

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

**RELATÓRIO ANUAL:**

**Integração a partir dos índices ecotoxicológicos**

**RT-28 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

1	INTRODUÇÃO GERAL .....	7
2	DISCUSSÃO .....	10
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	21

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Análise de Componentes Principais (PCA) considerando-se os dados de bioacumulação de metais e o índice de estresse (IBR biomarcador) nos organismos dulcícolas. ....	14
Figura 2: Análise de Componentes Principais (PCA) considerando-se os dados de bioacumulação de metais e o índice de estresse (IBR biomarcador) nos organismos marinhos. ....	14
Figura 3: Classificação ecotoxicológica das amostras de água e sedimento coletadas nos pontos dulcícolas (BRG e RDF) e marinhos (FRD1, FRD6, CA1 E CA2) durante a Campanha 1 (setembro-outubro/2018) e a Campanha 2 (janeiro-fevereiro/2019).....	15
Figura 4: Análise de Componentes Principais (PCA) considerando-se os dados de bioacumulação de metais e o índice de estresse (IBR biomarcador) nos organismos do ambiente costeiro.....	16
Figura 5: Análise de Componentes Principais (PCA) considerando-se os dados de bioacumulação de metais nas aves coletadas no ambiente costeiro. ....	18

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de IBR de bioacumulação de metais e de IBR de respostas de biomarcadores para os organismos coletados no monitoramento dulcícola. ....	10
Tabela 2: Valores de IBR de bioacumulação de metais e de IBR de respostas de biomarcadores para os organismos coletados no monitoramento marinho. ....	11
Tabela 3: Valores de IBR bioacumulação calculados a partir dos dados de metais determinados no plâncton, camarões e peixes coletados nos monitoramentos dulcícola e marinho, bem como nos corais (corais e hidrocorais) coletados no monitoramento marinho, durante a campanha 1 (setembro-outubro/2018), a campanha 2 (janeiro-fevereiro/2019) e no período pré-rompimento da barragem de Fundão (IBR bioacumulação pretérita). Os valores em vermelho indicam aumento no valor do IBR bioacumulação, em relação ao respectivo valor do IBR bioacumulação pretérita. * Não se aplica. ....	12
Tabela 4: Valores de IBR bioacumulação e de IBR biomarcador para os organismos coletados e analisados no âmbito do monitoramento costeiro.....	16
Tabela 5: Valores de IBR bioacumulação para as aves aquáticas coletadas e analisadas no âmbito do monitoramento costeiro.....	17

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Identificação dos setores utilizados para a análise integrada dos dados ecotoxicológicos. . 8

Quadro 2: Síntese dos resultados integrados de bioacumulação (IBR bioacumulação), efeitos biológicos (IBR biomarcador) e toxicidade das amostras ambientais (Índice de Toxicidade) nos diferentes grupos de organismos dos ambientes dulcícola, marinho e costeiro. Os organismos coloridos em laranja ou azul representam os maiores valores de IBR ou de toxicidade para a campanha 1 (setembro-outubro/2018) e campanha 2 (janeiro-fevereiro/2019), respectivamente, para cada ambiente monitorado..... 20

## **ANÁLISE INTEGRADA – ECOTOXICOLOGIA**

### **1 INTRODUÇÃO GERAL**

As amostras ambientais e biológicas coletadas durante as expedições em campo realizadas no escopo do Anexo 1 nas diferentes estações amostrais dos ambientes dulcícola (porção capixaba do Rio Doce, lagos e lagoas), costeiro (manguezais e praias) e marinho foram analisadas quanto à toxicidade da água e do sedimento, bioacumulação de metais e biomarcadores em organismos de diferentes níveis da cadeia trófica. Adicionalmente, foi analisada a comunidade microbiana na água, sedimento e corais. Porém, os resultados obtidos nesta avaliação foram incorporados na análise integrada da "biodiversidade", pelo fato de terem sido determinados parâmetros ecológicos da comunidade microbiana. Todas as coletas e análises das amostras foram realizadas conforme descrito no Plano de Trabalho do Anexo 1.

As análises realizadas visaram à avaliação da exposição dos organismos aos metais presentes na água e no sedimento, bem como dos efeitos decorrentes da bioacumulação destes contaminantes. Para analisar o conjunto dos resultados ecotoxicológicos obtidos, bem como subsidiar a discussão integrada dos resultados gerados pelos demais anexos do PMBA, os indicadores ecotoxicológicos selecionados foram os seguintes: bioacumulação de metais, respostas de biomarcadores e testes de toxicidade. Os dados de bioacumulação dos metais analisados foram utilizados para o cálculo de um índice da contaminação da biota. Por sua vez, os dados dos biomarcadores analisados foram utilizados para o cálculo de um índice da resposta biológica a essa contaminação. Em ambos os casos, foi utilizado o índice de Respostas Integradas de Biomarcadores (IBR), que sintetiza as respostas dos parâmetros biológicos e demais variáveis analisadas, em uma única e simples medida.

