

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

**Material Suplementar Ambiente Dulcícola**

**Tema: Qualidade de Água e Sedimento**

**RT- 52/OUT 25**

**RSE2025 PMBA/FEST-UFES**

Vitória,

Outubro de 2025

## **EQUIPE TÉCNICA**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vânia Mácia Durate Pasa (coordenadora)

Prof. Dr. Paulo Jorge Sanches Barbeira

Poliana Cardoso Lima

Luana Rocha do Carmo

Pedro Henrique Paranhos de Medeiros

Izabella Cristina Gonçalves Silva

Yara Aparecida Melo

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>6</b>
2.1	COLETA .....	6
2.2	ANÁLISE.....	6
2.2.1	Metais em água .....	6
2.2.2	Metais em sedimento.....	7
2.2.3	Orgânicos em sedimento .....	7
2.3	INDICADORES.....	10
2.3.1	Metais em água (cwqi).....	10
2.3.2	Metais em sedimentos (sqq-q) .....	11
2.3.3	Orgânicos em água (cwqi) .....	13
2.3.4	Orgânicos em sedimentos (sqq-q).....	14
2.4	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	16
<b>3</b>	<b>RESULTADOS DOS INDICADORES .....</b>	<b>16</b>
3.1	METAIS EM ÁGUA (CWQI) .....	17
3.2	METAIS EM SEDIMENTOS (SQQ-Q) .....	20
3.3	ORGÂNICOS EM ÁGUA (CWQI).....	23
3.4	ORGÂNICOS EM SEDIMENTO (SQQ-Q) .....	25
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DEMONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO .....</b>	<b>27</b>
<b>5</b>	<b>ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>29</b>

## **1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL**

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

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

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

Quadro 1: Histórico da nomenclatura da malha do dulcícola integrado.

Setores	Nome da estação	Código Original	Código Atual (Deliberação 803/24*)	Abrangência Temporal
Lagoas	<b>Lagoa do Areal</b>	<b>E24</b>	<b>LAL 01</b>	<b>setembro/18 a março/25</b>
	Lagoa do Areal	E24L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Laguna Monsarás	E25a	N/A	outubro/18 a julho/22
	<b>Laguna Monsarás</b>	<b>E25</b>	<b>LMN 02R</b>	<b>outubro/18 a março/25***</b>
	Laguna Monsarás	E25L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	<b>Lagoa Cacimbas</b>	<b>E27</b>	<b>E27</b>	<b>agosto/22 a março/25***</b>
	Lagoa Cacimbas	E27L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lagoa Areão	E23	N/A	outubro/18 a setembro/19
Lagos	<b>Lago do Limão/ColatinaES</b>	<b>E18</b>	<b>LLM 03R</b>	<b>outubro/18 a julho/22 outubro/24 a março/25***</b>
	<b>Lago Nova</b>	<b>E19</b>	<b>LVN 02R</b>	<b>outubro/18 a março/25***</b>
	Lago Nova	E19L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lago Juparanã	E20	N/A	outubro/18 a setembro/24
	Lago Juparanã	E20L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lago Palmas	E28	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lago Palmas	E28L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
Reservatórios	Calha Rio Doce – Reservatório UHE Aimorés/Aimorés-MG	ERA	N/A	agosto/22 a setembro/24
	<b>Calha Rio Doce – Reservatório UHE Aimorés/Aimorés-MG</b>	<b>N/A</b>	<b>UHE AIM</b>	<b>outubro/24 a março/25***</b>
	<b>Reservatório de Mascarenhas</b>	<b>ERM</b>	<b>UHE MAS</b>	<b>agosto/22 a março/25***</b>
Calha	<b>Calha Rio Doce – Montante do reservatório UHE Mascarenhas/Baixo Guandu-ES</b>	<b>N/A</b>	<b>RDO 11</b>	<b>outubro/24 a março/25***</b>
	<b>Calha Rio Doce/Colatina-ES</b>	<b>N/A</b>	<b>RDO 12</b>	<b>outubro/24 a março/25***</b>
	<b>Calha Rio Doce/Marilândia-ES</b>	<b>N/A</b>	<b>RDO 14</b>	<b>outubro/24 a março/25***</b>
	<b>Calha Rio Doce/Linhares-ES</b>	<b>E21</b>	<b>RDO 15</b>	<b>outubro/18 a março/25***</b>
	Itapina	E0	N/A	outubro/18 a setembro/24
	Resplendor	E0a	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Povoação	E22	N/A	outubro/18 a julho/22
Foz	Calha Rio Doce/Foz – Regência-ES	E26f	N/A	agosto/22 a setembro/24
	<b>Calha Rio Doce/Foz – Regência-ES</b>	<b>E26</b>	<b>RDO 16</b>	<b>outubro/18 a março/25***</b>
Tributários	<b>Rio Guandu/Trecho baixo</b>	<b>N/A</b>	<b>RGU 02</b>	<b>outubro/24 a março/25***</b>
	Guandú	E17	N/A	outubro/18 a julho/22
	<b>Rio Manhuaçu/AimorésMG</b>	<b>N/A</b>	<b>RMH 01</b>	<b>outubro/24 a março/25***</b>
	Rio Manhuaçu/AimorésMG	E2	N/A	agosto/22 a setembro/24
* Vigência da Deliberação nº 803: a partir de outubro de 2024 (em curso)				
** Estações litorâneas que foram monitoradas pelos seguintes Temas: Mineralogia, Limnologia e Qualidade de água e do sedimento				
*** Março/2025 refere-se ao último período de dados coletados com resultados reportados no presente relatório (RSE2025).				

## **2 METODOLOGIA**

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

### **2.1 COLETA**

A coleta das amostras de água foi realizada por meio de uma garrafa de Niskin (2,8L), com montagem horizontal quando o corpo d'água apresentava correnteza ou baixa profundidade e na vertical nas demais condições. Nas estações amostrais fluviais a amostragem foi realizada superficialmente, no meio da calha do rio. Para lagos e reservatórios, a coleta de água foi realizada na superfície, nas profundidades de 1% de luz (até setembro/2024) e 1,0 m próximo ao fundo. Enquanto para lagoas e lagunas, a coleta de água foi realizada no meio da coluna d'água, até setembro/2024 e após esse período, a coleta passou a ser realizada na superfície. As amostras de água foram acondicionadas em frascos de polipropileno (1 L), previamente descontaminados. Os frascos com as amostras de água para determinação das concentrações de metal total foram armazenados refrigerados. As amostras para determinação da fração dissolvida de metais e de material particulado em suspensão (MPS) foram mantidas resfriadas até a filtração (membranas de acetato/éster de celulose 47 mm e 0,45 µm). Posteriormente, membrana e a fração dissolvida foram armazenadas refrigeradas até o momento das análises no Laboratório de Ensaio de Combustíveis – LEC da UFMG.

As coletas de sedimento de fundo foram realizadas com draga de van Veen nos rios e com draga do tipo Ekman, em lagos e reservatórios. Para lagoas e lagunas, por sua vez, a coleta de sedimento foi feita com amostrador Ekman, em solos lamosos e com draga de van Veen, em solos arenosos. Para evitar a contaminação da amostra para determinação de metais-traço foram coletadas alíquotas de sedimento úmido na parte central e superficial da amostra com colheres de plástico e acondicionadas em frascos de polipropileno (250 mL) com tampa, previamente descontaminados, em temperatura menor que zero grau.

### **2.2 ANÁLISE**

#### **2.2.1 Metais em água**

As amostras de água coletadas nas estações foram analisadas, pela técnica de Espectrometria Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado com detecção por Espectrometria de Massas (ICP-MS), sob três aspectos: Metais Totais; Metais Dissolvidos; Metais no Material Particulado em Suspensão (MPS). Para

todas as amostras foram determinadas as concentrações, em  $\mu\text{g L}^{-1}$ , de 30 elementos: Al, As, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Hg, Ho, La, Lu, Mn, Nd, Ni, Pb, Pr, Sm, Sn, Th, Tm, U, V, Yb e Zn. Para tal utilizou-se equipamento ICP-MS da marca Agilent – Modelo 8800-QQQ. As curvas analíticas foram construídas usando-se materiais de referência rastreáveis e solventes de elevada pureza.

