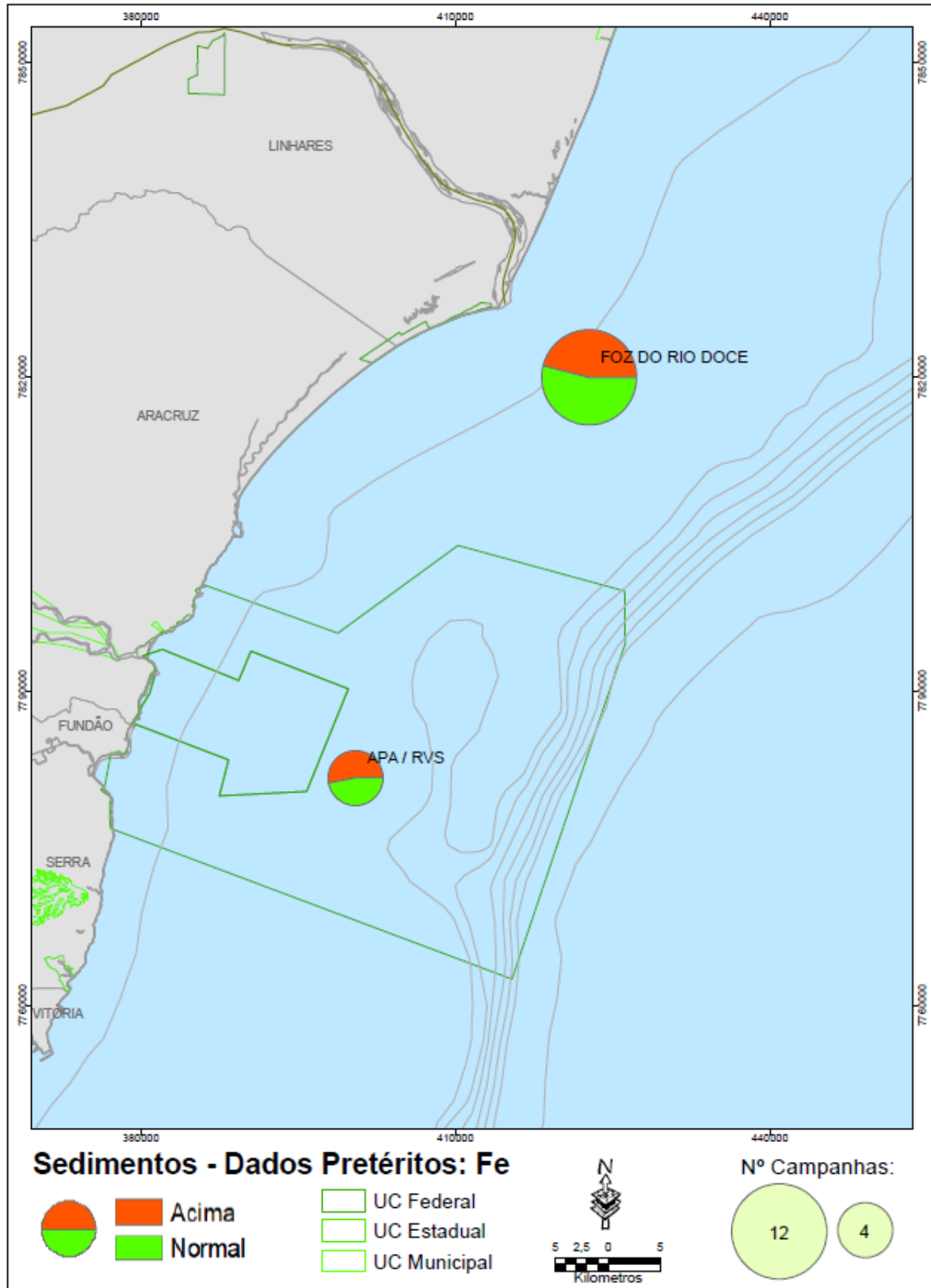
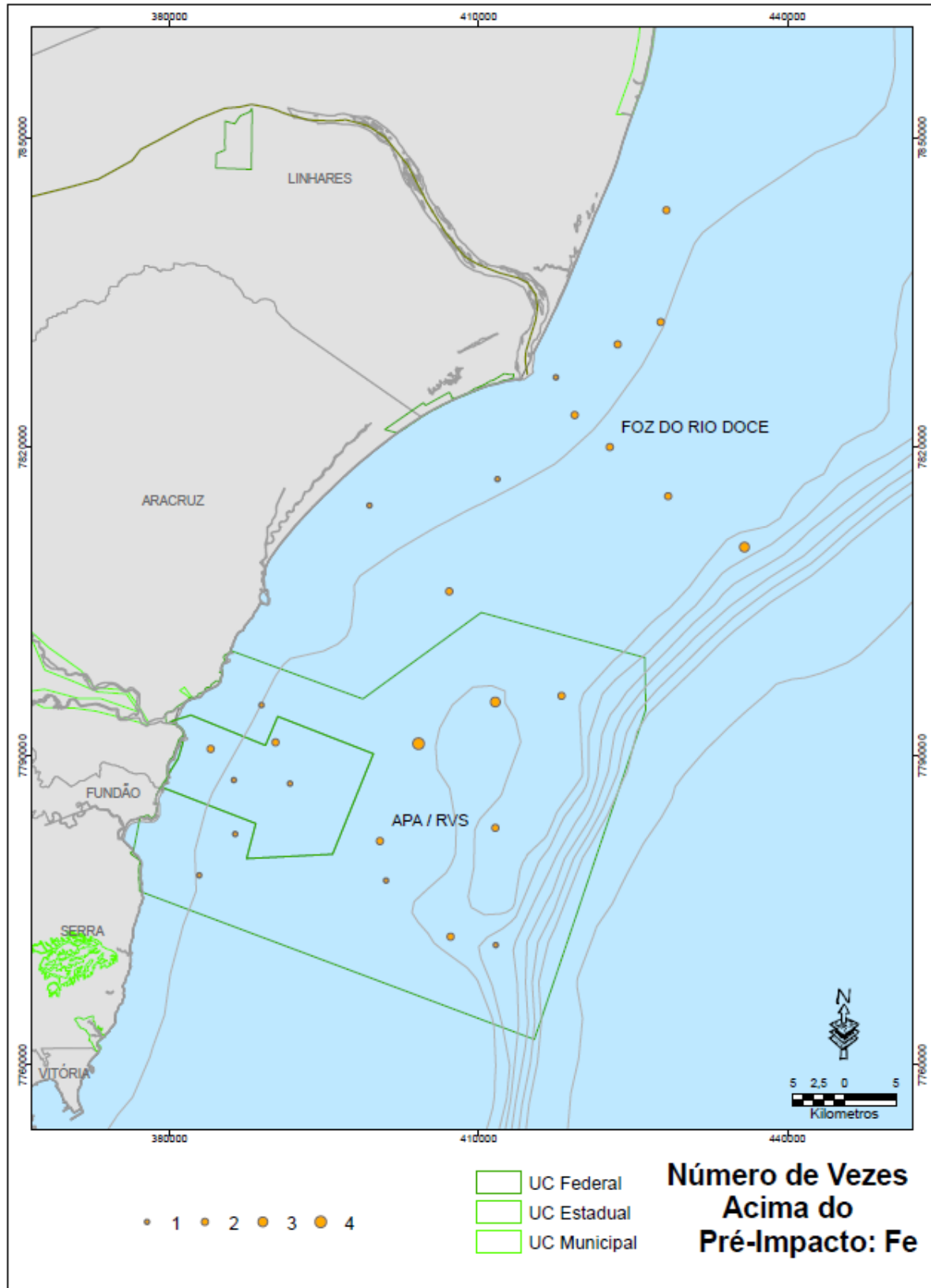


Figura 13: Distribuição espacial do aumento (e.g., aumento de 2x representa 100% de incremento) das concentrações do Fe no PMBA em relação a valores Pretéritos



## 1.2 INTEGRAÇÃO ABIÓTICA X BIÓTICA

Do ponto de vista biótico, os resultados integrados para o primeiro ano de PMBA mostraram uma repetição e continuidade dos principais impactos observados durante o período pré-PMBA (Bastos et al., 2017) e para os primeiros resultados apresentados no relatório semestral de maio de 2019. No entanto, **as observações sistemáticas e periódicas realizadas no âmbito do PMBA permitiram um avanço significativo no entendimento da influência de processos abióticos nos impactos bióticos nos diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar marinha.** Em síntese, a análise integrada apresentará os impactos bióticos nos seguintes aspectos quali-quantitativos das comunidades fitoplanctônica, zooplanctônica, ictioplanctônica e bentônica:

- **Comunidade fitoplanctônica: composição qualitativa da comunidade, biomassa em termos de clorofila-a, concentração de feopigmentos, porcentagem de clorofila ativa e densidade numérica;**
- **Comunidade zooplantônica: abundância total, abundância das espécies *Penilia avirostris* (espécie sensível a diferentes tipos de poluentes), *Paracalanus cf parvus* e *Temora turbinata* (espécies com reconhecida capacidade de adaptação a diferentes tipos de impacto antrópico), e índices ecológicos (Diversidade de Shannon ( $H'$ ) e riqueza de Margalef ( $d$ ));**
- **Ictioplâncton: Densidade de larvas e ovos, número de táxons e ocorrência de larvas com trato digestório destruído;**
- **Organismos bentônicos de fundos inconsolidados: número de vestígios de organismos e ocorrência de grupos tolerantes a impacto antrópico;**
- **Ambientes recifais: são abordados aqui com objetivo de avaliar qual a condição da qualidade da água e do sedimento nos diferentes setores monitorados. A vulnerabilidade de cada região diagnosticada ao longo do PMBA também será destacada.**