Abordagens ecotoxicológicas integradas têm sido propostas como ferramentas úteis na avaliação do impacto de contaminantes ambientais na saúde dos organismos (Potet et al., 2016). O IBR, proposto por Beliaeff e Burgeot (2002) e revisado e modificado por Devin et al. (2014), fornece uma síntese gráfica das respostas dos parâmetros e variáveis analisadas, bem como um valor numérico que integra simultaneamente todas essas respostas, facilitando assim a visualização e interpretação das alterações observadas. Portanto, o IBR pode oferecer uma interpretação mais holística das respostas biológicas de organismos expostos a uma complexa mistura de poluentes com diferentes concentrações de exposição nos ecossistemas aquáticos (Devin et al., 2014). Portanto, os dados de bioacumulação de metais e dos biomarcadores analisados nos organismos coletados nos ambientes dulcícola, costeiro e marinho, durante a campanha 1 (setembro-outubro/2018) e a campanha 2 (janeiro-fevereiro/2019) foram integrados utilizando-se o IBR, calculado com o auxílio do ambiente computacional *R*.

A partir da identificação de regiões aparentemente críticas, os ambientes dulcícola, costeiro e marinho foram setorizados. Os dados utilizados na análise ecotoxicológica integrada para cada setor foram os

resultados obtidos a partir das amostras coletadas nos pontos localizados no respectivo setor, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Identificação dos setores utilizados para a análise integrada dos dados ecotoxicológicos.

<b>Ambiente</b>	<b>Setor</b>	<b>Pontos amostrais</b>
Dulcícola	Afluente	Rio Guandu (BRG)
	Rio (calha principal)	Rio Doce Linhares (RDL) Rio Doce Regência (RDR) Foz do Rio Doce (RDF)
	Lagos	Lagoa do Limão (LLI) Lagoa Nova (LNO) Lagoa Juparanã (LJA)
	Lagoas	Lagoa do Areão (LAO) Lagoa do Areal (LAL) Lagoa Monsarás (LMO)
Marinho	Sul	Guarapari 1 (GUA1) Guarapari 2 (GUA2) Vitória 1 (VIX1) Vitória 2 (VIX2)
	APA (APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz)	Costa das Algas 1 (CA1) Costa das Algas 2 (CA2) Costa das Algas 3 (CA3) Costa das Algas 4 (CA4) Costa das Algas 5 (CA5)
	Foz (Foz do Rio Doce)	Foz do Rio Doce 1 (FRD1) Foz do Rio Doce 3 (FRD3) Foz do Rio Doce 6 (FRD6) Foz do Rio Doce 8 (FRD8) Foz do Rio Doce 9 (FRD9) Foz do Rio Doce 10 (FRD10)
	Norte	Barra Nova 1 (BN1) Barra Nova 2 (BN2) Degredo 1 (DEG1) Degredo 2 (DEG2) Itaúnas 1 (ITA1) Itaúnas 2 (ITA2)
	Abrolhos	Abrolhos 1 (ABR01) Abrolhos 2 (ABR02) Abrolhos 4 (ABR04) Abrolhos Controle (ABRC1)
Costeiro (Praias e Manguezais)	Setor A – Praia	Aracruz 1 – Refúgio (ARR) Aracruz 2 – Putiri (ARP)
	Setor A – Mangue	Rio Piraque-Açu (PAM)

Ambiente	Setor	Pontos amostrais
		RVS Santa Cruz 1 (RSC1) RVS Santa Cruz 2 (RSC2)
	Setor B – Praia	Doce Sul 1 - Barra do Riacho (DSB) Doce Sul 2 – Comboios (DSC) Doce Sul 3 – Regência (DSR)
	Setor B – Mangue	Foz de Regência (FRG)
	Setor C – Praia	Doce Norte 1 – Povoação (DNP) Doce Norte 2 – Vila de Cacimbas (DNC) Doce Norte 3 - Pontal do Ipiranga (DNPI) Doce Norte 4 – Urussuquara (DNU) Doce Norte 5 – Guriri (DNG)
	Setor C – Mangue	Rio Urussuquara (RUR) Rio Mariricu (RMA) Rio São Mateus (RSM) Rio Caravelas (RCA)

O IBR foi calculado com dados de bioacumulação de metais (**IBR bioacumulação**) e da resposta de biomarcadores (**IBR biomarcador**) para os organismos representativos dos diferentes ambientes. Para os ambientes dulcícola e marinho, os grupos de organismos considerados foram os seguintes: **plâncton** (fitoplâncton e zooplâncton), de forma a refletir a qualidade da água; **camarões**, de forma a refletir a qualidade do sedimento; e **peixes**, de forma a subsidiar a transferência trófica e os impactos dos metais nos níveis biológicos superiores (vertebrados). Para o setor Abrolhos, os valores de IBR foram calculados para o grupo **corais** (incluindo corais e hidrocorais). Para o ambiente costeiro, os caranguejos de manguezais ou de praias constituíram o grupo **caranguejos**. Por sua vez, os demais invertebrados coletados nas praias (anfipodas, isopodas e poliquetas) foram incluídos no grupo **outros invertebrados**. Por fim, as aves coletadas no ambiente costeiro (manguezais, estuário e praias) foram incluídas no grupo **aves**.

