

Avaliação da qualidade das águas e sedimentos do Rio Paraopeba - 4 anos



Foto: arquivo Igam

Caderno Especial . 2023

Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Paraopeba após 4 anos do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA em Brumadinho/MG

Avaliação da qualidade das águas e sedimentos do Rio Paraopeba

Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Paraopeba após 4 anos do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA em Brumadinho/MG

Belo Horizonte
2023

Instituto Mineiro de Gestão das Águas

Avaliação da qualidade da água e sedimentos do rio Paraopeba

Acompanhamento da Qualidade das Águas do rio Paraopeba Após 4 anos
do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale S.A.
– Brumadinho/MG

Belo Horizonte

2023

Governo do Estado de Minas Gerais

Governador

Romeu Zema Neto

SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

Secretária

Marília Carvalho de Melo

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

Diretora Geral

Marcelo da Fonseca

Diretora de Operações e Eventos Críticos

Wanderlene Ferreira Nacif

Gerente de Monitoramento de Qualidade das Águas

Sylvia Therese Meyer Ribeiro

I59a Instituto Mineiro de Gestão das Águas.
Avaliação da qualidade das águas e sedimentos do Rio Paraopeba:
acompanhamento da qualidade das águas do Rio Paraopeba após 4 anos do
rompimento da barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA –
Brumadinho/MG / Instituto Mineiro de Gestão das Águas . --- Belo
Horizonte: Igam, 2023.
96 p.; il.

Caderno especial.

1. Qualidade da água - monitoramento. 2. Sedimentos. 3. Rio Paraopeba.
I. Título.

CDU: 556:550.4

© 2023 Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM

Equipe Técnica - Gerência de Monitoramento de Qualidade das Águas

Átalo Pinto Coelho Durso, Engenheiro Ambiental

André Gustavo Oliveira Nassif, Estatístico

Cláudia Alves Ferreira, Química

Iury Chrystian de Oliveira Assunção, graduando em Química Tecnológica

Katiane Cristina de Brito Almeida, Bióloga

Mariana Elissa Vieira de Souza, Geógrafa

Matheus Duarte Santos, Geógrafo

Marco Antônio Ribeiro Silva, graduando em Ciências Biológicas

Patrícia Franklin Mayrink Nogueira, Bióloga

Sérgio Pimenta Costa, Biólogo

Vanessa Kelly Saraiva, Química

SIMGE - Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais

Paula Pereira de Souza, Meteorologista

Normalização bibliográfica

Foto Capa: Sisema

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	7
1 INTRODUÇÃO.....	8
2 DESASTRE AMBIENTAL DA VALE NO MUNICÍPIO DE BRUMADINHO – AÇÕES 2019 A 2022.....	10
3 PRINCIPAIS USOS DA ÁGUA NA CALHA DO RIO PARAPEBA	13
4 AVALIAÇÃO DA ANOMALIA DE PRECIPITAÇÃO TRIMESTRAL NO ANO DE 2022 NA BACIA DO PARAPEBA	14
5 PROGRAMA DE MONITORAMENTO EMERGENCIAL DO RIO PARAPEBA – ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS.....	21
5.1 Plano de amostragem – Metodologia	21
5.2 Rede de monitoramento	21
5.3 Frequência de amostragem.....	26
5.4 Parâmetros monitorados e padrões de qualidade.....	29
6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2022, NA CALHA DO RIO PARAPEBA	31
8 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE SEDIMENTOS DE JANEIRO DE 2019 A OUTUBRO DE 2022.....	61
9 CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS.....	91

APRESENTAÇÃO

A bacia do rio Paraopeba é um território estratégico para o Estado de Minas Gerais, uma vez que está localizada no Quadrilátero Ferrífero, região de importante produção mineral e relevância econômica. Sob o ponto de vista ambiental, a região também se destaca, por abrigar um ecossistema único no Estado, os campos ferruginosos, importante local de ocorrência de espécies endêmicas de anfíbios e plantas e riqueza de fauna em geral. Na bacia do rio Paraopeba, ainda estão três reservatórios de abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte/RMBH, bem como um ponto de captação no próprio rio Paraopeba, instalado em 2015, para reverter a condição de estresse hídrico ao qual estavam submetidos os reservatórios de abastecimento de água.

No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem de rejeito no complexo da Mina Córrego do Feijão, designada B1, da empresa Vale S.A. rompeu no ribeirão Ferro-Carvão, tributário do rio Paraopeba, no município de Brumadinho. O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), a partir de então, no uso de suas competências, intensificou o monitoramento da qualidade das águas e dos sedimentos ao longo do trecho do rio Paraopeba afetado pelo rompimento, prezando pelas informações atualizadas das condições dos cursos de água afetados.

Nesse caderno estão apresentados os dados de monitoramento das águas superficiais e sedimentos decorridos quatro anos do rompimento da barragem. O programa de monitoramento tem por objetivo fornecer à sociedade o conhecimento da situação da qualidade das águas dos corpos de água atingidos pelo desastre, bem como permitir o acompanhamento das ações de recuperação da bacia do rio Paraopeba. Além disso, aqui estão apresentadas as principais ações e entregas do órgão gestor de recursos hídricos no que se refere ao tema impacto na qualidade da água e usos múltiplos do rio Paraopeba.

Boa leitura!

Marcelo da Fonseca

Diretor Geral Igam

1 INTRODUÇÃO

A bacia do rio Paraopeba correspondente a 2,5% da área total do estado de Minas Gerais (MG), na qual estão inseridos 48 municípios, sendo que 14 deles estão na região metropolitana de Belo Horizonte. A bacia do rio Paraopeba pertencente à bacia do rio São Francisco, tem grande relevância econômica, uma vez que é uma área de importante produção mineral, além de contribuir para o abastecimento de água da região metropolitana de Belo Horizonte.

No dia 25 de janeiro de 2019, ocorreu o rompimento da barragem B-I (B1) de contenção de rejeitos, e na sequência a B-IV e B-IVA da mina Córrego do Feijão, de propriedade da mineradora Vale S.A, localizada no município de Brumadinho, Minas Gerais. A estrutura da barragem tinha uma área total de aproximadamente 27 hectares, 87 metros de altura e não recebia rejeitos desde 2016. A ruptura da Barragem B1 provocou a liberação de cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de produção mineral (Figura 1) atingindo o ribeirão Ferro-Carvão em direção ao rio Paraopeba e uma parte se espalhou até o remanso da Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo. O material depositado no rio Paraopeba continua a se mover carregado pelo rio e principalmente durante o período de chuvas intensas.

O rompimento da Barragem B1 tem sido considerado um desastre ambiental de grandes proporções e o maior acidente de trabalho da história brasileira. Tal fato suscitou preocupação não só na região, como também em toda a bacia do rio São Francisco que atravessa uma longa crise hídrica. Assim, ocorreram manifestações por parte dos governos dos Estados banhados pelo São Francisco, por várias instituições públicas e pela sociedade.

Diante desse quadro e aliado ao censo da Unesco (2018) que estima que o número de pessoas em situação de risco devido ao estresse hídrico provavelmente alcançará 2 bilhões no início da década de 2030, o monitoramento da qualidade da água é de suma importância para fundamentar a proposição de ações de controle de qualidade ambiental da bacia do Paraopeba. Dessa forma, necessárias são a manutenção e melhoria das condições ambientais locais e dos cursos de água contribuintes, para que a água possa atender, além dos usos pretendidos, os diversos usos previstos na legislação. Nesse contexto, o monitoramento de corpos hídricos tem como objetivos: gerar dados históricos de referência; diagnosticar a qualidade da água e

verificar se está de acordo com o uso designado pela legislação; prognosticar, com base no diagnóstico, as alterações na qualidade da água advindas de atividades antrópicas; subsidiar, com base no diagnóstico e prognósticos, medidas preventivas para manutenção da qualidade necessária para o uso pretendido e os serviços ecossistêmicos.

Figura 1 – Imagem da área da Barragem B-I da Mina do Córrego Feijão, antes e depois do rompimento



Fonte: Imagem extraída do Google Earth em 2019

2 DESASTRE AMBIENTAL DA VALE NO MUNICÍPIO DE BRUMADINHO – AÇÕES 2019 a 2022

Programa de monitoramento da qualidade das águas superficiais e sedimentos

Imediatamente após o rompimento da barragem B-I de contenção de rejeitos e, na sequência, as barragens B-IV e B-IVA da mina Córrego do Feijão, pertencente à Vale S.A, o Igam atuou em diversas ações no âmbito de gestão das águas tais como restrição de uso, emissão de outorgas emergenciais para captação, alinhamento com o Conselho Estadual de Política Ambiental (Copam) e com a Companhia de Saneamento de Minas Gerais (Copasa), além do monitoramento constante das águas e sedimentos.

No âmbito do monitoramento, no dia subsequente ao rompimento das barragens (B1, B-IV e B-IVA) o Igam intensificou a frequência de coletas que passou a ser diária na água superficial e semanal no sedimento, na calha do rio Paraopeba, entre Brumadinho e Felixlândia, durante os primeiros 60 dias após o rompimento. Além disso, adicionou-se ao monitoramento 8 estações de amostragem para um melhor acompanhamento do impacto causado sobre as águas do rio Paraopeba.

Atualmente, o Igam monitora, mensalmente, 14 pontos na bacia do rio Paraopeba e outros três localizados no corpo do reservatório de Três Marias. Os resultados têm sido consolidados em relatórios técnicos e boletins informativos, com o intuito de orientar as ações dos órgãos competentes, tanto na esfera estadual quanto na federal, bem como fornecer à sociedade o conhecimento da situação da qualidade das águas atingidas pelo desastre.

Dentre os produtos elaborados pelo Igam estão o Boletim Informativo do Cidadão de periodicidade mensal que traz informações sobre qualidade da água do rio Paraopeba e o Relatório de Qualidade dos Sedimentos, que avalia os níveis de poluição e degradação ambiental do rio Paraopeba, sendo publicado a cada semestre. Essas publicações trazem as informações do monitoramento em uma linguagem mais acessível à população. Os relatórios são divulgados em um repositório que foi criado para armazenar e dar transparência a todos as

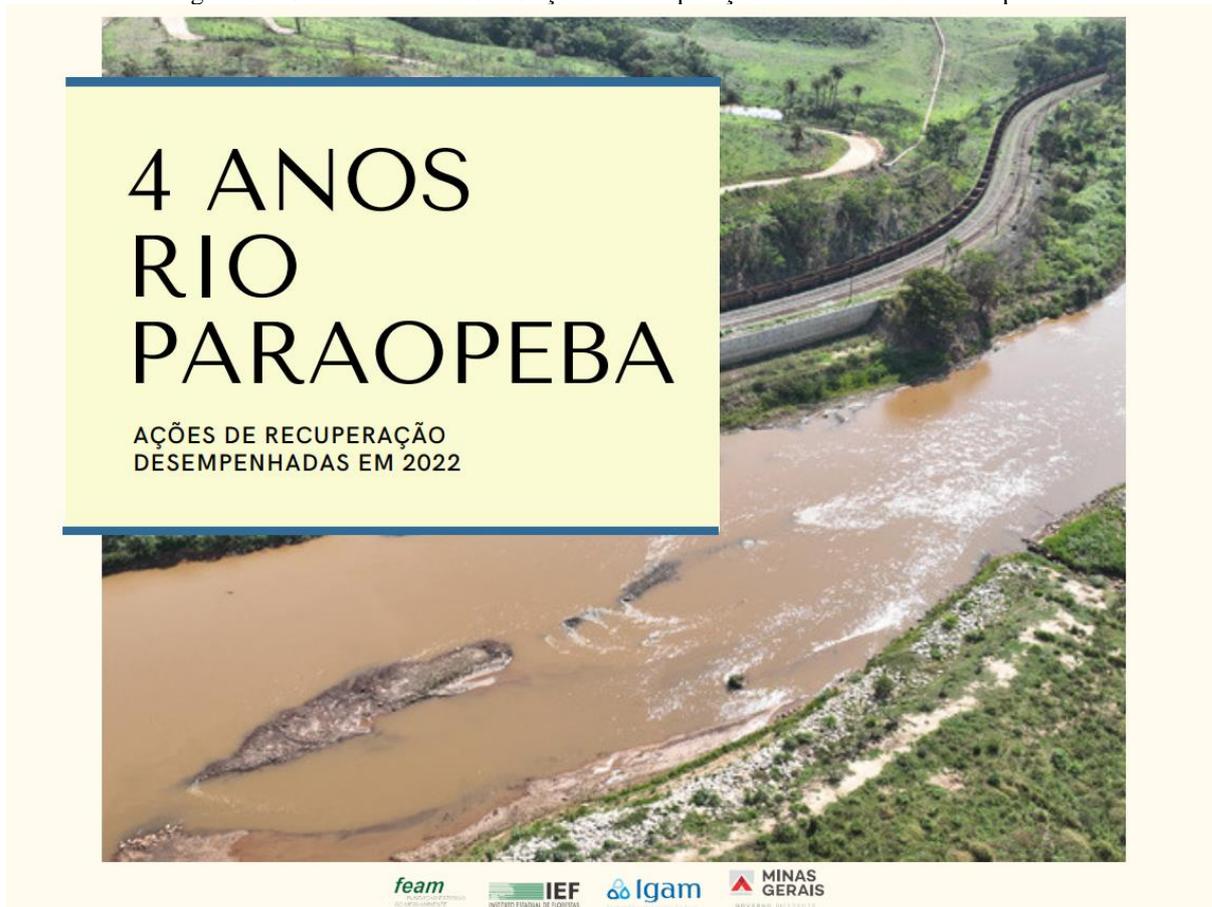
ações e acompanhamentos que estão sendo realizados no âmbito do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema)¹.

Em 9 de agosto de 2022 o Igam e a Feam realizaram vistoria na região do rompimento da Barragem B1, no município de Brumadinho. Os analistas ambientais vistoriaram o Marco Zero (onde o rejeito já foi totalmente removido e a área estava em fase inicial de revegetação), Estaca Prancha, Estação de Tratamento de Água Fluvial do ribeirão Ferro-Carvão (ETAF-1), localidade das operações das atividades de dragagem, *Sumps* 1 e 2 da dragagem, DTR03 (depósitos temporários de resíduos), estruturas de contenção (BH0, BH1, Dique 2) e também o remanso 1.

Além disso, no ano em que se completam quatro anos do rompimento das barragens da Vale S.A., em Brumadinho, o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema), lançou o [Caderno 4 anos](#) (Figura 2) das ações de recuperação da bacia do Rio Paraopeba. O documento lista as principais ações executadas no ano de 2022, dentre as quais, relacionadas à operação de dragagem do rio e à retomada das atividades de campo dos Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e Risco Ecológico.