### 1.2.1 Análise biótica Pré/PMBA

Em termos de fatores abióticos que afetam a biodiversidade marinha, a chegada da mistura da lama de rejeito, solo e detritos resultou em elevadas concentrações de metais (na coluna d'água e no sedimento), sedimento em suspensão e matéria orgânica nas regiões estuarina e marinha da Foz do Rio Doce como já discutido em parágrafos anteriores. Conseqüentemente também se observa um aumento na concentração de nutrientes inorgânicos, destacando-se o aumento do nitrogênio amoniacal, nitrato e silício dissolvido. Durante o primeiro ano de monitoramento (Novembro/2015 - Dezembro/2016), todos os nutrientes apresentaram concentrações máximas muito acima das registradas antes do rompimento da barragem (Figueiredo et al., 2016), especialmente o silício

dissolvido e o nitrato. A chegada da mistura de lama de rejeitos, solo e detritos na porção interna da foz do rio e ambiente marinho também ocasionou um incremento nas concentrações de metais micronutrientes (Fe, Mn e Zn) e traços (Cu, Co e V), tanto na fração dissolvida quanto na fração total. Além desses metais, outros como Al, Cr, Ba também apresentaram aumento em suas concentrações na matriz água (Bastos et al., 2017; Gomes et al., 2017). A maioria dos metais analisados apresentou valores de concentração mais elevados nas campanhas realizadas entre Novembro de 2015 e Janeiro de 2016. Concentrações máximas de MPS foram observadas em Novembro de 2015, com valores que alcançaram 9000 mg/L.

Dessa forma a chegada do material com rejeito alterou a condição oligotrófica na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce. Os resultados obtidos entre Novembro de 2015 e 2016, bem como ao longo do primeiro ano de monitoramento do PMBA (2018-2019), mostram o impacto dos parâmetros mencionados anteriormente em aspectos quali-quantitativos de diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar marinha.

Entre Novembro/2015 e Abril/2016 foi observado um aumento significativo da densidade numérica total do fitoplâncton (até vinte e três vezes maior que em amostragens pretéritas; Petrobras, 2015) na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce. A partir de Abril/2016 foram observadas flutuações da densidade numérica com valores superiores aos observados nas campanhas anteriores ao rompimento, mostrando que a abundância de organismos não retornou a valores pretéritos. Esse aumento na densidade numérica fitoplanctônica ocorreu em resposta a um incremento significativo da concentração de nutrientes inorgânicos e metais micronutrientes (Fe, Mn e Zn) e traços (Cu, Co e V) na região, como descrito no parágrafo anterior.

As alterações nas condições ambientais na região marinha adjacente à Foz do rio Doce, bem como o aumento significativo da densidade numérica fitoplanctônica resultou em um efeito cascata na cadeia alimentar marinha. Acompanhando o aumento inicial da densidade numérica fitoplanctônica, ocorre um aumento significativo (**quase duzentas vezes maior que em amostragens pretéritas; Petrobras, 2015**) na abundância total do zooplâncton, na região próxima à Foz do Rio Doce, em Novembro-Dezembro/2015 em relação a estudos prévios. A partir de Janeiro/2016, a abundância retornou a valores intermediários.

Entre Novembro/2015 e Abril/2016, o aumento na densidade numérica da comunidade fitoplanctônica foi acompanhado por uma alteração radical na composição dessa comunidade, bem como na diminuição das condições da saúde fisiológica, representado pelo aumento das concentrações de feopigmentos, (produto da degradação da clorofila-a e que indica um aumento na senescência das células), refletindo-se também na queda da clorofila ativa. A partir de Abril/2016, a saúde fisiológica da comunidade fitoplanctônica mostrou uma ligeira recuperação, com concentrações de feopigmentos menores se comparadas ao período agudo, porém mostrando oscilações temporais nas porcentagens de clorofila ativa. Em relação à mudança da composição do fitoplâncton, entre Novembro/2015 e

Abril/2016, foi observada uma quase total substituição de espécies mais frágeis, mas de grande ocorrência em águas tropicais, como os coccolitoforídeos (Levington, 1995), por espécies oportunistas, de proliferação rápida, como as cianofíceas e clorofíceas (algas verde). Essas últimas adaptam-se mais facilmente a mudanças de condições ambientais e por isso são reconhecidas como cosmopolitas (Pearl, 2000). Também foram observadas florações de cianofíceas como *Synechococcus spp.*, *Synechocystis spp.*, além do aumento da ocorrência da também cianofícea *Trichodesmium spp.* e clorofíceas unicelulares nanofitoplanctônicas de formato esférico/ovalado (algas verdes). Após Abril/2016, a composição mostrou uma persistência de organismos oportunistas (cianobactérias e clorofíceas), com o quase desaparecimento de indivíduos frágeis, como os coccolitoforídeos. Reynolds (2006) e Kaiser et al. (2005) indicam que um processo de não recuperação em curto ou médio prazo pode indicar uma aplicação ao fitoplâncton marinho da Hipótese do Distúrbio Intermediário. Essa hipótese defende que, sob circunstâncias de um distúrbio repetido várias vezes, não ocorre um processo de recuperação ou sucessão ecológica progressiva. Dessa forma, a repetição do distúrbio provoca uma interrupção no processo de recuperação e retorno às condições verificadas logo após este distúrbio. Isso mostraria não um processo de recuperação/sucessão verdadeiro, mas um processo em que uma mudança não se completaria, pois ocorreria uma reversão causada por uma repetição do distúrbio. Reynolds (2006) considera que, aplicado ao fitoplâncton, se não ocorrer distúrbio (natural ou antrópico), a comunidade segue o seu processo natural de recuperação. No caso da repetição do distúrbio com um tempo intermediário, esse processo de mudança/reversão seria mais lento e possibilitaria a ocorrência de várias espécies, conseguindo inclusive aumentar a diversidade. Entretanto se este distúrbio ocorrer mais frequentemente, isso só possibilitaria a manutenção das espécies pioneiras e oportunistas. Embora Reynolds (2006) aplique a teoria ao fitoplâncton, as consequências dos distúrbios provocados pelo aporte fluvial e ressuspensão afetam também as comunidades zooplanctônicas, bentônicas e ictioplanctônicas. Estudos ecológicos (e.g., Hodgkiss e Ho, 1997) têm mostrado que o aumento da carga de nutrientes e contaminantes, bem como alterações nas proporções dos nutrientes, podem alterar a composição, a dominância e a sucessão das espécies de fitoplâncton, comprometendo os ciclos naturais de crescimento da comunidade e a sua sucessão nos sistemas costeiros. Ademais, alterações na comunidade fitoplanctônica devido à alteração nutricional podem acarretar em mudanças em toda a cadeia alimentar (Souza, et al., 2013).

Para a comunidade zooplanctônica, foi observado um decréscimo no número de táxons ao longo do ano de 2016, de forma que em Novembro/2015 cerca de 80% da comunidade zooplanctônica era constituída por indivíduos pertencentes a duas espécies de copépodos. Além disso, foi observada uma alteração na estrutura da comunidade zooplanctônica, com perda imediata de diversidade e aumento na abundância de algumas espécies.

O Ictioplâncton, no monitoramento de Janeiro-Fevereiro/2016, apresentou um menor número de táxons em relação a monitoramentos realizados na região da Foz do Rio Doce em 1999 e 2014. Para a comunidade ictioplanctônica em Janeiro/2016, foi registrada pela primeira vez, larvas que estavam com

sedimento alaranjado aderido ao corpo, indicando um contato direto com a lama de rejeito. Em Abril/2016, também pela primeira vez na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce, foram observadas larvas com trato digestório destruído. Essas larvas apresentavam maiores concentrações de vários metais, principalmente ferro e manganês, quando comparadas à larvas coletadas em 2014, e em 2015, mas com o trato digestório íntegro. Authman *et al.* (2015) documentaram que a toxicidade dos metais pode levar a um retardo no desenvolvimento, deformidades morfológicas e funcionais ou até mesmo a morte.

Assim como observado para a comunidade planctônica, entre Novembro de 2015 e 2016, a comunidade bentônica também apresentou alterações na composição da comunidade. Foi observada uma redução do registro de organismos do Subfilo Crustacea, Filo Bryozoa, tubos e organismos da Classe Polychaeta, Classes Bivalvia e Scaphopoda. Esse resultado apontou para uma redução ou desaparecimento na região, de organismos com partes moles no corpo (como dos Filos Nematoda e Platyhelminthe), e a presença de conchas e valvas vazias e inteiras (sem fragmentações), indicando organismos recentemente mortos. Em relação aos impactos observados na comunidade bentônica, os resultados mostram que esses ocorreram em resposta tanto ao aumento da concentração de MPS próximo ao fundo, logo após a chegada da mistura de lama de rejeito, solo e detritos em Novembro/2015, como devido ao aumento da concentração de metais na coluna d'água próxima ao fundo e no sedimento superficial. Para o MPS, as concentrações de metais foram maiores nas campanhas de Novembro e Dezembro de 2015, e para o sedimento superficial, foi observada uma tendência de acréscimo ao longo do monitoramento com valores mais elevados em Novembro de 2016.

### 1.2.2 Análise biótica PMBA

Conforme mencionado anteriormente, a construção de uma série temporal mais longa e contínua no Setor Foz do Rio Doce (primeiro ano do PMBA - Novembro/2018 a Setembro/2019) possibilitou um maior entendimento dos processos responsáveis pelos impactos observados nas comunidades planctônicas e bentônica, os quais ao longo do PMBA foram basicamente os mesmos que os observados entre Novembro de 2015 e 2016.