Para a avaliação temporal dos níveis de contaminação da biota por metais após as campanhas 1 e 2, em particular para os ambientes dulcícola e marinho, os valores de IBR bioacumulação calculados para os diferentes grupos de organismos analisados (plâncton, camarões, peixes e corais) foram comparados com os valores de IBR calculados a partir de dados de bioacumulação de metais obtidos anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão (**IBR bioacumulação pretérita**). Os dados pretéritos utilizados para o cálculo do IBR bioacumulação pretérita estão apresentados e discutidos no Relatório Anual do Anexo 1.

Visando uma análise exploratória integrando os dados de bioacumulação de metais e da resposta biológica (IBR biomarcador), foi aplicada uma Análise de Componentes Principais (PCA) para cada grupo de organismos avaliados em cada ambiente amostrado.

Além da abordagem utilizando o IBR, os resultados de ensaios de toxicidade com amostras de água e sedimento dos pontos do monitoramento dulcícola e marinho foram apresentados utilizando-se um **Índice de Toxicidade**. Este índice é uma medida que integra todos os resultados dos ensaios de toxicidade obtidos para água e sedimento de um mesmo ponto amostral, considerando a severidade do efeito observado na sobrevivência, desenvolvimento, crescimento, fecundação e reprodução, bem como a sensibilidade do organismo-teste utilizado. Os ensaios de toxicidade foram realizados nos pontos BRG (Rio Guandu) e RDF (Foz do Rio Doce) para o monitoramento dulcícola, e para os pontos FRD1 (Foz do Rio Doce 1), FRD6 (Foz do Rio Doce 6), CA1 (Costa das Algas 1) e CA2 (Costa das Algas 2) para o monitoramento marinho.

## 2 DISCUSSÃO

Os valores de IBR bioacumulação e IBR biomarcador calculados para os diferentes setores dos ambientes dulcícola e marinho estão apresentados na Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente. Por sua vez, os dados de IBR bioacumulação pretérita estão descritos na Tabela 3.

Tabela 1: Valores de IBR de bioacumulação de metais e de IBR de respostas de biomarcadores para os organismos coletados no monitoramento dulcícola.

	Setor	Campanha	IBR bioacumulação	IBR biomarcador	
			Plâncton		
	Afluente	1	6,80	1,96	
		2	0,30	0,08	
	Rio	1	2,58	13,92	
		2	3,08	0,93	
	Lagos	1	0,81	2,39	
		2	0,02	0,14	
	Lagoas	1	0,66	0,71	
		2	4,37	0,12	
			Camarões		
Dulcícola	Afluente	1	0,82	0,80	
		2	1,38	5,64	
	Rio	1	5,54	3,07	
		2	2,12	2,96	
	Lagos	1	0,51	1,83	
		2	0,70	12,68	
	Lagoas	1	1,08	3,37	
		2	0,70	12,68	
				Peixes	
		Afluente	1	1,02	5,26
			2	1,99	4,59

Setor	Campanha	IBR bioacumulação	IBR biomarcador
Rio	1	4,10	16,08
	2	1,90	12,39
Lagos	1	1,33	6,88
	2	0,61	5,34
Lagoas	1	1,79	14,22
	2	5,00	3,22

Tabela 2: Valores de IBR de bioacumulação de metais e de IBR de respostas de biomarcadores para os organismos coletados no monitoramento marinho.

Setor	Campanha	IBR (bioacumulação)	IBR (biomarcador)
<b>Plâncton</b>			
Abrolhos	1	0,03	2,79
	2	0,07	8,03
APA	1	6,87	0,27
	2	8,08	13,81
Foz	1	0,45	0,23
	2	2,54	2,71
Norte	1	4,58	3,08
	2	2,07	1,16
Sul	1	0,94	0,00
	2	0,91	0,04
<b>Camarões</b>			
APA	1	3,23	3,17
	2	0,44	5,71
Foz	1	4,97	4,38
	2	0,44	2,35
Norte	1	4,32	1,91
	2	0,08	0,91
Sul	1	1,36	7,18
	2	0,48	4,01
<b>Peixes</b>			
APA	1	1,99	13,13
	2	0,35	1,68
Foz	1	2,07	10,16
	2	0,19	3,21
Norte	1	16,11	9,93
	2	0,01	6,14
Sul	1	0,48	12,20
	2	0,31	3,41
<b>Corais</b>			

Setor	Campanha	IBR (bioacumulação)	IBR (biomarcador)
Abrolhos	1	0,2	0,6
	2	3,03	2,02

Tabela 3: Valores de IBR bioacumulação calculados a partir dos dados de metais determinados no plâncton, camarões e peixes coletados nos monitoramentos dulcícola e marinho, bem como nos corais (corais e hidrocorais) coletados no monitoramento marinho, durante a campanha 1 (setembro-outubro/2018), a campanha 2 (janeiro-fevereiro/2019) e no período pré-rompimento da barragem de Fundão (IBR bioacumulação pretérita). Os valores em vermelho indicam aumento no valor do IBR bioacumulação, em relação ao respectivo valor do IBR bioacumulação pretérita. \* Não se aplica.