¹<http://feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio-paraopeba/-acoes-e-programas-de-recuperacao-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-paraopeba>

Figura 2 – Caderno de 4 anos das ações de recuperação da bacia do Rio Paraopeba



Fonte: <http://feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio-paraopeba/-acoes-e-programas-de-recuperacao-ambiental-da-bacia-hidrografica-do-rio-paraopeba> (2023)

Neste Caderno são apresentadas, de forma sucinta e simplificada, as diversas atividades desempenhadas e medidas adotadas pelo Sisema, em articulação com o Comitê Pró-Brumadinho e demais órgãos envolvidos na recuperação ambiental da bacia do rio Paraopeba.

3 PRINCIPAIS USOS DA ÁGUA NA CALHA DO RIO PARAPEBA

A Deliberação Normativa Copam-MG n° 14, de 28 de dezembro de 1995 dispõe sobre o enquadramento das águas da bacia do rio Paraopeba. De acordo com essa deliberação o rio Paraopeba desde a confluência com o rio Maranhão até a represa de Três Marias é enquadrado como Classe 2.

Com a regulamentação da Política Estadual de Recursos Hídricos pelo Decreto n° 41.578, de 8 de março de 2001, e com vistas ao atendimento de seu artigo 7º, inciso II, o Conselho Estadual de Política Ambiental (Copam) e o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-MG) estabeleceram a Deliberação Normativa Conjunta n° 8, de 21 de novembro de 2022, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento dos corpos de água superficiais de domínio de Minas Gerais.

De acordo com esta deliberação normativa conjunta, os usos preponderantes para as classes de enquadramento são:

I. Classe especial - Águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção;
- b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e
- c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.

II. Classe 1 - Águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução Conama n° 274, de 2000;
- d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e
- e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

III. Classe 2: Águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho;
- d) à 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
- e) à aquicultura e à atividade de pesca.

IV. Classe 3 - Águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado;
- b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras;
- c) à pesca amadora;
- d) à recreação de contato secundário; e
- e) à dessedentação de animais.

V. Classe 4 - Águas que podem ser destinadas:

- a) à navegação; e
- b) à harmonia paisagística.

4 AVALIAÇÃO DA ANOMALIA DE PRECIPITAÇÃO TRIMESTRAL NO ANO DE 2022 NA BACIA DO PARAOPEBA

O diagnóstico da precipitação foi realizado pelo Simge tendo como base as estações meteorológicas convencionais e automáticas da rede de observação de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET e da rede pluviométrica automática disponibilizados no pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). As estações utilizadas se localizam na Bacia do Paraopeba e nas bacias vizinhas para melhor representatividade das bordas. Os dados foram interpolados para estimativa da chuva em áreas em que não existem estações.

A análise foi realizada considerando o ano civil de 2022, dividido em 4 trimestres: JFM, AMJ, JAS e OND. Para cada um dos trimestres são apresentados os campos de anomalia da precipitação observada no Paraopeba. Foi realizada a análise considerando a chuva total registrada durante o ano, também apresentada em forma de anomalia.

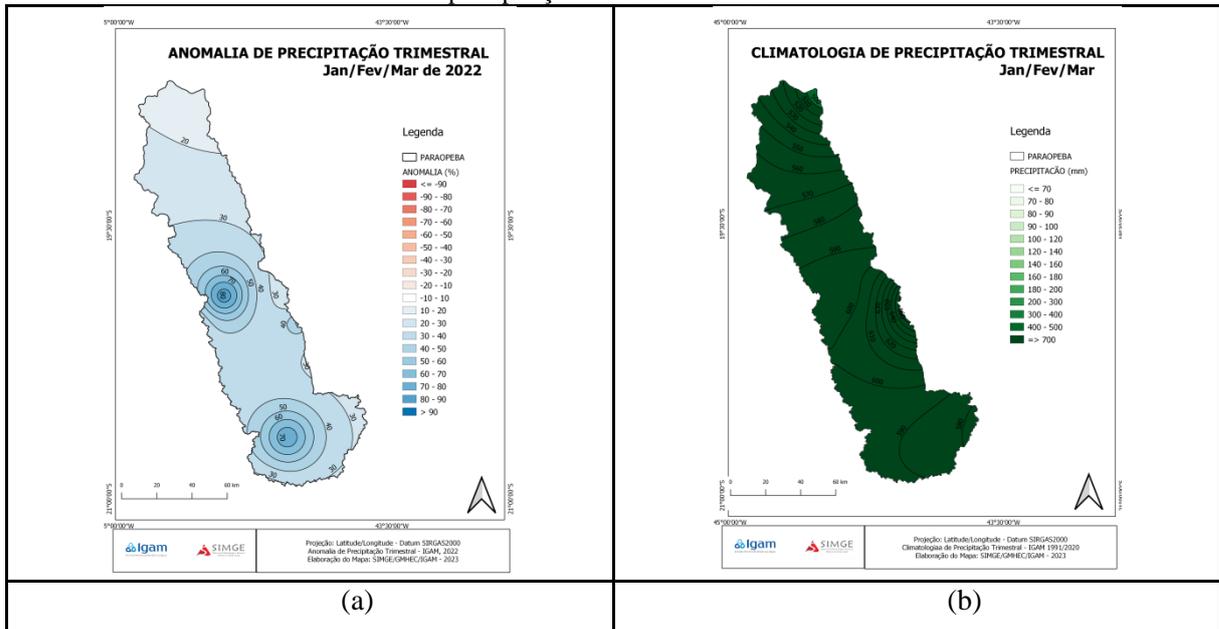
A anomalia de precipitação é variação da chuva observada (para mais ou para menos) tendo como referência a Normal climatológica. A anomalia positiva de chuvas ocorre quando a chuva fica acima da climatologia. Já a anomalia negativa ocorre quando a chuva fica abaixo da climatologia. A climatologia utilizada ilustra os valores das Normais climatológicas das chuvas publicadas pelo Inmet, com referência aos 30 anos entre 1991-2020.

A distribuição espacial da anomalia através destes campos permite a observação do comportamento espacial da mesma, dado que estas podem se comportar diferentemente mesmo dentro de uma mesma porção geográfica.

A cor branca nas figuras, indica as áreas em que a precipitação ficou em torno da climatologia. Já as cores em tons azuis representam as áreas em ocorreram anomalias positivas. As áreas preenchidas em cores quentes representam as áreas de anomalias negativas. Os valores são dados em porcentagem.

O trimestre JFM é caracterizado climatologicamente pela ocorrência de chuvas em torno de 500mm e 650mm no Paraopeba, com as maiores precipitações ocorrendo no alto Paraopeba. Em 2022, no decorrer dos meses de janeiro e fevereiro, foram registrados grande acumulados de precipitação próximos, respectivamente, aos 700 mm e 430mm. Já em março, houve uma queda brusca nos acumulados e os maiores totais registrados estiveram em torno de apenas 45 mm. O balanço final trimestral pode ser observado na anomalia na precipitação ocorrida no primeiro trimestre (JFM) de 2022, exibido na Figura 3, predominantemente positiva em toda Bacia do Paraopeba, com anomalias entre 70 e 80% superiores à média no médio e alto Paraopeba.

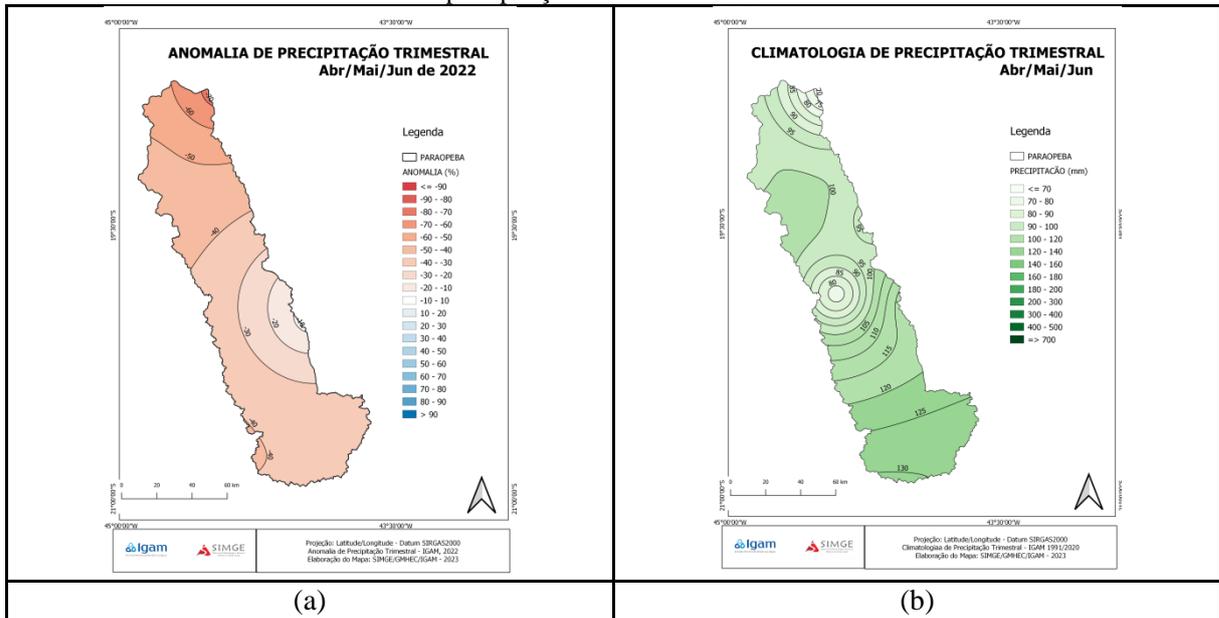
Figura 3 – Distribuição espacial da: (a) anomalia de precipitação no trimestre JFM de 2022; (b) climatologia da precipitação no trimestre JFM.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O segundo trimestre (AMJ), é o primeiro trimestre do período seco no estado. Climatologicamente, as chuvas computadas ao final do trimestre variam entre valores de 70mm a 130 mm, como exibido na Figura 4(b). Em 2022, Apesar de acumulados de até 54 mm em abril, observa-se ocorrência de anomalias predominantemente negativas no Paraopeba, conforme exibido na Figura 4(a). Os totais de precipitação observados dentro do trimestre foram inferiores à climatologia entre 70% e 10%, sendo os maiores desvios negativos observados no baixo Paraopeba.

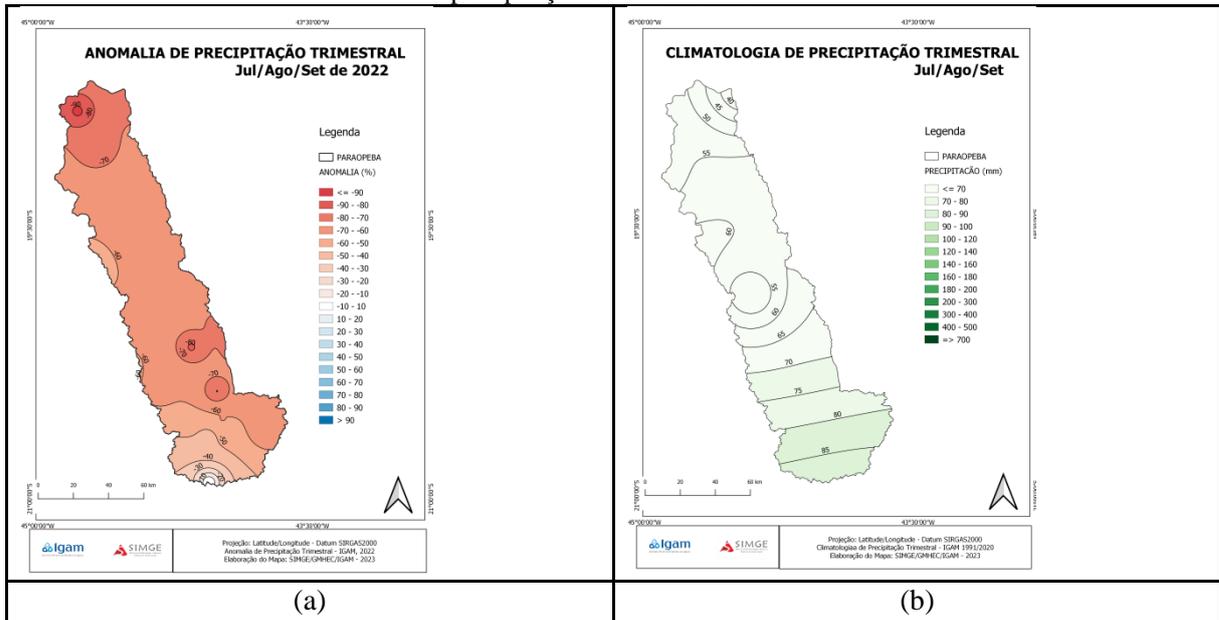
Figura 4 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação no trimestre AMJ de 2022 (b) climatologia da precipitação no trimestre AMJ.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O terceiro trimestre (JAS) é o segundo trimestre do período seco, que é também o pior trimestre do ano na contribuição de chuvas, já que as precipitações totais no Paraopeba, exibidas na Figura 5(b), nesse período variam climatologicamente entre 35mm e 85mm. Em 2022 os maiores acumulados em julho e agosto foram ficarem em torno de 3 e 7 mm respectivamente. Em setembro ocorreram acumulados de até 54 mm. O trimestre, exibido na Figura 5(a), se apresentou ainda pior do que a climatologia, com anomalias negativas ao longo de quase toda a área, com precipitações observadas ficando entre 90% e 80% inferiores à climatologia. Apenas no setor mais sul da bacia as precipitações ocorreram próximas à climatologia.