Durante o primeiro ano de monitoramento do PMBA foi possível medir e analisar a importância de eventos hidrológicos na bacia do Rio Doce no aporte de material particulado e dissolvido para a região marinha (apresentando anteriormente). Em paralelo, as medições realizadas a partir do outono e inverno mostraram também a importância do aumento da energia das ondas na mobilização do fundo e redistribuição na coluna d'água de materiais dissolvidos e particulados em altas concentrações próximos ao fundo ou já depositados no sedimento marinho. A combinação de eventos hidrológicos (não necessariamente simultâneos) a eventos de aumento da energia das ondas resultaram em consequências importantes e preocupantes para o ambiente marinho, especialmente na (re)disponibilização de metais na coluna d'água. Os dados revelaram que, sob certos aspectos, eventos hidrológicos e/ou de ressuspensão podem ser comparáveis ou mais impactantes na disponibilização

de alguns metais na coluna d'água que o próprio rompimento da barragem em novembro de 2015, durante o chamado período agudo. Em outras palavras, os resultados discutidos a seguir põem em dúvida a simplificação de que, após o período agudo da chegada dos rejeitos nos primeiros meses após o rompimento da barragem de Fundão, o ambiente marinho entrou num período de impactos crônicos sobre a biota. Os eventos de ressuspensão e/ou aumento significativo do aporte fluvial são novos e recorrentes impactos agudos para o ambiente marinho, com consequências biológicas imediatas na base da cadeia alimentar marinha.

O comportamento da comunidade fitoplanctônica ao longo do primeiro ano do PMBA comprovou a hipótese de que a comunidade tem estado sob a influência de constantes distúrbios intermediários, os quais têm impossibilitado que a comunidade se recupere. Os resultados mostraram a manutenção dos impactos observados entre Novembro de 2015 e 2016. O distúrbio frequente na região marinha adjacente à foz do Rio Doce seria causado tanto pela continuidade do aporte do material oriundo do desastre pelo Rio Doce, como pela periódica ressuspensão desse material contido no sedimento. De fato, como discutido acima, os resultados têm mostrado que o último fator tem maior impacto sobre a disponibilização de metais (frações dissolvida e particulada), nutrientes e MPS para a coluna d'água. Além disso, a dispersão preferencial desse material na região marinha adjacente à foz do Rio Doce, a qual tem sentido norte e nordeste também influenciou na distribuição espacial dos impactos observados.

A densidade numérica do fitoplâncton continuou apresentando valores acima dos encontrados em levantamentos prévios à Novembro/2015, apesar de ter apresentado flutuações ao longo do monitoramento. Essas flutuações diferiram nos setores Foz Sul, Foz Central e Foz Norte na região do Rio Doce, sugerindo que as condições meteoceanográficas que controlam a dispersão de nutrientes inorgânicos, metais e MPS na região, também resultam em respostas diferenciadas na variação da densidade numérica do fitoplâncton. Flutuações espaço-temporais também foram observadas nos parâmetros que avaliam a saúde fisiológica do fitoplâncton, de forma que uma pior saúde fisiológica foi observada sob condições de maior concentração de metais na coluna d'água. Um exemplo desse cenário é a campanha 8, durante a qual foi observada uma elevada concentração de metais, e que resultou em uma queda da clorofila ativa nos setores Foz Sul, Foz Central e Foz Norte. No geral, apesar das variações temporais na composição, o setor Foz Norte apresentou os menores valores médios de clorofila ativa. Tal resultado deve estar associado a direção preferencial de transporte de metais e sedimento para norte nessa região (discutido no item de análise abiótica). É importante destacar que no setor Foz Norte são observados os maiores teores de lama no sedimento superficial, o que resulta em um maior potencial de ressuspensão do sedimento superficial, e conseqüentemente de metais para a coluna d'água nessa região. Além disso, para os três setores, os menores valores de clorofila ativa foram encontrados próximo ao fundo, em resposta às maiores concentrações de metais nas frações particulada e total próximas ao fundo (RT-19B RRDM/NOV19). Os menores valores médios de clorofila ativa para a camada próxima ao fundo foram observados nas campanhas 7 (51,41 %), 8 (51,87 %) e 3

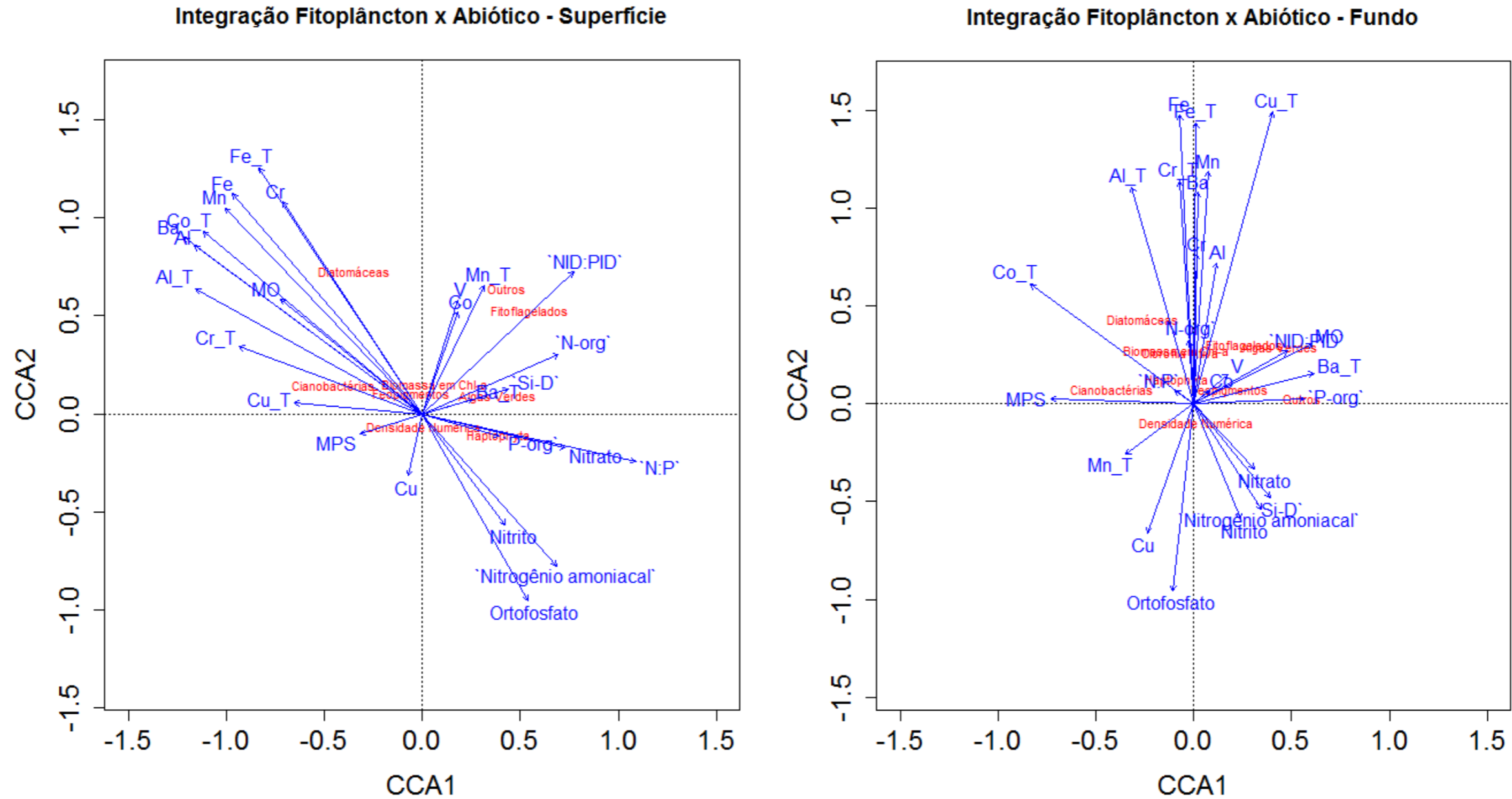
(57,79 %), as quais foram precedidas por eventos de aumento da energia de ondas, e consequentemente maior mobilidade do sedimento superficial - evidenciando o efeito da ressuspensão na disponibilidade de uma alta concentração de metais para a coluna d'água próximo ao fundo.

Acompanhando as flutuações na densidade numérica e na saúde fisiológica, a composição da comunidade fitoplanctônica também mostrou variação espaço-temporal fortemente associada às variações nas condições ambientais. Em relação a composição do fitoplâncton, ainda é observada a dominância de cianobactérias e algas verdes oportunistas nas campanhas caracterizadas por elevadas concentrações de metais na água (exemplo: campanhas 1, 4, 8 e 9). Nessas campanhas também é possível observar uma menor contribuição das haptófitas, que são mais sensíveis a mudanças nas condições ambientais, como forte estratificação térmica (Baumann *et al.*, 2005), aumento nas concentrações de Fe e Zn (Schulz *et al.*, 2004), e desequilíbrio da razão de Redfield. No caso do último fator, baixos valores da razão Nitrogênio Inorgânico Dissolvido: Fósforo Inorgânico Dissolvido (NID:PID) contribuem para o desenvolvimento de cocolitoforídeos (grupo predominante dentro das haptófitas), já que esses conseguem se desenvolver bem em ambientes de pouco fosfato (Hans & Young, 2004). Contudo, por ser tratar de organismos R-estrategistas, perdem na competição para outras espécies K-estrategistas, quando essas também são favorecidas pela composição nutricional do ambiente (Hans & Young, 2004). Dessa forma, a ocorrência de altas concentrações de metais, associada a uma forte estratificação e a maiores valores da razão NID:PID explicam o predomínio de algas verdes, cianofíceas e diatomáceas na composição do fitoplâncton, diferentemente do que encontrado em dados pretéritos. Uma maior contribuição de Haptófitas foram registradas nas campanhas 10, 11 e 12, quando as menores concentrações de metais foram observadas na coluna d'água, com destaque para a campanha 11. Durante a Campanha 11 também foram observados valores mais baixos da razão NID:PID, bem como uma menor estratificação térmica no Setor Foz do Rio Doce.