Campanha	Setor	Plâncton	Camarões	Peixes	Corais	
Dulcícola	1	Afluentes	<b>6,80</b>	<b>0,82</b>	1,03	*
		Rio	<b>2,58</b>	<b>5,54</b>	<b>4,10</b>	*
		Lagos	<b>0,81</b>	<b>0,51</b>	1,79	*
		Lagoas	<b>0,66</b>	<b>1,08</b>	1,33	*
	2	Afluentes	<b>0,30</b>	<b>1,38</b>	1,99	*
		Rio	<b>3,08</b>	<b>2,12</b>	1,90	*
		Lagos	0,01	<b>0,70</b>	0,61	*
		Lagoas	<b>4,37</b>	<b>1,44</b>	<b>5,00</b>	*
		IBR pretérito	0,01	0,39	3,22	*
	Marinho	1	Abrolhos	0,03	*	*
APA			<b>6,87</b>	<b>3,23</b>	<b>1,99</b>	*
FOZ			<b>0,45</b>	<b>4,97</b>	<b>2,07</b>	*
Norte			<b>4,58</b>	<b>4,32</b>	<b>16,11</b>	*
Sul			<b>0,94</b>	<b>1,36</b>	0,48	*
2		Abrolhos	0,07	*	*	<b>1,94</b>
		APA	<b>8,08</b>	<b>0,44</b>	<b>0,35</b>	*
		FOZ	<b>2,54</b>	<b>0,44</b>	0,19	*
		Norte	<b>2,07</b>	0,08	0,01	*
		Sul	<b>0,91</b>	<b>0,48</b>	<b>0,31</b>	*
	IBR pretérito	0,32	0,14	0,28	0,15	

De maneira geral, os valores de IBR bioacumulação para o plâncton e camarões dos ambientes dulcícola e marinho indicaram um aumento nos níveis de acumulação de metais nestes organismos nas campanhas 1 e 2, em relação aos valores de IBR bioacumulação pretérita. Para a comunidade de peixes dulcícolas, apenas os setores Rios (campanha 1) e Lagoas (campanha 2) apresentaram valores de IBR bioacumulação superiores ao valor de IBR bioacumulação pretérita. Por sua vez, a comunidade de peixes marinhos apresentou valores de IBR bioacumulação acima dos respectivos valores de IBR bioacumulação pretérita, em todos os setores monitorados na campanha 1 e apenas nos setores APA e Sul durante a campanha 2. A análise temporal entre os valores de IBR bioacumulação requer o uso de testes estatísticos específicos devido a natureza dos dados gerados. Estes testes estão atualmente sendo desenvolvidos. Entretanto, como mencionado anteriormente, os dados integrados da

concentração de metais na biota coletada nas campanhas 1 e 2 (IBR bioacumulação) evidenciam claramente um padrão temporal de bioacumulação destes elementos quando comparados com os dados integrados da concentração de metais na biota coletada no período pré-rompimento da barragem de Fundão (IBR bioacumulação pretérita).

Os resultados das PCAs geradas para os organismos do ambiente dulcícola estão representados na Figura 1. Para o plâncton, maiores valores do índice de estresse (IBR biomarcador) estão associados com os metais Mn, Cr e Cd, especialmente na campanha 1. Para os camarões, maiores níveis de estresse estão associados aos elementos Mn e As, com os maiores valores de IBR biomarcador sendo observados na campanha 2. Para a comunidade de peixes, foi observada uma reduzida associação entre o índice de estresse (IBR biomarcador) e os níveis de metais acumulados nestes organismos, não sendo verificado, portanto, um padrão espaço-temporal evidente.

Os resultados das PCAs para o ambiente marinho estão apresentados na Figura 2. O índice de estresse (IBR biomarcador) do plâncton está associado aos níveis de Fe, Cd e Cu, com os maiores valores de IBR biomarcador sendo observados na campanha 2, especialmente nos setores APA e Foz. O índice de estresse nos camarões está associado aos níveis teciduais de Mn, com destaque para os resultados obtidos na campanha 1. Para a comunidade de peixes, o índice de estresse (IBR biomarcador) está mais associado aos níveis de As, com maiores níveis de estresse sendo observados na campanha 1, com destaque para os setores Foz, APA e Sul.

Ainda para os ambientes dulcícola e marinho, os dados ecotoxicológicos indicam toxicidade da água e do sedimento em alguns pontos amostrais. O mapa com os Índices de Toxicidade gerados a partir dos resultados obtidos nos diferentes testes de toxicidade com água e sedimento está representado na Figura 3. As amostras coletadas no ponto BRG são as que apresentaram menor toxicidade, tanto para a campanha 1 quanto para a campanha 2. As amostras coletadas nos pontos RDF (estuário) e FRD1 (foz do Rio Doce) foram consideradas moderadamente tóxicas. Por sua vez, as amostras coletadas na FRD6 (foz do Rio Doce) foram consideradas tóxicas. As amostras coletadas no ponto FRD1 apresentaram maiores valores de toxicidade na campanha 1, enquanto as amostras coletadas no ponto FRD6 apresentaram-se tóxicas na campanha 1 e moderadamente tóxicas na campanha 2. As amostras coletadas nos pontos CA1 e CA2 também se mostraram bastante impactadas. De maneira geral, para todos os pontos analisados a maior toxicidade estava associada às amostras de sedimento.