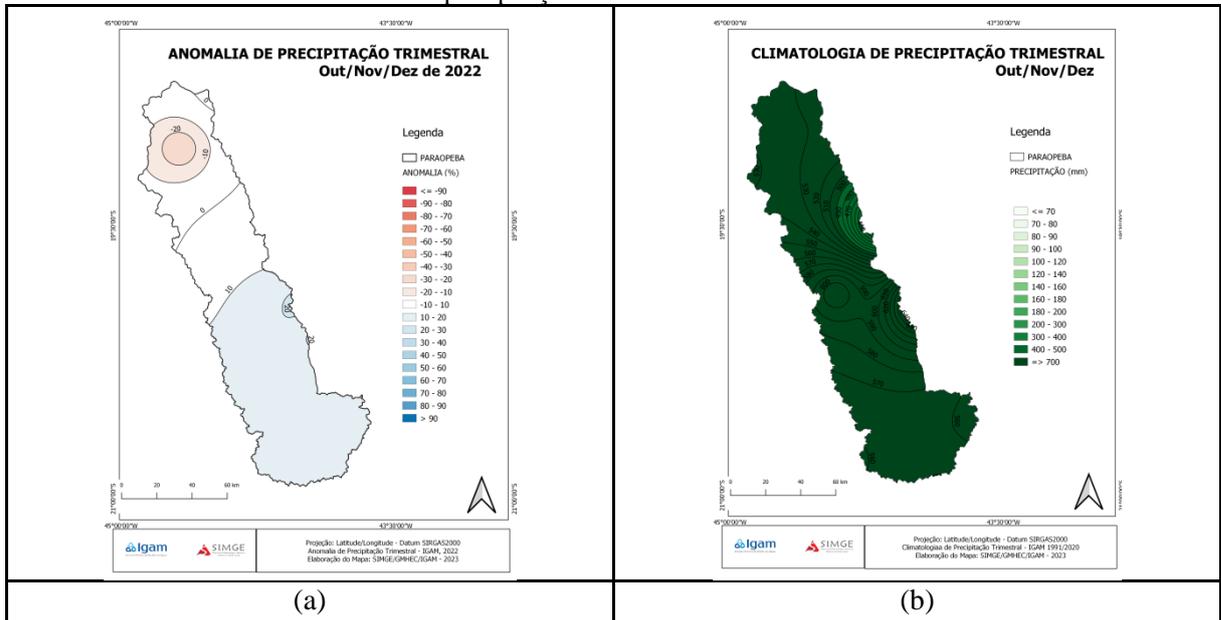
Figura 5 – Distribuição espacial da: (a) anomalia de precipitação no trimestre JAS de 2022; (b) climatologia da precipitação no trimestre JAS.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

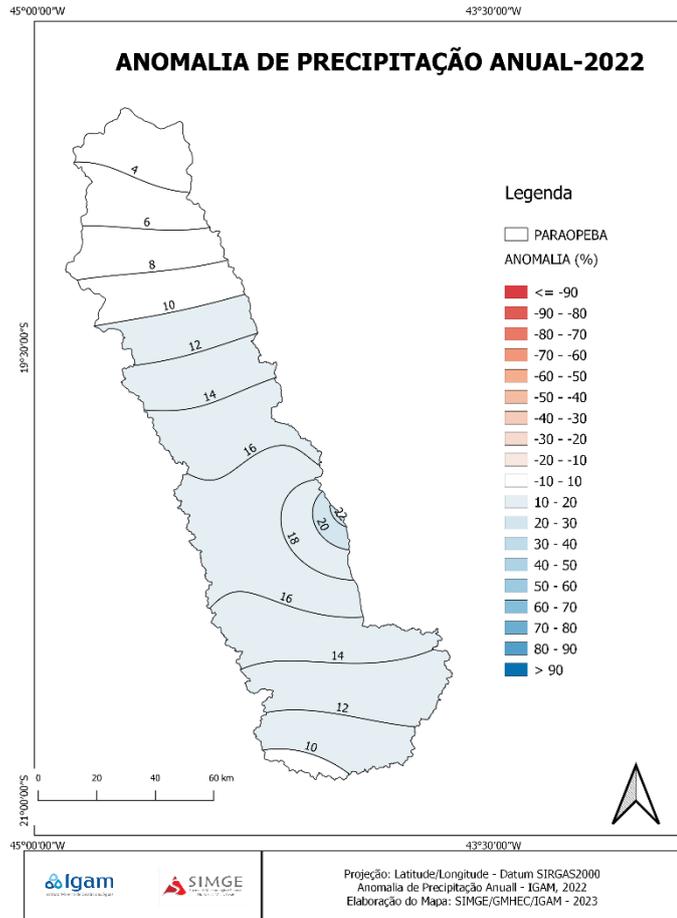
O quarto trimestre (OND) marca o início do período chuvoso em Minas. Nesse trimestre as precipitações, conforme a climatologia exibida na Figura 6(b) variam entre 430mm e 650mm. Em 2022, no mês de outubro, em grande parte da bacia ocorreram grandes acumulados, sendo registrados até 218 mm. No entanto, as chuvas ocorridas em novembro e dezembro alcançaram acumulados inferiores à climatologia em grande parte da bacia e conforme exibido na Figura 6(a), o que se observa é que o último trimestre do ano se caracterizou por anomalias positivas no alto Paraopeba, enquanto na parte mais norte da bacia ocorreram anomalias negativas.

Figura 6 – Distribuição espacial da: (a) anomalia de precipitação no trimestre OND de 2022; (b) climatologia da precipitação no trimestre OND.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Figura 7 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação anual de 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A análise das anomalias referentes ao ano (calculadas entre janeiro e dezembro) mostra a grande contribuição das chuvas ocorridas no primeiro trimestre para o acumulado anual. Apesar dos desvios negativos ocorridos no demais trimestres, o balanço final de 2022 mostra que as chuvas ocorreram acima da climatologia em toda a bacia, conforme exibido na Figura 7.

5 PROGRAMA DE MONITORAMENTO EMERGENCIAL DO RIO PARAPEBA – ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS

5.1 Plano de amostragem – Metodologia

No dia seguinte ao rompimento das barragens, o Igam iniciou o monitoramento da qualidade das águas e dos sedimentos na bacia do rio Paraopeba. O Plano de monitoramento seguiu uma sequência de montante para jusante, à medida que os rejeitos avançavam ao longo do rio.

A avaliação da qualidade da água superficial foi feita comparando-se os resultados do monitoramento emergencial com os resultados da série histórica de monitoramento do Igam entre 2010 a 2018 (água superficial). Os resultados do monitoramento emergencial também foram confrontados com os limites legais previstos na Deliberação Conjunta Copam/CERH-MG nº 08/2022 para água superficial e na Resolução nº 454 de 1 de novembro de 2012 do Conselho de Meio Ambiente (CONAMA, 2012) para sedimentos.

5.2 Rede de monitoramento

Antes do rompimento das barragens B1, B-IV e B-IVA da Vale S.A, o Igam realizava desde 1997 o monitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais em 37 pontos distribuídos na bacia do rio Paraopeba, no âmbito do Programa Águas de Minas. Após o desastre, instituiu-se uma rede emergencial para o acompanhamento do impacto. A rede emergencial contemplou os 8 pontos de monitoramento da rede básica na calha do rio Paraopeba e foi continuamente ampliada ao longo do ano de 2019 (Tabela 1). A existência de uma rede prévia permitiu comparar a condição do rio antes e após o rompimento da barragem.

Tabela 1 – Descrição das estações do monitoramento na bacia do rio Paraopeba pelo Igam

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Descrição
BP036	-20,197	-44,123	Brumadinho	Rio Paraopeba (Melo Franco)
BPE2	-20,135	-44,215	Brumadinho	Rio Paraopeba (captação da Copasa)
BP068	-20,093	-44,211	São Joaquim de Bicas	Rio Paraopeba 5 km a jusante da captação da Copasa (Brumadinho)
BP070	-20,04	-44,256	Betim, São Joaquim de Bicas	Rio Paraopeba a jusante da foz do Ribeirão Sarzedo, próximo à cidade de São Joaquim de Bicas
BP072	-19,949	-44,305	Betim	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Betim, na divisa dos municípios de Betim e Juatuba
BPE3*	-19,709	-44,470	Esmeraldas	Rio Paraopeba a montante da captação de Pará de Minas
BPE4**	-19,711	-44,497	Pará de Minas	Rio Paraopeba (captação Pará de Minas)
BP082	-19,670	-44,480	Esmeraldas, São José da Varginha	Rio Paraopeba na localidade de São José, em Esmeraldas
BP083	-19,370	-44,530	Papagaios, Paraopeba	Rio Paraopeba logo após a foz do Ribeirão São João em Paraopeba
BP077	-19,33	-44,53	Papagaios, Paraopeba	Rio Paraopeba na captação da Copasa entre os municípios de Paraopeba e Papagaios
BP078	-19,170	-44,710	Curvelo, Pompéu	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Pardo em Pompéu

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Descrição
BP087	-19,02	-44,73	Curvelo, Pompéu	Rio Paraopeba a montante da UHE Retiro baixo
BPE5***	-18,987	-44,776	Pompéu	Rio Paraopeba logo a montante da UHE de Retiro Baixo, em seu remanso
BP099	-18,871	-44,787	Felixlândia	Rio Paraopeba a montante de sua foz na barragem de Três Marias
BPE6	-18,816	-45,015	Felixlândia	Remanso da represa de Três Marias no Município de Felixlândia
BPE7	-18,929	-45,241	Abaeté	Remanso da represa de Três Marias no Município de Abaeté
BPE8	-18,493	-45,283	Três Marias	Corpo da represa de Três Marias no Município de Três Marias
BPE9	17,13	43,23	Felixlândia	Ribeirão do Gomes próximo a confluência com o rio Paraopeba

*Estação desativada. Última medição realizada em 11/03/19

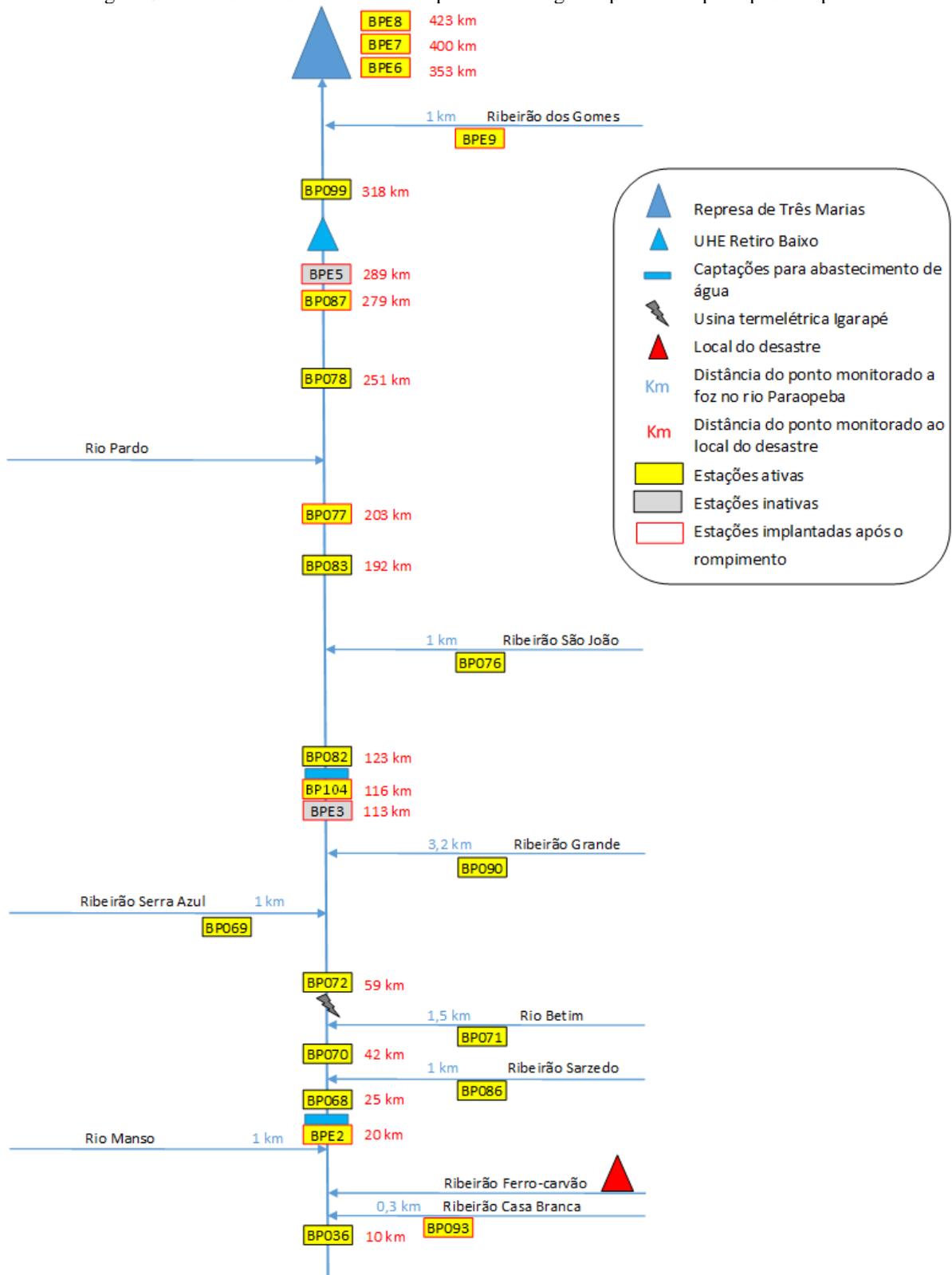
**BPE4Foi renomeado para BP104

***Estação desativada por dificuldade de acesso. Última medição realizada em 21/04/19

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

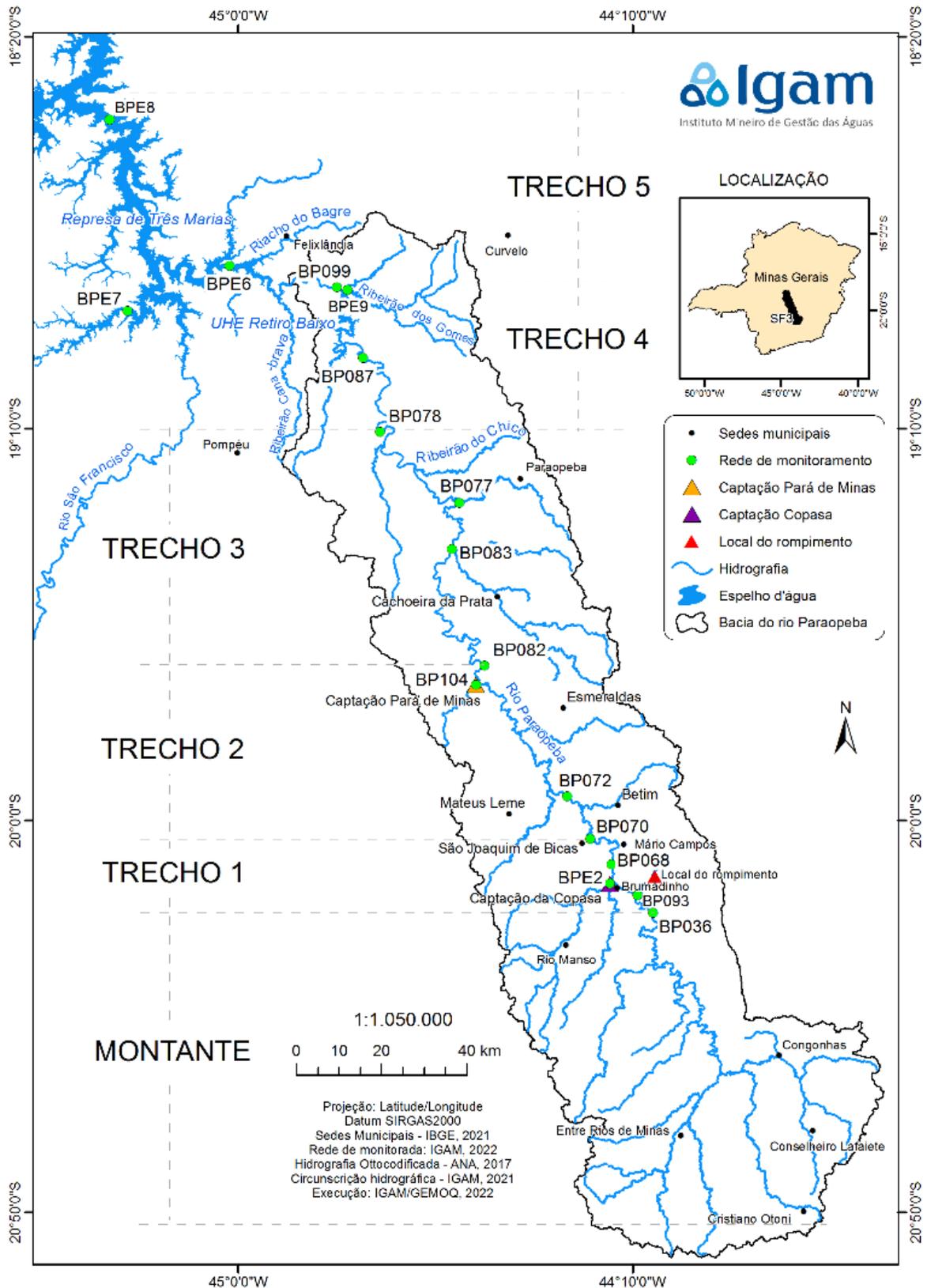
De forma a facilitar a visualização da localização dos pontos de monitoramento antes do rompimento (série histórica) e após o rompimento (2019), são apresentadas as Figuras 8 e 9, com a localização da Rede de Monitoramento Emergencial na bacia do rio Paraopeba.