Uma análise de correspondência canônica (Figura 14) realizada entre os parâmetros indicadores de impacto no fitoplâncton e parâmetros que indicam a qualidade da água confirmou a relação positiva existente entre grupos oportunistas, como as cianobactérias, e maiores concentrações de metais. A análise também mostrou as Haptófitas correlacionadas negativamente à disponibilidade de metais e positivamente a um maior aporte de nutrientes inorgânicos dissolvidos como o nitrato. As relações entre as variáveis abióticas e o fitoplâncton foram mais evidentes para a camada superficial da coluna d'água (Figura 14).



Figura 14: Diagrama de ordenação da Análise de Correspondência Canônica com base nos dados das estações do setor Foz, mostrando a relação entre as variáveis predictoras (parâmetros abióticos) e as variáveis respostas (Fitoplâncton - Estrato Superfície (a) e Fitoplâncton - Estrato Fundo (b)). Parâmetros abióticos: Concentração dos seguintes metais na fração dissolvida - Vanádio (V), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Bário (Ba), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Alumínio (Al), Manganês (Mn); Concentração dos seguintes metais na fração total - Cobalto (Co\_T), Cobre (Cu\_T), Bário (Ba\_T), Cromo (Cr\_T), Ferro (Fe\_T), Alumínio (Al\_T), Manganês (Mn\_T); Concentração dos seguintes nutrientes dissolvidos Nitrogênio amoniacal, Silício Reativo Dissolvido (Si-D), Ortofosfato, Nitrito, Nitrato, Nitrogênio orgânico (N-org), Fósforo orgânico (P-org); Razão N:P; Razão NID:PID; Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS), Porcentagem de Matéria Orgânica no MPS (MO). Parâmetros da comunidade Fitoplanctônica: Densidade Numérica Total do Fitoplâncton (x [10<sup>3</sup> organismos.L<sup>-1</sup>]), Porcentagem de Diatomáceas, Algas Verdes, Haptophyta, Cianobactérias, Fitoflagelados, e Outros; Biomassa em Chl-a (µg/L), Feopigmentos (µg/L), Clorofila Ativa (%).



Assim como para a comunidade fitoplanctônica, a estrutura da comunidade zooplanctônica permanece alterada. Os resultados obtidos ao longo do primeiro ano do PMBA mostraram que essa comunidade está sendo regulada, principalmente, pelas condições ambientais que continuam sendo influenciadas pelo aporte do material oriundo do Rio Doce com presença de rejeito, seja via aporte fluvial, seja via ressuspensão do material contido no sedimento superficial para a coluna d'água. Conforme discutido anteriormente, alterações na comunidade fitoplanctônica devido a mudanças nos nutrientes disponíveis também podem acarretar em mudanças em toda a cadeia alimentar.

Entre Novembro/2018 e Setembro/2019, no Setor Foz do Rio Doce, a comunidade zooplanctônica apresentou menores índices de diversidade e riqueza na campanha 4, caracterizada por uma elevada concentração de metais dissolvidos na coluna d'água. Apresentou ainda maiores valores de índices ecológicos na campanha 10, quando baixas concentrações de metais dissolvidos foram observadas na água. Durante a campanha 4 também foi observada uma redução expressiva na abundância da espécie *Penilia avirostris*, que é uma espécie sensível a impactos antrópicos.

Já as duas espécies com maior contribuição dentro da comunidade zooplanctônica, *Paracalanus cf parvus* e *Temora turbinata*, são conhecidas por serem indicadoras de condições estressantes e estiveram mais associadas aos momentos de maior impacto. A *Paracalanus cf parvus* esteve mais associada aos momentos de maior aporte fluvial (campanhas 1 e 4 - Figura 15) e a *Temora turbinata* aos momentos de maior altura significativa de ondas (campanhas 7 e 10 - Figura 15). Especialmente, também foi encontrada uma influência da dispersão preferencial de metais e sedimento para norte/nordeste na distribuição dos índices ecológicos. Como mencionado anteriormente, no Setor Foz do Rio doce, o sub-setor Foz Norte, que tem apresentado as maiores concentrações de metais no sedimento, também apresentou os menores índices ecológicos. Uma análise de correspondência canônica (Figura 16) realizada entre os parâmetros indicadores de impacto no zooplâncton e parâmetros que indicam a qualidade da água mostrou que existe uma relação inversa entre a espécie *Penilia avirostris* e a concentração de metais (frações dissolvida e total), nutrientes inorgânicos e MPS. Por outro lado, a análise mostra uma relação positiva entre as espécies *Paracalanus cf parvus* e *Temora turbinata*, melhor adaptadas a impacto antrópico, e a concentração de metais (frações dissolvida e total), nutrientes inorgânicos e MPS.

Figura 15: Diagrama da Análise de Componentes Principais com base nas forçantes físicas e parâmetros da comunidade Zooplancônica das estações do setor Foz do Rio Doce. A análise inclui os seguintes parâmetros da comunidade Zooplancônica: Abundância de *Paracalanus cf parvus*, Abundância de *Temora turbinata*, Abundância de *Penilia avirostris*.; A análise incluiu como forçantes físicas a vazão do Rio Doce em  $m^3/s$  (média de 30 dias Estação Fluviométrica de Colatina - código 56994500) e Altura Significativa de Ondas em m (média de 30 dias - Fundeio 3/SubProjeto Modelagem Numérica).

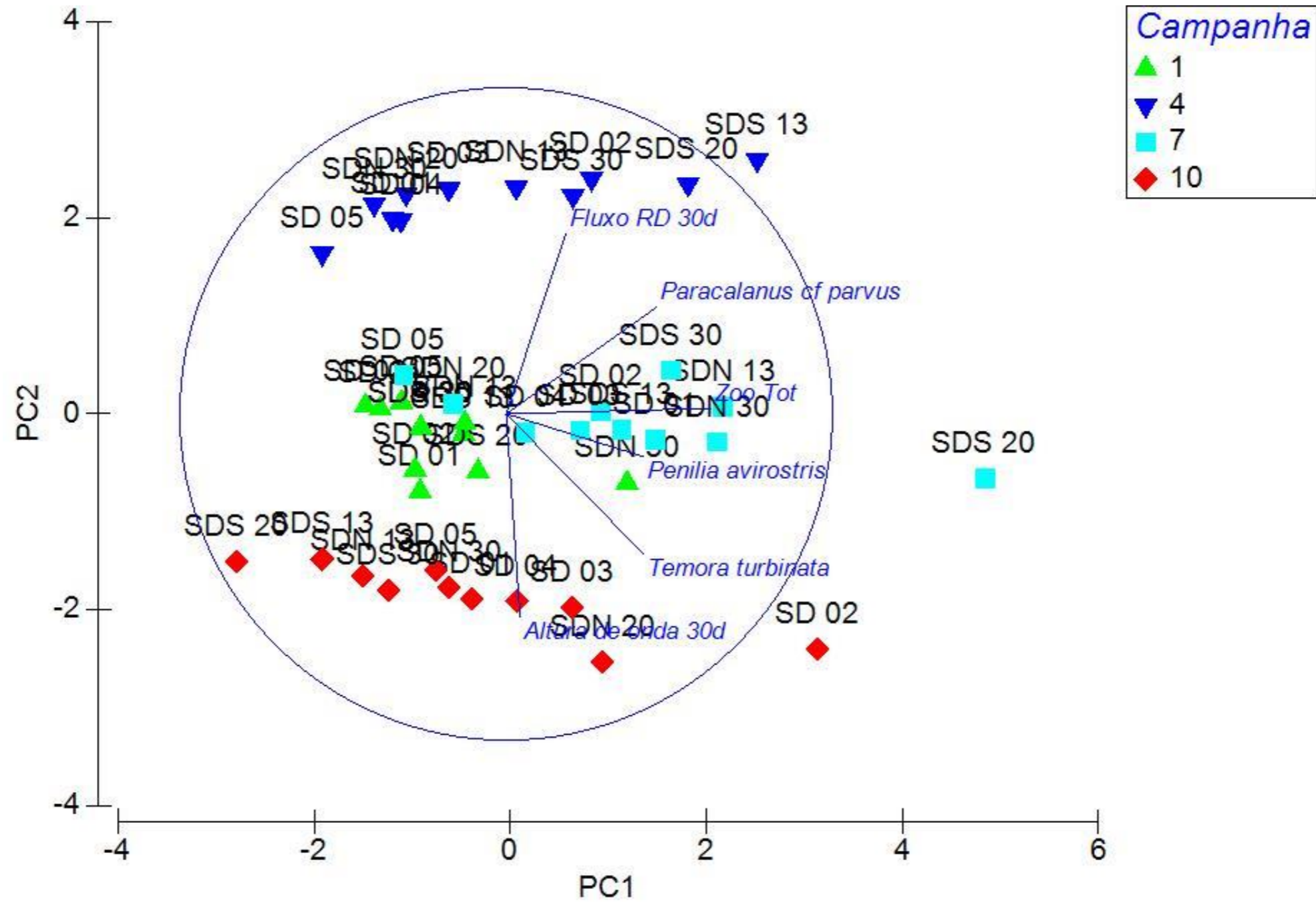
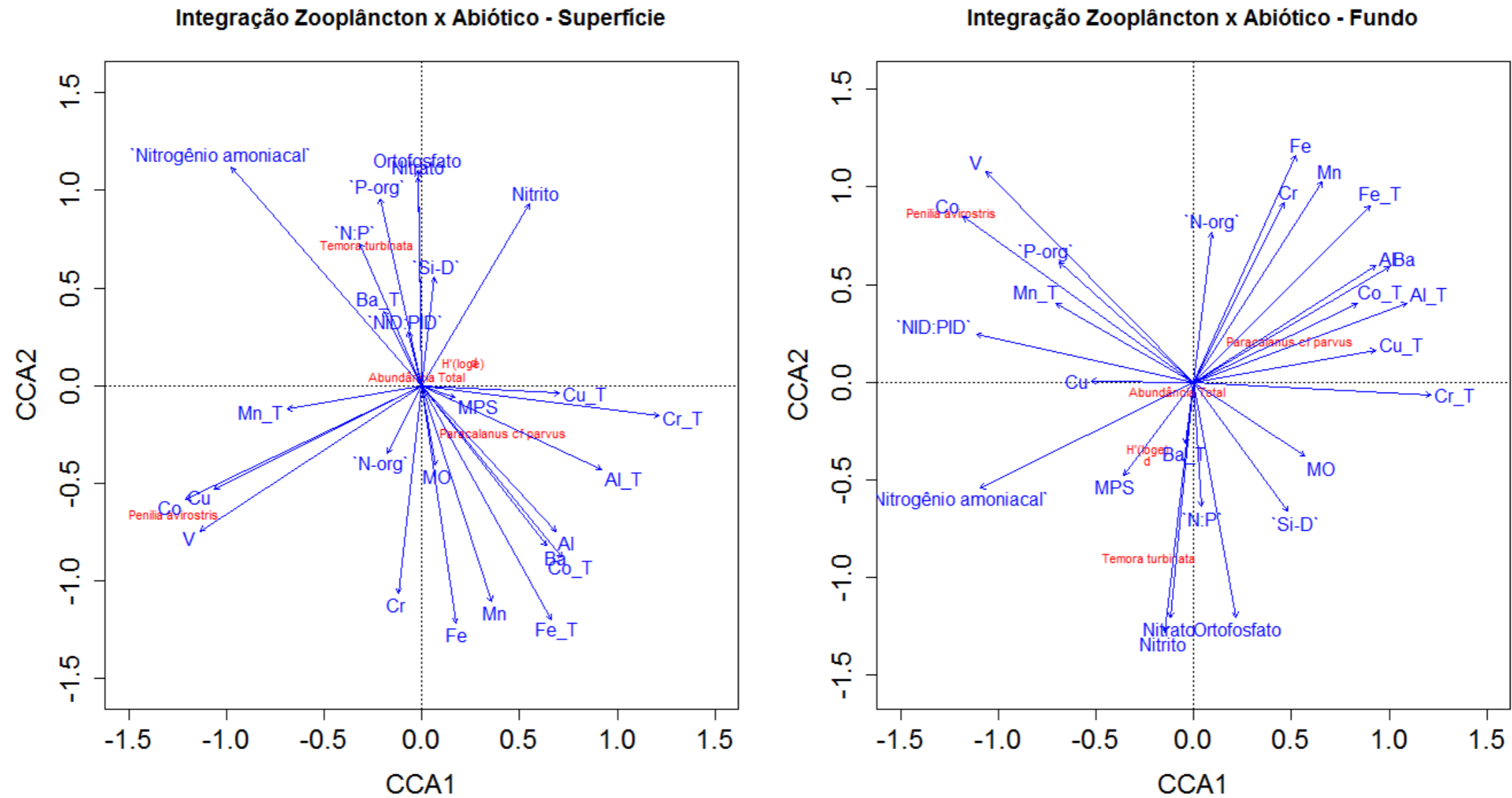