Figura 1: Análise de Componentes Principais (PCA) considerando-se os dados de bioacumulação de metais e o índice de estresse (IBR biomarcador) nos organismos dulcícolas.

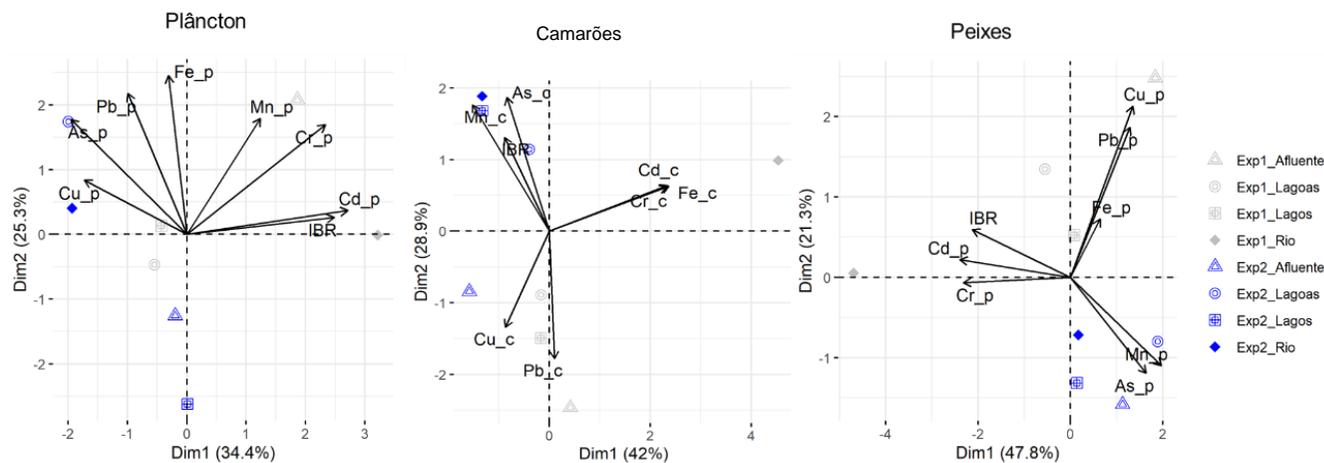


Figura 2: Análise de Componentes Principais (PCA) considerando-se os dados de bioacumulação de metais e o índice de estresse (IBR biomarcador) nos organismos marinhos.

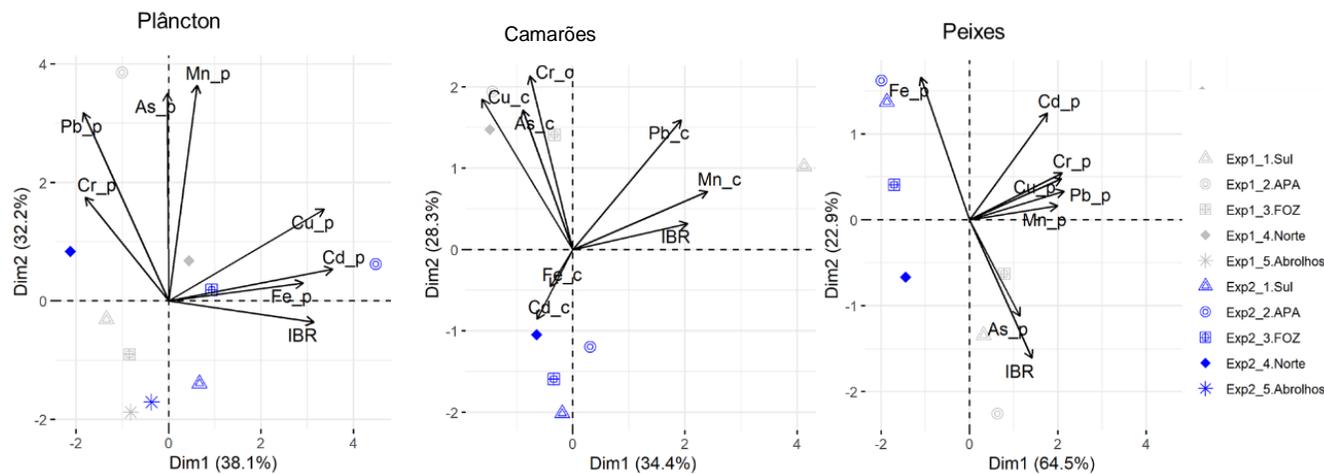
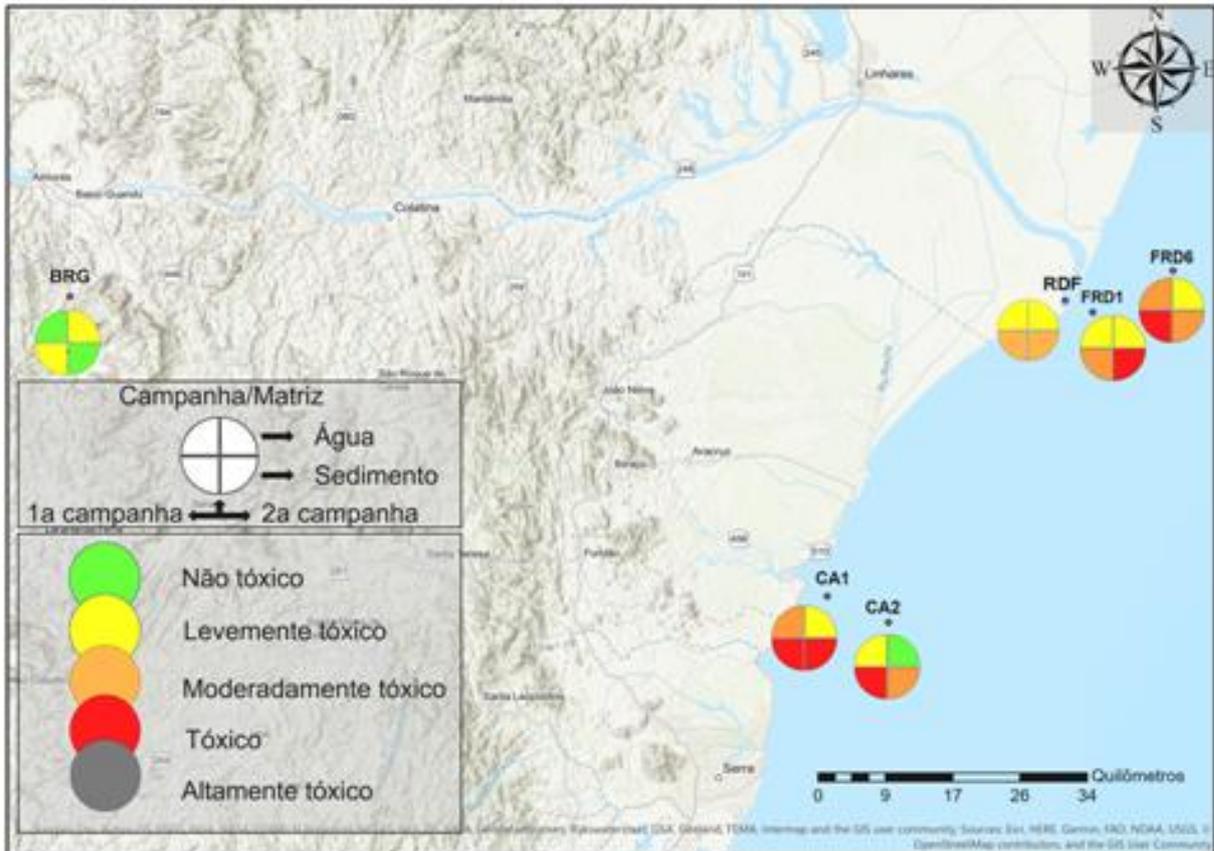