Figura 8 – Pontos de monitoramento da qualidade da água superficial – pré e pós-rompimento



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Figura 9 – Mapa com a localização geográfica da Rede de Monitoramento Emergencial do rio Paraopeba



Fonte: Elaborado pelos autores (2022)

Atualmente a rede emergencial possui 17 pontos monitorados pelo Igam na bacia do rio Paraopeba, sendo dois pontos a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036; PB093) e, 15 a jusante até o reservatório de Três Marias (BPE2, BP068, BP070, BP072, BP104, BP082, BP083, BP077, BP078, BP087, BP099, BPE9, BPE6, BPE7, BPE8).

5.3 Frequência de amostragem

Após o rompimento da Barragem B1, o Igam intensificou a frequência do monitoramento das águas superficiais na calha do rio Paraopeba, entre Brumadinho e Felixlândia (Quadro 1). Foi definida inicialmente, uma frequência de amostragem diária para as águas superficiais e semanal para os sedimentos em todos os pontos da calha do rio Paraopeba, nos primeiros 60 dias.

Quadro 1 – Resumo das estações de monitoramento, frequências e períodos de alteração para o monitoramento emergencial

Tipo de amostra / Estações	Antes do Desastre	Data a partir da qual houve alteração da frequência de coleta													
		1997 a 25/01/2019	26/01/19	13/03/19		18/03/19		03/06/19		01/07/19	03/09/19		01/11/19		01/05/20
Estações	8 pontos Todas da calha: BP036 BP068 BP070 BP072 BP082 BP078 BP083 BP099	11 pontos Todas da calha: BPE2 BP036 BP068 BP070 BP072 BP082 BP078 BPE4 BPE3 BP078 BP083 BP099	BPE2 BP082 BP099 BPE5	Demais estações	BPE5 BPE9 BP099	BPE2 BP072 BP082 BP078	BP036 BP068 BP070 BPE3 BP083 BPE6 BPE7 BPE8	BPE9 BPE099	BPE2 BP036 BP068 BP070 BP072 BP082 BPE3 BP078 BP083 BPE6 BPE7 e BPE8	Todos os 14 pontos	BPE2 BP036 BP068 e BP070	Demais estações	Todas da calha: BPE2 BP036 BP068 BP070 BP072 BP082 BPE3 BP083 BP077 BP078 BP087 BPE9 BP099	Represa de Três Marias BPE6 BPE7 BPE8	Todos os 16 pontos
Frequência (Água)	Trimestral	Diária	Diária	Mensal	Diária	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal
Frequência (Sedimentos)	Trimestral	Semanal	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal								Mensal

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Tendo em vista o início das atividades de dragagem do rio Paraopeba, na região próxima a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, desde o início do mês de agosto de 2019, além das obras para a contenção dos rejeitos no ribeirão Ferro-Carvão, realizadas pela Vale S.A, o monitoramento nas estações BPE2, BP036, BP068 e BP070 (primeiros 50 km) foi intensificado, passando a ser realizado semanalmente pelo Igam, a partir de setembro de 2019.

Já a partir de novembro de 2019, com a chegada do período chuvoso, o Igam intensificou o acompanhamento sistemático dos resultados do monitoramento da qualidade da água das demais estações, incluindo a região do reservatório de Três Marias. Esse trabalho é importante para verificar quaisquer anomalias que possam indicar, na água, a presença de partículas do rejeito, provenientes do rompimento das barragens B1, B-IV e B-IVA, em Brumadinho.

Posteriormente, o monitoramento das estações da calha do rio Paraopeba passou a ser realizado semanalmente, a exceção dos pontos localizados dentro da represa de Três Marias que permaneceram até o mês de dezembro com frequência mensal (BPE6, BPE7 e BPE8), bem como o monitoramento dos sedimentos em todos os pontos. A frequência de monitoramento semanal durou até o mês de abril de 2020, a partir de então, a frequência de monitoramento passou a ser mensal novamente.

Assim, no decorrer do monitoramento houve redução das alterações nas concentrações dos parâmetros e a frequência passou a ser semanal e depois mensal, tanto nas águas superficiais quanto nos sedimentos.

Vale ressaltar que a frequência do monitoramento é continuamente avaliada, conforme os resultados obtidos, as ações implantadas pela Vale S.A, o período climático do ano, dentre outros fatores.

5.4 Parâmetros monitorados e padrões de qualidade

As metodologias utilizadas para a coleta e a análise das amostras de água e de sedimentos são as preconizadas por manuais como:

- Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, 2011);
- *Standart Mehods for the Examination of Water and Watewater* (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA, 2017).

As amostragens e análises foram realizadas pelo Centro de Inovação e Tecnologia Senai Fiemg, no âmbito dos Institutos de Tecnologia em Meio Ambiente e de Química, cujos laboratórios possuem ensaios acreditados, segundo os requisitos da Norma ABNT (NBR) ISO/IEC 17025:2017.

Os limites para os parâmetros físico-químicos e biológicos são definidos segundo um sistema de classificação com base na qualidade da água requerida para os usos prioritários dos recursos hídricos. O trecho do rio Paraopeba desde a confluência com o rio Maranhão até a represa de Três Marias, é enquadrado como Classe 2, conforme a Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995 que dispõe sobre o enquadramento das águas da bacia do rio Paraopeba.

No âmbito do Estado de Minas Gerais, a norma que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes e dá outras providências é a Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH-MG nº 08, de 21 de novembro de 2022. Os limites para os parâmetros físico-químicos definidos segundo a Deliberação Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08/2022 dos limites para águas de Classe 1, 2 e 3 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites para os parâmetros físico-químicos definidos segundo a Deliberação Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08/2022 dos limites para águas de Classe 1, 2 e 3 avaliados

Parâmetro	LIMITE DN COPAM/CERH-MG – 08/2022			Unidade de Medida
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	
pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	
Turbidez	40	100	100	NTU
Cor Verdadeira	Cor Natural	75	75	UPt
Sólidos Dissolvidos totais	500	500	500	mg / L
Sólidos em Suspensão totais	50	100	100	mg / L
Nitrogênio amoniacal total	3,7 p/ pH <=7,5 2,0 p/ 7,5<pH<=8,0 1,0 p/ 8,0<pH<=8,5 0,5 p/ pH>8,5	3,7 p/ pH <=7,5 2,0 p/ 7,5<pH<=8,0 1,0 p/ 8,0<pH<=8,5 0,5 p/ pH>8,5	13,3 p/ pH <= 7,5 5,6 p/ 7,5<pH<=8,0 2,2 p/ 8,0<pH<=8,5 1,0 p/ pH>8,5	mg / L N
Nitrato	10	10	10	mg / L N
Nitrito	1	1	1	mg / L N
OD	> 6	> 5	> 4	mg / L
Cianeto Livre	0,005	0,005	0,022	mg / L CN
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,003	0,003	0,01	mg / L C6H5OH
Alumínio Dissolvido	0,1	0,1	0,2	mg / L Al
Arsênio total	0,01	0,01	0,033	mg / L As
Bário total	0,7	0,7	1	mg / L Ba
Boro total	0,5	0,5	0,75	mg / L B
Cádmio total	0,001	0,001	0,01	mg / L Cd
Chumbo total	0,01	0,01	0,033	mg / L Pb
Cobre Dissolvido	0,009	0,009	0,013	mg / L Cu
Cromo total	0,05	0,05	0,05	mg / L Cr
Ferro Dissolvido	0,3	0,3	5	mg / L Fe
Manganês total	0,1	0,1	0,5	mg / L Mn
Mercurio total	0,2	0,2	2	µg/L Hg
Níquel total	0,025	0,025	0,025	mg / L Ni
Selênio total	0,01	0,01	0,05	mg / L Se
Zinco total	0,18	0,18	5	mg / L Zn

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

No caso de sedimentos, considerou-se os limites estabelecidos pelo Conselho de Meio Ambiente (CONAMA) por meio de sua Resolução nº 454 de 8 de novembro de 2012 (TABELA 3). Essa resolução define limites de contaminantes em sedimentos para fins de dragagem de leitos de cursos d'água, bem como outras orientações. Os limites definidos nesta resolução, para os metais estudados, se basearam nas Diretrizes de Qualidade para a Análise de Sedimentos, emitidas pelo “*Canadian Council Of Ministers Of The Environment - CCME*”.

Tabela 3 – Parâmetros de qualidade avaliados nos sedimentos de fundo e limites dos níveis 1 e 2 estabelecidos na CONAMA n° 454/2012

Parâmetros Sedimento de Fundo	Limites da Resolução CONAMA n° 454/2012	
	Nível 1	Nível 2
Nitrogênio Total (mg/Kg N)	*	*
Alumínio Total (% Al)	*4,521	*
Arsênio Total (mg/Kg As)	5,9	17,0
Cádmio Total (mg/Kg Cd)	0,6	3,5
Chumbo Total (mg/Kg Pb)	35,0	91,3
Cobre Total (mg/Kg Cu)	35,7	197,0
Cromo Total (mg/Kg Cr)	37,3	90,0
Ferro Total (%)	*28,101	*
Manganês Total (%)	*0,331	*
Merúrio Total (mg/Kg Hg)	0,17	0,486
Níquel Total (mg/Kg Ni)	18,0	35,9
Selênio (mg/Kg Se)	*	*
Vanádio Total (mg/Kg V)	*	*
Zinco Total (mg/Kg Zn)	123,0	315,0

*Não preconizado pela legislação

¹Valores usados por Vicq (2015)

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Vale destacar que a Resolução Conama n° 454/2012 não estabelece valores orientadores para os metais ferro, alumínio e manganês. Dessa forma, utilizou-se os valores orientadores obtidos por Vicq (2015), em sua pesquisa intitulada “Mapeamento Geoquímico e Estabelecimento de Valores e Referência (Background) de Sedimentos Fluviais do Quadrilátero Ferrífero”, MG. Portanto, foram usados no presente relatório os valores de referência de 28,10% (ferro), 4,52% (alumínio) e 0,33% (manganês), estabelecidos nesse estudo, por meio da técnica de análise fractal.

6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2022, NA CALHA DO RIO PARAPEBA

A seguir é apresentada uma análise dos resultados obtidos no monitoramento emergencial ao longo do rio Paraopeba, para os dados obtidos entre 26/01/19 a 02/12/2022. Foram utilizados para complementar essa análise a Série Histórica com dados de águas superficiais do IGAM entre os anos de 2010 a 2018.

No presente relatório, são apresentados gráficos com os resultados dos quatro anos de monitoramento de cada estação, para os parâmetros oxigênio dissolvido, pH in loco,

condutividade elétrica in loco, turbidez, sólidos totais em suspensão, cor verdadeira, ferro dissolvido, ferro total, manganês total, alumínio dissolvido, chumbo total, mercúrio total, arsênio total, níquel total, zinco total, cádmio total e cobre dissolvido. Esses parâmetros foram selecionados com o objetivo de avaliar os recursos hídricos afetados, permitindo, ainda, a avaliação dos níveis de poluição e degradação ambiental dos corpos de água em função das características do rejeito e da capacidade de arraste e revolvimento de material de fundo com o deslocamento da pluma.

Os gráficos foram apresentados com os resultados das estações BP036, BPE2, BP068, BP070, BP072, BP104, BP082, BP083, BP077, BP078, BP087, BP099, BPE6, BPE7, BPE8 de montante a jusante do rio Paraopeba e o tributário ribeirão dos Gomes BPE9. Na análise de águas superficiais os dados foram separados por períodos seco e chuvoso, devido a diferença na amplitude dos resultados observados entre eles.

Nesses gráficos, também são considerados os padrões de qualidade para os corpos de água enquadrados como Classe 2, segundo Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH-MG nº 8 de 2022. Ressalta-se que o ribeirão dos Gomes BPE9 se enquadra como Classe 1.

Oxigênio dissolvido

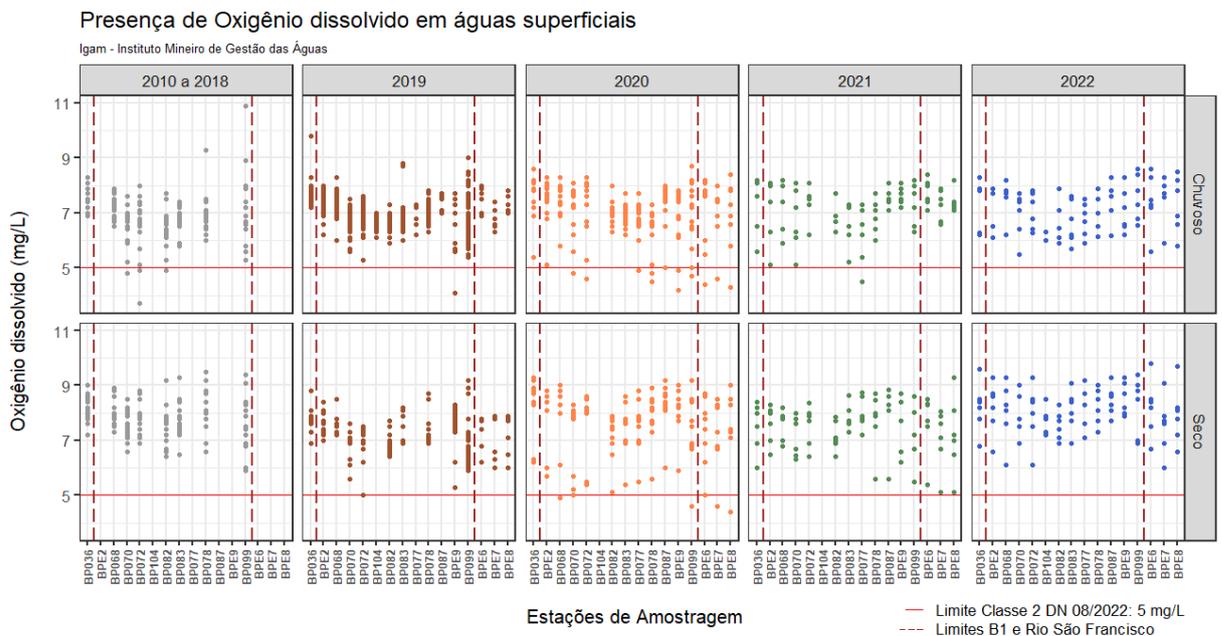
As análises de oxigênio dissolvido (OD) informam sobre os níveis de oxigenação das águas, bem como o consumo de oxigênio decorrente da oxidação de possíveis cargas de material orgânico carregadas ao sistema hídrico em questão. A concentração de oxigênio dissolvido na água é fundamental para a manutenção da vida aquática. O oxigênio pode ser fornecido a água pelo ar atmosférico ou pelos vegetais subaquáticos, por meio da fotossíntese. As águas rápidas e turbulentas (ambientes lóticos) apresentam uma concentração maior de oxigênio, comparado as águas de ambientes lênticos, como lagos e reservatórios.