Figura 16: Diagrama de ordenação da Análise de Correspondência Canônica com base nos dados das estações do setor Foz, mostrando a relação entre as variáveis predictoras (parâmetros abióticos) e as variáveis respostas (Zooplâncton - Estrato Superfície (a) e Zooplâncton - Estrato Fundo (b)). Parâmetros abióticos: Concentração dos seguintes metais na fração dissolvida - Vanádio (V), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Bário (Ba), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Alumínio (Al), Manganês (Mn); Concentração dos seguintes metais na fração total - Cobalto (Co\_T), Cobre (Cu\_T), Bário (Ba\_T), Cromo (Cr\_T), Ferro (Fe\_T), Alumínio (Al\_T), Manganês (Mn\_T); Concentração dos seguintes nutrientes dissolvidos Nitrogênio amoniacal, Silício Reativo Dissolvido (Si-D), Ortofosfato, Nitrito, Nitrato, Nitrogênio orgânico (N-org), Fósforo orgânico (P-org); Razão N:P; Razão NID:PID; Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS), Porcentagem de Matéria Orgânica no MPS (MO). Parâmetros da comunidade Zooplantônica: Riqueza de Magalef (d), Diversidade de Shannon (H' (log<sub>e</sub>)), Abundância de Paracalanus cf parvus, Abundância de Temora turbinata, Abundância de Penilia avirostris, Abundância Total do Zooplâncton.



Embora as comunidades ictioplanctônica e bentônica tenham um maior tempo de resposta a alterações nas condições ambientais, os impactos observados para essas comunidades, entre Novembro de 2015 e 2016, continuam a ser observados na região da Foz do Rio Doce. No Setor Foz do Rio Doce, até o momento, a densidade ictioplanctônica encontrou-se baixa ( $< 100 \text{ ind.}100 \text{ m}^{-3}$ ) e larvas com trato digestório destruído continuam a serem encontradas ao longo de toda região monitorada. Além disso, foi observado um efeito negativo da concentração de metais na coluna d'água na comunidade ictioplanctônica, desde que um menor número médio de ovos foi encontrado nas campanhas com maior concentração de metais na coluna d'água (campanhas 1 e 4). Maiores densidades de larvas e ovos foram encontradas nas campanhas 7 e 10, com destaque para a campanha 10, quando as menores concentrações de metais dissolvidos foram observadas no setor Foz. A maior riqueza de larvas foi encontrada na campanha 7. Os resultados encontrados para a comunidade ictioplanctônica mostram que o padrão de desova dos adultos (Abdelouahab *et al.*, 2017; Aceves-Medina *et al.*, 2018; Oozeki, 2018), bem como o comportamento da larva no ambiente continuam sendo impactados pelas condições ambientais no Setor Foz do Rio Doce.

Entre Novembro/2018 e Setembro/2019, a comunidade bentônica permaneceu apresentando alterações na composição da comunidade, uma vez que um aumento do número de vestígios de organismos mortos recentemente e de espécies tolerantes a ambientes impactados continua a ser observado no Setor Foz do Rio Doce. Nesse setor a variação espaço-temporal das condições ambientais, com destaque para as concentrações de metais no sedimento superficial e próximo ao fundo na coluna d'água influenciaram a variabilidade espaço-temporal dos parâmetros indicadores de impacto na comunidade bentônica. No geral, o Setor Foz do Rio Doce apresentou as maiores frequências relativas de conchas vazias (RT-19I RRDM/NOV19), bem como os menores valores de diversidade e riqueza de conchas. Especialmente, o maior número de vestígios e espécies tolerantes a ambientes impactados foi encontrado nos setores Foz Central e Norte, sendo que o último tem apresentado os maiores teores de lama e metais no sedimento superficial. Além disso, uma análise temporal mostra que para esses setores, um maior número de conchas de gastrópodos e esqueleto de briozoários, bem como uma menor diversidade foram registrados na campanha 4, quando o sedimento superficial apresentou o pico de concentração de metais e sedimento coesivo. Para o setor Foz Sul, a maior frequência de vestígios foi observada nas campanhas 7 e 10.

Nos setores APA Costa das Algas, Norte, Abrolhos e Sul, os impactos do aporte da lama de rejeito e materiais associados, sobre a biodiversidade foram analisados de forma associativa em relação aos padrões observados no setor Foz do Rio Doce. Além disso, as séries temporais dos diferentes parâmetros bióticos e abióticos nesses setores não apresentam a mesma periodicidade e disponibilidade de dados pretéritos quando comparados ao setor Foz. Porém, foi possível identificar uma ampla similaridade com a Foz de processos abióticos gerando impactos bióticos nos diferentes setores, embora com magnitude diferente na maioria dos casos.

Semelhante ao setor Foz, no **setor Norte** as concentrações de nutrientes e metais na coluna d'água e sedimento foram os principais responsáveis pela variação temporal dos parâmetros indicadores dos diferentes níveis tróficos. As comunidades fito e zooplânctônicas responderam de forma positiva à diminuição da concentração de metais no ambiente. Uma maior densidade numérica do fitoplâncton foi encontrada na Campanha 10, associada a uma maior oferta de nutrientes dissolvidos e menor concentração de metais na coluna d'água. O zooplâncton apresentou maior abundância nas campanhas 4 e 10, sendo que na campanha 4 (maior concentração de metais na coluna d'água) foi observada a menor riqueza e na campanha 10 (menor concentração de metais na coluna d'água) uma alta riqueza. Durante essa campanha também foi encontrada o maior valor de biomassa em termos de clorofila-a juntamente com baixas concentrações de feopigmentos, o que resultou em maiores valores de clorofila ativa. O efeito de menores concentrações de metais na coluna d'água, na campanha 10, também foram refletidos na composição do fitoplâncton, desde que uma menor contribuição de espécies oportunistas, como as cianobactérias, foi observada. Ademais, nessa campanha foi registrada uma maior diversidade, com uma maior contribuição de grupos sensíveis a alterações das condições ambientais, como as Haptófitas. O impacto da maior concentração de metais na coluna d'água na campanha 4 foi refletido no baixo valor de clorofila ativa, associado a um domínio de espécies nanoplânctônicas oportunistas e cosmopolitas.