Figura 3: Classificação ecotoxicológica das amostras de água e sedimento coletadas nos pontos dulcícolas (BRG e RDF) e marinhos (FRD1, FRD6, CA1 E CA2) durante a Campanha 1 (setembro-outubro/2018) e a Campanha 2 (janeiro-fevereiro/2019).



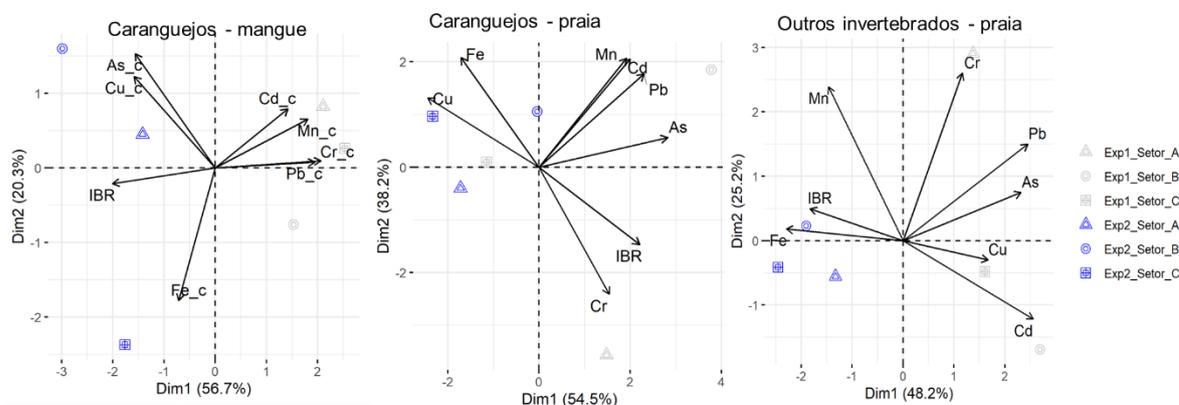
Os valores de IBR bioacumulação e IBR biomarcador nos diferentes setores amostrados para o ambiente costeiro estão apresentados na Tabela 4. Para o ambiente costeiro não foi possível calcular o IBR bioacumulação pretérita, devido à ausência de dados pretéritos nos bancos de dados disponíveis.