#### 2.2.1.1 Metais traço totais

A fração de metais totais foi obtida pela digestão em micro-ondas da amostra adicionada de uma mistura de ácidos ( $\text{HNO}_3$  e  $\text{HCl}$ ) segundo norma EPA3515A.

#### 2.2.1.2 Metais traço particulados

A fração de metais em MPS foi obtida pela digestão da membrana utilizada na filtração da amostra para a análise de metais dissolvidos, em micro-ondas da amostra adicionada de uma mistura de ácidos ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), seguida de uma neutralização do  $\text{HF}$  com solução saturada de ácido bórico. Este procedimento segue a norma EPA3052.

#### 2.2.1.3 Metais traço dissolvidos

A fração de metais dissolvidos foi obtida no filtrado em membrana de  $0,45 \mu\text{m}$  da amostra coletada. A análise foi feita de forma direta.

### 2.2.2 Metais em sedimento

As amostras de sedimentos coletadas nas estações foram analisadas, pela técnica de Espectrometria Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado com detecção por Espectrometria de Massas (ICP-MS), sob o aspecto de Metais Totais.

A fração de metais totais foi obtida pela digestão em forno micro-ondas da amostra adicionada de uma mistura de ácidos ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$ ), seguida de uma neutralização do  $\text{HF}$  com solução saturada de ácido bórico, conforme metodologia EPA 3052.

Para todas as amostras foram determinadas as concentrações, em ppm ou  $\text{mg kg}^{-1}$ , de 30 elementos: Al, As, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Hg, Ho, La, Lu, Mn, Nd, Ni, Pb, Pr, Sm, Sn, Th, Tm, U, V, Yb e Zn. Para tal, utilizou-se equipamento ICP-MS da marca Agilent – Modelo 8800-QQQ. As curvas analíticas foram construídas usando-se materiais de referência rastreáveis e solventes de elevada pureza.

### 2.2.3 Orgânicos em sedimento

#### 2.2.3.1 Bifenilos policlorados – PCBs

As amostras de sedimentos coletadas nas estações, previamente liofilizadas, foram submetidas a extração por Ultrassom, conforme sugerido pelo protocolo USEPA 3550C, e analisadas pela técnica de cromatografia gasosa acoplada a um detector de captura de elétrons (GC-ECD), conforme sugerido pela USEPA 8082A.

### **Metodologia de Preparo de Amostra**

A metodologia de preparo de amostras para análise de PCBs baseou-se em um processo de extração por Ultrassom, em que foram utilizados 1 g da amostra liofilizada e masserada de sedimento, acrescido de aproximadamente 1 g de sulfato de sódio. A extração foi realizada por 15 minutos com acetona e n-hexano (1:1), sendo este realizado três vezes visando garantir solubilização completa dos analitos presentes na amostra, entre cada batelada, a solução foi centrifugada por 10 minutos e o resíduo solubilizado recolhido. Para finalizar, o resíduo solubilizado passou então pelo processo de concentração, onde foi seco em nitrogênio (10 minutos/amostra). O processo de extração durou em média duas horas e foi realizado em duplicata, até outubro/24 e, depois disso, em triplicata.

### **Metodologia de Análise**

Para o procedimento de análise cromatográfica, o extrato final foi solubilizado com n-hexano e para a análise cromatográfica dos 7 analitos, um padrão interno e dois surrogates, necessitou-se de um tempo de eluição de duas horas por amostra. O tratamento de dados requereu a conferência manual da integração de cada um dos picos.

A análise quantitativa foi feita segundo o método da curva analítica utilizando-se a razão entre as áreas do analito e do padrão interno apropriado, em função da concentração do analito, e as concentrações foram reportadas em  $\mu\text{g kg}^{-1}$ .

#### **2.2.3.2 Pesticidas**

As amostras de sedimentos coletadas nas estações, previamente liofilizadas, foram submetidas a extração por Ultrassom, conforme sugerido pelo protocolo USEPA 3550C, e analisadas pela técnica de cromatografia gasosa acoplada a um detector de captura de elétrons (GC-ECD), conforme sugerido pela USEPA 8082A.

### **Metodologia de Preparo de Amostra**

A metodologia para análise de Pesticidas baseou-se em um processo de extração por Ultrassom, em que foram utilizados 1 g da amostra liofilizada e masserada de sedimento, acrescido de aproximadamente 1 g de sulfato de sódio. A extração foi realizada por 15 minutos com acetona e n-hexano (1:1), o procedimento de extração foi realizado três vezes visando garantir solubilização completa dos analitos presentes na amostra, entre cada batelada, a solução é centrifugada por 10 minutos e o resíduo solubilizado recolhido. Para finalizar, o resíduo solubilizado passou então pelo processo de concentração, onde foi seco em nitrogênio (10 minutos/amostra). O processo de extração durou em média duas horas e foi realizado em duplicata, até outubro/24 e, depois disso, em triplicata.

### **Metodologia de Análise**

Para o procedimento de análise cromatográfica, o extrato final foi solubilizado com n-hexano e para a análise dos 11 analitos, um padrão interno e dois surrogates, necessitou-se um tempo de eluição de duas horas por amostra. O tratamento de dados requereu a conferência manual da integração de cada um dos picos.



A análise quantitativa foi feita segundo o método da curva analítica utilizando-se a razão entre as áreas do analito e do padrão interno apropriado, em função da concentração do analito, e as concentrações foram reportadas em  $\mu\text{g kg}^{-1}$ .

#### 2.2.3.3 Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – HPAs

As amostras de sedimentos coletadas nas estações, previamente liofilizadas, foram submetidas a extração por Ultrassom, conforme sugerido pelo protocolo USEPA 3550C, e analisadas pela técnica de cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (GC-MS), conforme sugerido pelo protocolo USEPA 8270D.

#### **Metodologia de Preparo de Amostra**

A metodologia para análise de HPA's baseou-se em um processo de extração por Ultrassom, em que foram utilizados 1 g da amostra liofilizada e masserada de sedimento, acrescido de aproximadamente 1 g de sulfato de sódio. A extração foi realizada por 15 minutos com acetona e n-hexano (1:1), o procedimento de extração foi realizado três vezes visando garantir solubilização completa dos analitos presentes na amostra, entre cada batelada, a solução foi centrifugada por 10 minutos e o resíduo solubilizado recolhido. Para finalizar, o resíduo solubilizado passou então pelo processo de concentração, onde foi seco em nitrogênio (10 minutos/amostra), processo de extração durou em média duas horas e foi realizado em duplicata, até outubro/2024 e, depois disso, em triplicata.

#### **Metodologia de Análise**

Para o procedimento de análise cromatográfica, o extrato final foi solubilizado com n-hexano e para a análise cromatográfica dos 16 analitos, os seis padrões internos e um surrogate, necessitou-se tem um tempo de eluição de uma hora por amostra, onde as áreas de cada pico foram quantificadas manualmente.

A análise quantitativa foi feita segundo o método da curva analítica utilizando-se a razão entre as áreas do analito e do padrão interno apropriado, em função da concentração do analito, e os resultados foram reportados em  $\mu\text{g kg}^{-1}$ .

#### 2.2.3.4 Fenóis

As amostras de sedimentos coletadas nas estações, previamente liofilizadas, foram submetidas a extração por Ultrassom, conforme sugerido pelo protocolo USEPA 3550C, e analisadas pela técnica de cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (GC-MS), conforme sugerido pelo protocolo USEPA 8270D.

#### **Metodologia de Preparo de Amostra**

A metodologia para análise de Fenóis baseou-se em um processo de extração por Ultrassom, em que foram utilizados 1 g da amostra liofilizada e masserada de sedimento, acrescido de aproximadamente 1 g de sulfato de sódio. A extração foi realizada por 15 minutos com acetona e n-hexano (1:1), o procedimento de extração foi realizado três vezes visando garantir solubilização completa dos analitos

presentes na amostra, entre cada batelada, a solução foi centrifugada por 10 minutos e o resíduo solubilizado recolhido. Para finalizar, o resíduo solubilizado passou então pelo processo de concentração, onde foi seco em nitrogênio (10 minutos/amostra), processo de extração durou em média duas horas e foi realizado em duplicata, até outubro/2024 e, depois disso, em triplicata.