Ainda no setor Norte, o ictioplâncton e o bentos também apresentaram respostas às condições ambientais semelhantes às observadas no setor Foz do Rio Doce. A comunidade ictioplanctônica apresentou maiores densidades de larvas e ovos sendo encontradas nas campanhas 7 e 10 (menor concentração de metais na coluna d'água), em relação às campanhas 1 e 4 (maior concentração de metais na coluna d'água). Nesse setor, larvas com trato digestório destruído foram encontradas na Campanha 1. A comunidade bentônica apresentou maiores valores de vestígios na campanha 4, quando alguns metais, como Fe, Al e Zn, apresentaram as maiores concentrações médias no sedimento superficial.

No **setor APA Costa das Algas**, as maiores concentrações de metais foram observadas na campanha 4 e menores concentrações nas campanhas 1 e 10, sendo que a última também apresentou um aumento da concentração de nutrientes. Associadas a essas condições ambientais, na campanha 10 foi observada uma maior densidade numérica fitoplanctônica, com maiores valores de clorofila ativa e uma menor contribuição de espécies oportunistas nanoplânctônicas. Em relação ao zooplâncton, nesse setor a maior abundância foi encontrada na campanha 4, entretanto associada a baixos valores de riqueza e diversidade. Menor abundância zooplânctônica foi encontrada na campanha 10, associada a uma maior riqueza e diversidade. Em relação aos impactos da comunidade ictioplanctônica, larvas com trato digestório destruído foram encontradas no setor **APA Costa das Algas** nas campanhas 1, 4 e 7. Já nas campanhas 7 e 10 foram observados os maiores valores de densidade de larvas e ovos.

Em relação aos **setores Abrolhos e Sul**, a análise dos impactos na biodiversidade deve ser realizada com maior atenção. Além da maior distância da foz do Rio Doce em comparação aos setores

adjacentes à Foz, nessas áreas existem outras fontes importantes de nutrientes e metais que podem influenciar na variação espaço-temporal dos aspectos quali-quantitativos investigados.

Especialmente para o setor Abrolhos, as campanhas 1 e 7 apresentaram características abióticas únicas durante o primeiro ano de PMBA. Anteriormente à Campanha 1 no setor Abrolhos (entre 07 e 10/12/2018), no litoral sul da Bahia expressivos acumulados de chuva foram registrados em decorrência da atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul. Entre 01 e 10/12/2018, as estações Pluviométricas nas proximidades da foz do Rio Caravelas registram acumulados de chuva entre 157 mm e 284 mm. Já a campanha 7 foi realizada após a atuação da Tempestade Tropical Iba no litoral dos estados da BA, do ES e do RJ. Segundo informações do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e em colaboração com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), entre os dias 23 e 28 de Março de 2019, um ciclone tropical atuou entre o litoral sul da BA e o litoral norte do RJ. Inicialmente classificado como Depressão Tropical Iba (dia 23/03), o sistema foi reclassificado na manhã do dia 24/03 como Tempestade Tropical Iba e enfraqueceu na manhã do dia 28/03, quando o ciclone passou a ser considerado como um centro de baixa pressão. O sistema que apresentou deslocamento de sul/sudoeste e depois sul/sudeste, teve a trajetória iniciada em aproximadamente 18°S/37°W e finalizada em aproximadamente 23°S/33°W.

A atuação da Tempestade Tropical Iba, bem como a convergência dos ventos em baixos níveis atmosféricos nos dias que antecederam a formação da tempestade, resultaram em acumulados de chuva expressivos para o litoral sul da BA. Dados do Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA) do estado da BA mostram que entre 20 e 26/03/2019, as estações Pluviométricas nas proximidades da foz do Rio Caravelas registraram acumulados de chuva entre 121.4 mm e 187.2 mm. Segundo o INMET, o Acumulado Médio Climatológico para Março, para o litoral sul da BA está entre 150 e 175 mm.

No setor Abrolhos, a campanha 1 apresentou os maiores valores de metais no sedimento, se comparado à campanha 7. Os valores elevados de concentração de metal no sedimento ocorreram em conjunto maior número de conchas de gastrópodos e valva de bivalvia. Já na campanha 7, a matriz água apresentou as maiores concentrações de metais e nutrientes para o setor. Nesse período, a comunidade fitoplânctônica apresentou os maiores valores de densidade numérica e maiores concentração de feopigmentos. Esse resultado indicou um elevado grau de senescência da comunidade fitoplânctônica e diminuição da saúde fisiológica. O impacto de fatores abióticos associados ao Iba no setor Abrolhos não se restringiu ao fitoplâncton. Durante a campanha 7, foram verificadas maiores abundâncias das comunidades zooplânctônicas, ictioplânctônicas e de bactérias heterotróficas na região. No entanto, foram verificados os menores valores dos índices ecológicos da comunidade zooplânctônica no mesmo período.

Alguns grupos de pesquisadores reconhecem a disponibilidade de nutrientes como sendo o principal fator regulador do crescimento das algas da comunidade fitoplânctônica (efeito “bottom-up”). Outros

grupos de pesquisa apostam no controle dos pastadores (herbivoria) ao invés dos nutrientes como principal fator regulador (efeito “top-down”), e há também grupos que associam os blooms algais com a abundância de vírus e ainda associando a produção de toxinas como responsável pelos blooms (Bairagi et al., 2008). Dessa forma, o comportamento da comunidade fitoplanctônica na campanha 7, sugere uma forte influência da maior abundância das comunidades zooplanctônicas e ictioplanctônicas sobre a densidade numérica dos organismos autotróficos.

Para o setor Sul, os fatores abióticos no sedimento não mostraram um padrão claro de variabilidade, com diferentes metais apresentando maiores e menores valores nas diferentes campanhas realizadas na região. No entanto, para a matriz água foi possível perceber um aumento relativo de metais dissolvidos nas campanhas 4 e 7, quando o zooplâncton apresentou uma maior abundância, porém acompanhada de baixos valores de riqueza e diversidade. O fitoplâncton apresentou menores densidades durante a campanha 4, e durante a campanha 7 foram registrados os maiores valores de feopigmentos na região, resultado da senescência dos organismos. Semelhante ao que ocorreu em Abrolhos após o Iba, a campanha 7 no setor Sul registrou os maiores números de vestígios de organismos e uma maior ocorrência de grupos de organismos tolerantes (poliquetas e crustáceos) a mudanças ambientais.

Em uma análise integrada e comparativa dos impactos nos diferentes setores, é possível sugerir a dispersão desigual do aporte fluvial ao longo da plataforma continental explique parte das diferenças de impactos bióticos entre os diferentes setores. As evidências sedimentológicas e geoquímicas apontaram para uma dispersão preferencial para norte próximo ao fundo do material particulado e dissolvido aportado pelo Rio Doce. Com isso, os efeitos dessa dispersão para norte criam uma resposta biológica de curto e médio prazo. Embora os diferentes níveis tróficos possuam tempos de resposta diferentes a mudanças nos estressores ambientais, uma evidência destacada dessa regionalização dos impactos foi o maior número de vestígios de organismos bentônicos ocorrendo simultaneamente às maiores concentrações de metais no sedimento (campanha 4).

De uma maneira geral, ainda há muito a ser entendido sobre o que está acontecendo e como os ecossistemas irão se adaptar a essas novas condições, e se é possível separar a variabilidade natural do ecossistema dos impactos gerados pelo rompimento da barragem. O quadro abaixo (Quadro 1), tem como objetivo mostrar de forma objetiva e prática as principais alterações ambientais e /ou impactos observados no marinho integrado e o critério comparativo para se chegar a essa conclusão. Aqui se considerou o indicador como o objeto da análise e os critérios foram seguidos da seguinte forma:

- (A) Em referência a dados pretéritos pré-rompimento;
- (B) Em referência a dados pretéritos pós-rompimento da barragem no âmbito da RRDM (dados anteriores ao PMBA);
- (C) Análise espacial dos resultados entre pontos amostrais impactados e não impactados;



- (D) Correlação direta com a presença dos metais característicos do rejeito, como Fe e Mn;
- (E) Em referência a dados disponíveis na literatura científica;
- (F) A partir da legislação vigente.

Quadro 1: Quadro síntese dos impactos abiótico e biótico encontrados no ambiente marinho (Anexo 3 – Marinho Integrado)

Meio	Indicador	Alteração do ambiente/ Impacto (Grau)	Critério	Local
Abiótico	<i>Sedimento</i> Densidade superficial de fundo	Diminuição da densidade superficial de fundo (1)	A e B	FOZ
	Mineralogia	Aumento do volume das fases minerais de Fe e dos teores de FeOT (1)	A e B	NORTE, FOZ, APA
	<i>Hidrogeoquímico</i> Metais	Contaminação por metais do depósito sedimentar e da água (1)	A e B	ABR, NORTE, FOZ, APA
	Orgânico	Aumento nas concentrações de compostos nitrogenados totais, hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos	A, B e E	ABR, NORTE, FOZ e APA/RVS
	Nutrientes	Aumento da concentração de nutrientes	A e B	FOZ
Biótico	<i>Fitoplâncton</i>	Aumento na abundância de organismos (3)	A e B	NORTE, FOZ, APA
		Diminuição da diversidade da comunidade (3)	A e B	NORTE, FOZ, APA
		Alterações na saúde fisiológica da comunidade (3)	A e B	NORTE, FOZ, APA
	<i>Zooplâncton</i>	Diminuição da abundância de organismos (3)	B e E	NORTE, FOZ, APA e SUL
Diminuição da diversidade, equitabilidade e riqueza da comunidade (3) Ausência de espécies sensíveis e dominância das tolerantes, durante maiores vazões		B, C e E C	NORTE, FOZ, APA e SUL FOZ	
<i>Bentos consolidado</i>	Aumento da mortalidade (vestígios) de organismos (3)	A e B	ABR, NORTE, FOZ, APA e SUL	
	Aumento na abundância de poliquetas característicos de ambientes poluídos (3)	A e B	ABR, NORTE, FOZ, APA e SUL	
	Aumento na abundância de crustáceos amphipodas característicos de ambientes poluídos (3)	A e B	NORTE, FOZ, APA	
Ictioplâncton	Larvas de peixe com o trato digestivo destruído (2)	A e B	NORTE, FOZ, APA, SUL	

## 2 RESUMO DO ANEXO

Este Anexo tem como objetivo principal avaliar e monitorar de forma integrada as condições do ambiente marinho após o aporte de lama de rejeito, tanto do ponto de vista abiótico quanto biótico. Assim, o objetivo do monitoramento é o entendimento de variações sazonais dos diversos parâmetros medidos, o estudo da dinâmica e dispersão da pluma fluvial, suas características físicas e químicas, sua influência na biodiversidade do plâncton, além da caracterização do depósito oriundo do rompimento da barragem formado no ambiente marinho e seus impactos na biodiversidade bentônica.

