

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA

NATHÁLIA RODRIGUES DE OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO SAZONAL DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS EM  
ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO DOCE  
EMPREGANDO FERRAMENTAS QUIMIOMÉTRIAS**

BELO HORIZONTE

2025

**UFMG/ICEX/DQ. 1.683**  
**T. 761**

**NATHÁLIA RODRIGUES DE OLIVEIRA**

**AVALIAÇÃO SAZONAL DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS EM  
ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS NA BACIA DO RIO DOCE  
EMPREGANDO FERRAMENTAS QUIMIOMÉTRIAS**

Tese apresentada ao Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutora em Ciências - Química.

**Orientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dra. Letícia Malta Costa

**Coorientadora:** Prof.<sup>a</sup> Dra. Mariana Ramos de Almeida

**BELO HORIZONTE**

**2025**

Ficha Catalográfica

O48a  
2025  
T  
Oliveira, Nathália Rodrigues de.  
Avaliação sazonal de contaminantes inorgânicos em águas superficiais e sedimentos na Bacia do Rio Doce empregando ferramentas quimiométrias [manuscrito] / Nathália Rodrigues de Oliveira. 2025.  
221 f. : il., gráfs., tabs.

Orientadora: Letícia Malta Costa.  
Coorientadora: Mariana Ramos de Almeida.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Química.

Bibliografia: f. 115-129.

Apêndices: f. 130-221.

1. Química analítica – Teses. 2. Quimiometria – Teses. 3. Água – Análise – Teses. 4. Sedimentos fluviais – Teses. 5. Resíduos de metal – Teses. 6. Rio Doce, Bacia – Teses. 7. Fundão, Barragem de (MG) – Teses. 8. Análise de componentes principais – Teses. 9. Espectrometria de massa – Teses. 10. Geoprocessamento – Teses. I. Costa, Letícia Malta, Orientadora. II. Almeida, Mariana Ramos de, Coorientadora. III. Título.

CDU 043



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS



## **"Avaliação Sazonal de Contaminantes Inorgânicos em Águas Superficiais e Sedimentos na Bacia do Rio Doce Empregando Ferramentas Quimiométricas"**

**Nathália Rodrigues de Oliveira**

Tese aprovada pela banca examinadora constituída pelos Professores:

Profa. Leticia Malta Costa - Orientadora  
UFMG

Profa. Mariana Ramos de Almeida - Coorientadora  
UFMG

Prof. Gisele Simone Lopes  
UFC

Profa. Patrícia Sueli de Rezende  
CEFET

Profa. Clésia Cristina Nascentes  
UFMG

Prof. Fernando Barboza Egreja Filho  
UFMG

Belo Horizonte, 30 de setembro de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Leticia Malta Costa, Professora do Magistério Superior**, em 30/09/2025, às 19:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando Barboza Egreja Filho, Professor do Magistério Superior**, em 30/09/2025, às 20:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patrícia Sueli de Rezende, Usuária Externa**, em 01/10/2025, às 05:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gisele Simone Lopes, Usuária Externa**, em 01/10/2025, às 07:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Clesia Cristina Nascentes, Professora do Magistério Superior**, em 03/10/2025, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mariana Ramos de Almeida, Professora do Magistério Superior**, em 10/10/2025, às 20:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4593513** e o código CRC **6619C450**.

## **Agradecimentos**

Chegar ao final desta jornada acadêmica é, sem dúvida, uma conquista que não teria sido possível sem o apoio e a presença de muitas pessoas especiais. Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força e perseverança nos momentos mais desafiadores, à minha família, meu alicerce, agradeço o amor incondicional, paciência e incentivo em todos os momentos — especialmente nos dias em que pensei em desistir. Principalmente depois que perdemos uma pessoa tão especial em nossas vidas – meu pai. Cada gesto de apoio foi essencial para que eu seguisse em frente.

A minha orientadora Letícia e a minha coorientadora Mariana, minha sincera gratidão por toda a orientação, dedicação, confiança em meu trabalho e paciência. O conhecimento e olhar crítico de vocês foram fundamentais para o desenvolvimento desta tese. Aos colegas do LAQUAFOR (Fernanda, Greg e Ana) agradeço pelas trocas de conhecimento, pelo companheirismo e pelas discussões enriquecedoras que tanto contribuíram para minha formação. Aos membros da banca, que aceitaram fazer parte desta defesa.

Aos amigos Diego, Luiza, Larissa, Daniele, Júlia e Tainara que estiveram por perto nos bons e maus momentos, meu carinho e gratidão. Obrigado por acreditarem em mim, mesmo quando eu duvidava de mim mesma. Por fim, agradeço a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho se tornasse realidade. Cada um deixou uma marca importante nesta caminhada.

Muito obrigada.

## RESUMO

As barragens, principais estruturas de contenção de rejeitos, têm apresentado falhas graves, como nos desastres de Mariana (2015) liberando 45 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos tóxicos, causando mortes, destruição e poluição ao longo de todo o rio Doce. Com o objetivo de determinar a concentração de metais e metaloides em amostras de águas superficiais e sedimentos, empregando os limites estabelecidos nas resoluções CONAMA 357/05 e 454/12 como diretrizes ambientais, além da sua avaliação sazonal por meio de ferramentas quimiométricas realizou-se coletas trimestrais e semestrais para águas superficiais e sedimentos, respectivamente. Após a coleta e análise das amostras de águas superficiais observou-se que dentre os 23 analitos analisados apenas as concentrações determinadas para Al (100 µg L<sup>-1</sup>), As (10 µg L<sup>-1</sup>), Fe (300 µg L<sup>-1</sup>), Cr (50 µg L<sup>-1</sup>), Mn (100 µg L<sup>-1</sup>), Ni (25 µg L<sup>-1</sup>), P (100 µg L<sup>-1</sup>) e Pb (10 µg L<sup>-1</sup>) apresentaram valores acima dos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 para as águas doces de classe 2. Enquanto para sedimentos determinou-se 20 analitos, na qual apenas as concentrações de As (nível 1 = 5,9 mg/kg e nível 2 = 17 mg/kg), Cr (nível 1 = 37,3 mg/kg e nível 2 = 90 mg/kg), e Pb (nível 1 = 35 mg/kg e nível 2 = 91,3 mg/kg), apresentaram valores superiores aos estabelecidos pela resolução CONAMA 454/12. De modo a tentar verificar uma correlação entre os dados obtidos empregou-se a análise de componentes principais para ambas as amostras. Em seguida as concentrações determinadas para as amostras de águas superficiais e sedimentos foram comparadas com os mapas de uso dos solos e a partir deles identificou-se algumas possíveis fontes de contaminação, como por exemplo liberação de efluentes domésticos não tratados no leito do rio (área urbana), agropecuária (pastagem e mosaico de usos), silvicultura, mineração, dentre outros usos do solo. O grau de contaminação, o índice de geoacumulação e o fator de enriquecimento, métricas empregadas para avaliar a contaminação por metais em sedimentos e/ou águas superficiais, calculados cada analito em cada um dos pontos de coleta, exceto para o cálculo do grau de contaminação, demonstraram valores preocupantes para alguns elementos. Avaliando-se os dados obtidos neste trabalho com os da literatura, passados 10 anos do rompimento da barragem de Fundão em novembro de 2015, pode-se observar os efeitos do rompimento da barragem de Fundão nas águas superficiais e nos sedimentos coletados no rio Doce até o presente momento.

**Palavras Chaves:** Fundão; contaminantes inorgânicos; PCA; uso do solo; fator de enriquecimento.

## ABSTRACT

The dams, main waste containment structures, have presented serious failures, as in the disasters of Mariana (2015) releasing 45 million m<sup>3</sup> of toxic waste, causing deaths, destruction and pollution along the entire Doce river. To determine the concentration of metals and metalloids in samples of surface waters and sediments, using the limits established in CONAMA resolutions 357/2005 and 454/2012 as environmental guidelines, in addition to its seasonal evaluation by means of chemometric if quarterly and biannual collections for surface waters and sediments, respectively. After the collection and analysis of surface water samples, it was observed that among the 23 analytes analyzed only the concentrations determined for Al (100 µg L<sup>-1</sup>), As (10 µg L<sup>-1</sup>), Fe (300 µg L<sup>-1</sup>), Cr (50 µg L<sup>-1</sup>), Mn (100 µg L<sup>-1</sup>), Ni (25 µg L<sup>-1</sup>), P (100 µg L<sup>-1</sup>) and Pb (10 µg L<sup>-1</sup>) showed values above the maximum limits established by CONAMA Resolution 357/05 for freshwater class 2. While for sediments were determined 20 analytes, in which only the concentrations of As (level 1 = 5.9 mg/kg and level 2 = 17 mg/kg), Cr (level 1 = 37.3 mg/kg and level 2 = 90 mg/kg), and Pb (level 1 = 35 mg/kg and level 2 = 91.3 mg/kg), showed values higher than those established by CONAMA resolution 454/12. To verify a correlation between the data obtained, the analysis of main components for both samples was used. Then the concentrations determined for the samples of surface water and sediment were compared with the land use maps and from them some possible sources of contamination were identified, such as release of untreated domestic effluents in the river bed (urban area), agriculture (pasture and mosaic of uses), forestry, mining, among other land uses. The degree of contamination, the geoaccumulation index and the enrichment factor, metrics used to evaluate metal contamination in sediments and/or surface waters, calculated each analyte at each of the collection points, except for the calculation of the degree of contamination, showed worrying values for some elements. Evaluating the data obtained in this work with those of the literature, 10 years after the rupture of the Fundão dam in November 2015, it is possible to observe the effects of the rupture of the Fundão dam on surface waters and sediments collected in the Doce river until now.

**Keywords:** soil; inorganic contaminants; PCA; land use; enrichment factor.

## Lista de Figuras

Figura 1. Participação das exportações minerais brasileiras em 2024 (em reais) <sup>5</sup> .....	20
Figura 2. Quantidade de municípios por Estado com atividades mineradora. <sup>5</sup> .....	21
Figura 3. Características de uma barragem que se insere na PNSB <sup>15</sup> . .....	24
Figura 4. Circunscrições hidrográficas do estado de Minas Gerais e as UPGRHs da Bacia do Rio Doce (adaptada) <sup>27</sup> . .....	26
Figura 5. Potencial de produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Doce <sup>28</sup> . .....	28
Figura 6. Consumo de água por setor em cada circunscrição hidrográfica de Minas Gerais <sup>27</sup> . .....	30
Figura 7. Distribuição de Barragens de Rejeitos na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (adaptada) <sup>38</sup> .....	31
Figura 8. Distribuição de Barragens de Rejeitos na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (adaptada) <sup>38</sup> .....	32
Figura 9. Imagens de satélite das barragens da Samarco (A) e do povoado de Bento Rodrigues (B) antes e após o rompimento da Barragem de Fundão <sup>55</sup> . .....	34
Figura 10. Trajeto da onda de lama gerada pela ruptura da barragem de rejeito de Fundão (adaptada) <sup>32,55</sup> . .....	35
Figura 11. Pontos de monitoramento de qualidade da água superficial da rede básica com (vermelho) e sem (preto) medições de vazão, em 2021 <sup>85</sup> .....	39
Figura 12. Fluxograma geral do método aplicado para as amostras de águas superficiais. ....	49
Figura 13. Fluxograma geral do método aplicado para as amostras de sedimentos.....	50
Figura 14. Localização dos pontos de coleta na bacia do rio Doce: em vermelho pontos de coleta do rio Doce e em azul do rio Santo Antônio. ....	54

Figura 15. Esquema para determinação de metais totais em amostras de águas superficiais.....	55
Figura 16. Esquema para determinação de metais dissolvidos em amostras de águas superficiais.....	56
Figura 17. Esquema para extração e determinação de metais em amostras de sedimentos. ....	57
Figura 18. Análise dos componentes principais das nove coletas realizadas para todos os elementos quantificados. (A e C) Gráfico de scores versus amostras. (B e D) Gráfico de loadings versus variáveis. (▼) Abril/2022. (*) Julho/2022. (■) Outubro/2022 (+) Janeiro/2023. (◇) Abril/2023. (▲) Julho/2023. ( ) Outubro/2023. (●) Janeiro/2024. (●) Abril/2024.....	78
Figura 19. Análise dos componentes principais das nove coletas realizadas para os elementos que obtiveram concentrações acima do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005. (A e C) Gráfico de scores versus amostras. (▼) Abril/2022. (*) Julho/2022. (■) Outubro/2022 (+) Janeiro/2023. (◇) Abril/2023. (▲) Julho/2023. ( ) Outubro/2023. (●) Janeiro/2024. (●) Abril/2024. ....	79
Figura 20. Análise dos componentes principais realizada no período de um ano. Gráficos Biplot. (A) Abril (B) Julho (C) Outubro (D) Janeiro. (*) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (●) Rio Santo Antônio. (+) Contaminantes inorgânicos acima do limite da Resolução CONAMA 357/2005.....	81
Figura 21. Determinação da concentração para Al, As, Cr, Fe, Mn, Ni, P e Pb em 21 pontos de coleta ao longo da bacia do rio Doce em nove coletas. (●) Janeiro/2024. (■) Abril/2022. (▼) Janeiro/2023. (▲) Outubro/2022. (►) Outubro/2023. (◄) Julho/2023. (◆) Abril/2023. (●) Julho/2022. (●) Abril/2024. A linha vermelha destaca o limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA/2005. RD: Rio Doce. SA: Rio Santo Antônio. (■) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (■) Rio Santo Antônio. ....	83
Figura 22. Uso do solo para os pontos RD.3, RD.10 e SA.21. ....	85
Figura 23. Uso do solo para os pontos RD.1, RD.3, RD.12 e RD.13. ....	86
Figura 24. Uso do solo para os pontos SA.17, SA.18 e SA.19. ....	87

Figura 25. Análise dos componentes principais das quatro coletas realizadas para todos os elementos analisados. (A e C) Gráfico de scores versus amostras. (B e D). Gráfico de loadings versus variáveis. (▼) Abril/2023. (\*) Outubro/2023. (■) Abril/2024 (+) Outubro/2024..... 103

Figura 26. Análise multivariada das quatro coletas realizadas para As, Cd, Cr, Mn, Pb e Zn. (A e C) Gráfico de scores versus amostras. (B e D) Gráfico de loadings versus variáveis. (▼) Abril/2023. (\*) Outubro/2023. (■) Abril/2024 (+) Outubro/2024. .... 104

Figura 27. Gráficos Biplot das quatro coletas realizadas com os elementos com concentrações acima do limite da Resolução CONAMA 454/2012. (A) divisão por coletas. (▼) Abril/2023. (\*) Outubro/2023. (■) Abril/2024 (+) Outubro/2024. (B) divisão por entre Rio Doce – Alto e Médio e Santo Antônio. (◇) Alto Rio Doce. (▲) Médio Rio Doce. ( ) Santo Antônio..... 105

Figura 28. Determinação da concentração para As, Cd, Cr, Mn, Pb e Zn nos 21 pontos de coleta ao longo da bacia do rio Doce em quatro coletas. (■) Abril/2023. (▼) Outubro/2023. (▲) Abril/2024. (●) Outubro/2024. A linha preta destaca o nível 1 e a linha vermelha destaca o nível 2 dos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA 454/2012. RD: Rio Doce. SA: Rio Santo Antônio. (■) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (■) Rio Santo Antônio. .... 107

Figura 29. Uso do solo para os pontos RD.2, RD.8, RD.11 e SA.17..... 109

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Principais eventos envolvendo barragens de mineração no estado de Minas Gerais noticiados pela mídia (adaptada) <sup>16</sup> . .....	23
Tabela 2. Condições operacionais utilizadas na quantificação dos analitos por ICP-MS. ....	58
Tabela 3. Classificação para os níveis de contaminação dos sedimentos a partir do índice de geoacumulação.....	63
Tabela 4. Classificação dos valores do fator de enriquecimento.....	64
Tabela 5. Classificação dos valores do grau de contaminação.....	65
Tabela 6. Figuras de mérito obtidas para a determinação de Ag, Al (dissolvido), As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu (dissolvido), Fe (dissolvido), Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn por ICP-MS usando Rh como padrão interno em águas superficiais. ....	68
Tabela 7. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, $n = 3$ ) no SRM NIST 1640a usando ICP-MS com padronização interna. ....	70
Tabela 8. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, $n = 3$ e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS. ....	71
Tabela 9. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, $n = 3$ e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS (continuação). ....	72
Tabela 10. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, $n = 3$ e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS (continuação). ....	73
Tabela 11. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, $n = 3$ e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS (continuação). ....	74
Tabela 12. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, $n = 3$ e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS (continuação). ....	75

Tabela 13. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, n = 3 e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS (continuação). .....	76
Tabela 14. Figuras de mérito obtidas para a determinação de Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn por ICP-MS usando Rh como padrão interno em sedimentos. ....	95
Tabela 15. Determinação de As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, n = 3) no SRM NIST 1944 usando ICP-MS com padronização interna. ....	97
Tabela 16. Experimento de adição e recuperação para As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, n = 3 e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS. ....	98
Tabela 17. Experimento de adição e recuperação para As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, n = 3 e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS (continuação). ....	99
Tabela 18. Experimento de adição e recuperação para As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, n = 3 e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS (continuação). ....	100
Tabela 19. Experimento de adição e recuperação para As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média $\pm$ desvio padrão, n = 3 e % de recuperação $\pm$ DPR) usando padronização interna por ICP-MS (continuação). ....	101

# Sumário

<b>Introdução .....</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo 1. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>17</b>
1.1. MINERAÇÃO .....	19
1.2. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE .....	25
1.3. DESASTRE DE MARIANA - O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO.....	32
1.4. AVALIAÇÃO DOS SEDIMENTOS E ÁGUAS SUPERFICIAIS DO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO .....	38
<b>Capítulo 2. Objetivos .....</b>	<b>46</b>
2. OBJETIVOS.....	47
2.1 OBJETIVO GERAL .....	47
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	47
<b>Capítulo 3. Parte Experimental.....</b>	<b>48</b>
3.1. FLUXOGRAMAS DOS MÉTODOS APLICADOS PARA AS AMOSTRAS DE ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTO.....	49
3.2. MATERIAIS E REAGENTES .....	49
3.3. PREPARO DAS CURVAS ANALÍTICAS PARA ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS.....	51
3.4. COLETA DAS AMOSTRAS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO DOCE.....	52
3.5. PREPARO DAS AMOSTRAS POR DIGESTÃO ÁCIDA ASSISTIDA POR RADIAÇÃO MICRO-ONDAS COM FRASCOS PRESSURIZADOS .....	54
3.5.1. ÁGUAS SUPERFICIAIS .....	54
3.5.2. SEDIMENTOS .....	56
3.6. INSTRUMENTAÇÃO.....	57

3.7 PARÂMETROS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÕES POR ICP-MS EM AMOSTRAS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS .....	58
3.8 AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PARA AMOATRAS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS .....	60
3.9 GEOPROCESSAMENTO .....	61
3.9.1 MAPBIOMAS – USO DA TERRA E COBERTURA DO SOLO (LULC) .....	61
3.9.2 ALTIMETRIA E DADOS DO SOLO .....	62
3.10 ÍNDICE DE GEOACUMULAÇÃO EM AMOSTRAS DE SEDIMENTO - $I_{geo}$ .....	62
3.11 FATOR DE ENRIQUECIMENTO PARA AMOSTRAS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS .....	63
<b>Capítulo 4. Águas Superficiais .....</b>	<b>66</b>
4.1 PARÂMETROS ANALÍTICOS DETERMINADOS POR ICP-MS.....	66
4.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS TOTAIS E DISSOLVIDOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE POR ICP-MS.....	77
<b>Capítulo 5. Sedimentos .....</b>	<b>93</b>
5.1 PARÂMETROS ANALÍTICOS DETERMINADOS POR ICP-MS.....	93
5.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS E METALOIDES EM AMOSTRAS DE SEDIMENTOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE .....	102
<b>Capítulo 6. Conclusão .....</b>	<b>113</b>
<b>Referências.....</b>	<b>115</b>
<b>Apêndice.....</b>	<b>130</b>

## INTRODUÇÃO

A atividade mineradora no Brasil remonta ao século XVIII, com a extração de ouro e diamantes por métodos rudimentares. Esses processos, apesar de economicamente relevantes, geraram extensivos impactos ambientais desde o início, como o descarte de rejeitos diretamente no ambiente. Com a Revolução Industrial, a exploração mineral se intensificou, aumentando a produção de rejeitos que passaram a afetar os corpos d'água. Somente a partir da segunda metade do século XX, com legislações ambientais mais rigorosas, começaram a surgir medidas de controle, como a construção de barragens de contenção de rejeitos<sup>1</sup>.

O Brasil ocupa posição de destaque global na mineração, em razão de sua vasta extensão territorial e rica diversidade geológica. Em 2024, o setor mineral faturou R\$ 270,8 bilhões, com o minério de ferro liderando as exportações, responsável por US\$ 29,8 bilhões<sup>2</sup>. Minas Gerais e Pará concentram mais de 76% desse faturamento, impulsionados por grandes empresas como Vale S.A. e CSN<sup>3</sup>. Apesar da importância econômica e dos investimentos em infraestrutura, a mineração causa severos impactos ambientais, como erosão, perda de solo, desmatamento, poluição hídrica e atmosférica. Estima-se que, para cada tonelada de ferro produzida, cerca de 1,5 tonelada de rejeitos seja gerada, agravando os desafios ambientais do setor.

As barragens de contenção, embora essenciais para o controle desses impactos, têm apresentado falhas críticas de segurança. Exemplos marcantes são os desastres de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), que escancararam a vulnerabilidade das estruturas e a necessidade de rigor nas normas e na fiscalização. A Lei nº 12.334/2010 instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), com foco em prevenção e transparência. No entanto, em 2024, o Brasil possuía 25.943 barragens registradas, sendo que 1.277 estavam em situação crítica e muitas ainda careciam de informações básicas sobre segurança, o que representa um risco constante para o meio ambiente e as populações vizinhas<sup>4,5</sup>.

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce, localizada entre Minas Gerais e Espírito Santo, é uma das regiões mais afetadas pela atividade mineradora. Com uma área de drenagem de aproximadamente 86.715 km<sup>2</sup>, a bacia abriga cerca de 3,5 milhões de habitantes e inclui 229 municípios. O rio Doce percorre 850 km até desaguar no Oceano Atlântico, atravessando terrenos acidentados, conhecidos como “mar de morros”, o que limita o uso intensivo do solo e eleva os riscos de erosão e inundações. A bacia é dividida administrativamente em nove

Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs e comitês de bacia), e, apesar de sua importância, ainda não possui um enquadramento definitivo para qualidade da água, adotando provisoriamente a Classe 2, que permite o uso para abastecimento humano, recreação e irrigação<sup>6,7</sup>.

A degradação ambiental na bacia é intensa, provocada pela mineração, desmatamento, erosão e assoreamento dos cursos d'água. Os solos predominantes — Latossolos e Argissolos — são altamente intemperizados, com baixa fertilidade e suscetíveis à concentração de metais e metaloides tóxicos, como arsênio, cádmio e chumbo. A geoquímica natural, associada à atividade mineradora, aumenta os riscos de contaminação ambiental e afeta negativamente a qualidade da água e do solo. A bacia também abriga grande biodiversidade, principalmente do bioma Mata Atlântica, e tem relevância econômica pela geração de energia (10 usinas hidrelétricas), siderurgia, produção de celulose e laticínios.

O rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana, em 2015, destacou de forma dramática os riscos associados à mineração irresponsável. Operada pela Samarco (Vale e BHP Billiton), a barragem liberou cerca de 45 milhões de metros cúbicos de rejeitos tóxicos, causando a morte de 19 pessoas, a destruição do distrito de Bento Rodrigues e a contaminação de toda a calha do rio Doce até o litoral capixaba<sup>8</sup>. O desastre é considerado o maior do tipo no mundo, gerando impactos profundos e duradouros. Os rejeitos continham altas concentrações de metais como arsênio, cromo, cádmio e níquel — muitos acima dos limites estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) — e causaram perda de biodiversidade, destruição de habitats e ameaça à saúde humana.

Estudos pós-desastre revelam a persistência dos efeitos ao longo dos anos, com risco constante de remobilização de metais pesados por ação de chuvas ou ventos. A contaminação atinge a cadeia alimentar e pode gerar doenças graves, sobretudo em populações vulneráveis. Para mitigar esses impactos e orientar a recuperação ambiental da bacia, são fundamentais ações integradas de monitoramento e gestão, como os programas PMQQS (Programa de Monitoramento da Qualidade da Água Subterrânea) e as iniciativas do IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas), que monitoram a qualidade da água e sedimentos. A geoquímica ambiental, por meio de mapeamentos e acompanhamento contínuo como o realizado neste trabalho, é essencial para nortear medidas eficazes de recuperação e uso sustentável da bacia hidrográfica do rio Doce.

**Capítulo 1.**  
**Revisão Bibliográfica**



## 1.1. MINERAÇÃO

A atividade de mineração no Brasil iniciou-se há cerca de 300 anos, principalmente com a extração de ouro e diamante. O processo de extração utilizava de técnicas e ferramentas rudimentares, gerando rejeitos que eram considerados desprezíveis e descartados diretamente na natureza. No entanto, com o advento da Revolução Industrial, houve um aumento na demanda e na exploração de insumos minerais, produzindo uma crescente geração desses rejeitos<sup>9</sup>. O desenvolvimento tecnológico após a Revolução aumentou a habilidade de minerar substâncias com baixo teor mineral, resultando na produção ainda maior de rejeitos e com menor granulometria. Consequentemente, estes rejeitos foram depositados e transportados para distâncias cada vez maiores das fontes geradoras, alcançando os cursos d'água, lagos e oceanos<sup>9</sup>.

Até o final dos anos 1960, década em que se iniciaram os movimentos ambientais e culminou numa regulamentação ambiental mais restritiva e estruturada por parte dos países mais desenvolvidos, a preocupação com os impactos gerados pela mineração e a remediação destes eram mínimas<sup>10</sup>. A disposição inadequada de rejeitos foi coibida somente após a criação de dispositivos legais, que levaram as indústrias a investirem na construção das primeiras barragens de contenção de rejeitos<sup>9</sup>.

O Brasil é um país de extensão continental que possui uma grande diversidade geológica, motivo pelo qual se apresenta numa excelente posição no cenário global tanto em reservas quanto em produção mineral<sup>11,12</sup>. No ano de 2023, o valor da produção mineral brasileira representou cerca de 4 % do PIB do país. Em 2024 o faturamento do setor mineral foi de R\$ 270,8 bilhões, 9,1% de aumento em relação a 2023. Sendo assim, R\$ 43,4 bilhões do faturamento do setor em 2024 vieram dos produtos de exportação do setor mineral, sendo somente o minério de ferro responsável por US\$ 29,8 bilhões deste valor<sup>13</sup>, destacando a relevância do setor mineral para a economia brasileira.

Dentre os estados brasileiros, Minas Gerais, juntamente com o Pará, são os estados mineradores mais importantes do país, apresentando respectivamente 40% e 36,1%, ou seja, juntos os dois Estados possuem 76,1% de participação no faturamento no setor mineral do Brasil (Figura 1A). A VALE S/A (MG, MS e PA), a CSN-MINERAÇÃO (MG), a Anglo American Minério de Ferro Brasil S/A (MG), a Gerdau Açominas S/A (MG) e a Itaminas

Comércio de Minérios S/A (MG) foram as principais empresas produtoras e, juntas, respondem por 93,2% da produção nacional<sup>14</sup>.

O minério de ferro é a principal *commodity* mineral do Brasil responsável por 68,7% do valor das exportações minerais brasileiras em 2024, seguido pelo cobre (9,6%) e pelo ouro (9,1%) como representado pela Figura 1B<sup>13</sup>. As reservas brasileiras de minério de ferro representam aproximadamente 19,8% das reservas mundiais de minério de ferro. Estas são encontradas nos estados de Minas Gerais (74,4% das reservas e teor médio de 41,1% de Fe), Pará (19,5% e teor médio de 65,6% de Fe) e Mato Grosso do Sul (2,2% e teor médio de 63,7% de Fe)<sup>14</sup>.

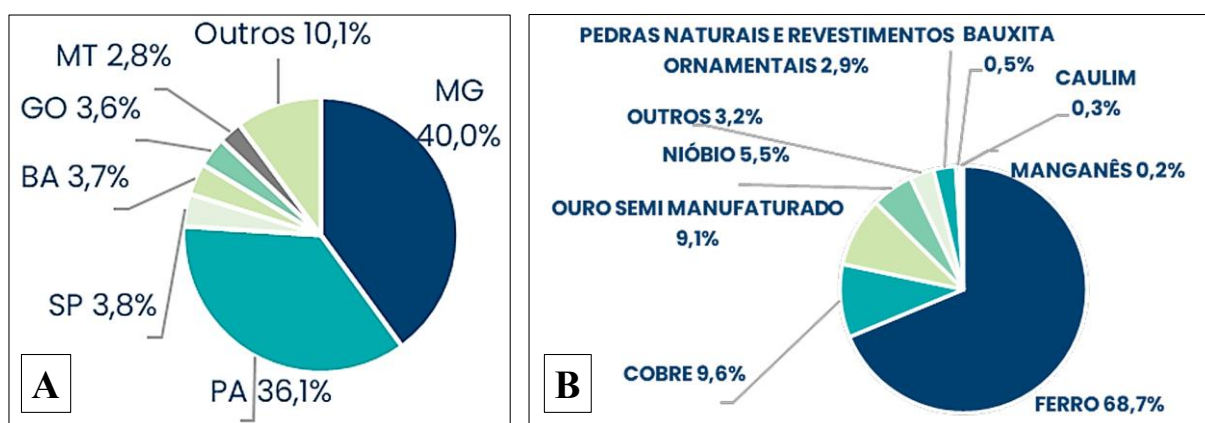


Figura 1. Participação das exportações minerais brasileiras em 2024. (A) Divisão por estados. (B) Divisão por *commodity* mineral<sup>13</sup>.

A indústria mineral brasileira é formada pelos segmentos empresariais de mineração e transformação mineral<sup>15</sup>, sendo responsável por inúmeros investimentos no Brasil e com papel fundamental no avanço econômico do estado de Minas Gerais<sup>12</sup>. A região do quadrilátero ferrífero, com cerca de 7 mil quilômetros quadrados, abrange a parte ocidental da Mata Atlântica no centro de Minas Gerais e tem a mineração e a metalurgia como suas principais atividades industriais<sup>10</sup>. A atividade mineradora no estado está presente em mais de 525 municípios (Figura 2) com mais de 300 minas em operação, abrigando sete dos dez maiores municípios mineradores<sup>9,16</sup>.

RANKING Nº MUN.	ESTADO	Nº MUNICÍPIOS - 2024 MINERAÇÃO
1	Minas Gerais	525 (62%)
2	São Paulo	363 (56%)
3	Rio Grande do Sul	243 (49%)
4	Bahia	200 (48%)
5	Paraná	193 (48%)
6	Santa Catarina	191 (65%)
7	Goiás	161 (65%)
8	Mato Grosso	96 (68%)
9	Ceará	96 (52%)
10	Pará	73 (51%)
11	Rio de Janeiro	70 (76%)
12	Espírito Santo	63 (81%)
	Subtotal	2.274
	OUTROS	531
	TOTAL	2.805

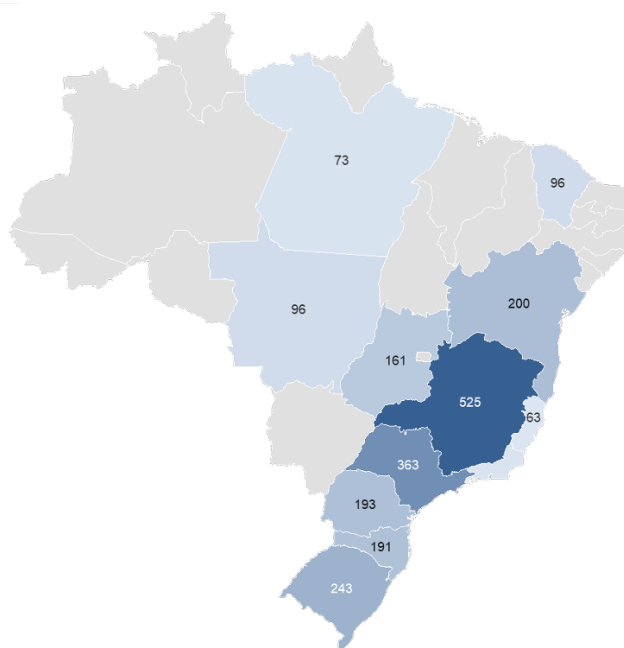


Figura 2. Quantidade de municípios por Estado com atividades mineradora.<sup>13</sup>

Como exposto, o setor mineral tem importante contribuição socioeconômica para o país. Este responde por significativa parte do crescimento do produto interno bruto (PIB), o que possibilita investimentos em infraestrutura, desenvolvimento de tecnologia e no aprimoramento da qualificação profissional. No entanto, a mineração é uma atividade industrial de uso temporário da terra que requer uma alteração das condições ambientais naturais (como a modificação da topografia local, a supressão da vegetação, etc.) de forma a suprir à sociedade moderna com os minerais e energias necessários para o desenvolvimento da população<sup>10,17</sup>.

Praticamente 98% da produção de minério de ferro utilizável no mundo é consumida em altos-fornos no processo de fabricação de ferro gusa e ferro esponja visando a produção de aço. Para ser considerado comercialmente utilizável, o minério deve ser beneficiado visando teores e granulometrias adequadas. Na indústria siderúrgica, o teor de ferro adequado deve ser superior a 58% e com exceção de alguns importantes depósitos no Brasil e na Austrália, a maioria dos depósitos de minério de ferro no mundo são de baixo teor de ferro e exige beneficiamento, ou seja, os depósitos brasileiros são considerados de alto teor de ferro com baixos teores de impurezas<sup>18</sup>. Nas usinas de beneficiamento, o minério de ferro bruto (material obtido direto da lavra) passa pelos processos de preparação (britagem, peneiramento e lavagem) e classificação (separação por granulometria). Após o beneficiamento, o minério de ferro é transportado para os pátios de estocagem das usinas siderúrgicas ou, em caso de exportação, direcionados aos portos<sup>18</sup>.

Nesse sentido, durante a extração mineral, o processo de beneficiamento produz grandes quantidades de rejeitos. Por exemplo, para se obter uma tonelada métrica de ferro são geradas cerca de 1,5 toneladas de rejeito de minério de ferro. No contexto da mineração, o rejeito é definido como o resíduo ou subproduto não econômico gerado durante as atividades de mineração, contendo pequenas quantidades de minerais valiosos residuais, produtos químicos, água e metais pesados<sup>19</sup>. Considerando as minas metálicas e não metálicas, as estatísticas de mineração mostram que a quantidade de rejeitos produzidos representa aproximadamente 99% da matéria-prima total.

Os principais impactos ambientais gerados pela mineração na superfície terrestre são a erosão, a perda e deterioração do solo, a deposição diferencial de material erodido e transportado e o preenchimento de vales com rejeitos. Tais impactos frequentemente alteram as paisagens naturais, que em sua maioria, não podem ser restauradas. Entretanto, o maior problema associado à destruição dessas paisagens é que essas constituem ecossistemas naturais específicos para algumas espécies de plantas e animais, ocasionando a redução do uso da área por determinados organismos silvestres e um consequente desaparecimento de espécies da flora e fauna presentes<sup>10,19-21</sup>.

Atividades minerárias a céu aberto liberam grandes quantidades de material particulado na atmosfera, e infelizmente são as mais empregadas no Brasil. O revolvimento do solo causado pelo maquinário na lavra, bem como pelo transporte de solo, minério e estéréis (rochas diferentes do minério ou com teor inferior ao economicamente lavrável), no uso de explosivos nos desmontes e na moagem, dispersam o material particulado produzido nos diversos processos da mineração sobre a vegetação e sobre os sítios urbanos, interferindo significativamente na qualidade do ar<sup>19,22</sup>. Para tentar minimizar a emissão desses materiais particulados, a água é utilizada como principal recurso na lavagem de maquinários e vias de tráfego, além de mantas ou coberturas de vegetação em pilhas de estéril e na cava de mina<sup>10</sup>.

Absolutamente necessária como recurso na mineração, a água abrange a exploração da jazida, os processos de beneficiamento do minério e as ações após o término da atividade no local. Desse modo, a poluição dos recursos hídricos na mineração se dá pelo transporte de material particulado das áreas decapeadas (mina, pilha de estéril, estrada, pátios etc.) por água pluvial, pelo lançamento de rejeitos ou efluentes nos cursos de água, pela deposição de resíduos sólidos, bem como pelo rebaixamento do lençol nos cursos de água, turbilhonamento das aluviões na operação de dragagem e pelo lançamento de esgotos sanitários, óleos e graxas<sup>10,19,22</sup>.

Com o objetivo de minimizar e prevenir, de maneira significativa, o assoreamento e a funcionalidade dos rios a jusante das áreas de mineração implantou-se a construção das barragens de contenção<sup>10</sup>. Nesse sentido, a estabilidade dessas barragens é vital para a estocagem permanente dos efluentes líquidos e rejeitos sólidos gerados no tratamento dos minérios. No entanto, nos últimos 25 anos, alguns eventos significativos acenderam um sinal de alerta para a estabilidade das barragens de mineração<sup>10,23</sup>, destacando-se principalmente os dois últimos acidentes ocorridos na cidade de Mariana em 2015 e na cidade de Brumadinho em 2019, ambos no estado de Minas Gerais. A Tabela 1 apresenta alguns dos principais acidentes ocorridos envolvendo empresas mineradoras.

Tabela 1. Principais eventos envolvendo barragens de mineração no estado de Minas Gerais noticiados pela mídia (adaptada)<sup>24</sup>.

<b>Ano</b>	<b>Empresa</b>	<b>Município</b>	<b>Tipo de minério</b>	<b>Impactos</b>
<b>2001</b>	Mineração Rio Verde	Nova Lima	Ferro	Impacto ambiental e morte de pessoas
<b>2006</b>	Mineradora Rio Pomba Cataguases	Miraí	Bauxita	Impacto ambiental
<b>2007</b>	Mineradora Rio Pomba Cataguases	Miraí	Bauxita	Impacto ambiental e social
<b>2008</b>	Namisa	Congonhas	Ferro	Impacto social
<b>2008</b>	Não informado pelo Ibama	Itabira	Ouro	Não há registro de impactos
<b>2014</b>	Herculano Mineração	Itabirito	Ferro	Impacto ambiental e morte de pessoas
<b>2015</b>	Samarco Mineração S.A.	Mariana	Ferro	Impacto ambiental, social, econômico e morte de pessoas
<b>2019</b>	Vale S.A.	Brumadinho	Ferro	Impacto ambiental, social, econômico e morte de pessoas

As barragens são de grande importância para o desenvolvimento da sociedade, uma vez que essas possibilitam o armazenamento de água para os diversos fins, geração de energia, e para a retenção de resíduos minerais e/ou industriais, etc. Contudo, essas estruturas expõem a sociedade a elevados níveis de riscos, uma vez que seus possíveis rompimentos geram grandes problemas sociais e econômicos motivo pelo qual a regulamentação deste tema se fez tão necessária<sup>21,23</sup>.

Nesse sentido, em 20 de setembro de 2010 foi criada a Lei nº 12.334 que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Essa Lei tem como objetivo garantir a observância de padrões de segurança, regulamentar, promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, junto à população potencialmente afetada<sup>23</sup>.

Um ponto importante da Lei foi a delimitação de quais estruturas estariam ou não dentro da PNSB, como representado pela Figura 3. Para que uma barragem esteja dentro da Lei nº 12.334/2010 em plenitude, ela deve apresentar pelo menos uma das seguintes características<sup>23</sup>:

- Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a quinze metros;
- Capacidade total do reservatório maior ou igual a três milhões de metros cúbicos;
- Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;
- Categoria de dano potencial associado (DPA), médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas, conforme definido no art. 6º.

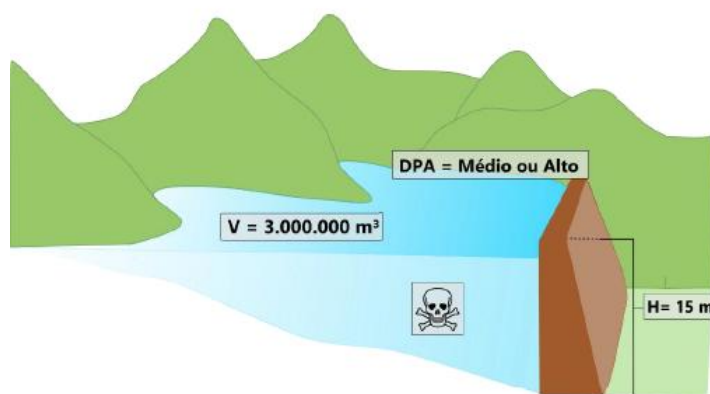


Figura 3. Características de uma barragem que se insere na PNSB<sup>23</sup>.

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens (RSB) emitido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) há 28.085 barragens cadastradas no ano base de 2024. Dentre este número, 14.801 (57%) barragens não foram verificadas quanto ao enquadramento na PNSB, outras 4.894 (19%) estão enquadradas na PNSB e o restante, 6.095 (24%) não estão enquadradas na PNSB. Sendo assim, são 53% (14.878) das barragens cadastradas não disponibilizaram informações suficientes para se avaliar se estão ou não de acordo à PNSB<sup>25</sup>.

A definição, por parte do órgão fiscalizador, se a barragem se submete ou não à PNSB é fundamental para qualquer aplicação dos instrumentos da Lei nº 12.334/2010 assim como para que a sociedade conheça qual o universo de barragens que geram algum tipo de preocupação em caso de eventual rompimento, o que permite a fiscalização de seus empreendedores quanto à manutenção da segurança de suas barragens em aspecto estrutural ou documental<sup>25</sup>

Em 2023, foi reportada a existência de 1748 (28%) barragens em estado crítico (a maioria baseada no estado de conservação ou na classificação quanto ao DPA e a CRI – Categoria de Risco), distribuídas por região<sup>25</sup>. Diante do exposto, a falha no monitoramento das condições de operação das barragens ou a negligência em cumprir protocolos de segurança podem agravar os impactos sociais e ambientais irreversíveis a médio e longo prazo, como o rompimento da Barragem do Fundão da Samarco Mineração S.A.<sup>21</sup> e da Barragem do Córrego do Feijão da Vale S.A.

## **1.2. A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE**

Localizados inteiramente em território mineiro, o rio do Carmo e o rio Piranga possuem respectivamente 134 e 470 quilômetros de extensão, desde sua nascente, no município de Ouro Preto (MG) (rio do Carmo) e de Ressaquinha (MG) (rio Piranga)<sup>26,27</sup>. A partir da confluência destes rios há a formação do rio Doce, que dá nome a bacia hidrográfica do rio Doce.

Localizada no sudeste do Brasil, entre os estados de Minas Gerais e Espírito Santo, a bacia hidrográfica do rio Doce possui uma área de drenagem de aproximadamente 86.715 km<sup>2</sup>, dos quais 86% pertencem ao estado de Minas Gerais e o restante ao estado do Espírito Santo<sup>28,29</sup>. Percorrendo aproximadamente 850 km do planalto do estado de Minas Gerais, nas serras da Mantiqueira e do Espinhaço, e subdividido em alto curso (a montante do confluência dos rios Doce e Piracicaba), médio curso (a jusante da confluência dos rios Doce e Piracicaba até a

divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo) e baixo curso (da divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo até a foz do rio Doce), o rio Doce também integra na divisão hidrográfica federal a Bacia do Atlântico Sudeste<sup>30-33</sup>.

Dentro do estado de Minas Gerais, a bacia hidrográfica do rio Doce é subdividida em seis Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRHs), as quais correspondem às seguintes sub-bacias e seus respectivos Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs): rio Piranga (DO1), rio Piracicaba (DO2), rio Santo Antônio (DO3), rio Suaçuí (DO4), rio Caratinga (DO5) e rio Manhuaçu (DO6), como apresentado na Figura 4. Por sua vez, no estado do Espírito Santo não há subdivisões administrativas, tem-se apenas os comitês da bacia do rio Santa Maria do Doce, do rio Guandu e do rio São José<sup>31,32,34</sup>.

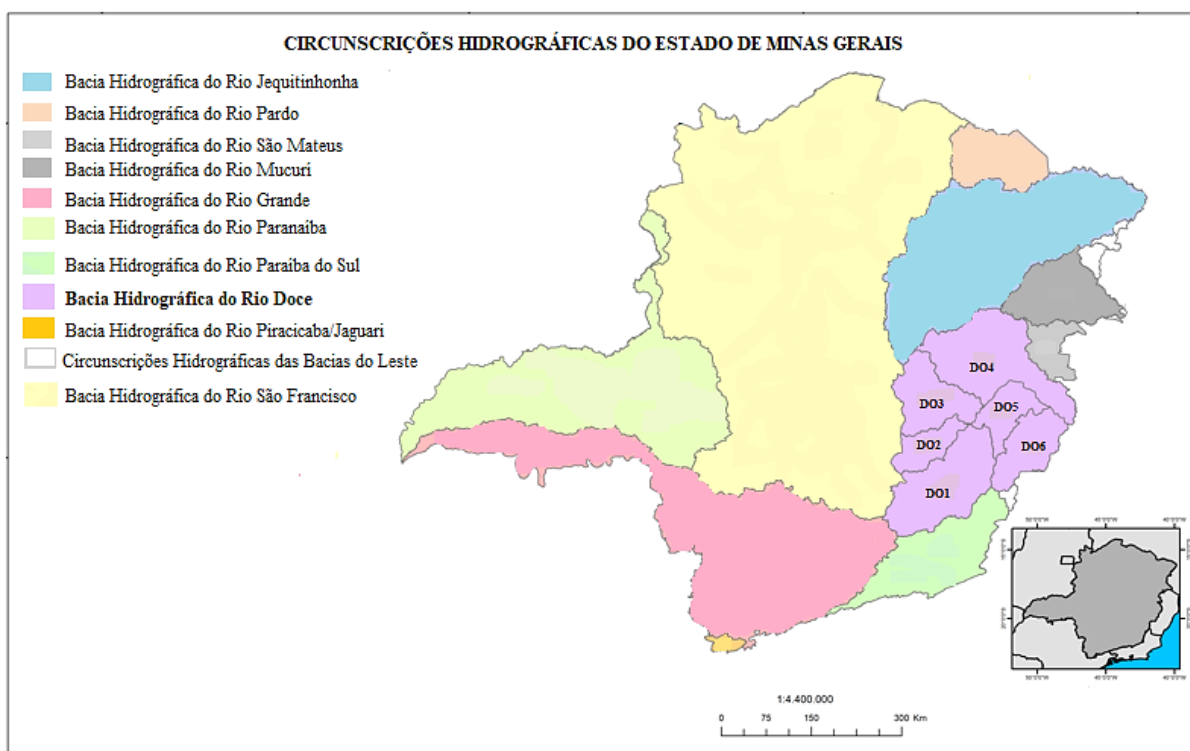


Figura 4. Circunscrições hidrográficas do estado de Minas Gerais e as UPGRHs da Bacia do Rio Doce (adaptada)<sup>35</sup>.

O relevo da bacia do rio Doce é bastante acidentado, motivo pelo qual é caracterizado como um “mar de morros”. Em função de suas declividades, há uma forte limitação às atividades econômicas e a ocupação urbana do solo, fazendo com que a população se concentre junto ao talvegue dos cursos de água, ou seja, em áreas suscetíveis a inundações<sup>32,34</sup>. O canal do rio Doce possui padrões geomorfológicos diferenciados com segmentos de meandros, retilíneos, anastomosados e ainda existem a presença de ilhas, principalmente no médio curso.

As planícies fluviais são amplas e os terraços, em sua maioria, constituídos por material arenoso e argilo-arenoso, com cerca de três metros de desnível<sup>31,34</sup>. Por sua vez, o regime pluviométrico na bacia é caracterizado por dois períodos bem distintos. O período chuvoso que se estende de outubro a março, com maiores índices no mês de dezembro, no qual a precipitação varia de 800 a 1300 mm, e o período seco que se estende de abril a setembro, com estiagem mais crítica de junho a agosto, com precipitação variando entre 150 a 250 mm<sup>32,34</sup>.

O enquadramento dos corpos d'água é um dos instrumentos previstos no Plano Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) e pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Estes estabelecem metas ou objetivos de qualidade de água para atender aos seus usos preponderantes, as quais devem ser aprovadas pelos conselhos de recursos hídricos. Durante a elaboração do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce (PIRH – Doce) gerou-se uma proposta de enquadramento para os 16 afluentes principais e para o próprio rio Doce, com o intuito de orientar o alcance das metas de qualidade previstas no plano. No entanto, foi identificada a necessidade de estudos complementares para consolidação da proposta, motivo pelo qual o rio Doce ainda não possui enquadramento aprovado no âmbito do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH)<sup>34,35</sup>.

Conforme a Resolução do CNRH nº 91/2008 e o art. 37 da Deliberação Normativa Conjunta, Copam/CERH-MG nº 01/2008, devem ser considerados nos corpos d'água superficiais ainda não enquadrados nos padrões de qualidade, a classe correspondente aos usos preponderantes mais restritivos existentes no respectivo corpo d'água, ou seja, para fins de cobrança, outorga, licenciamento ambiental ou até que a autoridade outorgante tenha informações sobre o uso mais restritivos do corpo d'água, poderá ser adotado para as águas superficiais do rio Doce a Classe 2 como enquadramento<sup>34,36</sup>. A Classe 2 são “águas que podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; para proteção das comunidades aquáticas; recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho; para irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e destinados à aquicultura e à atividade de pesca”<sup>37</sup>.

A bacia do rio Doce apresenta um quadro de grande supressão da cobertura vegetal, estando os remanescentes florestais restritos às áreas mais declivosas do terreno. As pastagens encontram-se bastante degradadas, o que proporciona uma superfície susceptível à erosão do solo e a volumes expressivos de sedimentos que são carregados aos cursos d'água (Figura 5). A

retirada da cobertura vegetal contribui para a remoção dos solos pela aceleração dos processos morfodinâmicos indicados por ravinas e sulcos. As características do solo e do relevo levam a bacia hidrográfica do rio Doce a uma condição de fragilidade quanto à susceptibilidade a erosão, com isso, 58% da área da bacia se encontra na categoria de susceptibilidade forte e 30% na categoria de susceptibilidade média<sup>32,34,38</sup>.

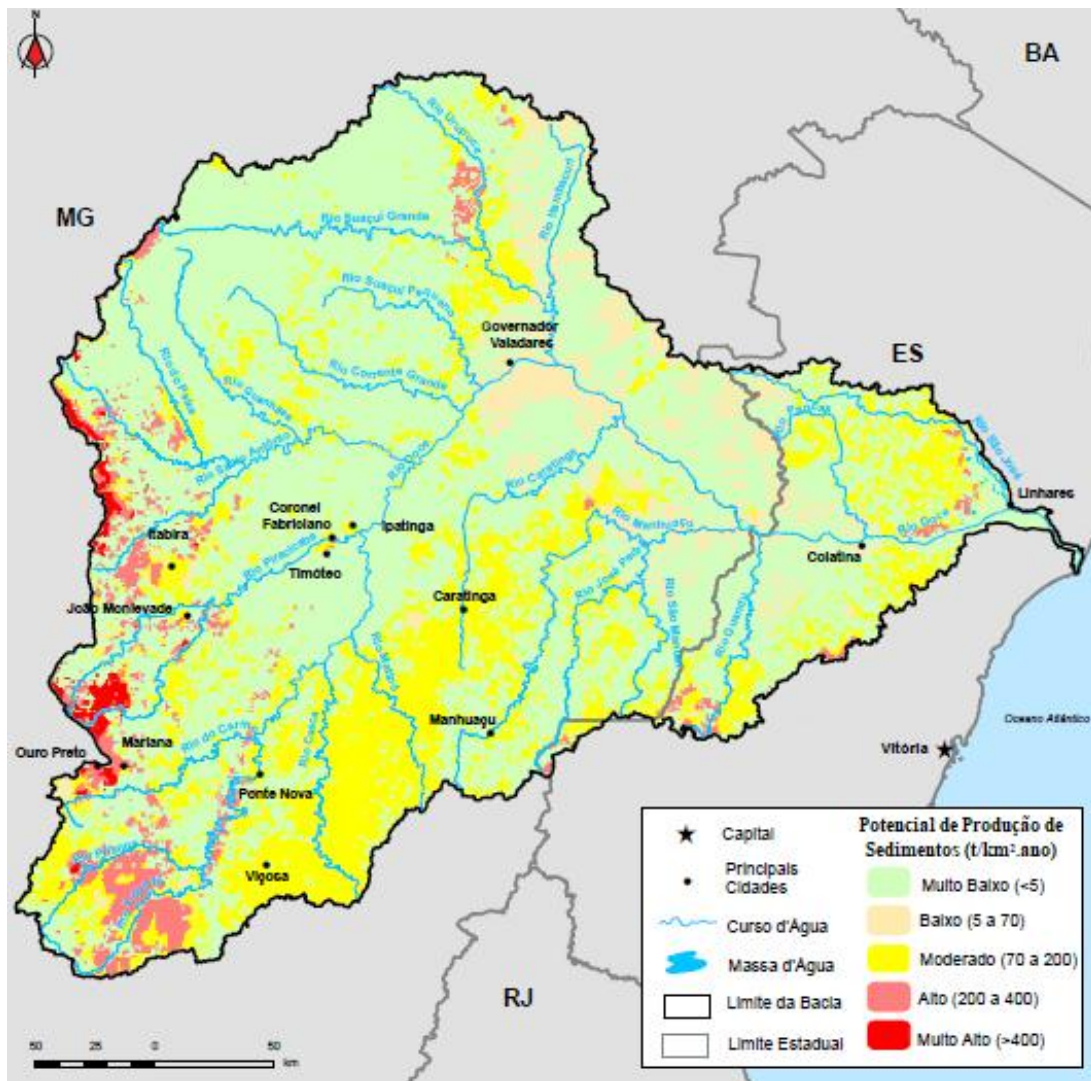


Figura 5. Potencial de produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Doce<sup>36</sup>.

A identificação de áreas contaminadas com base em um único Valor de Referência da Qualidade do Solo (VRQS) por elemento químico potencialmente tóxico foi implementada em 2011 para todo o estado de Minas Gerais. Contudo, essa abordagem generalizada não reflete a diversidade geoquímica dos solos mineiros, tornando necessária a definição de valores de referência regionalizados. Solos originados de rochas ricas em ferro, ocorrem em áreas de maior

altitude (cerca de 1000 metros) na bacia hidrográfica do rio Doce, onde processos erosivos frequentes limitam o acúmulo de argila e matéria orgânica. Já em regiões de menor altitude (aproximadamente 500 metros), há maior acúmulo de matéria orgânica e enriquecimento do solo em alumínio e argila, como resultado do intenso intemperismo. Latossolos e Argissolos, juntos compõem cerca de 86% da área de solos intemperizados e apresentam ampla variação nas concentrações de metais como cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al). Devido ao avançado do grau de intemperismo, os latossolos têm uma maior tendência a acumular metais e metaloides por meio de processos de adsorção ou coprecipitação com óxidos de ferro. Solos inundados ou mal drenados apresentam características anaeróbias e são afetados pela dissolução de óxidos de ferro reduzidos pela oxidação de carbono orgânico, que possibilitam a redução do potencial redox, o que conseqüentemente, aumenta a mobilidade de elementos como o arsênio (As), cobalto (Co), crômio (Cr), cobre (Cu), chumbo (Pb) e zinco (Zn), ou seja, ocorrendo assim a lixiviação do Fe e dos elementos coprecipitados<sup>39</sup>.

A superfície do solo na bacia hidrográfica, geralmente ácida em função do intenso intemperismo, apresenta baixa disponibilidade de fósforo, reduzida capacidade de troca catiônica e aumento da adsorção aniônica específica, características típicas de ambientes sob clima tropical úmido e fortemente intemperizados<sup>39</sup>. Os Cambissolos, majoritariamente derivados de quartzito e ricos em ferro, concentram os maiores teores de metais e metaloides. De forma geral, as concentrações de arsênio (As), antimônio (Sb), selênio (Se) e mercúrio (Hg) são mais elevados na bacia, pois esses elementos estão fortemente associados tanto às características geológicas quanto aos impactos antrópicos, especialmente da atividade mineradora. Por outro lado, o alumínio (Al) e o ferro (Fe) apresentam as menores variações em suas concentrações, sendo considerados os principais constituintes dos solos intemperizados da bacia do rio Doce<sup>39</sup>. Isso significa que sua distribuição espacial ao longo da bacia é mais uniforme.

Considerada uma área de grande importância social e ambiental, a bacia do rio Doce contém 229 municípios e uma população estimada de 3,5 milhões de pessoas. Apresenta-se como uma área rica em biodiversidade, com 98% inserida no bioma mata Atlântica e o restante no cerrado<sup>40,41</sup>. Além de sua grande biodiversidade, a bacia se configura como uma área de grande importância econômica, principalmente no que diz respeito à geração de energia elétrica (encontram-se em operação 10 usinas hidrelétricas), a mineração e atividades industriais como a produção de celulose, laticínios e siderurgia (com a presença das maiores siderúrgicas da

América Latina com destaque para a Companhia Siderúrgica Belo Mineira, a ACESITA e a USIMINAS) (Figura 6)<sup>36,40-43</sup>.

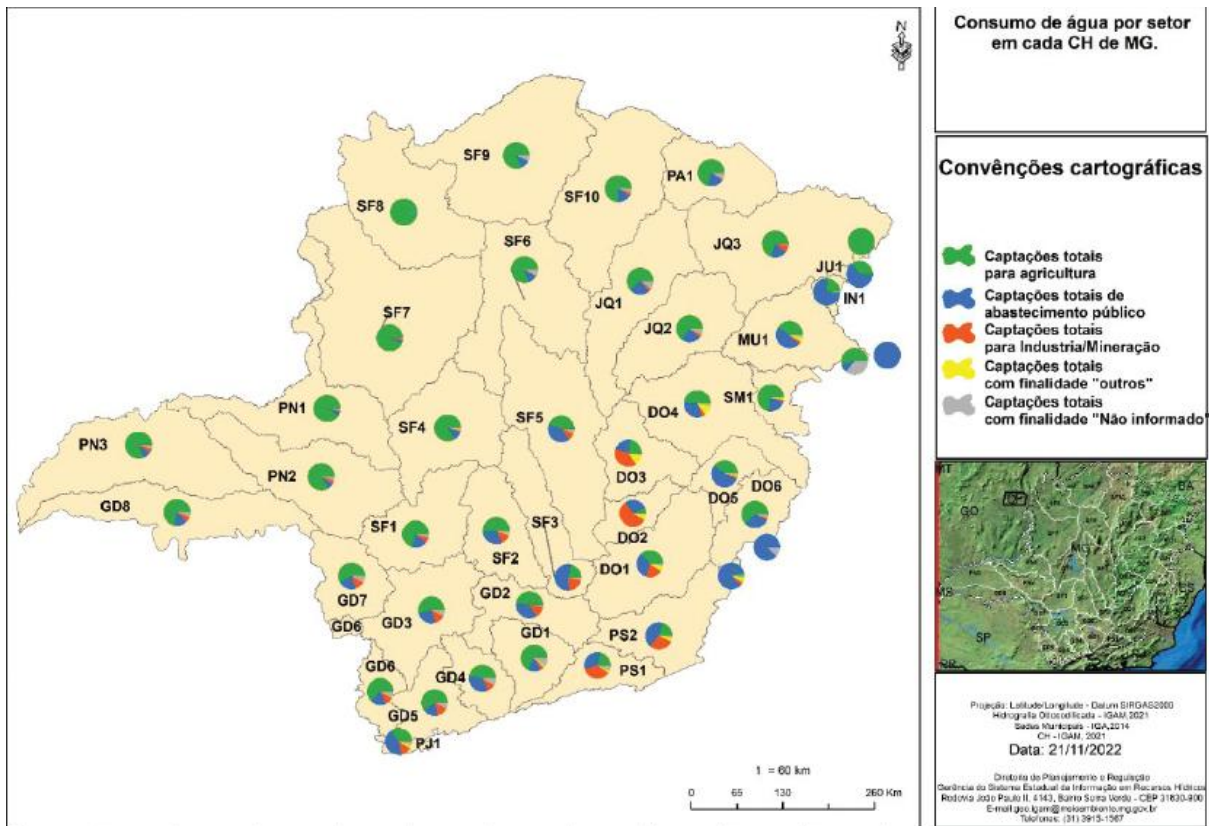


Figura 6. Consumo de água por setor em cada circunscrição hidrográfica de Minas Gerais<sup>35</sup>.

A bacia hidrográfica do Rio Doce é a principal região produtora de ferro e aço do Brasil e está exposta a mais de um século às atividades de mineração. Existe uma forte concentração industrial na região do rio Piracicaba (DO2), onde o PIB do setor industrial supera 50% total da bacia, compondo-se de plantas siderúrgicas e de fabricação de celulose na região metropolitana de Ipatinga<sup>44,45</sup>. As atividades de exploração mineral, principalmente aquelas relacionadas à extração de minério de ferro, se concentram, de modo geral, nas cabeceiras do rio Piracicaba (Figura 7), enquanto ao longo da divisa dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo predomina a exploração de rochas ornamentais. Essas atividades intensificam a pressão sobre o rio Doce e seus afluentes, que fornecem água para comunidades industriais e urbanas e atividades de produção rural, além de gerar sérios riscos ambientais, associados às infraestruturas de armazenamento de rejeitos de mineração, que ameaçam as comunidades a jusante<sup>44,45</sup>.

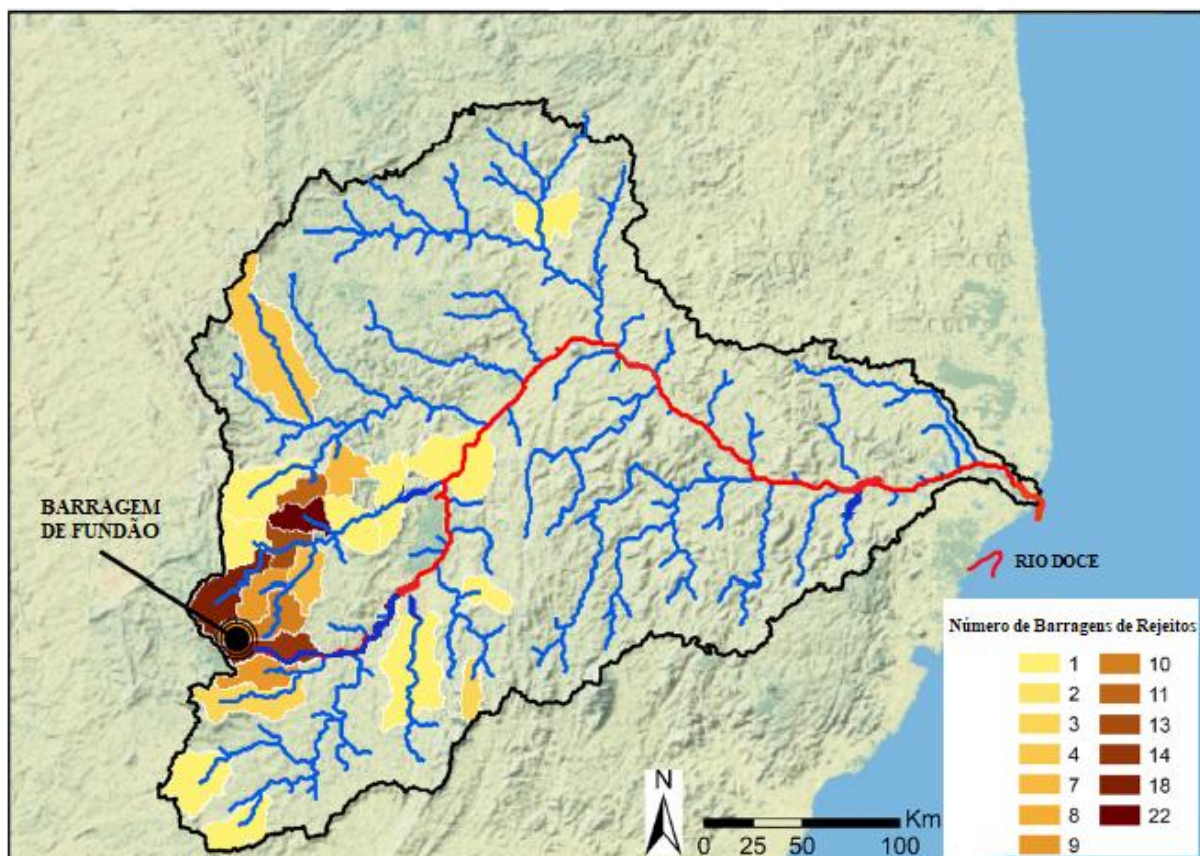


Figura 7. Distribuição de Barragens de Rejeitos na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (adaptada)<sup>46</sup>.

Os cursos d'água da bacia do rio Doce funcionam como canais receptores, transportadores e autodepuradores dos rejeitos e efluentes produzidos por essas atividades econômicas assim como dos esgotos domésticos da grande maioria dos municípios ali existentes (Figura 8), o que compromete significativamente na qualidade da água<sup>34,38</sup>. Conforme dados do Atlas Esgoto, em Minas Gerais, cerca de 270 milhões de metros cúbicos de esgoto sanitário não tratado, vem sendo lançados diretamente na bacia hidrográfica do rio Doce<sup>47</sup>.

Em resposta a esse cenário, foram criados comitês para a gestão da bacia, com investimentos da Fundação Renova voltados para obras de esgotamento sanitário. A Figura 8 ilustra o rio Doce e alguns dos seus rios tributários, que apresentam altos percentuais de esgoto não tratado lançados diretamente nos corpos d'água, apesar das iniciativas<sup>47</sup>. A presença de esgoto não tratado nos rios pode resultar na redução da biodiversidade<sup>48</sup>, no aumento de interações por doenças de origem hídrica<sup>49</sup>, na elevação da concentração de matéria orgânica<sup>50</sup> e no aumento da presença de metais originados do esgoto industrial<sup>51,52</sup>.

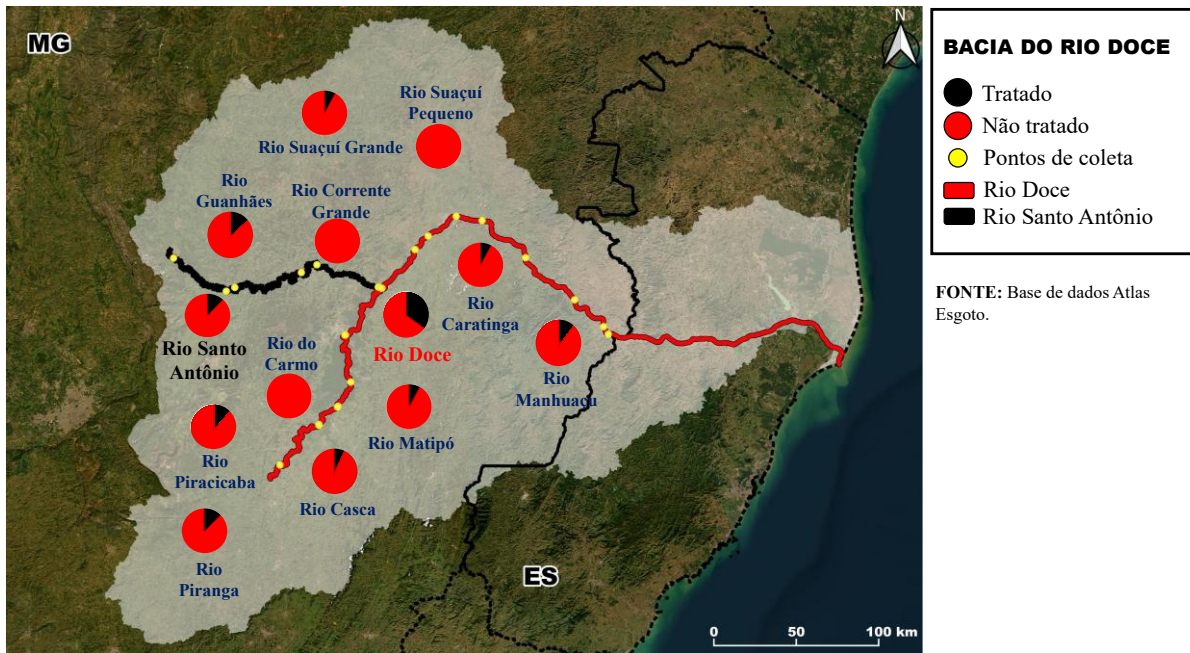


Figura 8. Distribuição do tratamento do esgoto sanitário da Bacia Hidrográfica do Rio Doce .

Nesse contexto, o monitoramento da qualidade das águas superficiais se apresenta como uma importante ferramenta de gestão, tendo como objetivo conhecer a situação desse recurso natural no território e avaliar se este se encontra apropriado aos seus diversos usos (consumo humano, produção agrícola, lazer e fins ambientais); além de medir tendências e, assim, apoiar o planejamento, a execução e a avaliação da política pública de água e o seu impacto efetivo na qualidade ambiental das bacias<sup>55,53</sup>.

### 1.3. DESASTRE DE MARIANA - O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

Mariana é uma cidade histórica localizada no estado de Minas Gerais que possui área territorial de 1194,208 km<sup>2</sup> e uma população estimada de 61.830 pessoas<sup>54</sup>. Sua economia é baseada no turismo cultural, no comércio e na mineração, com 95% de sua receita direta e indireta ligada a extração de minério de ferro como a principal atividade econômica e industrial do município<sup>55,56</sup>.

Parte integrante da região do quadrilátero ferrífero, a unidade industrial de Germano, da Samarco Mineração S/A, localizada na cidade de Mariana, é controlada pelas duas maiores mineradoras do mundo (a BHP Billiton e a Vale S/A) de forma

igualitária<sup>43,57,58</sup>. Pertencente ao complexo minerador Germano-Alegria e recebendo rejeitos provenientes das etapas de extração e beneficiamento de minério de ferro, a Barragem de Fundão apresentava uma altura de 100 metros e um volume de reservatório de 45 milhões de m<sup>3</sup>, sendo classificada como estrutura classe III de acordo com critérios estabelecidos na DN 87/2005<sup>59</sup> e com baixo potencial de risco pelo Cadastro Nacional de Barragens de Mineração<sup>60</sup>, até que por volta das 16 horas do dia 05 de novembro de 2015 foi anunciado o rompimento da Barragem de Fundão.

Desastres provocados pelo homem são eventos repentinos causados por falhas envolvendo tecnologia e manipulação do ambiente natural, tais como o colapso da barragem de Fundão que causou efeito em cadeia, provocando o galgamento da Barragem de Santarém, a qual se localizava a jusante das Barragens de Germano e Fundão. A onda de rejeitos galgou o barramento de Santarém que acumulava 760.000 m<sup>3</sup> de água, diluindo o rejeito da Barragem de Fundão e provocando um aumento da velocidade da lama<sup>59,61</sup>. Rica em metais e metaloides, a onda de rejeitos seguiu pelo córrego de Santarém o que provocou a morte de 19 pessoas e a destruição do município de Bento Rodrigues que se localizava a aproximadamente 6 km da barragem<sup>40,60,62</sup>. A Figura 9 apresenta imagens de satélite da cidade antes e após o acidente. Na calha do rio Gualaxo do Norte e do rio do Carmo a onda percorreu 77 km levando parte da vegetação e do substrato, atingindo comunidades rurais e os municípios de Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado até alcançar o rio Doce.

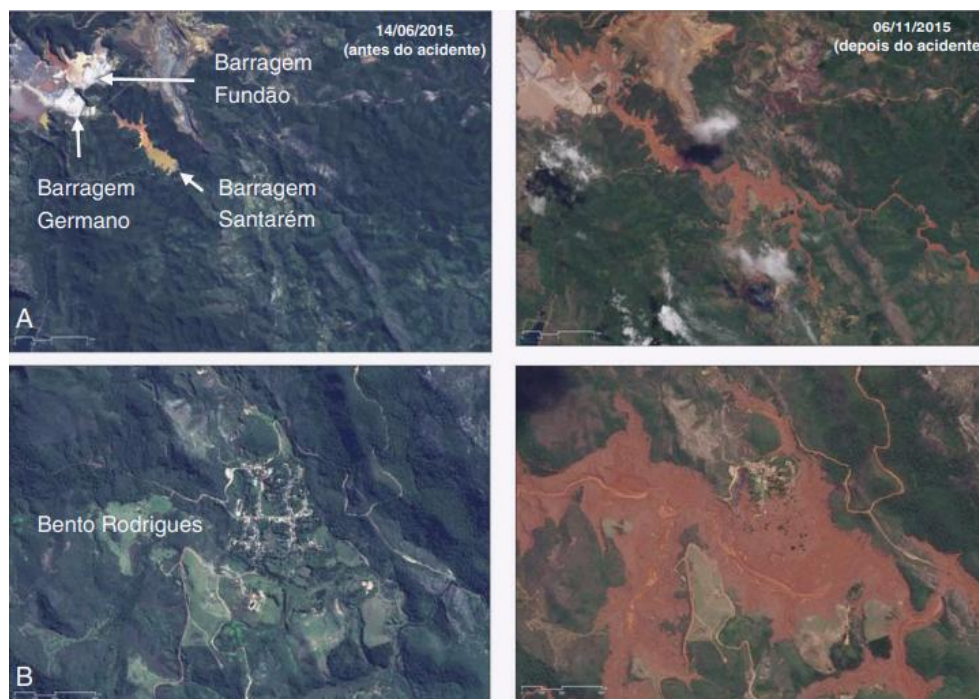


Figura 9. Imagens de satélite das barragens da Samarco (A) e do povoado de Bento Rodrigues (B) antes e após o rompimento da Barragem de Fundão<sup>63</sup>.