## Metodologia de Análise

Para o procedimento de análise cromatográfica, o extrato final foi solubilizado com n-hexano e para a análise cromatográfica dos 21 analitos, os 2 padrões internos e um surrogate, necessitou-se de um tempo de eluição de uma hora por amostra, onde as áreas de cada pico foram quantificadas manualmente.

A análise quantitativa foi feita segundo o método da curva analítica utilizando-se a razão entre as áreas do analito e do padrão interno apropriado, em função da concentração do analito, e as concentrações foram reportadas em  $\mu\text{g kg}^{-1}$ .

## 2.3 INDICADORES

### 2.3.1 Metais em água (cwqi)

O indicador de poluição utilizado para verificar a qualidade da água foi o Canadian Water Quality Index (CWQI) considerando-se os limites estabelecidos no NOAA Crônico para metais dissolvidos.

O cálculo deste índice leva em consideração três aspectos:

- **Escopo (F1):** que representa o percentual de parâmetros que ultrapassam os limites estabelecidos na legislação, pelo menos uma vez, durante um determinado período;

$$F1 = \left( \frac{\text{número de parâmetros não conformes}}{\text{número total de parâmetros}} \right) \times 100$$

- **Frequência (F2)** que representa o percentual de ensaios que ultrapassam os limites estabelecidos na legislação, durante um determinado período;

$$F2 = \left( \frac{\text{número de ensaios não conformes}}{\text{número total de ensaios}} \right) \times 100$$

- **Amplitude (F3)** que representa a quantidade de ensaios não conformes, calculado em três etapas:

$$excursion_i = \left( \frac{\text{valor do ensaio não conforme}}{\text{limite estabelecido}} \right) - 1$$

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n excursion_i}{\text{número de ensaios}}$$

$$F3 = \frac{nse}{0,01nse + 0,01}$$

Uma vez obtidos os valores de F1, F2 e F3, o CWQI é calculado da seguinte forma:

$$CWQI = 100 - \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732}$$

Tabela 1: Classificação da qualidade das águas segundo o índice *CWQI*.

<i>CWQI</i>	Classificação	Observação
95 – 100	Excelente	ausência virtual de ameaça
80 – 94	Bom	pequeno grau de ameaça
65 – 79	Razoável	ameaças ocasionais
45 – 64	Marginal	ameaça frequente
0 – 44	Pobre	ambiente ameaçado

Tabela 2: Limites de concentração estabelecidos no NOAA Crônico para metais dissolvidos em águas, utilizados nos cálculos do *CWQI*.

Elemento	Limite (µg/L)	Elemento	Limite (µg/L)
Al	87	Mn	80
As	150	Ni	52
Ba	3,9	Pb	2,5
Cd	0,25	V	19
Co	3	Zn	120
Cu	9		
Fe	1000		
Hg	0,77	-	-

### 2.3.2 Metais em sedimentos (sqg-q)

O indicador de poluição utilizado para verificar a qualidade dos sedimentos foi o Sediment Quality Guideline Quotient (SQG-q) considerando-se os limites estabelecidos no NOAA PEL para metais.

Na primeira etapa são calculados os valores do Effect Range Median (ERM) individualmente para cada metal ou composto orgânico, utilizando-se a concentração obtida experimentalmente em cada coleta e o valor limite estabelecido na legislação. No caso de concentrações obtidas abaixo do limite de quantificação, foi utilizado o valor do limite de quantificação de cada elemento no cálculo.

$$ERM_i = \frac{C_i}{PEL}$$

O valor do SQG-q é obtido pela média dos valores de ERM obtidos para cada elemento:

$$SQG - q = \frac{\sum ERM_i}{n}$$

A qualidade do sedimento é mensurada segundo a classificação apresentada na Tabela 3:

Tabela 3: Classificação dos sedimentos segundo o índice SQG-q.

SQG-q	Classificação	Cor
< 0,1	não impactado	verde
0,1 a 1,0	moderadamente impactado	amarelo
≥ 1,0	altamente impactado	vermelho

Tabela 4: Limites de concentração estabelecidos no NOAA PEL e os respectivos limites de quantificação para cada metal em sedimentos.

Elemento	Limite de Quantificação (mg/kg)	Limite NOAA PEL (mg/kg)
As	0,4	17
Cd	0,5	3,53
Cr	0,4	90
Cu	2,4	197
Hg	0,1	0,486
Ni	0,5	36
Pb	0,5	91,3
Zn	0,9	315

### 2.3.3 Orgânicos em água (cwqi)

O indicador de poluição utilizado para verificar a qualidade da água foi o Canadian Water Quality Index (CWQI) considerando-se os limites estabelecidos no NOAA Crônico para compostos orgânicos.

O cálculo deste índice leva em consideração três aspectos:

- **Escopo (F1)** que representa o percentual de parâmetros que ultrapassam os limites estabelecidos na legislação, pelo menos uma vez, durante um determinado período;

$$F1 = \left( \frac{\text{número de parâmetros não conformes}}{\text{número total de parâmetros}} \right) \times 100$$

- **Frequência (F2)** que representa o percentual de ensaios que ultrapassam os limites estabelecidos na legislação, durante um determinado período;

$$F2 = \left( \frac{\text{número de ensaios não conformes}}{\text{número total de ensaios}} \right) \times 100$$

- **Amplitude (F3)** que representa a quantidade de ensaios não conformes, calculado em três etapas:

$$excursion_i = \left( \frac{\text{valor do ensaio não conforme}}{\text{limite estabelecido}} \right) - 1$$

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n excursion_i}{\text{número de ensaios}}$$

$$F3 = \frac{nse}{0,01nse + 0,01}$$

Uma vez obtidos os valores de F1, F2 e F3, o CWQI é calculado da seguinte forma:

$$CWQI = 100 - \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732}$$

Tabela 5: Classificação da qualidade das águas segundo o índice CWQI.

CWQI	Classificação	Observação
95 – 100	Excelente	ausência virtual de ameaça
80 – 94	Bom	pequeno grau de ameaça
65 – 79	Razoável	ameaças ocasionais
45 – 64	Marginal	ameaça frequente
0 – 44	Pobre	ambiente ameaçado

Tabela 6: Limites de concentração estabelecidos no NOAA Crônico para compostos orgânicos em águas, utilizados no cálculo do CWQI.

PCBs e Pesticidas	Limite (ng/L)	Hidrocarbonetos Poliaromáticos	Limite (ng/L)	Fenóis	Limite (µg/L)
PCBs Totais	14	Acenaftileno	4840000	2-Clorofenol	490
α-BHC	2200	Acenafteno	5800	2,4-Diclorofenol	160
β-BHC	2200	Antraceno	730	2,6-Diclorofenol	0,2
γ-BHC	80	Benzo(a)antraceno	27	2,4-Dimetilfenol	100
δ-BHC	2200	Benzo(a)pireno	14	2,4-Dinitrofenol	45
DDD	11	Benzo(b)fluoranteno	9070	Dinoseb	0,05
DDE	10500	Benzo(g,h,i)perileno	7640	Fenol	320
DDT	0,5	Fenantreno	6300	4-Nitrofenol	300
Dieldrin	56	Fluoranteno	40	Pentaclorofenol	15
Endrin	36	Fluoreno	3900	2,3,4,5-Tetraclorofenol	1
DDD+DDE+DDT	0,5	Indeno(1,2,3-cd)pireno	4310	2,3,4,6-Tetraclorofenol	20
-	-	Naftaleno	1100	2,4,5-Triclorofenol	63
-	-	Pireno	25	2,4,6-Triclorofenol	20

#### 2.3.4 Orgânicos em sedimentos (sqg-q)

O indicador de poluição utilizado para verificar a qualidade dos sedimentos foi o Sediment Quality Guideline Quotient (SQG-q) considerando-se os limites estabelecidos no NOAA PEL para compostos orgânicos.