Visando evidenciar as relações existentes entre os dados de bioacumulação de metais e o nível de estresse nos organismos (IBR biomarcador), foram realizadas análises de PCA também para os dados obtidos no monitoramento costeiro (Figura 4). Para os caranguejos de manguezais observa-se que, apesar de não existir uma forte correlação entre os valores de bioacumulação de Fe e do IBR biomarcador, estes parâmetros se agrupam no mesmo quadrante. De maneira geral, os níveis mais elevados de bioacumulação de metais e os maiores índices de estresse (IBR biomarcador) nos caranguejos mostraram-se mais associados à campanha 2. Para os caranguejos de praia, foi evidenciada uma associação entre os níveis teciduais de Cr e o índice de estresse (IBR biomarcador), especialmente na campanha 1. Por fim, os resultados da PCA considerando-se os dados obtidos para os outros invertebrados (poliquetas, anfipodas e isopodas) mostraram uma forte associação entre os níveis de bioacumulação de Fe o índice de estresse (BR biomarcador), com maiores valores sendo observados na campanha 2.

Tabela 4: Valores de IBR bioacumulação e de IBR biomarcador para os organismos coletados e analisados no âmbito do monitoramento costeiro.

	Setor	Campanha	IBR bioacumulação	IBR biomarcador
Costeiro	Caranguejos - manguezais			
	A	1	2,82	0,77
		2	1,03	2,26
	B	1	0,91	2,28
		2	2,45	7,63
	C	1	1,15	0,17
		2	0,58	5,94
	Caranguejos - praia			
	A	1	0,44	4,31
		2	0,78	2,09
	B	1	4,82	3,19
		2	3,33	3,14
	C	1	0,69	1,58
		2	2,07	0,98
	Outros invertebrados - praia			
A	1	6,83	1,86	
	2	0,36	1,71	
B	1	2,20	0,87	
	2	3,43	6,96	
C	1	1,15	0,17	
	2	0,58	5,94	

Figura 4: Análise de Componentes Principais (PCA) considerando-se os dados de bioacumulação de metais e o índice de estresse (IBR biomarcador) nos organismos do ambiente costeiro.



O monitoramento ecotoxicológico de aves foi realizado em três regiões no ambiente costeiro, contemplando ecossistemas distintos: **manguezais**, ao sul da Foz do Rio Doce (Setor A); **estuário** do

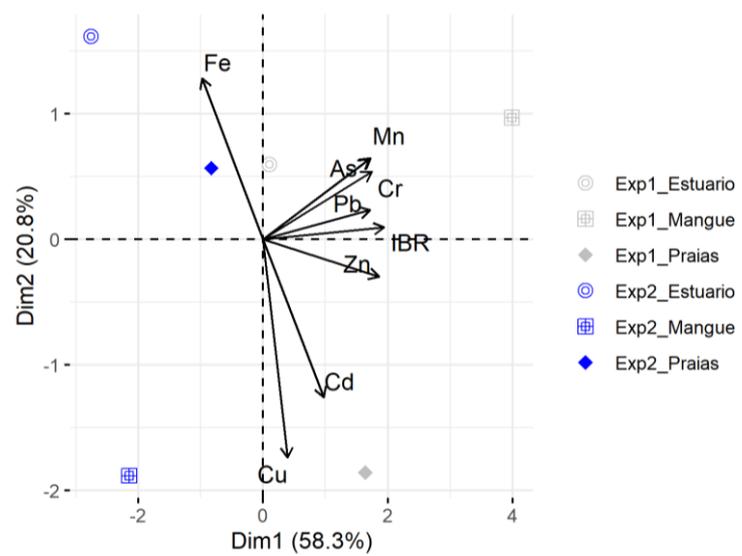
Rio Doce (Setor B) e **praias**, ao norte da Foz do Rio Doce (Setor C). A amostragem de aves costeiras contemplou diferentes guildas tróficas, incluindo espécies onívoras, piscívoras, filtradoras, granívoras, frugívoras, insetívoras, nectarívoras/insetívoras, piscívoras/consumidoras de invertebrados aquáticos, e consumidoras de invertebrados aquáticos e pequenos vertebrados. A partir dos dados de bioacumulação de metais nas penas das aves coletadas durante a Campanha 1 e a Campanha 2, foram calculados os valores de IBR bioacumulação. Os resultados de IBR para bioacumulação de metais nas aves estão apresentados na Tabela 5. De maneira geral, as aves coletadas durante a Campanha 1 apresentaram maiores níveis de contaminação por metais nas penas em comparação àquelas coletadas durante a Campanha 2.

Tabela 5: Valores de IBR bioacumulação para as aves aquáticas coletadas e analisadas no âmbito do monitoramento costeiro.

Ambiente	Setor	Campanha	IBR (bioacumulação)
Costeiro	A	1	9,08
		2	0,10
	B	1	1,79
		2	0,21
	C	1	4,97
		2	0,80

Além do IBR, os resultados individuais dos metais analisados nas penas das aves coletadas em cada campanha amostral também foram integrados por meio de uma PCA. Os resultados desta análise estão apresentados na Figura 5, onde pode ser observado que os níveis da maioria dos metais analisados foram maiores nas penas das aves coletadas durante a Campanha 1, com destaque para os manguezais, o que refletiu nos maiores valores de IBR obtidos para esta Campanha e para estes setores amostrais. Em contrapartida, maiores níveis de Fe nas penas das aves coletadas nos três setores foram observados durante a Campanha 2, com destaque para os setores estuário e praia. Estes resultados corroboram os maiores níveis de Fe também observados para outros organismos coletados durante a mesma Campanha, incluindo o plâncton, camarões e peixes no ambiente marinho, bem como caranguejos e outros invertebrados coletados no ambiente costeiro. Em conjunto, estes resultados evidenciam o efeito da sazonalidade sobre os níveis de Fe durante a Campanha 2, sugerindo a contaminação da biota e a transferência trófica deste metal, desde os produtores primários até o nível de consumidores, incluindo os peixes e aves aquáticas que forrageiam nestas áreas.