Cerca de 24 milhões de m<sup>3</sup> das partículas grossas, compostas basicamente por quartzo e hematita, foram depositados em um trecho de aproximadamente 100 km do rio, entre as barragens de Fundão e a barragem da usina hidrelétrica de Candonga, ou ficaram retidos neste reservatório, assim como apresentado na Figura 10<sup>64,65,43</sup>. O volume de rejeito restante, composto em sua maioria por partículas finas, ultrapassou o maciço de concreto da barragem e, após um percurso de 16 dias, alcançou o distrito de Regência no município de Linhares (ES), totalizando aproximadamente 663 km percorridos a jusante, espalhando-se por 350 km da área litorânea adjacente, desde o sul do estado do Espírito Santo até o sul da Bahia (Figura 10)<sup>27,33,43,63,65</sup>.

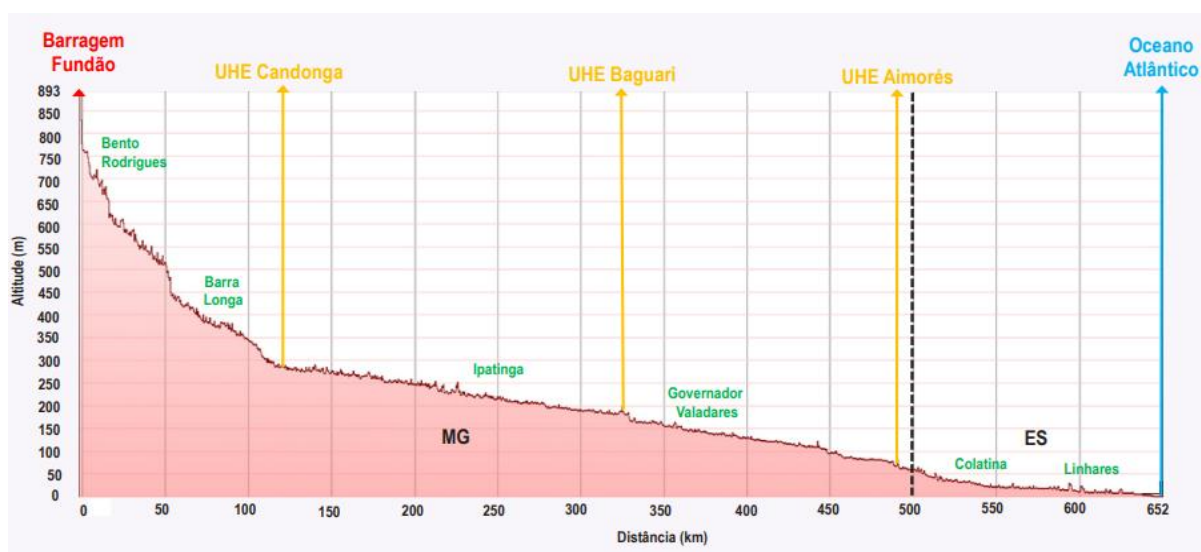
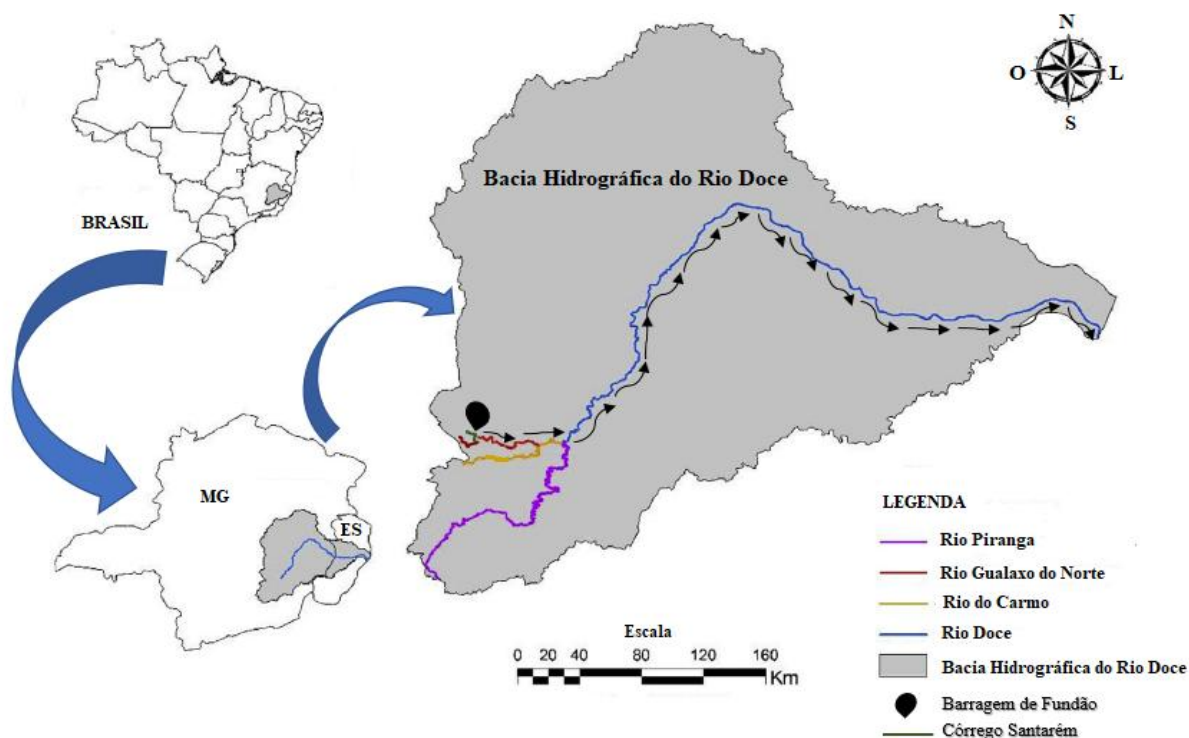


Figura 10. Trajeto da onda de lama gerada pela ruptura da barragem de rejeito de Fundão (adaptada)<sup>40,63</sup>.

O volume de rejeitos liberados pela Barragem do Fundão representa o maior rompimento da barragem de rejeitos da história moderna, superando as magnitudes dos dois maiores incidentes ocorridos anteriormente: (a) nas Filipinas em 1982 (28 milhões de m<sup>3</sup>) e em 1992 (32,2 milhões de m<sup>3</sup>)<sup>62</sup> e (b) o desastre de Brumadinho (MG) em 2019 (12 milhões de m<sup>3</sup>), deixando, este último, mais de 250 mortos<sup>66-69</sup>. De acordo com o

Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), as causas dos acidentes e dos incidentes são dadas, em grande parte, por falhas de proprietários e operadores das barragens na adoção de procedimentos de segurança para a redução de riscos, uma vez que para tais falhas já existem soluções tecnológicas disponíveis<sup>60</sup>.

O rompimento da barragem de Fundão afetou seriamente a flora, a fauna, as atividades econômicas e a vida das pessoas, causando a destruição de aproximadamente 1.500 hectares de superfície terrestre, incluindo Áreas de Preservação Permanente (APP)<sup>58,60</sup>, ou seja, destruindo a mata ciliar/mata atlântica ao longo do curso do rio<sup>41</sup>, assim como os habitats foram fragmentados e animais selvagens e domesticados foram perdidos em grande número. Adicionalmente, uma série de danos socioambientais foram identificados ao longo do trecho, as áreas habitadas foram isoladas e devido à destruição de inúmeras casas, a população foi deslocada. Cerca de um milhão de pessoas, considerando 41 municípios, foram prejudicadas devido à redução do acesso local aos recursos pesqueiros, água potável, plantações, geração de energia hidrelétrica e obtenção de matérias-primas<sup>17,58,61,62,65,69</sup>.

Vários estudos investigaram a magnitude dos impactos ecológicos por deposição de lama na qualidade da água<sup>65,69-71</sup>, comunidades de peixes e algas<sup>62,72-74</sup>, condições estuarinas<sup>62,72,73</sup>, solos ripários<sup>64,68,75</sup>, sedimentos<sup>70,71,76-80</sup>, vegetação<sup>67,81</sup>, dentre outras<sup>82</sup>. Considerando a contaminação inorgânica, sendo o comportamento e o destino dos metais e metaloides nos rios dependentes de sua forma química, entender a distribuição e a labilidade dos metais em sistemas aquáticos é extremamente importante, uma vez que estes podem ser adsorvidos em partículas suspensas, incorporados em organismos vivos, complexados com ligantes orgânicos ou inorgânicos, ou ainda permanecerem como íons livres (hidratados)<sup>67,82,83</sup>.

Historicamente, a mineração pode ser considerada uma das principais atividades antrópicas que contribuem para a poluição por elementos químicos principais (maior concentração) e elementos traços das bacias hidrográficas em todo o mundo, o que pode ocasionar em sérias implicações para a saúde humana e também prejuízo a longo prazo aos cursos de água e à biodiversidade<sup>69</sup>, restringindo o acesso a alimentos e água (mesmo a espécies mais tolerantes a distúrbios) resultando na redução severa do número de populações viáveis de mamíferos florestais dependentes na natureza e,

consequentemente, provocando a extinção local de espécies e/ou facilitando a introdução de espécies exóticas (espécies novas ao bioma)<sup>21</sup>.

Mudanças no pH, reduções no conteúdo de matéria orgânica, perturbações químicas devido à presença de metais e a criação de uma crosta espessa de lama seca no solo nativo são consequências decorridas de um acidente ambiental que impede os processos naturais de revegetação e sucessão vegetal<sup>67,68</sup>. O solo e o rejeito, uma vez misturados, podem resultar em um material com composição elementar desconhecida e dinâmica de sorção/dessorção que afetam tanto a disponibilidade de nutrientes quanto a mobilidade de elementos tóxicos. Por isso, a caracterização da cobertura de lama aluvial e/ou mistura com solo nativo em zonas ripárias é uma prioridade para o sucesso da reabilitação ambiental<sup>64,81</sup>.

Desastres envolvendo barragens de rejeitos de mineração tornaram-se um problema recorrente no Brasil. Nesse sentido, alguns estudos relatam os efeitos de citogenotoxicidade, ecotoxicidade e bioacumulação dos rejeitos e dos cursos d'água impactados<sup>73-75,84</sup>. Efeitos citogenotóxicos como danos no DNA podem reduzir o crescimento e a sobrevivência do organismo e causar desenvolvimento anormal, interrompendo a função ecológica dos organismos aquáticos<sup>75</sup>. Por sua vez, a contaminação elementar representa riscos à saúde ambiental devido à toxicidade aguda em concentrações relativamente baixas e tempos de residência estendidos, os quais podem adentrar no corpo humano por contato direto, inalação de gases ou partículas em suspensão ou ingestão.

Riscos e danos à saúde humana tendem a ser de médio e longo prazos, atingindo, em particular, grupos populacionais de maior vulnerabilidade como gestantes, crianças e idosos, podendo resultar em desfechos negativos, não necessariamente de caráter agudo, e com possíveis repercussões clínicas tardias<sup>56</sup>. Nesse contexto, o monitoramento humano tem um papel fundamental na saúde, bem como oferece a avaliação da exposição a poluentes e da contaminação de grupos populacionais. Tal análise pode ser realizada através de medições químicas das concentrações de elementos químicos em matrizes biológicas como sangue, urina, cabelo e unha<sup>85</sup>.

Ainda que a poluição por derramamento pare, a remobilização de sedimentos após fortes tempestades ou ressuspensão movida pelo vento pode resultar em um aumento intermitente da concentração total de metais<sup>86</sup>, motivo pelo qual o consumo de plantas

alimentícias cultivadas em solo contaminado por metais tóxicos, peixes e moluscos provenientes de corpos d'água contaminados, ou ainda a alimentação de gado em pastagem contaminada são as principais vias de exposição a esses elementos<sup>22,62</sup>. Além disso, o consumo excessivo de elementos químicos de alta toxicidade pode ser considerado um fator de risco para o desenvolvimento de doenças neurodegenerativas. Com isso, os potenciais riscos ambientais e de saúde humana decorrentes do processo de bioacumulação na cadeia alimentar não podem ser desconsiderados, fazendo-se necessário o monitoramento contínuo da ecotoxicidade dos metais<sup>81</sup>.

#### **1.4. AVALIAÇÃO DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

Em de 17 de março de 2005, o Conselho Nacional do Meio ambiente publicou a Resolução CONAMA nº 357, que “*dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes*”. Esta Resolução apresenta padrões de qualidade das águas, através de valores máximos ou de referência para parâmetros físicos, químicos e biológicos<sup>37</sup>. Dentre os parâmetros químicos, estão incluídos compostos orgânicos e elementos inorgânicos, sendo o último o de interesse imediato desse trabalho<sup>29</sup>.

Os parâmetros inorgânicos descritos para a qualidade das águas doces de classe 2 incluem metais, metaloides, ânions (cianeto, cloreto, fluoreto, sulfeto e sulfato), além de fósforo e nitrogênio amoniacal. Na Tabela S2 estão apresentados os valores máximos permitidos para metais totais e dissolvidos e metaloides<sup>37</sup>.

Por meio do Programa Águas de Minas, desde 1997, o IGAM realiza o monitoramento das águas em todo o Estado de Minas Gerais (Figura 11). Na bacia hidrográfica do rio Doce o monitoramento é realizado através de 65 estações de amostragem de água onde são realizadas coletas e análises laboratoriais trimestralmente e a avaliação de 60 parâmetros físico-químicos e hidrológicos, que combinados nos permitem determinar dentre diversas outras coisas, a carga de poluentes e a capacidade de diluição do corpo d'água, fatores que afetam a manutenção dos organismos que vivem nela, assim como para as comunidades ribeirinhas que utilizam o rio. Das 65 estações de

monitoramento, 12 estações estão localizadas na calha do rio Doce, Gualaxo do Norte e no rio do Carmo e possuem monitoramento semestral<sup>93-95</sup>.

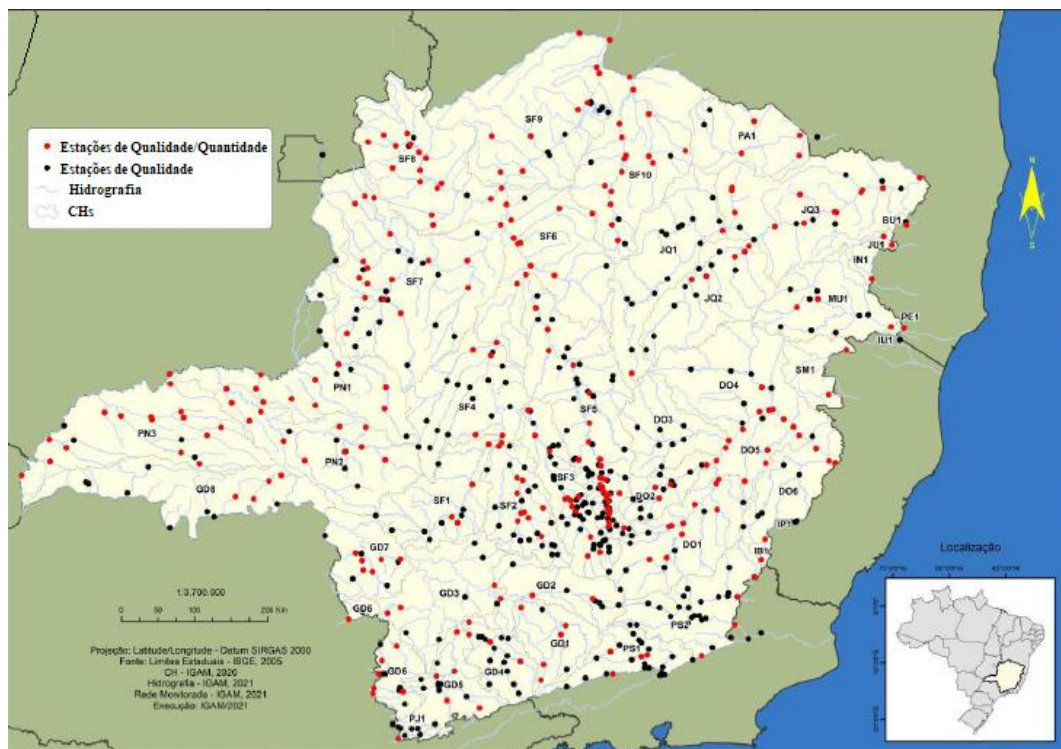


Figura 11. Pontos de monitoramento de qualidade da água superficial da rede básica com (vermelho) e sem (preto) medições de vazão, em 2021<sup>95</sup>.

Com a adesão do IGAM ao Programa de Estímulo à Divulgação de Dados de Qualidade de Água – QUALIÁGUA, promovido pela Agência Nacional das Águas, iniciou-se em 2016 a medição de vazão simultânea ao monitoramento de qualidade de água (Figura 11)<sup>35,95</sup>. Embora a Samarco e o Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM argumentem que a lama não contém concentrações de metais tóxicos que podem trazer malefícios ao meio ambiente, vários estudos independentes coordenados por acadêmicos, ONGs e agências ambientais estaduais e federais fornecem evidências contrárias.

Segundo o relatório emitido pelo IGAM no dia 17 de novembro de 2015 sobre a qualidade da água na calha do rio Doce, foram encontrados valores superiores ao limite permitido pela Resolução CONAMA 357/05 para águas de classe 2 para ferro e alumínio dissolvidos e, manganês, arsênio, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio níquel e cobre totais. No relatório foi apontado que elevados valores de concentração podem ser devidos ao revolvimento de grande volume de material de fundo ocasionado pelo deslocamento da

pluma de rejeitos, o que pode ser a causa da ressuspensão dos materiais que haviam sido depositados por longos períodos no leito do rio<sup>94</sup>.

No primeiro semestre de 2020, o IGAM disponibilizou um novo relatório, na qual apenas o alumínio e o ferro dissolvidos, o manganês e o chumbo total apresentavam valores acima do limite estabelecido pela CONAMA 357/05 nos vários trechos estudados, podendo ser relacionado ao intenso volume de chuvas ocorrido no período<sup>96</sup>.

Silva et al., 2018 analisaram amostras do rio do Carmo seis meses antes do rompimento da barragem e seis meses após a deposição da lama, possibilitando verificar alterações na quantidade de elementos traços na água. Os resultados do trabalho mostraram que a concentração total de arsênio na água variou de 10,4 a 50,4  $\mu\text{g L}^{-1}$ , excedendo o limite máximo ( $> 10 \mu\text{g L}^{-1}$ ) definido pela regulamentação ambiental brasileira (Tabela S1). Entretanto, as concentrações de cádmio, cromo, níquel, chumbo e zinco ficaram abaixo dos limites máximos definidos pelos padrões brasileiros (Tabela S1)<sup>97</sup>.

Segura et al., 2016 verificaram a qualidade de amostras de água do rio Gualaxo do norte, próximo ao rompimento da barragem de Fundão, na comunidade de Bento Rodrigues. As amostras foram analisadas por espectroscopia de fluorescência por raios-X. De acordo com a Resolução CONAMA 357/05 para águas de classe 1, todos os valores encontrados estavam dentro dos limites estabelecidos, exceto prata<sup>58</sup>.

Em outro estudo, Longhini et al., 2022 investigaram a qualidade da água e dos sedimentos na plataforma continental adjacente à foz do rio Doce que foi afetada pela deposição de rejeitos após a barragem de Fundão no período chuvoso e seco do ano de 2019. Este estudo mostrou que o rejeito depositado na plataforma continental ainda pode atuar como fonte de contaminação para água e sedimentos, principalmente durante a estação seca. Processos integrados de forças físicas e equilíbrio geoquímico entre o sedimento e a coluna de água contribuíram para a diminuição da qualidade da água, provocando a ressuspensão do sedimento pela ação da onda, liberando continuamente arsênio e níquel para a coluna de água<sup>72</sup>.

Costa et al., 2022 analisaram amostras de água e sedimentos coletadas em ambientes de água doce, água do mar, manguezais e praias na foz do rio Doce nos meses de setembro de 2018 e fevereiro de 2020, permitindo verificar alterações na quantidade de elementos traços em águas e sedimentos em relação a variação temporal das coletas

realizadas pelo estudo. Os resultados indicaram que para as amostras coletadas nas águas doce, no mar, nos manguezais e na praia em 2020 houve um aumento na concentração total de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb e Zn quando comparados aos valores determinados em 2018<sup>78</sup>.

Pauly et al., 2024 analisaram amostras de água e sedimentos coletadas ao longo da bacia hidrográfica do rio Doce nos meses de dezembro de 2015, abril de 2016, novembro de 2016 e janeiro e agosto de 2019. As concentrações determinadas para as amostras de águas superficiais demonstraram que os elementos Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Pb ultrapassaram o limite estabelecido pela resolução CONAMA 357/05, principalmente nas coletas realizadas no ano de 2015 e 2016<sup>70</sup>.

Em ambientes aquáticos, íons metálicos e metaloides podem se distribuir entre a água dissolvida, fases coloidais, material em suspensão e, predominantemente, nos sedimentos de fundo, que retêm mais de 99% dessas substâncias, já que menos de 1% permanece dissolvido na água. A concentração desses elementos varia conforme fatores como geologia local, uso e ocupação do solo, regime hidrológico, tipo de vegetação e presença de mineralizações. Metais traço podem existir em diferentes formas químicas: em ambientes não impactados por ações humanas, tendem a estar ligados a silicatos e minerais primários, o que lhes confere baixa mobilidade; já sob influência antrópica, são mais móveis e associados a fases como carbonatos, óxidos, hidróxidos e sulfetos. O comportamento desses elementos também depende de processos como adsorção, dessorção, precipitação, solubilização e floculação, além da gênese e transporte dos sedimentos<sup>99,101</sup>.

## **1.5. AVALIAÇÃO DOS SEDIMENTOS DO RIO DOCE APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

Em 1º de novembro de 2012, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) revisou a Resolução CONAMA nº 454, que “*define as diretrizes gerais e os procedimentos de referência para o gerenciamento dos materiais a serem dragados em águas sob jurisdição nacional*”, com o objetivo de reduzir e prevenir a poluição dos sedimentos, entre outras questões. A resolução apresenta os padrões de qualidade para o material dragado em águas doces e salinas/salobras, estabelecendo valores máximos ou

de referência para parâmetros físicos, químicos e biológicos<sup>87</sup>. Entre os parâmetros químicos, estão incluídos compostos orgânicos e elementos inorgânicos, sendo o último o foco principal deste estudo<sup>79</sup>.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente, por meio da resolução CONAMA n° 454(2012) e a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), adotaram os valores orientadores para alguns contaminantes baseados nos valores da agência ambiental canadense “Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME)” para classificar a qualidade dos sedimentos de acordo com a substâncias químicas<sup>88</sup>.

Para ambientes de água doce, adota-se o Threshold Effects Level (TEL) e o Probable Effects Level (PEL). Os valores de concentrações estabelecidos pela CCME para As, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Ni e Zn em sedimentos de rio apresentam dois valores, sendo o TEL o menor limite e o PEL o maior limite. Níveis abaixo do TEL são raramente associados a efeitos biológicos adversos. Os contaminantes associados ao sedimento que estiverem dentro dessa faixa de concentração não são considerados de efeito significativo para os organismos aquáticos. Por outro lado, níveis acima do PEL são frequentemente associados a efeitos biológicos adversos. Estes valores são baseados em concentrações totais e na probabilidade de ocorrência de efeitos nocivos para os organismos expostos a concentrações mais elevadas<sup>89</sup>. Os limites de TEL e PEL estabelecidos para os elementos são correspondentes aos níveis 1 e 2 da resolução CONAMA 454, respectivamente.

O programa de monitoramento rio Doce Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS) criado em julho de 2017, tem como objetivo gerar dados confiáveis para acompanhar a recuperação da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e das áreas costeiras e estuarinas adjacentes, como parte das medidas de reparação após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG)<sup>80</sup>. Sendo assim, a RENOVA gera dados de concentração de metais e metaloides em sedimentos em 52 pontos de coleta desde o ano de 2017<sup>90</sup>. No entanto, os dados não são interpretados pela mesma, apenas disponibilizados para a população em geral.

A partir do desastre de Fundão, os sedimentos começaram a ser analisados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), que disponibilizou um relatório contendo a concentração de metais e metaloides de janeiro de 2016 a julho de 2020. Neste relatório são expressas as concentrações de ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn),

comparados com o valor de referência calculado por Costa et al., 2022<sup>91</sup> em sua pesquisa sobre o mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do quadrilátero ferrífero. Neste estudo também foram avaliados arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni), mercúrio (Hg) e zinco (Zn), de acordo com a resolução CONAMA 454/12<sup>6</sup>.

Dentre as concentrações de metais e metaloides determinados pelo IGAM para sedimentos, o Fe, o Al e Mn obtiveram valores acima dos valores de referência de Costa para as amostras de sedimentos. O ferro obteve resultados elevados em pontos mais próximos do evento ocorrido, refletindo as características oriundas do rejeito. Quanto ao Al e Mn, os resultados mais elevados foram determinados em trechos mais distantes do desastre, indicando que os sedimentos estão sendo afetados por atividades antrópicas da região. No período de 2016 a 2020, os metais Cd, Cu, Pb e Zn estiveram abaixo do nível 2 (Tabela S1) em todas as amostragens, conforme a resolução 454/12. No entanto, o metaloide As e os metais Cr, Hg, Ni registraram valores acima do nível 2 (Tabela S1) em pelo menos uma coleta de sedimento<sup>6</sup>.

Abessa et al., 2024<sup>80</sup> coletaram amostras de sedimentos em outubro de 2021 e determinaram a concentração de metais e metaloides em três pontos de coleta no rio Doce. Dentre os pontos de coleta selecionados e de acordo com a legislação brasileira (Figura S1/Figura S1), as concentrações totais de As, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn superaram o valor máximo permitido para o nível 1 e as concentrações de Cr e Ni superaram os valores máximos permitidos no nível 2 em alguns pontos de coleta<sup>80</sup>.

O estudo realizado por Sartoti et al., 2023<sup>71</sup>, coletou sedimentos em 34 pontos no estuário do rio Doce em novembro de 2019 e encontraram que a concentração de As e Ni superaram o nível 1 e o nível 2 da legislação brasileira para a concentração de metais e metaloides em material dragado. Os resultados demonstraram que mesmo após quatro anos do desastre de Fundão, o rio Doce apresentou altas concentrações de metais nos sedimentos, contribuindo para o enriquecimento desses elementos nas áreas costeiras em 2019<sup>71</sup>.

Ferreira et al., 2024<sup>92</sup> avaliaram amostras de solos coletadas em agosto de 2019, janeiro de 2020 e agosto de 2021 no estuário do rio Doce no estado do Espírito Santo. Neste estudo, foram analisadas quatro profundidades diferentes de solo (0–5, 5–10, 10–15, e 15–20 cm), e as concentrações de As, Ba, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V e Zn foram

determinadas. Os autores relatam que apenas o Cr ficou acima dos níveis 1 e 2 da legislação brasileira<sup>92</sup>.

Para identificar as regiões onde são dominantes as pressões ambientais decorrentes de ações antrópicas, que em muitos casos exigem uma caracterização mais específica da qualidade das águas são implantadas as chamadas redes dirigidas ou especiais. Essas redes têm como objetivo identificar áreas críticas e avaliar a urgência de ações para a melhoria da qualidade das águas. Elas variam em relação à rede básica quanto à frequência de coleta, número de pontos e/ou tipos de parâmetros monitorados. No caso do desastre ocorrido na bacia do rio Doce, em 2015, o IGAM executa um monitoramento especial no rio Doce no intuito de acompanhar a situação e evolução da qualidade das águas superficiais e sedimentos<sup>35,95</sup>.

Costa et al., 2022 analisaram amostras de água e sedimentos coletadas em ambientes de água doce, água do mar, manguezais e praias na foz do rio Doce nos meses de setembro de 2018 e fevereiro de 2020, permitindo verificar alterações na quantidade de elementos traços em águas e sedimentos em relação a variação temporal das coletas realizadas pelo estudo. Para os resultados referente às amostras de sedimentos coletados em águas doces, do mar, dos manguezais e da praia houve um aumento na concentração total de As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn e Zn em comparação com os valores determinados em 2018<sup>78</sup>.

Pauly et al., 2024 analisaram amostras de água e sedimentos coletadas ao longo da bacia hidrográfica do rio Doce nos meses de dezembro de 2015, abril de 2016, novembro de 2016 e janeiro e agosto de 2019. Para as amostras de sedimento, observou-se que os elementos Cd, Cr e Ni ultrapassaram o valor máximo permitido pelo nível 1 e que o As ultrapassou os níveis 1 e 2 do limite máximo permitido pela resolução CONAMA 454/12<sup>70</sup>.

O acúmulo de metais traço no solo pode ocorrer tanto por processos naturais quanto por ações humanas. Atividades como mineração, tráfego de veículos, fundição de metais, produção industrial e o uso excessivo de fertilizantes estão entre as principais fontes antropogênicas de contaminação do solo por esses metais. Quando presentes mesmo em baixas concentrações, esses elementos podem modificar as propriedades físicas e químicas do solo, comprometer a biodiversidade, diminuir a produtividade agrícola e,

além disso, entrar na cadeia alimentar. Como consequência, esses metais podem se acumular no organismo humano, representando sérios riscos à saúde<sup>98,99</sup>.

A geoquímica ambiental estuda as interações entre elementos químicos naturais e artificiais no meio ambiente, com o objetivo de identificar, prever e controlar fontes de poluição no solo, sedimentos, águas e atmosfera. Um campo relevante dessa ciência é a análise geoquímica de sedimentos fluviais, pois mesmo em pequenas concentrações, certos elementos químicos podem ser tóxicos. Esses elementos não se distribuem de forma uniforme nos diferentes tamanhos de grãos dos sedimentos, sendo a fração mais fina geralmente a mais rica em metais pesados. Esses sedimentos, ao armazenarem tais metais, podem funcionar como fontes de contaminação caso as condições ambientais variem, como mudanças no pH, no potencial redox ou pela presença de substâncias orgânicas<sup>100</sup>.

Altas concentrações de metais em sedimentos nem sempre indicam contaminação, podendo refletir a composição mineralógica natural da região. No entanto, devido à complexidade das condições hidrodinâmicas e geomorfológicas, é difícil definir valores de referência naturais. Distinguir entre origens naturais e fontes antrópicas é essencial para avaliar corretamente os impactos ambientais em ecossistemas específicos<sup>99</sup>. Autores como Turekian e Wedepohl 1961, determinaram os valores de fundo natural – *background* através de estudos sobre a distribuição dos elementos na crosta terrestre<sup>102</sup>. No entanto, a concentração dos elementos podem mudar regionalmente, dificultando assim, a determinação exata de um valor de background. Sendo assim, elaboração de mapas geoquímicos com foco geoambiental é uma ferramenta fundamental para a gestão territorial, servindo como um guia de alerta para gestores públicos quanto à necessidade de remediar áreas com concentrações anômalas de elementos altamente tóxicos para os seres humanos e para toda a comunidade biológica dos ecossistemas<sup>98</sup>.

## **Capítulo 2.**

### **Objetivos**

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Determinar a concentração de metais e metaloides em amostras de águas superficiais e sedimentos por Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), empregando os limites estabelecidos nas resoluções CONAMA 357/2005 e 454/2012 como diretrizes ambientais, além da sua avaliação sazonal por meio de ferramentas quimiométricas.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar e analisar as amostras de água de acordo com o *Standard Methods the Examination of Water and Wastewater*<sup>103</sup>;
- Quantificar por meio da digestão das amostras de águas superficiais amostradas após o rompimento da Barragem de Fundão, Mariana-MG, utilizando forno de radiação micro-ondas com frascos pressurizados;
- Realizar a pseudo digestão de metais e metaloides em amostras de sedimentos amostradas após o rompimento da Barragem de Fundão, Mariana-MG, utilizando forno de radiação micro-ondas com frascos pressurizados;
- Determinar os elementos Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn por ICP-MS empregando as metodologias EPA 3051A para sedimentos;
- Fornecer os dados de concentração de metais e metaloides em amostras de águas superficiais e sedimentos no âmbito do Projeto de avaliação dos impactos do rompimento da Barragem de Fundão, Mariana, MG (Edital 10/2018);
- Aplicar geoprocessamento (mapas de uso do solo) e PCA, como ferramenta quimiométrica exploratória, no tratamento dos dados e obtenção de relação entre as variáveis;
- Aplicar o índice de geoacumulação e o fator de enriquecimento para avaliar os resultados obtidos.

# **Capítulo 3.**

## **Parte Experimental**

### 3.1.FLUXOGRAMAS DOS MÉTODOS APLICADOS PARA AS AMOSTRAS DE ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTO

O método, após validado, foi aplicado nas análises de águas superficiais. O fluxograma geral é apresentado na Figura 12 (águas superficiais) e na Figura 13 (sedimentos).

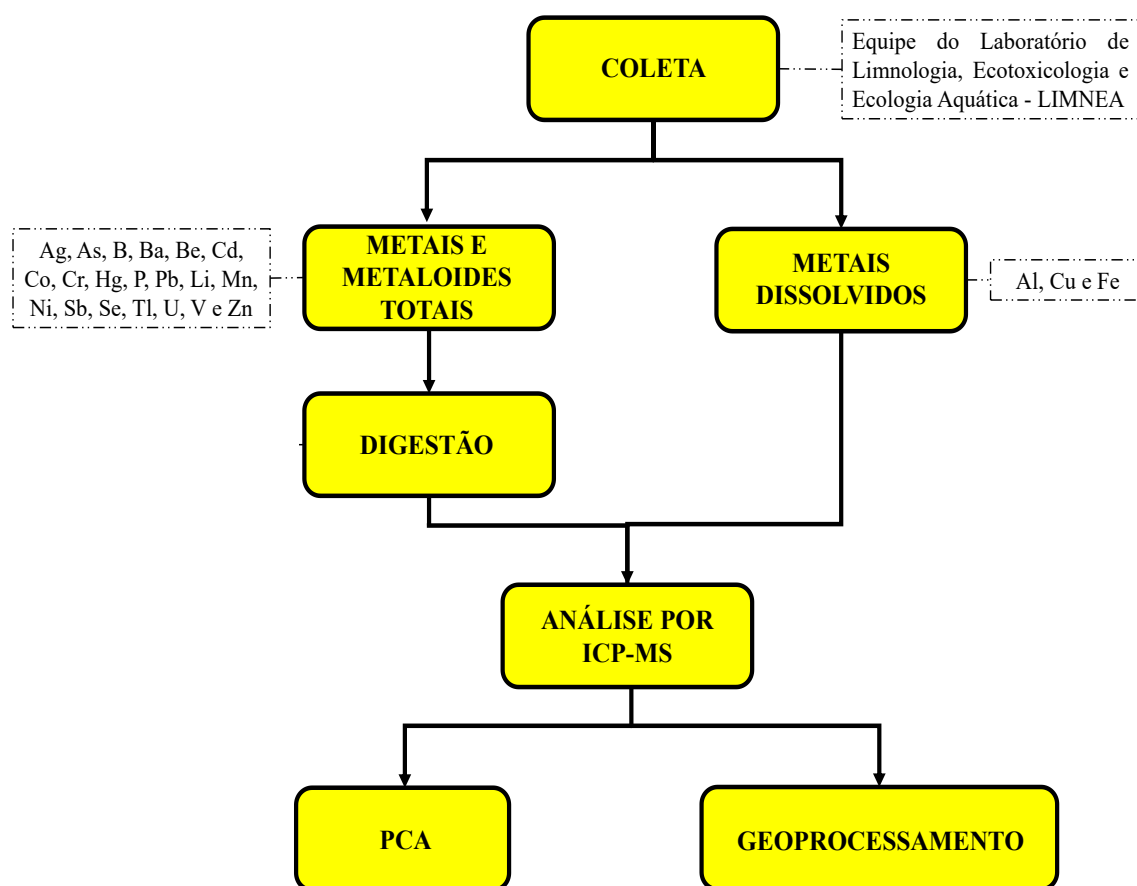


Figura 12. Fluxograma geral do método aplicado para as amostras de águas superficiais.

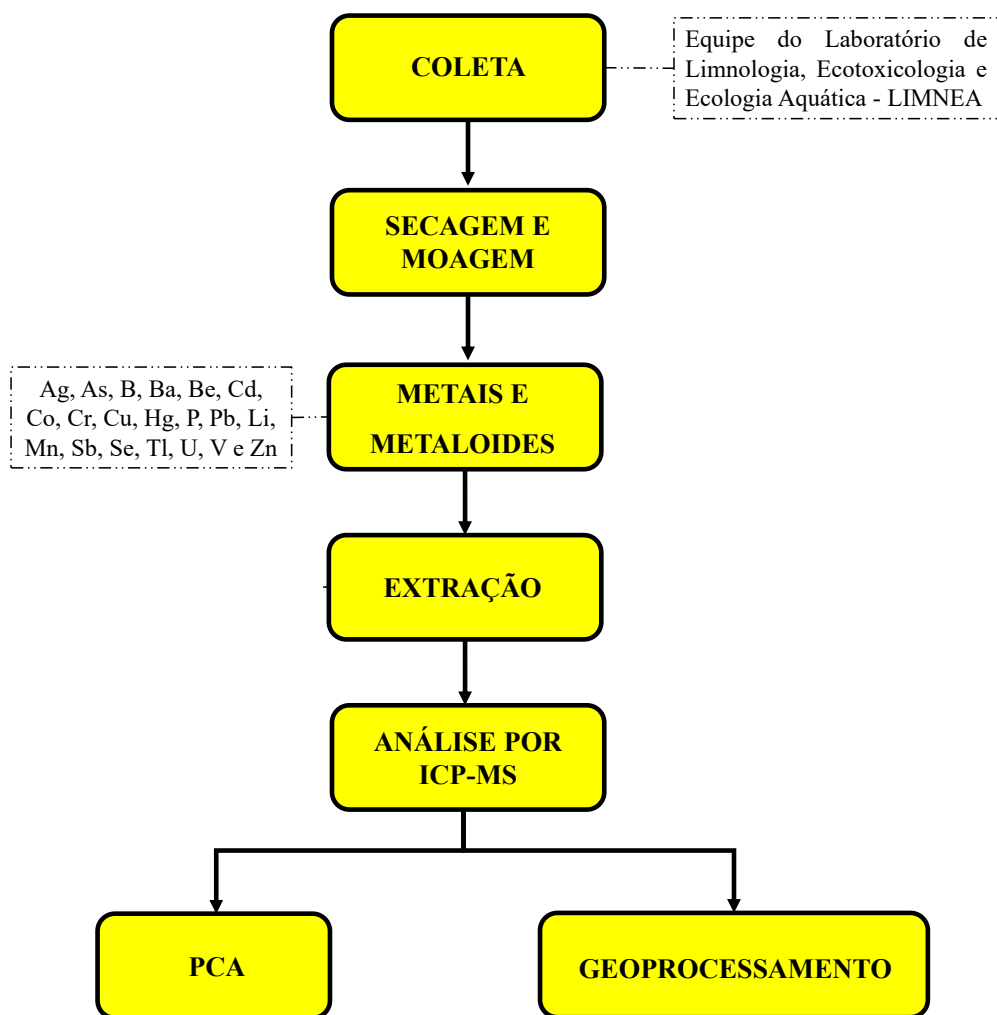


Figura 13. Fluxograma geral do método aplicado para as amostras de sedimentos.

### 3.2. MATERIAIS E REAGENTES

Todas as soluções deste trabalho foram preparadas utilizando água ultrapura (resistividade maior que 18,2 M $\Omega$  cm), ácido nítrico e ácido clorídrico subdestilados em destilador de ácidos (MLS Milestone). Todos os materiais e vidrarias foram descontaminados em banho ácido (HNO<sub>3</sub> 10% v v<sup>-1</sup>) por, no mínimo, 12 horas, e em seguida enxaguados com água ultrapura antes do uso. Os materiais e vidrarias foram secos à temperatura ambiente em capela de fluxo laminar.

Para o preparo das soluções padrão de calibração para águas superficiais foram utilizadas soluções estoque monoelementares de Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn em HNO<sub>3</sub> 0,14 mol L<sup>-1</sup>. O material de

referência certificado NIST 1640A - Trace Elements in Natural Water, lote: S110203005 foi utilizado na validação da metodologia aplicada.

Para o preparo das soluções padrão de calibração para sedimentos foram utilizadas soluções estoque monoelementares de Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn em  $\text{HNO}_3$  0,14 mol  $\text{L}^{-1}$ . O material de referência certificado NIST 1944 – Waterway Sediment, lote: S110203005 foi utilizado na validação do método

### **3.3. PREPARO DAS CURVAS ANALÍTICAS PARA ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS**

As soluções analíticas de calibração foram preparadas a partir de diluições de alíquotas de soluções estoque monoelementares contendo 1000 mg  $\text{L}^{-1}$  de cada elemento em  $\text{HNO}_3$  0,14 mol  $\text{L}^{-1}$ . As concentrações usadas para obtenção da curva analítica de calibração para águas superficiais foram 0; 0,025; 0,05; 0,10; 0,25; 0,50; 1,0 e 2,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Hg; 0; 0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10; 20 e 40  $\mu\text{g L}^{-1}$  para As, Ag, Be, Cd, Cu, Ni, Pb, Se, Sb, Tl e U; e 0; 10; 25; 50; 75; 100; 200 e 300  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Al, B, Ba, Co, Cr, Fe, Li, Mn, P, V e Zn todas preparadas em  $\text{HNO}_3$  0,14 mol  $\text{L}^{-1}$  e  $\text{HCl}$  0,04 mol  $\text{L}^{-1}$ . As concentrações usadas para obtenção da curva analítica de calibração para sedimentos foram 0; 0,05; 0,10; 0,25; 0,50; 0,75; 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Hg; 0; 0,1; 0,5; 1,0; 2,5; 5,0; 10; 20; 40 e 60  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Ag, As, Be, Cd, Co, Ni, Pb, Sb, Se, V e U; e 0; 2,5; 5,0; 10; 25; 50; 100; 150; 200 e 300  $\mu\text{g L}^{-1}$  para B, Ba, Cu, Cr, Li, Mn, P, Tl e Zn todas preparadas em  $\text{HNO}_3/\text{HCl}$  (3:1), ou seja, 9,0 mL de  $\text{HNO}_3$  e 3,0 mL de  $\text{HCl}$  aferidos para um balão volumétrico 25 mL. As curvas analíticas foram preparadas em tubos Falcon de 15 mL com volume final de 5 mL cada ponto. O preparo dos experimentos para avaliação da repetibilidade e precisão intermediária foi realizado de forma similar ao branco, efetuando a adição de solução monoelementar do padrão dos elementos nas concentrações estipuladas para os testes para águas superficiais: 0,10; 0,25 e 0,50  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Hg; 1,0; 5,0 e 10  $\mu\text{g L}^{-1}$  para As, Ag, Be, Cd, Ni, Pb, Se, Sb, Tl e U; e 1,0; 2,0 e 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Cu; 25, 50 e 75  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Al, B, Ba, Co, Cr, Fe, Li, Mn, P, V e Zn. O material de referência certificado foi diluído com água ultrapura duas vezes antes de realizarmos à leitura.

Para sedimentos a adição de solução monoelementar padrão dos elementos foram: 0,50; 0,75 e 1,0  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Hg; 0,1; 2,5 e 40  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Ag; 2,5; 25 e 200  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Tl; 5,0; 10 e 20  $\mu\text{g L}^{-1}$  para Pb; 2,5; 5,0 e 10  $\mu\text{g L}^{-1}$  para As, Be, Cd, Co, Ni, Se, Sb, V e U; 25, 50 e 100  $\mu\text{g L}^{-1}$  para B, Ba, Cr, Cu, Li, Mn, P e Zn. O material de referência certificado foi diluído com água ultrapura 25 vezes antes de realizarmos a leitura.

### **3.4. COLETA DAS AMOSTRAS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS DA BACIA DO RIO DOCE**

As amostras de águas superficiais e sedimentos foram coletadas pela equipe do Laboratório de Limnologia, Ecotoxicologia e Ecologia Aquática (LIMNEA) coordenada pelo professor José Fernandes Bezerra Neto, do Instituto de Ciências Biológicas (ICB-UFMG), dentro do projeto de avaliação dos impactos do rompimento da Barragem de Fundão, Mariana, MG, na dinâmica espaço-temporal dos processos biogeoquímicos e biota aquática do rio Doce (MG), Edital 10/2018.

Para águas superficiais as coletas foram realizadas quadrimestralmente nos meses de janeiro, abril, julho e outubro de 2022 a 2024. Os sedimentos por sua vez, foram coletados semestralmente nos meses de abril e outubro de 2023 a 2024. Em cada ponto de coleta, foram extraídas 3 amostras tanto para águas superficiais quanto para sedimentos.

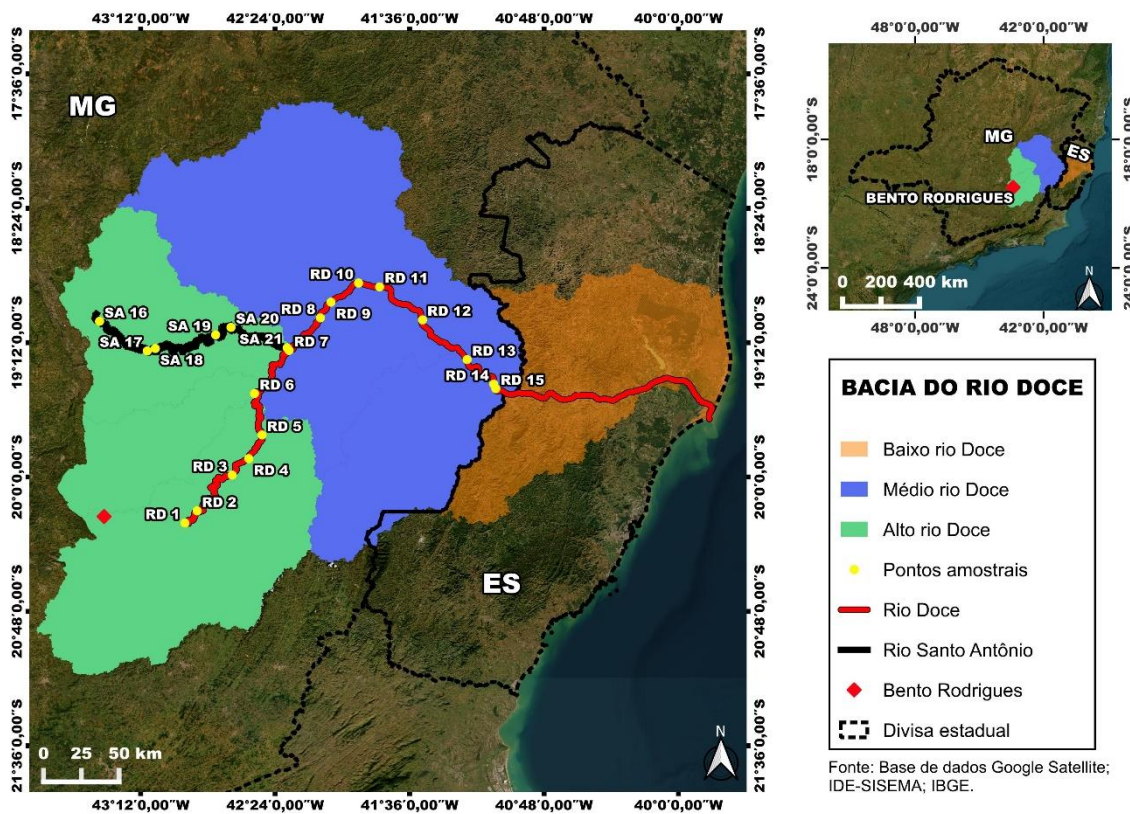
Para a coleta de água superficial, a garrafa de Van Dorn foi submersa e aberta lateralmente na profundidade de 50 cm, para entrada de água no equipamento, fechada com o sinalizador de peso e emergida. Um de seus bicos tem a mangueira retirada, por onde a amostra foi transferida para os frascos de coleta cilíndricos de polipropileno de 15 ou 50 mL, devidamente identificados.

As amostras de água adicionadas nos frascos de 15 mL, utilizados para análise de metais dissolvidos, foram filtradas com auxílio de seringa e filtro com porosidade de 0,22  $\mu\text{m}$ . O total de 1 mL de ácido nítrico bidestilado 50% v v<sup>-1</sup> foi adicionado nos frascos de 15 mL e 50 mL, utilizando pipeta de Pasteur, para preservação das amostras para as determinações de metais totais e dissolvidos. As amostras foram então acondicionadas em caixa térmica contendo gelo e preservadas até seu envio para laboratório e posterior análise. Após recebimento no laboratório, as amostras foram mantidas sob congelamento

até etapa de digestão. As coletas foram realizadas trimestralmente com início em abril de 2022 e final em abril de 2024. Sendo assim, foram realizadas um total de nove coletas de águas superficiais contempladas neste trabalho. A localização geográfica dos pontos amostrais está apresentada na Tabela S3 do arquivo complementar.

Para a coleta de sedimento, com o auxílio de um recipiente de inox inerte, moveu-se o recipiente de inox suavemente na horizontal sobre a superfície do sedimento próximo a interface água/sedimento (perfil de 5 cm). Em seguida, transferiu-se o material coletado para um frasco cilíndrico de polipropileno de 50 mL, devidamente identificado, garantindo o preenchimento do volume total. Com extremo cuidado, retirou-se o excesso de água e os tubos foram armazenados em caixas térmicas com gelo até armazenamento final em freezer. As amostras foram mantidas congeladas até a execução da etapa de digestão. As coletas foram realizadas semestralmente com início em abril de 2023 e final em abril de 2024. Sendo assim, foram realizadas um total de quatro coletas de sedimentos contempladas neste trabalho.

Ao longo do rio Doce - RD e do rio Santo Antônio - SA (sub-bacia de referência) foram definidos 21 pontos de coleta para águas superficiais e sedimentos, conforme apresentado na Tabela S3. A Figura 14 apresenta o mapa com a localização dos pontos de coleta dentro do Rio Doce (em vermelho) e do rio Santo Antônio (em preto) para águas superficiais e sedimentos.



FONTE: Autor.

Figura 14. Localização dos pontos de coleta na bacia do rio Doce: em vermelho pontos de coleta do rio Doce e em preto do rio Santo Antônio.

Para este estudo, o rio Santo Antônio foi considerado rio de referência, ou seja, um rio que não foi afetado pelo derramamento de rejeito. Dessa forma, pretende-se comparar os valores de concentração dos elementos do rio de referência com os valores obtidos pelo rio Doce, afetado pelo rejeito de mineração.

### 3.5. PREPARO DAS AMOSTRAS POR DIGESTÃO ÁCIDA ASSISTIDA POR RADIAÇÃO MICRO-ONDAS COM FRASCOS PRESSURIZADOS

#### 3.5.1. ÁGUAS SUPERFICIAIS

Foram coletadas três amostras de águas superficiais para metais dissolvidos e totais em cada um dos 21 pontos de coleta, portanto as amostras para determinação de metais totais foram digeridas e analisadas em duplicata para cada triplicata de coleta, totalizando uma sextuplicata e, para determinação de metais dissolvidos as amostras foram analisadas em triplicata para cada duplicata de coleta.

Segundo a metodologia EPA 3051A, alíquotas de 9 mL das amostras de água superficial foram transferidas para os frascos reacionais de PFA do forno de micro-ondas e adicionados 800  $\mu\text{L}$  de  $\text{HNO}_3$  e 200  $\mu\text{L}$  de  $\text{HCl}$ , ambos concentrados. As amostras foram digeridas em triplicata em forno assistido por radiação micro-ondas (Milestone Ethos Lean, Sorisole, Itália) à média pressão. Os frascos foram devidamente fechados e submetidos a um programa de digestão constituído de 12 min de rampa até atingir 170  $^\circ\text{C}$ , sendo mantidos por 10 min a essa temperatura. Após resfriamento de uma hora, os digeridos foram aferidos para 25 mL em tubos Falcon<sup>®</sup> de 50 mL (diluição de 2,5 vezes). A diluição das amostras foi realizada com água ultrapura juntamente à adição de 100  $\mu\text{L}$  da solução de Rh (Fluka, Suíça), utilizado como padrão interno para leitura por ICP-MS na concentração final de 5,0  $\mu\text{g L}^{-1}$ . A Figura 15 apresenta um esquema representativo do preparo e análise das amostras de água.

As triplicatas dos brancos analíticos foram preparadas utilizando-se 9 mL da amostra de água reagente digeridas em 800  $\mu\text{L}$  de  $\text{HNO}_3$  e 200  $\mu\text{L}$  de  $\text{HCl}$  concentrados, em forno assistido por radiação micro-ondas de média pressão. Anteriormente às análises por ICP-MS, os digeridos foram diluídos 2,5 vezes para compatibilização com os requisitos adequados para leituras no equipamento.

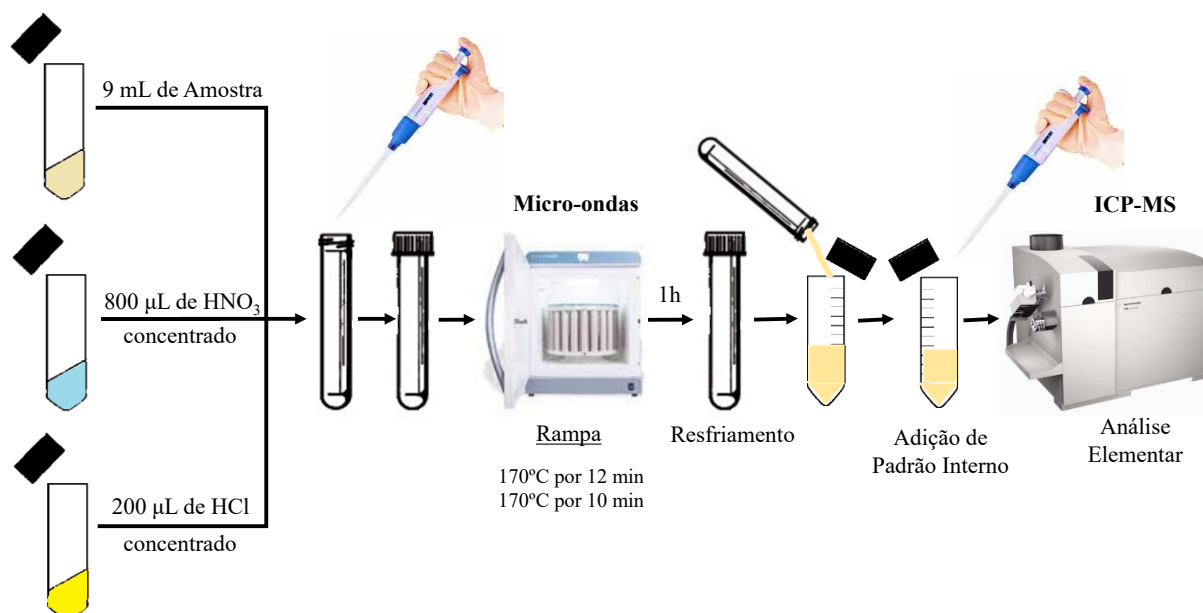


Figura 15. Esquema para determinação de metais totais em amostras de águas superficiais (EPA 3051A).

Para a análise de metais dissolvidos, as amostras de água foram diretamente analisadas por ICP-MS após uma diluição de cinco vezes com água ultrapura (Figura 16). A diluição das amostras foi realizada com água ultrapura juntamente à adição de solução de Rh (Fluka, Suíça), utilizado como padrão interno para leitura por ICP-MS na concentração final de  $5,0 \mu\text{g L}^{-1}$ . As triplicatas dos brancos analíticos foram preparadas da mesma forma.

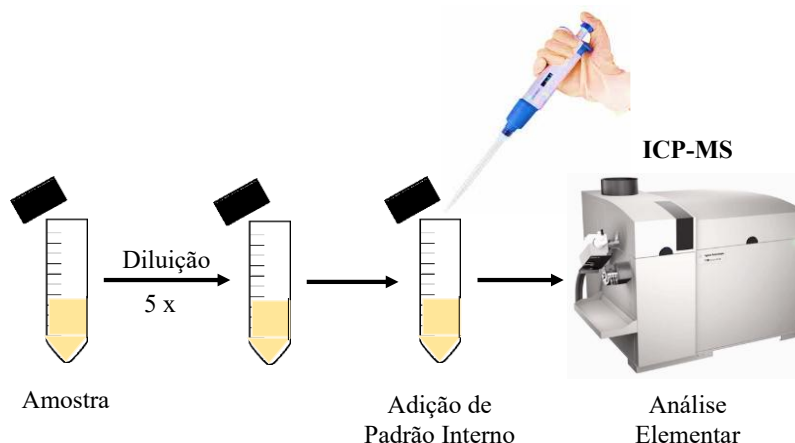


Figura 16. Esquema para determinação de metais dissolvidos em amostras de águas superficiais.

### 3.5.2. SEDIMENTOS

As amostras de sedimento foram descongeladas, secas sob fluxo de capela de exaustão a temperatura ambiente por 7 dias. Posteriormente a amostra foi peneirada (peneira de granulometria menor que 2 mm) e macerada para redução dos grânulos de sedimentos a pó. De modo a garantir que a secagem a temperatura ambiente foi suficiente para redução da umidade dez amostras de diferentes tipos de sedimentos foram escolhidas para liofilização.

Em seguida, massas de aproximadamente 0,5g das amostras de sedimentos foram pesadas e transferidas para os frascos reacionais de PFA do micro-ondas e adicionados 9,0 mL de  $\text{HNO}_3$  e 3,0 mL de  $\text{HCl}$ , ambos concentrados. As amostras foram digeridas em triplicata em forno assistido por radiação micro-ondas (Milestone Ethos Lean, Sorisole, Itália) em alta pressão. Os frascos foram devidamente fechados e submetidos a

um programa de digestão constituído de 25 min de rampa até atingir 130°C, sendo mantidos por 5 min nessa temperatura. Após resfriamento de uma hora, os digeridos foram aferidos para 25 mL em tubos Falcon® de 50 mL (diluição de 2,27 vezes). A diluição das amostras foi realizada com água ultrapura juntamente à adição de 100 µL da solução de Rh (Fluka, Suíça), utilizado como padrão interno para leitura por ICP-MS na concentração final de 5,0 µg L<sup>-1</sup>. A Figura 17 apresenta um esquema representativo do preparo de amostra e análise das amostras de sedimentos.

As triplicatas dos brancos analíticos foram preparadas utilizando-se de 9 mL de HNO<sub>3</sub> e 3 mL de HCl concentrados, em forno assistido por radiação micro-ondas. Anteriormente as análises por ICP-MS, os digeridos foram diluídos 25 vezes para compatibilização com os requisitos adequados para leituras no equipamento.

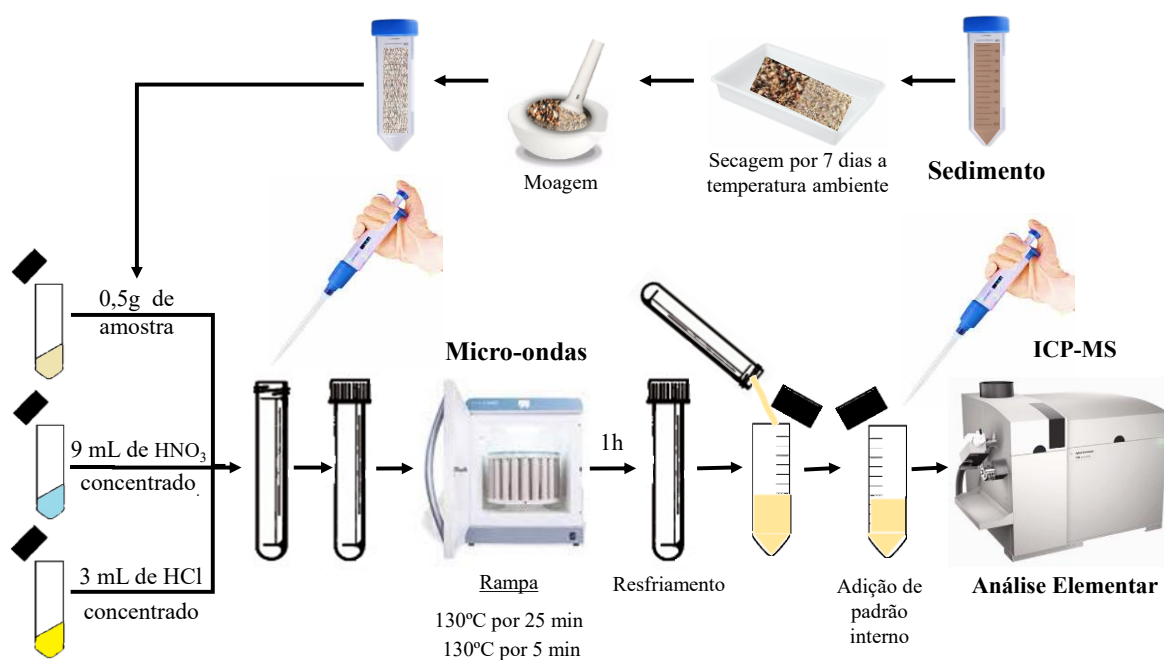


Figura 17. Esquema para extração e determinação de metais em amostras de sedimentos (EPA 3051A).

### 3.6. INSTRUMENTAÇÃO

A determinação dos elementos Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn foi realizada utilizando um ICP-MS com cela de colisão por discriminação de energia cinética (CC/KED) utilizando gás hélio (99,995%) e sem uso da cela de colisão (STD), utilizando argônio 99,99% como gás de purga. A

Tabela 2 apresenta a descrição dos parâmetros operacionais utilizados no ICP-MS (série 7700, Agilent Technology).

Tabela 2. Condições operacionais utilizadas na quantificação dos analitos por ICP-MS.

Parâmetro Instrumental	Valor Empregado
Potência de radiofrequência (kW)	1,55
Vazão do gás do plasma (L min <sup>-1</sup> )	15
Vazão do gás auxiliar (L min <sup>-1</sup> )	1,00
Vazão de nebulização (L min <sup>-1</sup> )	1,05
Profundidade de amostragem (mm)	8,0
Vazão de He na célula de colisão (mL min <sup>-1</sup> )	4,5
Tempo de integração (s)	3,0
Nebulizador	Micro-Mist
Câmara de nebulização	Scott type – double pass
Números de replicatas	3
Isótopos	<sup>7</sup> Li, <sup>9</sup> Be, <sup>11</sup> B, <sup>27</sup> Al, <sup>31</sup> P, <sup>51</sup> V, <sup>52</sup> Cr, <sup>55</sup> Mn, <sup>56</sup> Fe, <sup>58</sup> Ni, <sup>59</sup> Co, <sup>64</sup> Zn, <sup>65</sup> Cu, <sup>75</sup> As, <sup>82</sup> Se, <sup>107</sup> Ag, <sup>114</sup> Cd, <sup>121</sup> Sb, <sup>137</sup> Ba, <sup>202</sup> Hg, <sup>205</sup> Tl, <sup>208</sup> Pb, <sup>238</sup> U

**FONTE:** Autor

O procedimento de determinação de metais e metaloides em amostras de água superficiais e sedimentos por ICP-MS foi avaliado pelas seguintes figuras de mérito: linearidade, limite de detecção, limite de quantificação, veracidade e precisão através da repetibilidade.

### 3.7 PARÂMETROS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÕES POR ICP-MS EM AMOSTRAS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS

Visando a avaliação de possíveis interferências espectrais, o desempenho do equipamento ICP-MS com CC/KED foi avaliado para determinação de Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn nas amostras de água superficiais e sedimentos, empregando os modos de operação padrão sem gás de colisão (STD ou No gas) e com cela de colisão e discriminação por energia cinética (CC/KED ou He).

O modo com uso da STD possibilita uma maior sensibilidade, ou seja, o sinal analítico é consideravelmente maior. Além disso, o custo de análise é reduzido pois não usa de gás hélio<sup>104</sup>. No entanto, experimentos de adição e recuperação foram realizados visando a determinação dos isótopos e modo de aquisição com e sem CC/KED, buscando a melhor sensibilidade na quantificação de cada analito, utilizando a padronização interna como estratégia.

A partir da comparação entre os coeficientes angulares obtidos (sensibilidade) utilizando calibração externa e a padronização interna, empregou-se o teste F com 95% de confiança. A faixa de trabalho para análise de águas superficiais da bacia do rio Doce foi determinada para águas superficiais de classe 2 (Tabela S2) e sedimentos (Tabela S1).

Para avaliar a linearidade dos métodos foram preparadas três curvas analíticas independentes, a partir de três soluções intermediárias de 1000 mg L<sup>-1</sup> (descrito no item 3.1.1), conforme documento de validação do INMETRO<sup>105</sup>. Em seguida empregou-se o teste F e o teste t de Student com 95% de confiança e analisou-se o coeficiente de determinação para verificar a efetividade do método proposto. Medidas foram realizadas empregando-se a calibração externa e a padronização interna com o Rh como padrão interno.

Os limites de detecção (LD) e de quantificação (LQ) dos métodos foram estimados de acordo com o documento orientativo do INMETRO<sup>105</sup> que apresenta várias maneiras para realizar a estimativa destes valores. Uma das maneiras descritas neste documento, e utilizada neste trabalho, é a estimativa a partir da curva analítica e do desvio padrão de dez brancos autênticos.

Os limites de detecção podem ser estimados pela equação 1:

$$LD = 3,3 s/b \quad \text{Equação (1)}$$

Os limites de quantificação podem ser estimados pela equação 2:

$$LQ = 10 s/b \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

s = desvio padrão da resposta do branco.

b = inclinação (coeficiente angular) da curva analítica.

### 3.8 AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO PARA AMOSTRAS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS

A fim de verificar os métodos e garantir a confiabilidade dos resultados para as amostras de águas superficiais e sedimentos coletadas, foram realizados experimentos de adição e recuperação em três níveis de adição e a análise de materiais de referência certificados (MRC). Os níveis foram escolhidos com base na faixa de trabalho em que foi realizada a análise dos 23 analitos investigados para águas superficiais e dos 21 analitos para as amostras de sedimentos. O padrão interno Rh foi adicionado na concentração de  $5 \mu\text{g L}^{-1}$ . O cálculo de recuperação foi realizado pela equação 3<sup>105</sup>.

$$\text{Recuperação (\%)} = \left( \frac{C_1 - C_2}{C_3} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

C<sub>1</sub> = concentração do analito na amostra fortificada.

C<sub>2</sub> = concentração do analito na amostra não fortificada.

C<sub>3</sub> = concentração do analito adicionado à amostra fortificada.

Além da adição e recuperação, realizou-se a análise de um material de referência certificado (MRC). O material foi analisado por leitura direta, sem preparo de amostra, nas mesmas condições das amostras de águas superficiais (NIST 1640A) e para sedimentos (NIST 1944) realizou-se a extração empregando as mesmas condições utilizadas nas amostras de sedimentos, e posteriormente foram calculadas as recuperações para todos os analitos de interesse, exceto o Cu (nas amostras de águas superficiais). Para a análise do Cu o MRC foi diluído 5 vezes. O cálculo de recuperação a partir do MRC foi realizado através da equação 4<sup>105</sup>.

$$\text{Recuperação (\%)} = \left( \frac{\text{Valor observado}}{\text{Valor esperado}} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação (4)}$$

Os critérios de aceitação da recuperação através do experimento de adição e recuperação ou pela análise do MRC, pode ser vislumbrada na Tabela S4.

A precisão foi avaliada por meio da repetibilidade adicionando os 23 e 21 analitos de interesse aos brancos de amostra autênticos para águas superficiais e sedimentos, respectivamente, conforme diretrizes do INMETRO. Usualmente expressa pelo desvio padrão relativo ou pelo coeficiente de variação (CV ou DPR), a repetibilidade foi calculada seguindo a equação 5<sup>105</sup>. Os critérios de aceitação dos DPRs podem ser vislumbrados na Tabela 6.

$$CV(\%) = DPR = \left( \frac{DP}{CMD} \right) \cdot 100 \quad \text{Equação (5)}$$

Em que:

DP = desvio padrão.

CMD = concentração média determinada.

### **3.9 GEOPROCESSAMENTO**

#### **3.9.1 MAPBIOMAS – USO DA TERRA E COBERTURA DO SOLO (LULC)**

Mapbiomas é uma plataforma que fornece informações sobre uso da terra e cobertura do solo no Brasil usando dados de sensoriamento remoto e técnicas avançadas de processamento de imagens. Com este produto, é possível obter mapas LULC de 1985 até o presente, disponíveis para download em sua plataforma virtual em <http://mapbiomas.org/pages/downloads><sup>106</sup>. Os dados disponíveis são organizados em diferentes LULC, permitindo análises detalhadas de mudanças e tendências ao longo do tempo. As classes de Mapbiomas são: I) Floresta; II) Formação Natural Não-Florestal; III) Agricultura; IV) Área Não-Vegetada; e V) Corpos d'água. Vale ressaltar que cada classe pode ser subdividida em classes mais detalhadas. Por exemplo, a classe Floresta é subdividida em: a) Formação Florestal; b) Formação Savana; c) Mangue; d) Floresta Alagada; e e) Restinga arbórea. As LULC têm uma resolução espacial de 30 metros e uma plataforma web onde os usuários podem acessar, visualizar e baixar os dados (Souza et al., 2020). A análise de acurácia do projeto é pré-determinada por técnicas de amostragem estatística, consistindo em aproximadamente 75.000 amostras independentes por técnicos treinados na interpretação visual das imagens do Landsat, mostrando uma precisão global

que varia de 70% a 95% em todos os biomas brasileiros<sup>106</sup>. Todas as análises geoespaciais também incluíram um “buffer” de até 5 km a partir de cada ponto de amostragem.

### **3.9.2 ALTIMETRIA E DADOS DO SOLO**

Os dados de classificação do solo utilizados foram derivados da SEMAD (Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável - Departamento Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável) / Universidade Federal de Viçosa (UFV), que se refere a um conjunto de informações e mapas que descrevem a classificação do solo para Minas Gerais. A principal característica dos dados de classificação do solo da SEMAD/UFV é a classificação taxonômica dos solos segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS) ou o Sistema de Classificação do Solo do USDA (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos). A delimitação das áreas de influência e a estimativa do uso da terra para os 21 pontos de amostragem na DRB mostram a distribuição geográfica desses pontos ao longo da bacia e fornecem uma visão geral da cobertura espacial das análises realizadas em um buffer de 5 km.

### **3.10 ANÁLISE POR COMPONENTES PRINCIPAIS – PCA**

Para a análise estatística multivariada dos dados, primeiramente gerou-se uma tabela com todos os resultados de concentração de metais totais, metais dissolvidos e metaloide total sem a presença dos desvios para ambas as coletas. A partir dos resultados de concentração obtidos para as amostras de águas superficiais e sedimentos coletadas na bacia hidrográfica do rio Doce e empregando o software Matlab software, v. 7.10 (The MathWorks, Natick, MA, USA) juntamente com o PLS\_Toolbox, v. 5.2.2 (Eigenvector Research, Manson, WA) foram gerados gráficos a fim de encontrar possíveis correlações entre as variáveis e gerar hipóteses sobre os dados.

### **3.11 ÍNDICE DE GEOACUMULAÇÃO EM AMOSTRAS DE SEDIMENTO - $I_{geo}$**

O Índice de geoacumulação -  $I_{geo}$  foi definido originalmente por Mueller em 1979<sup>107</sup> na qual são estabelecidas uma razão entre as concentrações naturais dos metais em

sedimentos e um valor de referência tomado como valor de fundo ou *background* (Equação 6).

$$I_{geo} = \frac{\log_2 C_n}{1,5 B_n} \quad \text{Equação (6)}$$

Em que:

$C_n$  = Concentração do metal na amostra;

$B_n$  = Concentração do metal no background.

De modo a classificar a qualidade dos sedimentos amostrados, os resultados do  $I_{geo}$  serão comparados com a Tabela 3.

Tabela 3. Classificação para os níveis de contaminação dos sedimentos a partir do índice de geoacumulação.

Indicador	Valores de $I_{geo}$	Qualidade do Sedimento
	> 5	Contaminação extrema
	4 a 5	Contaminação elevada e extrema
	3 a 4	Contaminação elevada
	2 a 3	Contaminação moderada a alta
	1 a 2	Contaminação moderada
	0 a 1	Sem contaminação a contaminação moderada
	0	Sem contaminação
	< LQ	Não se aplica

Como a concentração dos elementos pode mudar regionalmente, dificultando assim, a determinação exata de um valor de *background*, utilizamos a média da concentração determinada para cada elemento em cada um dos pontos de coleta do rio Santo Antônio, escolhido como rio de referência por possuir características semelhantes ao rio Doce, como nosso valor de background para o cálculo do índice de geoacumulação e para o fator de enriquecimento.

### 3.12 RAZÃO DE ENRIQUECIMENTO PARA AMOSTRAS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SEDIMENTOS

A razão de enriquecimento – RE é a razão entre a concentração do elemento no sedimento e sua concentração natural ou *background*, sendo muito utilizado para estimar

os impactos antropogênicos dos metais. Auxiliando no entendimento do quão enriquecida a amostra está pelo elemento (Equação 7).

$$RE = \frac{C_n}{B_n} \quad \text{Equação (7)}$$

Em que:

$C_n$  = Concentração do metal na amostra;

$B_n$  = Concentração do metal no background.

De modo a classificar a águas superficiais e os sedimentos amostrados, os resultados do RE são comparados com a Tabela 4.

Tabela 4. Classificação dos valores da razão de enriquecimento.

Indicador	Fator de Enriquecimento	
		FE < 1
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

### 3.13 GRAU DE CONTAMINAÇÃO PARA ÁGUAS SUPERFICIAIS

O Grau de Contaminação – GC é empregado para indicar o impacto coletivo dos metais nas águas superficiais conforme Equação 8<sup>108</sup>.

$$GC = \left( \frac{M_i}{MAC_i} \right) - 1 \quad \text{Equação (8)}$$

Em que:

$M_i$  = Concentração do metal na amostra;

$MAC_i$  = Concentração máxima do metal permitida pela legislação CONAMA 357/05.

Tabela 5. Classificação dos valores do grau de contaminação.

<b>Indicador</b>	<b>Grau de Contaminação</b>	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

## **Capítulo 4.**

# **Águas Superficiais**

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das concentrações analíticas de Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn, nas águas superficiais, conforme descrito no capítulo 3. As concentrações obtidas foram comparadas aos valores limites estabelecidos na resolução CONAMA 357/05. Posteriormente, aplicou-se a análise multivariada em conjunto com o uso do geoprocessamento, para identificar correlações positivas e/ou negativas entre os elementos e as características de uso do solo na área da bacia do rio Doce.