Na primeira etapa são calculados os valores do Effect Range Median (ERM) individualmente para cada metal ou composto orgânico, utilizando-se a concentração obtida experimentalmente em cada coleta e o valor limite estabelecido na legislação. No caso de concentrações obtidas abaixo do limite de quantificação, foi utilizado o valor do limite de quantificação de cada elemento no cálculo.

$$ERM_i = \frac{C_i}{PEL}$$

O valor do SQG-q é obtido pela média dos valores de ERM obtidos para cada elemento:

$$SQG - q = \frac{\sum ERM_i}{n}$$

A qualidade do sedimento é mensurada segundo a classificação apresentada na Tabela 7.

Tabela 7: Classificação dos sedimentos segundo o índice SQG-q.

SQG-q	Classificação	Cor
< 0,1	não impactado	verde
0,1 a 1,0	moderadamente impactado	amarelo
≥ 1,0	altamente impactado	vermelho

Tabela 8: Limites de concentração estabelecidos no NOAA PEL e os respectivos limites de quantificação para cada composto orgânico em sedimentos, utilizados nos cálculos do índice SQG-q.

Elemento	Limite de Quantificação (µg/kg)	Limite NOAA PEL (µg/kg)
PCB	0,25	277
γ-BHC	0,01	1,38
DDD	0,01	8,51
DDE	0,01	6,75
DDT	0,01	4,77
Dieldrin	0,01	6,67
Endrin	0,01	62,4
DDD + DDE + DDT	0,03	4,45
Acenafteno	0,1	88,9
Acenaftileno	0,1	128
Antraceno	0,1	245
Benzo(a)antraceno	0,1	385
Benzo(a)pireno	0,2	782
Criseno	0,1	862
Dibenzo(a,h)antraceno	0,2	135
Fenantreno	0,2	515
Fluoranteno	0,2	2355
Fluoreno	0,1	144
Naftaleno	0,1	391
Pireno	0,2	875

## 2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

De acordo com a Proposta Técnica do Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES, as seguintes exclusões ocorreram no escopo do tema:

- Isótopos e análise elementar no MPS;
- Todas as análises de orgânicos em água, a saber: éter-aminas, aminas, bifenilos policlorados (PCBs), pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), hidrocarbonetos alifáticos, esteróis e fenóis;
- Análises de lipídios totais, ácidos graxos, éter-aminas, aminas, esteróis e hidrocarbonetos alifáticos em sedimentos;
- Metais biodisponíveis e extrações sequenciais em sedimentos.

Durante o monitoramento do PMBA/Fest-UFES, constatou-se que os parâmetros e análises mencionados anteriormente não apresentavam correlação com o material ligado ao desastre (MLD). Diante disso, optou-se por excluí-los, com o objetivo de otimizar o processo analítico.

Além disso, a metodologia adotada para as análises das amostras de sedimento, referentes a bifenilos policlorados (PCBs), pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e fenóis, foi modificada a partir das coletas realizadas em agosto de 2022 (Novo Ciclo do PMBA). A extração por Soxhlet foi substituída pela extração por ultrassom, metodologia também prevista na norma USEPA 3550C.

## 3 RESULTADOS DOS INDICADORES

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

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





Os principais metais que contribuíram para a redução dos índices de qualidade da água na região estudada foram o bário e o alumínio, detectados acima dos valores de referência em 99,36% e 19,81% das amostras analisadas, respectivamente. Além desses, embora com menor frequência, também foram identificados teores superiores aos limites estabelecidos para manganês (3,21% das amostras), ferro (1,39%) e chumbo (0,75%). Em 0,43% das amostras, foram observadas concentrações de cobre e cobalto acima dos limites crônicos definidos pelo NOAA. Em relação ao cádmio, como o limite definido pela norma é menor que o limite de detecção do elemento, apesar do mesmo ser considerado na composição do índice, não é possível definir o número de amostras acima dos limites da legislação para o período estudado.

A presença de metais pesados na água representa um risco toxicológico significativo para os organismos vivos, devido à sua persistência no ambiente e à capacidade de bioacumulação ao longo da cadeia trófica (Oros, 2025). Além disso, vários estudos discorrem a respeito dos efeitos ecotoxicológicos de metais pesados em organismos aquáticos, como algas e peixes. Entre eles, destaca-se a capacidade do alumínio em provocar cloroses, necroses, descolamento do córtex e amolecimento do tálus em algas (Rybak *et al.*; 2017) e a capacidade de inibição do crescimento de plantas aquáticas pelo chumbo (Zhan *et al.*, 2018 e Huang *et al.*, 2018).

No Ano 1, verificou-se uma predominância de índices classificados como razoáveis ao longo de todos os meses avaliados. Durante o período chuvoso, o índice CWQI apresentou média de  $72,28 \pm 3,04$ , com variações entre 64,20 e 77,50. O menor valor foi registrado em março de 2019, quando a laguna Monsarás (E25a) apresentou qualidade marginal (intervalo de 45–64). No período seco, os valores do CWQI oscilaram entre 66,80 e 81,30, com média de  $74,15 \pm 2,81$ . Nesse intervalo, foram observados índices pontuais classificados como bons nas superfícies dos setores rio Doce – Foz Regência (RDO16) e lago Juparanã (E20), em julho de 2019, e na lagoa do Areão (E23), em agosto do mesmo ano.

Durante a estação chuvosa do Ano 2, os índices CWQI oscilaram entre 61,90 e 78,30, com média de  $69,98 \pm 3,97$ , mantendo-se o predomínio de classificações razoáveis. No entanto, observa-se um aumento nos pontos de declínio dos parâmetros em relação ao mesmo período do Ano 1, com destaque para novembro de 2019. Nesse mês, três estações de monitoramento, lago do Limão (LLM 03R) e lago Juparanã (E20), em suas profundidades de superfície e fundo, e laguna Monsarás (E25a), apresentaram qualidade marginal. Cabe ressaltar que, em decorrência da pandemia de COVID-19, não foram obtidos dados referentes ao período seco do Ano 2 no âmbito do PMBA/Fest-UFES.

No Ano 3, os índices CWQI para a estação chuvosa variaram entre 61,80 e 85,10, com média de  $74,51 \pm 4,54$ . Já no período de estiagem, os valores oscilaram de 65,20 a 92,50, apresentando média superior de  $76,72 \pm 4,33$ . Observou-se, durante o período seco, uma tendência de melhoria na qualidade da água na calha do rio Doce, refletida na maior frequência de pontos classificados como de qualidade boa. Em contraste, durante a estação chuvosa, predominou a classificação razoável, para os pontos da calha. Esse padrão pode estar relacionado ao transporte de material inorgânico, especialmente rico em metais, das margens para o leito do rio, bem como à ressuspensão de

sedimentos provocada pelas chuvas. Por sua vez, no Ano 4, observou-se um comportamento inverso em alguns corpos hídricos, como o lago Nova (LNV 02R) e o lago Juparanã (E20), que apresentaram melhor qualidade da água durante o período chuvoso e pior desempenho nos meses de estiagem. Esse padrão pode estar relacionado ao efeito de diluição promovido pelas chuvas, especialmente por se tratar de ambientes lacustres fechados. Nesse ano, a média do índice CWQI foi de  $75,24 \pm 5,72$  no período chuvoso, com variações entre 62,30 e 86,70, enquanto no período seco a média foi ligeiramente superior, de  $76,05 \pm 3,78$ , com valores entre 64,00 e 84,20.