Figura 5: Análise de Componentes Principais (PCA) considerando-se os dados de bioacumulação de metais nas aves coletadas no ambiente costeiro.



Com base nas evidências apresentadas acima, pode-se afirmar que a análise integrada dos dados ecotoxicológicos evidenciou um aumento no índice de acumulação de metais na biota (IBR bioacumulação) para os ambientes dulcícola e marinho, em relação aos dados observados no período pré-rompimento da barragem de Fundão (IBR bioacumulação pretérita). Além disso, é importante ressaltar também a relação observada entre o índice de estresse (IBR biomarcador) calculado para os organismos coletados nas duas campanhas realizadas e os níveis de metais característicos do rejeito (Fe, Mn Cr e Cd).

O Quadro 2 apresenta uma síntese dos resultados de acumulação de metais (IBR bioacumulação) e de estresse (IBR biomarcador) na biota, para todos os setores monitorados durante as campanhas 1 e 2. Além disso, a síntese dos resultados obtidos a partir dos testes de toxicidade realizados com amostras de água e sedimento de alguns setores dos ambientes dulcícola e marinho também está apresentada neste quadro.

Para o ambiente dulcícola, o setor Rio (calha principal do Rio Doce) representa um *hotspot* de contaminação da biota por metais nas duas campanhas realizadas, considerando-se os diferentes grupos de organismos avaliados. Este setor se destaca também em termos de efeitos biológicos, tanto no que se refere à resposta de biomarcadores quanto à toxicidade das amostras ambientais para os organismos-teste. No setor Lagoas também se pode destacar a presença de efeitos biológicos (estresse) em níveis tróficos mais elevados, bem como um padrão temporal de resposta, a qual foi mais evidente na campanha 1 (setembro-outubro/2018). Considerando-se a biota marinha, os setores APA e Foz apresentaram maiores níveis de bioacumulação de metais, efeitos biológicos (resposta de biomarcadores) e toxicidade das amostras ambientais do que os demais setores. Por sua vez, o setor Foz (setor B) do ambiente costeiro apresentou os maiores níveis de bioacumulação de metais e de

efeitos biológicos (resposta de biomarcadores), os quais foram mais evidentes na campanha 2 (janeiro-fevereiro/2019).

Quadro 2: Síntese dos resultados integrados de bioacumulação (IBR bioacumulação), efeitos biológicos (IBR biomarcador) e toxicidade das amostras ambientais (Índice de Toxicidade) nos diferentes grupos de organismos dos ambientes dulcícola, marinho e costeiro. Os organismos coloridos em laranja ou azul representam os maiores valores de IBR ou de toxicidade para a campanha 1 (setembro-outubro/2018) e campanha 2 (janeiro-fevereiro/2019), respectivamente, para cada ambiente monitorado.

Ambiente	Setor	IBR bioacumulação	IBR biomarcador	Índice de toxicidade
Dulcícola	Afluente			
	Rio			
	Lagos			
	Lagoas			
Marinho	Abrolhos			
	APA (Costa das Algas)			
	Foz			
	Norte			
	Sul			
Costeiro	Setor A (Sul)			
	Setor B (Foz)			
	Setor C (Norte)			



### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarab N., Champeau O., Mora P., Daubeze M., Garrigues P., Narbonne J.F. (2004). Scoring approach based on fish biomarkers applied to French river monitoring. *Biomarkers* 9: 258-270.
- Beliaeff B., Burgeot T. (2002). Integrated biomarker response: a useful tool for ecological risk assessment. *Environ. Toxicol. Chem.* 21: 1316.
- Bianchini, A (2019). Monitoramento dos efeitos ecotoxicológicos da pluma de sedimentos oriunda da foz do Rio Doce sobre o ambiente marinho. Relatório Técnico-Científico - FURG/ICMBio, Rio Grande, RS.
- Devin S., Burgeot T., Giambérini L., Minguez L., Pain-Devin S. (2014). The integrated biomarker response revisited: optimization to avoid misuse. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21: 2448-2454.
- Devin, S., Cossu-Leguille, C., Geffard, A., Giambérini, L., Jouenne, T., Minguez, L., Naudin, B., Parant, M., Rodius, F., Rousselle, P., Tarnowska, K., Daguin-Thiébaud, C., Viard, F., Devin, S. (2014). Towards a better understanding of biomarker response in field survey: A case study in eight populations of zebra mussels. *Aquat. Toxicol.* 155: 52-61.
- Potet, M., Devin, S., Pain-Devin, S., Rousselle, P., Giambérini, L. (2016). Integrated multi-biomarker responses in two dreissenid species following metal and thermal cross stress. *Environ. Pollut.* 218: 39-49.