#### **4.1 PARÂMETROS ANALÍTICOS DETERMINADOS POR ICP-MS**

Experimentos de adição e recuperação foram realizados para avaliar as exatidões empregando os dois métodos de calibração, por padrão externo e por padronização interna, avaliando-se Ge, Rh e Y como padrões internos. Observando a Tabela 6 e a partir da comparação entre os coeficientes angulares obtidos (sensibilidade) utilizando ambas as estratégias de calibração, pode-se observar uma diferença significativa entre os valores (teste F com 95% de confiança), considerando os 23 analitos exceto para o mercúrio. Os resultados indicaram que a padronização interna foi fundamental para garantir a exatidão da análise.

A faixa de trabalho para análise de águas superficiais da bacia do rio Doce foi determinada a partir dos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 para águas de classe 2 (Tabela 6). A linearidade do método foi avaliada e não houve diferença estatística entre as triplicatas utilizando os testes F e t com 95% de confiança.

Para o cálculo da estimativa dos LD e LQ da determinação de metais dissolvidos em amostras de águas superficiais, foram preparadas dez soluções de branco analítico, utilizando-se água ultrapura, ácido nítrico e ácido clorídrico na mesma concentração das amostras. Para metais e metaloides totais em amostras de águas superficiais, foram utilizadas dez soluções de branco analítico (réplicas autênticas) obtidas a partir do processo de digestão. Neste contexto, os limites de detecção e quantificação foram calculados e estão adequados para quantificação dos elementos analisados conforme o limite máximo determinado pelo órgão responsável (Tabela 6).

Tabela 6. Figuras de mérito obtidas para a determinação de Ag, Al (dissolvido), As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu (dissolvido), Fe (dissolvido), Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn por ICP-MS usando Rh como padrão interno em águas superficiais.

Isótopo	Modo de aquisição	Faixa de trabalho ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	R <sup>2</sup>	Sensibilidade	LQ ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Limite máximo Conama ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
<sup>7</sup> Li	No gas	10-300	0,9998	0,0046	1,6	2500
<sup>9</sup> Be	No gas	0,10-40	0,9993	0,0025	0,24	40
<sup>11</sup> B	No gas	10-300	0,9994	0,0015	6,5	500
<sup>27</sup> Al	He	10-300	0,9929	0,0006	30	100
<sup>31</sup> P	No gas	10-300	0,9998	0,0018	12	100
<sup>51</sup> V	He	10-300	0,9995	0,1046	0,56	100
<sup>52</sup> Cr	He	10-300	0,9992	0,1233	1,2	50
<sup>55</sup> Mn	He	10-300	0,9997	0,0476	1,1	100
<sup>56</sup> Fe	He	10-300	0,9996	0,0435	3,7	300
<sup>58</sup> Ni	He	0,10-40	0,9995	0,1628	3,1	25
<sup>59</sup> Co	He	10-300	0,9993	0,2536	0,16	50
<sup>64</sup> Zn	He	10-300	0,9973	0,0396	9,9	180
<sup>65</sup> Cu	He	0,10-40	0,9996	0,0992	0,60	9
<sup>75</sup> As	He	0,10-40	0,9993	0,0204	0,33	10
<sup>82</sup> Se	No gas	0,10-40	0,9999	0,0011	5,3	10
<sup>107</sup> Ag	No gas	0,10-40	0,9999	0,0757	0,14	10
<sup>114</sup> Cd	No gas	0,10-40	0,9995	0,0354	0,16	1
<sup>121</sup> Sb	He	0,10-40	0,9919	0,1001	2,7	5
<sup>138</sup> Ba	No gas	10-300	0,9993	0,1639	0,46	700
<sup>202</sup> Hg	No gas	0,025-2,0	0,9992	0,0173	0,11	0,2
<sup>205</sup> Tl	No gas	0,10-40	0,9999	0,1143	0,060	NA
<sup>208</sup> Pb	No gas	0,10-40	0,9999	0,0858	0,36	10
<sup>238</sup> U	No gas	0,10-40	0,9999	0,1329	0,070	20

NA: Não se aplica. No gas: uso de argônio. He: Uso de hélio.

Fonte: Autor

A veracidade do método e a precisão foram verificadas com o material de referência SRM NIST 1640A foram avaliadas, respectivamente, em termos de porcentagem de recuperação e pelos DPR calculados, conforme Tabela S4. As recuperações obtidas foram satisfatórias e dentro do critério de aceitação de 80 a 120 % e todos os valores do desvio padrão relativo obtidos se apresentaram inferiores a 10%, indicando uma boa veracidade e precisão do método (Tabela 7).

Foram calculados os valores de adição e recuperação sem o uso do padrão interno e utilizando os três padrões internos (Rh, Ge e Y). No entanto, o Rh foi escolhido por ser o um elemento que não estava presente nas amostras (de águas superficiais e sedimentos, mesmo com a determinação de elementos terras raras) e que obtiveram melhores resultados. Adotando uma condição de compromisso considerando todos os analitos, recuperações satisfatórias foram obtidas utilizando Rh como padrão interno. As Tabelas 8 a 13 apresentam as recuperações obtidas para os experimentos de adição e recuperação, considerando os modos de aquisição otimizados. As recuperações obtidas para os 23 analitos de interesse estão dentro do critério de aceitação (recuperações entre 80 a 120%), com pequenas exceções para alguns níveis de adição investigados para os analitos Ag, Be, Cr, Hg, P e Sb.

Ao longo do rio Doce e seus afluentes existe uma diversidade de usos dos recursos hídricos e do solo que trazem diferenças significativas na qualidade da água. Sendo assim, para a escolha das amostras no experimento de adição e recuperação levou-se em consideração a distância (Figura 14) entre os pontos do rio. Dessa forma, os pontos RD.3, RD.6, RD.14 do rio Doce e os pontos SA.19 e SA.21 do rio Santo Antônio foram selecionados para o estudo. Os pontos RD.3 e RD.6 estão localizados no alto rio Doce e o RD.14 no médio rio Doce, enquanto os pontos SA.19 e SA.21 estão localizados no rio Santo Antônio, considerado neste trabalho como um rio de referência, ou seja, que possui características similares ao do rio Doce, no entanto, não foi impactado pelo rompimento da barragem de Fundão.

Tabela 7. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) no SRM NIST 1640a usando ICP-MS com padronização interna.

Isótopo	Valor certificado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em % $\pm$ DPR)
$^7\text{Li}$	NA	NA	NA
$^9\text{Be}$	$3,026 \pm 0,028$	$3,50 \pm 0,05$	$116 \pm 2$
$^{11}\text{B}$	$303,1 \pm 3,1$	$368 \pm 15$	$121 \pm 5$
$^{27}\text{Al}^a$	$53 \pm 1,8$	$47 \pm 3$	$89 \pm 6$
$^{31}\text{P}$	NA	NA	NA
$^{51}\text{V}$	$15,05 \pm 0,25$	$13,5 \pm 0,6$	$90 \pm 4$
$^{52}\text{Cr}$	$40,54 \pm 0,3$	$46 \pm 1$	$113 \pm 3$
$^{55}\text{Mn}$	$40,39 \pm 0,36$	$41 \pm 1$	$101 \pm 3$
$^{56}\text{Fe}^a$	$36,8 \pm 1,8$	$39 \pm 2$	$107 \pm 7$
$^{58}\text{Ni}$	$25,32 \pm 0,14$	$23,1 \pm 0,8$	$91 \pm 3$
$^{59}\text{Co}$	$20,24 \pm 0,24$	$18,0 \pm 0,5$	$89 \pm 2$
$^{64}\text{Zn}$	$55,64 \pm 0,35$	$56 \pm 2$	$101 \pm 4$
$^{65}\text{Cu}^b$	$17,15 \pm 0,51$	$15,5 \pm 0,4$	$91 \pm 1$
$^{75}\text{As}$	$8,075 \pm 0,07$	$8,1 \pm 0,5$	$100 \pm 6$
$^{82}\text{Se}$	$20,13 \pm 0,17$	$17,6 \pm 0,8$	$87 \pm 4$
$^{107}\text{Ag}$	$8,081 \pm 0,046$	$7,27 \pm 0,05$	$90 \pm 1$
$^{114}\text{Cd}$	$3,992 \pm 0,074$	$4,58 \pm 0,04$	$115 \pm 1$
$^{121}\text{Sb}$	$5,105 \pm 0,046$	$5,5 \pm 0,2$	$107 \pm 3$
$^{138}\text{Ba}$	$151,8 \pm 0,83$	$146 \pm 2$	$96 \pm 1$
$^{202}\text{Hg}$	NA	NA	NA
$^{205}\text{Tl}$	$1,619 \pm 0,016$	$1,62 \pm 0,04$	$100 \pm 2$
$^{208}\text{Pb}$	$12,10 \pm 0,05$	$11,76 \pm 0,08$	$97 \pm 1$
$^{238}\text{U}$	$25,35 \pm 0,27$	$24,3 \pm 0,1$	$95,7 \pm 0,4$

NA: não se aplica (valor não certificado no SRM); <sup>a</sup> Al e Fe foram determinados no SRM sem nenhuma diluição; <sup>b</sup> Cu foi determinado no SRM diluído cinco vezes.

Tabela 8. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de águas superficiais de classe 2 usando padronização interna por ICP-MS.

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)
$^7\text{Li}$	RD.3	0	$0,97 \pm 0,06$		$^9\text{Be}$	RD.3	0	< LD	
		25	$27,7 \pm 0,8$	$107 \pm 3$			1	$1,1 \pm 0,2$	$106 \pm 22$
		50	$56 \pm 5$	$110 \pm 11$			5	$5,5 \pm 0,5$	$109 \pm 9$
		75	$89 \pm 2$	$117 \pm 3$			10	$12,1 \pm 0,8$	$121 \pm 8$
	RD.14	0	< LD			RD.14	0	< LD	
		25	$26,4 \pm 0,2$	$103 \pm 1$			1	$1,14 \pm 0,07$	$113 \pm 7$
		50	$54 \pm 2$	$107 \pm 4$			5	$5,3 \pm 0,2$	$106 \pm 4$
		75	$89 \pm 2$	$118 \pm 3$			10	$11,2 \pm 1,0$	$112 \pm 10$
	SA.21	0	$24 \pm 1$			SA.21	0	$0,46 \pm 0,09$	
		25	$51 \pm 2$	$111 \pm 7$			1	$1,5 \pm 0,2$	$106 \pm 17$
		50	$79 \pm 2$	$111 \pm 9$			5	$5,8 \pm 0,5$	$108 \pm 10$
		75	$107 \pm 7$	$111 \pm 3$			10	$11,5 \pm 0,4$	$110 \pm 4$
$^{11}\text{B}$	RD.3	0	< LD		$^{27}\text{Al}$	RD.6	0	$16 \pm 2$	
		25	$30 \pm 2$	$99 \pm 6$			25	$45 \pm 1$	$115 \pm 2$
		50	$57 \pm 6$	$103 \pm 11$			50	$65 \pm 2$	$97 \pm 3$
		75	$88 \pm 4$	$111 \pm 5$			75	$93 \pm 3$	$103 \pm 3$
	RD.14	0	< LD			SA.19	0	< LD	
		25	$26,7 \pm 0,4$	$100 \pm 2$			25	$33 \pm 2$	$102 \pm 6$
		50	$55 \pm 2$	$106 \pm 3$			50	$60,7 \pm 0,7$	$87 \pm 1$
		75	$88 \pm 2$	$118 \pm 3$			75	$89 \pm 6$	$95 \pm 7$
	SA.21	0	$28 \pm 4$			SA.21	0	< LD	
		25	$51 \pm 2$	$91 \pm 7$			25	$28 \pm 1$	$114 \pm 4$
		50	$76 \pm 1$	$96 \pm 12$			50	$46 \pm 5$	$92 \pm 10$
		75	$104 \pm 9$	$101 \pm 3$			75	$74 \pm 7$	$99 \pm 9$

Tabela 9. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de águas superficiais de classe 2 usando padronização interna por ICP-MS (continuação).

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)
$^{31}\text{P}$	RD.3	0	$8 \pm 4$		$^{51}\text{V}$	RD.3	0	$0,9 \pm 0,4$	
		25	$37 \pm 5$	$118 \pm 17$			25	$27 \pm 1$	$103 \pm 5$
		50	$67 \pm 6$	$119 \pm 12$			50	$51 \pm 1$	$100 \pm 3$
		75	$94 \pm 5$	$115 \pm 7$			75	$76 \pm 2$	$100 \pm 2$
	RD.14	0	< LD			RD.14	0	$0,34 \pm 0,06$	
		25	$34 \pm 2$	$125 \pm 8$			25	$26 \pm 2$	$101 \pm 6$
		50	$65 \pm 1$	$124 \pm 3$			50	$53 \pm 2$	$105 \pm 5$
		75	$95 \pm 3$	$123 \pm 5$			75	$80,5 \pm 0,5$	$107 \pm 1$
	SA.21	0	$19 \pm 2$			SA.21	0	$20,9 \pm 0,2$	
		25	$45 \pm 4$	$103 \pm 17$			25	$45 \pm 2$	$98 \pm 9$
		50	$68 \pm 4$	$98 \pm 8$			50	$69 \pm 2$	$95 \pm 4$
		75	$94 \pm 6$	$100 \pm 7$			75	$97 \pm 3$	$102 \pm 4$
$^{52}\text{Cr}$	RD.3	0	$0,7 \pm 0,5$		$^{55}\text{Mn}$	RD.3	0	$35 \pm 4$	
		25	$26,8 \pm 0,9$	$104 \pm 4$			25	$59 \pm 3$	$97 \pm 10$
		50	$50 \pm 2$	$99 \pm 4$			50	$82 \pm 3$	$94 \pm 6$
		75	$75 \pm 2$	$99 \pm 3$			75	$107 \pm 2$	$96 \pm 2$
	RD.14	0	< LD			RD.14	0	$3,5 \pm 0,2$	
		25	$25 \pm 2$	$98 \pm 6$			25	$28 \pm 1$	$98 \pm 5$
		50	$52 \pm 2$	$104 \pm 3$			50	$55 \pm 2$	$102 \pm 3$
		75	$93 \pm 12$	$123 \pm 16$			75	$82 \pm 2$	$104 \pm 2$
	SA.21	0	$20,90 \pm 0,04$			SA.21	0	$21,4 \pm 0,5$	
		25	$46 \pm 2$	$99 \pm 9$			25	$45 \pm 2$	$95 \pm 9$
		50	$68 \pm 2$	$95 \pm 3$			50	$68 \pm 1$	$94 \pm 2$
		75	$96 \pm 2$	$101 \pm 3$			75	$96 \pm 1$	$99 \pm 2$

Tabela 10. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de águas superficiais de classe 2 usando padronização interna por ICP-MS (continuação).

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)
$^{56}\text{Fe}$	RD.6	0	$40 \pm 3$		$^{58}\text{Ni}$	RD.3	0	< LD	
		25	$66 \pm 2$	$106 \pm 3$			1	$1,43 \pm 0,03$	$81 \pm 3$
		50	$94 \pm 2$	$108 \pm 2$			5	$5,4 \pm 0,5$	$95 \pm 9$
		75	$119 \pm 2$	$106 \pm 2$			10	$10,3 \pm 0,1$	$97 \pm 1$
	SA.19	0	$99 \pm 10$			RD.14	0	< LD	
		25	$125 \pm 2$	$101 \pm 2$			1	< LD	
		50	$147 \pm 1$	$94 \pm 1$			5	$4,6 \pm 0,4$	$93 \pm 8$
		75	$178 \pm 8$	$105 \pm 4$			10	$9,8 \pm 0,3$	$98 \pm 3$
	SA.21	0	$116 \pm 3$			SA.21	0	< LD	
		25	$141 \pm 5$	$101 \pm 3$			1	< LD	
		50	$159,3 \pm 0,3$	$101 \pm 0$			5	$4,7 \pm 0,2$	$95 \pm 4$
		75	$187 \pm 6$	$106 \pm 3$			10	$10,0 \pm 0,6$	$100 \pm 6$
$^{59}\text{Co}$	RD.3	0	$0,24 \pm 0,05$		$^{64}\text{Zn}$	RD.3	0	$7 \pm 2$	
		25	$26,0 \pm 0,5$	$103 \pm 2$			25	$32 \pm 2$	$102 \pm 7$
		50	$50 \pm 1$	$99 \pm 3$			50	$53 \pm 3$	$92 \pm 6$
		75	$74 \pm 2$	$98 \pm 2$			75	$78 \pm 2$	$95 \pm 2$
	RD.14	0	$0,07 \pm 0,02$			RD.14	0	< LD	
		25	$24 \pm 1$	$97 \pm 5$			25	$24 \pm 2$	$92 \pm 7$
		50	$51 \pm 2$	$102 \pm 3$			50	$51 \pm 2$	$100 \pm 3$
		75	$78 \pm 1$	$104 \pm 1$			75	$79 \pm 2$	$104 \pm 3$
SA.21	0	$21,4 \pm 0,2$		SA.21	0	$21,8 \pm 0,8$			
	25	$46 \pm 2$	$97 \pm 7$		25	$44 \pm 2$	$89 \pm 9$		
	50	$72 \pm 5$	$101 \pm 5$		50	$70 \pm 5$	$96 \pm 5$		
	75	$97 \pm 4$	$100 \pm 10$		75	$94 \pm 4$	$96 \pm 9$		

Tabela 11. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de águas superficiais de classe 2 usando padronização interna por ICP-MS (continuação).

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)
$^{65}\text{Cu}$	RD.6	0	< LD		$^{75}\text{As}$	RD.3	0	$0,4 \pm 0,2$	
		1	$1,19 \pm 0,07$	$119 \pm 6$			1	$1,32 \pm 0,01$	$89 \pm 2$
		2	$2,4 \pm 0,1$	$119 \pm 4$			5	$5,2 \pm 0,5$	$95 \pm 10$
		5	$5,4 \pm 0,3$	$109 \pm 5$			10	$10,0 \pm 0,4$	$96 \pm 4$
	SA.19	0	$0,62 \pm 0,08$			RD.14	0	$0,20 \pm 0,08$	
		1	$1,67 \pm 0,07$	$105 \pm 4$			1	$1,04 \pm 0,07$	$84 \pm 7$
		2	$2,7 \pm 0,1$	$104 \pm 4$			5	$5,2 \pm 0,4$	$100 \pm 9$
		5	$6,0 \pm 0,5$	$107 \pm 8$			10	$10,7 \pm 0,9$	$105 \pm 9$
	SA.21	0	< LD			SA.21	0	$0,5 \pm 0,1$	
		1	$1,2 \pm 0,2$	$101 \pm 2$			1	$1,5 \pm 0,1$	$106 \pm 13$
		2	$2,2 \pm 0,2$	$101 \pm 9$			5	$5,22 \pm 0,08$	$95 \pm 2$
		5	$5,5 \pm 0,3$	$106 \pm 5$			10	$10,2 \pm 0,4$	$97 \pm 4$
$^{82}\text{Se}$	RD.3	0	< LD		$^{107}\text{Ag}$	RD.3	0	< LD	
		1	< LD				1	$1,01 \pm 0,04$	$100 \pm 4$
		5	$5,4 \pm 0,4$	$91 \pm 7$			5	$4,9 \pm 0,2$	$97 \pm 3$
		10	$10,2 \pm 0,3$	$94 \pm 3$			10	$9,9 \pm 0,1$	$98 \pm 1$
	RD.14	0	< LD			RD.14	0	< LD	
		1	< LD				1	$1,01 \pm 0,03$	$100 \pm 3$
		5	$5,6 \pm 0,3$	$103 \pm 6$			5	$5,00 \pm 0,06$	$100 \pm 1$
		10	$11,4 \pm 0,5$	$109 \pm 5$			10	$10,1 \pm 0,2$	$101 \pm 2$
	SA.21	0	< LD			SA.21	0	< LD	
		1	< LD				1	$0,2 \pm 0,1$	$23 \pm 10$
		5	$5,8 \pm 0,9$	$116 \pm 17$			5	$4,30 \pm 0,03$	$86 \pm 1$
		10	$12 \pm 1$	$103 \pm 13$			10	$9,6 \pm 0,7$	$96 \pm 7$

Tabela 12. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de águas superficiais de classe 2 usando padronização interna por ICP-MS (continuação).

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)
$^{114}\text{Cd}$	RD.3	0	< LD		$^{121}\text{Sb}$	RD.3	0	< LD	
		1	$1,00 \pm 0,04$	$100 \pm 4$			1	$1,057 \pm 0,001$	$101 \pm 0$
		5	$4,8 \pm 0,1$	$96 \pm 3$			5	$4,9 \pm 0,2$	$97 \pm 3$
		10	$9,75 \pm 0,06$	$97 \pm 1$			10	$9,2 \pm 0,9$	$92 \pm 9$
	RD.14	0	< LD			RD.14	0	< LD	
		1	$0,99 \pm 0,06$	$99 \pm 6$			1	$1,1 \pm 0,1$	$105 \pm 11$
		5	$5,0 \pm 0,1$	$99 \pm 2$			5	$4,82 \pm 0,10$	$83 \pm 2$
		10	$10,1 \pm 0,2$	$101 \pm 2$			10	$10,0 \pm 0,2$	$93 \pm 3$
	SA.21	0	$0,41 \pm 0,03$			SA.21	0	< LD	
		1	$1,38 \pm 0,07$	$97 \pm 7$			1	$1,65 \pm 0,02$	$95 \pm 2$
		5	$5,2 \pm 0,2$	$96 \pm 3$			5	$6 \pm 2$	$107 \pm 30$
		10	$10,2 \pm 0,3$	$98 \pm 3$			10	$13 \pm 2$	$126 \pm 15$
$^{138}\text{Ba}$	RD.3	0	$7,7 \pm 0,2$		$^{202}\text{Hg}$	RD.3	0	< LD	
		25	$32,3 \pm 0,9$	$98 \pm 4$			0,1	$0,09 \pm 0,01$	$89 \pm 14$
		50	$57 \pm 2$	$98 \pm 4$			0,25	$0,23 \pm 0,02$	$93 \pm 6$
		75	$82,4 \pm 0,5$	$100 \pm 1$			0,5	$0,49 \pm 0,04$	$97 \pm 9$
	RD.14	0	$7,9 \pm 0,2$			RD.14	0	< LD	
		25	$32 \pm 1$	$95 \pm 5$			0,1	$0,07 \pm 0,03$	$74 \pm 26$
		50	$60 \pm 3$	$104 \pm 5$			0,25	$0,21 \pm 0,03$	$86 \pm 12$
		75	$78 \pm 8$	$94 \pm 11$			0,5	$0,47 \pm 0,02$	$94 \pm 5$
SA.21	0	$7,5 \pm 0,4$		SA.21	0	< LD			
	25	$31 \pm 1$	$95 \pm 5$		0,1	$0,068 \pm 0,004$	$68 \pm 4$		
	50	$57 \pm 3$	$99 \pm 3$		0,25	$0,22 \pm 0,01$	$89 \pm 4$		
	75	$81 \pm 2$	$98 \pm 5$		0,5	$0,48 \pm 0,01$	$96 \pm 6$		

Tabela 13. Experimento de adição e recuperação para Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de águas superficiais de classe 2 usando padronização interna por ICP-MS (continuação).

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	
$^{205}\text{Tl}$	RD.3	0	< LD		$^{208}\text{Pb}$	RD.3	0	$0,33 \pm 0,07$		
		1	$1,02 \pm 0,03$	$100 \pm 3$			1	$1,35 \pm 0,05$	$102 \pm 4$	
		5	$5,0 \pm 0,2$	$99 \pm 3$			5	$5,3 \pm 0,2$	$100 \pm 1$	
		10	$10,09 \pm 0,09$	$101 \pm 1$			10	$10,5 \pm 0,1$	$102 \pm 5$	
	RD.14	0	< LD			RD.14	0	$0,14 \pm 0,06$		
		1	$1,04 \pm 0,03$	$103 \pm 3$			1	$1,17 \pm 0,06$	$104 \pm 6$	
		5	$5,1 \pm 0,1$	$102 \pm 3$			5	$5,4 \pm 0,2$	$104 \pm 4$	
		10	$10,5 \pm 0,1$	$105 \pm 1$			10	$10,8 \pm 0,2$	$106 \pm 2$	
	SA.21	0	< LD			SA.21	0	$0,42 \pm 0,04$		
		1	$1,40 \pm 0,08$	$96 \pm 8$			1	$1,41 \pm 0,09$	$99 \pm 9$	
		5	$5,3 \pm 0,2$	$97 \pm 5$			5	$5,2 \pm 0,2$	$96 \pm 4$	
		10	$10,4 \pm 0,2$	$100 \pm 2$			10	$10,4 \pm 0,2$	$99 \pm 2$	
$^{238}\text{U}$	RD.3	0	< LD				0	< LD		
		1	$1,08 \pm 0,03$	$105 \pm 3$			1	$1,07 \pm 0,03$	$106 \pm 3$	
		5	$5,1 \pm 0,2$	$102 \pm 4$			5	$5,3 \pm 0,1$	$107 \pm 2$	
		10	$10,43 \pm 0,02$	$104 \pm 0$			10	$10,8 \pm 0,1$	$108 \pm 1$	
	RD.14	0	< LD					0	< LD	
		1	$1,07 \pm 0,03$	$106 \pm 3$				1	$1,44 \pm 0,06$	$100 \pm 6$
		5	$5,3 \pm 0,1$	$107 \pm 2$				5	$5,3 \pm 0,3$	$97 \pm 5$
		10	$10,8 \pm 0,1$	$108 \pm 1$				10	$10,5 \pm 0,2$	$101 \pm 2$
	SA.21	0	< LD					0	< LD	
		1	$1,44 \pm 0,06$	$100 \pm 6$						
		5	$5,3 \pm 0,3$	$97 \pm 5$						
		10	$10,5 \pm 0,2$	$101 \pm 2$						

Com algumas figuras de mérito do método devidamente validadas para metais e metaloides totais e dissolvidos, foram realizadas as quantificações dos elementos por ICP-MS nas amostras de águas superficiais.

#### **4.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS TOTAIS E DISSOLVIDOS EM AMOSTRAS DE ÁGUA SUPERFICIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE POR ICP-MS**

Foram coletadas três amostras de águas superficiais para metais dissolvidos e totais em cada um dos 21 pontos de coleta, portanto as amostras para determinação de metais totais foram digeridas e analisadas em duplicata para cada triplicata de coleta, totalizando uma sextuplicata e, para determinação de metais dissolvidos as amostras foram analisadas em triplicata para cada duplicata de coleta (Cap. 3). Os resultados das concentrações de metais totais (Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn), metaloide total (As) e metais dissolvidos (Al, Fe e Cu) estão apresentados nas Tabelas S5 e S6.

Conforme apresentado anteriormente, foram realizadas nove coletas, realizadas trimestralmente, entre abril de 2022 a abril de 2024, totalizando mais de dois anos de coleta na bacia do rio Doce, de acordo com os dados da equipe de coleta do LINMEA<sup>33</sup>. De modo a obter um panorama do comportamento dos elementos determinados neste trabalho e encontrar possíveis correlações entre as variáveis, empregou-se a análise de componentes principais – PCA que foi conduzida com base em dados normalizados por autoescala. Para tal, os resultados das nove coletas foram submetidos ao software Matlab com pacote PLS Toolbox para ser gerada a Figura 18, com uma variância total explicada dos dados de 51,73% ao empregarmos 2 componentes principais<sup>109</sup>.

O gráfico de escores (Figura 18A) e o gráfico de loadings (Figura 18B) da primeira componente principal (PC1) mostra que Al, Fe, Hg, Sb e Se apresentaram os maiores pesos, na parte negativa do gráfico de loadings, se separando dos demais elementos. Isso pode ser justificado pelas baixas concentrações determinadas para os elementos Sb, Hg e Se (podendo estar abaixo do LQ) e pelo fato do Al e Fe terem concentrações elevadas e com pouca variação ao longo das coletas realizadas, quando comparadas as concentrações de Mn determinadas. Os demais elementos (Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mn, Ni, P, Pb, Tl, U, V e Zn) que estão na parte positiva do gráfico de loadings estão

influenciando principalmente as coletas realizadas nos meses de outubro/2022, janeiro/2023 e janeiro/2024, que são considerados meses do período de chuvas na bacia hidrográfica do rio Doce <sup>77</sup>. O fato pode estar associado ao revolvimento do leito do rio durante as chuvas aumentando a presença desses elementos nas águas superficiais da bacia.

No entanto, o gráfico de escores (Figura 18C) e o gráfico de loadings (Figura 18D) da segunda componente principal (PC2) mostra que as coletas foram divididas principalmente pela concentração de Li, que está na parte negativa do gráfico de loadings e fortemente presente nas coletas de janeiro/2024, e pelo Ag e Cu na parte positiva do gráfico de loadings. Isso pode ser justificado pelas baixas concentrações determinadas para esses elementos (podendo estar abaixo do LQ calculado) e pela variação da concentração destes elementos principalmente em janeiro de 2023.

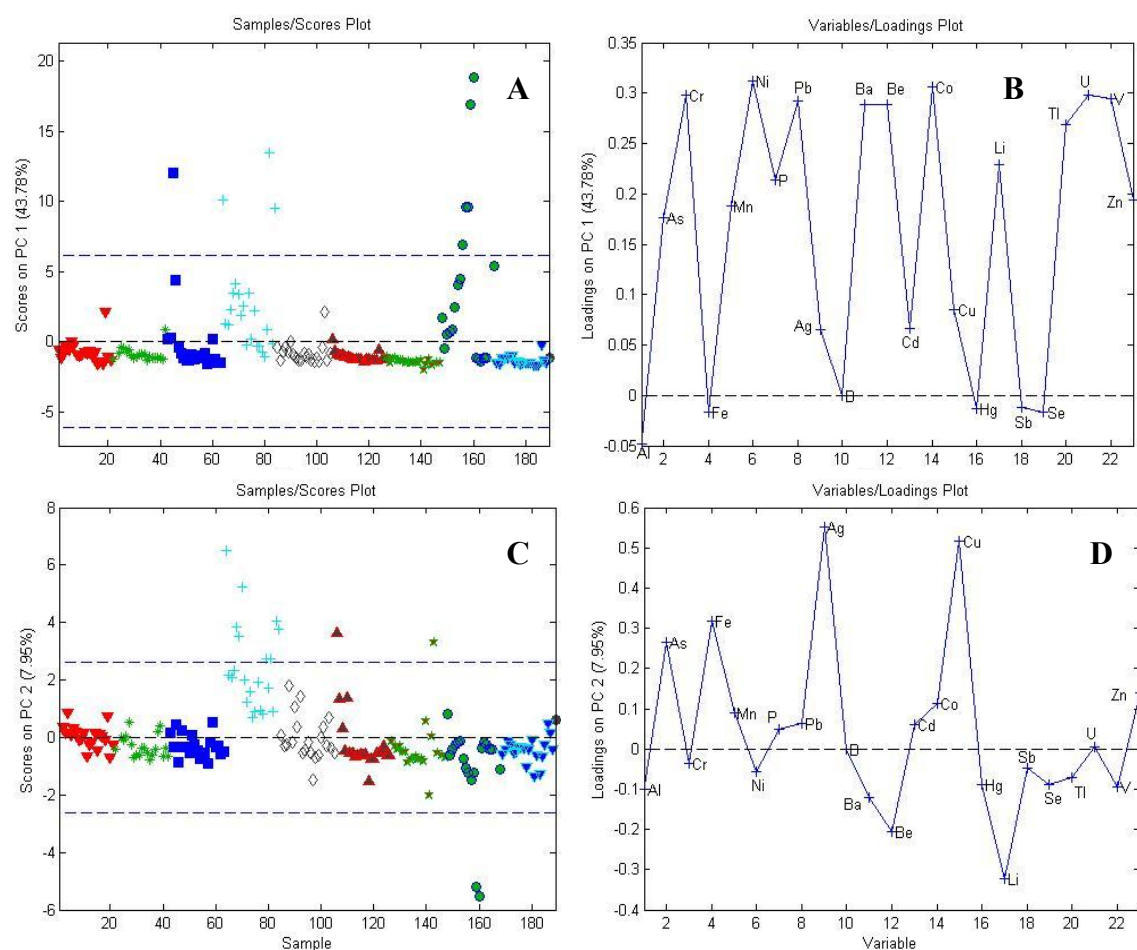


Figura 18. Análise dos componentes principais das nove coletas realizadas para todos os elementos quantificados para águas superficiais de classe 2 (metais totais e dissolvidos). (A e C) Gráfico de scores versus amostras. (B e D) Gráfico de loadings versus variáveis.



(▼) Abril/2022. (\*) Julho/2022. (■) Outubro/2022 (+) Janeiro/2023. (◇) Abril/2023. (▲) Julho/2023. ( ) Outubro/2023. (●) Janeiro/2024. (▼) Abril/2024.

Ao compararmos as nove coletas e analisarmos os resultados, verificou-se que dentre os vinte e três elementos analisados apenas oito obtiveram concentrações superiores às estabelecidas pela resolução CONAMA 357/05, sendo eles os elementos Al, As, Cr, Fe, Mn, Ni, P e Pb. Todos eles podem ser correlacionados diretamente com a indústria de mineração, exceto o P. Deste modo empregou-se o PCA apenas para os elementos que obtiveram concentrações acima do limite estabelecido pela legislação, visando encontrar possíveis correlações entre as variáveis. Para tal, foram gerados PCA das nove coletas realizadas de abril de 2022 a abril de 2024 na bacia hidrográfica do rio Doce. Os gráficos gerados estão mostrados nas Figura 19 e Figura 20, com uma variância total explicada dos dados de 67,33% ao empregarmos 2 componentes principais<sup>109</sup>.

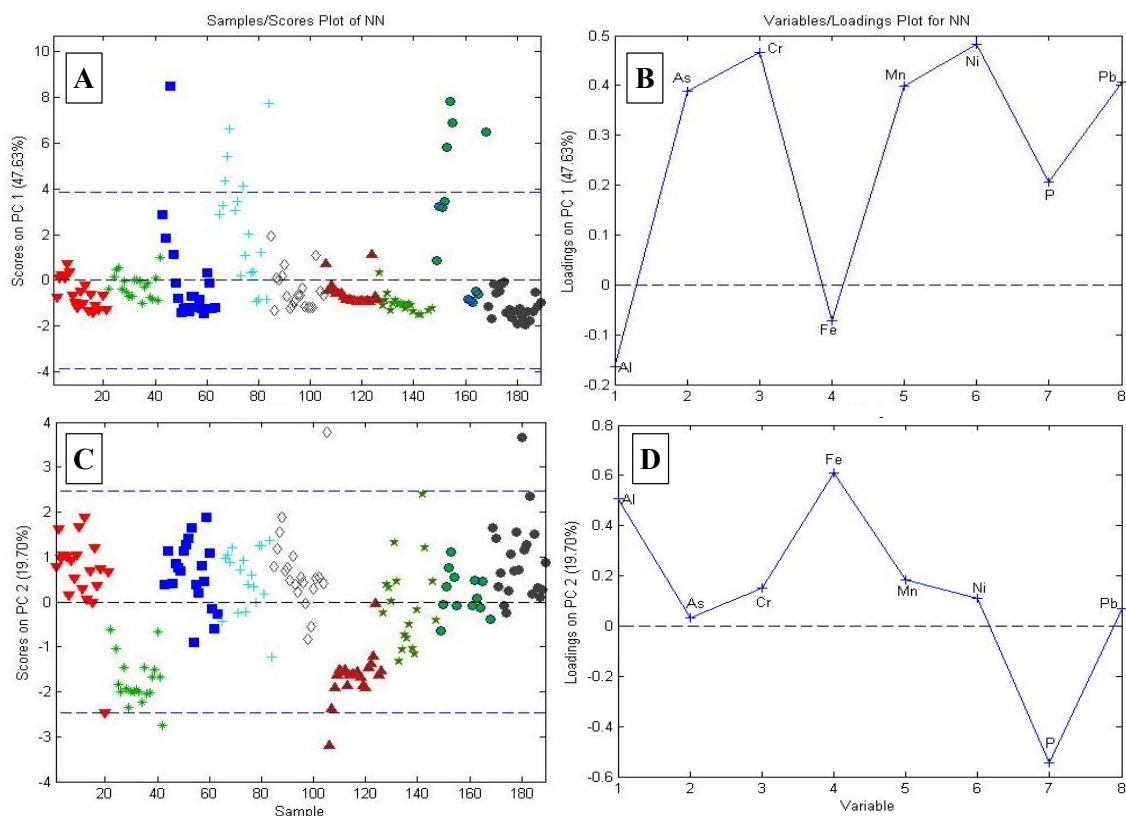


Figura 19. Análise dos componentes principais das nove coletas realizadas para os elementos que obtiveram concentrações acima do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para águas superficiais de classe 2 (metais totais e dissolvidos). (A e C) Gráfico de scores versus amostras. (▼) Abril/2022. (\*) Julho/2022. (■) Outubro/2022 (+) Janeiro/2023. (◇) Abril/2023. (▲) Julho/2023. (☆) Outubro/2023. (●) Janeiro/2024. (●) Abril/2024.

O gráfico de escores (Figura 19A) e o gráfico de loadings (Figura 19B) da primeira componente principal (PC1) mostra que Al e Fe apresentaram os maiores pesos, na parte negativa do gráfico de loadings, se separando dos demais elementos por terem altas concentrações e pouca variação ao longo das 9 coletas. Os demais elementos (As, Cr, Mn, Ni e Pb) que estão na parte positiva do gráfico de loadings estão influenciando principalmente as coletas realizadas nos meses de janeiro/2023 e janeiro/2024, que são considerados meses do período de chuvas na bacia hidrográfica do rio Doce<sup>77</sup>. O fato pode estar associado ao revolvimento do leito do rio durante as chuvas aumentando a presença desses elementos nas águas superficiais da bacia.

No entanto, o gráfico de escores (Figura 19C) e o gráfico de loadings (Figura 19D) da segunda componente principal (PC2) mostra que as coletas foram divididas principalmente pela concentração de P, que está na parte negativa do gráfico de loadings e fortemente presente nas coletas de julho/2022 e julho/2023, pois todos os pontos de coletas no gráfico de escores estão concentrados na porção inferior do mesmo. O P é um elemento que tem um comportamento diferente dos demais, tendo uma diluição da sua concentração com o aumento das chuvas já que o mesmo está presente nas águas da bacia principalmente devido a urbanização do leito dos rios e possivelmente devido ao despejo de esgoto e a lixiviação de fertilizantes em áreas agrícolas.

Foi avaliada a presença dos oito elementos que excederam o limite estabelecido na resolução CONAMA 357/2005 nos rios Doce e Santo Antônio no período de um ano, na tentativa de buscar padrões de similaridades. A Figura 20 apresenta os resultados da comparação entre os rios estudados. As amostras foram divididas em alto e médio rio Doce e rio Santo Antônio.

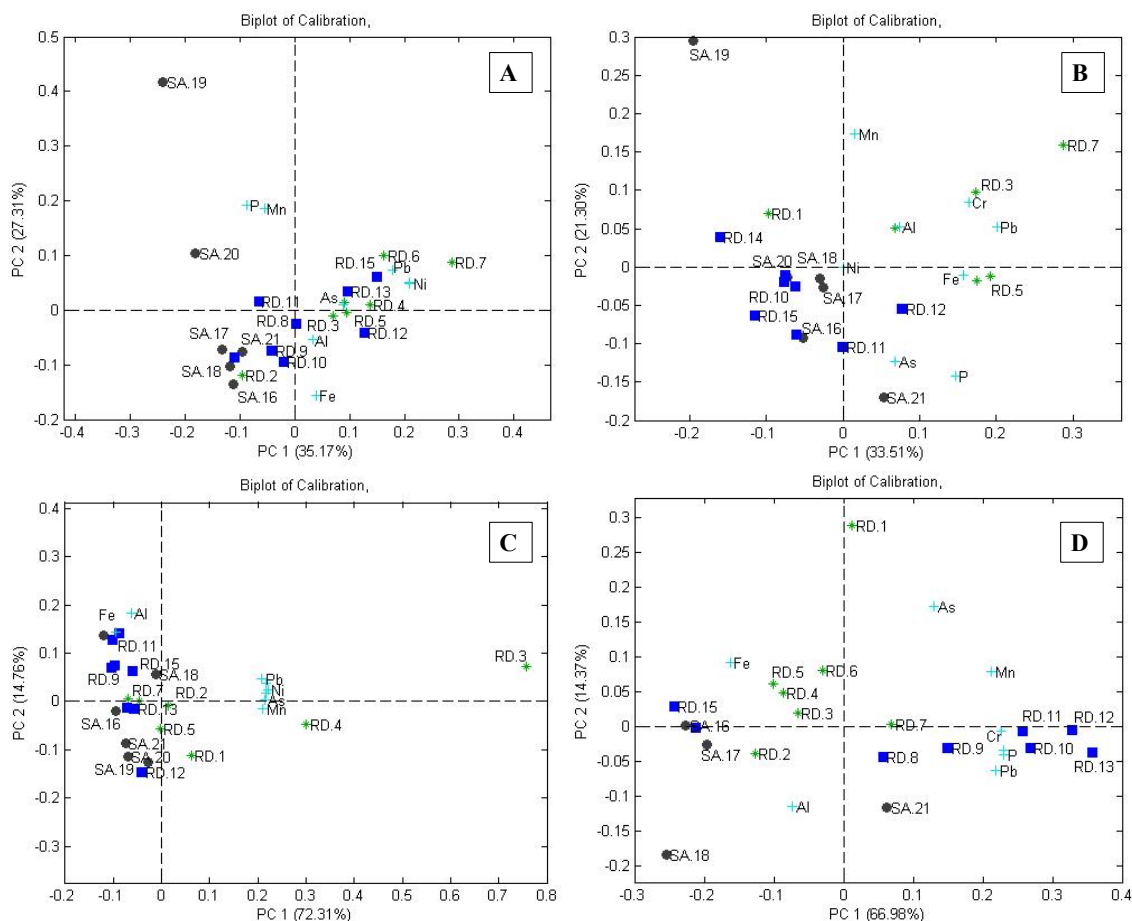


Figura 20. Análise dos componentes principais realizada no período de um ano em amostras de águas superficiais de classe 2. Gráficos Biplot. (A) Abril/2022 (B) Julho/2022 (C) Outubro/2022 (D) Janeiro/2023. (\*) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (●) Rio Santo Antônio. (+) Contaminantes inorgânicos acima do limite da Resolução CONAMA 357/2005 para águas superficiais de classe 2 (metais totais e dissolvidos).

Ao observar as coletas, destacando a divisão dos rios Santo Antônio e Alto e Médio rio Doce, é possível notar que nos períodos intermediários de seca (abril) e chuva (outubro) (Figura 20A e 20C), os rios não possuem características que os diferenciam de forma clara, com valores similares para as concentrações de Al, As, Cr, Fe, Mn, Ni, P e Pb em todos os 21 pontos amostrados. No entanto, nos períodos de seca (julho) e chuva (janeiro) (Figura 20B e 20D) ocorre uma separação clara do alto e médio rio Doce, indicando que nesses períodos as porções do rio possuem características distintas. O rio Santo Antônio, neste trabalho é considerado um rio de referência, pois não foi atingido pelos rejeitos de mineração. Observa-se, que o rio Santo Antônio possui características que se aproximam das do rio Doce (Figura 20B e 20D), exceto para o P.

Para ilustrar o comportamento das concentrações dos elementos acima do limite da resolução CONAMA 352/05, foi construído o gráfico da Figura 2, usando os pontos amostrados ao longo do rio Doce e Santo Antônio. Para a construção dos gráficos foram utilizados os dados das Tabelas S5 e S6. Para os elementos abaixo do limite da resolução CONAMA, os resultados podem ser encontrados nas Figuras S1 e S2. Ao analisar a Figura 21, observa-se que todos os elementos (Al, As, Cr, Fe, Mn, Ni e Pb) acima do limite estabelecido pela resolução brasileira possuem diversas prováveis fontes de contaminação, no entanto todos os elementos citados acima estão ligados diretamente a atividade de mineração<sup>6,70</sup>, exceto o P.

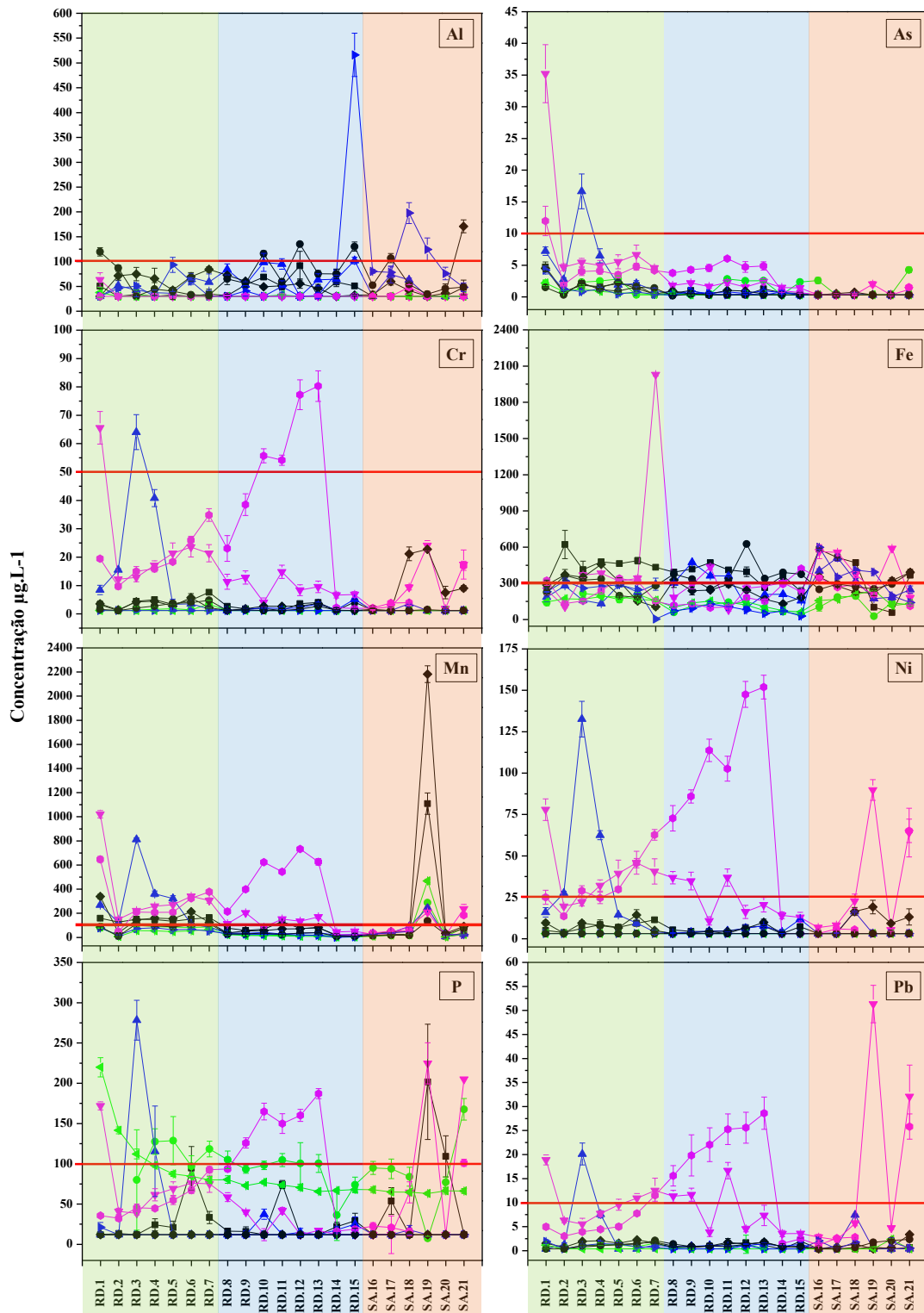


Figura 21. Determinação da concentração para Al, As, Cr, Fe, Mn, Ni, P e Pb em 21 pontos de coleta ao longo da bacia do rio Doce em nove coletas para águas superficiais de classe 2 (metais totais e dissolvidos). (●) Janeiro/2024. (■) Abril/2022. (▼) Janeiro/2023. (▲) Outubro/2022. (▶) Outubro/2023. (◀) Julho/2023. (◄) Abril/2023. (◉) Julho/2022. (●) Abril/2024. A linha vermelha destaca o limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005. RD: Rio Doce. SA: Rio Santo Antônio. (■) Alto Rio Doce. (▲) Médio Rio Doce. (■) Rio Santo Antônio.

Ao observarmos o Al (Figura 21) percebe-se que as coletas que obtiveram concentrações acima do limite estabelecido pela legislação foram abril/2023, outubro/2023 e abril/2024, contrariando os dados obtidos na literatura até o momento<sup>6,110-112</sup>, que evidencia um aumento na concentração de Al nos períodos de chuva, que ocorre principalmente no mês de janeiro na bacia do rio Doce. Nos períodos de outubro e abril, o Al obteve concentrações 16 e 5 vezes maiores, que no mês de janeiro, respectivamente, que é o mês com maior volume de chuvas na bacia.

Juntamente com o Al, outro elemento que possui altas concentrações no período de menor volume de chuvas é o P (Figura 21) que apresentou concentrações superiores ao limite da resolução CONAMA357/2005 no período considerado de seca na bacia do rio Doce (abril e julho).

As Figuras 22 e 23 destacam o uso dos solos com relação aos pontos RD1, RD3, RD10, RD12, RD13 e SA21. Nesses pontos foram observadas as principais fontes dos elementos acima do limite máximo da resolução CONAMA 357/05, como por exemplo pastagem, lavouras, agropecuária, silvicultura e áreas urbanas, representando bem a diversidade da bacia hidrográfica do rio Doce.

As maiores concentrações de P foram evidenciadas em áreas com uso do solo empregado para pastagem, lavoura e área urbanizada (Figura 22), que são uma das principais fontes de fósforo para o sistema aquático. Na pastagem e na lavoura, o fósforo é usado como adubo no perfilhamento do pasto (crescimento do pasto) que é excretado pelo gado. Na lavoura é utilizado como macronutriente essencial para o desenvolvimento das plantas, que são escoados para o curso d'água. Em área urbana, o fósforo está relacionado ao lançamento de rejeitos domésticos e industriais sem tratamento ou tratados inadequadamente no curso d'água<sup>47</sup>.

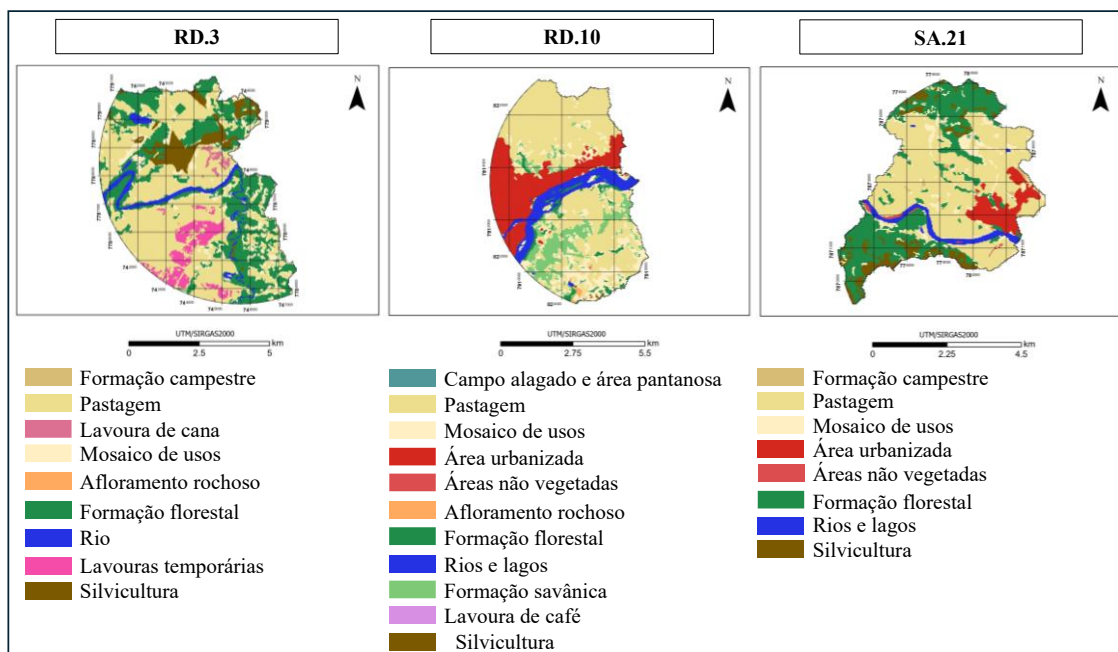


Figura 22. Uso do solo para os pontos RD.3, RD.10 e SA.21.

Ao observar os gráficos de concentração das nove coletas e focar a atenção nos elementos As, Cr, Ni e Pb (Figura 21), percebe-se que suas concentrações aumentaram no período das chuvas. Nota-se que o aumento do volume de água e o revolvimento do leito do rio constitui uma importante fonte no aumento da concentração destes elementos na água superficial da bacia do rio Doce.

O As possui uma forte correlação com a mineração e está presente em maiores concentrações, principalmente no alto rio Doce, onde ficam concentradas as indústrias mineradoras da bacia hidrográfica<sup>6,113</sup>. Nessa área podem ser observadas concentrações que ultrapassam os limites da resolução CONAMA 357/2005 especialmente nos pontos RD.1 e RD.3. Ao avaliarmos os períodos de chuva e seca para o As, há um aumento de cerca de 35 vezes ao compararmos as concentrações determinadas nos meses de julho e janeiro (Figura 21).

O Cr é utilizado como preservativos de madeiras na forma de arseniato de cobre cromatado (CCA). Ele é aplicado em postes de serviços para aumentar a vida útil dessas estruturas, podendo ocorrer a lixiviação desses elementos, especialmente em períodos chuvosos<sup>114</sup>. Ao analisarmos os mapas de uso de solo de todos os pontos de coleta da bacia do rio Doce (Figuras S3 a S23), observa-se várias áreas com uso do solo para a silvicultura, justificando-se o uso de preservativos de madeiras como o CCA. Além disso,

o uso de fertilizantes contendo Cr na agropecuária (pastagem e mosaico de usos) também constitui uma das fontes difusas de poluição por Cr em corpos d'água, já que o escoamento superficial das águas de chuva é um dos principais meios de transporte dos metais do solo para os rios<sup>115</sup> (Figura 23). No entanto, no período de chuvas com o revolvimento do leito do rio, a concentração de Cr nas águas superficiais aumenta cerca de 80 vezes ao compararmos com o período de seca (Figura 21).

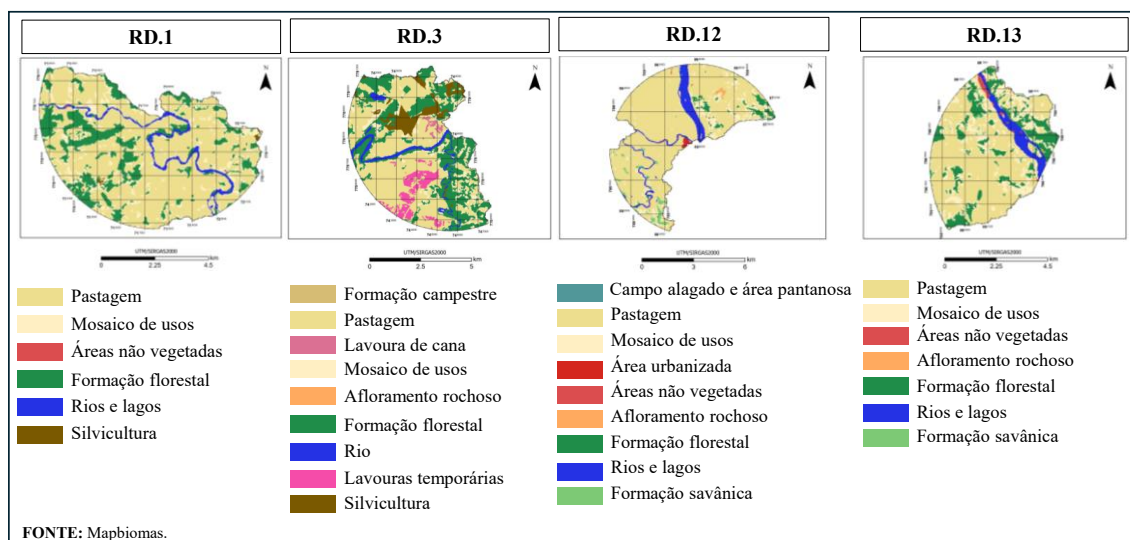


Figura 23. Uso do solo para os pontos RD.1, RD.3, RD.12 e RD.13.

Presente principalmente em efluentes de siderúrgicas, o Pb também pode ser encontrado na composição de alguns fertilizantes e pesticidas na agropecuária (pastagem e mosaico de usos) comercializados no país<sup>115</sup> (Figura 23). No entanto, no período de chuvas com o revolvimento do leito do rio, a concentração de Pb nas águas superficiais aumentou cerca de 21 vezes ao compararmos com o período de seca (Figura 21).

Como principais fontes de contaminação por Ni, temos os efluentes de siderúrgicas<sup>70</sup>, a agricultura<sup>116,117</sup>, lixões e aterros sanitários<sup>118,119</sup>, com a lixiviação de fertilizantes aplicados no solo, e de chorumes mal controlados oriundos principalmente de baterias, produtos eletrônicos e tintas, respectivamente (Figuras 22 e 23). O Ni tem suas maiores concentrações no período de chuvas com o revolvimento do leito do rio, na qual sua concentração aumentou cerca de 17 vezes ao compararmos com o período de seca (Figura 21)<sup>114</sup>.

O Mn e o Fe são elementos naturalmente presentes em altas concentrações no solo da bacia hidrográfica do rio Doce e devido a isso, várias mineradoras tornaram a região

parte de suas empresas. Sendo assim, diversos seguimentos ligados a mineração e a siderurgia surgiram para suprir as necessidades das mineradoras. Ao observarmos os gráficos das concentrações obtidas para o Mn (Figura 21), nota-se que no período de seca suas concentrações são reduzidas. No entanto, em alguns pontos amostrais (RD.1, RD.2, RD.3, RD.4, RD.5, RD.6, RD.7, RD.11 e SA.19) sua concentração ainda permanece acima do limite estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005. Entretanto, no período chuvoso as concentrações determinadas de Mn e Fe têm um aumento, conforme o esperado.

Ao observarmos o gráfico de Mn na Figura 21, o ponto SA.19 se destaca com uma concentração acima do limite estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005 de  $100 \mu\text{g L}^{-1}$  durante todas as coletas realizadas em mais de dois anos. O mapa de uso de solo deste ponto e de seus antecessores identifica que as principais atividades realizadas na área estão relacionadas a agropecuária (pastagem e mosaico de usos), com o uso de fertilizantes contendo Mn como insumo<sup>115</sup> (Figura 24) além de ser naturalmente encontrado no solo da bacia do rio Doce. Mesmo sendo um metal essencial para o ser humano, o Mn pode ser associado a disfunção de órgãos importantes como o fígado, pulmão, rins e neurotoxicidades, além de fatores hereditários adquiridos pelo metabolismo do Mn<sup>120,121</sup>. Com relação ao ambiente aquático a alta disponibilidade de Fe e Mn se acumulam significativamente na parte inferior da cadeia trófica (zooplâncton e caracóis) promovendo uma retenção desses elementos em tratos digestivos de peixes<sup>122,123</sup>.

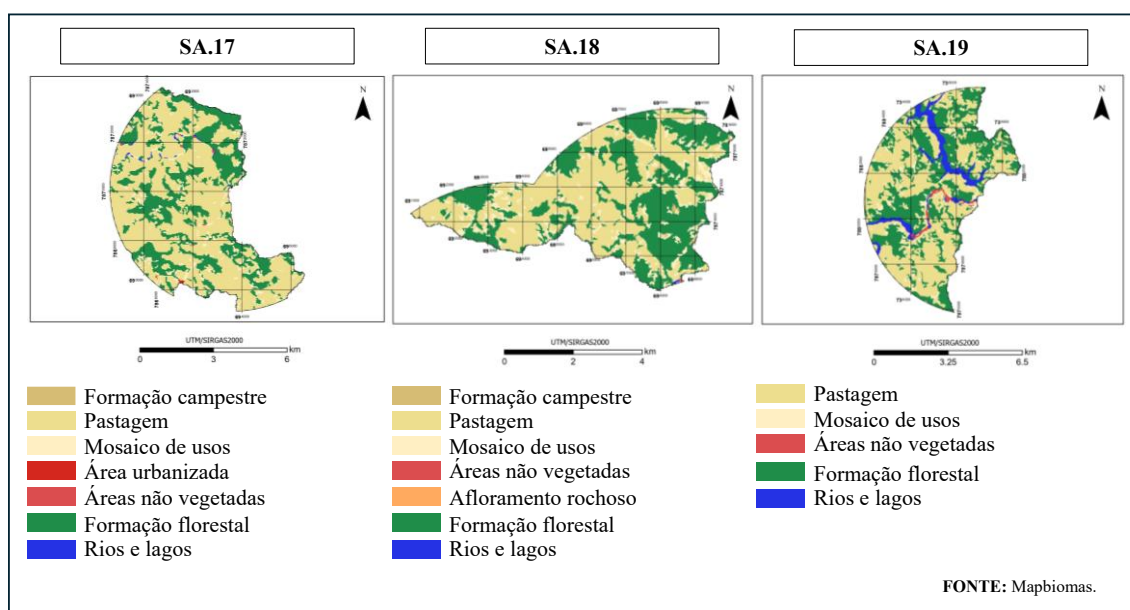


Figura 24. Uso do solo para os pontos SA.17, SA.18 e SA.19.

O Fe possui concentrações acima do limite estabelecido pela resolução CONAMA 357/2005 em praticamente todas as coletas realizadas, já esperado para a região, exceto nas ocorridas em julho/2022 e julho/2023, que correspondem ao período seco na bacia hidrográfica do rio Doce. No período de chuva as concentrações de Mn e Fe aumentaram cerca de 5 e 10 vezes, respectivamente, ao compararmos com o período de seca (Figura 21). Mesmo sendo um elemento naturalmente presente em altas concentrações no solo da bacia hidrográfica do rio Doce, outras possíveis fontes de Fe para as águas superficiais são a mineração, agricultura (irrigação com águas residuais e pelo uso de fertilizantes minerais) e esgoto doméstico<sup>124-127</sup>, estes são usos do solo que podem ser observadas em quase todos os pontos de coleta conforme Figuras S3 a S23.

Como anteriormente ressaltado, os elementos Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cu, Hg, Li, Se, Sb, Tl, U e Zn não excederam os limites estabelecidos pela resolução CONAMA 357/05. Destaca-se o B e o Hg que permaneceram com concentrações abaixo do LQ em todas as nove coletas e em todos os pontos de amostragem. Ao observamos os gráficos das Figuras S1 e S2, pode-se verificar que para todos os elementos o período chuvoso apresentou as maiores concentrações, sendo que para Ag, Cd, Sb, Tl e Zn as concentrações foram 6, 2, 2 e 4 vezes maior que as concentrações no período seco no primeiro ano de coleta, respectivamente. Para Ba, Be, Co, Li, Sb, Se, U e V as concentrações foram 14, 6, 10, 11, 2, 3, 33 e 50 vezes maiores que as concentrações determinadas no período seco no segundo ano de coleta, respectivamente, exceto para o Cu que possui sua concentração 7 vezes maior no período seco, quando comparado com o período chuvoso. Após análise detalhada das concentrações dos elementos e sua distribuição ao longo da bacia do rio Doce, o fator de enriquecimento e o grau de contaminação foram calculados.

O fator de enriquecimento é um recurso útil na análise da contaminação ambiental em corpos d'água e sedimentos. Ele se baseia na comparação da concentração de um metal na amostra com um valor de fundo (background), na qual geralmente são empregados os valores de Fe, Mn e Al como elemento normalizador. No entanto, neste trabalho foram coletadas amostras do rio Santo Antônio, que foi considerado um rio de referência. Sendo assim, a concentração total dos elementos presentes nas amostras de água e sedimento do rio de referência foram utilizados como background neste trabalho. Essa abordagem é amplamente empregada, partindo do princípio de que, o rio Santo Antônio possui

características similares entre si, no entanto sem a influência significativa do rompimento da barragem de Fundão. Sendo assim, as principais fontes de poluição do rio Doce também estão presentes no rio Santo Antônio tendendo a ter concentrações elementares comparáveis entre si. Neste trabalho, o rio Santo Antônio foi usado como valor de background para os cálculos do FE e os resultados foram avaliados de acordo com a Tabela 4, do capítulo 3. Adicionalmente, também foram avaliados os valores presentes na norma CONAMA 357/05 para comparação com os valores do rio Santo Antônio.

Ao observarmos as Figuras S24 a S32, podemos verificar que em todas as 9 coletas realizadas houve um enriquecimento moderado, com valores variando de 1,00 a 4,96, significando uma baixa influência antropogênica na região para os elementos analisados. No entanto, os dados foram obtidos com o background calculado a partir dos resultados de concentração para os pontos de coleta no rio Santo Antônio, que também é um rio que possui grande influência antropogênica. Nesse sentido, vale ressaltar que apesar de não ter sido atingido pelos rejeitos da barragem de Fundão, o rio Santo Antônio sofre com impactos antropogênicos. Porém, esse efeito ficou evidente somente ao longo do desenvolvimento do projeto.

Contudo, na 3ª, 4ª e 8ª coletas, houve valores de fator de enriquecimento entre 21,16 e 28,62, evidenciando um alto enriquecimento de Ni (3ª e 8ª coletas), V (3ª e 8ª coletas), As (4ª coleta), Cr e Pb (8ª coleta) nos pontos amostrados no rio Doce. Para todos os elementos com alto FE, as coletas ocorrem preponderantemente nos períodos chuvosos. O que pode ser explicado pelo revolvimento do leito do rio. Ao observarmos os pontos de coleta RD.1, RD.2, RD.3 (Figuras S3 a S5), RD.10, RD.11, RD.12 e RD.13 (Figuras S12 a S15) onde houve este enriquecimento, nota-se grandes áreas urbanas e de pastagem, que podem influenciar fortemente o perfil encontrado e principalmente pelo rompimento da barragem de Fundão que liberou um grande volume de rejeito de mineração nas águas superficiais do rio Doce.

O grau de contaminação – GC também é empregado em análises de águas superficiais com o objetivo de indicar o grau de contaminação por metais nos pontos de coleta. Entretanto, esta ferramenta aplica como valor de referência, o valor máximo permitido pela legislação vigente no país (CONAMA 357/05). Ao observarmos as figuras S33 a S41 nota-se que os elementos que obtiveram valores indicados como grau de poluição moderada e/ou alta são exatamente os mesmo que ultrapassaram o limite

máximo estabelecido pela resolução CONAMA 357/05 (Al, As, Fe, Mn, Ni, P e Pb) exceto Cr. Isso se deve a relação direta da Equação 8 (capítulo 3) com os limites máximos estabelecidos pela resolução. Foram calculados o grau de contaminação para todos os elementos analisados neste trabalho, no entanto, para Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cu, Hg, Li, Se, Sb, Tl, U, V e Zn foram observados valores de grau de contaminação menor que 1 em todas as coletas e em todos os pontos de coletas determinados, indicando baixo grau de poluição para estes elementos.

Sendo assim, para o Al, Fe, Mn e Ni, (Figuras S33 a S41) houve determinações de valores de grau de poluição alta ( $GC > 3$ ), 3,69; 5,76; 6,33 a 20,82 e 3,11 a 5,08, respectivamente, evidenciando assim um alto enriquecimento de Al (7ª coleta), Fe (4ª coleta), Mn (1ª, 3ª, 4ª, 5ª e 6ª coletas) e Ni (3ª e 8ª coletas) nas águas superficiais coletadas. Determinações de valores de graus de poluição moderada ( $1 < GC < 3$ ) foram observadas para As (4ª coleta), Fe (1ª e 9ª coletas), Mn (2ª, 3ª, 4ª, 5ª e 8ª coletas), Ni (3ª, 4ª e 8ª coletas), P (1ª, 3ª, 4ª e 6ª coletas) e Pb (3ª, 4ª e 8ª coletas) obtendo valores de 1,87; 1,07 a 1,09; 1,04 a 2,98; 1,50 a 2,59; 1,02 a 1,78 e 1,01 a 2,21 respectivamente (Figuras S33 a S41).

O somatório dos valores obtidos através do cálculo do grau de contaminação por coleta para os elementos acima do limite máximo permitido pela CONAMA 357/2005 (Al, As, Cr, Fe, Mn, Ni, P e Pb) foi determinado conforme Figura S52 (Arquivos Suplementares). Após análise da Figura S52 observou-se que Fe, Mn, Ni e Pb obtiveram graus de poluição moderada ( $1 < GC < 3$ ) e poluição alta ( $GC > 3$ ) respectivamente, na 4ª, 7ª, 8ª e 9ª coletas e na 1ª, 3ª, 4ª, 5ª, e 8ª coletas. Este resultado evidencia que nos períodos chuvosos da bacia do rio Doce há um maior grau de poluição nas águas superficiais devido a ressuspensão dos sedimentos no leito dos rios.

Quando observamos os pontos de coleta pertencentes ao rio doce (RD. 1 a RD.15) foi possível verificar que temos um enriquecimento de Al, As, Fe, Mn, Ni, P e Pb enquanto ao observarmos os pontos de coleta pertencentes ao rio Santo Antônio (SA.16 a SA.21) verificou-se que temos um enriquecimento de Mn, Ni, P e Pb. Estes enriquecimentos ocorreram principalmente nos períodos chuvosos (4ª e 8ª coletas), o que pode ser explicado pelo revolvimento do leito do rio.

Ao compararmos os elementos que obtiveram uma razão de enriquecimento (RE) de moderado a alto e um grau de contaminação (GC) de moderado a alto, os elementos

As, Ni, P e Pb estão presentes em ambos os recursos utilizados como indicadores de contaminação, que estão diretamente ligados a grandes áreas urbanas e de pastagem. No entanto, o RE demonstra que background obtido com as concentrações do rio Santo Antônio (rio de referência) indicam que os elementos que possuem grau de contaminação de moderada a elevada podem ser diretamente atribuídos ao rompimento da barragem de Fundão.

Quando comparamos as concentrações dos analitos determinados neste trabalho com os resultados obtidos em outros estudos, conforme demonstrado na Tabela S7, pode-se observar que a concentração máxima dos elementos As, Ba, Be, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, P, Pb, Sb, Se, V e Zn determinadas neste trabalho são superiores as concentrações determinadas nos trabalhos listados. Isso pode nos dizer que com o passar do tempo as concentrações dos metais e metaloides estão aumentando, uma vez que as amostras coletadas e analisadas nos anos entre 2010 a 2022, as concentrações foram menores que as determinadas nas coletas de abril de 2022 a abril de 2024. Este aumento pode estar diretamente ligado ao aumento da poluição gerada pelos grandes centros urbanos ao longo do rio Doce através do despejo de esgotos domésticos e industriais. No entanto, para Ag, Al, B, Cd e Hg concentrações determinadas neste trabalho são inferiores as concentrações dos trabalhos citados na Tabela S7, indicando uma redução da concentração desses elementos ao longo do tempo.

Dentre as concentrações determinadas na literatura que possuem valor superior ao determinado neste trabalho pode-se observar que o Al e o Mn são os que possuem uma maior redução, 10 e 9 vezes menor, respectivamente, quando comparados aos resultados deste estudo. No entanto, para Mn a única concentração observada na literatura que está acima da determinada neste trabalho foi relativa a amostra coletada pelo IGAM em novembro de 2015, logo após o rompimento da barragem de Fundão, ou seja, a concentração de Mn nas amostras de águas superficiais coletadas em anos anteriores ao período deste trabalho também possuem concentrações menores.

Quando observamos de modo especial para os oito elementos (Al, As, Cr, Fe, Mn, Ni, P e Pb) que excederam o limite máximo estabelecido pela resolução CONAMA 357/05 neste trabalho em comparação aos trabalhos listados na Tabela S7, podemos verificar que esses elementos também excederam o limite máximo em alguns trabalhos. No entanto, para a grande maioria dos trabalhos o Fe e Mn possuem concentrações que

excederam o limite máximo da CONAMA como ocorreu neste trabalho, isso pode indicar que ao longo dos anos o Fe e o Mn tem variações, mas ainda permanecem com concentrações de 2 a 10 vezes maiores que o limite estabelecido pela legislação o que pode estar diretamente ligado ao rompimento da barragem de Fundão.

Após analisarmos todos os resultados obtidos no capítulo 4, podemos verificar que os limites máximos estabelecidos pela resolução CONAMA 357/05 ainda são ultrapassados, o que pode estar relacionado a diversos fatores, e principalmente ao rompimento da barragem de Fundão.

# **Capítulo 5.**

## **Sedimentos**

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das concentrações analíticas de Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn nas amostras de sedimento. As concentrações determinadas foram comparadas com a legislação CONAMA 454/12 e, posteriormente, aplicou-se a análise multivariada em conjunto com o uso do geoprocessamento na busca de identificar correlações positivas e/ou negativas entre os elementos analisados e as características de uso do solo da bacia do rio Doce.

## **5.1 PARÂMETROS ANALÍTICOS PARA DETERMINAÇÕES POR ICP-MS**

Experimentos de adição e recuperação foram realizados para avaliar as exatidões empregando os dois métodos de calibração, por padrão externo e por padronização interna, avaliando-se Ge, Rh e Y como padrões internos. Observando a Tabela 14 e a partir da comparação entre os coeficientes angulares obtidos (sensibilidade) utilizando ambas as estratégias de calibração, pode-se observar uma diferença significativa entre os valores (teste F com 95% de confiança), considerando os 21 analitos exceto para o mercúrio. Os resultados indicaram que a padronização interna foi fundamental para garantir a exatidão da análise.

A faixa de trabalho para a análise de sedimentos da bacia do rio Doce foi definida com base nos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 454/2012 para (conforme indicado na Tabela 14). A linearidade do método foi confirmada, e os testes estatísticos F e t (nível de confiança de 95%) não identificaram diferenças significativas entre as triplicatas analisadas.