No Ano 5, os índices CWQI para o período chuvoso variaram de 61,20 a 92,50, com média de  $75,44 \pm 4,87$ . Durante a estiagem, os valores oscilaram entre 64,60 e 85,40, apresentando média de  $76,71 \pm 4,12$ . É importante destacar que, nesse ciclo, os pontos de superfície do lago Palmas (E28 e E28L) e da lagoa Cacimba (E27 e E27L), exibiram predominantemente indicadores classificados como bons. Em contrapartida, a laguna Monsarás (LMN 02R e LMN 02RL) apresentou desempenho inferior, sendo a única região a registrar qualidade marginal da água durante o período analisado. No Ano 6, os índices CWQI variaram de 69,70 a 84,30 durante o período chuvoso, com média de  $76,24 \pm 3,59$ , e de 67,90 a 81,50 na estação seca, com média de  $76,80 \pm 3,01$ . Em comparação com o Ano 5, observa-se uma melhoria na qualidade da água do rio Manhuaçu (RMH 01), além da manutenção da predominância de indicadores bons nas superfícies do lago Palmas (E28 e E28L). Por outro lado, destaca-se o surgimento de classificações razoáveis para a lagoa Cacimbas (E27L), especialmente durante o período seco.

Por fim, o estudo indicou que, durante o período chuvoso do Ano 7, houve uma deterioração progressiva nos índices de qualidade da água. Além da predominância de classificações razoáveis, foram identificados pontos com qualidade marginal nas amostras de fundo dos lagos do Limão (LLM 03R) e Nova (LNV 02R), bem como nas amostras de superfície da lagoa do Areal (LAL 01) e da laguna Monsarás (LMN 02R). A elevação dos índices de precipitação mensal em 2024, em relação a 2023, para o estado do Espírito Santo durante o período chuvoso (INCAPER, 2025), pode explicar a queda no índice CWQI, a qual pode estar associada à ressuspensão de sedimentos provocada pelas chuvas mais intensas, bem como a um maior transporte de material inorgânico das margens para o leito dos corpos hídricos. No último período do estudo, a média do índice foi de  $72,55 \pm 5,17$ , com variações entre 58,60 e 78,60. Para as estações E20, E0a e E26F, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.





Os resultados referentes aos indicadores de poluição por metais totais nos sedimentos, analisados em diferentes setores ao longo dos Anos 1 a 7 do PMBA/Fest-UFES, estão ilustrados na Figura 2. De forma geral, durante o período de monitoramento, predominam índices de impacto moderado (0,1–1,0), seguidos por uma quantidade expressiva de índices não impactados ( $<0,1$ ) e poucos casos de impacto elevado ( $>1,0$ ). Esses episódios mais críticos concentram-se no período chuvoso do Ano 4, com destaque para o lago Juparanã (E20) e a lagoa do Areal (LAL 01) e ressurge no Ano 7, para a lagoa Cacimbas (E27), também no período chuvoso. Nessas áreas, os altos valores do índice SQG-q podem estar associados ao aumento nas concentrações de arsênio, cromo, níquel e mercúrio, observadas nesse intervalo. A presença desses metais nos sedimentos também contribui para a predominância dos índices moderadamente impactados ao longo de todo o período, embora em concentrações menos intensas. Do ponto de vista da variação espaço-temporal, não foi possível estabelecer, de forma concreta, uma correlação sazonal na variação do indicador para os setores. As variações pontuais observadas, encontram-se descritas na sequência.

No primeiro ano de estudo, os sedimentos de todos os setores analisados foram classificados como moderadamente impactados, conforme o parâmetro SQG-q. Durante o período chuvoso, os índices variaram de 0,12 a 0,87, com média de  $0,35 \pm 0,21$ . Já no período seco, os valores oscilaram entre 0,11 e 0,79, apresentando média de  $0,32 \pm 0,18$ . No segundo ano, cujos dados abrangem apenas os meses de novembro de 2019 a março de 2020 (período chuvoso), observou-se a manutenção da predominância da classificação moderadamente impactado, com índices entre 0,07 e 0,83 e média de  $0,25 \pm 0,20$ . Contudo, alguns pontos apresentaram boa qualidade ambiental, sendo classificados como não impactados. Essa condição pode estar associada à lixiviação de metais induzida pelas chuvas, especialmente em ambientes abertos como o rio Doce, o rio Guandu (RGU 02) e a laguna Monsarás (LMN 02R), onde o arraste de materiais ricos em minerais pode ter contribuído para a melhoria da qualidade dos sedimentos. Não há reporte de resultados entre os meses de abril e novembro de 2020, devido as coletas terem sido interrompidas por conta da pandemia da COVID-19.

No Ano 3 do programa PMBA/Fest-UFES, os sedimentos foram predominantemente classificados como moderadamente impactados, com valores de SQG-q variando entre 0,07 e 0,77 (média de  $0,24 \pm 0,21$ ) no período chuvoso, e entre 0,07 e 0,76 (média de  $0,22 \pm 0,17$ ) no período seco. Apesar dessa classificação geral, observou-se uma redução gradual do impacto nos sedimentos ao longo do tempo, especialmente para os pontos na calha do rio Doce e no rio Guandu (RGU 02). Essa tendência de melhora nos índices de qualidade pode estar relacionada ao processo contínuo de arraste e lixiviação dos metais presentes nos sedimentos, promovido pelas chuvas e pela dinâmica hidrológica local.

No Ano 4 do monitoramento, os valores do indicador SQG-q variaram entre 0,07 e 1,50 no período chuvoso, com média de  $0,35 \pm 0,34$ , e entre 0,06 e 0,86 no período seco, com média de  $0,19 \pm 0,17$ . Observa-se um padrão semelhante ao identificado no Ano 3, com predominância de classificação moderadamente impactada. No entanto, conforme já mencionado, durante o período chuvoso, algumas regiões apresentaram níveis mais severos de impacto, elevando os índices para a categoria altamente impactado. Os limites de concentração estabelecidos pelo NOAA PEL para os elementos arsênio, cromo e níquel são de 17 mg/kg, 90 mg/kg e 36 mg/kg, respectivamente. Na lagoa

do Areal (LAL 01), foram registrados valores de até 144,37 mg/kg para arsênio e 209,17 mg/kg para cromo. Já no lago Juparanã (E20), as concentrações foram de 29,46 mg/kg para arsênio, 204,49 mg/kg para cromo e 94,67 mg/kg para níquel. Esse fenômeno pode estar relacionado ao intenso volume de chuvas, que promove a ressuspensão de material do fundo ou a transferência de sedimentos das margens para o corpo hídrico, contribuindo para o aumento das concentrações de metais nos sedimentos.

No Ano 5, o período chuvoso apresentou uma combinação de índices não impactados em reservatórios e rios, e moderadamente impactados em lagos e lagoas. Uma exceção foi observada no lago Palmas (E28L), que manteve classificação não impactada. Durante o período chuvoso, os valores do índice SQG-q variaram de 0,06 a 0,14 nos ambientes abertos, com média de  $0,09 \pm 0,02$ , enquanto nos lagos e lagoas os valores oscilaram entre 0,06 e 0,76, com média de  $0,26 \pm 0,14$ . Ao comparar os dados entre os regimes hidrológicos, observa-se que ambos os períodos, chuvoso e seco, apresentaram uma média comum de  $0,20 \pm 0,14$ , indicando baixa variação nos níveis de impacto ao longo do ano.