Ao longo do primeiro ano de PMBA a vazão média diária até julho de 2019 permaneceu sob condição seca em aproximadamente 40% do período. A Campanha 4 (Jan/2019) foi realizada após o maior pico de vazão (2562 m<sup>3</sup>/s em 1 de janeiro de 2019), sendo que no período de outono e inverno a vazão fluvial mostra uma tendência de diminuição e a energia das ondas de aumento. Em média, os ventos mais frequentes na região são dos quadrantes N-NE durante a primavera, verão e inverno e no outono, a entrada recorrente de frentes frias cria uma frequência de ventos de S-SE. A presença da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), sobre a plataforma continental e eventual afloramento sobre a plataforma interna e média cria uma estratificação vertical e horizontal que influencia a circulação regional e a dispersão do aporte fluvial. Nesses momentos, as correntes na região são preferencialmente paralelas às linhas batimétricas e direcionam para sul o material particulado em suspensão (MPS). Valores de MPS superiores a 1000 mg/L foram registrados próximo à foz (SD01) durante a Campanha 4. Picos de MPS semelhantes foram registrados somente em novembro de 2015, isso demonstra que eventos hidrológicos são extremamente importantes aportando material em grande quantidade, mesmo após mais de 3 anos do rompimento da barragem.

A partir da Campanha 7, quando a maior energia das ondas prevaleceu na região, também se observa um aumento dos valores medianos de MPS principalmente nos sub-setores Foz Norte e Foz Central evidenciando o transporte para o norte da foz durante esses eventos. Junto a isso ocorre um expressivo aumento da concentração de diversos metais no sedimento de fundo e na coluna d'água, especialmente nos sub-setores da Foz do Rio Doce. As concentrações nas frações dissolvida e total apresentaram um aumento a partir da Campanha 4 para a maioria dos elementos analisados no setor Foz, como por ex. Fe (~400 µg/L) e Al (~250 µg/L) dissolvidos estando na mesma faixa de concentração ou maiores que as medições realizadas logo após a chegada dos rejeitos à foz do Rio Doce. Tal influência também pode ser verificada nos setores Norte e APA/RVS (estações mais rasas). É importante destacar que outros parâmetros como, por exemplo nutrientes e amins, não apresentam aumento nas concentrações na campanha 4 durante a maior vazão fluvial. Também expressivos crescimentos dos valores de metais no sedimento superficial, do Setor Foz, foram observados com concentrações medianas de Fe passando de aproximadamente 30000 mg/kg no Setor Foz Central na campanha 3 para cerca de 110000 mg/kg na campanha 4, com os setores Foz Sul e Norte com valores superiores a 140000 mg/kg. Nos meses seguintes a campanha 4 houve uma progressiva diminuição.

As matrizes água e sedimento mostraram um comportamento inverso na evolução temporal de concentrações de metais. Esse comportamento inverso reflete principalmente a capacidade da energia das ondas na mobilização do fundo e na disponibilização de materiais dissolvidos e particulados para a coluna d'água. Mesmo comportamento também foi observado para nutrientes e aminas totais, indicando que os sedimentos marinhos ainda atuam como fonte para estes parâmetros. Os eventos de maior energia na plataforma continental influenciaram na diminuição dos valores de densidade superficial encontrados para fundos com lama fluida. Em todo o Setor Foz (Central, Norte e Sul) foi possível observar a presença de lama fluida. Esse material pode ser facilmente remobilizado na plataforma continental durante eventos de alta energia.

A partir da Campanha 10 houve uma mudança na qualidade da água e do sedimento nos Setores Foz, APA/RVS e Norte. As concentrações de metais dissolvidos na coluna d'água diminuíram significativamente (valores menores que 50 µg/L no setor Foz), enquanto no sedimento a tendência de diminuição persistiu. Mesmo assim, podemos verificar que as concentrações de metais no MPS na água de fundo são maiores no setor Norte, principalmente na região de Barra Nova, coincidindo com a alteração no sentido das correntes associadas a passagem de sistemas frontais.

As médias de concentração de nitrato na coluna d'água variaram entre 0 e 5 µmol/L, com valores máximos superiores a 20 µmol/L na campanha 5. Um comportamento semelhante foi observado para o nitrito e para o n-amoniaco. As análises de nitrogênio amoniacal nas amostras de água mostraram que as concentrações médias encontradas neste monitoramento estão acima das reportadas previamente ao desastre (0,47 µmol/L) e próximas ou mais altas que as medições logo após o rompimento da barragem (0,98 µmol/L), com valores superiores a 8,5 µmol/L (SDN30 na campanha 7), após a passagem da tempestade tropical Iba na região de estudo. As concentrações elevadas de amônia na água, especialmente para os setores Foz Central e Norte, apontam para um desequilíbrio na região.

Tendências de transporte preferencial para norte foram observadas ao longo do monitoramento nos teores de  $FeO_{total}$  no MPS, na distribuição granulométrica do sedimento superficial e na hidrogeoquímica do sedimento de fundo. Além dessas evidências diretas, a presença de formas de fundo erosivas do tipo *furrows*, e análises das elipses de maré na região a partir de fundeios virtuais mostram uma direção semelhante.

Na comparação entre os valores médios de concentração de diferentes elementos nos setores da Foz, o sub-setor Foz Norte se destaca como a área de maiores valores dos elementos ferro, níquel, cromo, chumbo, cobre, zinco, manganês e alumínio, com progressivo aumento de suas concentrações, e apresentando ainda picos máximos nos pontos mais rasos do setor norte (SDN13). Esses resultados sugerem que o sub-setor Foz Norte não é somente a área preferencial de transporte dos materiais como é uma área de acumulação dos metais no sedimento de fundo. Nota-se um incremento nas concentrações de alumínio na Foz Norte de até 8 vezes em relação a dados pretéritos ao desastre e nas campanhas atuais do PMBA concentrações similares ou superiores no setor Norte, principalmente

em Degredo e Barra Nova. Foram utilizados **dois critérios** complementares que indicaram **sinais do rejeito** em diferentes áreas: **Critério Mineralógico: Aumento de volumes totais de fases minerais de ferro** (hematita, magnetita, grenalita-T, magmita e goethita), **aumento da susceptibilidade magnética** dessas fases minerais e **aumento dos teores de óxido de ferro ( $\text{FeO}_{\text{total}}$ ) no sedimento de fundo em comparação aos dados pretéritos**; **Critério Geoquímico: é baseado nas concentrações dos seguintes metais: Ni, Cu, Pb, Cr, Fe, Al, Mn, Zn.** O mapeamento de sinais da presença de rejeito no sedimento marinho mostra claramente a presença de indícios em praticamente toda a área monitorada, desde a APA Costa das Algas e Revis de Santa Cruz, passando por todo o setor da Foz do Rio Doce e chegando ao Setor Norte. Outro indicador que se mostrou positivo em termos de identificação da presença do rejeito no sedimento de fundo marinho foi Elementos Terras Raras (ETRs). O mapeamento mostrou que a fase aguda de deterioração da qualidade da água e sedimento no ambiente marinho continua ocorrendo, praticamente 4 anos após o rompimento da barragem com concentrações de Fe superiores a valores crônicos, tanto para a água como para o sedimento. Valores acima do valor orientador como agudo pela NOAA ou pela CONAMA 357/05 para água salina, só foram observados nos locais onde a aplicação dos critérios geoquímicos e mineralógicos, além da melhor definição da assinatura geoquímica de ETRs, indicaram a presença do sinal do rejeito de mineração. Quando se considera como referência, valores medidos na região anteriores ao rompimento da barragem, as concentrações de ferro ainda se encontram até 4 vezes superiores. Outros elementos, como por exemplo o alumínio, apresentam enriquecimento ainda maior, de 8 vezes.

Do ponto de vista biótico, os resultados integrados para o primeiro ano de PMBA mostraram uma repetição e continuidade dos principais impactos observados durante o período pré-PMBA. No entanto, **as observações sistemáticas e periódicas realizadas no âmbito do PMBA permitiram um avanço significativo no entendimento da influência de processos abióticos nos impactos bióticos nos diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar marinha.**

A comunidade fitoplanctônica ao longo do primeiro ano do PMBA comprovou a hipótese de que a comunidade tem estado sob a influência de constantes distúrbios intermediários, os quais têm impossibilitado que a comunidade se recupere. A densidade numérica do fitoplâncton continuou apresentando valores acima dos encontrados em levantamentos prévios à Novembro/2015, apesar de ter apresentado flutuações ao longo do monitoramento. Flutuações espaço-temporais também foram observadas nos parâmetros que avaliam a saúde fisiológica do fitoplâncton, de forma que uma pior saúde fisiológica foi observada sob condições de maior concentração de metais na coluna d'água. No geral, apesar das variações temporais na composição, o setor Foz Norte apresentou os menores valores médios de clorofila ativa. Para os três setores, os menores valores de clorofila ativa foram encontrados próximo ao fundo, em resposta às maiores concentrações de metais nas frações particulada e total próximas ao fundo. A composição da comunidade fitoplanctônica também mostrou variação espaço-temporal fortemente associada às variações nas condições ambientais. Em relação a

composição do fitoplâncton, ainda é observada a dominância de cianobactérias e algas verdes oportunistas nas campanhas caracterizadas por elevadas concentrações de metais na água.