No caso de corpos hídricos sem poluição, a concentração de oxigênio dissolvido em equilíbrio com o oxigênio da atmosfera pode variar na faixa de 8-11 mg/L, dependendo da temperatura da água e da altitude.

A Figura 10 apresenta os resultados de oxigênio dissolvido no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IV-A (26 de janeiro

de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba. Observa-se que não houve variação significativa ao longo de todo o curso do rio Paraopeba durante os primeiros dias após o desastre ambiental. Durante o monitoramento realizado em 2019, todos os resultados estiveram dentro dos limites legais (valores acima de 5 mg/L), exceto no tributário ribeirão dos Gomes (BPE9 – Classe 1). No entanto, em 2020, foram registrados valores abaixo do limite de 5mg/L, principalmente no período chuvoso de 2020. No período seco observa-se uma maior quantidade de valores abaixo de 7 mg/L em comparação com a série histórica (2010 a 2018). Estes resultados indicam ter havido um aumento de matéria orgânica ao logo do tempo, após o rompimento da barragem de rejeito B1.

Figura 10 – Resultados de oxigênio dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

No ano de 2021, no período chuvoso, nota-se que houve violação no ponto BP077 (Papagaios/Paraopeba), com valor abaixo de 5 mg/L, já no período seco, não houve valores inferiores ao limite. Já em 2022 os resultados estiveram dentro dos limites legais.

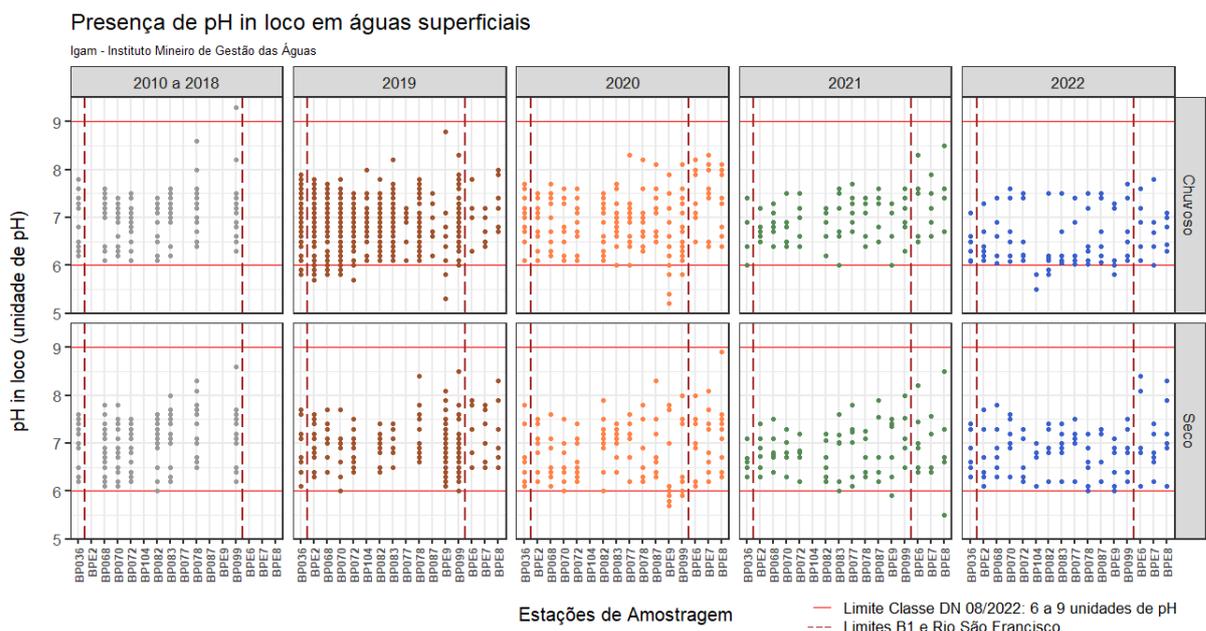
pH in loco

As análises de pH visam balizar possíveis alterações no equilíbrio ácido-base das águas. No caso em questão, tais alterações podem decorrer de possíveis aumentos dos teores orgânicos, o

que acarreta a produção de CO₂ pelos processos de decomposição orgânica, bem como pela presença de compostos húmicos carregados dos solos orgânicos das áreas da bacia de drenagem.

A Figura 11 apresenta os resultados de pH no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IV-A (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Figura 11 – Resultados de pH em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Observa-se que houve algumas violações para o parâmetro pH com resultados inferiores a 6, no monitoramento realizado entre 2019 a 2022, principalmente no período chuvoso. Ressalta-se que, logo após o rompimento foram observados valores de pH abaixo de 6 na área monitorada anterior ao desastre (BP036 - Brumadinho) até o ponto BP072 - Betim, o que distingue do padrão da série histórica (2010 a 2018) do Igam. Para os demais anos foram registrados os mesmos comportamentos nos pontos do BP099 - Felixlândia (ano 2020), BPE8 – Três Marias (ano 2021), BP104 – Pará de Minas e BP072 (ano 2022). As violações também foram registradas para os quatro anos de monitoramento localizado no tributário ribeirão dos Gomes (BPE9 – Classe 1).

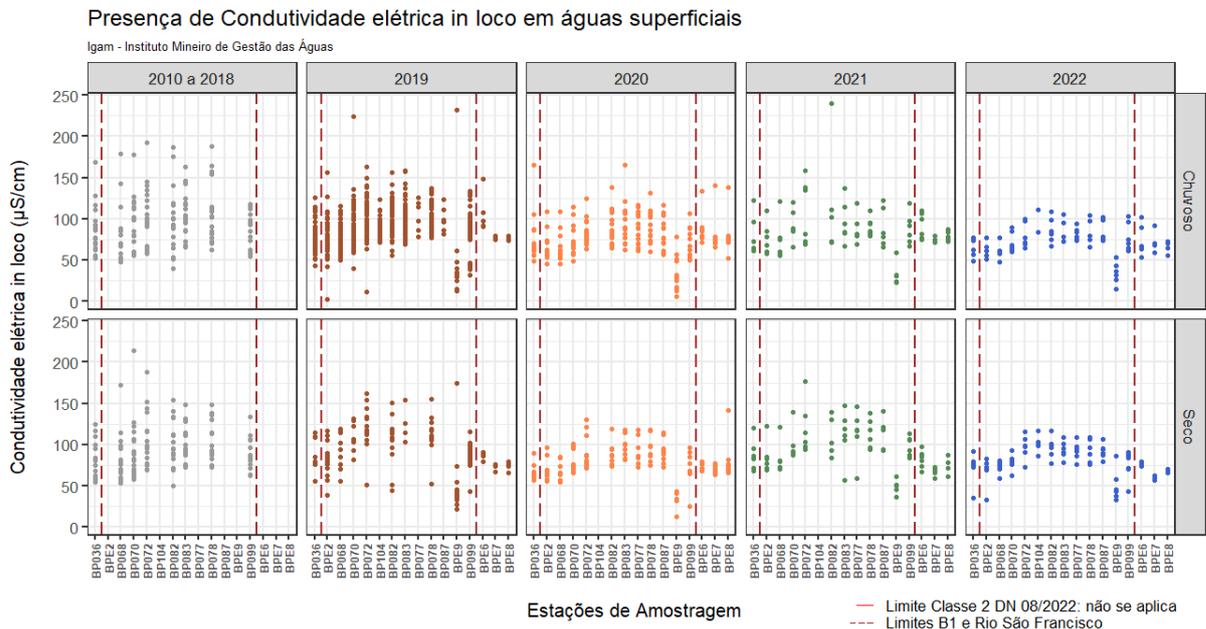
De maneira geral, a maioria dos resultados estão dentro do intervalo aceitável para rios de Classe 2 (entre 6 e 9), que de acordo com os limites estabelecidos na legislação, são valores adequados para a proteção da vida aquática.

Condutividade elétrica

As medições de condutividade elétrica se referem à potencialidade de aportes de compostos solúveis em geral, uma vez que esse parâmetro indica o grau de condução elétrica de uma amostra de água, determinado pela sua concentração iônica. Com isso, esse parâmetro é uma importante indicação indireta para uma avaliação sobre a disponibilidade de micronutrientes para os processos produtivos. A condutividade elétrica também informa sobre o grau de mineralização das águas, decorrente da dissolução de compostos inorgânicos, bem como resultante da decomposição química e biológica de material orgânico.

A condutividade elétrica apresentou resultados, de forma geral, próximos da normalidade histórica (2000-2018) no monitoramento realizado em 2019 a 2022 (Figura 12). Contudo, observa-se um ligeiro aumento da condutividade no período de estiagem, especialmente no ano de 2021, no trecho entre o município de Betim (BP072) e a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo (BP087). No período de estiagem, esse comportamento pode ser explicado pela diminuição do aporte de sólidos para dentro do corpo de água, podendo acarretar o deslocamento do equilíbrio para o aumento da solubilização dos íons na coluna d'água, uma vez que há uma menor concentração de partículas em suspensão e isso pode favorecer o aumento da concentração dos íons. No entanto, é imprescindível o acompanhamento dos resultados ao longo dos anos para se confirmar ou não esse comportamento. No entanto, no ano de 2022 já não se observa a mesma característica do ano anterior.

Figura 12 – Resultados de condutividade elétrica em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



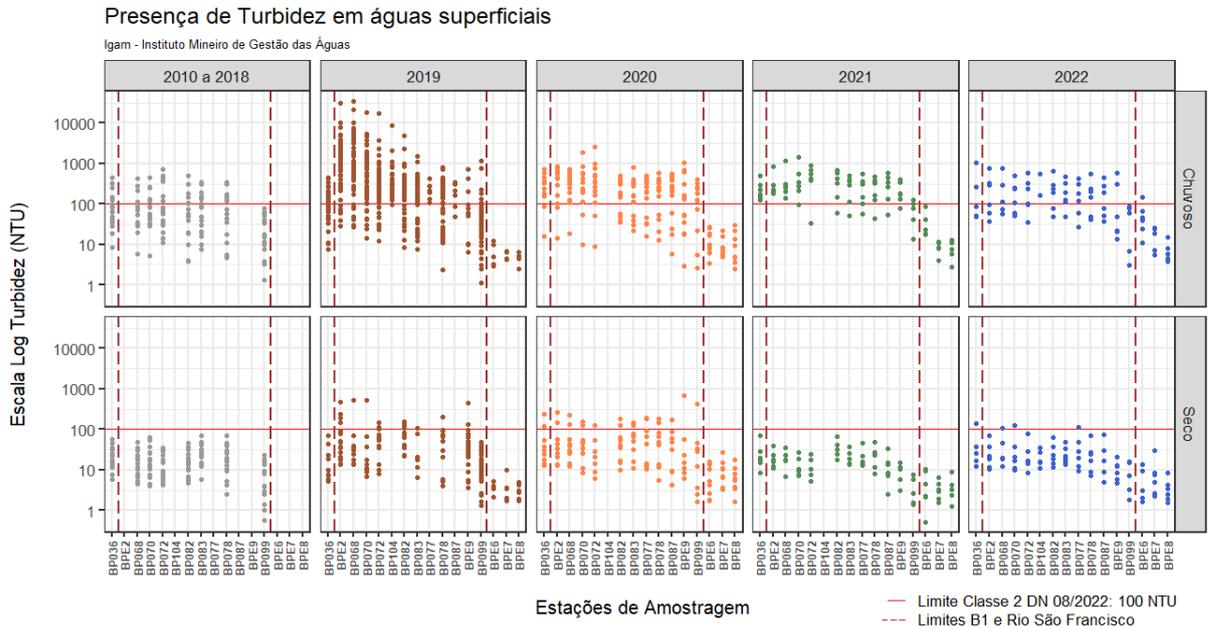
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Turbidez e cor verdadeira

As análises de turbidez se reportam à magnitude de aportes de material particulado e solúvel, ao qual o sistema hídrico em questão está submetido. É uma medida da dificuldade da luz em atravessar a água, causada por materiais suspensos como microrganismos e partículas sólidas. As águas que possuem alta turbidez apresentam uma elevação na temperatura e consequente diminuição do oxigênio dissolvido. A alta turbidez também diminui a incidência da luz, prejudicando a fotossíntese que contribui para oxigenar a água (ABU SHMEIS, 2018).

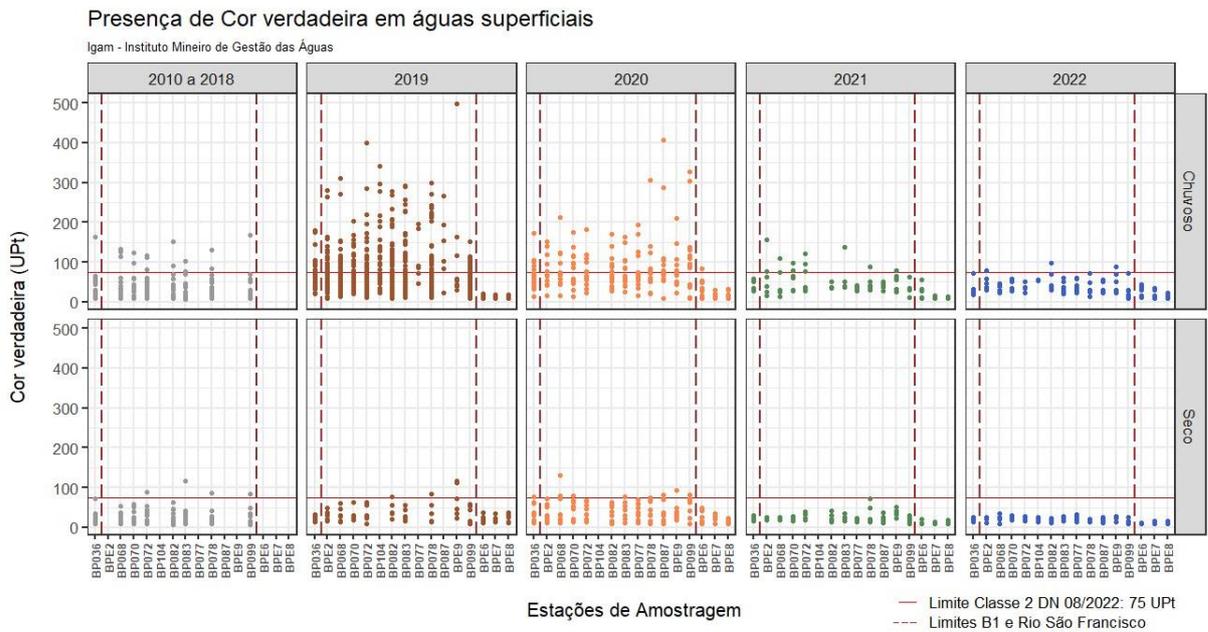
As alterações do parâmetro turbidez e cor verdadeira mostram-se como um dos principais indicativos do impacto decorrente da presença ou avanço dos rejeitos. As Figuras 13 e 14 apresentam respectivamente os resultados de turbidez e cor verdadeira no período pré-rompimento (2010 a 2018) e dos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e BIV-A (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Figura 13 – Resultados de turbidez em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Figura 14 – Resultados de cor verdadeira em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

É possível verificar que, de maneira geral, os maiores valores de turbidez foram observados no

primeiro semestre do ano de 2019, especialmente no trecho localizado nos 40 km após o local do rompimento (BPE2, BP068 e BP070). Esse trecho foi o mais impactado e apresentou resultados mais elevados de turbidez (entre 18.588 e 34.500 NTU), seguido do trecho localizado entre a termelétrica de Igarapé (BP072) até a montante da UHE Retiro Baixo (BP087). Os resultados de turbidez no trecho a jusante da UHE Retiro Baixo (da estação BP099 em diante) permaneceram abaixo do limite legal em todo período de monitoramento, no período de seca.