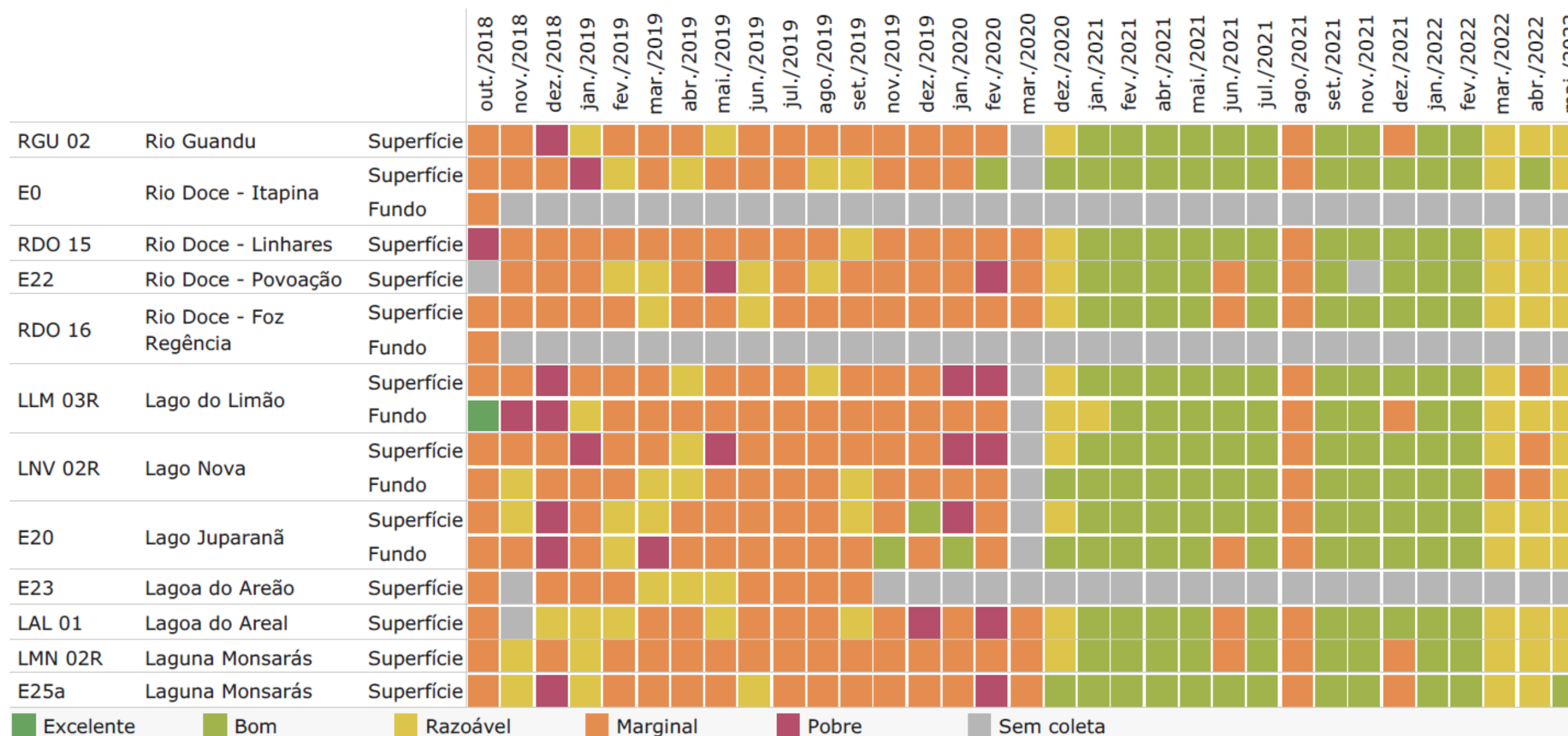
No Ano 6, os valores do índice SQG-q variaram entre 0,07 e 0,71 no período chuvoso, com média de  $0,25 \pm 0,15$ , e entre 0,07 e 0,42 no período seco, com média de  $0,18 \pm 0,09$ . A redução do impacto negativo na qualidade dos sedimentos durante o período de estiagem foi especialmente evidente em locais como o reservatório de Aimorés (UHE AIM), o rio Doce – Linhares (RDO 15) e o lago Palmas (E28L), que apresentaram melhora nos índices ao longo do Ano 6. Esse comportamento sugere uma possível estabilização ou recuperação gradual da qualidade sedimentar nesses ambientes.

Em contrapartida, no período chuvoso do Ano 7, observou-se um retorno da classificação moderadamente impactada para o reservatório Aimorés (UHE AIM) e para a estação Linhares (RDO 15), da calha do rio doce. Como ponto de declínio, destacou-se ainda, a lagoa Cacimbas (E27), a qual apresentou uma qualidade altamente impactada após um longo período de índices moderadamente impactados, bem como o reservatório Mascarenhas (UHE MAS) e o rio Manhuaçu (RMH 01), com resultados nunca impactados até então. Para o ponto E27, além do arsênio e do cromo, também foi identificado mercúrio, em teor 22% superior ao estabelecido na legislação. O índice SQG-q variou de 0,07 a 1,70, com média de  $0,37 \pm 0,33$  para o período chuvoso desse último ano. Em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024, após outubro/2024, não foram realizadas coletas para as estações E20, E0a e E26F.

Como conclusão da análise, pode-se afirmar que a presença de metais, especialmente arsênio, cromo e níquel, tem exercido uma influência negativa persistente sobre a qualidade dos sedimentos estudados, evidenciada pela predominância de índices moderadamente impactados ao longo dos anos.

### 3.3 ORGÂNICOS EM ÁGUA (CWQI)

Figura 3: Evolução dos índices de poluição CWQI para compostos orgânicos em água, calculados com os limites estabelecidos no NOAA Crônico, entre outubro de 2018 e maio de 2022, para diferentes pontos de coleta. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19.



A Figura 3 ilustra a evolução do índice de poluição CWQI para compostos orgânicos em água, considerando os diferentes setores abrangidos pelo PMBA/Fest-UFES entre os Anos 1 e 4. De forma geral, os resultados revelam uma variabilidade nos valores do indicador, porém é possível identificar dois padrões distintos ao longo do período analisado: até o Ano 2, predominam classificações marginais (45–64), enquanto a partir do Ano 3, observa-se uma prevalência de classificações boas (80–94). Essa variação nos resultados pode estar associada tanto a fatores antrópicos, como alterações no uso e ocupação do solo, quanto ao número elevado de analitos considerados na composição do índice, o que contribui para a sensibilidade e complexidade da avaliação.

No Ano 1, foi registrado um único ponto com qualidade de água classificada como excelente (95–100) em todo o período do estudo, localizado no lago do Limão (LLM 03R) – Fundo, no mês de outubro de 2018. Durante o período chuvoso, os valores do índice CWQI variaram entre 42,20 e 100,00, com média de  $54,29 \pm 10,62$ . No período seco, os indicadores oscilaram entre 41,70 e 79,50, com média de  $56,93 \pm 9,57$ . O comportamento observado no período chuvoso do Ano 2 foi semelhante, com valores entre 43,20 e 87,20 e média de  $53,15 \pm 10,03$ . Para esses dois primeiros anos, ao comparar os resultados em função do regime de chuvas, nota-se uma maior concentração de classificações pobres (0–44) nos períodos de maior precipitação, o que pode estar relacionado ao arraste de poluentes pelas águas pluviais para os diferentes ambientes aquáticos. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19.

Ao longo do período de monitoramento, torna-se evidente a influência dos contaminantes orgânicos na qualidade da água. Compostos fenólicos como 2,3,4,5-tetraclorofenol, 2,6-diclorofenol e Dinoseb, além de pesticidas como DDD, DDE e DDT, foram detectados em concentrações superiores aos limites de referência estabelecidos pelo NOAA para exposição crônica, em todas as amostras analisadas. Além desses, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's), como benzopireno e pireno, também excederam os valores de referência em 21,81% e 16,41% das amostras, respectivamente. De forma geral, esses contaminantes podem ser considerados os principais responsáveis pela redução dos índices de qualidade da água (CWQI) observada ao longo do estudo.

Contaminantes orgânicos podem provocar efeitos adversos em variados grupos de organismos aquáticos e considerando que esses compostos tendem a se acumular nos tecidos biológicos e a sofrer biomagnificação ao longo da cadeia trófica, é esperado que os predadores situados no topo da cadeia sejam, geralmente, os mais impactados pela exposição (Cavalcanti, 2020). A toxicidade de pesticidas em organismos vivos aquáticos, por exemplo, tem sido amplamente investigada e entre os resultados constatou-se que a exposição a esses compostos pode resultar em um aumento severo na biomassa de algas (Mustafa, et al., 2024) e em condições de exposição crônica, provocar impactos letais em peixes, bem como uma série de efeitos adversos, incluindo anormalidades no desenvolvimento, carcinogenicidade e mutagênese nesses organismos (Rohani, 2023).