Para estimar os limites de detecção (LD) e quantificação (LQ) de metais e metaloides nos sedimentos, as soluções de branco foram obtidas a partir do processo de extração, em dez réplicas autênticas. A partir dessas amostras, calcularam-se os LDs e LQs, os quais se mostraram compatíveis com os limites estabelecidos pelos órgãos reguladores, permitindo a quantificação adequada dos elementos de interesse (Tabela 14).

Tabela 14. Figuras de mérito obtidas para a determinação de Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V e Zn por ICP-MS usando Rh como padrão interno em sedimentos.

Isótopo	Modo de aquisição	Faixa de trabalho ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	R <sup>2</sup>	Sensibilidade	LQ (mg/kg)	Limite máximo Conama Nível 1* (mg/kg)	Limite máximo Conama Nível 2** (mg/kg)
<sup>7</sup> Li	No gas	2,5-300	0,9997	0,089	0,412	NA	NA
<sup>9</sup> Be	No gas	0,10-60	1,0000	0,026	0,039	NA	NA
<sup>11</sup> B	No gas	2,5-300	0,9999	0,020	6,33	NA	NA
<sup>31</sup> P	No gas	2,5-300	0,9991	0,009	48,9	NA	NA
<sup>51</sup> V	He	0,10-60	0,9999	0,090	0,096	NA	NA
<sup>52</sup> Cr	He	2,5-300	0,9998	0,021	2,46	37,5	90
<sup>55</sup> Mn	He	2,5-300	0,9999	0,028	2,57	NA	NA
<sup>58</sup> Ni	He	0,10-60	0,9984	0,009	18,8	18	35,9
<sup>59</sup> Co	He	0,10-60	0,9998	0,052	0,312	NA	NA
<sup>64</sup> Zn	He	2,5-300	0,9985	0,008	16,07	123	315
<sup>65</sup> Cu	He	2,5-300	0,9998	0,030	2,89	35,7	197
<sup>75</sup> As	He	0,10-60	0,9977	0,003	0,565	5,9	17
<sup>82</sup> Se	No gas	0,10-60	0,9989	0,001	2,06	NA	NA
<sup>107</sup> Ag	No gas	0,10-60	0,9997	0,059	7,35	NA	NA
<sup>114</sup> Cd	No gas	0,10-60	1,0000	0,037	0,213	0,6	3,5
<sup>121</sup> Sb	He	0,10-60	0,9991	0,013	1,49	NA	NA
<sup>138</sup> Ba	No gas	2,5-300	0,9997	0,131	0,123	NA	NA
<sup>202</sup> Hg	No gas	0,05-4,0	0,9881	0,025	0,104	0,17	0,486
<sup>205</sup> Tl	No gas	2,5-300	0,9640	0,851	0,020	NA	NA
<sup>208</sup> Pb	No gas	0,10-60	1,0000	0,115	16,15	35	91,3
<sup>238</sup> U	No gas	0,10-60	0,9998	0,253	0,014	NA	NA

\* Nível 1- limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota;

\*\* Nível 2 - limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota.

NA: Não se aplica. No gas: uso do argônio. He: uso de hélio.

Fonte: Autor

A precisão e a exatidão do método analítico foram avaliadas utilizando o material de referência certificado SRM NIST 1944. Esses parâmetros foram analisados com base na porcentagem de recuperação e nos desvios padrão relativos (DPR), conforme demonstrado na Tabela 15. As taxas de recuperação permaneceram dentro da faixa aceitável de 80% a 120%, para As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Li, Mn, P, Pb, Sb, Tl e Zn, todos os valores de DPR ficaram abaixo de 10% para B, Ba, Be, Co, Cr, Cu, Li, Mn, P, Se, Tl, U, V e Zn (Tabela 15).

Adicionalmente, foram realizados testes de adição e recuperação tanto na ausência quanto na presença de padrões internos, sendo avaliados os elementos Rh, Ge e Y. Considerando o desempenho geral para todos os analitos, o uso de Rh como padrão interno mostrou-se o mais eficaz, proporcionando recuperações consistentes. Os resultados desses experimentos estão organizados nas Tabelas 16 a 19, que mostram as recuperações obtidas nos diferentes modos de aquisição previamente otimizados. Para os 21 analitos estudados, as recuperações mantiveram-se dentro dos critérios de aceitação (entre 80% e 120%), com exceções pontuais em alguns níveis de adição para os elementos Ag, As, Hg, P, Pb, Se, Tl e V. No entanto, para o Ni, nenhum dos níveis em nenhuma das duas amostras empregadas mantiveram-se dentro do limite de aceitação (Tabela S3).

A bacia do rio Doce apresenta uma variedade de usos da terra e da água ao longo de seu curso e de seus afluentes, o que resulta em variações relevantes na qualidade dos sedimentos. Para garantir a representatividade do estudo de adição e recuperação, a seleção das amostras foi nos dois rios analisados, o rio Doce e o rio Santo Antônio (conforme mostrado na Figura 14). Assim, foram escolhidos os pontos RD.5 no rio Doce e o SA.21 no rio Santo Antônio, considerado neste estudo como um corpo hídrico de referência, por apresentar características semelhantes às do rio Doce, mas sem ter sido afetado pelo rompimento da barragem de Fundão.

Ao analisarmos os resultados das Tabela 15 a 19 observa-se que o Ni não passou nos critérios de validação da metodologia aplicada, sendo assim, a concentração do Ni não foi determinada nas coletas.

Tabela 15. Determinação de As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) no SRM NIST 1944 usando ICP-MS com padronização interna.

Isótopo	Valor certificado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em % $\pm$ DPR)
$^7\text{Li}$	NA	NA	NA
$^9\text{Be}$	$1,6 \pm 0,3$	$1,1 \pm 0,1$	$66 \pm 3$
$^{11}\text{B}$	NA	NA	NA
$^{31}\text{P}$	NA	NA	NA
$^{51}\text{V}$	$100 \pm 9$	$52,3 \pm 5,4$	$52 \pm 5$
$^{52}\text{Cr}$	$266 \pm 24$	$228 \pm 25$	$86 \pm 9$
$^{55}\text{Mn}$	$505 \pm 25$	$411,1 \pm 35,9$	$81 \pm 7$
$^{58}\text{Ni}$	$76,1 \pm 5,6$	$151 \pm 13$	$198 \pm 17$
$^{59}\text{Co}$	$14 \pm 2$	$11,7 \pm 1,2$	$83 \pm 9$
$^{64}\text{Zn}$	$656 \pm 75$	$635 \pm 62$	$97 \pm 9$
$^{65}\text{Cu}$	$380 \pm 40$	$295 \pm 34$	$78 \pm 9$
$^{75}\text{As}$	$18,9 \pm 2,8$	$21,0 \pm 4,2$	$111 \pm 22$
$^{82}\text{Se}$	$11,4 \pm 0,2$	$2,4 \pm 0,9$	$21 \pm 7$
$^{107}\text{Ag}$	$6,4 \pm 1,7$	$9,3 \pm 0,9$	$146 \pm 14$
$^{114}\text{Cd}$	$8,8 \pm 1,4$	$10,0 \pm 1,2$	$114 \pm 13$
$^{121}\text{Sb}$	$4,6 \pm 0,9$	$5,0 \pm 2,5$	$109 \pm 54$
$^{138}\text{Ba}$	NA	NA	NA
$^{202}\text{Hg}$	$3,4 \pm 0,5$	$7,6 \pm 1,0$	$223 \pm 30$
$^{205}\text{Tl}$	NA	NA	NA
$^{208}\text{Pb}$	$330 \pm 48$	$359 \pm 44$	$109 \pm 13$
$^{238}\text{U}$	$3,1 \pm \text{NA}$	$2,1 \pm 0,2$	$68 \pm 6$

NA: não se aplica (valor não certificado no MRC); O valor de MRC foi determinado após diluição de vinte e cinco vezes.

Tabela 16. Experimento de adição e recuperação para As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de sedimentos usando padronização interna por ICP-MS.

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)			
$^7\text{Li}$	SA.17	0	< LD		$^9\text{Be}$	SA.17	0	< LD				
		25	$25,04 \pm 0,78$	$97 \pm 3$			2,5	$2,72 \pm 0,12$	$94 \pm 5$			
		50	$51,66 \pm 0,96$	$102 \pm 2$			5	$4,96 \pm 0,61$	$92 \pm 12$			
		100	$101,41 \pm 1,97$	$101 \pm 2$			10	$9,44 \pm 0,44$	$91 \pm 4$			
		0	< LD				0	< LD				
		25	$26,20 \pm 0,31$	$99 \pm 1$			2,5	$2,73 \pm 0,12$	$102 \pm 5$			
	RD.5	50	$53,16 \pm 1,11$	$104 \pm 2$		5	$5,68 \pm 0,15$	$110 \pm 3$				
		100	$99,29 \pm 1,00$	$98 \pm 1$		10	$9,02 \pm 0,75$	$88 \pm 8$				
		$^{11}\text{B}$	SA.17	0		< LD		$^{31}\text{P}$	SA.17	0	< LD	
				25		< LD				25	$152,35 \pm 21,92$	$111 \pm 88$
				50		$49,42 \pm 1,27$	$98 \pm 3$			50	$166,00 \pm 2,28$	$83 \pm 5$
			100	$96,86 \pm 3,15$		$96 \pm 3$	100			$217,40 \pm 5,45$	$93 \pm 5$	
RD.5	0		< LD		0	$64,42 \pm 5,41$						
	25		< LD		25	$87,92 \pm 1,42$	$94 \pm 6$					
	50	$49,73 \pm 0,05$	$99 \pm 0$	50	$115,18 \pm 3,67$	$102 \pm 7$						
	100	$96,36 \pm 1,06$	$96 \pm 1$	100	$130,89 \pm 9,75$	$66 \pm 10$						
$^{51}\text{V}$	SA.17	0	$51,86 \pm 9,54$		$^{52}\text{Cr}$	SA.17	0		$181,49 \pm 26,97$			
		2,5	$55,72 \pm 9,84$	$155 \pm 394$			25		$210,53 \pm 29,64$	$116 \pm 119$		
		5	$54,84 \pm 11,70$	$60 \pm 234$			50		$229,93 \pm 35,72$	$97 \pm 71$		
		10	$61,73 \pm 11,21$	$99 \pm 112$			100		$279,07 \pm 29,98$	$98 \pm 30$		
	RD.5	0	$15,38 \pm 1,06$			0	$21,34 \pm 2,12$					
		2,5	$18,12 \pm 1,05$	$110 \pm 42$		25	$46,18 \pm 3,09$	$99 \pm 12$				
		5	$20,66 \pm 1,34$	$106 \pm 27$		50	$72,68 \pm 3,00$	$103 \pm 6$				
		10	$24,20 \pm 0,32$	$88 \pm 3$		100	$121,77 \pm 2,54$	$100 \pm 3$				

Tabela 17. Experimento de adição e recuperação para As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de sedimentos usando padronização interna por ICP-MS (continuação).

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)
$^{55}\text{Mn}$	SA.17	0	278,21 $\pm$ 19,48		$^{58}\text{Ni}$	SA.17	0	220,72 $\pm$ 38,93	
		25	298,73 $\pm$ 15,88	97 $\pm$ 3			2,5	215,74 $\pm$ 38,76	-199 $\pm$ 1550
		50	320,86 $\pm$ 7,46	102 $\pm$ 2			5	204,46 $\pm$ 45,73	-325 $\pm$ 915
		100	376,63 $\pm$ 7,03	101 $\pm$ 2			10	210,13 $\pm$ 39,77	-106 $\pm$ 398
	RD.5	0	212,38 $\pm$ 16,40			0	79,04 $\pm$ 14,31		
		25	241,05 $\pm$ 8,03	99 $\pm$ 1		2,5	83,63 $\pm$ 12,72	183 $\pm$ 509	
		50	271,40 $\pm$ 14,75	104 $\pm$ 2		5	86,83 $\pm$ 16,48	156 $\pm$ 330	
		100	313,44 $\pm$ 12,09	98 $\pm$ 1		10	68,05 $\pm$ 10,08	-110 $\pm$ 101	
$^{59}\text{Co}$	SA.17	0	7,47 $\pm$ 1,09		$^{63}\text{Cu}$	SA.17	0	5,78 $\pm$ 4,64	
		2,5	10,10 $\pm$ 1,15	105 $\pm$ 46			25	30,36 $\pm$ 3,29	98 $\pm$ 13
		5	11,74 $\pm$ 1,31	85 $\pm$ 26			50	50,85 $\pm$ 5,22	90 $\pm$ 10
		10	16,47 $\pm$ 0,84	90 $\pm$ 8			100	95,49 $\pm$ 6,04	90 $\pm$ 6
	RD.5	0	4,41 $\pm$ 0,34			0	< LD		
		2,5	7,07 $\pm$ 0,04	106 $\pm$ 2		25	20,81 $\pm$ 0,08	83 $\pm$ 0	
		5	9,95 $\pm$ 0,56	111 $\pm$ 11		50	45,11 $\pm$ 1,30	90 $\pm$ 3	
		10	13,41 $\pm$ 0,59	90 $\pm$ 6		100	92,12 $\pm$ 0,85	92 $\pm$ 10	
$^{64}\text{Zn}$	SA.17	0	26,51 $\pm$ 1,57		$^{75}\text{As}$	SA.17	0	18,93 $\pm$ 3,31	
		25	54,02 $\pm$ 2,46	110 $\pm$ 10			2,5	21,59 $\pm$ 2,52	107 $\pm$ 101
		50	77,38 $\pm$ 4,40	102 $\pm$ 9			5	22,88 $\pm$ 2,01	79 $\pm$ 40
		100	124,83 $\pm$ 3,02	98 $\pm$ 3			10	28,20 $\pm$ 3,73	93 $\pm$ 37
	RD.5	0	16,33 $\pm$ 1,38			0	14,27 $\pm$ 0,95		
		25	43,89 $\pm$ 0,86	110 $\pm$ 3		2,5	15,19 $\pm$ 2,09	37 $\pm$ 84	
		50	67,91 $\pm$ 2,36	103 $\pm$ 5		5	18,58 $\pm$ 1,82	86 $\pm$ 36	
		100	117,08 $\pm$ 1,57	101 $\pm$ 2		10	23,34 $\pm$ 0,48	91 $\pm$ 5	

Tabela 18. Experimento de adição e recuperação para As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de sedimentos usando padronização interna por ICP-MS (continuação).

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)
$^{82}\text{Se}$	SA.17	0	< LD		$^{107}\text{Ag}$	RD.13	0	< LD	
		2,5	$3,26 \pm 0,03$	$119 \pm 1$			0,1	< LD	
		5	$5,18 \pm 0,14$	$98 \pm 3$			2,5	$2,56 \pm 0,22$	$102 \pm 9$
		10	$10,42 \pm 0,46$	$101 \pm 5$			40	$44,53 \pm 1,65$	$111 \pm 4$
	RD.5	0	< LD			SA.17	0	< LD	
		2,5	$2,79 \pm 0,15$	$102 \pm 6$			0,1	< LD	
		5	$6,45 \pm 0,31$	$124 \pm 6$			2,5	$2,79 \pm 0,03$	$111 \pm 1$
		10	$9,73 \pm 1,56$	$95 \pm 16$			40	$43,41 \pm 0,72$	$109 \pm 2$
$^{114}\text{Cd}$	SA.17	0	< LD		$^{121}\text{Sb}$	SA.17	0	< LD	
		2,5	$2,56 \pm 0,10$	$100 \pm 4$			2,5	$4,48 \pm 0,71$	$114 \pm 28$
		5	$4,33 \pm 0,26$	$85 \pm 5$			5	$7,35 \pm 0,14$	$114 \pm 3$
		10	$9,41 \pm 0,36$	$94 \pm 4$			10	$11,45 \pm 0,26$	$98 \pm 3$
	RD.5	0	< LD			RD.5	0	< LD	
		2,5	$2,63 \pm 0,09$	$104 \pm 3$			2,5	$2,86 \pm 0,11$	$108 \pm 5$
		5	$5,58 \pm 0,05$	$111 \pm 1$			5	$5,95 \pm 0,64$	$116 \pm 13$
		10	$8,94 \pm 0,59$	$89 \pm 6$			10	$10,00 \pm 0,63$	$98 \pm 6$
$^{138}\text{Ba}$	SA.17	0	$19,05 \pm 2,38$		$^{202}\text{Hg}$	SA.17	0	< LD	
		25	$44,28 \pm 2,45$	$101 \pm 10$			0,5	$0,56 \pm 0,00$	$94 \pm 1$
		50	$72,23 \pm 1,78$	$106 \pm 4$			0,75	$0,86 \pm 0,02$	$104 \pm 2$
		100	$130,29 \pm 3,47$	$111 \pm 3$			1	$1,16 \pm 0,04$	$107 \pm 4$
	RD.5	0	$27,60 \pm 2,12$			RD.5	0	$0,12 \pm 0,02$	
		25	$54,27 \pm 0,90$	$107 \pm 4$			0,5	$0,57 \pm 0,03$	$89 \pm 7$
		50	$83,03 \pm 3,26$	$111 \pm 7$			0,75	$1,88 \pm 1,52$	$234 \pm 203$
		100	$132,90 \pm 3,48$	$105 \pm 3$			1	$1,08 \pm 0,10$	$95 \pm 10$

Tabela 19. Experimento de adição e recuperação para As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$  e % de recuperação  $\pm$  DPR) em amostras de sedimentos usando padronização interna por ICP-MS (continuação).

Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)	Isótopo	Amostra	Valor adicionado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Valor determinado ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Recuperação (em %)
$^{205}\text{Tl}$	RD.13	0	$2,46 \pm 0,62$		$^{208}\text{Pb}$	SA.17	0	$19,02 \pm 3,93$	
		2,5	$3,49 \pm 0,03$	$41 \pm 1$			5	$25,69 \pm 4,82$	$134 \pm 96$
		25	$21,23 \pm 0,27$	$75 \pm 1$			10	$27,89 \pm 3,67$	$89 \pm 37$
		200	$156,03 \pm 13,01$	$77 \pm 7$			20	$37,46 \pm 0,93$	$92 \pm 5$
	SA.17	0	$2,39 \pm 0,07$			0	< LD		
		2,5	$3,83 \pm 0,17$	$58 \pm 7$		5	< LD		
		25	$24,54 \pm 0,93$	$89 \pm 4$		10	$14,69 \pm 0,55$	$100 \pm 6$	
		200	$206,29 \pm 2,65$	$102 \pm 1$		20	$18,84 \pm 0,54$	$71 \pm 3$	
		$^{238}\text{U}$	SA.17	0		$2,17 \pm 0,49$			
				2,5		$4,77 \pm 0,52$	$104 \pm 21$		
5	$7,03 \pm 0,45$			$97 \pm 9$					
10	$11,85 \pm 0,88$			$97 \pm 9$					
RD.5	0		$0,63 \pm 0,08$						
	2,5	$3,16 \pm 0,07$	$101 \pm 3$						
	5	$6,64 \pm 0,26$	$112 \pm 5$						
		10	$9,26 \pm 0,42$	$86 \pm 4$					

Ao observarmos os resultados obtidos no teste de adição e recuperação pode-se perceber que para alguns elementos, a concentração inicial na amostra é maior que a concentração adicionada, fazendo com que alguns valores não estejam dentro dos limites de 80 a 120% dos percentuais de recuperação e com DPR maiores que 10%. Com algumas figuras de mérito do método devidamente validadas para metais e metaloides totais, foram realizadas as quantificações dos elementos por ICP-MS nas amostras de sedimentos.

## **5.2 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS E METALOIDES EM AMOSTRAS DE SEDIMENTOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE**

Foram coletadas amostras de sedimentos em 21 pontos da bacia do rio Doce para análise de metais e metaloides, com triplicatas de coleta para cada ponto (Figura 14). As amostras analisadas em triplicata foram coletadas nas proximidades dos mesmos pontos de coleta das amostras de águas superficiais. As concentrações dos 20 metais e metaloides estão detalhadas nas Tabelas S8 e S9. As coletas ocorreram semestralmente entre abril de 2023 e outubro de 2024, somando quatro campanhas em um período de 18 meses. Para avaliar o comportamento dos elementos e identificar possíveis correlações entre as variáveis, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) usando o software Matlab com o pacote PLS Toolbox, resultando em uma variância total explicada dos dados de 70,56% empregando 2 componentes principais (Figura 18).

O gráfico de escores (Figura 25A) e o gráfico de loadings (Figura 25B) da primeira componente principal (PC1) mostra que todos os 20 elementos (As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mn, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn) na parte positiva do gráfico de loadings influenciaram todas as coletas realizadas, uma vez que em amostras de sedimentos espera-se maiores concentrações desses elementos. Porém, os elementos presentes na linha que divide a parte positiva e negativa do gráfico (Ag, B, Hg e Sb), exercem baixíssima influência nas separações ocorridas e nas relações entre os períodos de coleta. Isso pode ser justificado pela baixa variação nas concentrações desses elementos nas coletas realizadas. De forma geral, para todas as coletas de sedimento não houve grandes variações nas concentrações de metais e metaloides, exceto para os pontos de coleta acima de 6 na Figura 25A, que possui concentrações de Be, Co, Pb e Zn que se destacam.

O gráfico de escores (Figura 25C) e o gráfico de loadings (Figura 25D) da segunda componente principal (PC2) com todos os elementos determinados neste trabalho mostram que as coletas realizadas no início do período de chuvas (outubro/2023 e outubro/2024) apresentam maior peso para os elementos As, Cu, Mn, Cr, Se, P, V e Co que estão dispostos na parte positiva dos gráficos de loadings, enquanto as coletas realizadas no início do período de seca (abril/2023 e abril/2024) tem maior peso para os elementos Tl, Br, Li, U, Pb, Cd, Zn e Ba, dispostos na parte negativa do gráfico de loadings. Os metais de modo geral, tendem a permanecer nos sedimentos dos rios quando o ambiente é moderado em matéria orgânica, o pH está próximo a neutralidade ou levemente alcalino (pH entre 6,5 e 8,0) e quando o ambiente é rico em óxidos de Fe/Mn, favorecendo assim a formação de compostos insolúveis e adsorções.

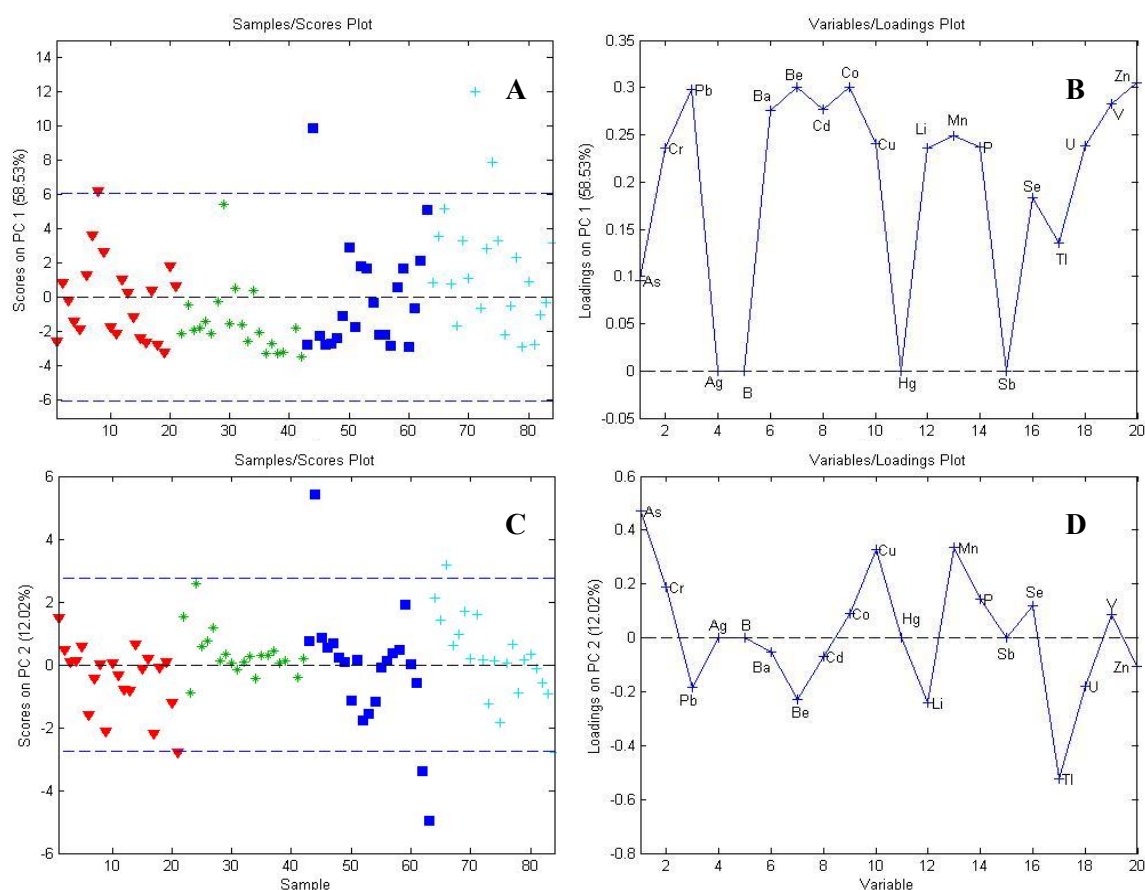


Figura 25. Análise dos componentes principais das quatro coletas realizadas para todos os elementos analisados nas amostras de sedimentos. (A e C) Gráfico de scores versus amostras. (B e D). Gráfico de loadings versus variáveis. (▼) Abril/2023. (\*) Outubro/2023. (■) Abril/2024 (+) Outubro/2024.

Conforme ressaltado anteriormente, as concentrações encontradas para todos os elementos nas amostras de sedimento não variaram significativamente durante as coletas. Na busca por explorar o perfil sazonal dos elementos que excederam os limites da resolução e de agregar mais informações para as discussões de perfil de uso de solo, os elementos As, Cd, Cr, Mn, Pb e Zn serão empregados na construção de um segundo modelo PCA, demonstrado na Figura 26. Esses elementos foram selecionados por estarem descritos na resolução e/ou por estarem extensivamente presente na bacia do rio Doce, como é o caso do Mn.

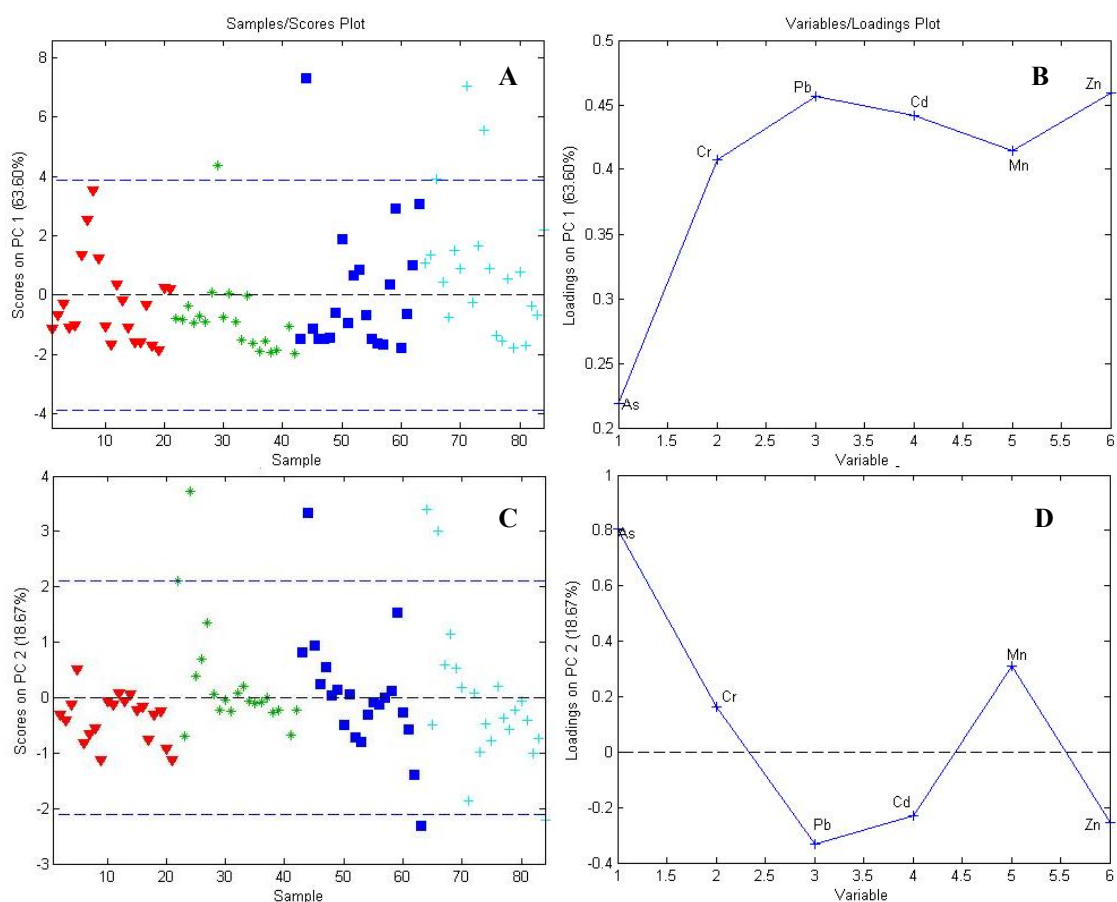


Figura 26. Análise multivariada das quatro coletas realizadas para As, Cd, Cr, Mn, Pb e Zn nas amostras de sedimentos. (A e C) Gráfico de scores versus amostras. (B e D) Gráfico de loadings versus variáveis. (▼) Abril/2023. (\*) Outubro/2023. (■) Abril/2024 (+) Outubro/2024.

O gráfico de escores (Figura 26A) e o gráfico de loadings (Figura 26B) da primeira componente principal (PC1) não mostra uma divisão entre as coletas a partir dos elementos As, Cd, Cr, Mn, Pb e Zn, pois todos os elementos no gráfico de loadings estão

na porção superior do mesmo. No entanto, algumas amostras (superiores a linha de valor 2 no gráfico de escores) se destacam por apresentar variações nas concentrações de As, Cd, Cr, Mn, Pb e Zn, não sendo observadas tendências de separação sazonal com base nas concentrações dos elementos. O gráfico de escores (Figura 26C) e o gráfico de loadings (Figura 26D) da segunda componente principal (PC2) mostram que As apresentou o maior peso, na parte positiva do gráfico de loadings, seguido do Mn e do Cr, se separando do Cd, Pb e Zn. O Pb que está na parte negativa do gráfico de loadings está influenciando principalmente a coleta realizada em abril/2023 que é considerado o início do período de seca na bacia hidrográfica do rio Doce<sup>77</sup>.

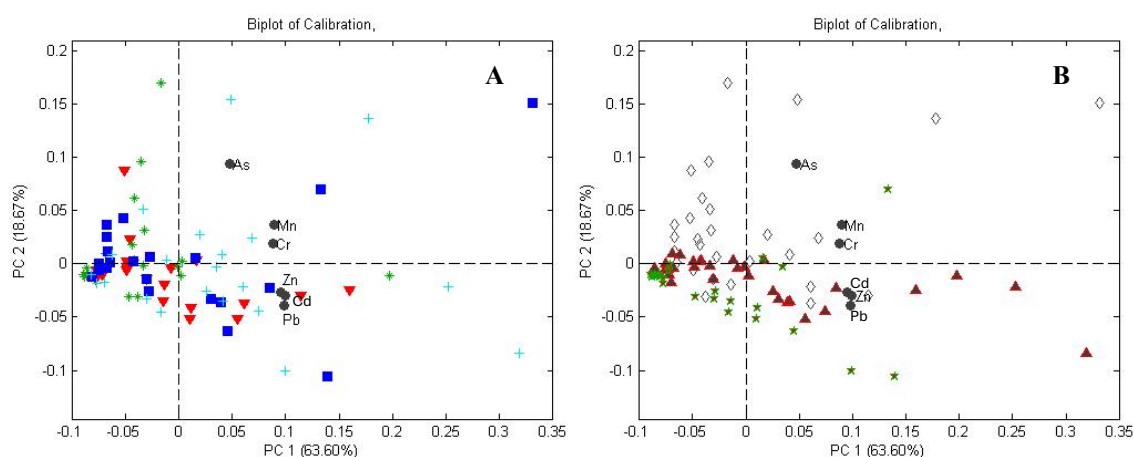


Figura 27. Gráficos Biplot das quatro coletas realizadas com os elementos com concentrações acima do limite da Resolução CONAMA 454/2012 nas amostras de sedimentos. (A) divisão por coletas. (▼) Abril/2023. (\*) Outubro/2023. (■) Abril/2024 (+) Outubro/2024. (B) divisão por entre Rio Doce – Alto e Médio e Santo Antônio. (◇) Alto Rio Doce. (▲) Médio Rio Doce. (★) Santo Antônio.

Quando observamos o gráfico biplot dividido por coletas (Figura 27A), percebe-se que os períodos de chuva e seca não influenciaram na distribuição dos elementos. No entanto, ao observarmos o gráfico biplot com a divisão entre alto rio Doce, médio rio Doce e rio Santo Antônio (Figura 27B), percebe-se que o alto rio Doce possui maior influência do As, Cr e Mn o que podemos relacionar com o garimpo de ouro e a mineração de ferro, historicamente presente na região do quadrilátero ferrífero, além do enorme volume de lama oriunda do rompimento da barragem de Fundão. Para o médio rio Doce nota-se a presença de predominante do Cr, Pb e Zn, que pode ser atribuída ao adensamento populacional e, conseqüentemente, maior número de indústrias e provável

lançando de seus efluentes no rio sem o prévio tratamento. Para o rio Santo Antônio a maioria dos pontos se assemelham ao médio rio Doce.

Para um estudo da distribuição da concentração dos elementos As, Cd, Cr, Mn, Pb e Zn foram compilados os dados das Tabelas S8 e S9 e gerou-se a Figura 28 para os demais elementos analisados neste trabalho gerou-se as Figuras S42 e S43, exceto para os elementos Ag, B, Hg e Sb, na qual todos as concentrações determinadas ficaram abaixo do limite de quantificação de 0,37, 6,48, 0,59 e 1,29 mg/kg, respectivamente. Ao direcionarmos nosso olhar para a Figura 28, observa-se que todos os elementos (As, Cr e Pb) acima do limite estabelecido pela resolução brasileira possuem diversas prováveis fontes de contaminação, no entanto ambos estão ligados diretamente a atividade de mineração<sup>6,70</sup>.

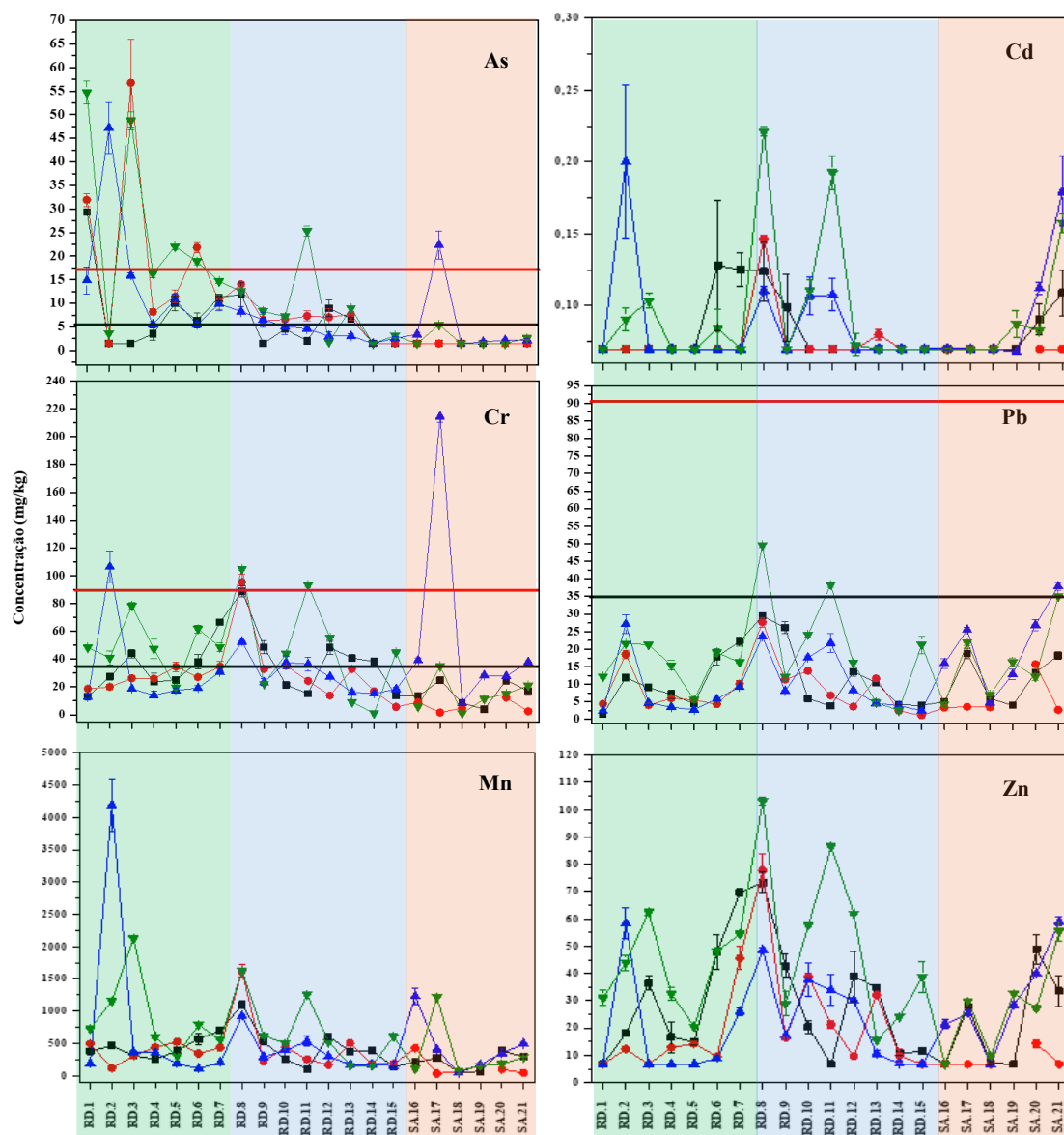


Figura 28. Determinação da concentração para As, Cd, Cr, Mn, Pb e Zn nos 21 pontos de coleta ao longo da bacia do rio Doce em quatro coletas de sedimentos. (■) Abril/2023. (▼) Outubro/2023. (▲) Abril/2024. (●) Outubro/2024. A linha preta destaca o nível 1 e a linha vermelha destaca o nível 2 dos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA 454/2012. RD: Rio Doce. SA: Rio Santo Antônio. (■) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (■) Rio Santo Antônio.

Ao observarmos a Figura 28 percebe-se que o alto rio Doce recebeu um enorme volume de lama oriundo do rompimento da barragem da Fundão e é onde se concentram as indústrias mineradoras da bacia hidrográfica e possui o maior número de pontos de coleta que obtiveram concentrações de As acima dos dois níveis (nível 1 = 5,9 mg/kg e nível 2 = 17 mg/kg) de limites estabelecido pela resolução CONAMA 454/12. Entretanto, as concentrações de As foram reduzindo ao longo do rio Doce, com a permanência de apenas uma amostra acima do nível 2. Solos sujeitos a inundações ou com drenagem

deficiente apresentam condições anaeróbias, nas quais a dissolução de óxidos de ferro ocorre devido à redução desses compostos pela oxidação da matéria orgânica. Esse processo leva à diminuição do potencial redox, o que, por sua vez, aumenta a mobilidade de elementos como arsênio (As), cromo (Cr) e chumbo (Pb) que são os elementos que obtiveram concentrações acima do limite estabelecido pela legislação brasileira. Como consequência, pode ocorrer a lixiviação do Fe e Mn, e dos elementos que estavam coprecipitados e/ou adsorvidos com ele<sup>39</sup>.

Ao observarmos os gráficos de concentração das quatro coletas de Cr e Pb (Figura 28) percebe-se que nos pontos RD.2, RD.8 e RD.11, pertencentes ao rio Doce foram obtidas as mais elevadas concentrações, quando comparada com as concentrações determinadas nos demais pontos de coleta, com exceção do SA.17 que pertence ao rio Santo Antônio (Figura 28). Embora o Cr e o Pb não sejam extraídos em grandes quantidades na região da bacia do rio Doce, eles estão presentes em rejeitos de mineração de Fe e Mn, a partir de minerais como a cromita ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) presente em depósitos ferro e como contaminantes em minérios de Fe, Mn e Ba, respectivamente. Siderurgias e metalurgias em Timóteo, usam Cr e Pb em ligas metálicas e no tratamento de superfícies metálicas e podem ser liberados nos seus efluentes para os rios que se liga fortemente aos óxidos de Fe e Mn e se depositam nos sedimentos de fundo. Fertilizantes desenvolvidos com resíduos de curtumes, também podem ser rotas diretas para o lançamento de Cr nos cursos d'água e conseqüentemente nos sedimentos de fundo, descrito acima. Ao observarmos os pontos de coleta com maiores concentrações deste metal na Figura 29, que demonstra o uso do solo verificamos que a agropecuária (pastagem e mosaicos de usos) e áreas urbanizadas estão presentes, além do enorme volume de lama oriunda do rompimento da barragem de Fundão para os pontos referentes ao rio Doce (RD).

Além dos elementos já citados, os Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cu, Hg, Li, Mn, P, Se, Sb, Tl, U, V e Zn tiveram suas concentrações determinadas neste trabalho, no entanto, não ultrapassaram os limites 1 e 2 estabelecidos como limites máximos pela resolução CONAMA 454/12 ou não possuem limites estabelecidos legislação brasileira. Os gráficos das Figuras 28, S42 e S43, mostram que as concentrações de Ag, B, Hg, Sb ficaram abaixo do LQ, enquanto para Ba, Be, Cd, Co, Cu, Li, Mn, P, Se, Tl, U e Zn obtiveram variações nas concentrações ao longo do rio Doce de no máximo 21, 17, 3, 16, 2, 30, 91, 15, 2, 2, 36 e 13 vezes maior entre um ponto de coleta e outro, respectivamente, e em sua maioria, ocorreram na 3ª coleta (abril/2024), ou seja, no início do tempo seco da bacia

hidrográfica do rio Doce. Após análise detalhada das concentrações dos elementos e sua distribuição ao longo da bacia do rio Doce, o fator de enriquecimento e o índice de geoacumulação foram calculados.

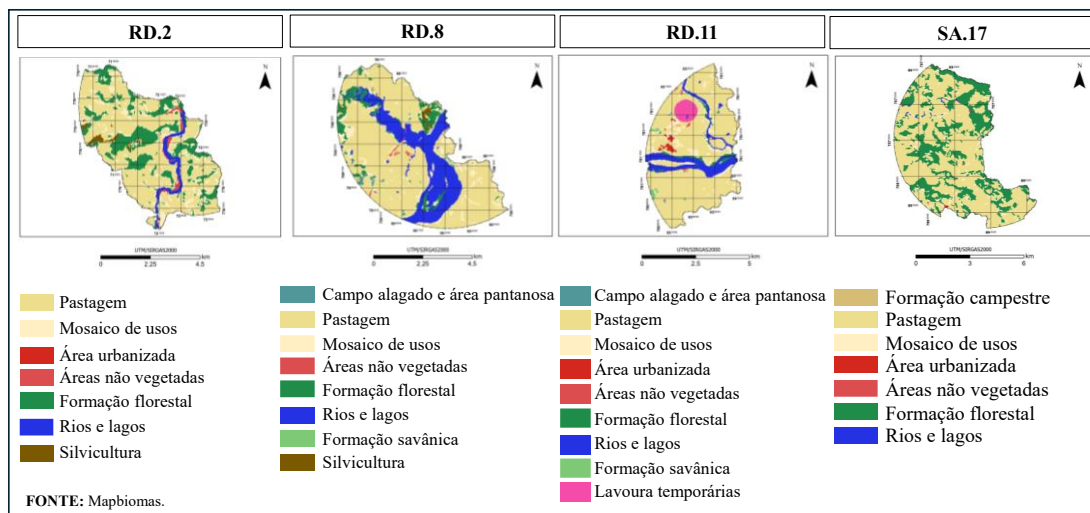


Figura 29. Uso do solo para os pontos RD.2, RD.8, RD.11 e SA.17.

A razão de enriquecimento é uma ferramenta utilizada para avaliar a contaminação por metais em ambientes aquáticos, como por exemplo sedimentos superficiais, comparando as concentrações dos metais nas amostras com valores de referência naturais (background)<sup>99,128</sup>. Ao observarmos as Figuras S44 a S47, podemos verificar que em todas as 4 coletas realizadas houve um enriquecimento moderado, com valores variando entre 1,00 e 4,86, significando uma baixa influência antropogênica na região. No entanto, os dados foram obtidos com o background calculado a partir dos resultados de concentração determinados neste trabalho para os pontos de coleta no rio Santo Antônio, que também é um rio que possui grande influência antropogênica.

Contudo, na 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> coletas, houve valores de RE entre 6,95 e 9,58, evidenciando um enriquecimento significativo de As nos pontos RD.1, RD.2 e RD.3 e de Mn no ponto RD.2 amostrados no rio Doce, podendo ser explicado por estes pontos estarem na cabeceira do rio Doce, que é o local onde mais se encontram mineradoras, principalmente no quadrilátero ferrífero e no poço da hidrelétrica de Risoleta Neves (RD.2), além de ter concentrado um enorme volume de lama oriunda do rompimento da barragem de Fundão.

O índice de geoacumulação é outro método empregado para avaliar a contaminação por metais em sedimentos, baseando-se na comparação entre as concentrações atuais e os níveis naturais ou pré-industriais, conhecidos como valores de background. A adoção de valores de background específicos para cada área de estudo é preferível ao uso de médias globais, pois considera a variabilidade natural da geologia local, refletida nas diferentes composições de rochas e sedimentos. A utilização de valores globais pode levar a interpretações equivocadas sobre a qualidade geoquímica dos sedimentos em uma região específica<sup>99,128-130</sup>.

Ao observarmos as Figuras S48 a S51, podemos verificar que em todas as 4 coletas realizadas a qualidade do solo na maioria dos elementos se encontram sem contaminação ou com contaminação moderada, significando uma baixa influência antropogênica na região. No entanto, os dados foram obtidos com o background calculado a partir dos resultados de concentração determinados no rio Santo Antônio, com forte influência antropogênica.

Contudo, o P, Mn, Cr tornam a qualidade dos sedimentos classificada como moderada (1ª e 2ª coletas), moderada a alta (3ª coleta) e elevada (4ª coleta), enquanto o As torna a qualidade dos sedimentos classificada como elevada e extrema (1ª coleta) a extrema (2ª, 3ª, e 4ª coletas) principalmente no primeiros pontos de coleta RD.1, RD.2, RD.3 podendo ser explicado por estes pontos estarem na cabeceira do rio Doce, que é o local onde mais se encontram mineradoras, principalmente no quadrilátero ferrífero e no poço da hidrelétrica de Risoleta Neves (RD.2), além de ter concentrado um enorme volume de lama oriunda do rompimento da barragem de Fundão..

Ao compararmos os valores obtidos na razão de enriquecimento com os valores obtidos do índice de geoacumulação, percebe-se que mesmo os dois sendo ferramentas amplamente usadas para avaliar a contaminação de sedimentos por metais pesados e usarem o mesmo valor de background, o índice de geoacumulação obteve valores mais elevados, demonstrando uma maior contaminação de metais e metaloides como As, Mn e Cr. Isso pode ser explicado quando observamos as equações 6 (RE) e 7 ( $I_{geo}$ ), o  $I_{geo}$  assume um valor arbitrário de correção de 1,5 como valor de fundo fixo, padronizando a escala de contaminação, que também tem valores menores que a escala do RE.

Ao comparar os resultados de concentração determinados neste trabalho com os resultados obtidos na literatura através da Tabela S10, observou-se que as concentrações

de Ag, B, Ba, Cd, Cu, Hg e P neste trabalho estão aproximadamente de 1 a 10 vezes menores que os resultados encontrados na literatura. Contudo, para as concentrações determinadas para As, Be, Co, Cr, Mn, Sb, Se, Pb, V e Zn estão aproximadamente de 1 a 20 vezes maiores que resultados encontrados na literatura. Para as concentrações de Al, Fe e Ni, que não foram determinadas as concentrações neste trabalho, ao observarmos a literatura verificamos variações de até 20 vezes para o Al, 16.000 vezes para o Fe e 48 vezes para o Ni.

Ao analisarmos individualmente cada elemento que possui suas concentrações mostradas ao longo de dois anos na Figura 28, percebe-se que a concentração determinada neste trabalho para As, Cr, Mn, Pb e Zn, estão maiores que as encontradas na literatura, exceto o Cd. O arsênio e o manganês tem concentração mais alta que a determinada neste trabalho, apenas quando comparada ao estudo de Pauly et al., 2024<sup>70</sup> com coleta em novembro de 2016, um ano após o rompimento da barragem. O cádmio por sua vez, possui neste trabalho concentração mais baixa que quando comparado com os estudos da literatura, exceto para os valores obtidos no trabalho de Costa et al., 2022<sup>78</sup> que realizou coletas nos anos de 2018 e 2019 e das análises realizadas pela Renova nos anos de 2021 a 2023.

O valor determinado neste trabalho para cromo e zinco ao ser comparado com os trabalhos da literatura possui uma variação de até 200 e 24 vezes, respectivamente, ficando superior a todas as referências obtidas. No entanto, o chumbo possui neste trabalho, concentração mais alta que todos os outros trabalhos comparados na tabela S10, exceto no estudo de Ferreira et al., 2021<sup>131</sup>, que teve sua coleta realizada no ano de 2017, dois anos após o rompimento da barragem.

Sendo assim, as comparações com a literatura se tornam de grande relevância para este trabalho pois demonstra que em sua maioria, as concentrações determinadas neste trabalho, que possuem de 7 a 9 anos após o rompimento da barragem de Fundão, possuem concentrações superiores as determinadas em coletas com períodos mais próximos do rompimento, como por exemplo as determinadas para As no trabalho de Pauly et al., 2024<sup>70</sup> com coletas em 2016. No entanto, podemos concluir que as elevadas concentrações determinadas para o rio Doce são advindas principalmente do rompimento da barragem, já que o fator de enriquecimento e o índice de geoacumulação foram calculados a partir dos resultados coletados no rio Santo Antônio que possui

características similares ao rio Doce, principalmente relacionado as atividades antropogênicas.

# **Capítulo 6.**

## **Conclusão**

Após a coleta e análise das amostras de águas superficiais observou-se que dentre os 23 analitos analisados apenas as concentrações determinadas para Al ( $100 \mu\text{g L}^{-1}$ ), As ( $10 \mu\text{g L}^{-1}$ ), Fe ( $300 \mu\text{g L}^{-1}$ ), Cr ( $50 \mu\text{g L}^{-1}$ ), Mn ( $100 \mu\text{g L}^{-1}$ ), Ni ( $25 \mu\text{g L}^{-1}$ ), P ( $100 \mu\text{g L}^{-1}$ ) e Pb ( $10 \mu\text{g L}^{-1}$ ) apresentaram valores acima dos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/05 para as águas doces de classe 2. Enquanto para sedimentos apenas as concentrações de As (nível 1 =  $5,9 \text{ mg/kg}$  e nível 2 =  $17 \text{ mg/kg}$ ), Cr (nível 1 =  $37,3 \text{ mg/kg}$  e nível 2 =  $90 \text{ mg/kg}$ ), e Pb (nível 1 =  $35 \text{ mg/kg}$  e nível 2 =  $91,3 \text{ mg/kg}$ ), apresentaram valores superiores aos estabelecidos pela resolução CONAMA 454/12.

Quando empregado e analisados os PCAs construídos para águas superficiais e identificou-se que o principal evento que influencia a concentração de metais disponíveis nas águas superficiais são os períodos de chuvas e secas que regem a região da bacia hidrográfica do rio Doce, ou seja, no período chuvoso a concentração da maioria dos elementos aumenta quando comparados ao período de seca da bacia, exceto para P. Para as amostras de sedimentos o período de chuva e seca não influenciaram as concentrações dos elementos determinados e sim a divisão entre alto e médio rio Doce, que possuem características distintas de uso do solo.

As concentrações determinadas para as amostras de águas superficiais e sedimentos foram comparadas com os mapas de uso dos solos e a partir deles identificou-se algumas possíveis fontes de contaminação, como por exemplo liberação de efluentes domésticos não tratados no leito do rio (área urbana), agropecuária (pastagem e mosaico de usos), silvicultura, mineração, dentre outros usos do solo, além do rompimento da barragem de Fundão.

Avaliando-se os dados obtidos neste trabalho com os da literatura, passados 10 anos do rompimento da barragem de Fundão, podem-se observar os efeitos do rompimento nas águas superficiais e nos sedimentos coletados no rio Doce. O grau de contaminação, o índice de geoacumulação e o fator de enriquecimento, métricas empregadas para avaliar a contaminação por metais em sedimentos e/ou águas superficiais, calculados cada analito em cada um dos pontos de coleta, exceto para o cálculo do grau de contaminação, demonstraram valores preocupantes para alguns elementos. Os resultados evidenciaram que para os elementos Ni, V, As, P, Cr e Pb (em águas superficiais), P, Mn, Cr e As (em sedimentos) os valores obtidos influenciam de maneira moderada a extrema a qualidade das águas superficiais e dos sedimentos do rio

Doce, tendo como principal fonte o rompimento da barragem de Fundão, com exceção do P. Metais como Fe e Mn, naturalmente presente na região em altas concentrações, ocasionaram grandes impactos na qualidade do rio Doce pelo derramamento da lama. Pelo grau de contaminação foi possível notar que o Fe e o Mn trazem grandes impactos na qualidade das águas do rio Doce e Santo Antônio.

Ao compararmos os resultados deste trabalho para águas superficiais e sedimentos com trabalhos publicados ao longo do tempo, foi possível verificar que as concentrações dos elementos em trabalhos anteriores a este possuem concentrações inferiores as determinadas para todos os elementos deste trabalho, salvo trabalhos como o de Longhini et al., 2022 e Pauly et al., 2024 para águas superficiais e sedimentos, respectivamente.

## **Referências**

- (1) Instituto Brasileiro de Mineração. *Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração*; Brasília, 2016. <https://ibram.org.br/publicacoes/page/14/#publication> (accessed 2023-01-01).
- (2) ANM. *Ferro*; Brasília, 2018. [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro\\_sm\\_2018](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro_sm_2018) (accessed 2023-01-02).
- (3) IBRAM. *Setor Mineral 2021*; Brasília, 2022. <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/02/Apresentacao-Coletiva-de-Imprensa-resultados-2021-01022022-versao-01-de-fevereiro.pdf> (accessed 2023-01-02).
- (4) CBH-PIRANGA/MG. *A Bacia*. <https://www.cbhpiranga.org.br/a-bacia> (accessed 2023-01-08).
- (5) ANA. *Rio Doce*. <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/rio-doce/rio-doce-saiba-mais> (accessed 2023-01-02).
- (6) IGAM; SEMAD. *Relatório Anual de Gestão e Recursos Hídricos de Minas Gerais - 2015*. <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3205>.
- (7) Oliveira, K. S. S.; Quaresma, V. da S. Temporal Variability in the Suspended Sediment Load and Streamflow of the Doce River. *J South Am Earth Sci* **2017**, *78*, 101–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.06.009>.
- (8) FEAM. *INVENTÁRIO DE BARRAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS - ANO 2015*; Belo Horizonte, 2016. [http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS\\_MINERAÇÃO/Inventário\\_de\\_Barragens\\_2015\\_Final\\_V01.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS_MINERAÇÃO/Inventário_de_Barragens_2015_Final_V01.pdf).
- (9) Instituto Brasileiro de Mineração. *Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração*; Brasília, 2016. <https://ibram.org.br/publicacoes/page/14/#publication> (accessed 2023-01-01).
- (10) CASTRO, P. T. A.; JÚNIOR, H. A. N.; LIMA, H. M. *Entendendo a Mineração No Quadrilátero Ferrífero*; Belo Horizonte, 2011. [https://qfe2050.ufop.br/sites/default/files/qfe2050/files/quadrilatero\\_ferriifero.pdf?m=1525724467](https://qfe2050.ufop.br/sites/default/files/qfe2050/files/quadrilatero_ferriifero.pdf?m=1525724467) (accessed 2023-01-02).
- (11) IBRAM. *INFORMAÇÕES SOBRE A ECONOMIA MINERAL BRASILEIRA 2020 - ANO BASE 2019*; Brasília, 2020. <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Economia-Mineral-Brasileira-IBRAM-2020.pdf> (accessed 2023-01-01).
- (12) Diniz, J. M. F. de S.; Reis, A. A. dos; Acerbi Junior, F. W.; Gomide, L. R. DETECÇÃO DA EXPANSÃO DA ÁREA MINERADA NO QUADRILÁTERO FERRÍFERO, MINAS GERAIS, NO PERÍODO DE 1985 A 2011 ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO. *Boletim de Ciências*

- Geodésicas* **2014**, 20 (3), 683–700. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000300039>.
- (13) IBRAM. *SETOR MINERAL | 2024*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/02/DADOS\\_Setor-Mineral\\_2024\\_5FEV2025.pdf](https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2025/02/DADOS_Setor-Mineral_2024_5FEV2025.pdf) (accessed 2025-04-08).
- (14) ANM. *Ferro*; Brasília, 2018. [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro\\_sm\\_2018](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro_sm_2018) (accessed 2023-01-02).
- (15) IBRAM; CNI. *A Mineração No Foco Das Políticas Públicas Para o Desenvolvimento Do Brasil e Para a Promoção Da Qualidade de Vida Do Brasileiro*, 2ª edição.; 2011.
- (16) IBRAM. *Setor Mineral 2021*; Brasília, 2022. <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/02/Apresentacao-Coletiva-de-Imprensa-resultados-2021-01022022-versao-01-de-fevereiro.pdf> (accessed 2023-01-02).
- (17) da Silva Junior, C. A.; Coutinho, A. D.; de Oliveira-Júnior, J. F.; Teodoro, P. E.; Lima, M.; Shakir, M.; de Gois, G.; Johann, J. A. Analysis of the Impact on Vegetation Caused by Abrupt Deforestation via Orbital Sensor in the Environmental Disaster of Mariana, Brazil. *Land use policy* **2018**, 76, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.019>.
- (18) CAXITO, F.; DIAS, T. G. *Ferro*. <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ferro/#aspectos-geometal%C3%BArgicos> (accessed 2023-01-09).
- (19) Sun, W.; Ji, B.; Khoso, S. A.; Tang, H.; Liu, R.; Wang, L.; Hu, Y. An Extensive Review on Restoration Technologies for Mining Tailings. *Environmental Science and Pollution Research* **2018**, 25 (34), 33911–33925. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3423-y>.
- (20) Academia Brasileira de Letras; VALE. *Recursos Minerais No Brasil - Problemas e Desafios*; Rio de Janeiro, 2016.
- (21) Martins-Oliveira, A. T.; Zanin, M.; Canale, G. R.; Costa, C. A. da; Eisenlohr, P. v; Melo, F. C. S. A. de; Melo, F. R. de. A Global Review of the Threats of Mining on Mid-Sized and Large Mammals. *J Nat Conserv* **2021**, 62, 126025. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.126025>.
- (22) Andrade, G. F.; Paniz, F. P.; Martins, A. C.; Rocha, B. A.; da Silva Lobato, A. K.; Rodrigues, J. L.; Cardoso-Gustavson, P.; Masuda, H. P.; Batista, B. L. Agricultural Use of Samarco’s Spilled Mud Assessed by Rice Cultivation: A Promising Residue Use? *Chemosphere* **2018**, 193, 892–902. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.099>.
- (23) Neves, L. P. *Legislacao-Federal-Brasileira-Em-Seguranca-de-Barragens*; Brasília, 2018. <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/e-book-livre->

- legislacao-federal-brasileira-em-seguranca-de-barragens-autor-luiz-paniago-neves.pdf (accessed 2022-10-09).
- (24) Milanez, B.; Wanderley, L.; Mansur, M.; Pinto, R.; Gonçalves, R.; Santos, R.; Coelho, T. *A QUESTÃO MINERAL NO BRASIL VOL. 2 ANTES FOSSE MAIS LEVE A CARGA: Reflexões Sobre o Desastre Da Samarco/Vale/BHP Billiton.*, 1ª Edição.; Editorial iGuana: Marabá, 2016; Vol. 2.
- (25) ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *RELATÓRIO DE SEGURANÇA DE BARRAGENS 2024/2025*.  
[https://www.snisb.gov.br/?fbclid=PAQ0xDSwLSoiZleHRuA2F1bQIxMQABpyKCJixCuF72-8ALf33pHEAMueU2M8iEfjmqnlq7owClexSyBBF2tmyQjfYe\\_aem\\_g2\\_uUXnBrX8kD3oYAj7QFw](https://www.snisb.gov.br/?fbclid=PAQ0xDSwLSoiZleHRuA2F1bQIxMQABpyKCJixCuF72-8ALf33pHEAMueU2M8iEfjmqnlq7owClexSyBBF2tmyQjfYe_aem_g2_uUXnBrX8kD3oYAj7QFw) (accessed 2025-07-02).
- (26) CBH-PIRANGA/MG. *A Bacia*. <https://www.cbhpiranga.org.br/a-bacia> (accessed 2023-01-08).
- (27) MENDES, C. L.; FELIPPE, M. F. ALTERAÇÕES GEOMORFOLÓGICAS DE FUNDO DE VALE NA BACIA DO RIO DO CARMO DECORRENTES DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO (MINAS GERAIS, BRASIL). *REVISTA CAMINHOS DE GEOGRAFIA* **2019**, 20 (62), 237–252.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14393/RCG206941190>.
- (28) ANA. *Rio Doce*. <https://www.gov.br/ana/pt-br/sala-de-situacao/rio-doce/rio-doce-saiba-mais> (accessed 2023-01-02).
- (29) Carneiro, G. A.; Gonçalves, J. A. C.; Carneiro, G. C. A. A Lama de Rejeitos de Mineração e Os Seus Efeitos Sobre a Recarga Dos Aquíferos Aluvionares Do Rio Gualaxo Do Norte Após o Rompimento Da Barragem de Fundão Em Mariana-MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 2020, pp 1213–1230.  
<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>.
- (30) Institutos Lactec. *Diagnóstico Socioambiental Do Rio Doce – Relatório de Linha - Base – Resumo Executivo*; Curitiba, 2017.  
<https://docslib.org/doc/660177/relat%C3%B3rio-de-linha-base-resumo-executivo>.
- (31) IGAM; SEMAD; SISEMA. *Relatório Anual de Gestão e Recursos Hídricos de Minas Gerais - 2015*; Belo Horizonte, 2017.  
<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3205>.
- (32) Oliveira, K. S. S.; Quaresma, V. da S. Temporal Variability in the Suspended Sediment Load and Streamflow of the Doce River. *J South Am Earth Sci* **2017**, 78, 101–115. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.06.009>.
- (33) Vaneli, B. P.; Araújo, E. M. de S.; de Oliveira, D. B.-H. S.; Spagnol, I. T.; Teixeira, E. C. Conceptual Model to Analyze the Effects Caused by Technological Disaster on the Physical-Chemical State of the Lower Doce River

- Waters, Brazil. *Science of The Total Environment* **2022**, 809, 152168.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152168>.
- (34) ANA. *PIRH Bacia Do Rio Doce - Plano Integrado De Recursos Hídricos Da Bacia Hidrográfica Do Rio Doce*; Brasília, 2010.
- (35) IGAM. *Gestão e Situação Das Águas de Minas Gerais: Ciclo 2019 - 2022*; Belo Horizonte, 2022.  
<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4209>.
- (36) IGAM; SEMAD. *Encarte Especial Sobre a Qualidade Das Águas Do Rio Doce Após 1 Ano Do Rompimento de Barragem de Fundão - 2015/2016*; Belo Horizonte, 2016.  
[http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2016/QUALIDADE/ENCARTE\\_ESPECIAL\\_SOBRE\\_A\\_QUALIDADE\\_DA\\_%C3%81GUA\\_DO\\_RIO\\_DOCE\\_AP%C3%93S\\_O\\_ROMPIMENTO\\_DE\\_BARRAGEM\\_DA\\_SAMARCO\\_NO\\_DISTRITO\\_DE\\_BENTO\\_RODRIGUES.pdf](http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/2016/QUALIDADE/ENCARTE_ESPECIAL_SOBRE_A_QUALIDADE_DA_%C3%81GUA_DO_RIO_DOCE_AP%C3%93S_O_ROMPIMENTO_DE_BARRAGEM_DA_SAMARCO_NO_DISTRITO_DE_BENTO_RODRIGUES.pdf).
- (37) CONAMA. *RESOLUÇÃO CONAMA Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005*; 2005. [http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO\\_CONAMA\\_n\\_357.pdf](http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLUCAO_CONAMA_n_357.pdf) (accessed 2022-10-11).
- (38) ANA. *Encarte Especial Sobre a Bacia Do Rio Doce - Rompimento Da Barragem Em Mariana/MG*; Brasília, 2016.
- (39) Guevara, Y. Z. C.; Souza, J. J. L. L. de; Veloso, G. V.; Veloso, R. W.; Rocha, P. A.; Abrahão, W. A. P.; Fernandes Filho, E. I. Reference Values of Soil Quality for the Rio Doce Basin. *Rev Bras Cienc Solo* **2018**, 42 (0).  
<https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170231>.
- (40) Almeida, C. A.; Oliveira, A. F. de; Pacheco, A. A.; Lopes, R. P.; Neves, A. A.; Lopes Ribeiro de Queiroz, M. E. Characterization and Evaluation of Sorption Potential of the Iron Mine Waste after Samarco Dam Disaster in Doce River Basin – Brazil. *Chemosphere* **2018**, 209, 411–420.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.071>.
- (41) Omachi, C. Y.; Siani, S. M. O.; Chagas, F. M.; Mascagni, M. L.; Cordeiro, M.; Garcia, G. D.; Thompson, C. C.; Siegle, E.; Thompson, F. L. Atlantic Forest Loss Caused by the World’s Largest Tailing Dam Collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil). *Remote Sens Appl* **2018**, 12, 30–34.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.08.003>.
- (42) Santolin, C. V. A.; Ciminelli, V. S. T.; Nascentes, C. C.; Windmüller, C. C. Distribution and Environmental Impact Evaluation of Metals in Sediments from the Doce River Basin, Brazil. *Environ Earth Sci* **2015**, 74 (2), 1235–1248.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-015-4115-2>.
- (43) Sánchez, L. E.; Alger, K.; Alonso, L.; Barbosa, F. A. R.; Brito, M. C. W.; Laureano, F. v; May, P.; Roeser, H.; Kakabadse, Y. *Os Impactos Do Rompimento*

- Da Barragem de Fundão O Caminho Para Uma Mitigação Sustentável e Resiliente*. <https://twitter.com/IUCN/>.
- (44) Brito, M. C. W.; Barbosa, F. A. R.; May, P.; Maroun, C.; Renshaw, J.; Sánchez, L. E.; Kakabadse, Y. *Abordagens Fonte-Mar e de Paisagem*; Gland, Suíça, 2021. <https://doi.org/https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2021.07.pt>.
- (45) Maroun, C.; Renshaw, J.; Sánchez, L. E.; Barbosa, F. A. R.; Brito, M. C. W.; May, P.; Kakabadse, Y. *UICN Da Restauração à Governança Responsiva O Rio Doce Após o Rompimento Da Barragem de Fundão RELATÓRIO TEMÁTICO N O 4 DO PAINEL DO RIO DOCE*. <https://twitter.com/IUCN/>.
- (46) Magris, R. A.; Marta-Almeida, M.; Monteiro, J. A. F.; Ban, N. C. A Modelling Approach to Assess the Impact of Land Mining on Marine Biodiversity: Assessment in Coastal Catchments Experiencing Catastrophic Events (SW Brazil). *Science of The Total Environment* **2019**, *659*, 828–840. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.238>.
- (47) ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *ATLAS Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas*. <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZjA1ZjQwZWUtYmRkYS00YjM0LWFhMjltMTMyOTQ0NDljNGQyIiwidCI6ImUwYmI0MDEyLTgxMGltNDY5YS04YjRkLTY2NzZjZDFiYWY4OCJ9> (accessed 2023-04-08).
- (48) Baptista, M.; Cardoso, A. RIOS E CIDADES. *Revista da Universidade Federal de Minas Gerais* **2016**, *20* (2). <https://doi.org/10.35699/2316-770X.2013.2693>.
- (49) Trata Brasil. *Estudo do Trata Brasil expõe os impactos da falta de saneamento nos Estados brasileiros em relação a saúde*. <https://tratabrasil.org.br/estudo-do-trata-brasil-expoe-os-impactos-da-falta-de-saneamento-nos-estados-brasileiros-em-relacao-a-saude/> (accessed 2023-04-08).
- (50) Secretaria Nacional de Saneamento. *Panorama Do Saneamento Básico Do Brasil 2021*; Brasília, 2021.
- (51) Pollastri Gimenes; Henrique Tadeu. *CONTAMINAÇÃO DE EFLUENTES LÍQUIDOS POR METAIS PESADOS: CARACTERIZAÇÃO DOS METAIS, IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS AFETADAS E MÉTODOS DE REMOÇÃO*. . chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj/[https://oswaldocruz.br/revista\\_academica/content/pdf/Henrique\\_Tadeu\\_Pollastri\\_Gimenes.pdf](https://oswaldocruz.br/revista_academica/content/pdf/Henrique_Tadeu_Pollastri_Gimenes.pdf).
- (52) Reis, M. M.; Tuffi Santos, L. D.; da Silva, A. J.; de Pinho, G. P.; Montes, W. G. Metal Contamination of Water and Sediments of the Vieira River, Montes Claros, Brazil. *Arch Environ Contam Toxicol* **2019**, *77* (4), 527–536. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00666-1>.
- (53) Fundação RENOVA. *Relatório Trimestral Simplificado - Programa de Monitoramento Quali-Quantitativo Sistemático de Água e Sedimentos – PMQQS*; 2019. <https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2019/07/relatorio-trimestral-simplificado-pmqqs-mai-19.pdf>.

- (54) IBGE. *Cidades e Estados*. <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/mariana.html> (accessed 2023-01-02).
- (55) Prefeitura de Mariana. *Prefeitura de Mariana - Histórico*. <https://www.mariana.mg.gov.br/historico> (accessed 2023-01-02).
- (56) de Freitas, C. M.; Barcellos, C.; Asmus, C. I. R. F.; da Silva, M. A.; Xavier, D. R. From Samarco in Mariana to Vale in Brumadinho: Mining Dam Disasters and Public Health. *Cadernos de Saude Publica*. Fundacao Oswaldo Cruz 2019. <https://doi.org/10.1590/0102-311X00052519>.
- (57) SAMARCO. *RELATÓRIO DA ADMINISTRAÇÃO E DEMONSTRAÇÕES FINANCEIRAS - 2015*; 2015. [https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2020/12/2015-DFs\\_portugues\\_final\\_07062016-1.pdf](https://www.samarco.com/wp-content/uploads/2020/12/2015-DFs_portugues_final_07062016-1.pdf).
- (58) Segura, F. R.; Nunes, E. A.; Paniz, F. P.; Paulelli, A. C. C.; Rodrigues, G. B.; Braga, G. Ú. L.; dos Reis Pedreira Filho, W.; Barbosa, F.; Cerchiaro, G.; Silva, F. F.; Batista, B. L. Potential Risks of the Residue from Samarco's Mine Dam Burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental Pollution* **2016**, *218*, 813–825. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>.
- (59) FEAM. *INVENTÁRIO DE BARRAGEM DO ESTADO DE MINAS GERAIS - ANO 2015*; Belo Horizonte, 2016. [http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS\\_MINERAÇÃO/Inventário\\_de\\_Barragens\\_2015\\_Final\\_V01.pdf](http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS_MINERAÇÃO/Inventário_de_Barragens_2015_Final_V01.pdf).
- (60) Castro, L. S. de; Almeida, E. S. de. Desastres e Desempenho Econômico: Avaliação Do Impacto Do Rompimento Da Barragem de Mariana. *Geosul* **2019**, *34* (70), 406–429. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p406>.
- (61) Coimbra, K. T. O.; Alcântara, E.; de Souza Filho, C. R. An Assessment of Natural and Manmade Hazard Effects on the Underwater Light Field of the Doce River Continental Shelf. *Science of The Total Environment* **2019**, *685*, 1087–1096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.127>.
- (62) Fernandes, G. W.; Goulart, F. F.; Ranieri, B. D.; Coelho, M. S.; Dales, K.; Boesche, N.; Bustamante, M.; Carvalho, F. A.; Carvalho, D. C.; Dirzo, R.; Fernandes, S.; Galetti, P. M.; Millan, V. E. G.; Mielke, C.; Ramirez, J. L.; Neves, A.; Rogass, C.; Ribeiro, S. P.; Scariot, A.; Soares-Filho, B. Deep into the Mud: Ecological and Socio-Economic Impacts of the Dam Breach in Mariana, Brazil. *Natureza e Conservacao*. Elsevier B.V. July 1, 2016, pp 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.10.003>.
- (63) ANA. *Conjuntura Dos Recursos Hídricos No Brasil - Informe 2016*; Brasília, 2016.
- (64) Ferreira, G. W. D.; Ribeiro, B. T.; Weindorf, D. C.; Teixeira, B. I.; Chakraborty, S.; Li, B.; Guilherme, L. R. G.; Scolforo, J. R. S. Assessment of Iron-Rich Tailings via Portable X-Ray Fluorescence Spectrometry: The Mariana Dam Disaster, Southeast Brazil. *Environ Monit Assess* **2021**, *193* (4), 203. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08982-7>.