Observa-se a interferência das chuvas na qualidade das águas do rio Paraopeba, sobretudo nas áreas próximas ao rompimento, uma vez que o aumento do escoamento superficial e da vazão do rio acarretam a remobilização do material depositado no leito e aportes de rejeitos no rio Paraopeba. Esse fato foi observado em todo período chuvoso monitorado pelo IGAM (2019 a 2022). A partir do período seco de 2021, os registros de turbidez se apresentaram, na sua maioria, abaixo do limite legal estabelecido e, aproximaram-se dos valores da série histórica.

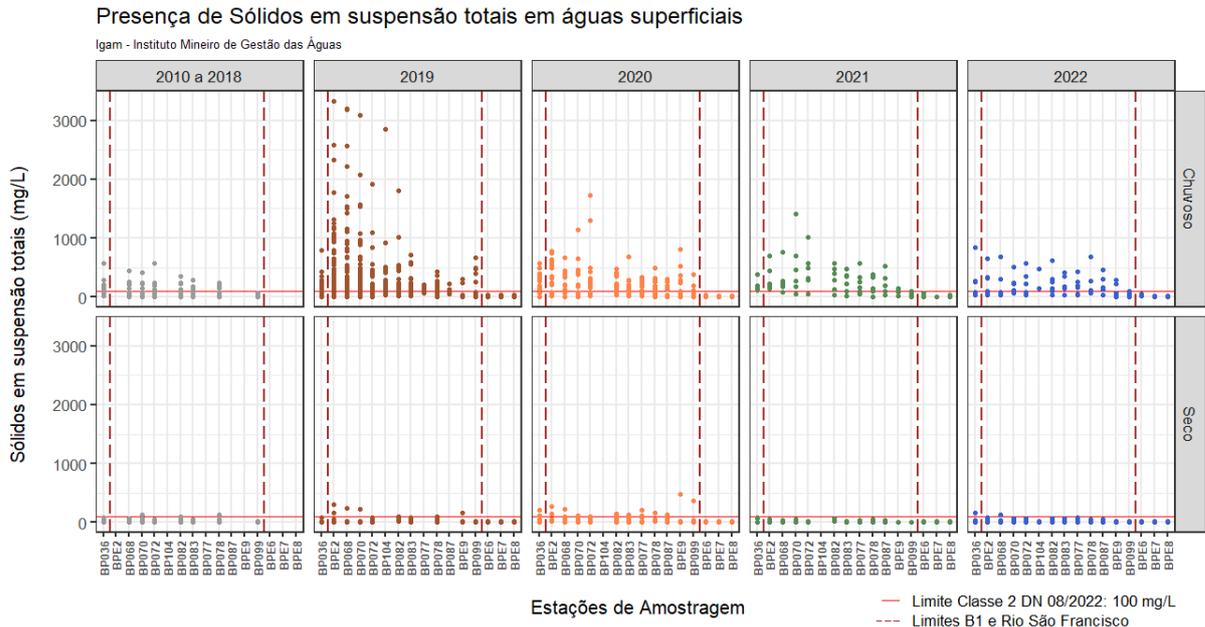
Sólidos totais em suspensão

Os resíduos sólidos podem afetar as características físicas e químicas da água ou advertir para a qualidade dos efluentes em determinados locais. Entre os resíduos mais importantes estão o material em suspensão, que é constituído de pequenas partículas que se encontram suspensas na água, as quais têm uma fração mineral ou inorgânica e outra orgânica.

As altas concentrações de material em suspensão limitam a qualidade da água bruta, por estarem relacionadas com a turbidez, a salinidade e dureza da água. As concentrações do material em suspensão são bastante variáveis no tempo e no espaço, e dependem da hidrodinâmica, da constituição do substrato de fundo, das margens do meio hídrico e ainda de fatores meteorológicos. Um outro aspecto importante a ser levado em conta é que situações ou locais onde a hidrodinâmica e a capacidade de transporte de partículas diminuem, ocorre o depósito desse material em suspensão, diminuindo a profundidade do corpo d'água (ABU SHMEIS, 2018).

A Figura 15 apresenta os resultados dos sólidos totais em suspensão, no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IVA, considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Figura 15 – Resultados de sólidos em suspensão totais em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 8 de 2022 estabelece o limite de 100 mg/L para sólidos em suspensão em águas de Classe 2. Observa-se que os resultados apresentaram comportamento semelhante ao observado para turbidez, com valores superiores ao limite de Classe 2 (100 mg/L), sobretudo no período chuvoso. As maiores concentrações de sólidos em suspensão foram verificadas no ano de 2019, como mostrado na Tabela 4, em comparação com os anos seguintes. O valor máximo registrado foi no município de Mário Campos/BP068 (13.688 mg/L). Em 2020 o máximo registrado foi de 1.723 mg/L em Betim/BP072 e em 2021, o registro máximo foi de 1.420 mg/L em São Joaquim de Bicas/BP070. No ano de 2022, vale ressaltar que os valores se aproximaram da série histórica do IGAM, sendo que o ponto a montante do desastre (BP036), no município de Brumadinho, foi o que apresentou os maiores valores (840 mg/L). Os pontos BPE6, BPE7 e BPE8, localizados dentro do reservatório de Três Marias apresentaram-se com valores abaixo do limite estabelecido em todo o período do monitoramento.

Tabela 4 - Valores extremos de sólidos em suspensão obtidos no ano de 2019

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP068	26/01/2019	Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	13.688	Chuvoso
BPE2	31/01/2019	Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	6.562	Chuvoso
BP068	31/01/2019	Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	10.714	Chuvoso
BPE2	06/02/2019	Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	5.447	Chuvoso
BP072	18/02/2019	Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	4.984	Chuvoso
BP070	27/02/2019	Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	5.000	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Ferro dissolvido e ferro total

O ferro (Fe) foi um dos primeiros metais utilizados pelo ser humano, e na natureza pode ser encontrado associado a outros minerais, dentre eles muitos óxidos. Nos seres vivos tem papel fundamental como constituinte de biomoléculas.

O ferro está associado a dinâmica ecológica de ecossistemas aquáticos, uma vez que se associa com grupos fosfatos, tornando o fósforo disponível ou não para o fitoplâncton, influenciando assim o processo de eutrofização (ZHANG *et al.*, 2020). Em regiões de baixa concentração de oxigênio, principalmente perto do sedimento, o fósforo passa a formar compostos solúveis na água como o fosfato ferroso ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$), ficando disponível para o processo fotossintético. Quando o ecossistema está oxigenado, o fósforo se encontra na forma de fosfato de ferro (FePO_4), insolúvel na água e preso no sedimento (ZHANG *et al.*, 2020).

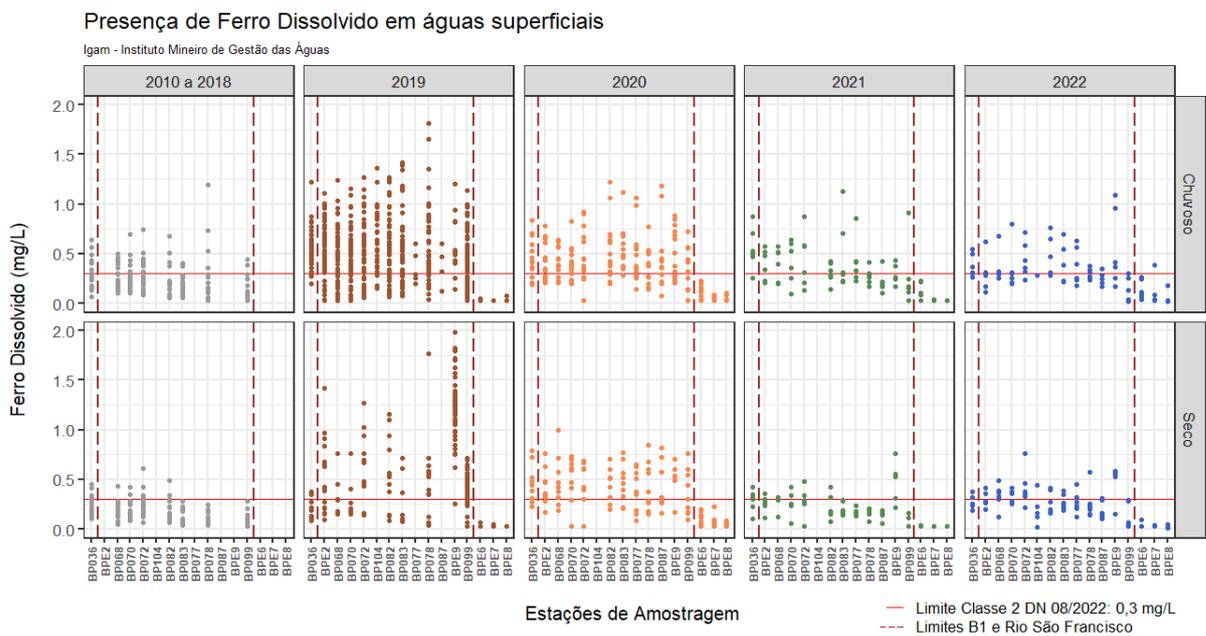
O ferro está diretamente relacionado às atividades de mineração e é um dos principais constituintes do material proveniente do rompimento da barragem de rejeito B1. Por ser o principal insumo da mina, o resultado deste metal é essencial para o entendimento do impacto causado pelo rompimento da barragem. Assim, quando são encontradas variações significativas deste metal, principalmente no período que sucedeu o rompimento das barragens B1, B-IV e BIV-A, estas podem ser um indicativo da contaminação do corpo d'água pelo rejeito.

O padrão normativo para o ferro prevê apenas a forma dissolvida, no entanto, constatou-se que a liberação de ferro no rio Paraopeba seria mais bem avaliada, se considerada a fração total

desse parâmetro. Dessa maneira, essas duas formas de ferro, dissolvido e total, foram analisadas pelo IGAM.

A Figura 16 apresenta os resultados de ferro dissolvido, no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IVA, considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Figura 16 – Resultados de ferro dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

É possível observar na análise dos resultados de ferro dissolvido do ponto a montante do ribeirão Ferro-Carvão (trecho que não sofreu impacto da lama de rejeitos), ao longo do rio Paraopeba (no trecho impactado) até a estação a jusante da UHE Retiro Baixo/BP099 (trecho em que não se verificou influência dos rejeitos das barragens que romperam), valores acima do limite legal ao longo dos anos monitorados (2019 a 2022), principalmente no período chuvoso. O valor máximo obtido para esse parâmetro foi de 2,875 no município de Paraopeba/BP083 em 2022 (Tabela 5). A partir do ano de 2021, no período seco, pode ser observada uma redução na concentração de ferro dissolvido, no entanto, alguns pontos monitorados apresentaram valores acima do limite legal estabelecido. Apesar destes valores ainda permanecerem acima do limite de Classe 2 (0,3 mg/L Fe), os resultados já se aproximam dos valores da série histórica em todos os pontos monitorados. Na represa de Três Marias o ferro dissolvido se mostrou abaixo do

limite estabelecido em todos os pontos monitorados, com exceção do ponto BPE7 (Abaeté), no período chuvoso de 2022.

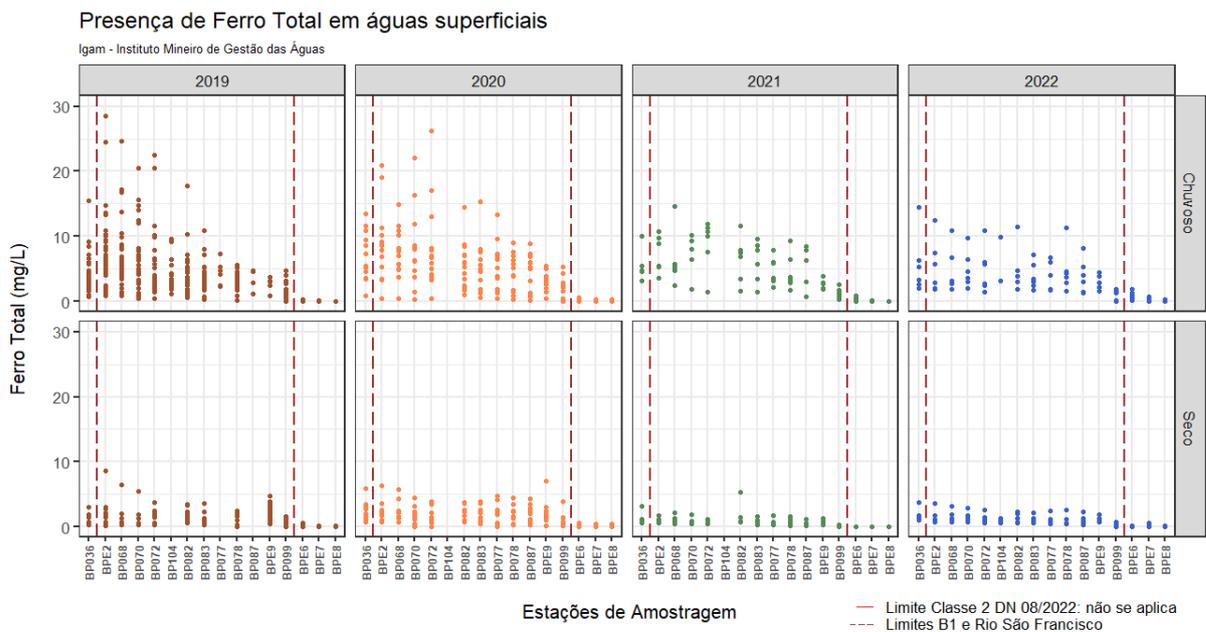
Tabela 5 - Valor extremo de ferro dissolvido obtido no ano de 2022

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP083	20/01/2022	Ferro Dissolvido	mg/L	2,875	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Na Figura 17 estão apresentados os valores de ferro total obtidos em cada ponto de monitoramento. Observa-se que este metal apresenta uma elevação bastante evidente, a partir da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (a partir do BPE2), principalmente nos anos de 2019 a 2021, em que os máximos foram verificados em fevereiro de 2019 (Tabela 6). Da mesma forma que ocorreu com os outros parâmetros, pode ser observada uma redução do ferro total no período seco em comparação ao chuvoso, em todo período monitorado. Vale ressaltar que, a partir do ano de 2020, as concentrações de ferro total ao longo do rio Paraopeba foram similares aos valores determinados no ponto a montante (BP036 - Brumadinho). Na represa de Três Marias, os valores se apresentaram sempre inferiores aos obtidos na estação de amostragem localizada a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão.