Assim como para a comunidade fitoplanctônica, a estrutura da comunidade zooplanctônica permanece alterada. A comunidade está sendo regulada, principalmente, pelas condições ambientais que continuam sendo influenciadas pelo aporte do material oriundo do Rio Doce com presença de rejeito. Apresentou menores índices de diversidade e riqueza na campanha 4, caracterizada por uma elevada concentração de metais dissolvidos na coluna d'água (principalmente no setor Foz) e, também foi observada uma redução expressiva na abundância da espécie *Penilia avirostris*, (sensível a impactos antrópicos). Já as duas espécies com maior contribuição dentro da comunidade zooplanctônica, *Paracalanus cf parvus* e *Temora turbinata*, são conhecidas por serem indicadoras de condições estressantes.

Para a comunidade ictioplanctônica, no Setor Foz do Rio Doce, a densidade encontrou-se baixa (< 100 ind.100 m<sup>-3</sup>) e larvas com trato digestório destruído continuam a serem encontradas ao longo de toda região monitorada, sendo observado um efeito negativo da concentração de metais na coluna d'água com um menor número médio de ovos foi encontrado nas campanhas com maior concentração de metais na coluna d'água (campanhas 1 e 4).

Neste ano, a comunidade bentônica permaneceu apresentando alterações na composição da comunidade, uma vez que um aumento do número de vestígios de organismos mortos recentemente e de espécies tolerantes a ambientes impactados continua a ser observado no Setor Foz do Rio Doce. Apresentou ainda um aumento na abundância de poliquetas e crustáceos amphipodas, característicos de ambientes poluídos principalmente nos setores Foz, Norte e APA.

De uma maneira geral, ainda há muito a ser entendido sobre o que está acontecendo e como os ecossistemas irão se adaptar a essas novas condições, e se é possível separar a variabilidade natural do ecossistema dos impactos gerados pelo rompimento da barragem.

### 3 REFERÊNCIAS

Abdelouahab, H.; Berrahao, A.; Baibai, T.; Agouzouk, A.; Makaoui, A.; Errhif, A., 2017. Autumn larval fish assemblages in the northwest African Atlantic coastal zone. Chinese Journal of Oceanology and Limnology 35(3): 515-527.

Aceves-Medina, G.; Jiménez-Rosenberg, S.P.A.; Saldierna-Martínez, R.J.; Durazo, R.; Hinojosa-Medina, A.T.; Hernández-Rivas, M.E.; González-Rodríguez, E.; Gaxiola-Castro, G., 2018. Distribution and abundance of the ichthyoplankton assemblages and its relationships with the geostrophic flow along the southern region of the California Current. Latin American Journal of Aquatic Research 46(1): 104-119.

Authman, M.M.N.; Zaki, M.S., Khallaf E.A.; Abbas, H.H., 2015. Use of Fish as Bio-indicator of the Effects of Heavy Metals Pollution. *Journal of Aquaculture Research and Development*. 6: 328.

Bastos, A. C., et al., 2017. Monitoramento da influência da pluma do Rio Doce após o rompimento da barragem de rejeitos de Mariana/MG - Novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados, Departamento De Oceanografia, Centro De Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo.

Baumann, K.-H.; Andrulleit, H.; Bockel, B .; Geisen, M.; Kinkel, H. 2005. The significance of extant coccolithophores as indicators of ocean water masses, surface water temperature, and paleoproductivity: a review. - *Paliiontologische Zeitschrift*. v.79, n. 1, p.93-11.

Belderson, R. H.; Johnson, M. A.; Kenyon, N. H., 1982. Bedforms. In: Stride AH (ed) *Offshore tidal sands: processes and deposits*. Chapman & Hall, London.

Cagnin, R.C.; Quaresma, V.S.; Chaillou, G.; Franco, T.; Bastos, A.C., 2017. Arsenic enrichment in sediment on the eastern continental shelf of Brazil. *Science of The Total Environment*, 607 - 608, 304-316.

CONAMA Nº 357/2005 - "Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.". - Data da Legislação: 17/03/2005 - Publicação DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63.

Davis, R. A. Jr; Dalrymple, R.W., 2012. *Principles of Tidal Sedimentology*, DOI 10.1007/978-94-007-0123-6\_13, Springer Scienc - Business Media B.V. 20.

Figueiredo, J. A.; Costa, E. S.; Milán, E.; Barroso, G. F.; Neto, R. R. Nutrientes Limitantes e as Relações Orgânicas e Inorgânicas Entre o Fósforo, Nitrogênio e Silício no Sistema Pelágico da Bacia do Espírito Santo e Porção Norte da Bacia de Campos – ES, Brasil. *Geochimica Brasiliensis*, vol. 30 (2), pag. 95 - 111, 2016.

Gomes, L.E.O.; Correa, L.B.; Sá, F.; Neto, R.R.; Bernardino, A.F., 2017. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 120, no. 1-2, pp. 28-36.

Hans, R. T.; Young, J. R., 2004. *Coccolithophores From Molecular Processes to Global Impact*. Spring.

Hodgkiss, I. J.; Ho, K. C. Are changes in N:P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms? *Hydrobiologia* 352: 141-147, 1997.

Kaiser, M.J.; Attrill, M.J.; Jennings, S.; Thomas, D.N.; Barnes, D.K.A.; Brierley, A.S.; Polonin, N.V.C.; Reffaelli, D.G.; Williams, P.J.B. *Marine Ecology: Processes, Systems and Impacts*. Oxford: Oxford University Press, 2005.

Levington, J. S. *Marine Biology: Function, Biodiversity, Ecology*. Oxford: Oxford University Press, 1995.

Mehta, A.J., 2013. *An Introduction to Hydraulics of Fine Sediment Transport*. World Scientific, New Jersey.

NOAA/Screening Quick Reference Tables (SQuiRTs) – Disponível em: <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/9327>

Nogueira, I. C. M.: *Caracterização do clima de ondas na bacia do Espírito Santo através de modelagem numérica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2014.

Oliveira, K. S. S., Quaresma, V. S. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 78, pag. 101-115, 2017.

Oozeki y. *Biological Monitoring: Fish Eggs, Fish Larvae, and Zooplankton*. In: Aoki I., Yamakawa T., Takasuka A. (Eds) *Fish Population Dynamics, Monitoring, and Management*. Fisheries Science Series. Springer, Tokyo. 2018.

Pearl, H. W., 2000. Marine plankton. In: WHITTON, B. A.; POTTS, M. (Ed.). *The Ecology of Cyanobacteria: Their Diversity in Time and Space*. Dordrecht: KluwerAcademicPublishers. p. 121-148.

Pereira, A. A.; Van Hattum, B.; Brouwer, A.; van Bodegom, P. M.; Rezende, C. E.; Salomons, W., 2008. Effects of iron-ore mining and processing on metal bioavailability in a tropical coastal lagoon. *J Soil Sediment* 8, 239–252.

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)*.

Quaresma, V.S.; Catabriga, G.M.; Bourguignon, S.C.; Godinho, E.; Bastos, A. C., 2015. Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. *Brazilian Journal of Geology*, 45, 635-644.

Reynolds, C. *Ecology of Phytoplankton*. Cambridge: Cambridge University, 2006. Kaiser, M.J.; Attrill, M.J.; Jennings, S.; Thomas, D.N.; Barnes, D.K.A.; Brierley, A.S.; Polonin, N.V.C.; Reffaelli, D.G.; Williams, P.J.B. *Marine Ecology: Processes, Systems and Impacts*. Oxford: Oxford University Press.

Schulz, K. G.; Zondervan, I.; Gerringa L. J. A.; Timmermans, K. R.; Veldhuis, M. J. W.; Riebesell, 2004. Effect of trace metal availability on coccolithophorid calcification. *Nature*, v. 430.



Souza, C. S. De; Luz, J. A. G. Da; Macedo, S.; Montes, M. J. F.; Mafalda Jr, P. Chlorophyll a and nutrient distribution around seamounts and islands of the tropical South-western Atlantic. *Marine and Freshwater Research*, vol. 64, pag. 168-184, 2013.

Vieira, F. V.; Bastos, A. , Quaresma, V.; Leite, M. D.; Costa Jr, A.; Oliveira, K. S.; Dalvi, C.; Moura, R.; Bahia, R.; Holz, V.; Amado-Filho, G., 2019. Along-Shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research*.

Vinzon, S.B., Winterwerp, J.C., Nogueira, R., de Boer, G.J., 2009. Mud deposit formation on the open coast of the larger Patos Lagoon–Cassino Beach system. *Continental Shelf Research* 29, 572-588.

Winterwerp, J.C., 1999. On the dynamics of high-concentrated mud suspensions, *Civil Engineering and Geosciences*. Delft University of Technology, p. 204.

Winterwerp, J.C., 2002. On the flocculation and settling velocity of estuarine mud. *Continental Shelf Research* 22 22.

Winterwerp, J.C.; Van Kesteren, W. G. M., 2004. *Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment*. Developments in Sedimentology Series no. 56. xiii + 466 pp. Amsterdam: Elsevier.