- (65) IGAM. *Encarte Especial: Qualidade Das Águas Do Rio Doce Após 4 Anos Do Rompimento Da Barragem de Fundão - 2015/2019* ; Belo Horizonte, 2020.
- (66) Thompson, F.; de Oliveira, B. C.; Cordeiro, M. C.; Masi, B. P.; Rangel, T. P.; Paz, P.; Freitas, T.; Lopes, G.; Silva, B. S.; S. Cabral, A.; Soares, M.; Lacerda, D.; dos Santos Vergilio, C.; Lopes-Ferreira, M.; Lima, C.; Thompson, C.; de Rezende, C. E. Severe Impacts of the Brumadinho Dam Failure (Minas Gerais, Brazil) on the Water Quality of the Paraopeba River. *Science of the Total Environment* **2020**, 705. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>.
- (67) Esteves, G. de F.; Bressanin, L. A.; de Souza, K. R. D.; da Silva, A. B.; Mantovani, J. R.; Marques, D. M.; Magalhães, P. C.; Pasqual, M.; de Souza, T. C. Do Tailings from the Mariana, MG (Brazil), Disaster Affect the Initial Development of Millet, Maize, and Sorghum? *Environmental Science and Pollution Research* **2020**, 27 (31), 38662–38673. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10013-w>.
- (68) Viana, L. M. S.; Pestana, I. A.; Carvalho, C. E. V; Salomão, M. S. M. B. Doce River Estuary: Geochemical Changes Following the Largest Tailing Spill in South America. *Arch Environ Contam Toxicol* **2020**, 79 (3), 343–353. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00766-3>.
- (69) Hatje, V.; Pedreira, R. M. A.; de Rezende, C. E.; Schettini, C. A. F.; de Souza, G. C.; Marin, D. C.; Hackspacher, P. C. The Environmental Impacts of One of the Largest Tailing Dam Failures Worldwide. *Sci Rep* **2017**, 7 (1), 10706. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>.
- (70) de Figueiredo Eufrazio Pauly, G.; Perina, F. C.; Yamamoto, F. Y.; Kim, B. S. M.; Trevizani, T. H.; Cruz, A. C. F.; Ribeiro, C. C.; Menezes, L.; Figueira, R. C. L.; de Souza Abessa, D. M. Five Years after the Collapse of the Fundão Dam: Lessons from Temporal Monitoring of Chemistry and Acute Toxicity. *Environ Monit Assess* **2024**, 196 (3), 247. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12405-8>.
- (71) Sartori, É.; dos Santos Vergilio, C.; Gatts, P. V.; de Oliveira, B. C. V.; de Almeida, M. G.; Thompson, F.; de Rezende, C. E. Trace Metal Concentration along the Brazilian Coast: An Assessment of the Influence of the Doce River Plume. *Mar Pollut Bull* **2023**, 188, 114640. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114640>.
- (72) Longhini, C. M.; Rodrigues, S. K.; Costa, E. S.; da Silva, C. A.; Cagnin, R. C.; Gripp, M.; Lehrback, B. D.; Mill, G. N.; de Oliveira, E. M. C.; Hermogenes, C. de C. M.; Rodrigues, D. G. F.; David, A. M.; Gramlich, K. C.; Bisi Júnior, R. da C.; Gomes, A. A. P.; da Silva Filho, J. P.; Almeida, J. F.; de Souza, K. F.; Luz Junior, W. A. R.; Poleze, L. M. B.; Barros, R. R.; Rigo, D.; Ghisolfi, R. D.; Neto, R. R.; Sá, F. Environmental Quality Assessment in a Marine Coastal Area Impacted by Mining Tailing Using a Geochemical Multi-Index and Physical Approach. *Science of The Total Environment* **2022**, 803, 149883. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149883>.

- (73) Vilar, C. C.; Andrades, R.; Szablak, F. T.; Guabiroba, H. C.; Pichler, H. A.; Bastos, K. V.; de Lima, L. R. S.; Bastos, P. G. P.; Martins, R. F.; Rodrigues, V. L. A.; Hostim-Silva, M.; Joyeux, J.-C. Variability in Nearshore Fish Biodiversity Indicators after a Mining Disaster in Eastern Brazil. *Mar Environ Res* **2022**, *175*, 105565. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2022.105565>.
- (74) da Silva, A. P. V.; Silva, A. O.; Lima, F. R. D. de; Benedet, L.; Franco, A. de J.; Souza, J. K. de; Ribeiro Júnior, A. C.; Batista, É. R.; Inda, A. V.; Curi, N.; Guilherme, L. R. G.; Carneiro, M. A. C. Potentially Toxic Elements in Iron Mine Tailings: Effects of Reducing Soil PH on Available Concentrations of Toxic Elements. *Environ Res* **2022**, *215*, 114321. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114321>.
- (75) Quadra, G. R.; Roland, F.; Barros, N.; Malm, O.; Lino, A. S.; Azevedo, G. M.; Thomaz, J. R.; Andrade-Vieira, L. F.; Praça-Fontes, M. M.; Almeida, R. M.; Mendonça, R. F.; Cardoso, S. J.; Guida, Y. S.; Campos, J. M. S. Far-Reaching Cytogenotoxic Effects of Mine Waste from the Fundão Dam Disaster in Brazil. *Chemosphere* **2019**, *215*, 753–757. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.104>.
- (76) Vergilio, C. S.; Lacerda, D.; da Silva Souza, T.; de Oliveira, B. C. V.; Fioresi, V. S.; de Souza, V. V.; da Rocha Rodrigues, G.; de Araujo Moreira Barbosa, M. K.; Sartori, E.; Rangel, T. P.; de Almeida, D. Q. R.; de Almeida, M. G.; Thompson, F.; de Rezende, C. E. Immediate and Long-Term Impacts of One of the Worst Mining Tailing Dam Failure Worldwide (Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil). *Science of the Total Environment* **2021**, *756*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143697>.
- (77) Aires, U. R. V.; Silva, D. D. da; Fernandes Filho, E. I.; Rodrigues, L. N.; Uliana, E. M.; Amorim, R. S. S.; Ribeiro, C. B. de M.; Campos, J. A. Modeling of Surface Sediment Concentration in the Doce River Basin Using Satellite Remote Sensing. *J Environ Manage* **2022**, *323*, 116207. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116207>.
- (78) Costa, P. G.; Marube, L. C.; Artifon, V.; Escarrone, A. L.; Hernandes, J. C.; Zebral, Y. D.; Bianchini, A. Temporal and Spatial Variations in Metals and Arsenic Contamination in Water, Sediment and Biota of Freshwater, Marine and Coastal Environments after the Fundão Dam Failure. *Science of The Total Environment* **2022**, *806*, 151340. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151340>.
- (79) Queiroz, H. M.; Ruiz, F.; Deng, Y.; de Souza Júnior, V. S.; Ferreira, A. D.; Otero, X. L.; de Lima Camêlo, D.; Bernardino, A. F.; Ferreira, T. O. Mine Tailings in a Redox-Active Environment: Iron Geochemistry and Potential Environmental Consequences. *Science of The Total Environment* **2022**, *807*, 151050. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151050>.
- (80) Abessa, D.; Burton, G. A.; Cervi, E. C.; Simpson, S. L.; Stubblefield, W.; Ribeiro, C. C.; Cruz, A. C. F.; Kruger, G.; Smith, R. Has the Rio Doce “Time Bomb” Been Defused? Using a Weight-of-Evidence Approach to Determine

- Sediment Quality. *Integr Environ Assess Manag* **2024**, *20* (1), 148–158.  
<https://doi.org/10.1002/ieam.4785>.
- (81) Coelho, D. G.; Marinato, C. S.; de Matos, L. P.; de Andrade, H. M.; da Silva, V. M.; Neves, P. H. S.; de Oliveira, J. A. Evaluation of Metals in Soil and Tissues of Economic-Interest Plants Grown in Sites Affected by the Fundão Dam Failure in Mariana, Brazil. *Integr Environ Assess Manag* **2020**, *16* (5), 596–607.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ieam.4253>.
- (82) Zebal, Y. D.; Costa, P. G.; de Souza, M. M.; Bianchini, A. Avian Blood and Feathers as Biological Tools to Track Impacts from Trace-Metals: Bioaccumulation Data from the Biggest Environmental Disaster in Brazilian History. *Science of The Total Environment* **2022**, *807*, 151077.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151077>.
- (83) Sartori Jeunon Gontijo, E.; Santos Costa Monteiro, A.; Tonello, P. S.; Roeser, H. M. P.; Friese, K.; Rosa, A. H. Analyses of Colloidal, Truly Dissolved, and DGT-Labile Metal Species and Phosphorus in Mining Area Surrounded by Tailing Dams Using Self-Organising Maps. *Chemosphere* **2022**, *303*, 135003.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135003>.
- (84) da Silva Souza, T.; da Silva Figueira Barone, L.; Lacerda, D.; dos Santos Vergilio, C.; de Oliveira, B. C. V.; de Almeida, M. G.; Thompson, F.; de Rezende, C. E. Cytogenotoxicity of the Water and Sediment of the Paraopeba River Immediately after the Iron Ore Mining Dam Disaster (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). *Science of the Total Environment* **2021**, *775*.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145193>.
- (85) Matos, A. R. de; Faria, M. C. S.; Freire, B. M.; Pereira, R. M.; Batista, B. L.; Rodrigues, J. L. Determination of 14 Trace Elements in Blood, Serum and Urine after Environmental Disaster in the Doce River Basin: Relationship between Mining Waste and Metal Concentration in the Population. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology* **2022**, *70*, 126920.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126920>.
- (86) Magris, R. A.; Marta-Almeida, M.; Monteiro, J. A. F.; Ban, N. C. A Modelling Approach to Assess the Impact of Land Mining on Marine Biodiversity: Assessment in Coastal Catchments Experiencing Catastrophic Events (SW Brazil). *Science of The Total Environment* **2019**, *659*, 828–840.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.238>.
- (87) CONAMA. *RESOLUÇÃO CONAMA N° 454, DE 1º DE NOVEMBRO DE 2012*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/[https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/legislacao/22.\\_CONAMA\\_454\\_2012.pdf](https://www.suape.pe.gov.br/images/publicacoes/legislacao/22._CONAMA_454_2012.pdf) (accessed 2023-04-18).
- (88) CETESB. *Avaliação da contaminação por metais pesados em água sedimentos e peixes*. <https://cetesb.sp.gov.br/residuossolidos/wp-content/uploads/2021/05/Avaliacao-da-contaminacao-por-metais-pesados-em-agua-sedimento-e-peixes-UGRHI-6.pdf> (accessed 2025-06-06).

- (89) CCME. *Canadian Council of Ministers of the Environment*. <https://ccme.ca/en> (accessed 2025-06-06).
- (90) RENOVA. *Monitoramento Rio Doce - PMQQS*. <https://monitoramentoriodoce.org/> (accessed 2024-04-28).
- (91) Costa, L. R. de C.; Fioravante, I. F. Evaluation the Efficiency of Individual Organic Coagulants and Associated with Aluminum Sulfate in the Removal of Colloidal Substances from Rio Doce, Minas Gerais, Brazil. *Cleaner Chemical Engineering* **2024**, *10*, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2024.100134>.
- (92) Ferreira, A. D.; Duckworth, O. W.; Queiroz, H. M.; Nóbrega, G. N.; Barcellos, D.; Bernardino, Â. F.; Otero, X. L.; Ferreira, T. O. Seasonal Drives on Potentially Toxic Elements Dynamics in a Tropical Estuary Impacted by Mine Tailings. *J Hazard Mater* **2024**, *474*, 134592. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134592>.
- (93) IGAM. *Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Rio Doce no Estado de Minas Gerais*. <http://www.igam.mg.gov.br/monitoramento-da-qualidade-das-aguas2/monitoramento-da-qualidade-das-aguas-superficiais-do-rio-doce-no-estado-de-minas-gerais#:~:text=O%20Instituto%20Mineiro%20de%20Gest%C3%A3o,desde%20o%20ano%20de%201997>. (accessed 2023-01-10).
- (94) IGAM. *Relatório Técnico de Acompanhamento Da Qualidade Das Águas Do Rio Doce Após o Rompimento Da Barragem Da Samarco No Distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG*; Belo Horizonte, 2015.
- (95) IGAM. *AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DE MINAS GERAIS EM 2021 - RESUMO EXECUTIVO ANUAL*; Belo Horizonte, 2022. <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4208>.
- (96) IGAM. *Encarte Especial: Qualidade Das Águas Do Rio Doce Após 5 Anos Do Rompimento Da Barragem de Fundão - 2015/2020*; Belo Horizonte, 2020.
- (97) Silva, D.; Bellato, C.; Marques Neto, J.; Fontes, M. TRACE ELEMENTS IN RIVER WATERS AND SEDIMENTS BEFORE AND AFTER A MINING DAM BREACH (BENTO RODRIGUES, BRAZIL). *Quim Nova* **2018**. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170252>.
- (98) Shi, J.; Zhao, D.; Ren, F.; Huang, L. Spatiotemporal Variation of Soil Heavy Metals in China: The Pollution Status and Risk Assessment. *Science of The Total Environment* **2023**, *871*, 161768. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161768>.
- (99) Santolin, C. V. A.; Ciminelli, V. S. T.; Nascentes, C. C.; Windmüller, C. C. Distribution and Environmental Impact Evaluation of Metals in Sediments from the Doce River Basin, Brazil. *Environ Earth Sci* **2015**, *74* (2), 1235–1248. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4115-2>.

- (100) Rodrigues, A. S. L.; Júnior H.A.N.; Costa, A. T.; Malafaia, G. Construção de Mapas Geoquímicos a Partir de Sedimentos Ativos de Margens Oriundos Do Rio Gualaxo Do Norte, MG, Brasil. *Multi-Science Jour* **2015**, *1* (1), 70–78.
- (101) Pereira, J. C.; Guimarães-Silva, A. K.; Nalini Júnior, H. A.; Pacheco-Silva, É.; Lena, J. C. de. Distribuição, Fracionamento e Mobilidade de Elementos Traço Em Sedimentos Superficiais. *Quim Nova* **2007**, *30* (5), 1249–1255.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500037>.
- (102) TUREKIAN, K. K.; WEDEPOHL, K. H. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. *GSA Bulletin* **1961**, *72* (2), 175–192.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[175:DOTEIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[175:DOTEIS]2.0.CO;2).
- (103) Baird, R.; Bridgewater, L. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd ed.; American Public Health Associatio: Washington, D.C., 2017; Vol. 1.
- (104) Thomas, R. *Practical Guide to ICP-MS*; Marcel Dekker, Inc.: New York, 2004.
- (105) INMETRO. *DOQ-CGCRE-008: ORIENTAÇÃO SOBRE VALIDAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS*. Revisão 08.  
[http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/Cgcre/DOQ/DOQ-Cgcre-8\\_05.pdf](http://www.inmetro.gov.br/Sidoq/Arquivos/Cgcre/DOQ/DOQ-Cgcre-8_05.pdf).
- (106) MAPBIOMAS. *MapBiomass General "Handbook" – Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD)*. [https://mapbiomas-brsite.s3.amazonaws.com/ATBD\\_Collection\\_5\\_v1.pdf](https://mapbiomas-brsite.s3.amazonaws.com/ATBD_Collection_5_v1.pdf) (accessed 2024-03-27).
- (107) MUELLER G. HEAVY METALS ALLUVIUM RIVERS UPPER RHINE VALLEY RHENISH SCHIEFERGEBIRGE RHINE WESTPHALIAN BASIN ENGINEERING GEOLOGY GEOLOGY EARTH SCIENCES GERMANY EUROPE. *UMSCHAU WISSENSCH* **1979**, *Vol. 79*, *nº 24*, 778–783.
- (108) Karaouzas, I.; Kapetanaki, N.; Mentzafou, A.; Kanellopoulos, T. D.; Skoulikidis, N. Heavy Metal Contamination Status in Greek Surface Waters: A Review with Application and Evaluation of Pollution Indices. *Chemosphere*. Elsevier Ltd January 1, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128192>.
- (109) Fleck, M. P. A.; Bourdel, M. C. Método de Simulação e Escolha de Fatores Na Análise Dos Principais Componentes. *Rev Saude Publica* **1998**, *32* (3), 267–272.  
<https://doi.org/10.1590/S0034-89101998000300010>.
- (110) Yamamoto, F. Y.; Pauly, G. F. E.; Nascimento, L. S.; Fernandes, G. M.; Santos, M. P.; Figueira, R. C. L.; Cavalcante, R. M.; Grassi, M. T.; Abessa, D. M. S. Explaining the Persistence of Hazardous Chemicals in the Doce River (Brazil) by Multiple Sources of Contamination and a Major Environmental Disaster. *Journal of Hazardous Materials Advances* **2023**, *9*, 100250.  
<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100250>.
- (111) Cordeiro, M. C.; Garcia, G. D.; Rocha, A. M.; Tschoeke, D. A.; Campeão, M. E.; Appolinario, L. R.; Soares, A. C.; Leomil, L.; Froes, A.; Bahiense, L.; Rezende, C. E.; de Almeida, M. G.; Rangel, T. P.; De Oliveira, B. C. V.; de Almeida, D. Q. R.; Thompson, M. C.; Thompson, C. C.; Thompson, F. L. Insights on the

- Freshwater Microbiomes Metabolic Changes Associated with the World's Largest Mining Disaster. *Science of The Total Environment* **2019**, *654*, 1209–1217. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.112>.
- (112) Longhini, C. M.; Rodrigues, S. K.; Costa, E. S.; da Silva, C. A.; Cagnin, R. C.; Gripp, M.; Lehrback, B. D.; Mill, G. N.; de Oliveira, E. M. C.; Hermogenes, C. de C. M.; Rodrigues, D. G. F.; David, A. M.; Gramlich, K. C.; Bisi Júnior, R. da C.; Gomes, A. A. P.; da Silva Filho, J. P.; Almeida, J. F.; de Souza, K. F.; Luz Junior, W. A. R.; Poleze, L. M. B.; Barros, R. R.; Rigo, D.; Ghisolfi, R. D.; Neto, R. R.; Sá, F. Environmental Quality Assessment in a Marine Coastal Area Impacted by Mining Tailing Using a Geochemical Multi-Index and Physical Approach. *Science of The Total Environment* **2022**, *803*, 149883. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149883>.
- (113) IGAM. *Gestão e Situação Das Águas de Minas Gerais: Ciclo 2019 - 2022*; Belo Horizonte, 2022. <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4209>.
- (114) Ferrarini, S. F.; Santos, H. S. dos; Miranda, L. G.; Azevedo, C. M. N.; Pires, M. J. R.; Maia, S. M. Classificação de Resíduos de Madeira Tratada Com Preservativos à Base de Arseniato de Cobre Cromatado e de Boro/Flúor. *Quim Nova* **2012**, *35* (9), 1767–1771. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422012000900012>.
- (115) Mendes, A. M. S.; Olszewski, N.; Silva, F. N.; Mendes, R. L.; Brito, L. T. L. Impactos Ambientais Causados Pelo Uso de Fertilizantes Agrícolas.
- (116) Murtaza, G.; Maan, M. A. A.; Alhodaib, A.; Iqbal, M. M.; Naz, T.; Zafar, M. I.; Fatima, H.; Parveen, R.; Naz, I. Biogeochemical Behavior of Lead and Nickel as Influenced by Phosphatic Fertilizer Applied to Rice (*Oryza Sativa* L.) Cultivars Grown under City Effluent Irrigation. *Water (Basel)* **2022**, *14* (9), 1319. <https://doi.org/10.3390/w14091319>.
- (117) Wierzbowska, J.; Sienkiewicz, S.; Krzebietke, S.; Bowszys, T. Heavy Metals in Water Percolating Through Soil Fertilized with Biodegradable Waste Materials. *Water Air Soil Pollut* **2016**, *227* (12), 456. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3147-x>.
- (118) Qian, Y.; Hu, P.; Lang-Yona, N.; Xu, M.; Guo, C.; Gu, J.-D. Global Landfill Leachate Characteristics: Occurrences and Abundances of Environmental Contaminants and the Microbiome. *J Hazard Mater* **2024**, *461*, 132446. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132446>.
- (119) Wang, J.; Qiao, Z. A Comprehensive Review of Landfill Leachate Treatment Technologies. *Front Environ Sci* **2024**, *12*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1439128>.
- (120) Gandhi, D.; Rudrashetti, A. P.; Rajasekaran, S. The Impact of Environmental and Occupational Exposures of Manganese on Pulmonary, Hepatic, and Renal

- Functions. *Journal of Applied Toxicology* **2022**, *42* (1), 103–129.  
<https://doi.org/10.1002/jat.4214>.
- (121) Magro, G.; Laterza, V.; Tosto, F.; Torrente, A. Manganese Neurotoxicity: A Comprehensive Review of Pathophysiology and Inherited and Acquired Disorders. *J Xenobiot* **2025**, *15* (2), 54. <https://doi.org/10.3390/jox15020054>.
- (122) Herman, P.; Fehér, M.; Molnár, Á.; Harangi, S.; Sajtos, Z.; Stündl, L.; Fábíán, I.; Baranyai, E. Iron and Manganese Retention of Juvenile Zebrafish (*Danio Rerio*) Exposed to Contaminated Dietary Zooplankton (*Daphnia Pulex*)—a Model Experiment. *Biol Trace Elem Res* **2021**, *199* (2), 732–743.  
<https://doi.org/10.1007/s12011-020-02190-z>.
- (123) Ibrahim, A. M.; Abdel-Haleem, A. A.-S.; Taha, R. G. Biomonitoring of Manganese Metal Pollution in Water and Its Impacts on Biological Activities of *Biomphalaria Alexandrina* Snail and Larvicidal Potencies. *Environmental Science and Pollution Research* **2023**, *30* (48), 105967–105976.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-29786-x>.
- (124) Jordão, C. P.; Pereira, M. de G.; Matos, A. T.; Pereira, J. L. Influence of Domestic and Industrial Waste Discharges on Water Quality at Minas Gerais State, Brazil. *J Braz Chem Soc* **2005**, *16* (2), 241–250.  
<https://doi.org/10.1590/S0103-50532005000200018>.
- (125) Khan, Z. I.; Muhammad, F. G.; Ahmad, K.; Akhtar, S.; Sohail, M.; Nadeem, M.; Mahpara, S.; Awan, M. U. F.; Alwahibi, M. S.; Elshikh, M. S.; Hussain, M. I. Effects of Diverse Irrigation with Wastewater in Soil and Plants: Assessing the Risk of Metal to the Animal Food Chain. *Environmental Science and Pollution Research* **2022**, *29* (18), 27140–27149. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17559-3>.
- (126) Khan, Z. I.; Safdar, H.; Ahmad, K.; Wajid, K.; Bashir, H.; Ugulu, I.; Dogan, Y. Health Risk Assessment through Determining Bioaccumulation of Iron in Forages Grown in Soil Irrigated with City Effluent. *Environmental Science and Pollution Research* **2019**, *26* (14), 14277–14286. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04721-1>.
- (127) Akhtar, S.; Luqman, M.; Farooq Awan, M. U.; Saba, I.; Khan, Z. I.; Ahmad, K.; Muneeb, A.; Nadeem, M.; Batool, A. I.; Shahzadi, M.; Memona, H.; Ahmad Shad, H.; Mustafa, G.; Zubair, R. M. Health Risk Implications of Iron in Wastewater Soil-Food Crops Grown in the Vicinity of Peri Urban Areas of the District Sargodha. *PLoS One* **2022**, *17* (11), e0275497.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275497>.
- (128) Vieira, L.; Paula, G.; Halmeman, M. C. R.; Froehmer, S. Geoacumulação de Metais Em Sedimentos de Ambientes Aquáticos Brasileiros, Uma Revisão e Comparação Entre Um Lago Do Norte Do Paraná e Demais Localidades. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia* **2017**, *8* (20).
- (129) Ren, S.; Song, C.; Ye, S.; Cheng, C.; Gao, P. The Spatiotemporal Variation in Heavy Metals in China's Farmland Soil over the Past 20 years: A Meta-Analysis.

- Science of The Total Environment* **2022**, 806, 150322.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150322>.
- (130) Li, Z.; Ma, Z.; van der Kuijp, T. J.; Yuan, Z.; Huang, L. A Review of Soil Heavy Metal Pollution from Mines in China: Pollution and Health Risk Assessment. *Science of The Total Environment* **2014**, 468–469, 843–853.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.08.090>.
- (131) Gabriel, F. Â.; Ferreira, A. D.; Queiroz, H. M.; Vasconcelos, A. L. S.; Ferreira, T. O.; Bernardino, A. F. Long-Term Contamination of the Rio Doce Estuary as a Result of Brazil's Largest Environmental Disaster. *Perspect Ecol Conserv* **2021**, 19 (4), 417–428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pecon.2021.09.001>.

## **Apêndice**

Tabela S1. Valores máximos permitidos de metais e metaloides para materiais dragados em águas doces<sup>87</sup>.

<b>SEDIMENTOS</b>		
<b>Parâmetros</b>	<b>Valor Máximo Permitido</b>	<b>Valor Máximo Permitido</b>
<b>Inorgânicos</b>	<b>(VPM) – Nível 1</b>	<b>(VPM) – Nível 2</b>
Arsênio (As)	5,9 mg/kg	17 mg/kg
Cádmio (Cd)	0,6 mg/kg	3,5 mg/kg
Chumbo (Pb)	35 mg/kg	91,3 mg/kg
Cobre (Cu)	35,7 mg/kg	197 mg/kg
Cromo (Cr)	37,3 mg/kg	90 mg/kg
Mercúrio (Hg)	0,17 mg/kg	0,486 mg/kg
Níquel (Ni)	18 mg/kg	35,9 mg/kg
Zinco (Zn)	123 mg/kg	315 mg/kg

**Nível 1**- limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota;

**Nível 2** - limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota.

Tabela S2. Valores máximos permitidos de metais e metaloides para águas doces de classe<sup>37</sup>.

<b>ÁGUAS DOCES DE CLASSE 2</b>	
<b>Parâmetros Inorgânicos</b>	<b>Valor Máximo Permitido (VMP)</b>
Alumínio dissolvido (Al)	0,1 mg L <sup>-1</sup>
Antimônio (Sb)	0,005 mg L <sup>-1</sup>
Arsênio total (As)	0,01 mg L <sup>-1</sup>
Bário total (Ba)	0,7 mg L <sup>-1</sup>
Berílio total (Be)	0,04 mg L <sup>-1</sup>
Boro total (B)	0,5 mg L <sup>-1</sup>
Cádmio total (Cd)	0,001 mg L <sup>-1</sup>
Chumbo total (Pb)	0,01 mg L <sup>-1</sup>
Cobalto total (Co)	0,05 mg L <sup>-1</sup>
Cobre dissolvido (Cu)	0,009 mg L <sup>-1</sup>
Cromo total (Cr)	0,05 mg L <sup>-1</sup>
Ferro dissolvido (Fe)	0,3 mg L <sup>-1</sup>
Lítio total (Li)	2,5 mg L <sup>-1</sup>
Manganês total (Mn)	0,1 mg L <sup>-1</sup>
Mercúrio total (Hg)	0,0002 mg L <sup>-1</sup>
Níquel total (Ni)	0,025 mg L <sup>-1</sup>
Prata total (Ag)	0,01 mg L <sup>-1</sup>
Selênio total (Se)	0,01 mg L <sup>-1</sup>
Urânio total (U)	0,02 mg L <sup>-1</sup>
Vanádio total (V)	0,1 mg L <sup>-1</sup>
Zinco total (Zn)	0,18 mg L <sup>-1</sup>

Tabela S3. Localização e descrição dos pontos de coleta.

Rio	Ponto	Descrição	Latitude	Longitude	Cidade prox.
Rio Doce	RD.1	Ponto no rio do Carmo a montante da formação do rio doce	20°16'38.86"S	42°54'57.17"O	Rio Doce
Rio Doce	RD.2	UHE Risoleta Neves	20°12'9.56"S	42°52'19.22"O	Rio Doce
Rio Doce	RD.3	Ponto a montante da foz do Rio Casca	19°59'13.31"S	42°39'14.73"O	São José Goiabal
Rio Doce	RD.4	Ponto na foz do Rio Matipó	19°53'17.00"S	42°33'13.29"O	São José Goiabal
Rio Doce	RD.5	PERD / a montante da foz do rio Sacramento	19°43'43.78"S	42°28'59.78"O	Pingo d'Água
Rio Doce	RD.6	Ponto a montante da foz do rio Piracicaba	19°29'41.70"S	42°30'59.83"O	Ipatinga
Rio Doce	RD.7	Ponto a montante da foz do rio Sto Antônio	19°14'17.99"S	42°19'16.64"O	Naque
Rio Doce	RD.8	UHE de Baguari	19° 2'56.65"S	42° 8'18.76"O	Rio Cartente (G. Valadares)
Rio Doce	RD.9	Ponto a montante da foz do Rio Suaçuí pequeno	18°57'27.54"S	42° 3'56.25"O	Baguari (G. Valadares)
Rio Doce	RD.10	Ponto na UNIVALE	18°50'42.03"S	41°54'14.91"O	Gov. Valadares
Rio Doce	RD.11	Ponto a montante da foz do rio Suaçuí Grande	18°51'54.88"S	41°46'23.97"O	Gov. Valadares

Rio Doce	RD.12	Ponto a montante da foz do rio Caratinga	19° 3'58.64"S	41°31'24.28"O	Barra do Cuieté (Cons. Pena)
Rio Doce	RD.13	Ponto a montante da cidade de Resplendor	19°18'4.58"S	41°15'24.52"O	Resplendor
Rio Doce	RD.14	UHE Aimorés	19°27'6.20"S	41° 5'44.56"O	Aimorés
Rio Doce	RD.15	Ponto a montante da foz do rio Manhuaçu	19°29'0.02"S	41° 5'7.16"O	Aimorés
Rio Sto Antônio	SA.16	Ponto próximo à MG-010, a montante do curso d'água	19° 4'27.07"S	43°26'42.83"O	Conceição do Mato Dentro
Rio Sto Antônio	SA.17	Ponto a montante do rio Preto do Itambé	19°15'5.27"S	43° 9'35.90"O	São Sebastião do Rio Preto
Rio Sto Antônio	SA.18	Ponto a montante do rio do Peixe	19°14'4.73"S	43° 6'46.49"O	Ferros
Rio Sto Antônio	SA.19	Ponto a montante do rio Guanhães	19° 9'7.92"S	42°44'55.93"O	Joanésia
Rio Sto Antônio	SA.20	UHE Porto Estrela	19° 6'2.41"S	42°39'42.73"O	Joanésia
Rio Sto Antônio	SA.21	Ponto próximo a foz do rio Santo Antônio	19°13'52.34"S	42°19'41.89"O	Naque

**FONTE:** Autor.

Tabela S4. Faixas de aceitação da recuperação e desvio padrão relativo em função da porcentagem do analito (adaptada)<sup>105</sup>.

<b>Analito (%)</b>	<b>Razão do analito</b>	<b>Unidade</b>	<b>Recuperação (%)</b>	<b>DPR (%)</b>
100	1	100%	98 – 102	1,3
10	10 <sup>-1</sup>	10%	98 – 102	1,9
1	10 <sup>-2</sup>	1%	97 – 103	2,7
0,1	10 <sup>-3</sup>	0,1%	95 – 105	3,7
0,01	10 <sup>-4</sup>	100 ppm	90 – 107	5,3
0,001	10 <sup>-5</sup>	10 ppm	80 – 110	7,3
0,0001	10 <sup>-6</sup>	1 ppm	80 – 110	11
0,00001	10 <sup>-7</sup>	100 ppb	80 – 110	15
0,000001	10 <sup>-8</sup>	10 ppb	60 – 115	21
0,0000001	10 <sup>-9</sup>	1 ppb	40 – 120	30

Tabela S5. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe e Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna.

Amostra	Coleta	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg
RD.1	1ª	<LQ	50,37 $\pm$ 5,34	4,74 $\pm$ 0,78	<LQ	43,26 $\pm$ 4,26	<LQ	<LQ	0,68 $\pm$ 0,06	3,21 $\pm$ 0,15	1,24 $\pm$ 0,05	289,50 $\pm$ 37,26	<LQ
	2ª	<LQ	<LQ	2,09 $\pm$ 0,60	<LQ	21,33 $\pm$ 1,06	<LQ	<LQ	0,25 $\pm$ 0,07	<LQ	0,81 $\pm$ 0,08	139,21 $\pm$ 0,65	<LQ
	3ª	0,18 $\pm$ 0,06	<LQ	7,23 $\pm$ 0,67	<LQ	38,29 $\pm$ 2,73	<LQ	<LQ	1,60 $\pm$ 0,21	8,45 $\pm$ 1,63	<LQ	186,31 $\pm$ 40,52	<LQ
	4ª	0,75 $\pm$ 0,21	63,17 $\pm$ 14,41	35,22 $\pm$ 4,57	<LQ	93,03 $\pm$ 5,50	0,41 $\pm$ 0,11	<LQ	8,40 $\pm$ 1,22	65,58 $\pm$ 5,74	5,09 $\pm$ 0,39	244,61 $\pm$ 37,56	<LQ
	5ª	<LQ	<LQ	4,52 $\pm$ 0,41	<LQ	32,84 $\pm$ 0,72	<LQ	<LQ	1,13 $\pm$ 0,07	3,56 $\pm$ 1,06	<LQ	286,76 $\pm$ 28,24	<LQ
	6ª	0,32 $\pm$ 0,09	37,80 $\pm$ 9,91	2,20 $\pm$ 0,42	<LQ	21,80 $\pm$ 0,93	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	8,20 $\pm$ 1,89	145,73 $\pm$ 7,37	<LQ
	7ª	<LQ	<LQ	4,24 $\pm$ 0,61	<LQ	19,30 $\pm$ 2,01	<LQ	<LQ	0,23 $\pm$ 0,07	<LQ	<LQ	230,77 $\pm$ 1,73	<LQ
	8ª	<LQ	<LQ	11,98 $\pm$ 2,32	<LQ	47,49 $\pm$ 3,40	<LQ	<LQ	1,83 $\pm$ 0,27	19,49 $\pm$ 0,86	<LQ	322,74 $\pm$ 21,57	<LQ
	9ª	<LQ	119,62 $\pm$ 8,37	1,51 $\pm$ 0,08	<LQ	16,74 $\pm$ 0,91	<LQ	<LQ	<LQ	1,58 $\pm$ 0,21	<LQ	226,12 $\pm$ 13,86	<LQ
RD.2	1ª	<LQ	<LQ	0,86 $\pm$ 0,14	<LQ	38,88 $\pm$ 0,57	<LQ	<LQ	0,41 $\pm$ 0,12	<LQ	1,05 $\pm$ 0,11	622,04 $\pm$ 117,29	<LQ
	2ª	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3ª	<LQ	51,47 $\pm$ 10,12	2,76 $\pm$ 0,27	<LQ	38,96 $\pm$ 1,50	<LQ	<LQ	1,46 $\pm$ 0,15	15,50 $\pm$ 0,44	0,61 $\pm$ 0,04	279,62 $\pm$ 4,11	<LQ
	4ª	0,57 $\pm$ 0,14	<LQ	4,70 $\pm$ 0,54	<LQ	36,97 $\pm$ 0,77	<LQ	<LQ	3,21 $\pm$ 0,34	12,22 $\pm$ 0,56	2,53 $\pm$ 0,57	104,94 $\pm$ 9,47	<LQ
	5ª	<LQ	71,37 $\pm$ 8,83	0,66 $\pm$ 0,08	<LQ	20,04 $\pm$ 2,62	<LQ	<LQ	0,24 $\pm$ 0,02	1,41 $\pm$ 0,27	<LQ	370,59 $\pm$ 43,85	<LQ
	6ª	0,69 $\pm$ 0,01	<LQ	0,84 $\pm$ 0,15	<LQ	17,74 $\pm$ 1,23	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	172,65 $\pm$ 6,13	<LQ
	7ª	<LQ	46,22 $\pm$ 3,79	1,25 $\pm$ 0,31	<LQ	17,64 $\pm$ 0,62	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	320,25 $\pm$ 23,28	<LQ
	8ª	<LQ	<LQ	1,97 $\pm$ 0,19	<LQ	27,03 $\pm$ 1,90	<LQ	<LQ	<LQ	9,72 $\pm$ 1,03	<LQ	132,06 $\pm$ 4,30	<LQ
	9ª	<LQ	87,07 $\pm$ 5,22	<LQ	<LQ	16,58 $\pm$ 2,02	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	366,03 $\pm$ 6,84	<LQ
RD.3	1ª	<LQ	33,78 $\pm$ 8,73	1,83 $\pm$ 0,39	<LQ	43,52 $\pm$ 2,02	<LQ	<LQ	1,10 $\pm$ 0,14	4,41 $\pm$ 0,39	1,13 $\pm$ 0,40	414,18 $\pm$ 69,70	<LQ
	2ª	<LQ	33,19 $\pm$ 10,34	2,33 $\pm$ 0,42	<LQ	22,75 $\pm$ 1,37	<LQ	<LQ	0,67 $\pm$ 0,15	1,35 $\pm$ 1,2	1,15 $\pm$ 0,33	215,93 $\pm$ 8,65	<LQ
	3ª	<LQ	42,37 $\pm$ 13,25	16,66 $\pm$ 2,73	<LQ	131,35 $\pm$ 5,53	0,65 $\pm$ 0,14	<LQ	8,47 $\pm$ 0,80	64,06 $\pm$ 6,15	1,78 $\pm$ 0,36	158,28 $\pm$ 11,99	<LQ
	4ª	0,55 $\pm$ 0,10	<LQ	5,45 $\pm$ 0,63	<LQ	39,67 $\pm$ 0,69	<LQ	<LQ	2,97 $\pm$ 1,04	12,89 $\pm$ 1,50	1,52 $\pm$ 0,18	367,50 $\pm$ 22,97	<LQ
	5ª	<LQ	74,78 $\pm$ 13,51	1,99 $\pm$ 0,33	<LQ	27,16 $\pm$ 1,16	<LQ	<LQ	1,05 $\pm$ 0,22	4,28 $\pm$ 0,63	<LQ	350,90 $\pm$ 27,24	<LQ
	6ª	0,37 $\pm$ 0,12	<LQ	1,28 $\pm$ 0,34	<LQ	19,84 $\pm$ 1,11	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	168,66 $\pm$ 16,43	<LQ
	7ª	<LQ	50,57 $\pm$ 5,14	0,83 $\pm$ 0,29	<LQ	21,57 $\pm$ 0,51	<LQ	<LQ	0,92 $\pm$ 0,07	<LQ	<LQ	258,94 $\pm$ 3,60	<LQ
	8ª	<LQ	<LQ	4,00 $\pm$ 0,62	<LQ	36,61 $\pm$ 1,45	<LQ	<LQ	0,85 $\pm$ 0,16	14,99 $\pm$ 1,73	<LQ	155,20 $\pm$ 13,63	<LQ
	9ª	<LQ	<LQ	2,24 $\pm$ 0,21	<LQ	19,16 $\pm$ 1,02	<LQ	<LQ	0,33 $\pm$ 0,05	2,09 $\pm$ 0,18	<LQ	326,81 $\pm$ 11,77	<LQ

Tabela S5. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe e Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão, n = 3) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg
RD.4	1 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	1,65 $\pm$ 0,48	<LQ	50,09 $\pm$ 2,36	<LQ	<LQ	1,41 $\pm$ 0,22	5,01 $\pm$ 0,96	2,54 $\pm$ 0,31	478,27 $\pm$ 0,24	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	2,51 $\pm$ 0,27	<LQ	24,95 $\pm$ 1,75	<LQ	<LQ	0,73 $\pm$ 0,08	1,60 $\pm$ 0,80	<LQ	199,73 $\pm$ 16,56	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	37,42 $\pm$ 5,52	6,49 $\pm$ 1,11	<LQ	71,32 $\pm$ 2,87	0,25 $\pm$ 0,11	<LQ	4,16 $\pm$ 0,39	40,82 $\pm$ 3,01	0,81 $\pm$ 0,21	132,95 $\pm$ 6,68	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,43 $\pm$ 0,12	<LQ	4,98 $\pm$ 0,78	<LQ	54,69 $\pm$ 0,87	<LQ	<LQ	3,82 $\pm$ 0,11	17,14 $\pm$ 1,59	2,95 $\pm$ 1,30	382,84 $\pm$ 5,39	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	65,61 $\pm$ 20,87	1,46 $\pm$ 0,31	<LQ	31,95 $\pm$ 1,56	<LQ	<LQ	1,45 $\pm$ 0,04	4,43 $\pm$ 0,37	4,76 $\pm$ 0,83	458,14 $\pm$ 11,07	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	0,87 $\pm$ 0,13	<LQ	21,65 $\pm$ 1,13	<LQ	<LQ	0,23 $\pm$ 0,05	<LQ	<LQ	190,21 $\pm$ 9,62	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	1,27 $\pm$ 0,25	<LQ	23,79 $\pm$ 0,77	<LQ	<LQ	1,02 $\pm$ 0,14	<LQ	<LQ	276,43 $\pm$ 7,91	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	4,13 $\pm$ 0,54	<LQ	43,93 $\pm$ 1,95	<LQ	<LQ	1,28 $\pm$ 0,20	15,91 $\pm$ 1,09	<LQ	238,73 $\pm$ 26,21	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	44,57 $\pm$ 13,01	1,17 $\pm$ 0,12	<LQ	21,63 $\pm$ 1,28	<LQ	<LQ	0,80 $\pm$ 0,04	2,79 $\pm$ 0,40	<LQ	336,38 $\pm$ 4,71	<LQ
RD.5	1 <sup>a</sup>	<LQ	32,94 $\pm$ 9,44	2,08 $\pm$ 0,11	<LQ	51,83 $\pm$ 2,85	<LQ	<LQ	1,12 $\pm$ 0,10	3,39 $\pm$ 0,14	0,76 $\pm$ 0,19	463,66 $\pm$ 10,52	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	2,84 $\pm$ 0,50	<LQ	27,70 $\pm$ 3,60	<LQ	<LQ	0,78 $\pm$ 0,15	1,83 $\pm$ 1,48	1,27 $\pm$ 0,13	165,55 $\pm$ 26,20	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	36,05 $\pm$ 3,68	1,92 $\pm$ 0,73	<LQ	31,79 $\pm$ 9,16	<LQ	<LQ	1,80 $\pm$ 0,77	3,38 $\pm$ 1,84	1,50 $\pm$ 0,46	292,04 $\pm$ 9,61	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,56 $\pm$ 0,07	<LQ	5,54 $\pm$ 1,11	<LQ	70,01 $\pm$ 7,24	<LQ	<LQ	5,47 $\pm$ 0,88	21,35 $\pm$ 3,66	5,24 $\pm$ 0,55	316,92 $\pm$ 10,29	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	42,51 $\pm$ 5,34	2,29 $\pm$ 0,39	<LQ	32,76 $\pm$ 2,98	<LQ	<LQ	1,56 $\pm$ 0,33	2,76 $\pm$ 0,25	<LQ	312,62 $\pm$ 32,84	<LQ
	6 <sup>a</sup>	0,73 $\pm$ 0,17	<LQ	0,68 $\pm$ 0,11	<LQ	21,91 $\pm$ 1,78	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	188,15 $\pm$ 10,00	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	93,31 $\pm$ 15,09	0,46 $\pm$ 0,18	<LQ	23,40 $\pm$ 1,02	<LQ	<LQ	0,70 $\pm$ 0,12	<LQ	<LQ	288,10 $\pm$ 18,95	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	3,50 $\pm$ 0,49	<LQ	50,31 $\pm$ 3,87	<LQ	<LQ	1,31 $\pm$ 0,15	18,35 $\pm$ 0,73	<LQ	340,86 $\pm$ 15,00	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	40,57 $\pm$ 13,01	0,93 $\pm$ 0,11	<LQ	24,04 $\pm$ 0,57	<LQ	<LQ	0,41 $\pm$ 0,10	3,72 $\pm$ 0,29	<LQ	197,05 $\pm$ 2,64	<LQ
RD.6	1 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	1,83 $\pm$ 0,26	<LQ	58,62 $\pm$ 2,47	<LQ	<LQ	1,35 $\pm$ 0,13	4,76 $\pm$ 0,82	1,19 $\pm$ 0,01	487,48 $\pm$ 26,50	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	24,95 $\pm$ 1,90	<LQ	<LQ	0,72 $\pm$ 0,15	1,40 $\pm$ 1,06	2,73 $\pm$ 0,31	209,00 $\pm$ 16,43	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	67,92 $\pm$ 8,40	2,11 $\pm$ 0,49	<LQ	39,76 $\pm$ 1,76	<LQ	<LQ	0,95 $\pm$ 0,08	3,54 $\pm$ 0,72	0,97 $\pm$ 0,18	228,02 $\pm$ 20,98	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,61 $\pm$ 0,07	<LQ	6,66 $\pm$ 1,54	<LQ	75,44 $\pm$ 3,32	<LQ	<LQ	5,77 $\pm$ 0,70	23,53 $\pm$ 3,45	4,24 $\pm$ 0,96	342,04 $\pm$ 21,34	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	69,33 $\pm$ 8,53	1,34 $\pm$ 0,43	<LQ	36,70 $\pm$ 1,72	<LQ	<LQ	1,91 $\pm$ 0,27	5,70 $\pm$ 1,42	4,35 $\pm$ 0,47	152,47 $\pm$ 17,22	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	0,54 $\pm$ 0,07	<LQ	21,74 $\pm$ 0,73	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	166,51 $\pm$ 6,68	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	60,37 $\pm$ 6,60	0,80 $\pm$ 0,21	<LQ	25,09 $\pm$ 0,53	<LQ	<LQ	0,61 $\pm$ 0,09	<LQ	<LQ	248,52 $\pm$ 8,87	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	4,77 $\pm$ 0,55	<LQ	70,78 $\pm$ 2,09	0,25 $\pm$ 0,02	<LQ	3,19 $\pm$ 0,25	25,98 $\pm$ 1,41	<LQ	316,25 $\pm$ 14,30	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	33,12 $\pm$ 2,50	1,55 $\pm$ 0,23	<LQ	27,09 $\pm$ 1,56	<LQ	<LQ	0,57 $\pm$ 0,06	3,96 $\pm$ 0,48	<LQ	181,46 $\pm$ 8,65	<LQ

Tabela S5. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe e Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg
RD.7	1 <sup>a</sup>	<LQ	34,56 $\pm$ 9,76	0,38 $\pm$ 0,11	<LQ	60,35 $\pm$ 2,88	<LQ	<LQ	1,38 $\pm$ 0,26	7,64 $\pm$ 0,51	1,53 $\pm$ 0,16	433,40 $\pm$ 12,17	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	25,68 $\pm$ 1,27	<LQ	<LQ	0,77 $\pm$ 0,11	3,42 $\pm$ 1,30	1,20 $\pm$ 0,11	154,96 $\pm$ 3,49	<LQ
	3 <sup>a</sup>	0,16 $\pm$ 0,06	58,46 $\pm$ 16,78	1,02 $\pm$ 0,38	<LQ	32,23 $\pm$ 6,63	<LQ	<LQ	0,59 $\pm$ 0,20	1,74 $\pm$ 0,62	<LQ	292,83 $\pm$ 50,42	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,62 $\pm$ 0,17	<LQ	4,58 $\pm$ 0,36	<LQ	75,08 $\pm$ 4,87	<LQ	<LQ	4,66 $\pm$ 0,89	21,36 $\pm$ 3,03	2,11 $\pm$ 0,39	2028,83 $\pm$ 12,28	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	84,17 $\pm$ 5,61	0,45 $\pm$ 0,12	<LQ	27,57 $\pm$ 1,91	<LQ	<LQ	0,88 $\pm$ 0,18	2,19 $\pm$ 0,21	3,22 $\pm$ 1,17	105,81 $\pm$ 18,92	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	0,39 $\pm$ 0,13	<LQ	23,11 $\pm$ 1,50	<LQ	<LQ	0,39 $\pm$ 0,05	<LQ	<LQ	160,34 $\pm$ 7,70	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	0,40 $\pm$ 0,01	<LQ	21,78 $\pm$ 2,24	<LQ	<LQ	0,41 $\pm$ 0,10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	4,17 $\pm$ 0,27	<LQ	73,90 $\pm$ 5,15	0,37 $\pm$ 0,05	<LQ	3,82 $\pm$ 0,25	34,83 $\pm$ 2,24	<LQ	149,89 $\pm$ 12,06	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	31,99 $\pm$ 5,02	1,42 $\pm$ 0,27	<LQ	26,71 $\pm$ 1,41	<LQ	<LQ	0,45 $\pm$ 0,06	4,80 $\pm$ 0,43	<LQ	281,19 $\pm$ 9,76	<LQ
RD.8	1 <sup>a</sup>	<LQ	31,47 $\pm$ 2,52	0,60 $\pm$ 0,48	<LQ	50,58 $\pm$ 0,91	<LQ	<LQ	0,61 $\pm$ 0,14	2,69 $\pm$ 0,46	1,06 $\pm$ 0,21	393,32 $\pm$ 11,96	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	21,46 $\pm$ 1,45	<LQ	<LQ	0,32 $\pm$ 0,03	<LQ	<LQ	59,55 $\pm$ 8,63	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	84,38 $\pm$ 11,12	0,50 $\pm$ 0,23	<LQ	32,23 $\pm$ 1,79	<LQ	<LQ	0,20 $\pm$ 0,08	1,17 $\pm$ 0,32	<LQ	303,62 $\pm$ 14,13	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,86 $\pm$ 0,24	<LQ	1,83 $\pm$ 0,27	<LQ	48,44 $\pm$ 3,42	<LQ	<LQ	2,25 $\pm$ 0,31	11,32 $\pm$ 2,64	0,74 $\pm$ 0,27	182,88 $\pm$ 11,80	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	72,32 $\pm$ 4,27	0,96 $\pm$ 0,37	<LQ	20,66 $\pm$ 1,09	<LQ	<LQ	0,25 $\pm$ 0,04	1,23 $\pm$ 0,20	4,69 $\pm$ 0,55	327,66 $\pm$ 60,83	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	0,55 $\pm$ 0,10	<LQ	19,25 $\pm$ 4,29	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	101,05 $\pm$ 2,65	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	20,85 $\pm$ 0,48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	71,47 $\pm$ 8,49	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	3,79 $\pm$ 0,40	<LQ	73,24 $\pm$ 6,06	0,42 $\pm$ 0,10	<LQ	2,85 $\pm$ 0,37	23,09 $\pm$ 4,54	<LQ	117,72 $\pm$ 19,64	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	65,15 $\pm$ 11,57	<LQ	<LQ	20,45 $\pm$ 0,71	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	376,86 $\pm$ 12,36	<LQ
RD.9	1 <sup>a</sup>	<LQ	53,21 $\pm$ 6,86	1,02 $\pm$ 0,09	<LQ	50,06 $\pm$ 0,91	<LQ	<LQ	0,41 $\pm$ 0,06	1,78 $\pm$ 0,28	1,12 $\pm$ 0,32	417,77 $\pm$ 4,61	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	19,99 $\pm$ 0,60	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	111,11 $\pm$ 13,57	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	53,10 $\pm$ 5,88	0,52 $\pm$ 0,19	<LQ	31,93 $\pm$ 0,89	<LQ	<LQ	<LQ	1,55 $\pm$ 0,40	1,17 $\pm$ 0,30	773,78 $\pm$ 5,03	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,44 $\pm$ 0,22	<LQ	2,20 $\pm$ 0,19	<LQ	59,80 $\pm$ 3,50	<LQ	<LQ	3,97 $\pm$ 0,16	12,83 $\pm$ 2,38	1,12 $\pm$ 0,22	289,79 $\pm$ 35,35	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	60,43 $\pm$ 3,16	0,46 $\pm$ 0,15	<LQ	20,91 $\pm$ 1,14	<LQ	<LQ	0,37 $\pm$ 0,08	1,76 $\pm$ 0,28	<LQ	238,22 $\pm$ 34,03	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	16,07 $\pm$ 1,93	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	138,34 $\pm$ 3,47	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	40,89 $\pm$ 10,54	0,90 $\pm$ 0,32	<LQ	21,79 $\pm$ 1,60	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	92,93 $\pm$ 3,97	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	4,27 $\pm$ 0,44	<LQ	89,57 $\pm$ 3,07	0,61 $\pm$ 0,06	<LQ	4,47 $\pm$ 0,32	38,50 $\pm$ 3,83	<LQ	129,14 $\pm$ 20,66	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	56,15 $\pm$ 7,53	0,47 $\pm$ 0,06	<LQ	22,33 $\pm$ 3,23	<LQ	<LQ	<LQ	1,43 $\pm$ 0,12	<LQ	334,53 $\pm$ 10,92	<LQ

Tabela S5. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe e Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg
RD.10	1 <sup>a</sup>	<LQ	68,72 $\pm$ 4,14	<LQ	<LQ	46,99 $\pm$ 1,23	<LQ	0,19 $\pm$ 0,02	0,51 $\pm$ 0,06	1,88 $\pm$ 0,27	1,32 $\pm$ 0,09	471,56 $\pm$ 11,73	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	20,64 $\pm$ 0,94	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	126,13 $\pm$ 13,90	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	98,33 $\pm$ 18,30	0,64 $\pm$ 0,09	<LQ	34,69 $\pm$ 0,33	<LQ	<LQ	0,35 $\pm$ 0,09	2,15 $\pm$ 0,17	<LQ	363,06 $\pm$ 11,55	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,40 $\pm$ 0,11	<LQ	1,63 $\pm$ 0,29	<LQ	33,17 $\pm$ 4,04	<LQ	<LQ	1,10 $\pm$ 0,33	4,10 $\pm$ 1,54	2,18 $\pm$ 0,52	435,56 $\pm$ 21,91	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	49,06 $\pm$ 3,74	0,43 $\pm$ 0,05	<LQ	21,54 $\pm$ 1,84	<LQ	<LQ	0,41 $\pm$ 0,08	2,74 $\pm$ 0,15	<LQ	243,92 $\pm$ 18,32	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	16,10 $\pm$ 0,90	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	153,12 $\pm$ 8,46	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	0,55 $\pm$ 0,13	<LQ	19,88 $\pm$ 0,73	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	128,70 $\pm$ 16,85	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	4,57 $\pm$ 0,56	<LQ	102,52 $\pm$ 6,55	0,77 $\pm$ 0,13	<LQ	6,75 $\pm$ 0,32	55,72 $\pm$ 2,47	<LQ	98,00 $\pm$ 6,70	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	115,80 $\pm$ 5,72	<LQ	<LQ	21,66 $\pm$ 1,31	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	252,23 $\pm$ 5,15	<LQ
RD.11	1 <sup>a</sup>	<LQ	50,64 $\pm$ 7,87	<LQ	<LQ	48,10 $\pm$ 9,18	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,84 $\pm$ 0,07	410,86 $\pm$ 9,80	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	2,84 $\pm$ 0,30	<LQ	20,68 $\pm$ 0,98	<LQ	<LQ	0,19 $\pm$ 0,02	<LQ	0,60 $\pm$ 0,19	143,37 $\pm$ 7,59	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	95,15 $\pm$ 10,59	0,79 $\pm$ 0,17	<LQ	35,86 $\pm$ 1,84	<LQ	<LQ	0,27 $\pm$ 0,08	1,92 $\pm$ 0,36	<LQ	361,16 $\pm$ 7,20	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,46 $\pm$ 0,14	<LQ	2,29 $\pm$ 0,45	<LQ	68,46 $\pm$ 7,25	0,32 $\pm$ 0,02	<LQ	3,38 $\pm$ 0,60	14,82 $\pm$ 2,32	1,09 $\pm$ 0,24	80,22 $\pm$ 11,73	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	51,14 $\pm$ 5,33	1,02 $\pm$ 0,02	<LQ	25,94 $\pm$ 2,42	<LQ	<LQ	0,47 $\pm$ 0,14	2,69 $\pm$ 0,57	<LQ	291,78 $\pm$ 23,69	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	32,66 $\pm$ 1,29	<LQ	<LQ	16,21 $\pm$ 2,55	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	126,22 $\pm$ 5,87	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	49,93 $\pm$ 11,51	<LQ	<LQ	19,58 $\pm$ 0,61	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	107,69 $\pm$ 4,28	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	6,04 $\pm$ 0,28	<LQ	110,54 $\pm$ 3,11	0,68 $\pm$ 0,08	<LQ	4,47 $\pm$ 0,32	54,17 $\pm$ 1,80	<LQ	106,94 $\pm$ 7,20	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	59,28 $\pm$ 5,02	<LQ	<LQ	20,80 $\pm$ 0,52	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	333,29 $\pm$ 1,00	<LQ
RD.12	1 <sup>a</sup>	<LQ	91,64 $\pm$ 28,89	<LQ	<LQ	57,10 $\pm$ 3,75	<LQ	<LQ	0,90 $\pm$ 0,21	3,59 $\pm$ 0,09	1,11 $\pm$ 0,13	395,90 $\pm$ 39,38	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	2,54 $\pm$ 0,10	<LQ	20,92 $\pm$ 0,54	<LQ	<LQ	0,21 $\pm$ 0,06	<LQ	0,75 $\pm$ 0,14	120,74 $\pm$ 3,17	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	0,56 $\pm$ 0,16	<LQ	38,74 $\pm$ 1,03	<LQ	<LQ	0,30 $\pm$ 0,09	2,13 $\pm$ 0,64	<LQ	99,65 $\pm$ 4,89	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,48 $\pm$ 0,09	<LQ	1,55 $\pm$ 0,29	<LQ	47,05 $\pm$ 2,67	<LQ	<LQ	1,61 $\pm$ 0,15	8,37 $\pm$ 1,91	1,09 $\pm$ 0,28	258,79 $\pm$ 27,00	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	55,63 $\pm$ 9,36	0,92 $\pm$ 0,29	<LQ	30,62 $\pm$ 3,38	<LQ	<LQ	0,49 $\pm$ 0,08	2,79 $\pm$ 0,34	<LQ	242,79 $\pm$ 6,93	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	15,93 $\pm$ 1,13	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	147,01 $\pm$ 8,01	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	0,51 $\pm$ 0,14	<LQ	19,98 $\pm$ 0,41	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	79,33 $\pm$ 9,81	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	4,73 $\pm$ 0,83	<LQ	221,60 $\pm$ 7,56	1,48 $\pm$ 0,31	<LQ	10,55 $\pm$ 1,68	77,25 $\pm$ 5,23	<LQ	182,71 $\pm$ 19,23	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	135,04 $\pm$ 2,79	<LQ	<LQ	23,98 $\pm$ 2,20	<LQ	<LQ	<LQ	1,69 $\pm$ 0,33	<LQ	625,78 $\pm$ 9,46	<LQ

Tabela S5. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe e Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg
RD.13	1 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	$1,28 \pm 0,13$	<LQ	$56,29 \pm 5,08$	<LQ	<LQ	$0,72 \pm 0,07$	$4,02 \pm 0,68$	$1,33 \pm 0,44$	$265,10 \pm 21,09$	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	$2,55 \pm 0,19$	<LQ	$22,78 \pm 0,63$	<LQ	<LQ	$0,18 \pm 0,02$	<LQ	<LQ	$72,93 \pm 13,19$	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	$63,19 \pm 12,21$	$0,94 \pm 0,24$	<LQ	$41,48 \pm 1,60$	<LQ	<LQ	$0,39 \pm 0,06$	$3,62 \pm 0,51$	<LQ	$208,80 \pm 3,22$	<LQ
	4 <sup>a</sup>	$0,45 \pm 0,07$	<LQ	$2,39 \pm 0,49$	<LQ	$59,04 \pm 5,56$	<LQ	<LQ	$3,26 \pm 0,13$	$9,54 \pm 2,02$	$1,10 \pm 0,28$	$276,44 \pm 6,26$	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	$46,44 \pm 7,77$	$0,48 \pm 0,10$	<LQ	$33,50 \pm 3,86$	<LQ	<LQ	$0,68 \pm 0,19$	$3,68 \pm 1,23$	<LQ	$168,21 \pm 11,76$	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$14,29 \pm 1,10$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$105,66 \pm 3,72$	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	$31,60 \pm 5,78$	<LQ	<LQ	$21,59 \pm 1,47$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$49,63 \pm 12,21$	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	$4,88 \pm 0,66$	<LQ	$299,79 \pm 5,64$	$1,60 \pm 0,21$	<LQ	$10,27 \pm 1,66$	$80,28 \pm 5,37$	<LQ	$151,80 \pm 3,93$	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	$75,55 \pm 6,30$	<LQ	<LQ	$27,91 \pm 0,71$	<LQ	<LQ	<LQ	$2,75 \pm 0,27$	<LQ	$338,55 \pm 7,48$	<LQ
RD.14	1 <sup>a</sup>	<LQ	$58,62 \pm 8,94$	$0,66 \pm 0,18$	<LQ	$54,84 \pm 2,30$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$1,96 \pm 0,65$	$363,19 \pm 30,52$	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$22,99 \pm 1,83$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$65,53 \pm 8,27$	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	$64,37 \pm 8,39$	$0,70 \pm 0,24$	<LQ	$40,60 \pm 3,63$	<LQ	<LQ	<LQ	$1,44 \pm 0,19$	$0,89 \pm 0,20$	$209,37 \pm 6,36$	<LQ
	4 <sup>a</sup>	$0,38 \pm 0,10$	<LQ	$1,49 \pm 0,31$	<LQ	$38,50 \pm 2,32$	<LQ	<LQ	$0,81 \pm 0,03$	$6,64 \pm 1,05$	$1,81 \pm 0,20$	$306,34 \pm 9,95$	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$28,14 \pm 1,67$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$131,09 \pm 5,67$	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$15,60 \pm 1,26$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$73,33 \pm 4,70$	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	$76,05 \pm 8,49$	$0,78 \pm 0,25$	<LQ	$22,01 \pm 0,68$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$71,18 \pm 3,93$	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	$0,99 \pm 0,29$	<LQ	$26,45 \pm 1,07$	<LQ	<LQ	<LQ	$2,18 \pm 0,37$	<LQ	$293,37 \pm 6,84$	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	$75,06 \pm 9,77$	<LQ	<LQ	$25,39 \pm 0,37$	<LQ	<LQ	<LQ	$1,31 \pm 0,22$	<LQ	$389,62 \pm 7,53$	<LQ
RD.15	1 <sup>a</sup>	<LQ	$50,92 \pm 1,45$	$0,55 \pm 0,18$	<LQ	$57,69 \pm 1,84$	<LQ	<LQ	$0,24 \pm 0,04$	$4,21 \pm 1,06$	$1,00 \pm 0,10$	$230,61 \pm 34,09$	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	$2,36 \pm 0,19$	<LQ	$21,18 \pm 0,61$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$0,62 \pm 0,25$	$42,20 \pm 4,08$	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	$101,94 \pm 6,76$	<LQ	<LQ	$43,01 \pm 4,89$	<LQ	<LQ	<LQ	$5,21 \pm 0,27$	<LQ	$155,30 \pm 5,72$	<LQ
	4 <sup>a</sup>	$0,45 \pm 0,09$	<LQ	<LQ	<LQ	$39,46 \pm 1,75$	<LQ	<LQ	<LQ	$6,85 \pm 1,02$	$1,25 \pm 0,10$	$227,17 \pm 18,60$	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	$32,30 \pm 1,84$	<LQ	<LQ	$25,06 \pm 1,96$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$182,86 \pm 18,04$	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$19,45 \pm 2,70$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$63,06 \pm 1,89$	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	$516,25 \pm 43,62$	<LQ	<LQ	$21,88 \pm 1,44$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$29,19 \pm 6,19$	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$23,22 \pm 1,20$	<LQ	<LQ	<LQ	$1,90 \pm 0,27$	<LQ	$422,24 \pm 2,04$	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	$130,19 \pm 9,41$	<LQ	<LQ	$25,45 \pm 0,83$	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	$374,72 \pm 5,71$	<LQ

Tabela S5. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe e Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg
SA.16	1ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	10,16 $\pm$ 0,79	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	581,80 $\pm$ 10,05	<LQ
	2ª	<LQ	<LQ	2,59 $\pm$ 0,48	<LQ	6,31 $\pm$ 0,24	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	103,71 $\pm$ 33,54	<LQ
	3ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	9,27 $\pm$ 0,81	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	403,91 $\pm$ 16,28	<LQ
	4ª	0,63 $\pm$ 0,07	<LQ	<LQ	<LQ	8,53 $\pm$ 1,32	<LQ	<LQ	1,00 $\pm$ 0,11	1,81 $\pm$ 0,59	2,48 $\pm$ 0,48	562,50 $\pm$ 58,17	<LQ
	5ª	<LQ	32,95 $\pm$ 7,14	<LQ	<LQ	7,50 $\pm$ 0,36	<LQ	<LQ	<LQ	1,60 $\pm$ 1,22	<LQ	353,60 $\pm$ 22,23	<LQ
	6ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	6,68 $\pm$ 0,76	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	157,67 $\pm$ 18,41	<LQ
	7ª	<LQ	80,22 $\pm$ 3,53	<LQ	<LQ	12,52 $\pm$ 3,36	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	598,18 $\pm$ 14,90	<LQ
	8ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	7,89 $\pm$ 0,91	<LQ	<LQ	<LQ	2,06 $\pm$ 0,50	<LQ	346,28 $\pm$ 13,39	<LQ
	9ª	<LQ	52,36 $\pm$ 4,63	<LQ	<LQ	6,00 $\pm$ 0,25	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	249,03 $\pm$ 3,96	<LQ
SA.17	1ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	12,92 $\pm$ 0,84	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	512,99 $\pm$ 3,65	<LQ
	2ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	7,34 $\pm$ 0,31	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,09 $\pm$ 0,32	186,20 $\pm$ 14,25	<LQ
	3ª	<LQ	73,96 $\pm$ 17,04	<LQ	<LQ	10,67 $\pm$ 0,54	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,78 $\pm$ 0,26	512,36 $\pm$ 30,38	<LQ
	4ª	0,45 $\pm$ 0,22	<LQ	<LQ	<LQ	6,73 $\pm$ 0,77	<LQ	<LQ	0,89 $\pm$ 0,10	2,52 $\pm$ 0,34	1,70 $\pm$ 0,47	556,88 $\pm$ 3,44	<LQ
	5ª	<LQ	59,55 $\pm$ 7,11	0,54 $\pm$ 0,17	<LQ	13,42 $\pm$ 0,80	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,38 $\pm$ 0,06	277,81 $\pm$ 12,54	<LQ
	6ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	7,23 $\pm$ 0,63	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	168,30 $\pm$ 11,57	<LQ
	7ª	1,29 $\pm$ 0,27	78,03 $\pm$ 11,17	<LQ	<LQ	7,86 $\pm$ 0,58	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	351,79 $\pm$ 15,91	<LQ
	8ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	11,26 $\pm$ 1,73	<LQ	<LQ	<LQ	3,87 $\pm$ 0,44	<LQ	268,12 $\pm$ 19,08	<LQ
	9ª	<LQ	106,82 $\pm$ 9,27	<LQ	<LQ	8,63 $\pm$ 3,53	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,33 $\pm$ 0,03	294,91 $\pm$ 2,65	<LQ
SA.18	1ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	13,63 $\pm$ 0,71	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	471,22 $\pm$ 23,16	<LQ
	2ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	8,08 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,54 $\pm$ 0,29	193,91 $\pm$ 20,21	<LQ
	3ª	<LQ	<LQ	0,52 $\pm$ 0,13	<LQ	26,48 $\pm$ 0,63	<LQ	<LQ	1,09 $\pm$ 0,10	3,61 $\pm$ 0,22	0,84 $\pm$ 0,24	320,39 $\pm$ 19,92	<LQ
	4ª	0,59 $\pm$ 0,10	<LQ	<LQ	<LQ	20,55 $\pm$ 1,50	<LQ	<LQ	2,21 $\pm$ 0,30	9,36 $\pm$ 0,94	2,47 $\pm$ 0,98	371,98 $\pm$ 24,64	<LQ
	5ª	<LQ	<LQ	0,75 $\pm$ 0,21	<LQ	15,57 $\pm$ 1,24	<LQ	<LQ	0,42 $\pm$ 0,06	21,16 $\pm$ 2,42	<LQ	225,96 $\pm$ 20,02	<LQ
	6ª	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	8,06 $\pm$ 0,58	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	205,27 $\pm$ 16,60	<LQ
	7ª	<LQ	197,66 $\pm$ 21,09	<LQ	<LQ	11,11 $\pm$ 1,76	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	410,10 $\pm$ 5,42	<LQ
	8ª	<LQ	48,42 $\pm$ 5,05	0,41 $\pm$ 0,12	<LQ	10,47 $\pm$ 1,01	<LQ	<LQ	<LQ	3,99 $\pm$ 0,12	<LQ	293,03 $\pm$ 4,20	<LQ
	9ª	<LQ	53,81 $\pm$ 3,21	<LQ	<LQ	7,76 $\pm$ 1,18	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	271,72 $\pm$ 1,12	<LQ

Tabela S5. Determinação de Al, As, Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe e Hg ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão, n = 3) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg
SA.19	1 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	63,46 $\pm$ 4,80	<LQ	0,37 $\pm$ 0,01	1,53 $\pm$ 0,07	<LQ	<LQ	101,69 $\pm$ 7,44	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	20,95 $\pm$ 0,51	<LQ	<LQ	0,88 $\pm$ 0,10	<LQ	0,75 $\pm$ 0,08	27,67 $\pm$ 3,93	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	20,27 $\pm$ 0,41	<LQ	<LQ	0,19 $\pm$ 0,05	<LQ	1,13 $\pm$ 0,06	173,17 $\pm$ 5,96	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,37 $\pm$ 0,03	<LQ	2,02 $\pm$ 0,40	<LQ	86,63 $\pm$ 7,32	1,15 $\pm$ 0,19	0,27 $\pm$ 0,04	6,89 $\pm$ 1,54	24,11 $\pm$ 1,74	2,71 $\pm$ 0,33	249,70 $\pm$ 11,05	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	31,36 $\pm$ 1,20	<LQ	<LQ	4,44 $\pm$ 0,26	22,77 $\pm$ 0,28	<LQ	219,24 $\pm$ 20,15	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	40,25 $\pm$ 1,96	<LQ	<LQ	1,00 $\pm$ 0,08	<LQ	<LQ	244,72 $\pm$ 6,58	<LQ
	7 <sup>a</sup>	-	124,39 $\pm$ 23,20	<LQ	<LQ	-	<LQ	<LQ	-	-	<LQ	393,00 $\pm$ 9,77	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	<LQ	<LQ	-	-	<LQ	206,44 $\pm$ 17,41	<LQ
	9 <sup>a</sup>	0,32 $\pm$ 0,05	34,31 $\pm$ 5,73	<LQ	<LQ	13,54 $\pm$ 2,06	<LQ	<LQ	<LQ	1,46 $\pm$ 0,24	<LQ	253,45 $\pm$ 6,63	<LQ
SA.20	1 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	16,89 $\pm$ 2,76	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	58,38 $\pm$ 0,50	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	11,18 $\pm$ 0,45	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,04 $\pm$ 0,21	139,64 $\pm$ 15,50	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	16,90 $\pm$ 0,41	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	184,34 $\pm$ 22,30	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,86 $\pm$ 0,13	<LQ	<LQ	<LQ	14,87 $\pm$ 0,92	<LQ	<LQ	1,30 $\pm$ 0,38	1,85 $\pm$ 0,23	3,79 $\pm$ 1,19	588,56 $\pm$ 11,03	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	15,30 $\pm$ 1,81	<LQ	<LQ	<LQ	7,53 $\pm$ 2,21	<LQ	322,92 $\pm$ 24,55	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	14,05 $\pm$ 1,02	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	115,54 $\pm$ 12,22	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	75,87 $\pm$ 12,66	<LQ	<LQ	14,73 $\pm$ 0,43	<LQ	<LQ	<LQ	1,19 $\pm$ 0,35	<LQ	197,46 $\pm$ 7,28	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	-	<LQ	<LQ	<LQ	-	<LQ	-	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	45,33 $\pm$ 9,54	<LQ	<LQ	12,61 $\pm$ 0,35	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	293,21 $\pm$ 2,34	<LQ
SA.21	1 <sup>a</sup>	<LQ	47,91 $\pm$ 14,77	<LQ	<LQ	26,11 $\pm$ 1,36	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,00 $\pm$ 0,10	367,19 $\pm$ 14,92	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	4,27 $\pm$ 0,43	<LQ	28,13 $\pm$ 1,72	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	122,10 $\pm$ 9,24	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	21,21 $\pm$ 0,89	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	248,71 $\pm$ 30,31	<LQ
	4 <sup>a</sup>	0,61 $\pm$ 0,06	<LQ	1,16 $\pm$ 0,11	<LQ	91,75 $\pm$ 8,68	0,95 $\pm$ 0,16	<LQ	6,20 $\pm$ 1,18	17,40 $\pm$ 5,15	7,92 $\pm$ 0,07	180,82 $\pm$ 27,19	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	170,94 $\pm$ 12,92	<LQ	<LQ	27,50 $\pm$ 2,01	<LQ	<LQ	0,98 $\pm$ 0,13	9,06 $\pm$ 0,90	<LQ	392,21 $\pm$ 24,83	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	14,93 $\pm$ 1,75	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	131,96 $\pm$ 3,27	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	48,12 $\pm$ 8,69	<LQ	<LQ	14,68 $\pm$ 1,20	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	140,14 $\pm$ 10,53	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	1,54 $\pm$ 0,33	<LQ	55,19 $\pm$ 4,71	0,60 $\pm$ 0,10	<LQ	1,89 $\pm$ 0,36	16,94 $\pm$ 1,61	<LQ	111,47 $\pm$ 8,15	<LQ
	9 <sup>a</sup>	0,41 $\pm$ 0,13	48,35 $\pm$ 4,26	<LQ	<LQ	19,75 $\pm$ 0,92	<LQ	0,18 $\pm$ 0,03	<LQ	<LQ	<LQ	388,72 $\pm$ 3,83	<LQ

Tabela S6. Determinação de Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna.