Figura 17 – Resultados de ferro total em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 6 - Valor extremo de ferro total obtido no ano de 2019

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP068	17/02/2019	Ferro Total	mg/L	39,350	Chuvoso
BP070	26/02/2019	Ferro Total	mg/L	32,410	Chuvoso
BP070	27/02/2019	Ferro Total	mg/L	62,000	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

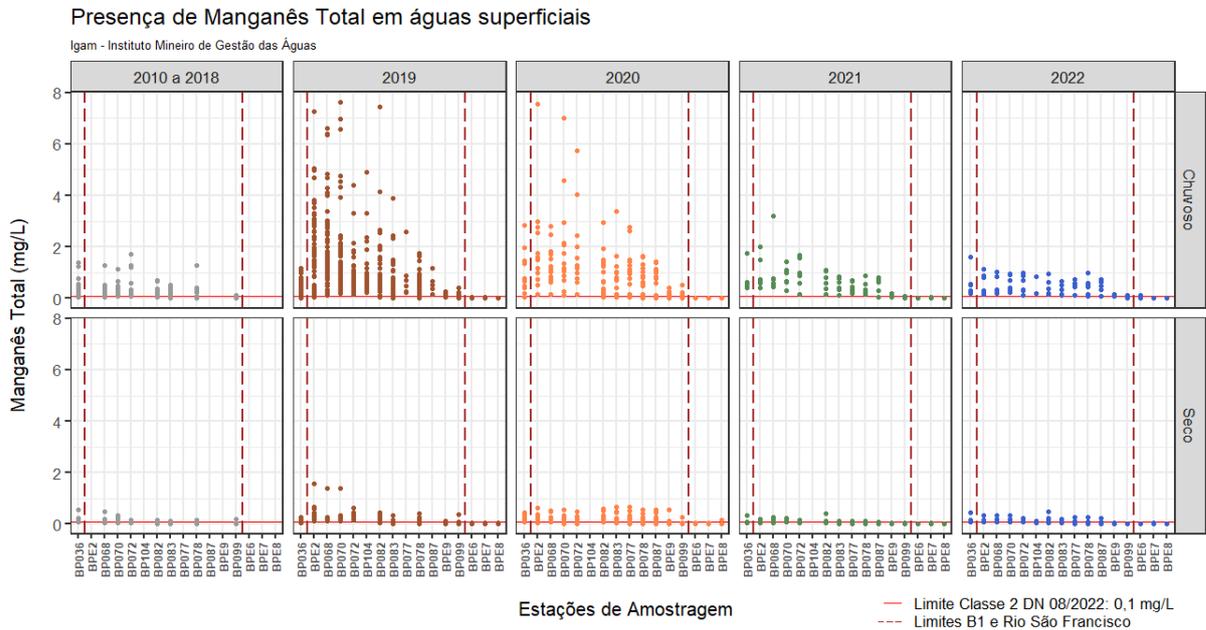
Em complemento, os dados de ferro total alinham-se melhor à análise feita para turbidez, com valores mais altos mais próximos da barragem e redução a partir do município de Paraopeba (BP083), a 192 km do rompimento, sendo menos evidente a partir do reservatório da UHE de Retiro Baixo. Isso ocorre devido à sedimentação do ferro adsorvido a partículas sólidas, que avança em velocidade muito inferior à de matéria dissolvida.

Manganês total

Nos ecossistemas aquáticos, o manganês (Mn) proveniente do sulfato de manganês e do cloreto de manganês reage com a água formando um complexo (Mn_6H_2O) altamente biodisponível (ABU SHMEIS, 2018) e assim como o ferro total, também está diretamente relacionado às atividades de mineração desenvolvidas na área do desastre. Os resultados destes são essenciais para o entendimento do impacto do rompimento das barragens B1, B-IV e BIV-A. Assim, quando ocorrem variações significativas de manganês, principalmente no período pós rompimento, há um forte indicativo da contaminação do corpo d'água pelo rejeito.

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 8 de 2022 estabelece o limite de 0,1 mg/ L para manganês total em águas de Classe 2. A Figura 18 apresenta os resultados de manganês total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IV-A (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba. Os valores extremos foram registrados nos anos de 2019 e 2020 (Tabela 7).

Figura 18 – Resultados de manganês total em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Na Figura 18 e Tabela 7 observa-se que o primeiro período chuvoso, logo após o rompimento das barragens da Vale S.A, os registros de manganês se mostraram os mais altos em quase todo monitoramento. Esse comportamento é o mesmo apresentado pelos parâmetros de turbidez e os sólidos totais em suspensão. Nota-se que, durante o monitoramento, os valores reduziram sendo os menores teores encontrados nos anos de 2021 e 2022, sobretudo nos períodos secos em comparação aos chuvosos. Apesar deste parâmetro se apresentar ao longo do monitoramento em desconformidade com o limite de classe 2 (0,1 mg/L Mn), verifica-se que este metal, no período seco, já se aproxima dos seus respectivos valores da série histórica do IGAM do período pré-rompimento (2010 a 2018).

No trecho a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099), o valor máximo de manganês total registrado em 2022 foi de 0,13 mg/L, no período chuvoso. Esse trecho recebe influência direta do ribeirão dos Gomes, dessa forma a ocorrência dos picos de manganês total, principalmente nos períodos chuvosos, podem ser consequência dessa influência.

Os pontos localizados no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) permaneceram abaixo do limite legal para os quatro anos monitorados.

Tabela 7 - Valor extremo de manganês total obtido no ano de 2019 e 2020

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BPE2	26/01/2019	Manganês total	mg/L	19,060	Chuvoso
BP068	26/01/2019	Manganês total	mg/L	46,270	Chuvoso
BP070	27/02/2019	Manganês Total	mg/L	24,771	Chuvoso
BPE2	31/01/2019	Manganês Total	mg/L	15,310	Chuvoso
BP068	31/01/2019	Manganês Total	mg/L	16,640	Chuvoso
BPE2	17/02/2019	Manganês Total	mg/L	10,501	Chuvoso
BP068	17/02/2019	Manganês Total	mg/L	15,709	Chuvoso
BPE2	18/02/2019	Manganês Total	mg/L	10,130	Chuvoso
BP068	18/02/2019	Manganês Total	mg/L	9,960	Chuvoso
BP072	18/02/2019	Manganês Total	mg/L	9,080	Chuvoso
BP072	22/02/2019	Manganês Total	mg/L	10,305	Chuvoso
BP070	26/02/2019	Manganês Total	mg/L	12,853	Chuvoso
BP072	17/01/2020	Manganês Total	mg/L	12,262	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Alumínio dissolvido

O alumínio (Al) é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre, estando presente em grandes quantidades no solo e na água. Em pH ácido, ocorre um aumento de sua solubilidade e, conseqüentemente da sua biodisponibilidade.

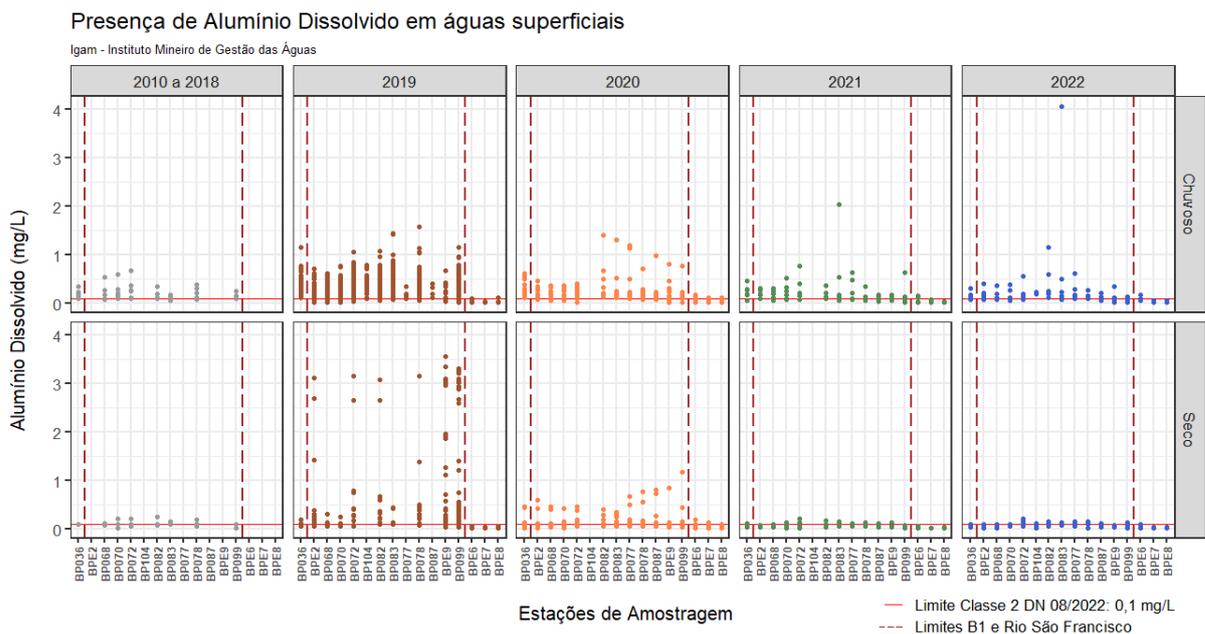
A Figura 19 apresenta os resultados de alumínio dissolvido no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IV-A (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Observa-se que ao longo de toda a calha do rio Paraopeba, desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036) até a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099), os resultados foram superiores ao limite de classe 2 (0,1 mg/L) em praticamente todo o ano de 2019 e de 2020. A partir de 2021, ocorreu uma diminuição da concentração deste metal tanto no período chuvoso, quanto na estiagem, com os menores valores encontrados no período seco. A partir de 2021, os registros já se aproximam do padrão da série histórica do IGAM. No trecho a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099), o valor máximo de alumínio dissolvido registrado em 2022 foi de 0,15 mg/L no período seco e de 0,14 mg/L no chuvoso.

Vale ressaltar que o alumínio dissolvido se apresentou de forma inconsistente em relação ao seu comportamento comparado ao manganês total, ferro total e turbidez, ao revés, com valores próximos da normalidade histórica justamente nos primeiros 40 km a jusante da barragem, aumentando muito além dessa normalidade em todos os outros pontos ao longo da calha do rio Paraopeba, inclusive no trecho de montante (BP036).

No reservatório de Três Marias, o alumínio dissolvido não extrapolou o limite permitido na maior parte do período monitorado, com exceção do ponto BPE6. De acordo com os autores (TRINDADE; HORN; RIBEIRO, 2012), a Formação geológica de Três Marias é composta predominantemente por siltitos e arenitos arcoseanos, ricos em alumínio. Portanto, as concentrações acima do limite, observadas principalmente durante os períodos chuvosos se devem, provavelmente, a lixiviação dos feldspatos presente no solo ou na rocha da região, além do fator ressuspensão do sedimento característico desta época do ano.

Figura 19 - Resultados de alumínio dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022

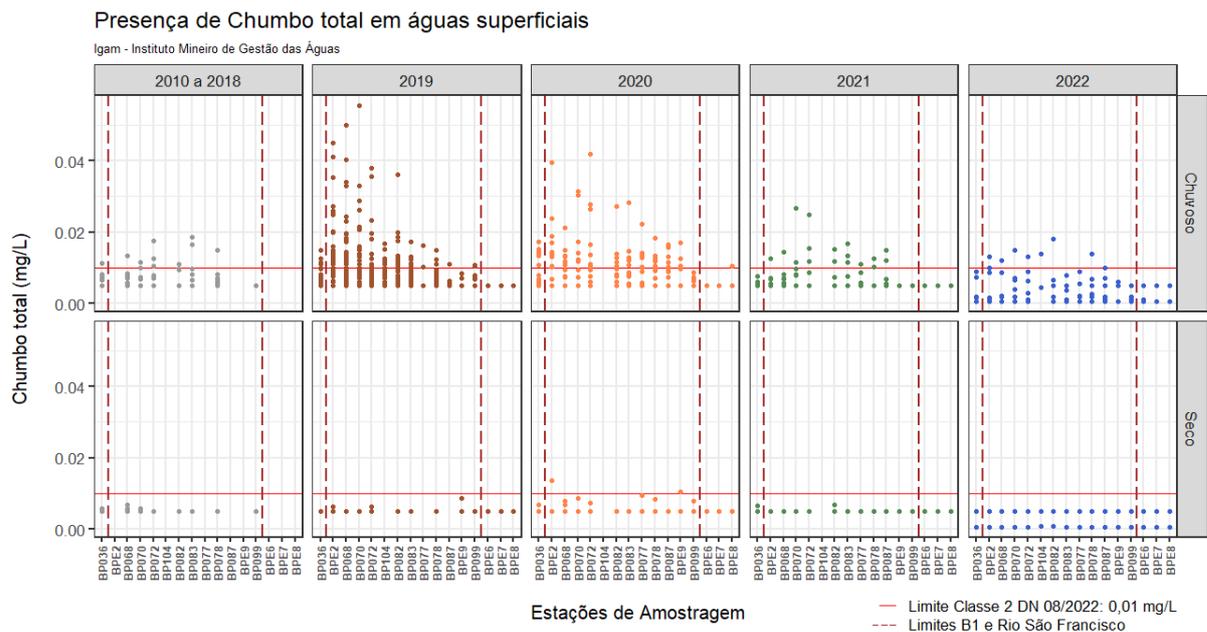


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Chumbo Total

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 8 de 2022 estabelece o limite de 0,01 mg/L para chumbo total em águas de Classe 2. A Figura 20 apresenta os resultados de chumbo total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IV-A (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Figura 20 – Resultados de chumbo total em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

As concentrações de chumbo total na calha do rio Paraopeba, a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, se apresentaram acima dos máximos históricos logo após o desastre. Apesar de não fazer parte da composição do rejeito, a presença de chumbo na água está associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito e propiciaram o aumento das concentrações de alguns contaminantes no período pós-desastre.