A melhoria geral na qualidade da água observada nos Anos 3 e 4 do programa PMBA/Fest-UFES pode estar associada às restrições impostas pela pandemia da COVID-19, que resultaram na redução ou paralisação de atividades agrícolas e industriais — fontes potenciais de poluentes como PCBs, HPAs e fenóis (Medeiros & Vasconcellos, 2023; Sisino *et al.*, 2003). No Ano 3, os valores médios do índice CWQI foram de  $82,95 \pm 4,95$  no período chuvoso e  $78,21 \pm 14,68$  no período seco, indicando uma tendência positiva. No entanto, destaca-se uma interrupção nessa evolução no mês de agosto de 2021, quando todos os setores analisados apresentaram classificação marginal, sugerindo uma possível influência pontual de fatores externos ou eventos específicos que comprometeram temporariamente a qualidade da água.

No Ano 4, os valores do índice CWQI variaram entre 50,20 e 86,00 no período chuvoso, com média de  $78,83 \pm 8,02$ , e entre 62,90 e 82,00 no período seco, com média de  $74,57 \pm 5,20$ . Os dados indicam que, nos três últimos meses de monitoramento, a partir de março de 2022, houve uma predominância de classificações razoáveis, contrastando com os resultados mais positivos observados no início do Ano 4 e no ano anterior.

Com o início do Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES, a partir de agosto de 2022, as análises referentes ao índice CWQI foram descontinuadas, não havendo registros disponíveis para esse período.





A Figura 4 apresenta a evolução dos índices de poluição SQG-q para compostos orgânicos em sedimentos ao longo do estudo. No Ano 1 do programa PMBA/Fest-UFES, os valores médios foram semelhantes entre os períodos, com  $0,10 \pm 0,09$ , variando de 0,005 a 0,34 no período chuvoso e de 0,003 a 0,35 no período seco. Esses resultados indicam um equilíbrio entre as classificações moderadamente impactado (0,1–1,0) e não impactado ( $<0,1$ ), padrão observado especialmente nos pontos do lago do Limão (LLM 03R), lagoa Nova (LNV 02R) e laguna Monsarás (LMN 02R e E25a). Cerca de 42% dos pontos amostrados apresentaram bons resultados, com predominância de classificações não impactadas, destacando-se os setores da calha do rio Doce (E0, RDO 15, E22, RDO 16) e do rio Guandu (RGU 02). Em contraste, as lagoas Areão (E23), Areal (LAL 01) e o lago Juparanã (E20) apresentaram maior frequência de classificações moderadamente impactadas. No período chuvoso do Ano 2, observou-se uma melhora significativa na qualidade dos sedimentos, com todos os setores classificados como não impactados. Os indicadores variaram de 0,002 a 0,09, com média de  $0,01 \pm 0,02$ . Essa melhora pode estar associada à lixiviação e solubilização dos contaminantes orgânicos, promovidas pelo aumento do aporte hídrico decorrente das chuvas. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19,

Nos Anos 3 e 4, observou-se uma predominância de índices não impactados durante o período chuvoso, com valores variando de 0,003 a 0,11 e média de  $0,03 \pm 0,02$  no Ano 3, e de 0,002 a 0,15 com média de  $0,02 \pm 0,03$  no Ano 4. Apesar dessa tendência positiva, o período seco do Ano 3 apresentou deterioração da qualidade dos sedimentos em alguns pontos, com variações entre 0,005 e 0,29 e média de  $0,08 \pm 0,05$ . Destacam-se os setores do lago Nova (LNV 02R) e do lago Juparanã (E20), onde houve predominância de índices moderadamente impactados. O período seco do Ano 4 também foi marcado por uma mescla de classificações moderadamente e não impactadas, com valores entre 0,015 e 2,39 e média de  $0,16 \pm 0,37$ . Os dados sugerem que, durante os períodos chuvosos, ocorre solubilização e transporte dos poluentes orgânicos, promovendo uma melhora temporária na qualidade dos sedimentos. Além disso, a redução das atividades industriais e agrícolas durante a pandemia da COVID-19 pode ter contribuído para a diminuição da entrada de contaminantes nesses ecossistemas.

Ainda no Ano 4, destaca-se a ocorrência de um índice altamente impactado na calha do rio Doce, em Resplendor (E0a), atribuída principalmente às elevadas concentrações de  $\gamma$ -BHC que atingiu até 60,20  $\mu\text{g/kg}$ , valor significativamente superior ao limite de tolerância de 1,38  $\mu\text{g/kg}$  estabelecido pelo NOAA PEL. Além disso, foram detectadas concentrações elevadas de pesticidas organoclorados (DDD+DDE+DDT), chegando a 7,17  $\mu\text{g/kg}$ , também acima do limite de 4,45  $\mu\text{g/kg}$ . De forma geral, os índices moderadamente impactados observados ao longo do programa PMBA/Fest-UFES podem ser atribuídos, em grande parte, a esses compostos. Historicamente, tais substâncias foram amplamente utilizadas como fungicidas e inseticidas em atividades agrícolas no Brasil. No caso do BHC, além de seu uso como pesticida, ele também pode ser gerado como subproduto de diversos processos industriais, contribuindo para sua presença nos sedimentos.

Nos Anos 5 e 6, foram identificados diversos pontos com classificação moderadamente impactada, possivelmente em decorrência da retomada das atividades industriais e agrícolas após a fase mais

crítica da pandemia da COVID-19. No Ano 5, os valores do índice SQG-q variaram de 0,001 a 0,67, com média de  $0,16 \pm 0,15$  no período chuvoso, e de 0,01 a 0,45, com média de  $0,08 \pm 0,09$  no período seco. Durante o período chuvoso, destacaram-se como áreas impactadas as estações do rio Doce – Foz (E26f), lago Nova (LNV 02R e LNV 02RL) e laguna Monsarás (LMN 02R e LMN 02RL). No Ano 6, os indicadores do período chuvoso variaram entre 0,02 e 0,62, com média de  $0,13 \pm 0,13$ . Já no período seco, observou-se uma redução nos valores, com média de  $0,05 \pm 0,09$ , variando de 0,001 a 0,65. Para esses dois anos, vale destacar uma tendência de melhora no indicador nos períodos secos em comparação com os chuvosos, para os Reservatórios, Aimorés (UHE AIM) e Mascarenhas (UHE MAS).

No período chuvoso do Ano 7, o índice SQG-q apresentou média de  $0,03 \pm 0,03$ , com valores variando entre 0,002 e 0,13, mantendo a tendência de conservação da qualidade dos sedimentos observada a partir de janeiro de 2024, quando a maioria dos ambientes passou a ser classificados como não impactados. Entretanto, essa tendência não se aplicou a alguns pontos específicos, que apresentaram classificação moderadamente impactada em maio de 2024: rio Doce – Linhares (RDO 15), Foz Regência (RDO 16), lago Palmas (E28 e E28L) e laguna Monsarás (LMN 02RL). Além disso, os novos pontos de monitoramento no rio Doce, localizados em Colatina (RDO 12) e Baixo Guandu (RDO 11), também apresentaram valores moderadamente impactados em outubro de 2024. Cabe salientar que, para as estações E20, E0a e E26F, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DEMONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO**

Ao longo anos de execução do PMBA/Fest-UFES, foram obtidos resultados consistentes, que evidenciam que a bacia do rio Doce ainda apresenta impactos significativos. Esses impactos decorrem tanto da presença de poluentes orgânicos quanto de contaminantes inorgânicos, cujas concentrações continuam acima dos limites estabelecidos por normas internacionais, como os parâmetros de referência do NOAA para exposição crônica e PEL (Probable Effect Level).