Amostra	Coleta	Li	Mn	Ni	P	Pb	Sb	Se	Tl	U	V	Zn
RD.1	1 <sup>a</sup>	<LQ	158,79 $\pm$ 11,70	5,02 $\pm$ 1,83	<LQ	1,04 $\pm$ 0,47	<LQ	<LQ	<LQ	0,13 $\pm$ 0,02	2,27 $\pm$ 0,20	18,76 $\pm$ 2,47
	2 <sup>a</sup>	<LQ	78,85 $\pm$ 3,80	<LQ	<LQ	0,44 $\pm$ 0,12	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,84 $\pm$ 0,12	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	267,81 $\pm$ 9,34	15,92 $\pm$ 2,86	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,32 $\pm$ 0,04	7,78 $\pm$ 1,11	14,00 $\pm$ 0,90
	4 <sup>a</sup>	2,33 $\pm$ 0,34	1021,60 $\pm$ 30,67	77,94 $\pm$ 6,53	171,94 $\pm$ 5,03	18,88 $\pm$ 1,05	<LQ	<LQ	0,13 $\pm$ 0,01	1,47 $\pm$ 0,12	40,48 $\pm$ 2,77	42,61 $\pm$ 13,30
	5 <sup>a</sup>	<LQ	338,68 $\pm$ 17,94	9,52 $\pm$ 1,41	<LQ	1,51 $\pm$ 0,27	<LQ	<LQ	<LQ	0,14 $\pm$ 0,02	4,23 $\pm$ 0,82	12,26 $\pm$ 3,40
	6 <sup>a</sup>	<LQ	84,85 $\pm$ 3,90	<LQ	219,86 $\pm$ 11,88	1,12 $\pm$ 0,14	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	79,00 $\pm$ 10,98	<LQ	21,21 $\pm$ 5,95	1,90 $\pm$ 0,35	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	646,97 $\pm$ 25,03	25,01 $\pm$ 4,22	35,63 $\pm$ 2,17	4,96 $\pm$ 0,55	<LQ	<LQ	<LQ	0,58 $\pm$ 0,05	12,38 $\pm$ 2,22	14,54 $\pm$ 2,65
	9 <sup>a</sup>	<LQ	88,70 $\pm$ 2,31	<LQ	<LQ	0,37 $\pm$ 0,09	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,83 $\pm$ 0,19	<LQ
RD.2	1 <sup>a</sup>	<LQ	126,35 $\pm$ 4,13	3,70 $\pm$ 0,48	13,43 $\pm$ 1,76	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,65 $\pm$ 0,11	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	-	-	-	-	<LQ	<LQ	-	-	-	-
	3 <sup>a</sup>	<LQ	122,97 $\pm$ 2,71	27,52 $\pm$ 1,05	<LQ	1,25 $\pm$ 0,41	<LQ	<LQ	<LQ	0,37 $\pm$ 0,08	16,57 $\pm$ 0,38	19,38 $\pm$ 1,25
	4 <sup>a</sup>	<LQ	150,54 $\pm$ 9,46	19,59 $\pm$ 0,93	40,96 $\pm$ 3,84	6,29 $\pm$ 0,50	<LQ	<LQ	<LQ	0,26 $\pm$ 0,02	14,31 $\pm$ 0,78	31,62 $\pm$ 8,61
	5 <sup>a</sup>	<LQ	38,15 $\pm$ 3,42	3,33 $\pm$ 0,72	<LQ	0,71 $\pm$ 0,11	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,49 $\pm$ 0,20	16,11 $\pm$ 4,91
	6 <sup>a</sup>	<LQ	7,97 $\pm$ 0,75	<LQ	141,54 $\pm$ 4,33	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	14,46 $\pm$ 1,30
	7 <sup>a</sup>	<LQ	19,06 $\pm$ 2,06	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	49,83 $\pm$ 2,32	13,60 $\pm$ 1,58	32,41 $\pm$ 3,72	3,03 $\pm$ 0,41	<LQ	<LQ	<LQ	0,27 $\pm$ 0,04	11,17 $\pm$ 2,70	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	10,27 $\pm$ 2,74	<LQ	<LQ	0,37 $\pm$ 0,05	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,78 $\pm$ 0,19	<LQ
RD.3	1 <sup>a</sup>	<LQ	150,03 $\pm$ 13,64	6,23 $\pm$ 1,84	<LQ	0,77 $\pm$ 0,10	<LQ	<LQ	<LQ	0,11 $\pm$ 0,02	3,21 $\pm$ 0,24	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	100,93 $\pm$ 12,31	<LQ	79,90 $\pm$ 62,29	0,97 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,02	2,19 $\pm$ 0,94	11,92 $\pm$ 9,74
	3 <sup>a</sup>	3,46 $\pm$ 0,37	812,28 $\pm$ 13,18	132,62 $\pm$ 10,78	278,33 $\pm$ 24,71	20,12 $\pm$ 2,27	<LQ	<LQ	0,19 $\pm$ 0,01	2,56 $\pm$ 0,16	83,29 $\pm$ 6,24	37,16 $\pm$ 3,22
	4 <sup>a</sup>	<LQ	221,28 $\pm$ 6,08	21,95 $\pm$ 2,15	38,56 $\pm$ 2,12	5,53 $\pm$ 1,23	<LQ	<LQ	<LQ	0,31 $\pm$ 0,02	15,88 $\pm$ 1,23	24,225 $\pm$ 6,61
	5 <sup>a</sup>	<LQ	144,42 $\pm$ 10,45	9,42 $\pm$ 1,41	<LQ	1,94 $\pm$ 0,15	<LQ	<LQ	<LQ	0,17 $\pm$ 0,02	7,05 $\pm$ 0,82	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	56,10 $\pm$ 2,16	<LQ	112,21 $\pm$ 6,06	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,30 $\pm$ 0,22	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	73,39 $\pm$ 3,34	<LQ	<LQ	1,07 $\pm$ 0,29	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	210,30 $\pm$ 12,02	28,91 $\pm$ 3,07	45,49 $\pm$ 4,51	3,92 $\pm$ 0,28	<LQ	<LQ	<LQ	0,36 $\pm$ 0,05	19,09 $\pm$ 1,63	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	113,02 $\pm$ 7,32	<LQ	<LQ	1,08 $\pm$ 0,09	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,01	2,72 $\pm$ 0,20	<LQ

Tabela S6. Determinação de Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Li	Mn	Ni	P	Pb	Sb	Se	Tl	U	V	Zn
RD.4	1 <sup>a</sup>	<LQ	147,13 $\pm$ 15,17	8,32 $\pm$ 2,06	24,23 $\pm$ 7,47	1,03 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	<LQ	0,12 $\pm$ 0,02	6,77 $\pm$ 0,66	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	89,50 $\pm$ 4,49	<LQ	127,57 $\pm$ 15,85	1,35 $\pm$ 0,29	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,02	2,53 $\pm$ 0,65	27,97 $\pm$ 15,86
	3 <sup>a</sup>	4,51 $\pm$ 1,79	361,47 $\pm$ 23,94	62,50 $\pm$ 2,73	115,52 $\pm$ 56,22	7,57 $\pm$ 0,74	<LQ	7,69 $\pm$ 2,95	<LQ	1,06 $\pm$ 0,07	36,81 $\pm$ 2,65	17,07 $\pm$ 1,85
	4 <sup>a</sup>	<LQ	258,41 $\pm$ 8,18	32,14 $\pm$ 3,39	61,61 $\pm$ 7,61	7,72 $\pm$ 0,55	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,01	0,36 $\pm$ 0,02	22,74 $\pm$ 1,11	32,25 $\pm$ 5,46
	5 <sup>a</sup>	<LQ	159,88 $\pm$ 7,34	7,95 $\pm$ 3,40	<LQ	2,08 $\pm$ 0,32	<LQ	<LQ	0,08 $\pm$ 0,01	0,13 $\pm$ 0,04	5,61 $\pm$ 1,98	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	54,36 $\pm$ 2,38	<LQ	97,97 $\pm$ 2,38	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,66 $\pm$ 0,48	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	80,33 $\pm$ 2,27	<LQ	<LQ	1,43 $\pm$ 0,53	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	207,72 $\pm$ 10,01	24,64 $\pm$ 3,45	44,51 $\pm$ 3,08	4,44 $\pm$ 0,36	<LQ	<LQ	<LQ	0,35 $\pm$ 0,02	19,53 $\pm$ 2,03	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	96,55 $\pm$ 6,99	<LQ	<LQ	1,07 $\pm$ 0,17	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	3,92 $\pm$ 0,05	<LQ
RD.5	1 <sup>a</sup>	<LQ	133,90 $\pm$ 3,72	6,83 $\pm$ 1,77	20,90 $\pm$ 7,82	1,23 $\pm$ 0,31	<LQ	<LQ	<LQ	0,11 $\pm$ 0,01	4,68 $\pm$ 1,01	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	85,50 $\pm$ 11,51	<LQ	128,80 $\pm$ 29,92	1,20 $\pm$ 0,84	<LQ	<LQ	<LQ	0,08 $\pm$ 0,01	2,73 $\pm$ 1,49	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	321,87 $\pm$ 23,51	14,13 $\pm$ 0,56	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,17 $\pm$ 0,07	5,30 $\pm$ 2,82	<LQ
	4 <sup>a</sup>	<LQ	270,49 $\pm$ 8,59	39,41 $\pm$ 7,99	69,21 $\pm$ 8,33	9,56 $\pm$ 1,15	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,01	0,40 $\pm$ 0,04	24,64 $\pm$ 3,80	42,73 $\pm$ 10,18
	5 <sup>a</sup>	<LQ	154,39 $\pm$ 21,97	6,48 $\pm$ 0,79	<LQ	1,55 $\pm$ 0,19	<LQ	<LQ	<LQ	0,12 $\pm$ 0,04	4,75 $\pm$ 0,63	10,11 $\pm$ 0,08
	6 <sup>a</sup>	<LQ	48,43 $\pm$ 5,24	<LQ	87,49 $\pm$ 3,27	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,22 $\pm$ 0,28	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	63,00 $\pm$ 9,23	<LQ	<LQ	1,33 $\pm$ 0,36	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	208,33 $\pm$ 9,10	29,80 $\pm$ 11,63	54,74 $\pm$ 5,29	5,01 $\pm$ 0,58	<LQ	<LQ	<LQ	0,32 $\pm$ 0,04	20,67 $\pm$ 2,63	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	86,77 $\pm$ 3,58	<LQ	<LQ	1,26 $\pm$ 0,10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	4,03 $\pm$ 0,20	<LQ
RD.6	1 <sup>a</sup>	<LQ	51,62 $\pm$ 12,25	9,20 $\pm$ 1,57	94,61 $\pm$ 26,85	1,54 $\pm$ 0,08	<LQ	<LQ	<LQ	0,15 $\pm$ 0,01	6,80 $\pm$ 0,72	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	82,89 $\pm$ 5,90	<LQ	96,94 $\pm$ 13,10	0,83 $\pm$ 0,21	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,02	6,61 $\pm$ 1,01	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	110,25 $\pm$ 7,98	9,48 $\pm$ 1,61	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,01	5,51 $\pm$ 0,87	<LQ
	4 <sup>a</sup>	<LQ	341,16 $\pm$ 12,38	45,88 $\pm$ 6,88	76,08 $\pm$ 7,92	10,91 $\pm$ 0,99	<LQ	<LQ	0,11 $\pm$ 0,01	0,59 $\pm$ 0,06	28,64 $\pm$ 2,74	37,00 $\pm$ 5,02
	5 <sup>a</sup>	<LQ	213,01 $\pm$ 12,16	14,30 $\pm$ 3,25	<LQ	2,26 $\pm$ 0,18	<LQ	<LQ	<LQ	0,19 $\pm$ 0,03	12,71 $\pm$ 2,28	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	54,72 $\pm$ 3,22	<LQ	84,57 $\pm$ 2,17	0,41 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,41 $\pm$ 0,16	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	66,84 $\pm$ 4,03	<LQ	<LQ	0,82 $\pm$ 0,23	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	324,06 $\pm$ 6,49	45,66 $\pm$ 2,85	67,27 $\pm$ 4,27	7,76 $\pm$ 0,50	<LQ	<LQ	0,08 $\pm$ 0,00	0,48 $\pm$ 0,02	33,97 $\pm$ 1,44	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	103,94 $\pm$ 6,26	<LQ	<LQ	1,35 $\pm$ 0,15	<LQ	<LQ	<LQ	0,08 $\pm$ 0,01	5,49 $\pm$ 0,37	<LQ

Tabela S6. Determinação de Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Li	Mn	Ni	P	Pb	Sb	Se	Tl	U	V	Zn
RD.7	1ª	<LQ	164,94 $\pm$ 6,81	11,36 $\pm$ 0,54	33,31 $\pm$ 7,61	1,74 $\pm$ 0,41	<LQ	<LQ	<LQ	0,15 $\pm$ 0,04	6,34 $\pm$ 2,43	<LQ
	2ª	<LQ	86,40 $\pm$ 8,30	<LQ	118,28 $\pm$ 9,78	1,56 $\pm$ 0,25	<LQ	<LQ	<LQ	0,10 $\pm$ 0,02	3,58 $\pm$ 0,81	<LQ
	3ª	<LQ	83,81 $\pm$ 16,45	4,08 $\pm$ 1,47	<LQ	1,17 $\pm$ 0,12	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,02	2,42 $\pm$ 0,50	<LQ
	4ª	<LQ	306,03 $\pm$ 22,17	40,62 $\pm$ 7,62	75,13 $\pm$ 10,65	12,50 $\pm$ 2,60	<LQ	<LQ	0,15 $\pm$ 0,04	0,85 $\pm$ 0,09	25,13 $\pm$ 3,92	23,30 $\pm$ 9,00
	5ª	<LQ	124,03 $\pm$ 8,63	5,02 $\pm$ 0,82	<LQ	1,60 $\pm$ 0,19	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,02	3,61 $\pm$ 0,47	<LQ
	6ª	<LQ	65,52 $\pm$ 5,26	<LQ	79,96 $\pm$ 4,07	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,78 $\pm$ 0,29	<LQ
	7ª	<LQ	52,34 $\pm$ 2,06	<LQ	<LQ	0,68 $\pm$ 0,25	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	2,14 $\pm$ 0,35	378,57 $\pm$ 5,35	62,68 $\pm$ 3,22	92,57 $\pm$ 4,16	11,52 $\pm$ 1,23	<LQ	<LQ	0,12 $\pm$ 0,01	0,77 $\pm$ 0,05	43,37 $\pm$ 1,79	12,61 $\pm$ 1,47
	9ª	<LQ	113,99 $\pm$ 7,50	<LQ	<LQ	2,11 $\pm$ 0,19	<LQ	<LQ	<LQ	0,14 $\pm$ 0,02	5,23 $\pm$ 0,11	<LQ
RD.8	1ª	<LQ	76,85 $\pm$ 7,74	5,36 $\pm$ 0,21	16,36 $\pm$ 0,85	0,96 $\pm$ 0,19	<LQ	<LQ	<LQ	0,10 $\pm$ 0,02	3,94 $\pm$ 0,16	<LQ
	2ª	<LQ	33,85 $\pm$ 1,44	<LQ	105,01 $\pm$ 10,89	0,56 $\pm$ 0,13	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,62 $\pm$ 0,38	<LQ
	3ª	<LQ	36,28 $\pm$ 1,59	3,38 $\pm$ 0,33	<LQ	0,74 $\pm$ 0,06	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,13 $\pm$ 0,15	<LQ
	4ª	<LQ	112,69 $\pm$ 12,61	36,84 $\pm$ 3,75	58,61 $\pm$ 5,53	11,32 $\pm$ 1,24	<LQ	<LQ	0,11 $\pm$ 0,03	0,71 $\pm$ 0,15	18,63 $\pm$ 4,06	25,89 $\pm$ 5,17
	5ª	<LQ	37,09 $\pm$ 2,69	<LQ	<LQ	0,69 $\pm$ 0,10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,85 $\pm$ 0,23	16,56 $\pm$ 2,91
	6ª	<LQ	23,02 $\pm$ 1,93	<LQ	80,43 $\pm$ 4,68	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,58 $\pm$ 0,26	<LQ
	7ª	<LQ	29,41 $\pm$ 2,81	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	2,70 $\pm$ 0,12	214,22 $\pm$ 9,18	72,73 $\pm$ 7,69	93,57 $\pm$ 3,40	15,58 $\pm$ 2,11	<LQ	<LQ	0,16 $\pm$ 0,01	1,29 $\pm$ 0,11	47,24 $\pm$ 3,70	<LQ
	9ª	<LQ	27,49 $\pm$ 1,16	<LQ	<LQ	1,39 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,76 $\pm$ 0,20	<LQ
RD.9	1ª	<LQ	57,64 $\pm$ 5,94	4,37 $\pm$ 0,74	15,99 $\pm$ 5,67	0,65 $\pm$ 0,17	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,01	3,08 $\pm$ 0,26	<LQ
	2ª	<LQ	21,41 $\pm$ 1,28	<LQ	93,29 $\pm$ 5,15	0,36 $\pm$ 0,13	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,17 $\pm$ 0,18	<LQ
	3ª	<LQ	34,21 $\pm$ 0,66	3,91 $\pm$ 0,57	<LQ	0,87 $\pm$ 0,14	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,36 $\pm$ 0,61	<LQ
	4ª	<LQ	203,67 $\pm$ 13,05	34,83 $\pm$ 5,33	40,10 $\pm$ 2,52	11,64 $\pm$ 1,37	<LQ	<LQ	0,16 $\pm$ 0,02	0,83 $\pm$ 0,09	16,99 $\pm$ 2,29	42,45 $\pm$ 9,85
	5ª	<LQ	53,51 $\pm$ 2,80	3,45 $\pm$ 0,35	<LQ	0,89 $\pm$ 0,10	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,51 $\pm$ 0,49	<LQ
	6ª	<LQ	15,44 $\pm$ 2,13	<LQ	72,84 $\pm$ 1,14	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,45 $\pm$ 0,31	<LQ
	7ª	<LQ	27,70 $\pm$ 2,09	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	2,67 $\pm$ 0,34	398,20 $\pm$ 8,07	85,92 $\pm$ 4,03	125,88 $\pm$ 6,37	19,82 $\pm$ 4,27	<LQ	<LQ	0,26 $\pm$ 0,02	1,65 $\pm$ 0,09	58,03 $\pm$ 4,79	16,78 $\pm$ 4,17
	9ª	<LQ	29,41 $\pm$ 2,48	<LQ	<LQ	0,86 $\pm$ 0,09	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,41 $\pm$ 0,27	<LQ

Tabela S6. Determinação de Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Li	Mn	Ni	P	Pb	Sb	Se	Tl	U	V	Zn
RD.10	1ª	<LQ	68,44 $\pm$ 4,57	4,32 $\pm$ 0,49	<LQ	0,93 $\pm$ 0,22	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,01	3,27 $\pm$ 0,06	<LQ
	2ª	<LQ	20,21 $\pm$ 0,75	<LQ	98,14 $\pm$ 5,33	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,20 $\pm$ 0,26	<LQ
	3ª	<LQ	41,37 $\pm$ 1,23	4,62 $\pm$ 1,25	37,38 $\pm$ 6,36	1,07 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	<LQ	0,10 $\pm$ 0,03	2,95 $\pm$ 0,42	32,07 $\pm$ 5,68
	4ª	<LQ	83,39 $\pm$ 6,03	10,73 $\pm$ 2,46	11,93 $\pm$ 7,44	3,85 $\pm$ 0,90	<LQ	<LQ	<LQ	0,20 $\pm$ 0,04	6,87 $\pm$ 1,55	22,25 $\pm$ 3,25
	5ª	<LQ	56,47 $\pm$ 5,40	4,38 $\pm$ 0,79	<LQ	0,97 $\pm$ 0,17	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,01 $\pm$ 0,28	13,18 $\pm$ 3,13
	6ª	<LQ	13,97 $\pm$ 0,90	<LQ	76,92 $\pm$ 2,30	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,47 $\pm$ 0,25	<LQ
	7ª	<LQ	25,04 $\pm$ 1,91	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	3,40 $\pm$ 1,07	622,86 $\pm$ 0,75	113,79 $\pm$ 6,79	164,91 $\pm$ 10,35	22,06 $\pm$ 3,52	<LQ	<LQ	0,23 $\pm$ 0,02	1,86 $\pm$ 0,22	84,13 $\pm$ 4,17	32,66 $\pm$ 5,84
	9ª	<LQ	35,47 $\pm$ 3,21	<LQ	<LQ	0,97 $\pm$ 0,09	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,01	2,12 $\pm$ 0,34	<LQ
RD.11	1ª	<LQ	131,21 $\pm$ 0,74	<LQ	74,25 $\pm$ 4,95	1,39 $\pm$ 1,14	<LQ	<LQ	<LQ	0,54 $\pm$ 0,14	<LQ	<LQ
	2ª	<LQ	17,86 $\pm$ 0,93	<LQ	104,69 $\pm$ 8,13	0,47 $\pm$ 0,19	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,30 $\pm$ 0,19	<LQ
	3ª	<LQ	29,13 $\pm$ 2,20	4,69 $\pm$ 0,64	<LQ	0,97 $\pm$ 0,11	<LQ	<LQ	<LQ	0,10 $\pm$ 0,02	2,60 $\pm$ 0,70	<LQ
	4ª	<LQ	152,13 $\pm$ 16,38	36,91 $\pm$ 5,19	41,77 $\pm$ 4,18	16,66 $\pm$ 1,70	<LQ	<LQ	0,22 $\pm$ 0,03	1,30 $\pm$ 0,20	22,10 $\pm$ 2,77	37,32 $\pm$ 4,31
	5ª	<LQ	69,84 $\pm$ 7,30	4,53 $\pm$ 0,78	<LQ	1,72 $\pm$ 0,41	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,02	3,85 $\pm$ 0,44	38,14 $\pm$ 8,77
	6ª	<LQ	12,09 $\pm$ 2,76	<LQ	73,41 $\pm$ 2,57	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,87 $\pm$ 0,11	<LQ
	7ª	<LQ	26,79 $\pm$ 1,41	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	3,92 $\pm$ 0,38	544,20 $\pm$ 8,09	102,68 $\pm$ 7,53	150,02 $\pm$ 12,27	25,27 $\pm$ 3,18	<LQ	<LQ	0,26 $\pm$ 0,03	1,93 $\pm$ 0,13	76,24 $\pm$ 1,88	45,46 $\pm$ 6,49
	9ª	<LQ	24,10 $\pm$ 2,32	<LQ	<LQ	8,86 $\pm$ 0,13	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,32 $\pm$ 0,17	<LQ
RD.12	1ª	<LQ	74,86 $\pm$ 2,97	6,71 $\pm$ 0,74	<LQ	1,66 $\pm$ 0,10	<LQ	<LQ	<LQ	0,11 $\pm$ 0,01	3,63 $\pm$ 0,96	<LQ
	2ª	<LQ	20,62 $\pm$ 1,17	<LQ	100,45 $\pm$ 25,71	1,33 $\pm$ 1,90	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,36 $\pm$ 0,24	<LQ
	3ª	<LQ	34,46 $\pm$ 3,28	6,30 $\pm$ 1,85	14,81 $\pm$ 5,16	1,08 $\pm$ 0,22	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,02	3,79 $\pm$ 0,92	13,51 $\pm$ 3,29
	4ª	<LQ	134,35 $\pm$ 7,91	16,18 $\pm$ 3,98	<LQ	4,52 $\pm$ 0,60	<LQ	<LQ	0,08 $\pm$ 0,02	0,31 $\pm$ 0,04	10,50 $\pm$ 2,23	<LQ
	5ª	<LQ	71,90 $\pm$ 12,20	6,08 $\pm$ 1,64	<LQ	1,35 $\pm$ 0,25	<LQ	<LQ	<LQ	0,10 $\pm$ 0,02	5,00 $\pm$ 0,73	<LQ
	6ª	<LQ	9,43 $\pm$ 1,05	<LQ	70,58 $\pm$ 3,64	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,60 $\pm$ 0,10	<LQ
	7ª	<LQ	18,55 $\pm$ 1,16	<LQ	<LQ	1,10 $\pm$ 0,32	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	17,05 $\pm$ 3,40	733,09 $\pm$ 14,04	147,54 $\pm$ 7,85	160,13 $\pm$ 7,56	25,59 $\pm$ 3,23	<LQ	<LQ	0,48 $\pm$ 0,09	1,83 $\pm$ 0,21	102,57 $\pm$ 5,16	62,39 $\pm$ 4,55
	9ª	<LQ	36,33 $\pm$ 3,81	<LQ	<LQ	1,33 $\pm$ 0,29	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,01	2,72 $\pm$ 0,15	<LQ

Tabela S6. Determinação de Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão, n = 3) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Li	Mn	Ni	P	Pb	Sb	Se	Tl	U	V	Zn
RD.13	1 <sup>a</sup>	<LQ	79,67 $\pm$ 6,57	7,68 $\pm$ 0,84	<LQ	1,11 $\pm$ 0,41	<LQ	<LQ	<LQ	0,14 $\pm$ 0,03	6,13 $\pm$ 0,93	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	18,78 $\pm$ 0,92	<LQ	100,46 $\pm$ 11,11	0,42 $\pm$ 0,13	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,43 $\pm$ 0,27	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	39,89 $\pm$ 1,83	7,83 $\pm$ 0,55	<LQ	1,41 $\pm$ 0,21	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,01	5,42 $\pm$ 0,50	<LQ
	4 <sup>a</sup>	<LQ	169,44 $\pm$ 14,98	20,50 $\pm$ 4,38	17,20 $\pm$ 2,10	7,32 $\pm$ 2,12	<LQ	<LQ	0,08 $\pm$ 0,02	0,38 $\pm$ 0,05	12,76 $\pm$ 2,35	125,31 $\pm$ 4,99
	5 <sup>a</sup>	<LQ	82,27 $\pm$ 17,64	9,82 $\pm$ 1,92	<LQ	1,79 $\pm$ 0,43	<LQ	<LQ	<LQ	0,13 $\pm$ 0,05	7,10 $\pm$ 0,60	19,39 $\pm$ 5,43
	6 <sup>a</sup>	<LQ	8,89 $\pm$ 1,22	<LQ	65,61 $\pm$ 1,21	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,63 $\pm$ 0,32	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	16,97 $\pm$ 1,26	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	16,60 $\pm$ 2,16	625,85 $\pm$ 27,99	151,92 $\pm$ 7,16	187,08 $\pm$ 6,21	28,62 $\pm$ 3,36	<LQ	<LQ	0,58 $\pm$ 0,09	2,37 $\pm$ 0,21	102,26 $\pm$ 6,54	78,21 $\pm$ 7,44
	9 <sup>a</sup>	<LQ	39,54 $\pm$ 2,03	<LQ	<LQ	1,71 $\pm$ 0,17	<LQ	19,23 $\pm$ 4,51	<LQ	0,11 $\pm$ 0,02	13,17 $\pm$ 0,14	<LQ
RD.14	1 <sup>a</sup>	<LQ	18,35 $\pm$ 0,84	<LQ	21,98 $\pm$ 5,48	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,87 $\pm$ 0,19	<LQ
	2 <sup>a</sup>	<LQ	10,18 $\pm$ 0,73	<LQ	36,34 $\pm$ 31,69	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,07 $\pm$ 0,15	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	17,23 $\pm$ 1,87	3,96 $\pm$ 0,82	18,10 $\pm$ 3,80	0,94 $\pm$ 0,14	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,01	2,76 $\pm$ 0,91	11,91 $\pm$ 2,39
	4 <sup>a</sup>	<LQ	45,14 $\pm$ 6,68	14,11 $\pm$ 2,05	<LQ	3,55 $\pm$ 0,65	<LQ	<LQ	<LQ	0,22 $\pm$ 0,05	9,82 $\pm$ 1,00	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	12,55 $\pm$ 1,26	<LQ	<LQ	0,81 $\pm$ 0,13	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,01	2,66 $\pm$ 0,62	12,91 $\pm$ 3,34
	6 <sup>a</sup>	<LQ	3,40 $\pm$ 0,54	<LQ	66,76 $\pm$ 2,04	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,62 $\pm$ 0,25	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	23,86 $\pm$ 2,50	<LQ	16,36 $\pm$ 0,49	1,47 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	<LQ	0,17 $\pm$ 0,03	4,50 $\pm$ 0,86	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	8,04 $\pm$ 0,68	<LQ	<LQ	0,81 $\pm$ 0,15	<LQ	9,29 $\pm$ 1,24	<LQ	<LQ	1,42 $\pm$ 0,18	<LQ
RD.15	1 <sup>a</sup>	<LQ	22,52 $\pm$ 4,21	7,26 $\pm$ 1,65	29,29 $\pm$ 9,37	1,98 $\pm$ 0,68	<LQ	<LQ	<LQ	0,10 $\pm$ 0,03	4,82 $\pm$ 0,52	14,11 $\pm$ 1,30
	2 <sup>a</sup>	<LQ	7,76 $\pm$ 0,60	<LQ	73,82 $\pm$ 9,65	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,05 $\pm$ 0,11	<LQ
	3 <sup>a</sup>	<LQ	24,98 $\pm$ 0,65	11,76 $\pm$ 0,29	25,13 $\pm$ 8,81	1,29 $\pm$ 0,45	<LQ	<LQ	<LQ	0,12 $\pm$ 0,03	8,21 $\pm$ 0,81	11,52 $\pm$ 0,06
	4 <sup>a</sup>	<LQ	51,33 $\pm$ 4,91	12,91 $\pm$ 2,98	<LQ	3,55 $\pm$ 0,35	<LQ	<LQ	0,06 $\pm$ 0,01	0,23 $\pm$ 0,03	9,01 $\pm$ 2,03	<LQ
	5 <sup>a</sup>	<LQ	9,97 $\pm$ 1,26	<LQ	<LQ	0,72 $\pm$ 0,18	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,62 $\pm$ 0,22	<LQ
	6 <sup>a</sup>	<LQ	4,18 $\pm$ 0,97	<LQ	68,00 $\pm$ 3,04	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,78 $\pm$ 0,36	<LQ
	7 <sup>a</sup>	<LQ	5,09 $\pm$ 0,55	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8 <sup>a</sup>	<LQ	20,19 $\pm$ 2,08	<LQ	18,94 $\pm$ 2,38	2,45 $\pm$ 0,23	<LQ	<LQ	<LQ	0,11 $\pm$ 0,01	3,90 $\pm$ 0,15	<LQ
	9 <sup>a</sup>	<LQ	9,18 $\pm$ 1,10	<LQ	<LQ	0,89 $\pm$ 0,08	<LQ	17,32 $\pm$ 2,03	<LQ	0,07 $\pm$ 0,01	1,92 $\pm$ 0,23	<LQ

Tabela S6. Determinação de Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão, n = 3) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Li	Mn	Ni	P	Pb	Sb	Se	Tl	U	V	Zn
SA.16	1ª	<LQ	15,33 $\pm$ 1,66	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	2ª	<LQ	12,02 $\pm$ 0,72	<LQ	94,86 $\pm$ 8,16	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,81 $\pm$ 0,16	<LQ
	3ª	<LQ	33,24 $\pm$ 4,00	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,70 $\pm$ 0,16	<LQ
	4ª	<LQ	26,33 $\pm$ 4,71	6,67 $\pm$ 1,33	<LQ	2,80 $\pm$ 0,58	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,01	<LQ	29,54 $\pm$ 5,35
	5ª	<LQ	31,87 $\pm$ 1,66	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,04 $\pm$ 0,08	43,53 $\pm$ 9,00
	6ª	<LQ	10,12 $\pm$ 1,07	<LQ	67,78 $\pm$ 3,33	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,26 $\pm$ 0,24	<LQ
	7ª	<LQ	28,57 $\pm$ 3,51	<LQ	<LQ	2,04 $\pm$ 0,54	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	<LQ	36,63 $\pm$ 2,32	<LQ	22,49 $\pm$ 4,49	1,18 $\pm$ 0,19	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,02	3,67 $\pm$ 1,08	<LQ
	9ª	<LQ	14,08 $\pm$ 1,82	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	8,11 $\pm$ 1,85	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
SA.17	1ª	<LQ	23,90 $\pm$ 1,57	<LQ	53,75 $\pm$ 16,66	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	2ª	<LQ	17,83 $\pm$ 1,77	<LQ	93,75 $\pm$ 12,08	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,88 $\pm$ 0,11	11,66 $\pm$ 2,88
	3ª	<LQ	39,88 $\pm$ 2,63	3,45 $\pm$ 0,27	<LQ	0,92 $\pm$ 0,28	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,54 $\pm$ 0,51	19,35 $\pm$ 3,36
	4ª	<LQ	34,17 $\pm$ 3,23	8,10 $\pm$ 0,81	11,93 $\pm$ 23,32	2,23 $\pm$ 0,43	<LQ	<LQ	<LQ	0,07 $\pm$ 0,01	0,64 $\pm$ 0,11	17,12 $\pm$ 3,35
	5ª	<LQ	48,06 $\pm$ 1,60	<LQ	<LQ	0,75 $\pm$ 0,11	<LQ	<LQ	<LQ	0,08 $\pm$ 0,03	1,30 $\pm$ 0,49	<LQ
	6ª	<LQ	18,08 $\pm$ 1,58	<LQ	64,99 $\pm$ 2,53	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,16 $\pm$ 0,11	<LQ
	7ª	<LQ	37,28 $\pm$ 2,87	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	<LQ	50,90 $\pm$ 4,11	5,92 $\pm$ 0,84	20,94 $\pm$ 2,61	2,60 $\pm$ 0,10	<LQ	<LQ	<LQ	0,23 $\pm$ 0,02	6,40 $\pm$ 0,66	<LQ
	9ª	<LQ	19,33 $\pm$ 2,98	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	6,11 $\pm$ 1,05	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
SA.18	1ª	<LQ	25,86 $\pm$ 2,74	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	2ª	<LQ	18,21 $\pm$ 1,03	<LQ	83,97 $\pm$ 11,66	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,87 $\pm$ 0,12	10,59 $\pm$ 2,18
	3ª	<LQ	90,99 $\pm$ 5,94	16,28 $\pm$ 0,48	17,82 $\pm$ 5,53	7,45 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	0,14 $\pm$ 0,02	0,81 $\pm$ 0,02	10,75 $\pm$ 0,45	10,70 $\pm$ 2,09
	4ª	<LQ	88,94 $\pm$ 2,81	22,71 $\pm$ 4,24	64,48 $\pm$ 13,11	5,69 $\pm$ 0,53	<LQ	<LQ	0,06 $\pm$ 0,01	0,26 $\pm$ 0,05	17,69 $\pm$ 2,06	33,65 $\pm$ 4,48
	5ª	<LQ	50,60 $\pm$ 2,37	16,47 $\pm$ 2,43	<LQ	1,34 $\pm$ 0,19	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,02	1,83 $\pm$ 0,28	41,34 $\pm$ 1,62
	6ª	<LQ	19,62 $\pm$ 2,01	<LQ	64,75 $\pm$ 2,11	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,18 $\pm$ 0,22	<LQ
	7ª	<LQ	49,63 $\pm$ 1,40	<LQ	<LQ	1,77 $\pm$ 0,30	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	<LQ	54,54 $\pm$ 3,13	5,52 $\pm$ 0,74	15,44 $\pm$ 4,67	2,81 $\pm$ 0,33	<LQ	<LQ	<LQ	0,27 $\pm$ 0,02	6,82 $\pm$ 0,55	<LQ
	9ª	<LQ	17,92 $\pm$ 1,72	<LQ	<LQ	0,63 $\pm$ 0,08	<LQ	6,19 $\pm$ 0,57	<LQ	<LQ	0,58 $\pm$ 0,12	132,89 $\pm$ 1,23

Tabela S6. Determinação de Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, U, V, Tl e Zn ( $\mu\text{g L}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de água dos rios usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Li	Mn	Ni	P	Pb	Sb	Se	Tl	U	V	Zn
SA.19	1ª	<LQ	1008,53 $\pm$ 88,51	<LQ	201,72 $\pm$ 71,61	0,79 $\pm$ 0,26	<LQ	<LQ	<LQ	0,31 $\pm$ 0,08	<LQ	37,40 $\pm$ 4,94
	2ª	<LQ	287,43 $\pm$ 5,65	<LQ	7,35 $\pm$ 2,55	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,82 $\pm$ 0,12	<LQ
	3ª	<LQ	244,73 $\pm$ 7,42	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	4ª	2,37 $\pm$ 0,35	208,38 $\pm$ 16,74	89,81 $\pm$ 6,25	224,75 $\pm$ 25,59	51,32 $\pm$ 3,90	<LQ	<LQ	0,89 $\pm$ 0,04	3,04 $\pm$ 0,28	52,27 $\pm$ 2,62	89,68 $\pm$ 2,92
	5ª	<LQ	2182,36 $\pm$ 69,71	19,12 $\pm$ 4,12	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,60 $\pm$ 0,10	37,21 $\pm$ 2,28
	6ª	<LQ	468,71 $\pm$ 13,98	<LQ	63,18 $\pm$ 1,98	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,68 $\pm$ 0,34	<LQ
	7ª	<LQ	-	<LQ	-	-	<LQ	<LQ	<LQ	-	-	<LQ
	8ª	<LQ	-	<LQ	-	-	<LQ	<LQ	-	-	-	-
	9ª	<LQ	136,86 $\pm$ 5,45	<LQ	<LQ	1,72 $\pm$ 0,06	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,02	0,73 $\pm$ 0,12	<LQ
SA.20	1ª	<LQ	9,68 $\pm$ 1,21	<LQ	109,17 $\pm$ 25,52	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	2ª	<LQ	7,61 $\pm$ 1,07	<LQ	77,03 $\pm$ 6,61	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,87 $\pm$ 0,11	<LQ
	3ª	<LQ	7,90 $\pm$ 0,75	<LQ	<LQ	0,36 $\pm$ 0,02	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,94 $\pm$ 0,07	<LQ
	4ª	1,88 $\pm$ 0,51	19,16 $\pm$ 1,77	5,32 $\pm$ 0,85	<LQ	4,74 $\pm$ 0,34	<LQ	<LQ	<LQ	0,16 $\pm$ 0,02	4,33 $\pm$ 0,28	36,19 $\pm$ 5,48
	5ª	<LQ	33,68 $\pm$ 6,78	9,29 $\pm$ 0,57	<LQ	0,64 $\pm$ 0,33	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	6ª	<LQ	5,55 $\pm$ 1,09	<LQ	66,42 $\pm$ 3,93	2,37 $\pm$ 0,24	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	1,69 $\pm$ 0,42	<LQ
	7ª	<LQ	24,59 $\pm$ 3,37	<LQ	<LQ	1,85 $\pm$ 0,86	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,01	<LQ	<LQ
	8ª	<LQ	-	<LQ	-	-	<LQ	<LQ	-	-	-	-
	9ª	<LQ	25,98 $\pm$ 3,56	<LQ	<LQ	2,12 $\pm$ 0,01	<LQ	<LQ	<LQ	0,09 $\pm$ 0,01	2,01 $\pm$ 0,16	<LQ
SA.21	1ª	<LQ	35,00 $\pm$ 1,78	<LQ	<LQ	0,66 $\pm$ 0,07	<LQ	<LQ	<LQ	0,10 $\pm$ 0,01	1,58 $\pm$ 0,17	<LQ
	2ª	<LQ	79,32 $\pm$ 8,22	<LQ	167,70 $\pm$ 13,44	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	79,72 $\pm$ 5,95	<LQ
	3ª	<LQ	26,43 $\pm$ 1,96	<LQ	<LQ	0,41 $\pm$ 0,04	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,57 $\pm$ 0,08	<LQ
	4ª	<LQ	236,07 $\pm$ 38,30	64,07 $\pm$ 14,69	204,98 $\pm$ 10,35	32,06 $\pm$ 6,55	<LQ	<LQ	0,53 $\pm$ 0,13	2,28 $\pm$ 0,42	37,28 $\pm$ 8,45	54,04 $\pm$ 10,03
	5ª	<LQ	91,33 $\pm$ 5,16	13,12 $\pm$ 4,91	<LQ	3,35 $\pm$ 0,17	<LQ	<LQ	<LQ	0,18 $\pm$ 0,02	2,91 $\pm$ 0,53	<LQ
	6ª	<LQ	23,89 $\pm$ 2,09	<LQ	66,28 $\pm$ 3,08	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	2,15 $\pm$ 0,48	<LQ
	7ª	<LQ	22,56 $\pm$ 0,88	<LQ	<LQ	0,51 $\pm$ 0,16	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ
	8ª	<LQ	183,20 $\pm$ 7,35	65,12 $\pm$ 7,08	101,20 $\pm$ 4,51	25,83 $\pm$ 2,64	<LQ	<LQ	0,30 $\pm$ 0,02	2,35 $\pm$ 0,28	36,93 $\pm$ 2,37	22,97 $\pm$ 3,75
	9ª	<LQ	73,95 $\pm$ 4,17	<LQ	<LQ	2,35 $\pm$ 0,12	<LQ	<LQ	<LQ	0,19 $\pm$ 0,02	3,29 $\pm$ 0,29	<LQ

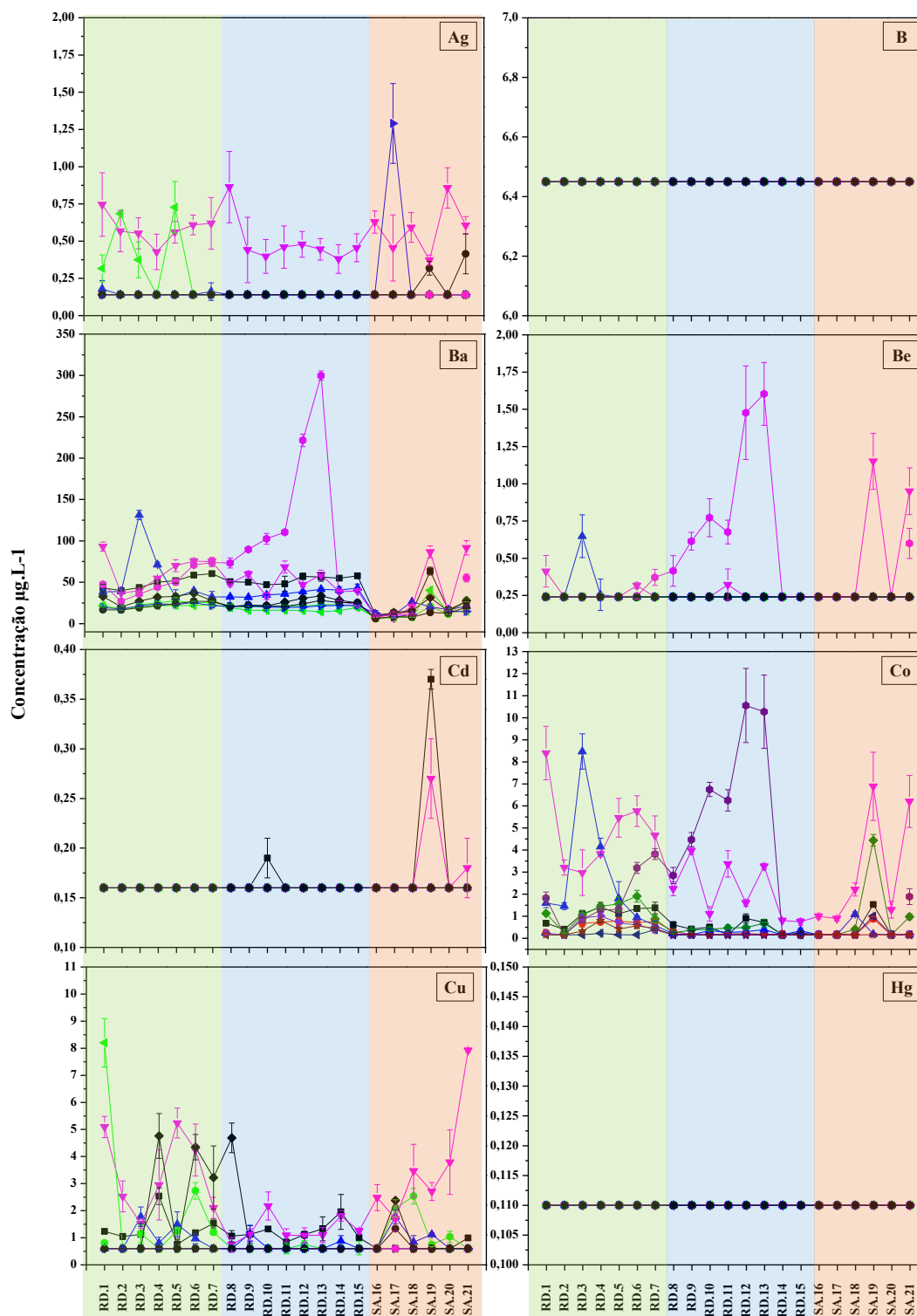


Figura S1. Determinação da concentração para Ag, B, Ba, Be, Cd, Co, Cu e Hg em 21 pontos de coleta ao longo da bacia do rio Doce em nove coletas de águas superficiais. (●) Janeiro/2024. (■) Abril/2022. (▼) Janeiro/2023. (▲) Outubro/2022. (▶) Outubro/2023. (◀) Julho/2023. (◆) Abril/2023. (●) Julho/2022. (●) Abril/2024. RD: Rio Doce. SA: Rio Santo Antônio. (■) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (■) Rio Santo Antônio.

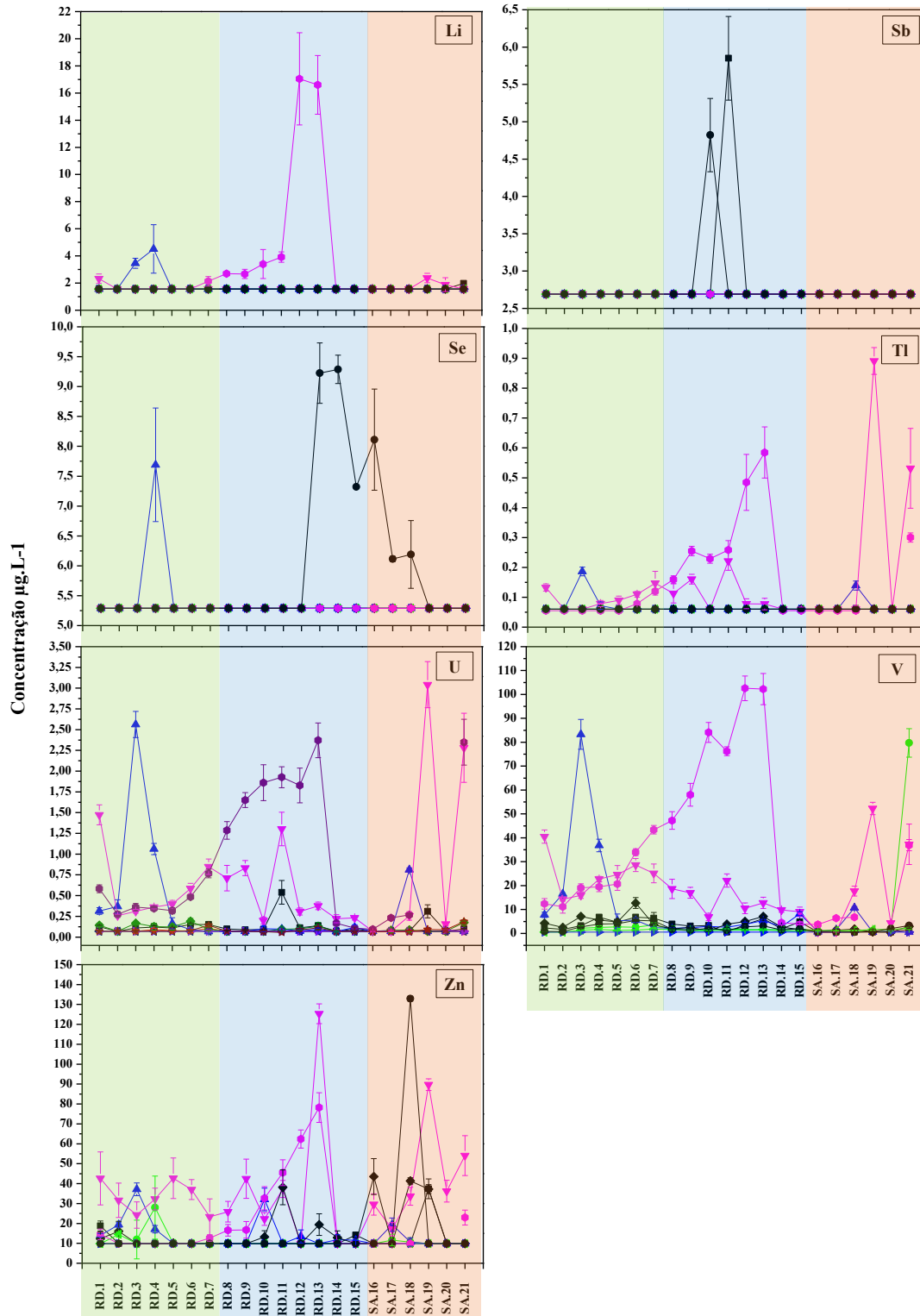


Figura S2. Determinação da concentração para Li, Sb, Se, Tl, U, V e Zn em 21 pontos de coleta ao longo da bacia do rio Doce em nove coletas de águas superficiais. (●) Janeiro/2024. (■) Abril/2022. (▼) Janeiro/2023. (▲) Outubro/2022. (▶) Outubro/2023. (◀) Julho/2023. (◆) Abril/2023. (●) Julho/2022. (●) Abril/2024. RD: Rio Doce. SA: Rio Santo Antônio. (■) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (■) Rio Santo Antônio.

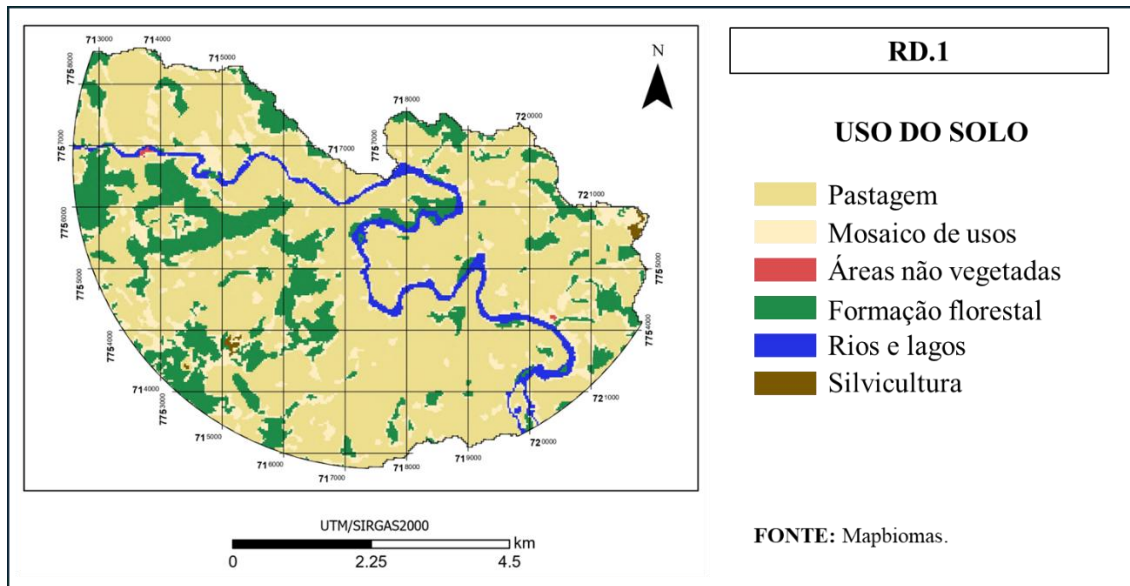


Figura S3. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.1.

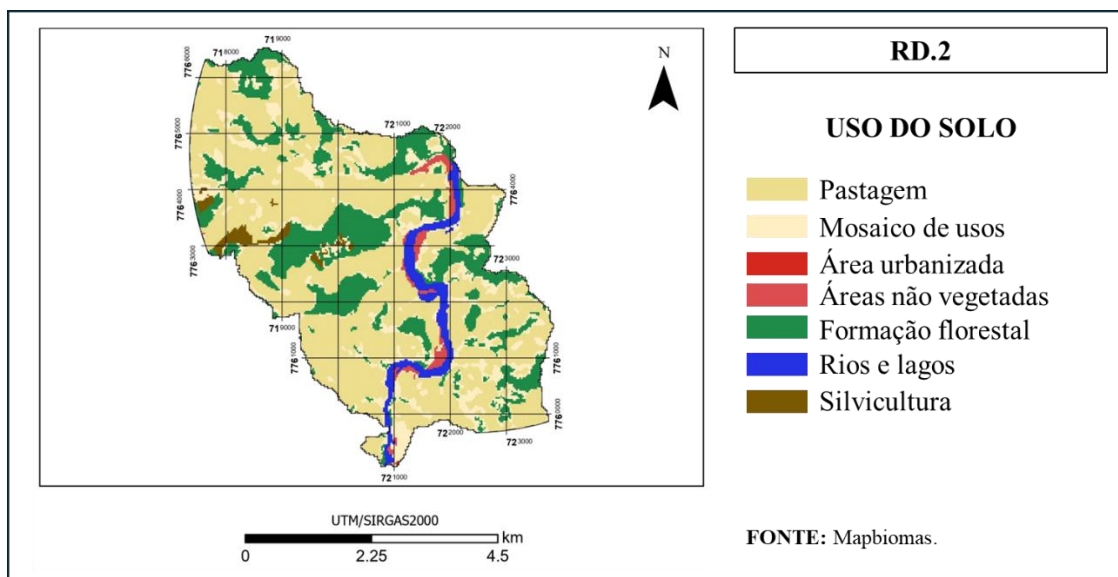


Figura S4. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.2.

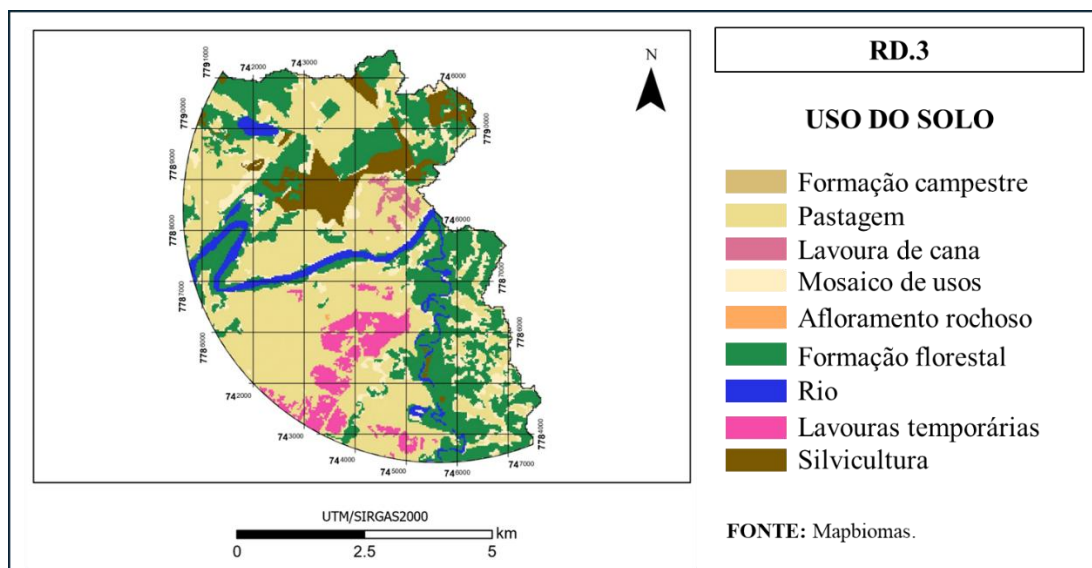


Figura S5. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.3.

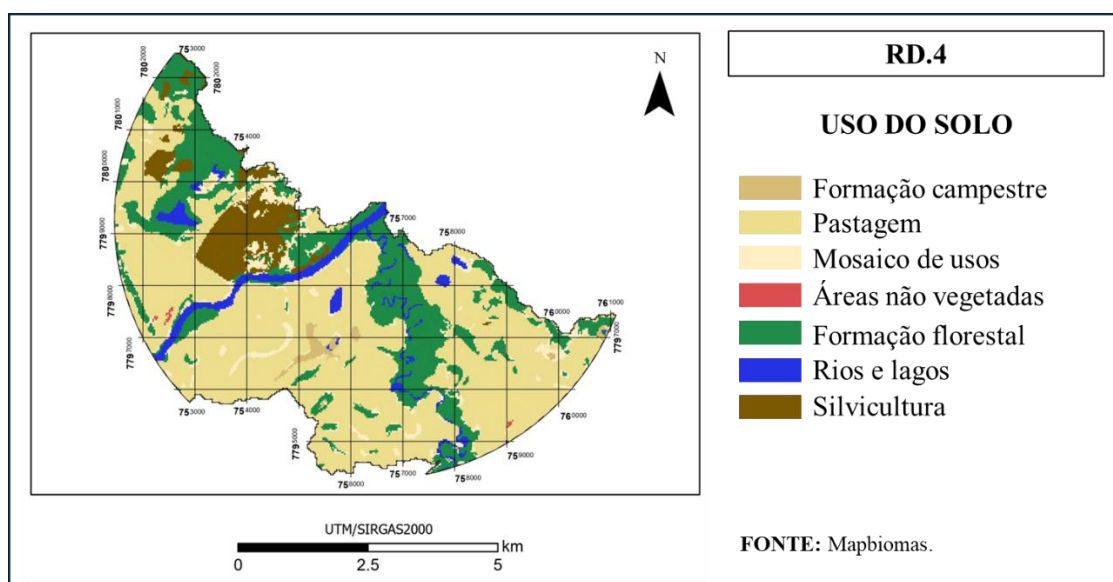


Figura S6. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.4.

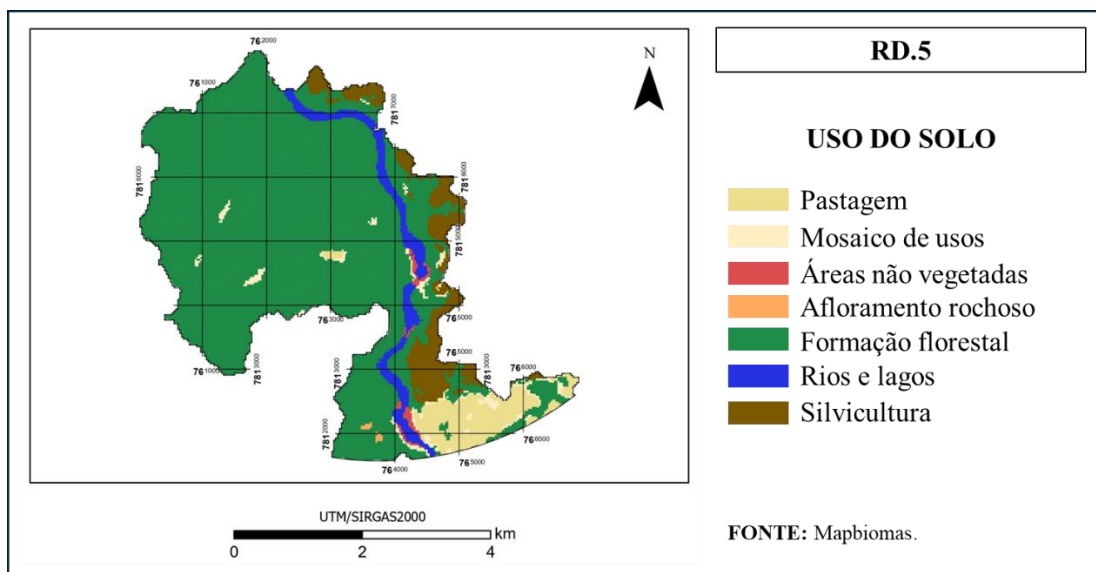


Figura S7. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.5.

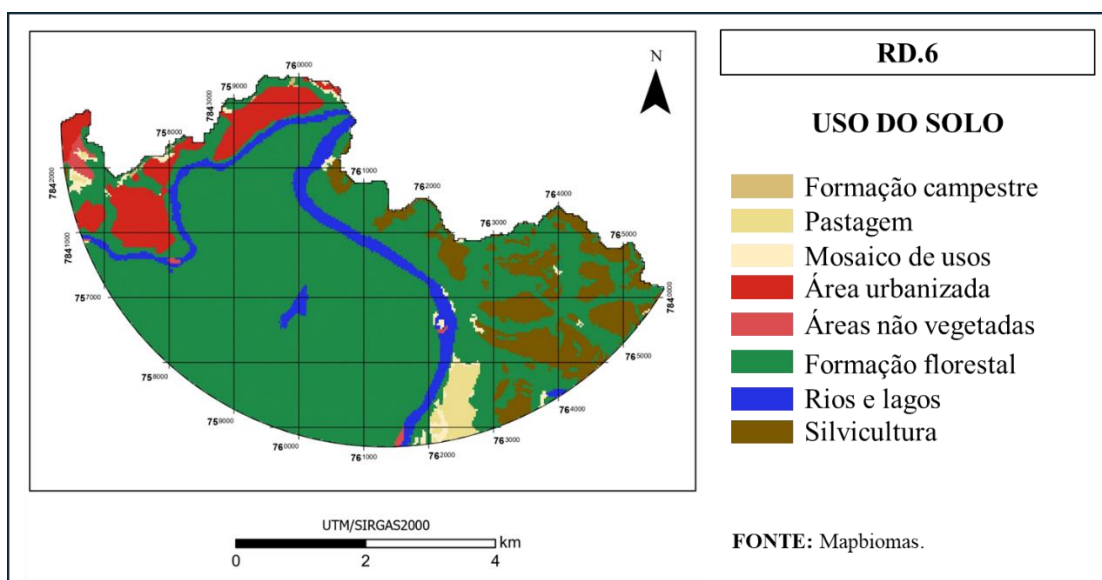


Figura S8. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.6.

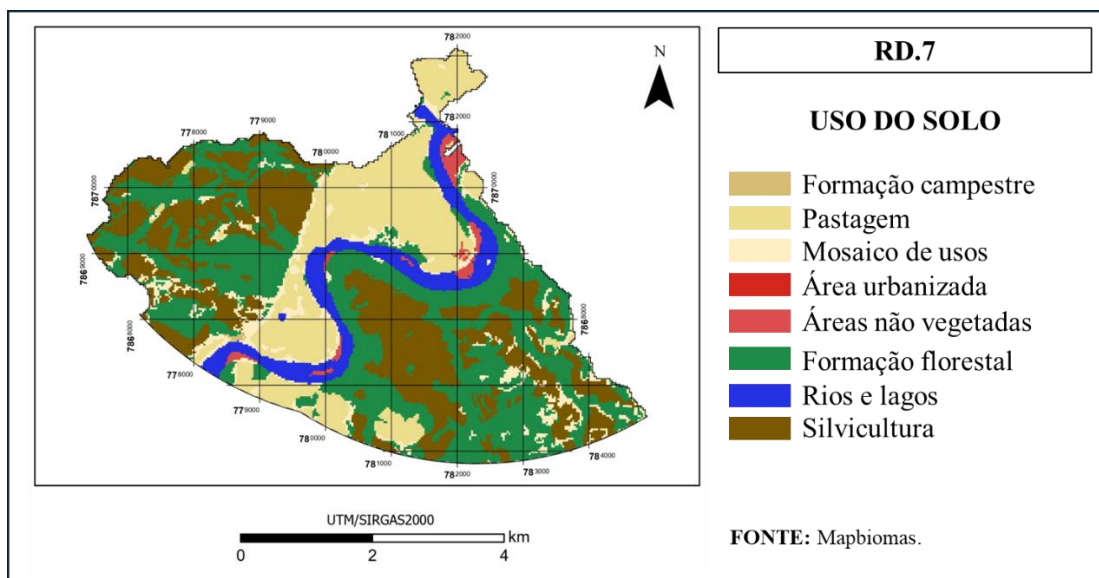


Figura S9. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.7.

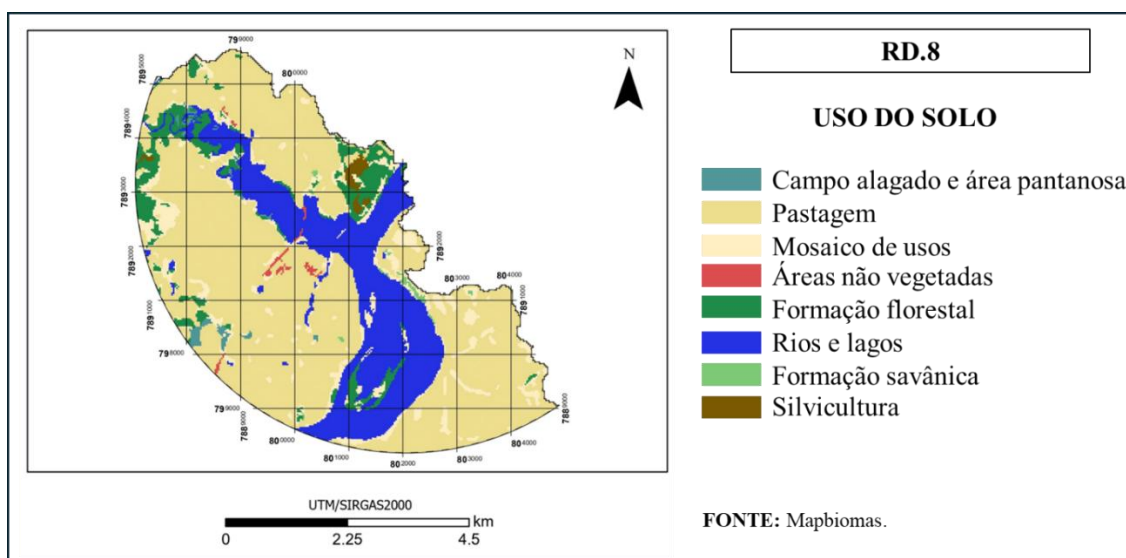


Figura S10. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.8.

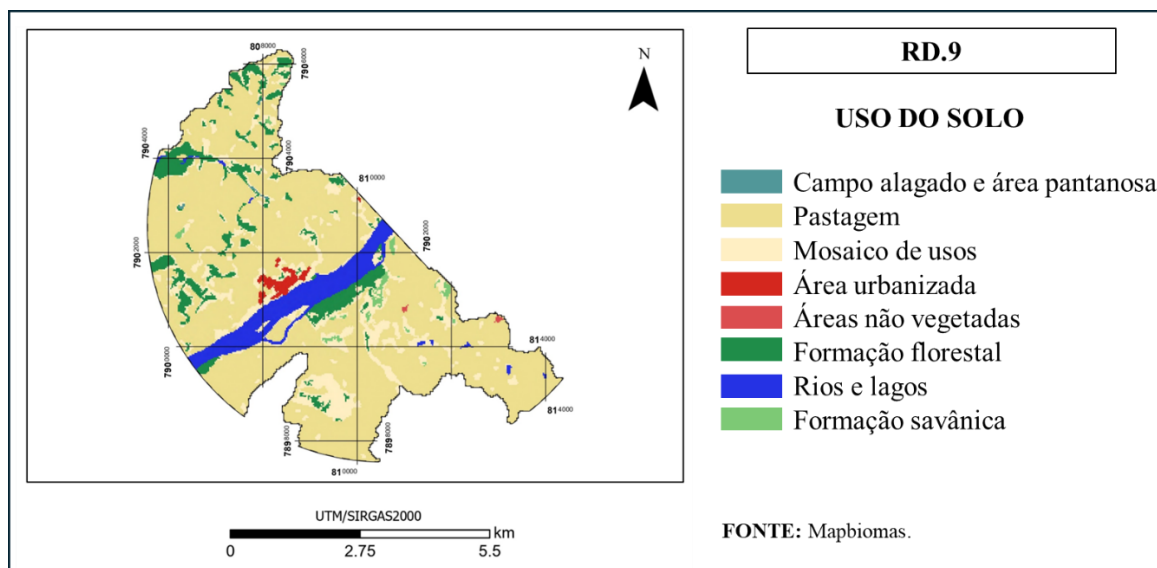


Figura S11. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.9.

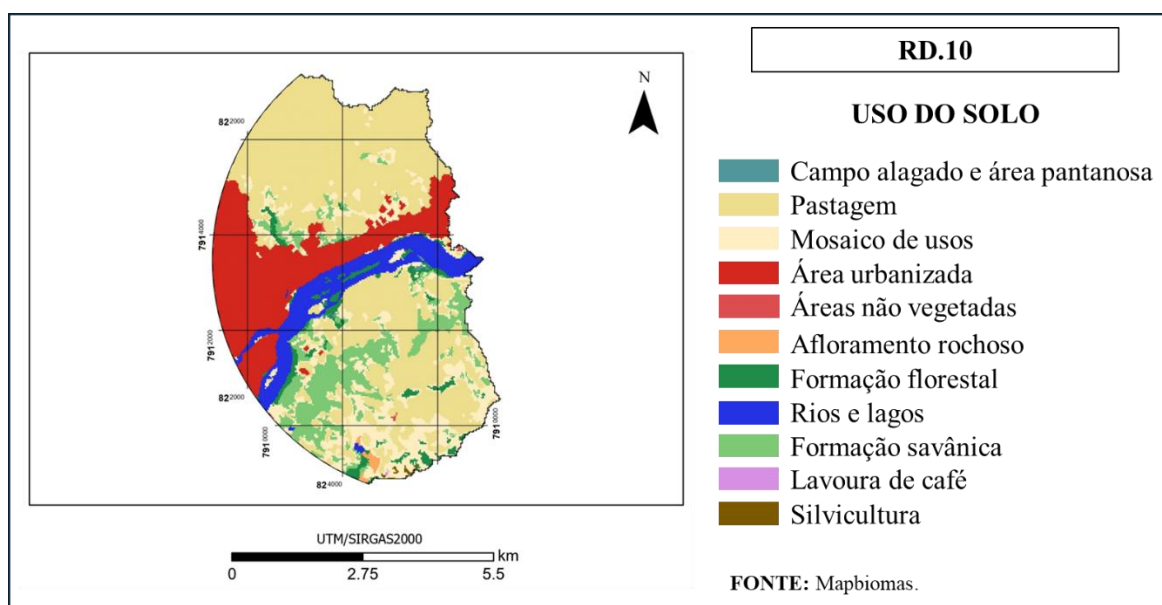


Figura S12. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.10.

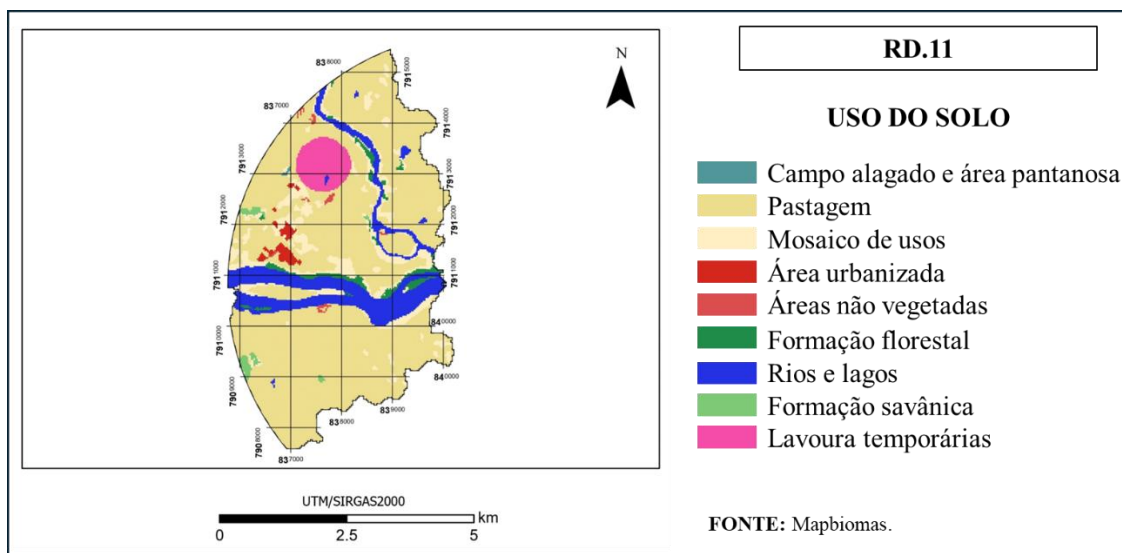


Figura S13. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.11.

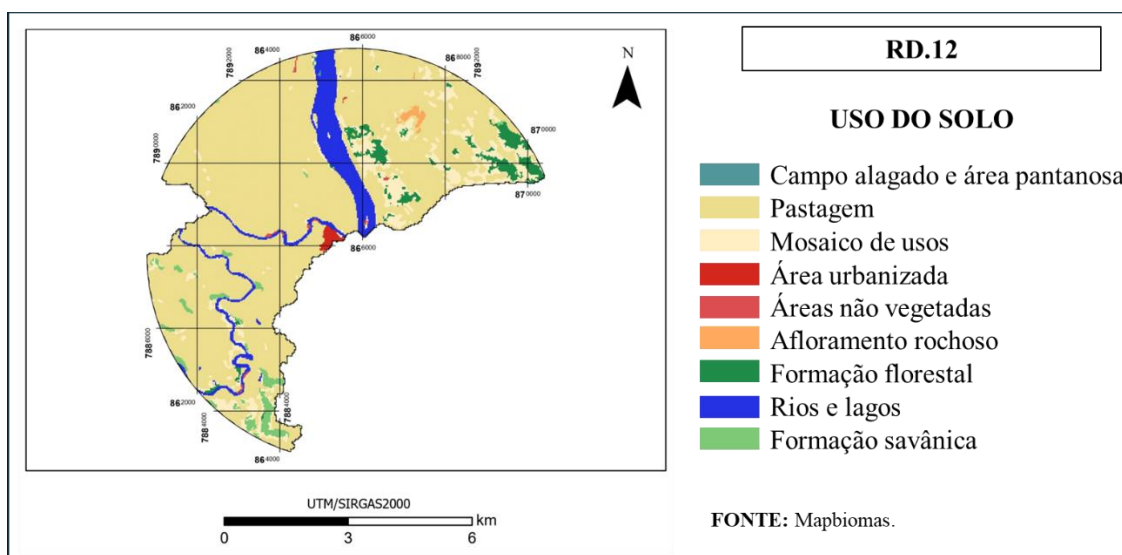


Figura S14. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.12.

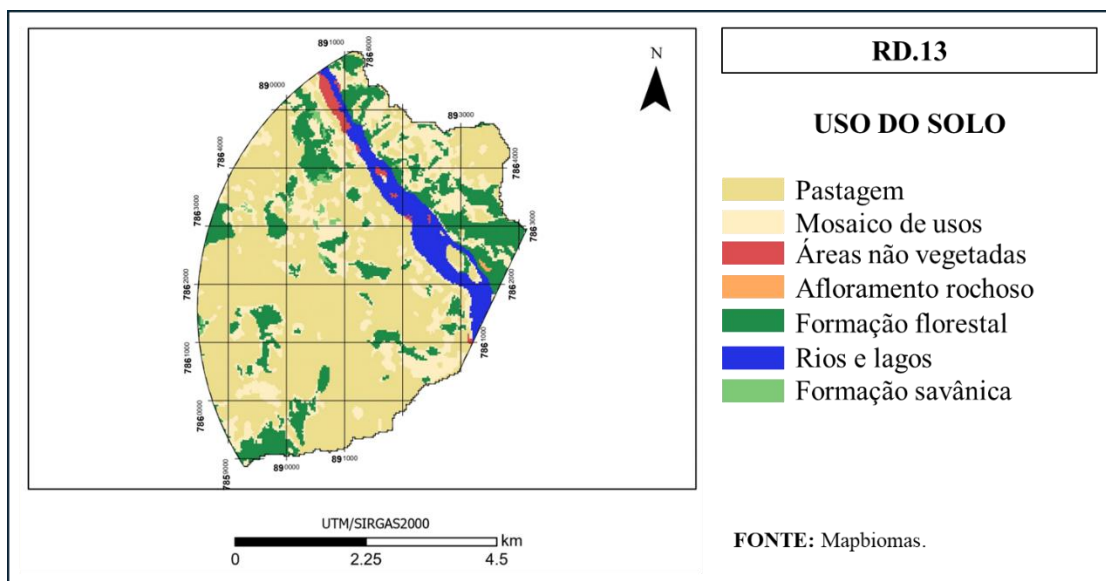


Figura S15. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.13.

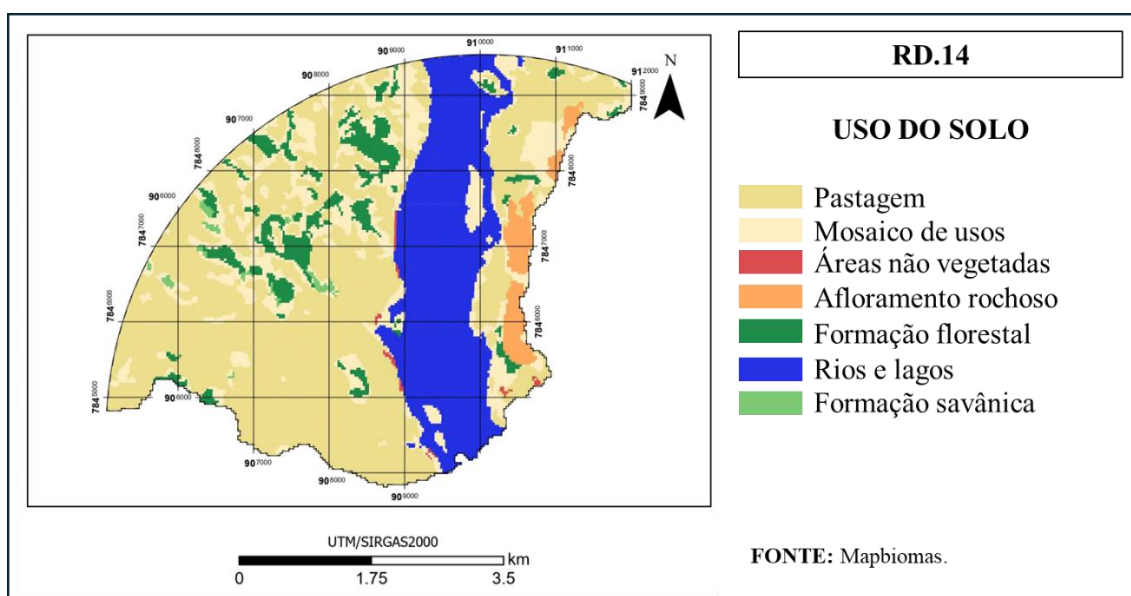


Figura S16. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.14.

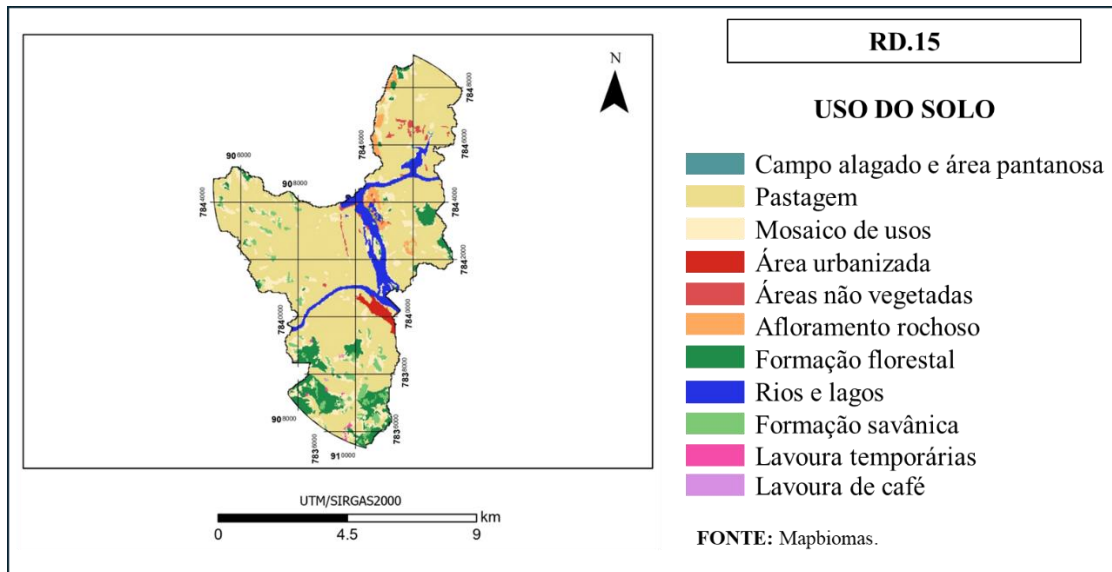


Figura S17. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta RD.15.

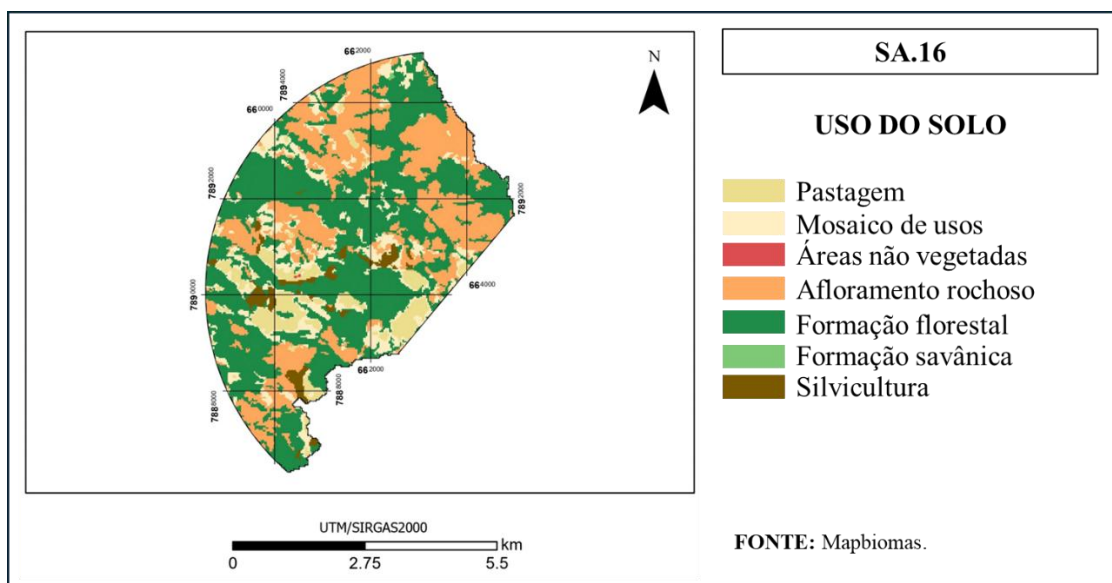


Figura S18. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta SA.16.

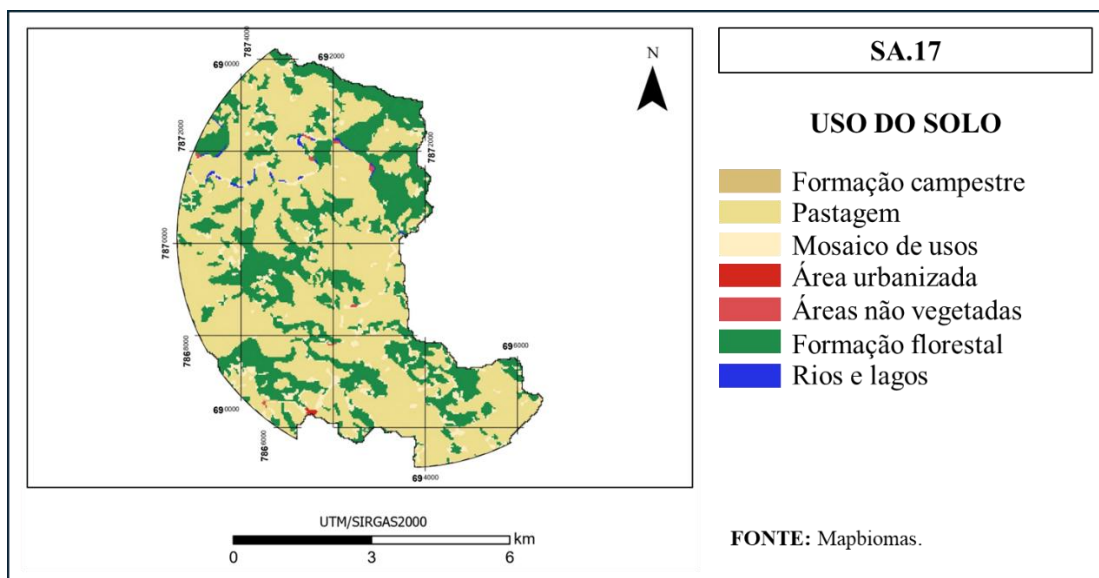


Figura S19. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta SA.17.

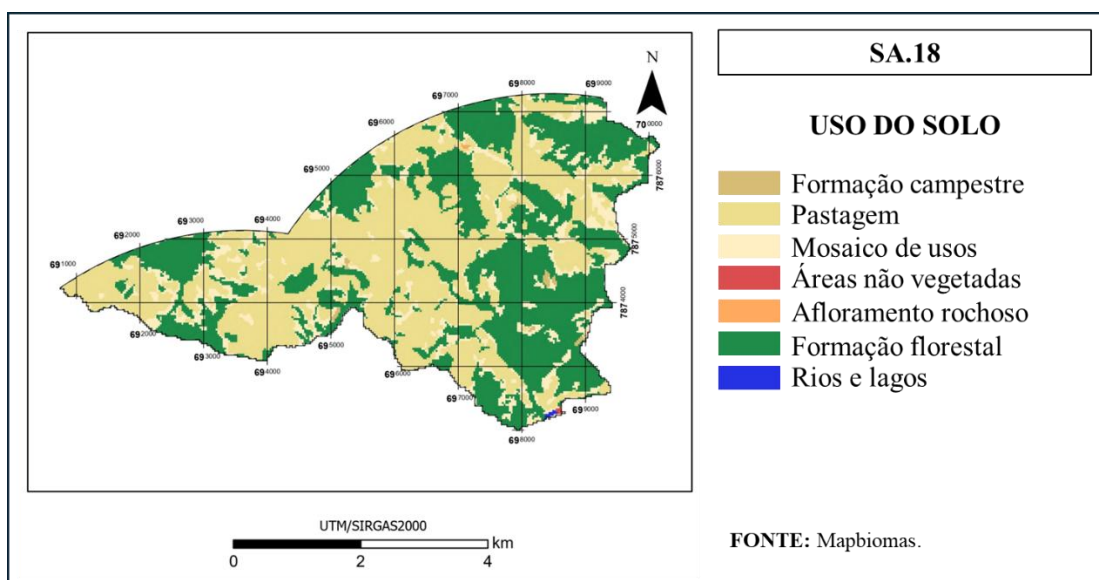


Figura S20. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta SA.18.

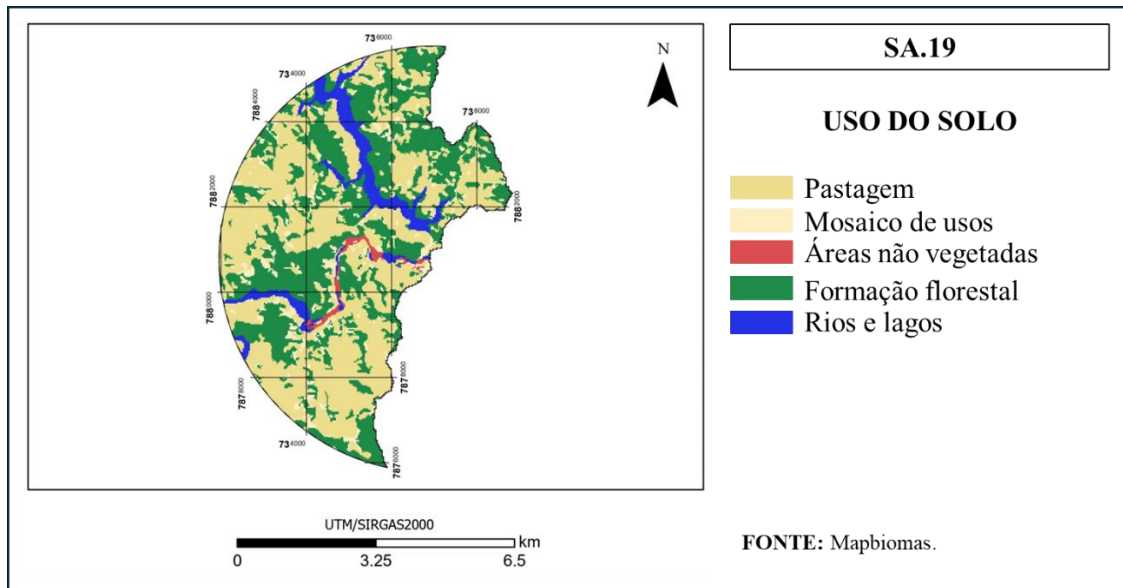


Figura S21. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta SA.19.

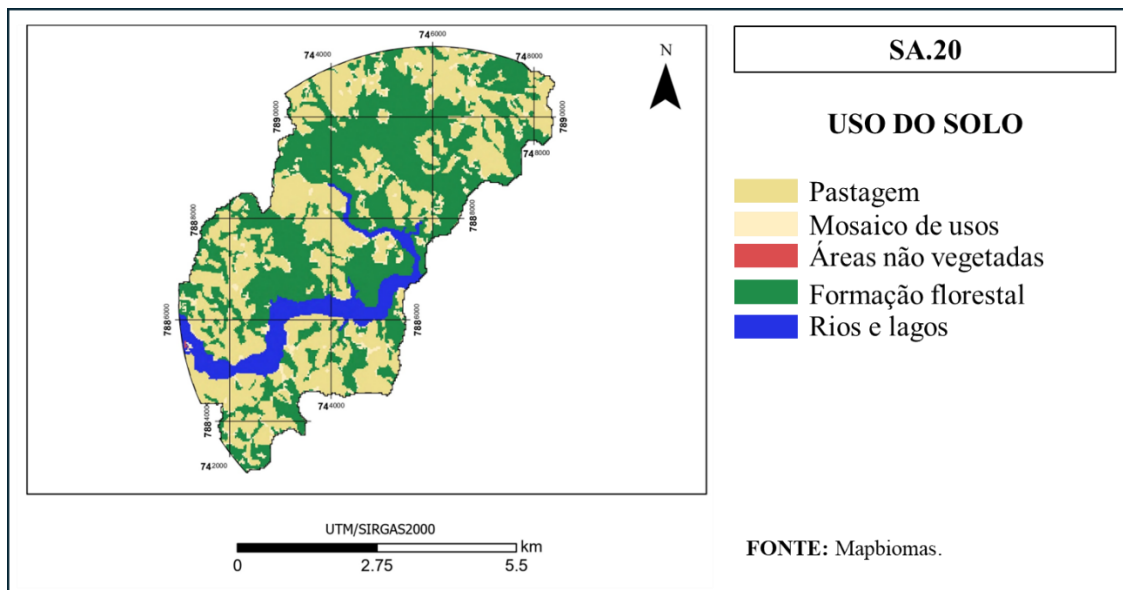


Figura S22. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta SA.20.

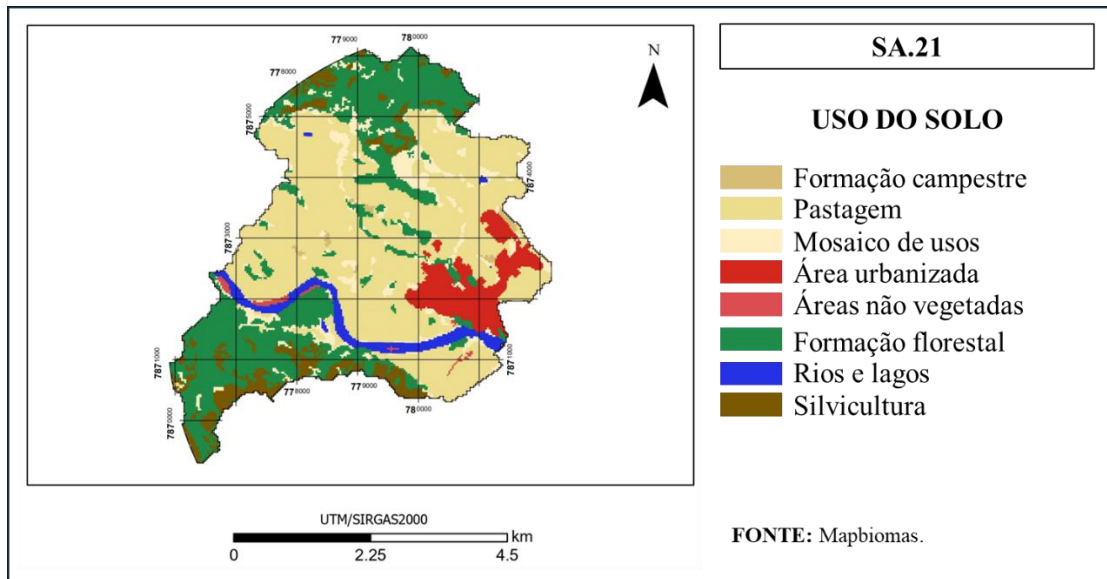


Figura S23. Mapa de uso do solo para o ponto de coleta SA.21.

1ª COLETA															
Amostras	Al	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	P	Pb	U	V	Zn
RD.1	1,12	3,85	0,84		0,92	0,96	0,97	0,71	1,52	0,81		0,93	0,91	0,58	1,74
RD.2		0,70	0,78		0,55		0,82	1,52	1,21	0,60	0,50			0,42	
RD.3	0,75	1,48	0,85		1,48	1,32	0,88	1,01	1,44	1,01		0,69	0,80	0,82	
RD.4		1,34	0,98		1,89	1,50	1,99	1,17	1,41	1,35	0,90	0,92	0,87	1,72	
RD.5	0,73	1,69	1,01		1,50	1,02	0,59	1,13	1,29	1,11	0,78	1,10	0,80	1,19	
RD.6		1,49	1,14		1,82	1,43	0,93	1,19	1,46	1,49	3,51	1,38	1,11	1,73	
RD.7	0,77	0,31	1,18		1,85	2,29	1,20	1,06	1,58	1,84	1,24	1,56	1,09	1,61	
RD.8	0,70	0,48	0,99		0,82	0,80	0,83	0,96	0,74	0,87	0,61	0,86	0,71	1,00	
RD.9	1,18	0,83	0,98		0,56	0,53	0,88	1,02	0,55	0,71	0,59	0,58	0,64	0,78	
RD.10	1,52		0,92	1,17	0,68	0,56	1,03	1,15	0,66	0,70		0,83	0,66	0,83	
RD.11	1,12		0,94				0,66	1,00	1,26		2,76	1,25	3,91		
RD.12	2,03		1,11		1,21	1,07	0,87	0,97	0,72	1,09		1,49	0,82	0,92	
RD.13		1,04	1,10		0,97	1,20	1,04	0,65	0,76	1,25		0,99	0,98	1,56	
RD.14	1,30	0,54	1,07				1,53	0,89	0,18		0,82			0,48	
RD.15	1,13	0,45	1,12		0,33	1,26	0,78	0,56	0,22	1,18	1,09	1,78	0,69	1,22	1,31

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S24. Fator de Enriquecimento da 1ª coleta de águas superficiais.

2ª COLETA													
Amostras	Al	As	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	P	Pb	U	V	Zn
RD.1		1,70	0,42	0,33		0,63	0,34	0,76	0,44	0,39		0,21	
RD.2													
RD.3	0,74	1,89	0,44	0,90	0,40	0,90	0,53	0,97	2,97	0,87		0,56	1,11
RD.4		2,04	0,49	0,99	0,48		0,49	0,86	4,74	1,21	0,65	0,64	2,60
RD.5		2,31	0,54	1,05	0,55	0,99	0,40	0,82	4,78	1,08	0,57	0,69	
RD.6			0,49	0,96	0,42	2,14	0,51	0,80	3,60	0,74		0,66	
RD.7			0,50	1,03	1,02	0,94	0,38	0,83	4,39	1,40	0,76	0,91	
RD.8			0,42	0,43			0,15	0,32	3,90	0,50		0,41	
RD.9			0,39				0,27	0,21	3,46			0,30	
RD.10			0,40	0,21			0,31	0,19	3,64			0,30	
RD.11		2,31	0,41	0,26			0,35	0,17	3,89	0,42		0,33	
RD.12		2,07	0,41	0,28		0,59	0,30	0,20	3,73	1,20		0,35	
RD.13		2,07	0,44	0,24			0,18	0,18	3,73	0,38		0,36	
RD.14			0,45				0,16	0,10	1,35			0,27	
RD.15		1,91	0,41			0,48	0,10	0,06	2,74			0,27	

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S25. Fator de Enriquecimento da 2ª coleta de águas superficiais.

3ª COLETA																			
Amostras	Ag	Al	As	Ba	Be	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Ni	P	Pb	Se	Tl	U	V	Zn
RD.1	1,28		5,88	0,75		2,15	2,53		0,46		2,57	2,58					2,28	1,98	1,30
RD.2		1,14	2,25	0,76		1,96	4,64	0,47	0,68		1,18	4,46	0,44	1,12			2,66	4,21	1,80
RD.3		0,94	13,54	2,56	2,70	11,38	19,18	1,39	0,39	2,22	7,80	21,50	10,33	18,04		3,11	18,55	21,16	3,46
RD.4		0,83	5,27	1,39	1,06	5,58	12,22	0,63	0,32	2,89	3,47	10,13	4,29	6,78	1,45	1,20	7,68	9,35	1,59
RD.5		0,80	1,56	0,62		2,42	1,01	1,17	0,71		3,09	2,33					1,20	1,35	
RD.6		1,50	1,71	0,78		1,27	1,06	0,76	0,56		1,06	1,54					0,66	1,40	
RD.7	1,15	1,29	0,83	0,63		0,79	0,52		0,72		0,80	0,66		1,05				0,62	
RD.8		1,87	0,41	0,63		0,27			0,74		0,35	0,55		0,66				0,54	
RD.9		1,18	0,42	0,62			0,46	0,91	1,16		0,33	0,63		0,78				0,60	
RD.10		2,18	0,52	0,68		0,47	0,64		0,89		0,40	0,75	1,39	0,96			0,73	0,75	2,98
RD.11		2,11	0,64	0,70		0,36	0,58		0,88		0,28	0,76		0,87			0,70	0,66	
RD.12			0,46	0,76		0,41	0,64		0,24		0,33	1,02	0,55	0,97				0,96	1,26
RD.13		1,40	0,77	0,81		0,52	1,08		0,51		0,38	1,27		1,26			0,68	1,38	
RD.14		1,43	0,57	0,79			0,43	0,69	0,51		0,17	0,64	0,67	0,84				0,70	1,11
RD.15		2,26		0,84		0,45	1,56		0,38		0,24	1,91	0,93	1,16			0,84	2,09	1,07

LEGENDA	
Indicador	Fator de Enriquecimento
	FE < 1 Mineral enriquecido
	1 < FE < 5 Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20 Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40 Alto enriquecimento
	FE > 40 Extremamente alto
	< LQ Não se aplica

Figura S26. Fator de Enriquecimento da 3ª coleta de águas superficiais.

4ª COLETA																		
Amostras	Ag	Al	As	Ba	Be	Co	Cr	Cu	Fe	Li	Mn	Ni	P	Pb	Tl	U	V	Zn
RD.1	5,33	1,40	28,62	1,81	1,72	11,28	19,63	3,98	0,60	1,49	9,81	12,63	6,38	16,93	2,21	10,66	10,28	3,96
RD.2	4,05		3,82	0,72		4,31	3,66	1,98	0,26		1,45	3,17	1,52	5,64		1,86	3,64	2,94
RD.3	3,94		4,43	0,77		3,99	3,84	1,19	0,90		2,12	3,56	1,43	4,95		2,25	4,03	2,25
RD.4	3,05		4,04	1,07		5,13	5,13	2,31	0,94		2,48	5,21	2,29	6,92	1,31	2,62	5,78	3,00
RD.5	4,00		4,50	1,37		7,34	6,39	4,10	0,77		2,60	6,39	2,57	8,57	1,50	2,88	6,26	3,97
RD.6	4,35		5,41	1,47	1,32	7,75	7,04	3,32	0,84		3,28	7,44	2,82	9,78	1,83	4,24	7,28	3,44
RD.7	4,42		3,72	1,46		6,26	6,39	1,65	4,96		2,94	6,58	2,79	11,21	2,45	6,14	6,38	2,17
RD.8	6,16		1,49	0,94		3,02	3,39	0,58	0,45		1,08	5,97	2,18	10,15	1,88	5,14	4,73	2,41
RD.9	3,15		1,79	1,17		5,34	3,84	0,88	0,71		1,96	5,64	1,49	10,44	2,68	6,03	4,32	3,95
RD.10	2,84		1,33	0,65		1,48	1,23	1,70	1,06		0,80	1,74		3,45		1,44	1,75	2,07
RD.11	3,29		1,86	1,33	1,34	4,53	4,44	0,86	0,20		1,46	5,98	1,55	14,93	3,69	9,43	5,61	3,47
RD.12	3,42		1,26	0,92		2,16	2,51	0,85	0,63		1,29	2,62		4,05	1,30	2,23	2,67	
RD.13	3,18		1,95	1,15		4,38	2,86	0,86	0,68		1,63	3,32	0,64	6,56	1,29	2,72	3,24	11,65
RD.14	2,72		1,21	0,75		1,09	1,99	1,41	0,75		0,43	2,29		3,18		1,60	2,49	
RD.15	3,25		1,16	0,77		1,00	2,05	0,98	0,56		0,49	2,09		3,19	0,97	1,67	2,29	

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S27. Fator de Enriquecimento da 4ª coleta de águas superficiais.

5ª COLETA													
Amostras	Al	As	Ba	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	U	V	Zn
RD.1		3,67	0,64	1,52	1,06		0,70	3,25	1,54	1,35	1,04	1,08	1,14
RD.2	1,58	0,54	0,39	0,33	0,42		0,91	0,37	0,54	0,64		0,63	1,50
RD.3	1,66	1,61	0,53	1,41	1,28		0,86	1,39	1,53	1,74	1,20	1,79	
RD.4	1,45	1,19	0,62	1,95	1,33	3,72	1,12	1,54	1,29	1,87	0,91	1,42	
RD.5	0,94	1,86	0,64	2,09	0,83		0,76	1,48	1,05	1,39	0,89	1,21	0,94
RD.6	1,54	1,09	0,72	2,57	1,71	3,40	0,37	2,05	2,32	2,03	1,38	3,23	
RD.7	1,86	0,36	0,54	1,18	0,66	2,52	0,26	1,19	0,81	1,43	0,68	0,92	
RD.8	1,60	0,78	0,40	0,34	0,37	3,67	0,80	0,36		0,62		0,47	
RD.9	1,34	0,37	0,41	0,50	0,53		0,58	0,51	0,56	0,80		0,64	
RD.10	1,09	0,35	0,42	0,55	0,82		0,60	0,54	0,71	0,87		0,26	1,23
RD.11	1,13	0,83	0,51	0,63	0,81		0,71	0,67	0,73	1,54	0,69	0,98	3,55
RD.12	1,23	0,75	0,60	0,65	0,84		0,59	0,69	0,99	1,21	0,72	1,27	
RD.13	1,03	0,39	0,65	0,91	1,10		0,41	0,79	1,59	1,61	0,95	1,80	1,80
RD.14			0,55				0,32	0,12		0,72	0,48	0,68	1,20
RD.15	0,72		0,49				0,45	0,10		0,64		0,41	

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S28. Fator de Enriquecimento da 5ª coleta de águas superficiais.

6ª COLETA												
Amostras	Ag	Al	As	Ba	Co	Cu	Fe	Mn	P	Pb	V	Zn
RD.1	2,26	0,84	1,79	0,43		6,41	0,36	0,81	8,16	1,01		
RD.2	4,89		0,68	0,35			0,42	0,08	5,26			1,34
RD.3	2,68		1,04	0,39			0,41	0,54	4,17		0,33	
RD.4			0,71	0,42	0,31		0,46	0,52	3,64		0,42	
RD.5	5,20		0,55	0,43			0,46	0,46	3,25		0,31	
RD.6			0,44	0,42			0,41	0,53	3,14	0,37	0,36	
RD.7			0,32	0,45	0,52		0,39	0,63	2,97		0,45	
RD.8			0,45	0,38			0,25	0,22	2,99		0,40	
RD.9				0,31			0,34	0,15	2,70		0,37	
RD.10				0,31			0,37	0,13	2,86		0,37	
RD.11		0,72		0,32			0,31	0,12	2,73		0,48	
RD.12				0,31			0,36	0,09	2,62		0,41	
RD.13				0,28			0,26	0,09	2,44		0,41	
RD.14				0,30			0,18	0,03	2,48		0,41	
RD.15				0,38			0,15	0,04	2,52		0,45	

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S29. Fator de Enriquecimento da 6ª coleta de águas superficiais.

7ª COLETA									
Amostras	Ag	Al	As	Ba	Co	Fe	Mn	P	Pb
RD.1			3,44	0,38	0,30	0,56	0,76	0,79	1,70
RD.2		1,02	1,02	0,34		0,78	0,18		
RD.3		1,12	0,67	0,42	1,24	0,63	0,70		0,96
RD.4			1,03	0,46	1,37	0,68	0,77		1,28
RD.5		2,07	0,37	0,46	0,93	0,70	0,60		1,19
RD.6		1,34	0,65	0,49	0,82	0,61	0,64		0,73
RD.7			0,32	0,42	0,55		0,50		0,61
RD.8				0,41		0,17	0,28		
RD.9		0,91	0,73	0,42		0,23	0,27		
RD.10			0,44	0,39		0,31	0,24		
RD.11		1,11		0,38		0,26	0,26		
RD.12			0,42	0,39		0,19	0,18		0,99
RD.13		0,70		0,42		0,12	0,16		
RD.14	4,24	1,68	0,63	0,43		0,17			
RD.15		11,43		0,43		0,07	0,05		

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S30. Fator de Enriquecimento da 7ª coleta de águas superficiais.

8ª COLETA															
Amostras	As	Ba	Be	Co	Cr	Fe	Li	Mn	Ni	P	Pb	Tl	U	V	Zn
RD.1	9,73	0,93		2,46	5,84	0,79		6,21	4,05	1,32	4,45		4,22	3,15	1,35
RD.2	1,60	0,53			2,91	0,32		0,48	2,20	1,20	2,71		1,98	2,84	
RD.3	3,25	0,69		1,15	4,49	0,38		2,02	4,69	1,69	3,52		2,61	4,85	
RD.4	3,36	0,86		1,72	4,76	0,58		1,99	3,99	1,65	3,98		2,50	4,96	
RD.5	2,84	0,98		1,76	5,49	0,83		2,00	4,83	2,03	4,49		2,30	5,25	
RD.6	3,88	1,38	1,03	4,29	7,78	0,77		3,11	7,40	2,50	6,96	1,31	3,51	8,63	
RD.7	3,38	1,44	1,55	5,13	10,43	0,37	1,37	3,63	10,16	3,44	10,32	2,00	5,55	11,02	1,17
RD.8	3,08	1,43	1,73	3,83	6,91	0,29	1,73	2,06	11,79	3,47	13,96	2,66	9,31	12,00	1,54
RD.9	3,47	1,75	2,56	6,01	11,53	0,32	1,71	3,82	13,93	4,67	17,77	4,25	11,95	14,74	1,56
RD.10	3,71	2,00	3,22	9,07	16,68	0,24	2,18	5,98	18,44	6,12	19,78	3,82	13,47	21,37	3,04
RD.11	4,91	2,16	2,82	8,40	16,21	0,26	2,51	5,22	16,64	5,57	22,65	4,30	13,95	19,37	4,23
RD.12	3,84	4,32	6,16	14,18	23,12	0,45	10,93	7,04	23,91	5,95	22,94	8,08	13,23	26,06	5,80
RD.13	3,97	5,85	6,68	13,80	24,03	0,37	10,64	6,01	24,62	6,95	25,65	9,74	17,17	25,98	7,27
RD.14	0,81	0,52			0,65	0,72		0,23	0,50	0,61	1,32		1,21	1,14	
RD.15	0,57	0,45			0,57	1,03		0,19	0,50	0,70	2,20		0,79	0,99	

LEGENDA	
Indicador	Fator de Enriquecimento
	FE < 1 Mineral enriquecido
	1 < FE < 5 Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20 Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40 Alto enriquecimento
	FE > 40 Extremamente alto
	< LQ Não se aplica

Figura S31. Fator de Enriquecimento da 8ª coleta de águas superficiais.

9ª COLETA												
Amostras	Al	As	Ba	Co	Cr	Fe	Mn	Pb	Sb	Se	U	V
RD.1	2,65	1,22	0,33		0,47	0,55	0,85	0,33				0,21
RD.2	1,93		0,32			0,89	0,10	0,33				0,20
RD.3		1,82	0,37	0,44	0,63	0,80	1,09	0,97			0,52	0,69
RD.4	0,99	0,95	0,42	1,08	0,84	0,82	0,93	0,96				0,99
RD.5	0,89	0,75	0,47	0,56	1,11	0,48	0,83	1,13				1,02
RD.6	0,73	1,26	0,53	0,77	1,19	0,44	1,00	1,21			0,56	1,39
RD.7	0,71	1,15	0,52	0,60	1,44	0,69	1,09	1,89			1,03	1,33
RD.8	1,44	0,15	0,40			0,92	0,26	1,25				0,45
RD.9	1,24	0,38	0,44		0,43	0,82	0,28	0,77				0,36
RD.10	2,56		0,42			0,62	0,34	0,87	1,66		0,47	0,54
RD.11	1,31		0,41			0,81	0,23	0,77			0,41	0,34
RD.12	2,99		0,47		0,51	1,53	0,35	1,19			0,62	0,69
RD.13	1,67		0,54		0,82	0,83	0,38	1,53		3,63	0,81	0,81
RD.14	1,66		0,50		0,39	0,95	0,08	0,72		1,76	0,47	0,36
RD.15	2,88		0,50			0,92	0,09	0,80		3,27	0,52	0,49

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S32. Fator de Enriquecimento da 9ª coleta de águas superficiais.

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn.

<b>Elemento</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Ano coleta</b>	<b>Ref</b>
<b>Ag</b>	2,5	2,5	2018	Renova
	2,5	2,5	2019	Renova
	2,5	2,5	2020	Renova
	1,0	1,0	2021	Renova
	1,0	1,0	2022	Renova
	<0,14	0,91	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>As</b>	0,4	8,0	2010/2014	IGAM
	4,6	4,1	Apr-15	IGAM
	NA	35,8 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	NA	0,44 <sup>b</sup>	2015	Segura et al., 2016
	1,0	2,5		IGAM
	0,2	0,5		Carvalho et al., 2018
	0,3	0,9	2016	Hatje et al., 2017
	0,5	0,9		Maia, 2017 - dissertação
	NA	20,8 <sup>a</sup>		Silva et al., 2018
	1,0	3,1	2017	IGAM
	1,0	3,2	2018	IGAM
	0,9	6,3		Renova
	1,0	2,9		IGAM
	0,7	4,0	2019	Renova
	<1	10		Yamamoto et al., 2023
	0,7	7,8	2020	Renova
	38	74		Longhini et al., 2022
	1,0	1,0	2021	Renova
	1,0	1,0	2022	Renova
	0,33	35,22	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn (continuação).

	100	123	2010/2014	IGAM
	100	105	Apr-15	IGAM
	NA	374 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	NA	20,6 <sup>b</sup>	2015	Segura et al., 2016
	100	176	2016	IGAM
	9	43	2016	Hatje et al., 2017
	<33	<33	2016	Maia, 2017 - dissertação
	<9	90	2016	Vergilio et al., 2021
	8	236	2016	Cordeiro et al., 2019
<b>Al</b>	73	247	2017	IGAM
	45	141	2018	IGAM
	27	152	2018	Renova
	50	115	2019	IGAM
	37	150	2019	Renova
	40	2180	2019	Yamamoto et al., 2023
	48	106	2020	Renova
	44	52	2020	Longhini et al., 2022
	56	157	2021	Renova
	39	189	2022	Renova
	<30,1	219	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
	70	70	2010/2014	IGAM
	SD	SD	Apr-15	IGAM
	SD	SD	Nov-15	IGAM
	SD	SD	2016	IGAM
	SD	SD	2017	IGAM
	SD	SD	2018	IGAM
	SD	SD	2019	IGAM
<b>B</b>	25,00	40,64	2018	Renova
	25,00	51,08	2019	Renova
	25,00	25,75	2020	Renova
	11,55	15,82	2021	Renova
	10,00	12,17	2022	Renova
	<6,45	<6,45	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn (continuação).

<b>Ba</b>	31,8	50,6	2010/2014	IGAM
	SD	SD	Apr-15	IGAM
	NA	18,7 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	NA	350 <sup>c</sup>	2015	Viana et al.,2020
	56	108	2015	Vergilio et al., 2021
	47	683	2016	IGAM
	20	42	2016	Vergilio et al., 2021
	25	116	2016	Cordeiro et al., 2019
	22,3	51,3	2017	IGAM
	21,3	47,2	2018	IGAM
	28	76	2018	Renova
	19,9	33,8	2019	IGAM
	30	51	2019	Renova
	28	73	2020	Renova
	34	119	2021	Renova
31	83	2022	Renova	
6	131	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>	
<b>Be</b>	0,50	0,67	2018	Renova
	0,50	0,50	2019	Renova
	0,50	0,50	2020	Renova
	1,00	1,00	2021	Renova
	1,00	1,00	2022	Renova
	<0,24	1,2	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>Cd</b>	0,5	0,5	2010/2014	IGAM
	0,5	0,5	Apr-15	IGAM
	NA	0,5 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	NA	0,27 <sup>b</sup>	2015	Segura et al., 2016
	0,5	0,5	2016	IGAM
	0,1	0,2	2016	Carvalho et al., 2018
	3	7	2016	Foesch et al., 2020
	<0,43	<0,43	2016	Maia, 2017 - dissertação
	<0,1	<0,1	2016	Vergilio et al., 2021
	NA	0,38 <sup>a</sup>	2016	Silva et al., 2018
	0,5	0,5	2017	IGAM
	0,5	8,0	2018	IGAM
	0,5	0,6	2018	Renova
	0,5	0,7	2019	IGAM
	0,5	0,5	2019	Renova
<1	<1	2019	Yamamoto et al., 2023	
0,5	0,5	2020	Renova	
0,26	0,77	2020	Longhini et al., 2022	
1,0	1,0	2021	Renova	

1,0	1,0	2022	Renova
<0,16	0,4	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn (continuação).

<b>Co</b>	<0,32	<0,32	2016	Maia, 2017 - dissertação
	NA	2,1 <sup>a</sup>	2016	Silva et al., 2018
	0,5	1,5	2018	Renova
	0,6	1,3	2019	Renova
	<1	<1	2019	Yamamoto et al., 2023
	0,6	2,6	2020	Renova
	0,16	1,05	2020	Longhini et al., 2022
	10	10	2021	Renova
	10	10	2022	Renova
	<0,16	15	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>Cr</b>	40	40	2010/2014	IGAM
	40	40	Apr-15	IGAM
	NA	40 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	NA	0,26 <sup>b</sup>	2016	Segura et al., 2016
	40	70	2016	IGAM
	0,5	4,1	2016	Carvalho et al., 2018
	0,13	0,33	2016	Hatje et al., 2017
	<0,15	<0,15	2016	Maia, 2017 - dissertação
	<0,3	<0,3	2016	Vergilio et al., 2021
	<0,3	<0,3	2016	Cordeiro et al., 2019
	2	7	2016	Foesch et al., 2020
	NA	6,5 <sup>a</sup>	2016	Silva et al., 2018
	40	40	2017	Igan
	40	40	2018	IGAM
	6,0	11	2018	Renova
	40	40	2019	IGAM
	5,0	8	2019	Renova
	<1	1	2019	Yamamoto et al., 2023
	5,0	6	2020	Renova
	6,8	11	2020	Longhini et al., 2022
10	15	2021	Renova	
10	20	2022	Renova	
<1,2	67	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>	

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn (continuação).

<b>Cu</b>	4	4	2010/2014	IGAM
	4	4	Apr-15	IGAM
	NA	4 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	4	5	2016	IGAM
	3,4	7,3	2016	Carvalho et al., 2018
	0,26	1,8	2016	Hatje et al., 2017
	10	24	2016	Foesch et al., 2020
	<0,38	<0,38	2016	Maia, 2017 - dissertação
	<0,6	<0,6	2016	Vergilio et al., 2021
	NA	0,44 <sup>a</sup>	2016	Silva et al., 2018
	4	8,2	2017	IGAM
	4	5	2018	IGAM
	0,7	1,2	2018	Renova
	4	5	2019	IGAM
	0,6	4,9	2019	Renova
	<1	10	2019	Yamamoto et al., 2023
	0,6	1,9	2020	Renova
	0,72	4,05	2020	Longhini et al., 2022
	1,0	1,0	2021	Renova
	1,0	1,1	2022	Renova
<0,6	78	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>	
<b>Fe</b>	137	202	2010/2014	IGAM
	40	279	Apr-15	IGAM
	NA	1122 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	NA	1116 <sup>a</sup>	2016	Silva et al., 2018
	154	240	2016	IGAM
	220	1473	2016	Carvalho et al., 2018
	31,6	69,2	2016	Hatje et al., 2017
	20	570	2016	Vergilio et al., 2021
	20	161	2016	Cordeiro et al., 2019
	121	287	2017	IGAM
	206	314	2018	IGAM
	107	270	2018	Renova
	159	331	2019	IGAM
	151	297	2019	Renova
	90	1470	2019	Yamamoto et al., 2023
	160	328	2020	Renova
	67	189	2020	Longhini et al., 2022
	127	3253	2020	Foesch et al., 2020
	246	408	2021	Renova
	224	437	2022	Renova
28	2029	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>	

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn (continuação).

<b>Hg</b>	0,2	0,2	2010/2014	IGAM
	0,2	0,2	Apr-15	IGAM
	NA	0,2 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	0,2	0,24	2016	IGAM
	<0,1	<0,1	2016	Carvalho et al., 2018
	<0,45	<0,45	2016	Maia, 2017 - dissertação
	0,2	0,2	2017	IGAM
	0,2	0,2	2018	IGAM
	0,05	0,05	2018	Renova
	0,2	0,2	2019	IGAM
	0,05	0,05	2019	Renova
	0,05	0,05	2020	Renova
	0,1	0,1	2021	Renova
	0,1	0,1	2022	Renova
<0,11	<0,11	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>	
<b>Li</b>	<1	4,0	2019	Yamamoto et al., 2023
	<1,56	4,5	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>Mn</b>	33	428	2010/2014	IGAM
	27	206	Apr-15	IGAM
	NA	9170 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	NA	135 <sup>b</sup>	2015	Segura et al., 2016
	70	1020	2015	Vergilio et al., 2021
	290	910	2016	IGAM
	23	522	2016	Carvalho et al., 2018
	1,63	110	2016	Hatje et al., 2017
	<0,4	150	2016	Vergilio et al., 2021
	76	84	2016	Cordeiro et al., 2019
	51	262	2016	Foesch et al., 2020
	45	727	2017	IGAM
	42	502	2018	IGAM
	64	307	2018	Renova
	19	160	2019	IGAM
	22	229	2019	Renova
	13	453	2019	Yamamoto et al., 2023
	21	295	2020	Renova
	30	254	2021	Renova
	58	267	2022	Renova
1,12	1109	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>	

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn (continuação).

	4	5	2010/2014	IGAM
	4	4	Apr-15	IGAM
	NA	13 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	NA	0,59 <sup>b</sup>	2015	Segura et al., 2016
	<0,5	<0,5	2015	Vergilio et al., 2021
	4	18	2016	IGAM
	1,1	2,9	2016	Carvalho et al., 2018
	0,49	1,12	2016	Hatje et al., 2017
	<3,8	<3,8	2016	Maia, 2017 - dissertação
	<0,5	<0,5	2016	Vergilio et al., 2021
	<0,3	12	2016	Cordeiro et al., 2019
<b>Ni</b>	4	14	2016	Foesch et al., 2020
	NA	2,4 <sup>a</sup>	2016	Silva et al., 2018
	4	32	2017	IGAM
	4	5	2018	IGAM
	5	6	2018	Renova
	4	5	2019	Igan
	5	5	2019	Renova
	<1	<1	2019	Yamamoto et al., 2023
	5	6	2020	Renova
	8,37	360,08	2020	Longhini et al., 2022
	10	11	2021	Renova
	10	15	2022	Renova
	<3,09	133	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
	36	72	2010/2014	IGAM
	20	180	Apr-15	IGAM
	SD	SD	Nov-15	IGAM
	42,5	152	2016	IGAM
	28,6	103	2017	IGAM
	34,2	69	2018	IGAM
<b>P</b>	6	37	2018	Renova
	26	70	2019	IGAM
	5	14	2019	Renova
	5	13	2020	Renova
	23	88	2021	Renova
	30	153	2022	Renova
	<11,93	282	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn (continuação).

	5	6,6	2010/2014	IGAM
	0,5	5	Apr-15	IGAM
	NA	35,1 <sup>a</sup>	Nov-15	IGAM
	<1,9	<1,9	2015	Vergilio et al., 2021
	5,5	19,8	2016	IGAM
	0,4	0,5	2016	Carvalho et al., 2018
	0,19	1,99	2016	Hatje et al., 2017
	<11,6	<11,6	2016	Maia, 2017 - dissertação
	<1,9	<1,9	2016	Vergilio et al., 2021
	<4	<4	2016	Cordeiro et al., 2019
<b>Pb</b>	33	41	2016	Foesch et al., 2020
	NA	3,1 <sup>a</sup>	2016	Silva et al., 2018
	5,4	12,9	2017	IGAM
	5,3	10,3	2018	IGAM
	5	7	2018	Renova
	5	5,4	2019	IGAM
	5	6	2019	Renova
	<1	9	2019	Yamamoto et al., 2023
	5	6	2020	Renova
	1,68	4,76	2020	Longhini et al., 2022
	10	10	2021	Renova
	10	10	2022	Renova
	<0,35	51	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
	<b>Sb</b>	0,5	0,7	2018
0,5		1,0	2019	Renova
0,5		0,6	2020	Renova
1,0		1,0	2021	Renova
1,0		1,0	2022	Renova
<2,69		5,8	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>Se</b>	0,5	0,6	2018	Renova
	0,5	0,5	2019	Renova
	0,5	0,8	2020	Renova
	10	10	2021	Renova
	10	10	2022	Renova
	<5,29	12,7	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>Tl</b>	<0,06	0,9	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>U</b>	<0,07	3,0	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>V</b>	7	13	2018	Renova
	5	8	2019	Renova
	<10	90	2019	Yamamoto et al., 2023
	6	9	2020	Renova
	0,43	0,69	2020	Longhini et al., 2022

	10	16	2021	Renova
	10	22	2022	Renova
	<0,56	83	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

Tabela S7. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn (continuação).

	23	40	2010/2014	IGAM
	20	20	Apr-15	IGAM
	SD	SD	Nov-15	IGAM
	10	99	2015	Vergilio et al., 2021
	NA	6,6 <sup>b</sup>	2015	Segura et al., 2016
	20	83,1	2016	IGAM
	10,2	167,2	2016	Carvalho et al., 2018
	<11,3	47,3	2016	Maia, 2017 - dissertação
	<1,8	31	2016	Vergilio et al., 2021
	22	34	2016	Cordeiro et al., 2019
<b>Zn</b>	NA	68,5 <sup>a</sup>	2016	Silva et al., 2018
	20	47	2017	IGAM
	20	72	2018	IGAM
	20	45	2019	IGAM
	7	19	2018	Renova
	7	22	2019	Renova
	<1	9	2019	Yamamoto et al., 2023
	5	30	2020	Renova
	13,45	87,43	2020	Longhini et al., 2022
	44	64	2021	Renova
	46	72	2022	Renova
	<9,88	168	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

NA: Não se aplica; SD: Sem dados; <sup>a</sup>Apenas rio do Carmo; <sup>b</sup>Apenas rio Galaxo do Norte; <sup>c</sup>Apenas rio Doce (estuário);

1ª COLETA			
Amostras	Fe	Mn	P
RD.1	-0,03	0,59	
RD.2	1,07	0,26	-0,87
RD.3	0,38	0,50	
RD.4	0,59	0,47	-0,76
RD.5	0,55	0,34	-0,79
RD.6	0,62	0,52	-0,05
RD.7	0,44	0,65	-0,67
RD.8	0,31	-0,23	-0,84
RD.9	0,39	-0,42	-0,84
RD.10	0,57	-0,32	
RD.11	0,37	0,31	-0,26
RD.12	0,32	-0,25	
RD.13	-0,12	-0,20	
RD.14	0,21	-0,82	-0,78
RD.15	-0,23	-0,77	-0,71
SA.16	0,94	-0,85	
SA.17	0,71	-0,76	-0,46
SA.18	0,57	-0,74	
SA.19	-0,66	10,09	1,02
SA.20	-0,81	-0,90	0,09
SA.21	0,22	-0,65	

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S33. Grau de contaminação da 1ª coleta para águas superficiais.

2ª COLETA		
Amostras	Mn	P
RD.1	-0,21	
RD.2	-1,00	
RD.3	0,01	-0,20
RD.4	-0,10	0,28
RD.5	-0,14	0,29
RD.6	-0,17	-0,03
RD.7	-0,14	0,18
RD.8	-0,66	0,05
RD.9	-0,79	-0,07
RD.10	-0,80	-0,02
RD.11	-0,82	0,05
RD.12	-0,79	0,00
RD.13	-0,81	0,00
RD.14	-0,90	-0,64
RD.15	-0,93	-0,26
SA.16	-0,88	-0,05
SA.17	-0,82	-0,06
SA.18	-0,82	-0,16
SA.19	1,87	-0,93
SA.20	-0,92	-0,23
SA.21	-0,21	0,68

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S34. Grau de contaminação da 2ª coleta para águas superficiais.

3ª COLETA							
Amostras	Al	As	Fe	Mn	Ni	P	Pb
RD.1		-0,28	-0,38	1,68	-0,36		
RD.2	-0,49	-0,72	-0,07	0,23	0,10		-0,88
RD.3	-0,58	0,67	-0,47	7,12	4,30	1,78	1,01
RD.4	-0,63	-0,35	-0,56	2,61	1,50	0,16	-0,24
RD.5	-0,64	-0,81	-0,03	2,22	-0,43		
RD.6	-0,32	-0,79	-0,24	0,10	-0,62		
RD.7	-0,42	-0,90	-0,02	-0,16	-0,84		-0,88
RD.8	-0,16	-0,95	0,01	-0,64	-0,86		-0,93
RD.9	-0,47	-0,95	0,58	-0,66	-0,84		-0,91
RD.10	-0,02	-0,94	0,21	-0,59	-0,82	-0,63	-0,89
RD.11	-0,05	-0,92	0,20	-0,71	-0,81		-0,90
RD.12		-0,94	-0,67	-0,66	-0,75	-0,85	-0,89
RD.13	-0,37	-0,91	-0,30	-0,60	-0,69		-0,86
RD.14	-0,36	-0,93	-0,30	-0,83	-0,84	-0,82	-0,91
RD.15	0,02		-0,48	-0,75	-0,53	-0,75	-0,87
SA.16			0,35	-0,67			
SA.17	-0,26		0,71	-0,60	-0,86		-0,91
SA.18	-0,37	-0,95	0,07	-0,09	-0,35	-0,82	-0,26
SA.19			-0,42	1,45			
SA.20			-0,39	-0,92			
SA.21			-0,17	-0,74			

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S35. Grau de contaminação da 3ª coleta para águas superficiais.

4ª COLETA						
Amostras	As	Fe	Mn	Ni	P	Pb
RD.1	2,52	-0,18	9,22	2,12	0,72	0,89
RD.2	-0,53	-0,65	0,51	-0,22	-0,59	-0,37
RD.3	-0,45	0,23	1,21	-0,12	-0,61	-0,45
RD.4	-0,50	0,28	1,58	0,29	-0,38	-0,23
RD.5	-0,45	0,06	1,70	0,58	-0,31	-0,04
RD.6	-0,33	0,14	2,41	0,84	-0,24	0,09
RD.7	-0,54	5,76	2,06	0,62	-0,25	0,25
RD.8	-0,82	-0,39	0,13	0,47	-0,41	0,13
RD.9	-0,78	-0,03	1,04	0,39	-0,60	0,16
RD.10	-0,84	0,45	-0,17	-0,57		-0,62
RD.11	-0,77	-0,73	0,52	0,48	-0,58	0,67
RD.12	-0,85	-0,14	0,34	-0,35		-0,55
RD.13	-0,76	-0,08	0,69	-0,18	-0,83	-0,27
RD.14	-0,85	0,02	-0,55	-0,44		-0,64
RD.15	-0,86	-0,24	-0,49	-0,48		-0,64
SA.16		0,88	-0,74	-0,73		-0,72
SA.17		0,86	-0,66	-0,68		-0,78
SA.18		0,24	-0,11	-0,09	-0,36	-0,43
SA.19	-0,80	-0,17	1,08	2,59	1,25	4,13
SA.20		0,96	-0,81	-0,79		-0,53
SA.21	-0,88	-0,40	1,36	1,56	1,05	2,21

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S36. Grau de contaminação da 4ª coleta para águas superficiais.

5ª COLETA			
Amostras	Al	Fe	Mn
RD.1		-0,04	2,39
RD.2	-0,29	0,24	-0,62
RD.3	-0,25	0,17	0,44
RD.4	-0,34	0,53	0,60
RD.5	-0,57	0,04	0,54
RD.6	-0,31	-0,49	1,13
RD.7	-0,16	-0,65	0,24
RD.8	-0,28	0,09	-0,63
RD.9	-0,40	-0,21	-0,46
RD.10	-0,51	-0,19	-0,44
RD.11	-0,49	-0,03	-0,30
RD.12	-0,44	-0,19	-0,28
RD.13	-0,54	-0,44	-0,18
RD.14		-0,56	-0,87
RD.15	-0,68	-0,39	-0,90
SA.16	-0,67	0,18	-0,68
SA.17	-0,40	-0,07	-0,52
SA.18	-0,58	-0,25	-0,49
SA.19		-0,27	20,82
SA.20	-0,64	0,08	-0,66
SA.21	0,71	0,31	-0,09

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S37. Grau de contaminação da 5ª coleta para águas superficiais.

6ª COLETA		
Amostras	Mn	P
RD.1	-0,15	1,20
RD.2	-0,92	0,42
RD.3	-0,44	0,12
RD.4	-0,46	-0,02
RD.5	-0,52	-0,13
RD.6	-0,45	-0,15
RD.7	-0,34	-0,20
RD.8	-0,77	-0,20
RD.9	-0,85	-0,27
RD.10	-0,86	-0,23
RD.11	-0,88	-0,27
RD.12	-0,91	-0,29
RD.13	-0,91	-0,34
RD.14	-0,97	-0,33
RD.15	-0,96	-0,32
SA.16	-0,90	-0,32
SA.17	-0,82	-0,35
SA.18	-0,80	-0,35
SA.19	3,69	-0,37
SA.20	-0,94	-0,34
SA.21	-0,76	-0,34

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S38. Grau de contaminação da 6ª coleta para águas superficiais.

7 <sup>a</sup> COLETA		
Amostras	Al	Fe
RD.1		-0,23
RD.2	-0,54	0,07
RD.3	-0,49	-0,14
RD.4		-0,08
RD.5	-0,07	-0,04
RD.6	-0,40	-0,17
RD.7		
RD.8		-0,76
RD.9	-0,59	-0,69
RD.10		-0,57
RD.11	-0,50	-0,64
RD.12		-0,74
RD.13	-0,68	-0,83
RD.14	-0,24	-0,76
RD.15	4,16	-0,90
SA.16	-0,20	0,99
SA.17	-0,22	0,17
SA.18	0,98	0,37
SA.19	0,24	0,31
SA.20	-0,24	-0,34
SA.21	-0,52	-0,53

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S39. Grau de contaminação da 7<sup>a</sup> coleta para águas superficiais.

8ª COLETA					
Amostras	Fe	Mn	Ni	P	Pb
RD.1	0,08	5,47	0,00	-0,64	-0,50
RD.2	-0,56	-0,50	-0,46	-0,68	-0,70
RD.3	-0,48	1,10	0,16	-0,55	-0,61
RD.4	-0,20	1,08	-0,01	-0,55	-0,56
RD.5	0,14	1,08	0,19	-0,45	-0,50
RD.6	0,05	2,24	0,83	-0,33	-0,22
RD.7	-0,50	2,79	1,51	-0,07	0,15
RD.8	-0,61	1,14	1,91	-0,06	0,56
RD.9	-0,57	2,98	2,44	0,26	0,98
RD.10	-0,67	5,23	3,55	0,65	1,21
RD.11	-0,64	4,44	3,11	0,50	1,53
RD.12	-0,39	6,33	4,90	0,60	1,56
RD.13	-0,49	5,26	5,08	0,87	1,86
RD.14	-0,02	-0,76		-0,84	-0,85
RD.15	0,41	-0,80		-0,81	-0,75
SA.16	0,15	-0,63		-0,78	-0,88
SA.17	-0,11	-0,49	-0,76	-0,79	-0,74
SA.18	-0,02	-0,45	-0,78	-0,85	-0,72
SA.19					
SA.20					
SA.21	-0,63	0,83	1,60	0,01	1,58

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S40. Grau de contaminação da 8ª coleta para águas superficiais.

9ª COLETA			
Amostras	Al	Fe	Mn
RD.1	0,20	-0,25	-0,11
RD.2	-0,13	0,22	-0,90
RD.3		0,09	0,13
RD.4	-0,55	0,12	-0,03
RD.5	-0,60	-0,34	-0,13
RD.6	-0,67	-0,40	0,04
RD.7	-0,68	-0,06	0,14
RD.8	-0,35	0,26	-0,73
RD.9	-0,44	0,12	-0,71
RD.10	0,16	-0,16	-0,65
RD.11	-0,41	0,11	-0,76
RD.12	0,35	1,09	-0,64
RD.13	-0,24	0,13	-0,60
RD.14	-0,25	0,30	-0,92
RD.15	0,30	0,25	-0,91
SA.16	-0,48	-0,17	-0,86
SA.17	0,07	-0,02	-0,81
SA.18	-0,46	-0,09	-0,82
SA.19	-0,66	-0,16	0,37
SA.20	-0,55	-0,02	-0,74
SA.21	-0,52	0,30	-0,26

LEGENDA		
Indicador	Grau de Contaminação	
	GC < 1	Poluição baixa
	1 < GC < 3	Poluição moderada
	GC > 3	Poluição alta
	< LQ	Não se aplica

Figura S41. Grau de contaminação da 9ª coleta para águas superficiais.

<b>Elementos</b>	<b>1ª Coleta</b>	<b>2ª Coleta</b>	<b>3ª Coleta</b>	<b>4ª Coleta</b>	<b>5ª Coleta</b>	<b>6ª Coleta</b>	<b>7ª Coleta</b>	<b>8ª Coleta</b>	<b>9ª Coleta</b>
<b>Al</b>	-12,24	-14,95	-9,28	-14,35	-8,93	-14,58	-3,50	-14,80	-6,60
<b>As</b>	-18,96	-17,98	-16,47	-12,36	-18,98	-19,83	-19,50	-14,29	-19,61
<b>Cr</b>	-19,86	-20,46	-17,68	-14,89	-18,90	-20,51	-20,53	-11,02	-20,21
<b>Fe</b>	6,43	-12,34	-2,37	6,85	-2,15	-10,59	-6,51	-6,39	1,31
<b>Mn</b>	6,81	-10,04	6,81	20,35	19,04	-10,92	2,68	34,34	-9,89
<b>Ni</b>	-16,56	-18,53	-7,20	5,29	-14,69	-18,40	-18,40	18,63	-18,40
<b>P</b>	-12,96	-3,00	-14,26	-8,31	-18,49	-3,08	-18,52	-6,50	-18,49
<b>Pb</b>	-19,04	-19,73	-16,06	2,27	-18,26	-19,96	-19,23	0,39	-18,60

Figura S52. Grau de contaminação por coleta dos elementos acima do máximo permitido pela resolução CONAMA 357/2005 para águas superficiais.

Tabela S8. Determinação de Be, Cd, Co, Cu, Li, Se, Tl e U ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna.

Amostra	Coleta	Analito							
		Be	Cd	Co	Cu	Li	Se	Tl	U
RD.1	1 <sup>a</sup>	0,117 $\pm$ 0,031	< LQ	2,22 $\pm$ 0,67	< LQ	0,827 $\pm$ 0,019	< LQ	< LQ	0,579 $\pm$ 0,087
	2 <sup>a</sup>	0,216 $\pm$ 0,045	< LQ	3,33 $\pm$ 0,09	< LQ	1,89 $\pm$ 0,22	< LQ	< LQ	0,684 $\pm$ 0,010
	3 <sup>a</sup>	0,184 $\pm$ 0,033	< LQ	1,97 $\pm$ 0,07	< LQ	0,721 $\pm$ 0,151	< LQ	< LQ	0,779 $\pm$ 0,109
	4 <sup>a</sup>	0,559 $\pm$ 0,041	< LQ	8,47 $\pm$ 0,87	< LQ	5,28 $\pm$ 0,60	< LQ	< LQ	2,52 $\pm$ 0,07
RD.2	1 <sup>a</sup>	0,796 $\pm$ 0,034	< LQ	17,8 $\pm$ 0,2	13,3 $\pm$ 0,4	2,43 $\pm$ 0,30	< LQ	< LQ	2,20 $\pm$ 0,05
	2 <sup>a</sup>	0,826 $\pm$ 0,050	< LQ	3,25 $\pm$ 0,27	< LQ	5,87 $\pm$ 0,52	< LQ	< LQ	2,85 $\pm$ 0,12
	3 <sup>a</sup>	1,21 $\pm$ 0,08	0,200 $\pm$ 0,053	21,8 $\pm$ 2,3	34,4 $\pm$ 3,5	8,36 $\pm$ 0,77	< LQ	< LQ	3,74 $\pm$ 0,34
	4 <sup>a</sup>	0,642 $\pm$ 0,039	0,090 $\pm$ 0,008	12,6 $\pm$ 0,9	18,4 $\pm$ 1,2	1,69 $\pm$ 0,19	2,26 $\pm$ 0,25	< LQ	4,61 $\pm$ 0,17
RD.3	1 <sup>a</sup>	0,568 $\pm$ 0,026	< LQ	10,2 $\pm$ 1,0	< LQ	3,02 $\pm$ 0,33	< LQ	< LQ	0,601 $\pm$ 0,083
	2 <sup>a</sup>	0,245 $\pm$ 0,031	< LQ	5,40 $\pm$ 0,40	< LQ	0,49 $\pm$ 0,07	< LQ	< LQ	0,762 $\pm$ 0,010
	3 <sup>a</sup>	0,228 $\pm$ 0,043	< LQ	3,40 $\pm$ 0,35	< LQ	0,773 $\pm$ 0,004	< LQ	< LQ	1,41 $\pm$ 0,12
	4 <sup>a</sup>	0,943 $\pm$ 0,037	0,103 $\pm$ 0,005	18,0 $\pm$ 0,5	20,8 $\pm$ 0,8	7,09 $\pm$ 0,11	< LQ	< LQ	3,06 $\pm$ 0,08
RD.4	1 <sup>a</sup>	0,427 $\pm$ 0,033	< LQ	6,77 $\pm$ 1,72	< LQ	3,07 $\pm$ 0,35	< LQ	< LQ	0,484 $\pm$ 0,144
	2 <sup>a</sup>	0,326 $\pm$ 0,026	< LQ	4,67 $\pm$ 0,09	< LQ	1,62 $\pm$ 0,10	< LQ	< LQ	0,808 $\pm$ 0,019
	3 <sup>a</sup>	0,169 $\pm$ 0,048	< LQ	2,52 $\pm$ 0,22	< LQ	0,492 $\pm$ 0,065	< LQ	< LQ	0,533 $\pm$ 0,019
	4 <sup>a</sup>	0,617 $\pm$ 0,088	< LQ	12,0 $\pm$ 0,5	< LQ	4,46 $\pm$ 0,50	< LQ	< LQ	1,99 $\pm$ 0,04
RD.5	1 <sup>a</sup>	0,229 $\pm$ 0,045	< LQ	5,55 $\pm$ 0,14	< LQ	2,45 $\pm$ 0,18	< LQ	< LQ	0,722 $\pm$ 0,091
	2 <sup>a</sup>	0,333 $\pm$ 0,043	< LQ	6,98 $\pm$ 0,90	< LQ	2,48 $\pm$ 0,18	< LQ	< LQ	0,872 $\pm$ 0,010
	3 <sup>a</sup>	0,180 $\pm$ 0,030	< LQ	3,48 $\pm$ 0,25	< LQ	0,716 $\pm$ 0,082	< LQ	< LQ	0,481 $\pm$ 0,007
	4 <sup>a</sup>	0,262 $\pm$ 0,029	< LQ	6,50 $\pm$ 0,63	< LQ	2,48 $\pm$ 0,21	< LQ	< LQ	0,840 $\pm$ 0,074

Tabela S8. Determinação de Be, Cd, Co, Cu, Li, Se, Tl e U ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Analito							
		Be	Cd	Co	Cu	Li	Se	Tl	U
<b>RD.6</b>	1 <sup>a</sup>	0,801 $\pm$ 0,147	0,128 $\pm$ 0,045	5,48 $\pm$ 0,73	< LQ	7,48 $\pm$ 0,89	< LQ	0,069 $\pm$ 0,011	2,65 $\pm$ 0,36
	2 <sup>a</sup>	0,215 $\pm$ 0,034	< LQ	4,70 $\pm$ 0,19	< LQ	1,09 $\pm$ 0,06	< LQ	< LQ	0,808 $\pm$ 0,013
	3 <sup>a</sup>	0,243 $\pm$ 0,048	< LQ	3,59 $\pm$ 0,02	< LQ	1,50 $\pm$ 0,05	< LQ	< LQ	0,990 $\pm$ 0,103
	4 <sup>a</sup>	0,822 $\pm$ 0,079	0,084 $\pm$ 0,014	13,1 $\pm$ 0,3	18,2 $\pm$ 0,3	4,48 $\pm$ 0,21	2,40 $\pm$ 0,17	< LQ	2,44 $\pm$ 0,06
<b>RD.7</b>	1 <sup>a</sup>	0,983 $\pm$ 0,038	0,125 $\pm$ 0,012	11,9 $\pm$ 0,9	17,5 $\pm$ 0,8	6,02 $\pm$ 0,25	< LQ	0,066 $\pm$ 0,003	2,72 $\pm$ 0,03
	2 <sup>a</sup>	0,518 $\pm$ 0,055	< LQ	7,27 $\pm$ 0,69	< LQ	4,65 $\pm$ 0,39	< LQ	< LQ	1,65 $\pm$ 0,16
	3 <sup>a</sup>	0,481 $\pm$ 0,072	< LQ	5,53 $\pm$ 0,09	< LQ	4,30 $\pm$ 0,45	< LQ	< LQ	1,22 $\pm$ 0,01
	4 <sup>a</sup>	0,713 $\pm$ 0,041	< LQ	9,43 $\pm$ 0,63	< LQ	5,26 $\pm$ 0,23	< LQ	< LQ	2,42 $\pm$ 0,04
<b>RD.8</b>	1 <sup>a</sup>	1,36 $\pm$ 0,02	0,124 $\pm$ 0,021	15,6 $\pm$ 0,9	24,5 $\pm$ 1,2	8,72 $\pm$ 0,25	< LQ	0,070 $\pm$ 0,002	3,59 $\pm$ 0,13
	2 <sup>a</sup>	1,36 $\pm$ 0,10	0,146 $\pm$ 0,003	15,3 $\pm$ 0,8	< LQ	7,92 $\pm$ 0,44	< LQ	< LQ	3,27 $\pm$ 0,15
	3 <sup>a</sup>	1,02 $\pm$ 0,05	0,111 $\pm$ 0,002	9,55 $\pm$ 0,20	14,5 $\pm$ 0,1	7,37 $\pm$ 0,29	< LQ	0,075 $\pm$ 0,001	2,95 $\pm$ 0,02
	4 <sup>a</sup>	1,78 $\pm$ 0,04	0,221 $\pm$ 0,003	22,6 $\pm$ 0,5	32,0 $\pm$ 0,4	8,94 $\pm$ 0,09	3,28 $\pm$ 0,01	0,050 $\pm$ 0,001	5,56 $\pm$ 0,04
<b>RD.9</b>	1 <sup>a</sup>	1,19 $\pm$ 0,05	0,099 $\pm$ 0,024	9,61 $\pm$ 1,00	< LQ	8,89 $\pm$ 0,46	< LQ	0,071 $\pm$ 0,004	3,72 $\pm$ 0,26
	2 <sup>a</sup>	0,425 $\pm$ 0,034	< LQ	3,50 $\pm$ 0,27	< LQ	2,20 $\pm$ 0,13	< LQ	< LQ	1,73 $\pm$ 0,04
	3 <sup>a</sup>	0,376 $\pm$ 0,070	< LQ	4,45 $\pm$ 0,37	< LQ	2,69 $\pm$ 0,15	< LQ	< LQ	1,12 $\pm$ 0,04
	4 <sup>a</sup>	0,443 $\pm$ 0,059	< LQ	5,94 $\pm$ 0,85	< LQ	3,92 $\pm$ 0,44	< LQ	< LQ	1,56 $\pm$ 0,07
<b>RD.10</b>	1 <sup>a</sup>	0,367 $\pm$ 0,067	< LQ	5,42 $\pm$ 0,16	< LQ	3,66 $\pm$ 0,13	< LQ	< LQ	0,796 $\pm$ 0,036
	2 <sup>a</sup>	0,697 $\pm$ 0,071	< LQ	7,67 $\pm$ 0,32	< LQ	7,15 $\pm$ 0,30	< LQ	< LQ	1,47 $\pm$ 0,04
	3 <sup>a</sup>	1,24 $\pm$ 0,30	0,107 $\pm$ 0,013	7,34 $\pm$ 1,23	< LQ	10,6 $\pm$ 0,3	< LQ	0,062 $\pm$ 0,001	1,88 $\pm$ 0,03
	4 <sup>a</sup>	1,04 $\pm$ 0,07	0,111 $\pm$ 0,007	11,0 $\pm$ 1,3	< LQ	10,6 $\pm$ 0,9	< LQ	0,040 $\pm$ 0,003	3,21 $\pm$ 0,07

Tabela S8. Determinação de Be, Cd, Co, Cu, Li, Se, Tl e U ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Analito							
		Be	Cd	Co	Cu	Li	Se	Tl	U
RD.11	1 <sup>a</sup>	0,201 $\pm$ 0,037	< LQ	2,34 $\pm$ 0,02	< LQ	1,39 $\pm$ 0,05	< LQ	< LQ	4,58 $\pm$ 0,11
	2 <sup>a</sup>	0,341 $\pm$ 0,068	< LQ	5,11 $\pm$ 0,46	< LQ	3,80 $\pm$ 0,11	< LQ	< LQ	1,32 $\pm$ 0,31
	3 <sup>a</sup>	0,870 $\pm$ 0,113	0,108 $\pm$ 0,011	7,07 $\pm$ 0,82	< LQ	8,99 $\pm$ 0,82	< LQ	0,063 $\pm$ 0,006	2,82 $\pm$ 0,34
	4 <sup>a</sup>	1,48 $\pm$ 0,07	0,192 $\pm$ 0,011	16,0 $\pm$ 0,6	18,5 $\pm$ 0,9	10,9 $\pm$ 0,6	2,66 $\pm$ 0,10	0,049 $\pm$ 0,003	5,31 $\pm$ 0,28
RD.12	1 <sup>a</sup>	0,739 $\pm$ 0,071	< LQ	9,79 $\pm$ 0,47	< LQ	7,49 $\pm$ 0,46	< LQ	0,065 $\pm$ 0,007	1,57 $\pm$ 0,26
	2 <sup>a</sup>	0,252 $\pm$ 0,029	< LQ	2,46 $\pm$ 0,04	< LQ	2,09 $\pm$ 0,04	< LQ	< LQ	0,807 $\pm$ 0,014
	3 <sup>a</sup>	0,639 $\pm$ 0,048	< LQ	6,56 $\pm$ 0,20	< LQ	8,53 $\pm$ 0,32	< LQ	0,057 $\pm$ 0,002	1,12 $\pm$ 0,01
	4 <sup>a</sup>	1,06 $\pm$ 0,03	0,072 $\pm$ 0,008	12,8 $\pm$ 0,6	< LQ	16,1 $\pm$ 0,8	< LQ	0,050 $\pm$ 0,003	2,31 $\pm$ 0,04
RD.13	1 <sup>a</sup>	0,643 $\pm$ 0,069	< LQ	7,16 $\pm$ 0,29	< LQ	7,82 $\pm$ 0,24	< LQ	0,049 $\pm$ 0,001	2,35 $\pm$ 0,03
	2 <sup>a</sup>	0,740 $\pm$ 0,060	0,080 $\pm$ 0,004	7,45 $\pm$ 0,15	< LQ	9,25 $\pm$ 0,36	< LQ	< LQ	1,63 $\pm$ 0,11
	3 <sup>a</sup>	0,317 $\pm$ 0,006	< LQ	3,18 $\pm$ 0,37	< LQ	4,27 $\pm$ 0,01	< LQ	< LQ	0,693 $\pm$ 0,031
	4 <sup>a</sup>	0,297 $\pm$ 0,052	< LQ	2,91 $\pm$ 0,14	< LQ	3,23 $\pm$ 0,06	< LQ	< LQ	1,62 $\pm$ 0,08
RD.14	1 <sup>a</sup>	0,178 $\pm$ 0,016	< LQ	3,56 $\pm$ 0,22	< LQ	2,30 $\pm$ 0,06	< LQ	< LQ	0,833 $\pm$ 0,047
	2 <sup>a</sup>	0,132 $\pm$ 0,021	< LQ	2,37 $\pm$ 0,48	< LQ	2,59 $\pm$ 0,07	< LQ	< LQ	0,680 $\pm$ 0,022
	3 <sup>a</sup>	0,220 $\pm$ 0,009	< LQ	1,73 $\pm$ 0,05	< LQ	3,16 $\pm$ 0,17	< LQ	< LQ	0,448 $\pm$ 0,043
	4 <sup>a</sup>	0,210 $\pm$ 0,061	< LQ	5,13 $\pm$ 0,78	< LQ	4,05 $\pm$ 0,59	< LQ	< LQ	0,652 $\pm$ 0,079
RD.15	1 <sup>a</sup>	0,230 $\pm$ 0,036	< LQ	3,10 $\pm$ 0,12	< LQ	4,17 $\pm$ 0,06	< LQ	< LQ	0,596 $\pm$ 0,077
	2 <sup>a</sup>	0,090 $\pm$ 0,014	< LQ	1,25 $\pm$ 0,12	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,494 $\pm$ 0,054
	3 <sup>a</sup>	0,182 $\pm$ 0,046	< LQ	2,77 $\pm$ 0,39	< LQ	0,552 $\pm$ 0,091	< LQ	< LQ	0,586 $\pm$ 0,066
	4 <sup>a</sup>	1,01 $\pm$ 0,13	< LQ	9,84 $\pm$ 1,28	< LQ	13,0 $\pm$ 1,6	< LQ	< LQ	2,31 $\pm$ 0,26

Tabela S8. Determinação de Be, Cd, Co, Cu, Li, Se, Tl e U ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Analito							
		Be	Cd	Co	Cu	Li	Se	Tl	U
SA.16	1 <sup>a</sup>	0,184 $\pm$ 0,045	< LQ	3,47 $\pm$ 0,03	< LQ	0,833 $\pm$ 0,109	< LQ	< LQ	0,559 $\pm$ 0,019
	2 <sup>a</sup>	0,129 $\pm$ 0,019	< LQ	3,71 $\pm$ 0,43	< LQ	0,396 $\pm$ 0,021	< LQ	< LQ	0,512 $\pm$ 0,086
	3 <sup>a</sup>	0,556 $\pm$ 0,017	0,070 $\pm$ 0,001	9,62 $\pm$ 0,59	< LQ	3,79 $\pm$ 0,26	< LQ	< LQ	1,79 $\pm$ 0,27
	4 <sup>a</sup>	0,110 $\pm$ 0,023	< LQ	1,39 $\pm$ 0,08	< LQ	0,693 $\pm$ 0,011	< LQ	< LQ	0,742 $\pm$ 0,024
SA.17	1 <sup>a</sup>	0,764 $\pm$ 0,022	< LQ	6,65 $\pm$ 0,12	< LQ	4,08 $\pm$ 0,13	< LQ	0,093 $\pm$ 0,003	3,56 $\pm$ 0,11
	2 <sup>a</sup>	0,076 $\pm$ 0,003	< LQ	0,969 $\pm$ 0,343	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	1,25 $\pm$ 0,20
	3 <sup>a</sup>	0,519 $\pm$ 0,066	< LQ	8,64 $\pm$ 0,42	< LQ	0,617 $\pm$ 0,048	< LQ	< LQ	2,82 $\pm$ 0,31
	4 <sup>a</sup>	0,545 $\pm$ 0,057	< LQ	9,54 $\pm$ 0,30	< LQ	3,90 $\pm$ 0,16	< LQ	< LQ	2,61 $\pm$ 0,03
SA.18	1 <sup>a</sup>	0,224 $\pm$ 0,018	< LQ	1,67 $\pm$ 0,10	< LQ	0,903 $\pm$ 0,055	< LQ	0,031 $\pm$ 0,002	1,44 $\pm$ 0,02
	2 <sup>a</sup>	0,120 $\pm$ 0,009	< LQ	1,05 $\pm$ 0,08	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,738 $\pm$ 0,086
	3 <sup>a</sup>	0,137 $\pm$ 0,002	< LQ	1,70 $\pm$ 0,25	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	1,73 $\pm$ 0,05
	4 <sup>a</sup>	0,159 $\pm$ 0,021	< LQ	1,62 $\pm$ 0,19	< LQ	1,39 $\pm$ 0,01	< LQ	< LQ	1,29 $\pm$ 0,08
SA.19	1 <sup>a</sup>	0,149 $\pm$ 0,015	< LQ	1,25 $\pm$ 0,13	< LQ	0,489 $\pm$ 0,102	< LQ	< LQ	0,609 $\pm$ 0,063
	2 <sup>a</sup>	N,D,	N,D,	N,D,	N,D,	N,D,	N,D,	< LQ	N,D,
	3 <sup>a</sup>	0,212 $\pm$ 0,018	< LQ	5,01 $\pm$ 0,12	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	7,21 $\pm$ 0,74
	4 <sup>a</sup>	0,269 $\pm$ 0,006	0,087 $\pm$ 0,009	4,03 $\pm$ 0,34	< LQ	3,82 $\pm$ 0,12	< LQ	< LQ	2,56 $\pm$ 0,17
SA.20	1 <sup>a</sup>	0,945 $\pm$ 0,194	0,090 $\pm$ 0,011	16,0 $\pm$ 2,7	< LQ	3,86 $\pm$ 0,11	< LQ	0,069 $\pm$ 0,005	1,66 $\pm$ 0,25
	2 <sup>a</sup>	0,401 $\pm$ 0,058	< LQ	3,26 $\pm$ 0,12	< LQ	2,10 $\pm$ 0,06	< LQ	< LQ	1,65 $\pm$ 0,04
	3 <sup>a</sup>	1,00 $\pm$ 0,03	0,112 $\pm$ 0,004	7,86 $\pm$ 0,03	< LQ	5,86 $\pm$ 0,16	< LQ	0,123 $\pm$ 0,012	4,57 $\pm$ 0,06
	4 <sup>a</sup>	0,789 $\pm$ 0,049	0,083 $\pm$ 0,001	5,49 $\pm$ 0,40	< LQ	3,54 $\pm$ 0,12	< LQ	0,043 $\pm$ 0,004	1,69 $\pm$ 0,04

Tabela S8. Determinação de Be, Cd, Co, Cu, Li, Se, Tl e U ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão, n = 3) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Analito							
		Be	Cd	Co	Cu	Li	Se	Tl	U
SA.21	1 <sup>a</sup>	0,819 $\pm$ 0,101	0,109 $\pm$ 0,016	7,03 $\pm$ 0,91	< LQ	5,43 $\pm$ 0,49	< LQ	0,109 $\pm$ 0,012	2,31 $\pm$ 0,28
	2 <sup>a</sup>	0,075 $\pm$ 0,006	< LQ	0,929 $\pm$ 0,113	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	0,241 $\pm$ 0,007
	3 <sup>a</sup>	1,58 $\pm$ 0,11	0,179 $\pm$ 0,024	11,5 $\pm$ 0,3	< LQ	7,49 $\pm$ 0,24	< LQ	0,168 $\pm$ 0,012	4,45 $\pm$ 0,16
	4 <sup>a</sup>	1,32 $\pm$ 0,11	0,158 $\pm$ 0,006	8,90 $\pm$ 0,39	< LQ	5,91 $\pm$ 0,01	1,88 $\pm$ 0,06	0,073 $\pm$ 0,008	4,99 $\pm$ 0,47

Tabela S9. Determinação de As, Ba, Cr, Mn, P, Pb, V e Zn ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna.