Durante os anos de execução do PMBA/Fest-UFES, a análise dos índices CWQI para metais permitiu classificar, de forma geral, as águas dos ambientes dulcícolas como de qualidade razoável, ou seja, com a identificação de ameaças ocasionais, com exceção das superfícies do lago Palmas (E28 e E28L) e da lagoa Cacimbas (E27 e E27L), que mantiveram índices bons na maior parte do período analisado. Destaca-se a presença recorrente de bário, detectado em concentrações persistentemente elevadas em todos os ambientes monitorados, bem como do alumínio, ambos excedendo os limites estabelecidos pelo NOAA, o que contribuiu significativamente para a redução dos índices de qualidade CWQI. Os resultados mais recentes reforçam que, embora tenha havido melhora na qualidade da água em anos anteriores do estudo para algumas estações amostrais, a condição de contaminantes metálicos, continua sendo uma preocupação relevante, visto que os índices ainda não se encontram estabilizados em patamares considerados sem a ausência de ameaças. Isso é evidenciado, no período

chuvoso do Ano 7, pelo declínio para índices razoáveis para o rio Manhuaçu (RMH 01) e pela retomada de índices marginais para pontos como os lagos do Limão (LLM 03R) e Nova (LNV 02R), bem como para a lagoa do Areal (LAL 01) e laguna Monsarás (LMN 02R).

Ainda do ponto de vista dos contaminantes inorgânicos, a análise dos resultados do índice SQG-q para poluição dos sedimentos revelou uma predominância de classificações moderadamente impactadas, seguida por um número expressivo de classificações não impactadas. Em contrapartida, ao longo do estudo, destacou-se pontos classificados como altamente impactados para os sedimentos do lago Juparanã (E20), da lagoa do Areal (LAL 01) e da Lagoa Cacimbas (E27), nos quais a presença de arsênio em níveis elevados, chegando a concentrações até dez vezes superiores aos limites estabelecidos pelo NOAA, demandam a necessidade de uma investigação mais aprofundada e adoção de medidas de mitigação, dada a alta toxicidade desse elemento. De forma similar ao que foi apresentado para a água, os resultados obtidos mais recentemente para os sedimentos, alertam para ambientes ainda instáveis e majoritariamente, impactados por compostos inorgânicos.

No que diz respeito aos contaminantes orgânicos em água, o índice CWQI apresentou alta variabilidade ao longo dos Anos 1 a 4 do programa PMBA/Fest-UFES, com dois períodos distintos: até o Ano 2, predominou a classificação marginal, enquanto a partir do Ano 3, observou-se uma prevalência de classificações boas. Durante esse intervalo, foram detectadas concentrações de compostos fenólicos, pesticidas e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) acima dos limites estabelecidos pelo NOAA para exposição crônica. No entanto, houve uma redução significativa desses contaminantes durante o período da pandemia da COVID-19, reforçando a correlação direta entre a presença de poluentes orgânicos e a intensidade das atividades humanas.

A evolução dos índices de poluição SQG-q para compostos orgânicos, como pesticidas e HPA's, indica uma influência relativamente menor desses contaminantes sobre os sedimentos ao longo do estudo. No entanto, foram detectadas substâncias orgânicas proibidas, como o hexaclorobenzeno (BHC), sugerindo uma possível relação com atividades agrícolas e industriais ainda presentes na região. A partir de janeiro de 2024, observou-se uma tendência positiva, com a maioria dos setores sendo classificados como não impactados. As exceções ocorreram em maio de 2024, quando alguns pontos específicos, rio Doce – Linhares (RDO 15), Regência (RDO 16), lago Palmas (E28 e E28L) e laguna Monsarás (LMN 02RL) e em outubro de 2024, para as novas estações do rio Doce, Baixo Guandu (RDO 11) e Colatina (RDO 12), ainda apresentaram classificação moderadamente impactada, indicando a necessidade de monitoramento contínuo e ações de controle direcionadas.

De forma geral, os resultados reforçam que os contaminantes inorgânicos e orgânicos não devem ser negligenciados, uma vez que sua presença e toxicidade representam riscos significativos à biota aquática. A complexidade do monitoramento é ampliada pelo comportamento heterogêneo dos pontos amostrais, influenciado por fatores como arraste de materiais, ressuspensão de sedimentos e variações nos níveis de precipitação.

Diante desse cenário, acredita-se que as áreas mais críticas e altamente impactadas devem ser priorizadas para intervenções específicas, com foco na melhoria da qualidade da água por meio da

aplicação de tecnologias avançadas, como ultrafiltração por membranas, adsorção seletiva, entre outras soluções que podem contribuir para a mitigação dos impactos ambientais na bacia do rio Doce.

## 5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todas as metas propostas para o tema Qualidade de água e sedimento foram cumpridas.

## 6 REFERÊNCIAS

CAVALCANTI, R.M. (2020). *Contaminantes orgânicos em ambientes aquáticos*. Imprensa universitária, UFC.

HUANG, D., QIN, X., PENG, Z., LIU, Y., GONGA, X., ZENG, G., HUANG, C., CHENG, M., XUE, W., WANG, X., HU, Z. (2018). Nanoscale zero-valent iron assisted phytoremediation of Pb in sediment: Impacts on metal accumulation and antioxidative system of *Lolium perenne*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.153, p.229–237. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.060>

INCAPER (2025). Precipitação Observada - mensal e anual. *Instituto Capixaba de Pesquisa Assistência Técnica e Extensão Rural*. Disponível em: <[https://meteorologia.incaper.es.gov.br/monitora\\_agro\\_sat\\_prec](https://meteorologia.incaper.es.gov.br/monitora_agro_sat_prec) >. Acesso em: 11 ago. 2025.

MEDEIROS, A. A.; VASCONCELLOS, M. da P. (2023). Ambiente, saúde e covid-19: da crise global à existência sustentável. *Saúde de Sociedade*, 1. <https://doi.org/10.1590/S0104-12902023220601pt>

MUSTAFA, S.A.; AL-RUDAINY, A.J; SALMAN, N. M.(2024). Effect of environmental pollutants on fish health: An overview. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, v. 50, p. 225 – 233.

OROS, A. (2025). Bioaccumulation and Trophic Transfer of Heavy Metals in Marine Fish: Ecological and Ecosystem-Level Impacts, *Journal Xenobiotics*, v, 15 (2). <https://doi.org/10.3390/jox15020059>

ROHANI, M.F. (2023). Pesticides toxicity in fish: Histopathological and hemato-biochemical aspects – A review. *Emerging Contaminants*, v. 9(3), p. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100234>

RYBAKA, M., KOŁODZIEJCZYKB, A., JONIAKA, T., RATAJCZAKC, I., GĄBKAD, M. (2017). Bioaccumulation and toxicity studies of macroalgae (Charophyceae) treated with aluminium: Experimental studies in the context of lake restoration, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 145, p. 359–366. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.056>

SISINNO, C. L. S.; NETTO, A. D. P.; REGO, E. C. P.; LIMA, G. S. V. (2003). Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em resíduos sólidos industriais: uma avaliação preliminar do risco potencial de



contaminação ambiental e humana em áreas de disposição de resíduos. *Caderno Saúde Pública*, 19 (2). <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2003000200035>

U.S. EPA. 1996. "Method 3550C (SW-846): Soxhlet Extraction," Washington, DC.

U.S. EPA. 1996. "Method 3630C (SW-846): Silica Gel Cleanup," Washington, DC.

U.S. EPA. 1996. "Method 3052 (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices". Washington, DC.

U.S. EPA. 1996. "Method 3052 (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices" Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA. 1996. "Method 3510C (SW-846): Separatory Funnel Liquid-Liquid Extraction" Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA. 2007. "Method 3550C (SW-846): Ultrasonic Extraction," Washington, DC.

U.S. EPA. 2007. "Method 8041A (SW-846): Phenols by Gas Chromatography," Washington, DC.

U.S. EPA. 2007. "Method 3015A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts," Revision 1. Washington, DC

U.S. EPA. 2007. "Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils," Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA. 2007. "Method 8082A (SW-846): Polychlorinated Biphenyls (PCBs) by Gas Chromatography" Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA. 2014. "Method 8270E (SW-846): Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS)," Washington, DC.

ZHAN, J., LI, T., ZHANG, X., YU, H., ZHAO, L. (2018). Rhizosphere characteristics of phytostabilizer *Athyrium wardii* (Hook.) involved in Cd and Pb accumulation, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.148, p. 892–900. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.070>