Amostra	Coleta	Analito							
		As	Ba	Cr	Mn	P	Pb	V	Zn
RD.1	1 <sup>a</sup>	29,3 $\pm$ 0,6	40,2 $\pm$ 9,6	13,2 $\pm$ 0,5	375 $\pm$ 30	< LQ	1,46 $\pm$ 0,35	11,0 $\pm$ 2,3	< LQ
	2 <sup>a</sup>	31,9 $\pm$ 1,3	42,3 $\pm$ 1,9	18,7 $\pm$ 1,0	497 $\pm$ 25	< LQ	4,41 $\pm$ 0,47	11,9 $\pm$ 0,4	< LQ
	3 <sup>a</sup>	14,9 $\pm$ 2,9	25,0 $\pm$ 3,9	12,8 $\pm$ 2,0	189 $\pm$ 4	< LQ	2,48 $\pm$ 0,13	8,98 $\pm$ 1,00	< LQ
	4 <sup>a</sup>	54,7 $\pm$ 2,4	75,4 $\pm$ 2,7	48,2 $\pm$ 0,3	727 $\pm$ 20	88,2 $\pm$ 0,4	12,2 $\pm$ 0,4	43,1 $\pm$ 0,6	31,0 $\pm$ 2,9
RD.2	1 <sup>a</sup>	< LQ	29,9 $\pm$ 1,3	27,3 $\pm$ 0,2	466 $\pm$ 27	146 $\pm$ 1	11,9 $\pm$ 0,6	80,8 $\pm$ 0,5	18,0 $\pm$ 0,4
	2 <sup>a</sup>	< LQ	28,5 $\pm$ 2,3	20,0 $\pm$ 2,0	118 $\pm$ 11	46,2 $\pm$ 3,5	18,5 $\pm$ 0,3	57,6 $\pm$ 2,0	12,3 $\pm$ 0,4
	3 <sup>a</sup>	47,2 $\pm$ 5,4	224 $\pm$ 20	106 $\pm$ 11	4195 $\pm$ 414	284 $\pm$ 34	27,1 $\pm$ 2,7	90,2 $\pm$ 9,0	58,4 $\pm$ 5,8
	4 <sup>a</sup>	3,58 $\pm$ 0,19	30,3 $\pm$ 1,7	41,1 $\pm$ 4,9	1156 $\pm$ 19	162 $\pm$ 12	21,6 $\pm$ 0,1	150 $\pm$ 9	44,0 $\pm$ 2,8
RD.3	1 <sup>a</sup>	< LQ	93,7 $\pm$ 11,5	44,0 $\pm$ 2,9	312 $\pm$ 36	64,0 $\pm$ 11,4	9,06 $\pm$ 0,98	40,0 $\pm$ 4,2	36,4 $\pm$ 2,6
	2 <sup>a</sup>	56,7 $\pm$ 9,2	29,6 $\pm$ 4,0	26,2 $\pm$ 1,7	308 $\pm$ 39	< LQ	4,07 $\pm$ 0,46	15,3 $\pm$ 0,1	< LQ
	3 <sup>a</sup>	15,9 $\pm$ 0,6	20,6 $\pm$ 0,1	18,7 $\pm$ 0,3	367 $\pm$ 17	46,2 $\pm$ 6,8	4,73 $\pm$ 0,37	17,0 $\pm$ 1,1	< LQ
	4 <sup>a</sup>	48,7 $\pm$ 1,9	137 $\pm$ 2	78,3 $\pm$ 2,7	2126 $\pm$ 6	140 $\pm$ 1	21,3 $\pm$ 0,1	79,4 $\pm$ 2,3	62,5 $\pm$ 1,3
RD.4	1 <sup>a</sup>	3,51 $\pm$ 1,30	68,7 $\pm$ 8,8	23,6 $\pm$ 6,5	254 $\pm$ 29	51,3 $\pm$ 9,4	7,2 $\pm$ 1,1	22,5 $\pm$ 5,8	16,7 $\pm$ 5,7
	2 <sup>a</sup>	8,18 $\pm$ 0,66	44,5 $\pm$ 1,5	26,0 $\pm$ 0,6	440 $\pm$ 2	41,1 $\pm$ 1,8	6,00 $\pm$ 0,15	22,7 $\pm$ 0,5	12,9 $\pm$ 0,1
	3 <sup>a</sup>	5,52 $\pm$ 0,66	23,0 $\pm$ 1,1	14,0 $\pm$ 1,1	360 $\pm$ 13	< LQ	3,52 $\pm$ 0,01	12,4 $\pm$ 0,1	< LQ
	4 <sup>a</sup>	16,3 $\pm$ 0,9	82,3 $\pm$ 6,1	47,3 $\pm$ 6,9	602 $\pm$ 19	84,4 $\pm$ 6,7	15,5 $\pm$ 1,4	47,9 $\pm$ 2,5	32,5 $\pm$ 2,6
RD.5	1 <sup>a</sup>	10,0 $\pm$ 1,5	48,8 $\pm$ 2,3	25,0 $\pm$ 1,2	388 $\pm$ 15	< LQ	4,42 $\pm$ 0,25	17,4 $\pm$ 0,5	14,9 $\pm$ 1,0
	2 <sup>a</sup>	11,4 $\pm$ 1,4	54,8 $\pm$ 2,8	34,4 $\pm$ 3,4	523 $\pm$ 32	36,9 $\pm$ 1,6	5,51 $\pm$ 0,33	20,9 $\pm$ 2,5	14,3 $\pm$ 0,8
	3 <sup>a</sup>	10,8 $\pm$ 1,2	22,9 $\pm$ 2,2	17,6 $\pm$ 1,2	188 $\pm$ 1	< LQ	2,77 $\pm$ 0,25	12,5 $\pm$ 0,1	< LQ
	4 <sup>a</sup>	22,0 $\pm$ 0,6	37,2 $\pm$ 2,7	19,7 $\pm$ 1,8	306 $\pm$ 2	33,1 $\pm$ 2,0	5,62 $\pm$ 0,04	21,3 $\pm$ 0,1	20,5 $\pm$ 0,1

Tabela S9. Determinação de As, Ba, Cr, Mn, P, Pb, V e Zn ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Analito							
		As	Ba	Cr	Mn	P	Pb	V	Zn
RD.6	1 <sup>a</sup>	6,36 $\pm$ 1,65	63,0 $\pm$ 8,3	38,1 $\pm$ 5,3	570 $\pm$ 80	62,0 $\pm$ 10,3	17,8 $\pm$ 2,3	29,5 $\pm$ 3,8	47,9 $\pm$ 6,3
	2 <sup>a</sup>	21,8 $\pm$ 1,0	32,3 $\pm$ 0,1	27,0 $\pm$ 0,5	343 $\pm$ 4	< LQ	4,32 $\pm$ 0,16	18,5 $\pm$ 0,1	9,56 $\pm$ 0,67
	3 <sup>a</sup>	5,49 $\pm$ 0,51	30,7 $\pm$ 0,5	19,2 $\pm$ 1,6	112 $\pm$ 3	< LQ	5,86 $\pm$ 0,28	16,9 $\pm$ 0,3	8,93 $\pm$ 0,07
	4 <sup>a</sup>	18,9 $\pm$ 0,7	95,5 $\pm$ 2,3	61,6 $\pm$ 2,6	790 $\pm$ 8	162 $\pm$ 4	19,1 $\pm$ 0,2	73,9 $\pm$ 1,4	48,2 $\pm$ 1,5
RD.7	1 <sup>a</sup>	11,2 $\pm$ 0,6	95,6 $\pm$ 5,5	66,4 $\pm$ 2,2	702 $\pm$ 26	149 $\pm$ 1	22,2 $\pm$ 1,4	60,4 $\pm$ 5,4	69,8 $\pm$ 1,4
	2 <sup>a</sup>	10,3 $\pm$ 1,5	60,3 $\pm$ 4,0	34,7 $\pm$ 3,5	435 $\pm$ 33	59,3 $\pm$ 7,2	10,2 $\pm$ 1,0	29,6 $\pm$ 2,5	45,7 $\pm$ 4,2
	3 <sup>a</sup>	9,91 $\pm$ 1,45	54,1 $\pm$ 0,5	30,9 $\pm$ 0,4	207 $\pm$ 4	50,8 $\pm$ 2,2	9,32 $\pm$ 0,20	20,8 $\pm$ 0,1	26,1 $\pm$ 1,3
	4 <sup>a</sup>	14,6 $\pm$ 0,5	81,0 $\pm$ 1,4	48,7 $\pm$ 3,2	556 $\pm$ 10	92,9 $\pm$ 2,6	16,2 $\pm$ 0,4	46,9 $\pm$ 2,5	54,5 $\pm$ 0,8
RD.8	1 <sup>a</sup>	11,9 $\pm$ 2,5	142 $\pm$ 4	88,8 $\pm$ 4,0	1100 $\pm$ 19	198 $\pm$ 9	29,5 $\pm$ 0,7	80,1 $\pm$ 1,6	73,4 $\pm$ 3,9
	2 <sup>a</sup>	14,1 $\pm$ 0,5	137 $\pm$ 8	95,4 $\pm$ 6,0	1622 $\pm$ 93	206 $\pm$ 16	27,7 $\pm$ 1,4	72,7 $\pm$ 3,8	77,8 $\pm$ 6,0
	3 <sup>a</sup>	8,28 $\pm$ 0,24	102 $\pm$ 2	52,5 $\pm$ 0,8	927 $\pm$ 4	129 $\pm$ 2	23,6 $\pm$ 0,5	48,2 $\pm$ 0,4	48,7 $\pm$ 0,8
	4 <sup>a</sup>	12,5 $\pm$ 0,3	165 $\pm$ 2	105 $\pm$ 1	1631 $\pm$ 16	258 $\pm$ 5	49,6 $\pm$ 0,7	130 $\pm$ 2	103 $\pm$ 1
RD.9	1 <sup>a</sup>	1,49 $\pm$ 0,21	97,3 $\pm$ 5,2	48,6 $\pm$ 4,9	523 $\pm$ 26	95,5 $\pm$ 9,2	26,1 $\pm$ 1,7	57,2 $\pm$ 5,5	42,8 $\pm$ 4,3
	2 <sup>a</sup>	6,32 $\pm$ 0,91	36,1 $\pm$ 2,1	32,9 $\pm$ 0,1	222 $\pm$ 1	33,6 $\pm$ 3,7	11,4 $\pm$ 0,4	23,3 $\pm$ 1,4	16,4 $\pm$ 0,1
	3 <sup>a</sup>	6,55 $\pm$ 1,56	40,1 $\pm$ 1,8	23,4 $\pm$ 2,4	296 $\pm$ 6	32,8 $\pm$ 2,3	8,10 $\pm$ 0,35	17,5 $\pm$ 0,2	17,2 $\pm$ 0,2
	4 <sup>a</sup>	8,33 $\pm$ 0,70	69,1 $\pm$ 9,6	22,2 $\pm$ 0,3	618 $\pm$ 19	55,6 $\pm$ 4,6	12,1 $\pm$ 0,9	26,1 $\pm$ 2,1	28,8 $\pm$ 4,4
RD.10	1 <sup>a</sup>	4,54 $\pm$ 0,51	43,8 $\pm$ 5,7	21,4 $\pm$ 1,9	257 $\pm$ 12	< LQ	5,93 $\pm$ 0,50	15,2 $\pm$ 1,1	20,3 $\pm$ 2,2
	2 <sup>a</sup>	6,57 $\pm$ 0,29	92,4 $\pm$ 3,2	35,2 $\pm$ 0,9	445 $\pm$ 16	135 $\pm$ 9	13,9 $\pm$ 0,3	30,8 $\pm$ 0,4	39,1 $\pm$ 0,1
	3 <sup>a</sup>	5,12 $\pm$ 1,72	107 $\pm$ 6	37,7 $\pm$ 4,8	396 $\pm$ 29	101 $\pm$ 2	17,6 $\pm$ 0,4	37,9 $\pm$ 4,8	37,7 $\pm$ 6,2
	4 <sup>a</sup>	7,19 $\pm$ 0,25	111 $\pm$ 3	43,9 $\pm$ 2,2	498 $\pm$ 20	114 $\pm$ 1	24,1 $\pm$ 0,6	50,8 $\pm$ 0,7	57,7 $\pm$ 0,6

Tabela S9. Determinação de As, Ba, Cr, Mn, P, Pb, V e Zn ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Analito							
		As	Ba	Cr	Mn	P	Pb	V	Zn
<b>RD.11</b>	1 <sup>a</sup>	2,04 $\pm$ 0,48	16,7 $\pm$ 2,4	15,2 $\pm$ 1,3	104 $\pm$ 9	< LQ	3,88 $\pm$ 0,45	17,1 $\pm$ 1,9	< LQ
	2 <sup>a</sup>	7,28 $\pm$ 1,06	39,1 $\pm$ 1,7	24,3 $\pm$ 0,4	251 $\pm$ 10	34,1 $\pm$ 4,4	6,79 $\pm$ 0,50	17,6 $\pm$ 1,9	21,3 $\pm$ 1,3
	3 <sup>a</sup>	4,57 $\pm$ 0,32	96,2 $\pm$ 13,9	36,4 $\pm$ 4,9	531 $\pm$ 78	120 $\pm$ 18	21,7 $\pm$ 2,7	34,0 $\pm$ 4,3	33,9 $\pm$ 5,7
	4 <sup>a</sup>	25,3 $\pm$ 1,1	143 $\pm$ 1	93,1 $\pm$ 1,3	1260 $\pm$ 10	128 $\pm$ 1	38,4 $\pm$ 0,9	69,9 $\pm$ 1,0	86,5 $\pm$ 0,2
<b>RD.12</b>	1 <sup>a</sup>	8,91 $\pm$ 1,77	95,8 $\pm$ 5,3	48,4 $\pm$ 4,8	606 $\pm$ 38	72,7 $\pm$ 8,8	13,6 $\pm$ 1,3	41,0 $\pm$ 3,7	39,0 $\pm$ 9,3
	2 <sup>a</sup>	7,03 $\pm$ 1,86	27,0 $\pm$ 2,3	13,9 $\pm$ 1,7	170 $\pm$ 10	< LQ	3,64 $\pm$ 0,02	10,2 $\pm$ 0,5	9,62 $\pm$ 0,04
	3 <sup>a</sup>	3,04 $\pm$ 0,95	79,9 $\pm$ 2,5	27,3 $\pm$ 0,4	301 $\pm$ 9	< LQ	8,31 $\pm$ 0,33	27,2 $\pm$ 1,7	30,1 $\pm$ 1,0
	4 <sup>a</sup>	1,76 $\pm$ 0,12	202 $\pm$ 2	55,4 $\pm$ 1,4	524 $\pm$ 1	72,1 $\pm$ 3,8	16,2 $\pm$ 0,4	59,8 $\pm$ 0,9	61,9 $\pm$ 0,8
<b>RD.13</b>	1 <sup>a</sup>	6,75 $\pm$ 0,35	83,9 $\pm$ 1,4	40,7 $\pm$ 1,5	379 $\pm$ 12	42,3 $\pm$ 0,5	10,5 $\pm$ 0,1	33,0 $\pm$ 0,5	34,8 $\pm$ 0,9
	2 <sup>a</sup>	7,69 $\pm$ 1,29	101 $\pm$ 3	32,8 $\pm$ 1,0	508 $\pm$ 2	46,6 $\pm$ 4,7	11,7 $\pm$ 0,4	29,7 $\pm$ 0,7	32,2 $\pm$ 0,1
	3 <sup>a</sup>	3,05 $\pm$ 0,51	38,9 $\pm$ 4,4	16,0 $\pm$ 1,3	174 $\pm$ 4	< LQ	4,63 $\pm$ 0,11	14,0 $\pm$ 0,5	10,7 $\pm$ 1,3
	4 <sup>a</sup>	8,98 $\pm$ 0,02	27,9 $\pm$ 2,3	9,07 $\pm$ 1,20	157 $\pm$ 17	< LQ	4,85 $\pm$ 0,89	13,7 $\pm$ 3,0	15,6 $\pm$ 0,3
<b>RD.14</b>	1 <sup>a</sup>	1,51 $\pm$ 0,49	95,1 $\pm$ 1,5	38,5 $\pm$ 1,3	391 $\pm$ 9	181 $\pm$ 1	4,16 $\pm$ 0,04	26,4 $\pm$ 1,8	10,6 $\pm$ 0,5
	2 <sup>a</sup>	< LQ	70,1 $\pm$ 1,5	16,9 $\pm$ 1,6	183 $\pm$ 20	113 $\pm$ 3	2,44 $\pm$ 0,01	16,1 $\pm$ 0,6	9,81 $\pm$ 2,44
	3 <sup>a</sup>	< LQ	62,2 $\pm$ 2,9	15,3 $\pm$ 0,2	174 $\pm$ 8	77,1 $\pm$ 2,0	3,88 $\pm$ 0,12	19,0 $\pm$ 0,3	6,93 $\pm$ 0,94
	4 <sup>a</sup>	< LQ	70,3 $\pm$ 4,0	< LQ	157 $\pm$ 3	390 $\pm$ 13	2,55 $\pm$ 0,35	32,9 $\pm$ 1,8	24,2 $\pm$ 0,7
<b>RD.15</b>	1 <sup>a</sup>	< LQ	40,4 $\pm$ 1,5	13,5 $\pm$ 0,2	138 $\pm$ 4	< LQ	4,02 $\pm$ 0,44	13,0 $\pm$ 0,3	11,6 $\pm$ 0,2
	2 <sup>a</sup>	< LQ	15,6 $\pm$ 2,0	5,64 $\pm$ 1,46	182 $\pm$ 5	< LQ	1,15 $\pm$ 0,17	6,9 $\pm$ 0,1	< LQ
	3 <sup>a</sup>	2,60 $\pm$ 0,33	17,0 $\pm$ 0,4	18,4 $\pm$ 1,7	156 $\pm$ 3	< LQ	2,53 $\pm$ 0,40	17,7 $\pm$ 2,9	< LQ
	4 <sup>a</sup>	3,16 $\pm$ 0,47	133 $\pm$ 9	44,8 $\pm$ 0,4	609 $\pm$ 13	141 $\pm$ 10	21,3 $\pm$ 2,5	56,4 $\pm$ 7,1	38,7 $\pm$ 5,7

Tabela S9. Determinação de As, Ba, Cr, Mn, P, Pb, V e Zn ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Analito							
		As	Ba	Cr	Mn	P	Pb	V	Zn
SA.16	1 <sup>a</sup>	< LQ	36,2 $\pm$ 2,6	13,3 $\pm$ 0,8	212 $\pm$ 13	12,6 $\pm$ 0,1	5,01 $\pm$ 0,17	17,0 $\pm$ 1,4	< LQ
	2 <sup>a</sup>	< LQ	30,2 $\pm$ 2,6	8,99 $\pm$ 0,33	426 $\pm$ 9	33,2 $\pm$ 1,1	3,38 $\pm$ 0,10	13,1 $\pm$ 1,2	< LQ
	3 <sup>a</sup>	3,39 $\pm$ 0,55	113 $\pm$ 12	39,2 $\pm$ 1,4	1230 $\pm$ 129	92,2 $\pm$ 8,9	16,0 $\pm$ 1,4	37,6 $\pm$ 0,4	21,5 $\pm$ 1,5
	4 <sup>a</sup>	< LQ	19,9 $\pm$ 3,2	5,86 $\pm$ 0,16	107 $\pm$ 2	< LQ	4,29 $\pm$ 0,45	24,8 $\pm$ 0,1	< LQ
SA.17	1 <sup>a</sup>	< LQ	66,1 $\pm$ 3,2	24,9 $\pm$ 1,3	274 $\pm$ 23	40,0 $\pm$ 6,0	18,8 $\pm$ 1,4	41,1 $\pm$ 1,6	27,9 $\pm$ 0,6
	2 <sup>a</sup>	< LQ	6,52 $\pm$ 1,38	1,65 $\pm$ 0,15	33,2 $\pm$ 7,8	< LQ	3,57 $\pm$ 0,45	3,8 $\pm$ 0,1	< LQ
	3 <sup>a</sup>	22,4 $\pm$ 2,9	26,4 $\pm$ 3,8	214 $\pm$ 4	408 $\pm$ 23	117 $\pm$ 13	25,5 $\pm$ 0,8	59,2 $\pm$ 1,3	25,3 $\pm$ 1,0
	4 <sup>a</sup>	5,46 $\pm$ 0,03	80,9 $\pm$ 1,5	34,9 $\pm$ 0,8	1216 $\pm$ 13	100 $\pm$ 3	22,0 $\pm$ 0,8	46,3 $\pm$ 1,5	29,9 $\pm$ 0,2
SA.18	1 <sup>a</sup>	< LQ	19,2 $\pm$ 1,7	8,50 $\pm$ 0,24	56,0 $\pm$ 3,5	< LQ	5,97 $\pm$ 0,30	11,7 $\pm$ 0,8	7,15 $\pm$ 0,27
	2 <sup>a</sup>	< LQ	13,1 $\pm$ 2,6	4,77 $\pm$ 0,12	68,9 $\pm$ 0,3	< LQ	3,45 $\pm$ 0,18	6,44 $\pm$ 0,60	< LQ
	3 <sup>a</sup>	< LQ	11,6 $\pm$ 1,1	8,68 $\pm$ 0,90	46,4 $\pm$ 4,1	< LQ	4,79 $\pm$ 0,56	12,1 $\pm$ 0,1	< LQ
	4 <sup>a</sup>	< LQ	16,3 $\pm$ 1,2	< LQ	75,9 $\pm$ 2,4	< LQ	7,00 $\pm$ 0,32	12,9 $\pm$ 0,4	9,97 $\pm$ 0,79
SA.19	1 <sup>a</sup>	< LQ	11,9 $\pm$ 2,2	3,90 $\pm$ 0,11	65,2 $\pm$ 7,9	< LQ	4,03 $\pm$ 0,20	4,62 $\pm$ 0,84	< LQ
	2 <sup>a</sup>	N,D,	N,D,	N,D,	N,D,	N,D,	N,D,	N,D,	N,D,
	3 <sup>a</sup>	1,79 $\pm$ 0,29	11,1 $\pm$ 1,2	28,3 $\pm$ 1,2	173 $\pm$ 5	36,4 $\pm$ 6,2	12,9 $\pm$ 1,5	39,7 $\pm$ 1,1	28,4 $\pm$ 1,1
	4 <sup>a</sup>	< LQ	29,3 $\pm$ 2,0	11,3 $\pm$ 0,1	153 $\pm$ 1	54,5 $\pm$ 1,0	16,3 $\pm$ 1,1	24,5 $\pm$ 0,8	32,7 $\pm$ 0,2
SA.20	1 <sup>a</sup>	< LQ	126 $\pm$ 14	24,9 $\pm$ 2,9	388 $\pm$ 2	86,4 $\pm$ 9,5	13,4 $\pm$ 0,2	68,2 $\pm$ 6,4	48,9 $\pm$ 5,4
	2 <sup>a</sup>	< LQ	34,5 $\pm$ 1,6	12,3 $\pm$ 0,9	96,4 $\pm$ 5,0	< LQ	15,7 $\pm$ 0,1	18,9 $\pm$ 1,1	14,4 $\pm$ 1,4
	3 <sup>a</sup>	2,18 $\pm$ 0,20	79,0 $\pm$ 1,2	27,7 $\pm$ 0,1	345 $\pm$ 3	73,7 $\pm$ 6,5	26,9 $\pm$ 1,5	36,2 $\pm$ 1,2	40,1 $\pm$ 0,5
	4 <sup>a</sup>	< LQ	114 $\pm$ 4	15,1 $\pm$ 1,7	182 $\pm$ 6	52,6 $\pm$ 4,4	12,1 $\pm$ 1,0	28,5 $\pm$ 1,5	27,2 $\pm$ 0,8

Tabela S9. Determinação de As, Ba, Cr, Mn, P, Pb, V e Zn ( $\mu\text{g g}^{-1}$ , média  $\pm$  desvio padrão,  $n = 3$ ) nas amostras de sedimento dos rios Doce (RD) e Santo Antônio (SA) usando ICP-MS com padronização interna (continuação).

Amostra	Coleta	Analito							
		As	Ba	Cr	Mn	P	Pb	V	Zn
SA.21	1ª	< LQ	84,4 $\pm$ 10,1	17,2 $\pm$ 3,0	292 $\pm$ 35	< LQ	18,2 $\pm$ 1,1	22,1 $\pm$ 3,2	33,5 $\pm$ 5,7
	2ª	< LQ	9,56 $\pm$ 0,78	2,43 $\pm$ 0,03	42,1 $\pm$ 5,5	< LQ	2,74 $\pm$ 0,05	2,73 $\pm$ 0,10	< LQ
	3ª	2,18 $\pm$ 0,26	138 $\pm$ 6	38,0 $\pm$ 0,1	494 $\pm$ 19	126 $\pm$ 3	37,9 $\pm$ 1,2	50,5 $\pm$ 1,3	59,0 $\pm$ 1,6
	4ª	2,61 $\pm$ 0,29	81,2 $\pm$ 0,5	21,0 $\pm$ 0,7	283 $\pm$ 2	78,5 $\pm$ 1,8	35,0 $\pm$ 0,4	43,0 $\pm$ 1,0	55,5 $\pm$ 3,7

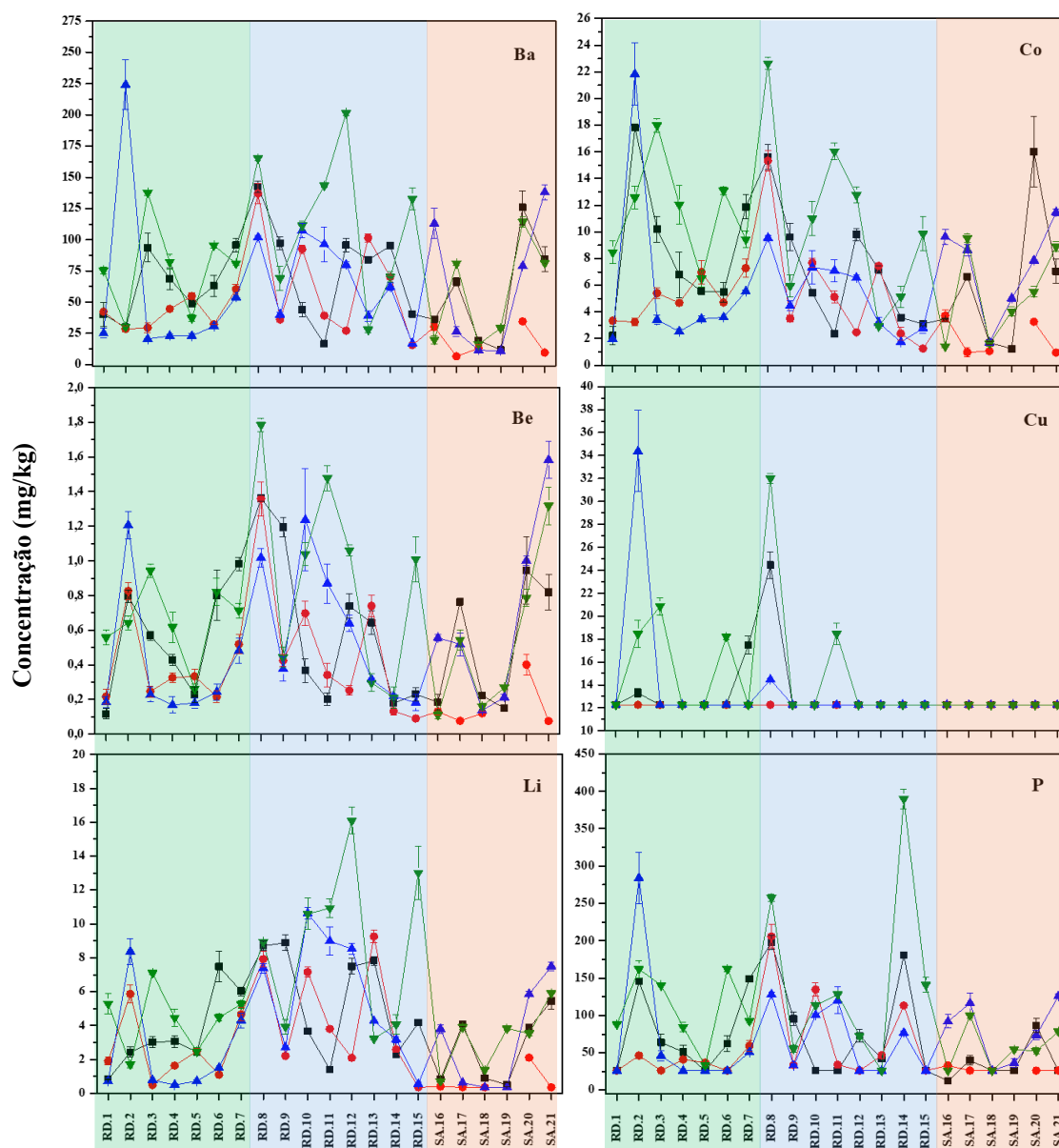


Figura S42. Determinação da concentração para Ba, Co, Be, Cu, Li e P em 21 pontos de coleta ao longo da bacia do rio Doce em quatro coletas de sedimentos. (■) Abril/2023. (▼) Outubro/2023. (▲) Abril/2024. (●) Outubro/2024. RD: Rio Doce. SA: Rio Santo Antônio. (■) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (■) Rio Santo Antônio.

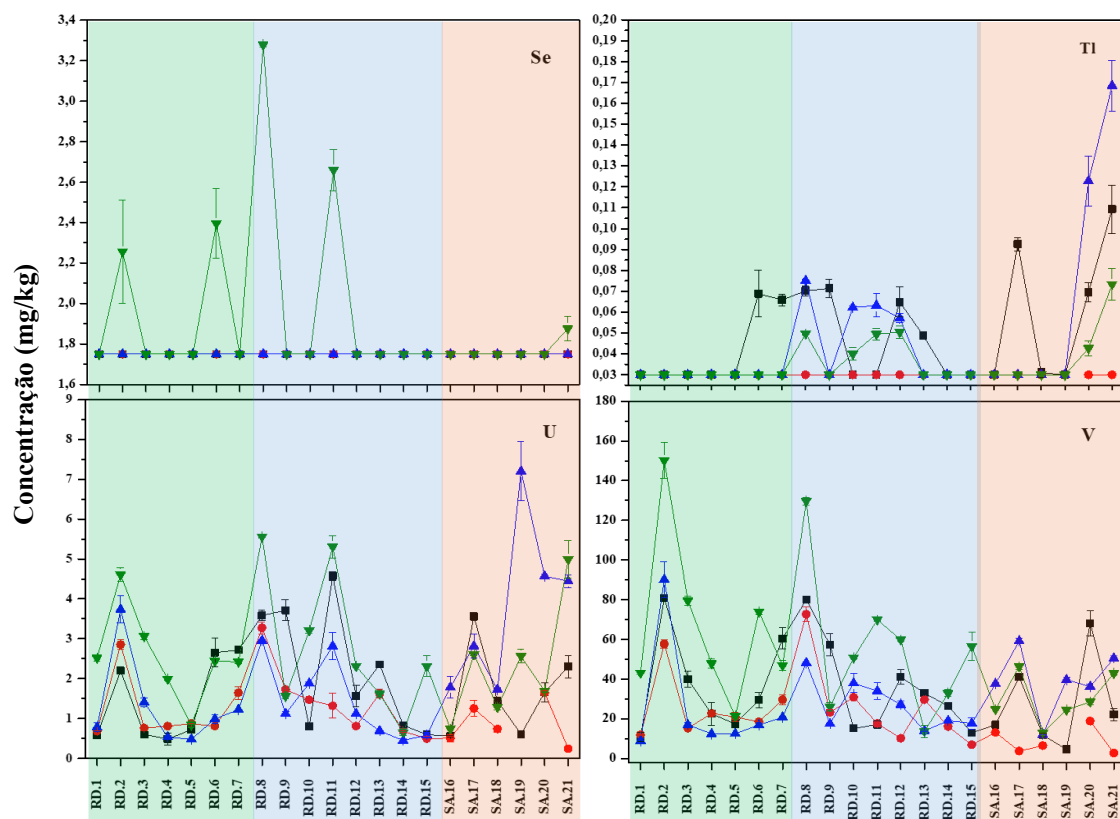


Figura S43. Determinação da concentração para Se, Tl, U e V nos 21 pontos de coleta ao longo da bacia do rio Doce em quatro coletas de sedimentos. (■) Abril/2023. (▼) Outubro/2023. (▲) Abril/2024. (●) Outubro/2024. RD: Rio Doce. SA: Rio Santo Antônio. (■) Alto Rio Doce. (■) Médio Rio Doce. (■) Rio Santo Antônio.

1ª COLETA															
Amostras	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mn	P	Pb	Tl	U	V	Zn
RD.1	4,31	0,57	0,20		0,29	0,36		0,18	0,86		0,13		0,31	0,30	
RD.2		0,43	1,35		2,30	0,74		0,52	1,06	1,83	1,04		1,18	2,22	0,60
RD.3		1,33	0,96		1,31	1,19		0,65	0,71	0,81	0,79		0,32	1,10	1,21
RD.4	0,52	0,98	0,73		0,87	0,64		0,66	0,58	0,65	0,63		0,26	0,62	0,56
RD.5	1,47	0,69	0,39		0,71	0,68		0,53	0,89		0,39		0,39	0,48	0,50
RD.6	0,94	0,90	1,36	1,54	0,71	1,03		1,61	1,30	0,78	1,56	1,57	1,42	0,81	1,60
RD.7	1,66	1,36	1,67	1,51	1,53	1,80	1,30	1,30	1,60	1,87	1,94	1,50	1,46	1,66	2,33
RD.8	1,75	2,03	2,31	1,49	2,01	2,41	1,81	1,87	2,51	2,49	2,57	1,60	1,92	2,21	2,45
RD.9	0,22	1,38	2,03	1,19	1,24	1,32		1,91	1,20	1,20	2,28	1,62	1,99	1,58	1,43
RD.10	0,67	0,62	0,62		0,70	0,58		0,79	0,59		0,52		0,43	0,42	0,68
RD.11	0,30	0,24	0,34		0,30	0,41		0,30	0,24		0,34		2,45	0,47	
RD.12	1,31	1,36	1,26		1,26	1,31		1,61	1,38	0,92	1,19	1,47	0,84	1,13	1,30
RD.13	0,99	1,19	1,09		0,92	1,11		1,68	0,87	0,53	0,92	1,11	1,26	0,91	1,16
RD.14	0,22	1,35	0,30		0,46	1,05		0,50	0,89	2,27	0,36		0,45	0,73	0,35
RD.15		0,57	0,39		0,40	0,37		0,90	0,31		0,35		0,32	0,36	0,39

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S44. Fator de Enriquecimento da 1ª coleta de sedimentos.

2ª COLETA													
Amostras	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Li	Mn	P	Pb	U	V	Zn
RD.1	4,70	0,60	0,37		0,43	0,51	0,41	1,13		0,38	0,37	0,33	
RD.2		0,40	1,40		0,42	0,54	1,26	0,27	0,58	1,62	1,53	1,59	0,41
RD.3	8,35	0,42	0,42		0,70	0,71	0,10	0,70		0,36	0,41	0,42	
RD.4	1,20	0,63	0,55		0,60	0,71	0,35	1,01	0,52	0,52	0,43	0,63	0,43
RD.5	1,68	0,78	0,57		0,90	0,94	0,53	1,19	0,46	0,48	0,47	0,58	0,48
RD.6	3,21	0,46	0,37		0,60	0,73	0,23	0,78		0,38	0,43	0,51	0,32
RD.7	1,52	0,86	0,88		0,94	0,94		0,99	0,75	0,89	0,88	0,82	1,52
RD.8	2,07	1,95	2,31	1,76	1,97	2,59	1,70	3,71	2,59	2,42	1,75	2,00	2,60
RD.9	0,93	0,51	0,72		0,45	0,89	0,47	0,51	0,42	0,99	0,93	0,64	0,55
RD.10	0,97	1,31	1,18		0,99	0,95	1,54	1,02	1,69	1,21	0,79	0,85	1,30
RD.11	1,07	0,56	0,58		0,66	0,66	0,82	0,57	0,43	0,59	0,71	0,49	0,71
RD.12	1,03	0,38	0,43		0,32	0,38	0,45	0,39		0,32	0,43	0,28	0,32
RD.13	1,13	1,44	1,26	0,96	0,96	0,89	1,99	1,16	0,59	1,02	0,87	0,82	1,08
RD.14		1,00	0,22		0,30	0,46	0,56	0,42	1,42	0,21	0,36	0,44	0,33
RD.15		0,22	0,15		0,16	0,15		0,42		0,10	0,26	0,19	

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S45. Fator de Enriquecimento da 2ª coleta de sedimentos.

3ª COLETA															
Amostras	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mn	P	Pb	Tl	U	V	Zn
RD.1	2,19	0,36	0,31		0,25	0,35		0,16	0,43		0,22		0,42	0,25	
RD.2	6,95	3,19	2,05	2,41	2,81	2,89	2,55	1,80	9,58	3,57	2,37		2,00	2,48	1,95
RD.3	2,34	0,29	0,39		0,44	0,51		0,17	0,84	0,58	0,41		0,75	0,47	
RD.4	0,81	0,33	0,29		0,32	0,38		0,11	0,82		0,31		0,29	0,34	
RD.5	1,58	0,32	0,31		0,45	0,48		0,15	0,43		0,24		0,26	0,34	
RD.6	0,81	0,44	0,41		0,46	0,52		0,32	0,26		0,51		0,53	0,47	0,30
RD.7	1,46	0,77	0,82		0,71	0,84		0,92	0,47	0,64	0,81		0,66	0,57	0,87
RD.8	1,22	1,45	1,73	1,33	1,23	1,43	1,07	1,59	2,12	1,61	2,06	1,71	1,58	1,33	1,62
RD.9	0,96	0,57	0,64		0,57	0,63		0,58	0,68	0,41	0,71		0,60	0,48	0,57
RD.10	0,75	1,53	2,10	1,28	0,95	1,02		2,29	0,90	1,27	1,54	1,41	1,01	1,04	1,26
RD.11	0,67	1,37	1,48	1,30	0,91	0,99		1,93	1,21	1,51	1,89	1,44	1,51	0,94	1,13
RD.12	0,45	1,13	1,08		0,84	0,74		1,83	0,69		0,73	1,30	0,60	0,75	1,00
RD.13	0,45	0,55	0,54		0,41	0,43		0,92	0,40		0,40		0,37	0,38	0,36
RD.14		0,88	0,37		0,22	0,41		0,68	0,40	0,97	0,34		0,24	0,52	0,23
RD.15	0,38	0,24	0,31		0,36	0,50		0,12	0,36		0,22		0,31	0,49	

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S46. Fator de Enriquecimento da 3ª coleta de sedimentos.

4ª COLETA																
Amostras	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mn	P	Pb	Se	Tl	U	V	Zn
RD.1	8,04	1,07	0,95		1,09	1,31		1,14	1,66	1,11	1,07			1,35	1,19	1,03
RD.2	0,53	0,43	1,09	1,09	1,62	1,12	1,37	0,36	2,64	2,04	1,89	1,29		2,47	4,13	1,47
RD.3	7,17	1,95	1,60	1,25	2,32	2,13	1,55	1,53	4,86	1,77	1,86			1,64	2,19	2,09
RD.4	2,40	1,17	1,05		1,55	1,28		0,96	1,37	1,06	1,35			1,07	1,32	1,09
RD.5	3,24	0,53	0,44		0,84	0,53		0,53	0,70	0,42	0,49			0,45	0,59	0,68
RD.6	2,78	1,36	1,40	1,01	1,68	1,67	1,35	0,96	1,80	2,04	1,67	1,37		1,31	2,04	1,61
RD.7	2,16	1,15	1,21		1,21	1,32		1,13	1,27	1,17	1,42			1,30	1,29	1,82
RD.8	1,84	2,35	3,03	2,67	2,91	2,85	2,37	1,92	3,73	3,24	4,34	1,87	1,13	2,98	3,57	3,44
RD.9	1,23	0,98	0,75		0,77	0,60		0,84	1,41	0,70	1,06			0,84	0,72	0,96
RD.10	1,06	1,58	1,76	1,34	1,42	1,19		2,28	1,14	1,43	2,11		0,91	1,72	1,40	1,93
RD.11	3,72	2,04	2,51	2,32	2,06	2,53	1,37	2,35	2,88	1,61	3,35	1,52	1,12	2,84	1,93	2,89
RD.12	0,26	2,87	1,80	0,87	1,64	1,50		3,46	1,20	0,91	1,41		1,15	1,24	1,65	2,07
RD.13	1,32	0,40	0,50		0,38	0,25		0,69	0,36		0,42			0,87	0,38	0,52
RD.14		1,00	0,36		0,66			0,87	0,36	4,90	0,22			0,35	0,90	0,81
RD.15	0,47	1,89	1,71		1,27	1,22		2,80	1,39	1,77	1,86			1,24	1,55	1,29

LEGENDA		
Indicador	Fator de Enriquecimento	
	FE < 1	Mineral enriquecido
	1 < FE < 5	Enriquecimento moderado
	5 < FE < 20	Enriquecimento significativo
	20 < FE < 40	Alto enriquecimento
	FE > 40	Extremamente alto
	< LQ	Não se aplica

Figura S47. Fator de Enriquecimento da 4ª coleta de sedimentos.

1ª COLETA															
Amostras	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mn	P	Pb	Tl	U	V	Zn
RD.1	4,03	0,14	0,05		0,07	0,17		0,06	0,35		0,03		0,07	0,08	
RD.2		0,10	0,31		0,60	0,36	0,22	0,19	0,44	0,81	0,22		0,26	0,59	0,17
RD.3		0,33	0,22		0,34	0,57		0,23	0,29	0,35	0,17		0,07	0,29	0,33
RD.4	0,48	0,24	0,17		0,23	0,31		0,24	0,24	0,28	0,13		0,06	0,16	0,15
RD.5	1,37	0,17	0,09		0,19	0,33		0,19	0,36		0,08		0,09	0,13	0,14
RD.6	0,87	0,22	0,31	0,32	0,18	0,49		0,58	0,53	0,34	0,33	0,23	0,32	0,22	0,44
RD.7	1,55	0,34	0,38	0,31	0,40	0,86	0,29	0,47	0,66	0,82	0,41	0,22	0,32	0,44	0,64
RD.8	1,64	0,50	0,53	0,31	0,52	1,15	0,40	0,67	1,03	1,10	0,54	0,23	0,43	0,59	0,68
RD.9		0,34	0,47	0,25	0,32	0,63		0,69	0,49	0,53	0,48	0,24	0,44	0,42	0,39
RD.10	0,62	0,15	0,14		0,18	0,28		0,28	0,24		0,11		0,09	0,11	0,19
RD.11	0,28	0,06	0,08		0,08	0,20		0,11	0,10		0,07		0,54	0,13	
RD.12	1,23	0,34	0,29		0,33	0,63		0,58	0,57	0,40	0,25	0,22	0,19	0,30	0,36
RD.13	0,93	0,29	0,25		0,24	0,53		0,60	0,35	0,23	0,19	0,16	0,28	0,24	0,32
RD.14	0,21	0,33	0,07		0,12	0,50		0,18	0,37	1,00	0,08		0,10	0,19	0,10
RD.15		0,14	0,09		0,10	0,18		0,32	0,13		0,07		0,07	0,10	0,11

LEGENDA		
Indicador	Valores de $I_{geo}$	Qualidade do Sedimento
	> 5	Contaminação extrema
	4 a 5	Contaminação elevada e extrema
	3 a 4	Contaminação elevada
	2 a 3	Contaminação moderada a alta
	1 a 2	Contaminação moderada
	0 a 1	Sem contaminação a contaminação moderada
	0	Sem contaminação
	< LQ	Não se aplica

Figura S48. Índice de geoacumulação da 1ª coleta de sedimentos.

2ª COLETA													
Amostras	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Li	Mn	P	Pb	U	V	Zn
RD.1	4,39	0,15	0,08		0,11	0,24	0,15	0,46		0,08	0,08	0,09	
RD.2		0,10	0,32		0,11	0,26	0,45	0,11	0,26	0,34	0,34	0,42	0,11
RD.3	7,80	0,10	0,10		0,18	0,34	0,04	0,29		0,08	0,09	0,11	
RD.4	1,12	0,16	0,13		0,16	0,34	0,13	0,41	0,23	0,11	0,10	0,17	0,12
RD.5	1,57	0,19	0,13		0,23	0,45	0,19	0,49	0,20	0,10	0,10	0,15	0,13
RD.6	3,00	0,11	0,08		0,16	0,35	0,08	0,32		0,08	0,10	0,14	0,09
RD.7	1,42	0,21	0,20		0,24	0,45	0,36	0,41	0,33	0,19	0,20	0,22	0,42
RD.8	1,93	0,48	0,53	0,37	0,51	1,24	0,61	1,52	1,14	0,51	0,39	0,53	0,72
RD.9	0,87	0,13	0,17		0,12	0,43	0,17	0,21	0,19	0,21	0,21	0,17	0,15
RD.10	0,90	0,32	0,27		0,26	0,46	0,55	0,42	0,74	0,25	0,17	0,23	0,36
RD.11	1,00	0,14	0,13		0,17	0,32	0,29	0,24	0,19	0,13	0,16	0,13	0,20
RD.12	0,97	0,09	0,10		0,08	0,18	0,16	0,16		0,07	0,10	0,07	0,09
RD.13	1,06	0,36	0,29	0,20	0,25	0,43	0,71	0,48	0,26	0,21	0,19	0,22	0,30
RD.14		0,25	0,05		0,08	0,22	0,20	0,17	0,63	0,04	0,08	0,12	0,09
RD.15		0,05	0,03		0,04	0,07		0,17		0,02	0,06	0,05	

LEGENDA		
Indicador	Valores de $I_{geo}$	Qualidade do Sedimento
	> 5	Contaminação extrema
	4 a 5	Contaminação elevada e extrema
	3 a 4	Contaminação elevada
	2 a 3	Contaminação moderada a alta
	1 a 2	Contaminação moderada
	0 a 1	Sem contaminação a contaminação moderada
	0	Sem contaminação
	< LQ	Não se aplica

Figura S49. Índice de geoacumulação da 2ª coleta de sedimentos.

3ª COLETA															
Amostras	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mn	P	Pb	Tl	U	V	Zn
RD.1	2,04	0,09	0,07		0,07	0,17		0,06	0,18		0,05		0,09	0,07	
RD.2	6,49	0,79	0,47	0,50	0,73	1,38	0,56	0,65	3,93	1,57	0,50		0,44	0,66	0,54
RD.3	2,18	0,07	0,09		0,11	0,24		0,06	0,34	0,26	0,09		0,17	0,12	
RD.4	0,76	0,08	0,07		0,08	0,18		0,04	0,34		0,06		0,06	0,09	
RD.5	1,48	0,08	0,07		0,12	0,23		0,06	0,18		0,05		0,06	0,09	
RD.6	0,75	0,11	0,10		0,12	0,25		0,12	0,11		0,11		0,12	0,12	0,08
RD.7	1,36	0,19	0,19		0,18	0,40		0,33	0,19	0,28	0,17		0,15	0,15	0,24
RD.8	1,14	0,36	0,40	0,28	0,32	0,68	0,24	0,57	0,87	0,71	0,43	0,25	0,35	0,35	0,45
RD.9	0,90	0,14	0,15		0,15	0,30		0,21	0,28	0,18	0,15		0,13	0,13	0,16
RD.10	0,70	0,38	0,48	0,27	0,25	0,49		0,82	0,37	0,56	0,32	0,21	0,22	0,28	0,35
RD.11	0,63	0,34	0,34	0,27	0,24	0,47		0,69	0,50	0,66	0,40	0,21	0,34	0,25	0,31
RD.12	0,42	0,28	0,25		0,22	0,35		0,66	0,28		0,15	0,19	0,13	0,20	0,28
RD.13	0,42	0,14	0,12		0,11	0,21		0,33	0,16		0,09		0,08	0,10	0,10
RD.14		0,22	0,09		0,06	0,20		0,24	0,16	0,43	0,07		0,05	0,14	
RD.15	0,36	0,06	0,07		0,09	0,24		0,04	0,15		0,05		0,07	0,13	

LEGENDA		
Indicador	Valores de $I_{geo}$	Qualidade do Sedimento
	> 5	Contaminação extrema
	4 a 5	Contaminação elevada e extrema
	3 a 4	Contaminação elevada
	2 a 3	Contaminação moderada a alta
	1 a 2	Contaminação moderada
	0 a 1	Sem contaminação a contaminação moderada
	0	Sem contaminação
	< LQ	Não se aplica

Figura S50. Índice de geoacumulação da 3ª coleta de sedimentos.

4ª COLETA																
Amostras	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Li	Mn	P	Pb	Se	Tl	U	V	Zn
RD.1	7,51	0,26	0,22		0,28	0,63		0,41	0,68	0,49	0,22			0,30	0,32	0,28
RD.2	0,49	0,11	0,25	0,23	0,42	0,53	0,30	0,13	1,08	0,90	0,40	0,26		0,55	1,10	0,40
RD.3	6,70	0,48	0,37	0,26	0,60	1,02	0,34	0,55	1,99	0,78	0,39			0,36	0,58	0,58
RD.4	2,24	0,29	0,24		0,40	0,61		0,34	0,56	0,47	0,28			0,24	0,35	0,30
RD.5	3,03	0,13	0,10		0,22	0,26		0,19	0,29	0,18	0,10			0,10	0,16	0,19
RD.6	2,59	0,33	0,32	0,21	0,44	0,80	0,30	0,35	0,74	0,90	0,35	0,27		0,29	0,54	0,44
RD.7	2,01	0,28	0,28		0,31	0,63		0,41	0,52	0,51	0,30			0,29	0,34	0,50
RD.8	1,72	0,58	0,70	0,56	0,76	1,36	0,52	0,69	1,53	1,43	0,91	0,38	0,17	0,66	0,95	0,95
RD.9	1,15	0,24	0,17		0,20	0,29		0,30	0,58	0,31	0,22			0,19	0,19	0,27
RD.10	0,99	0,39	0,41	0,28	0,37	0,57		0,82	0,47	0,63	0,44		0,13	0,38	0,37	0,53
RD.11	3,48	0,50	0,58	0,48	0,54	1,21	0,30	0,84	1,18	0,71	0,71	0,30	0,16	0,63	0,51	0,80
RD.12	0,24	0,71	0,41	0,18	0,43	0,72		1,24	0,49	0,40	0,30		0,17	0,28	0,44	0,57
RD.13	1,23	0,10	0,12		0,10	0,12		0,25	0,15		0,09			0,19	0,10	0,14
RD.14		0,25	0,08		0,17			0,31	0,15	2,15	0,05			0,08	0,24	0,22
RD.15	0,43	0,47	0,39		0,33	0,58		1,01	0,57	0,78	0,39			0,27	0,41	0,36

LEGENDA		
Indicador	Valores de $I_{geo}$	Qualidade do Sedimento
	> 5	Contaminação extrema
	4 a 5	Contaminação elevada e extrema
	3 a 4	Contaminação elevada
	2 a 3	Contaminação moderada a alta
	1 a 2	Contaminação moderada
	0 a 1	Sem contaminação a contaminação moderada
	0	Sem contaminação
	< LQ	Não se aplica

Figura S51. Índice de geoacumulação da 4ª coleta de sedimentos.

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2017 a 2022 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos.

<b>Elemento</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Ano coleta</b>	<b>Ref</b>
<b>Ag</b>	0,3	0,4	2017	Renova
	0,2	0,3	2018	Renova
	0,2	0,3	2019	Renova
	1,0	3,0	2020	Renova
	0,5	0,5	2021	Renova
	0,5	0,5	2022	Renova
	0,5	0,5	2023	Renova
	<0,37	<0,37	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>As</b>	4,0	19,30	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	<LQ	27,15	Dez/ 2015	Pauly et al., 2024
	<LQ	76,85	Nov/2016	Pauly et al., 2024
	1,5	14,0	2017	Renova
	<LD	<LD		Ferreira et al., 2021
	1,5	9,6	2018	Renova
	SD	0,006		Costa et al., 2022 <sup>a</sup>
	SD	0,048		Costa et al., 2022 <sup>b</sup>
	SD	7		Lipski et al., 2024
	1,5	19,0	2019	Renova
	6,52	44,11		Sartori et al., 2023 <sup>a</sup>
	SD	0,034		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	1,634		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	0,012		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	0,071		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	<LQ	29,07		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	3,15	47,46		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	1,5	25,3	2020	Renova
	SD	0,314		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	0,11		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
0,1	35,4	2021		Renova
0,1	17,5	2022	Renova	
0,1	23,9	2023	Renova	
<1,46	56,71	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

<b>Al</b>	SD	35.5493,4	Nov/2015	Viana et al., 2020 <sup>e</sup>	
	SD	268968,2		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>	
	895,7	36810,5	Dez/2015	Pauly et al., 2024	
	1118	69080	2015	Vergilio et al., 2021	
	600,9	30285,7		Pauly et al., 2024	
	8210	47900	2016	Vergilio et al., 2021	
	1490	23900	2017	Renova	
	1235,3	12730	2018	Renova	
	1754,8	23539,3		Renova	
	430	24130		Sartori et al., 2023	
	4713,6	49931	2019	Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>	
	4941,5	59276		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>	
	1459	13588,3	2020	Renova	
	2252,5	54825		Renova	
	8560	57300	2021	Abessa et al., 2024 <sup>d</sup>	
	4630	54125	2022	Renova	
	4040	40325	2023	Renova	
	SD	SD	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	
	<b>B</b>	9,8	17	2017	Renova
		9,8	9,9	2018	Renova
9,8		9,9	2019	Renova	
10		10	2020	Renova	
0,5		15,2	2021	Renova	
0,5		0,5	2022	Renova	
0,5		0,5	2023	Renova	
<6,48		<6,48	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	
<b>Ba</b>		8,90	22,17	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	16	101	2017	Renova	
	<LD	<LD		Ferreira et al., 2021	
	14	93,8	2018	Renova	
	SD	40		Lipski et al., 2024	
	18	147	2019	Renova	
	34,51	235,94		Sartori et al., 2023	
	8,4	114,3	2020	Renova	
	10,7	221	2021	Renova	
	25	205	2022	Renova	
	35,8	213,3	2023	Renova	
	6,52	224,16	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

<b>Be</b>	0,3	1,0	2017	Renova
	0,2	0,6	2018	Renova
	0,2	1,0	2019	Renova
	0,3	0,7	2020	Renova
	0,5	0,5	2021	Renova
	0,5	0,5	2022	Renova
	0,5	0,5	2023	Renova
	0,08	1,58	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>Cd</b>	SD	2,5	Nov/2015	Viana et al., 2020 <sup>c</sup>
	<LD	<LD		Camêlo et al., 2024
	SD	5,2	Dez/2015	Viana et al., 2020 <sup>c</sup>
	<LQ	1,83		Pauly et al., 2024
	<LQ	1,22	2016	Pauly et al., 2024
	025	0,43	2017	Renova
	0,24	0,25		Renova
	SD	0,2	2018	Lipski et al., 2024
	SD	0,02		Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,011		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	0,87	6,50		Renova
	<LQ	2,34		Sartori et al., 2023
	SD	0,01		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	0,438	2019	Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,004		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	0,033		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	<LQ	1,54		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	<LQ	5,14		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	0,3	0,3		Renova
	SD	1,086	2020	Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	0,09		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	0,05	0,05	2021	Renova
	0,05	0,05	2022	Renova
0,05	0,05	2023	Renova	
<0,07	0,22	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

<b>Co</b>	<LD	4,10	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	1,7	9,8	2017	Renova
	2,4	10,0	2018	Renova
	2,5	13,8	2019	Renova
	1,3	13	2020	Renova
	1,3	26,6	2021	Renova
	2,2	17	2022	Renova
	6,5	17,1	2023	Renova
	0,93	22,62	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>Cr</b>	SD	69,9	Nov/2015	Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	7,84	42,95		Camêlo et al., 2024
	SD	63,9	Dez/2015	Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	4,87	61,35		Pauly et al., 2024
	<LQ	39,92	2016	Pauly et al., 2024
	7,3	62	2017	Renova
	<LQ	385		Ferreira et al., 2021
	4,3	61,5		Renova
	1,99	165		Aguiar et al., 2023
	SD	9,584	2018	Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,35		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	28		Lipski et al., 2024
	8,9	61,5		Renova
	0,1	0,55		Sartori et al., 2023
	SD	8,458		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	19,22		Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,394	2019	Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	4,029		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	49,9		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	14,54	31,94		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	11,89	65,61		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	5,4	56,3	2020	Renova
	SD	1,567		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
SD	3,94		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>	
SD	25,90		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>	
10,9	126,5		Renova	
34,2	135	2021	Abessa et al., 2024 <sup>d</sup>	
17,3	82,3	2022	Renova	
20,6	104,3	2023	Renova	
<1,05	214,38	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

<b>Cu</b>	6,43	30,43	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	SD	25,3		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	1,38	73,7	Dez/2015	Pauly et al., 2024
	SD	24,8		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	2,41	31,4		Pauly et al., 2024
	1,5	13	2017	Renova
	2	79		Ferreira et al., 2021
	1,6	15,3		Renova
	2,0	44,92	2018	Aguiar et al., 2023
	SD	2,079		Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,132		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	7		Lipski et al., 2024
	13,6	148,5		Renova
	3,6	18,47		Sartori et al., 2023
	SD	1,665		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	2,219		Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,119	2019	Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	1,361		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	5		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	3,55	26,98		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	2,56	23,03		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	1,9	18,8		Renova
	SD	0,602	2020	Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	2,066		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	12,7		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	0,9	38,1	2021	Renova
	10,6	47,2		Abessa et al., 2024 <sup>d</sup>
	3,8	24,9	2022	Renova
6,5	31	2023	Renova	
<12,25	34,38	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	
<b>Hg</b>	0,13	0,15	2017	Renova
	0,14	0,15		Renova
	SD	0,002	2018	Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,003		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	0,2		Lipski et al., 2024
	0,14	0,15		Renova
	SD	0,003		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	0,099	2019	Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,004		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	0,032		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	2,03	25,10		Renova
	SD	0,12	2020	Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	0,572		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	0,05	0,05	2021	Renova
	0,05	0,05	2022	Renova
	0,10	0,12	2023	Renova
	<0,59	<0,59	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

<b>Li</b>	<0,35	16,09	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>
	SD	199.462,6		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	13.792,96	42.558,49	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	SD	286.373,1		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	19.012,6	98.641,8	Dez/2015	Pauly et al., 2024
	1790	130.030	2015	Vergilio et al., 2021
	3,45	286,59		Vergilio et al., 2021
	3.216,37	61.118	2016	Pauly et al., 2024
	7.650,0	238.601,0	2017	Renova
	5.869,5	65.547,0		Renova
	22.068	190.110		Aguiar et al., 2023 <sup>f</sup>
	SD	114	2018	Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	20,41		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	132.400		Lipski et al., 2024
	5.137,8	99.112,5		Renova
	44.000	150.300		Sartori et al., 2023
<b>Fe</b>	SD	98,94		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	116,5		Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	17	2019	Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	194,4		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	18.700		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	16.694,2	67.228,3		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	16.145,8	286.494,3		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	6.764,0	45.948,7		Renova
	SD	324,2	2020	Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	276,9		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	50.500		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	11.085	95.300	2021	Renova
	39.700	127.000		Abessa et al., 2024 <sup>d</sup>
	29.117,5	72.175,0	2022	Renova
	34.200	70.250	2023	Renova
	SD	SD	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

	121,36	907,38	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	28,4	9.056,7	Dez/2015	Pauly et al., 2024
	40	1.350	2015	Vergilio et al., 2021
	50	3.630		Vergilio et al., 2021
	33,06	6.862,8	2016	Pauly et al., 2024
	62	1289	2017	Renova
	120	1097,5		Renova
	270	2274		Aguiar et al., 2023
	SD	171,8	2018	Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	14,28		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	520		Lipski et al., 2024
	150,3	1048,3		Renova
	40	930		Sartori et al., 2023
	SD	163,9		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
<b>Mn</b>	SD	54,9		Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	17,73	2019	Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	172,3		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	264		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	94,4	8.546,4		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	92,8	11.373,1		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	92,7	1276		Renova
	SD	37,52	2020	Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	86,19		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	420		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	152,8	2145	2021	Renova
	334	2580		Abessa et al., 2024
	256,8	1054,3	2022	Renova
	313,5	987,3	2023	Renova
	33,25	4194	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>
	49	861	2017	Renova
	38	376,3		Renova
	SD	8,1	2018	Lipski et al., 2024
	43,3	430,5	2019	Renova
<b>P</b>	34,2	242,5	2020	Renova
	71,6	948,5	2021	Renova
	200,8	654,8	2022	Renova
	169,9	674,8	2023	Renova
	<11,93	282	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

<b>Ni</b>	SD	27,1		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	4,51	11,49	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	SD	23,6		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	1,28	16,45	Dez/2015	Pauly et al., 2024
	1,05	37,63	2015	Vergilio et al., 2021
	2,71	40,89		Vergilio et al., 2021
	1,31	11,26	2016	Pauly et al., 2024
	1,6	16		Renova
	<LD	<LD	2017	Ferreira et al., 2021
	1,4	15,3		Renova
	3,57	52,41	2018	Aguiar et al., 2023
	SD	9		Lipski et al., 2024
	5,1	20		Renova
	27,55	195,29		Sartori et al., 2023
	SD	4	2019	Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	5,38	13,94		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	3,54	25,45		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	1,8	14,5	2020	Renova
	SD	5,70		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	3,4	43,2	2021	Renova
16	46,7		Abessa et al., 2024	
1,9	25,1	2022	Renova	
6	26,9	2023	Renova	
SD	SD	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	
<b>Sb</b>	0,3	0,4	2017	Renova
	0,2	0,3	2018	Renova
	SD	0,2		Lipski et al., 2024
	0,2	0,3	2019	Renova
	0,3	0,3	2020	Renova
	0,5	1,2	2021	Renova
	0,5	0,5	2022	Renova
	0,5	0,5	2023	Renova
	<1,29	<1,29	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>Se</b>	2,0	3,5	2017	Renova
	1,9	2,0	2018	Renova
	SD	0,6		Lipski et al., 2024
	2,0	2,0	2019	Renova
	0,5	0,5	2020	Renova
	0,5	0,5	2021	Renova
	0,5	0,5	2022	Renova
	0,4	0,4	2023	Renova
	<1,75	3,28	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

<b>Pb</b>	SD	35,4	Nov/2015	Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	3,06	9,15		Camêlo et al., 2024
	SD	24,4	Dez/2015	Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	<LQ	15,8		Pauly et al., 2024
	0,38	20,98	2015	Vergilio et al., 2021
	3,26	27,09	2016	Vergilio et al., 2021
	<LQ	9,99		Pauly et al., 2024
	2,6	29	2017	Renova
	<LD	135		Ferreira et al., 2021
	2,4	15,9		Renova
	2,94	43,41		Aguiar et al., 2023
	SD	1,434	2018	Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,211		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	3		Lipski et al., 2024
	1,8	9,5	2019	Renova
	SD	1,428		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	5,99		Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	0,304		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	0,39		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	11,1		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	3,97	28,23		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	2,96	32,7		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	1,5	9,5		Renova
	SD	0,72	2020	Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	0,23		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	22,10		Ferreira et al., 2024 <sup>e</sup>
	2,7	36,1	2021	Renova
	<0,05	42,8		Abessa et al., 2024
3,4	24,6	2022	Renova	
11	29,7	2023	Renova	
1,15	49,64	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	
<b>Tl</b>	<0,03	0,07	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>U</b>	0,24	5,31	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>
<b>V</b>	24,56	72,45	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	8,5	55	2017	Renova
	<LD	<LD		Ferreira et al., 2021
	6,9	52,3	2018	Renova
	9,4	83,3	2019	Renova
	18,2	198,0	2020	Renova
	10,7	134,5	2021	Renova
	19,1	70,7	2022	Renova
	13,5	117,5	2023	Renova
2,73	150,1	2023/2024	<b>Esse trabalho</b>	

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados

Tabela S10. Teores de concentração máxima e mínima de 2010 a 2023 para Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, P, Pb, Se, Sb, Tl, U, V, and Zn em sedimentos (continuação).

	SD	73,7		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	24,45	51,06	Nov/2015	Camêlo et al., 2024
	SD	58		Viana et al., 2020 <sup>e</sup>
	5,55	102,27	Dez/2015	Pauly et al., 2024
	4,30	77,69	2015	Vergilio et al., 2021
	8,12	101,04		Vergilio et al., 2021
	4,77	53,6	2016	Pauly et al., 2024
	8,1	76		Renova
	<LD	55	2017	Ferreira et al., 2021
	7,1	58,8		Renova
	24,51	75,53		Aguiar et al., 2023
	SD	6,876	2018	Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	38,74		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	SD	22		Lipski et al., 2024
<b>Zn</b>	11,3	78,7		Renova
	SD	7,102		Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	46,26		Costa et al., 2022 <sup>ad</sup>
	SD	33,06	2019	Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	SD	32,75		Costa et al., 2022 <sup>bd</sup>
	17,77	69,58		Pauly et al., 2024 <sup>c</sup>
	11,48	85,67		Pauly et al., 2024 <sup>d</sup>
	4,5	54,5		Renova
	SD	35,65	2020	Costa et al., 2022 <sup>ac</sup>
	SD	15,27		Costa et al., 2022 <sup>bc</sup>
	7,1	96		Renova
	38,5	147	2021	Abessa et al., 2024
	16,2	68,1	2022	Renova
	13,5	58	2023	Renova
	<9,88	168	2022/2024	<b>Esse trabalho</b>

<sup>a</sup>Foz do rio Doce; <sup>b</sup>Praia; <sup>c</sup>Período chuvoso; <sup>d</sup>Período seco; <sup>e</sup>Estuário; <sup>f</sup> plataforma continental SD: sem dados