Análogo aos resultados de turbidez, ferro total e manganês total, o chumbo total também apresentou elevação expressiva nas estações de amostragem localizadas logo após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, nos meses seguintes ao rompimento das barragens B1, B-IV e B-IVA, com exceção dos pontos BPE6, BPE7 e BPE8 (reservatório de Três Marias). Faz-se uma ressalva para o ponto BPE8 (município de Três Marias), com um único registro da presença de

chumbo total em 2020, o que sugere relação com fatores externos ao rompimento, podendo ter origem, inclusive, de outras fontes presentes na bacia que drenam para o reservatório.

No período de seca pode ser observada redução dos valores desse metal abaixo do limite legal estabelecido, em sua maioria para os quatro anos monitorados, as exceções se deram nos pontos em Brumadinho (BPE2) e Felixlândia localizado no tributário do ribeirão dos Gomes (BPE9) em 2020. A partir de 2021, não se observa resultados de chumbo total com histórico de violações. Já nos períodos chuvosos dos anos monitorados observa-se uma elevação das concentrações de chumbo, extrapolando o limite estabelecido em quase todos os pontos amostrados, com os máximos verificados em janeiro e fevereiro de 2019 (Tabela 8). De maneira geral, observa-se que esse parâmetro ainda é recorrente no período chuvoso nos anos seguintes ao rompimento e apresenta resultados em desconformidade com a legislação.

Tabela 8 - Valor extremo de chumbo total obtido no ano de 2019

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BPE2	26/01/2019	Chumbo Total	mg/L	0,069	Chuvoso
BP068	26/01/2019	Chumbo Total	mg/L	0,147	Chuvoso
BP068	31/01/2019	Chumbo Total	mg/L	0,062	Chuvoso
BP070	27/02/2019	Chumbo Total	mg/L	0,090	Chuvoso

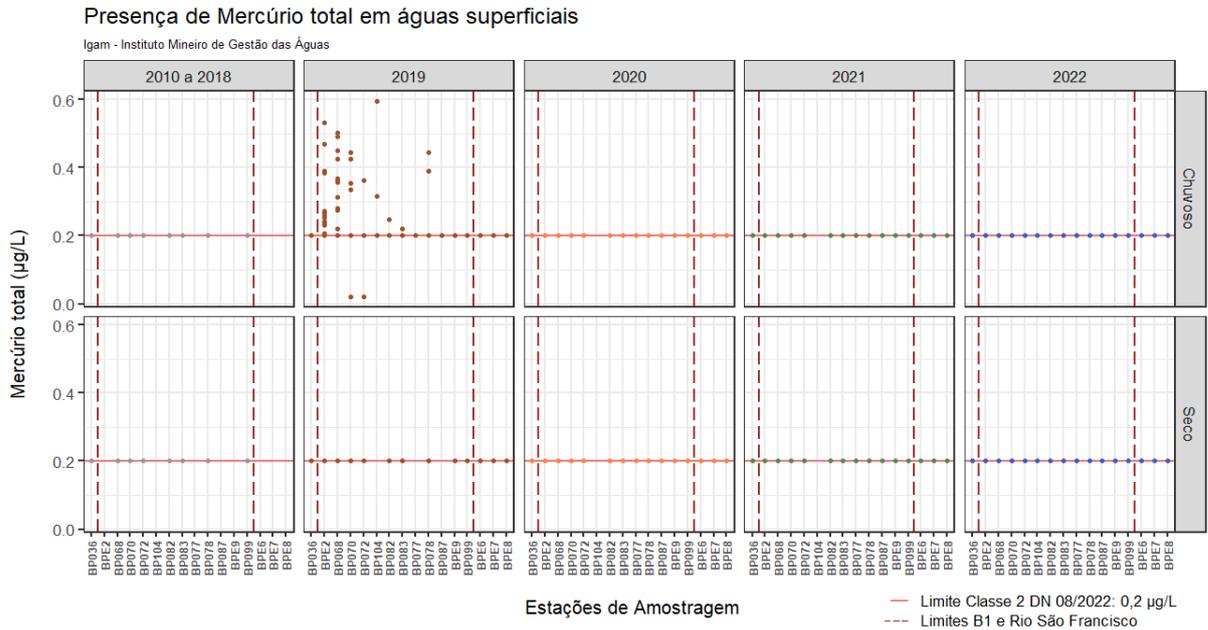
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Mercúrio Total

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 8 de 2022 estabelece o limite de 0,2 µg/L para mercúrio total em águas de Classe 2. Na Figura 21 estão apresentados os resultados de mercúrio total nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IV-A (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

O mercúrio total, que não tinha sido detectado historicamente na bacia do rio Paraopeba, foi identificado em valores acima do permitido pela legislação, logo após o rompimento da barragem da B1 (Figura 21). Observa-se em 2019 registros entre Brumadinho (BPE2) a São Joaquim de Bicas (BP078), pontos a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. Esses registros de violações ocorrem nos três primeiros meses, com determinação de concentrações máximas verificadas em janeiro e fevereiro (Tabela 9). A partir de abril de 2019, todos os registros de mercúrio estiveram inferiores ao limite de quantificação do método analítico.

Figura 21 – Resultados de mercúrio total em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 9 - Valor extremo de mercúrio total obtido no ano de 2019

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BPE2	26/01/2019	Mercúrio Total	µg/L	2,130	Chuvoso
BP068	26/01/2019	Mercúrio Total	µg/L	4,230	Chuvoso
BPE2	31/01/2019	Mercúrio Total	µg/L	1,050	Chuvoso
BP068	31/01/2019	Mercúrio Total	µg/L	1,670	Chuvoso
BPE2	06/02/2019	Mercúrio Total	µg/L	1,283	Chuvoso
BP068	17/02/2019	Mercúrio Total	µg/L	0,905	Chuvoso
BP072	18/02/2019	Mercúrio Total	µg/L	0,619	Chuvoso
BP070	19/02/2019	Mercúrio Total	µg/L	0,760	Chuvoso
BP070	27/02/2019	Mercúrio Total	µg/L	1,793	Chuvoso
BP072	22/02/2019	Mercúrio Total	µg/L	0,823	Chuvoso
BP082	22/02/2019	Mercúrio Total	µg/L	0,805	Chuvoso
BP083	22/02/2019	Mercúrio Total	µg/L	0,841	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Assim como ocorre com o chumbo total, a disponibilização do mercúrio para o corpo d'água não têm relação direta com o rejeito da barragem B1, uma vez que não faz parte da sua composição. Contudo, a presença do mercúrio na água pode estar associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito e que propiciaram

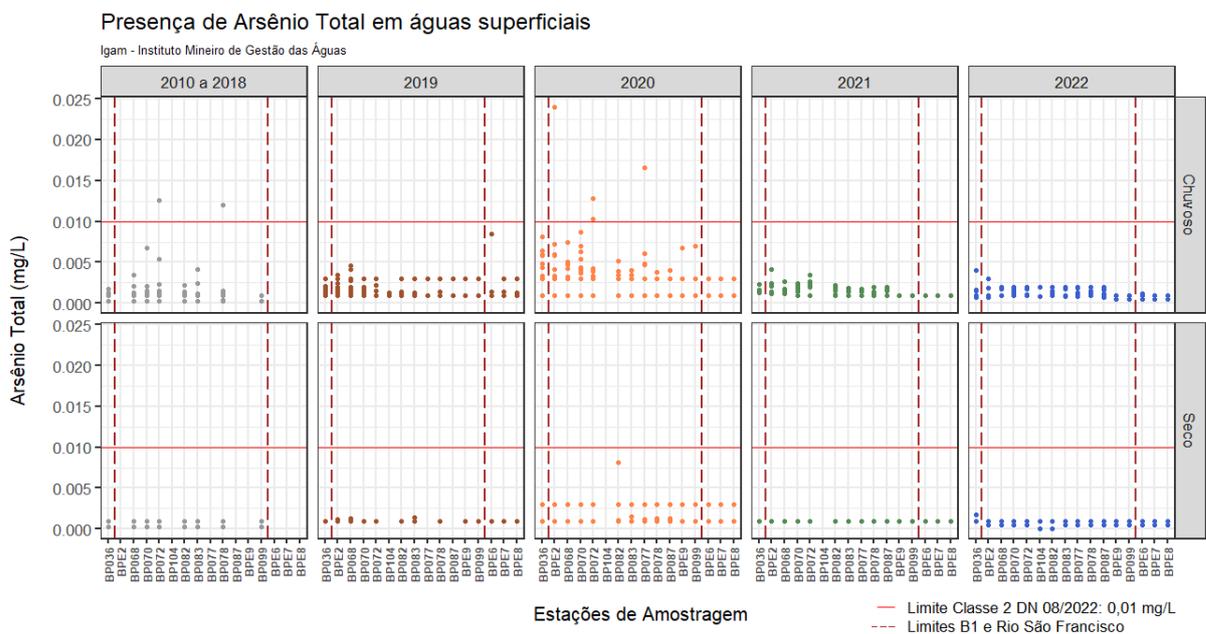
a ressuspensão de sedimentos depositados na calha do rio, elevando as concentrações desse contaminante no período pós-desastre.

Apesar do estudo geoquímico do Serviço Geológico do Brasil da (CPRM, 2018) indicar que a bacia do rio Paraopeba já mostrava, antes do rompimento das barragens, a existência de valores anômalos de mercúrio, principalmente nas cabeceiras, registra-se que todos os valores da série histórica (2010 a 2018) de monitoramento do Igam estiveram abaixo do limite de quantificação do método analítico (0,2 µg/L).

Arsênio total

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 0,01 mg/L para o arsênio total em águas de Classe 2. A Figura 22 apresenta os resultados de arsênio total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IV-A (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Figura 22 – Resultados de arsênio total em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



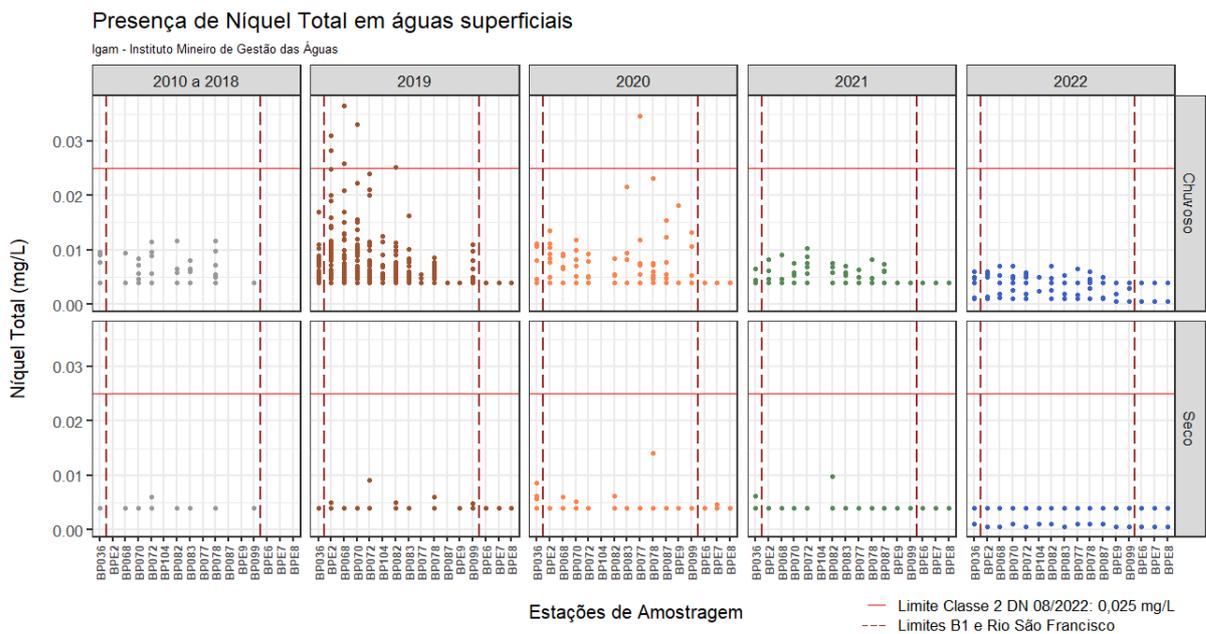
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Por meio dos resultados de arsênio obtidos no rio Paraopeba, observa-se violações do limite de classe no mês de janeiro de 2020 (BPE2 – Brumadinho, BP072 - Betim e BP077 – Papagaios/Paraopeba). Todos os demais registros estiveram em conformidade com a legislação vigente e dentro do esperado para a série histórica de monitoramento do Igam. Portanto, não foi possível identificar relação direta com o rejeito proveniente das barragens B1, B-IV e BIV-A, uma vez que no ano do desastre ambiental não houve valores expressivos de arsênio e o mesmo não faz parte da composição do rejeito. A presença do arsênio na coluna d’água pode estar relacionada com outras atividades antrópicas.

Níquel total

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 8 de 2022 estabelece o limite de 0,025 mg/L para o níquel total em águas de Classe 2. A Figura 23 apresenta os resultados de níquel total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IV-A (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Figura 23 – Resultados de níquel total em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Conforme observado na Figura 23, a maioria das violações para este parâmetro ocorreram somente no período chuvoso de 2019, com seus máximos observados principalmente em janeiro e fevereiro (Tabela 10), após o rompimento. Essas violações ocorreram de Brumadinho (BPE2) a São Joaquim de Bicas (BP070), e atingiram valores superiores aos máximos registrados para a série histórica (2010 a 2018). Nos anos subsequentes, com exceção do mês de fevereiro de 2020, nos pontos BP077 – Papagaios/Paraopeba (Figura 23) e BP072 – Betim (Tabela 10), os valores permaneceram abaixo do limite estabelecido e próximos ou abaixo da série histórica. Ressalta-se que o intenso período chuvoso no primeiro trimestre de 2020, possa ter contribuído para o aumento das concentrações de níquel. Assim como ocorreu com o chumbo e mercúrio total, a disponibilização de níquel para o corpo d'água não têm relação direta com o rejeito da B1, uma vez que não faz parte da sua composição. Contudo, a presença deste elemento pode estar associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito e que propiciaram a ressuspensão de sedimentos depositados na calha do rio, elevando as concentrações desse contaminante no período pós-desastre.

Tabela 10 - Valor extremo de níquel total obtido no ano de 2016, 2019 e 2020

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP083	04/08/2016	Níquel total	mg/L	0,087	Seco
BPE2	26/01/2019	Níquel Total	mg/L	0,053	Chuvoso
BP068	26/01/2019	Níquel Total	mg/L	0,109	Chuvoso
BP068	31/01/2019	Níquel Total	mg/L	0,049	Chuvoso
BP070	26/02/2019	Níquel Total	mg/L	0,040	Chuvoso
BP070	27/02/2019	Níquel Total	mg/L	0,058	Chuvoso
BP072	17/01/2020	Níquel Total	mg/L	0,065	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Zinco total

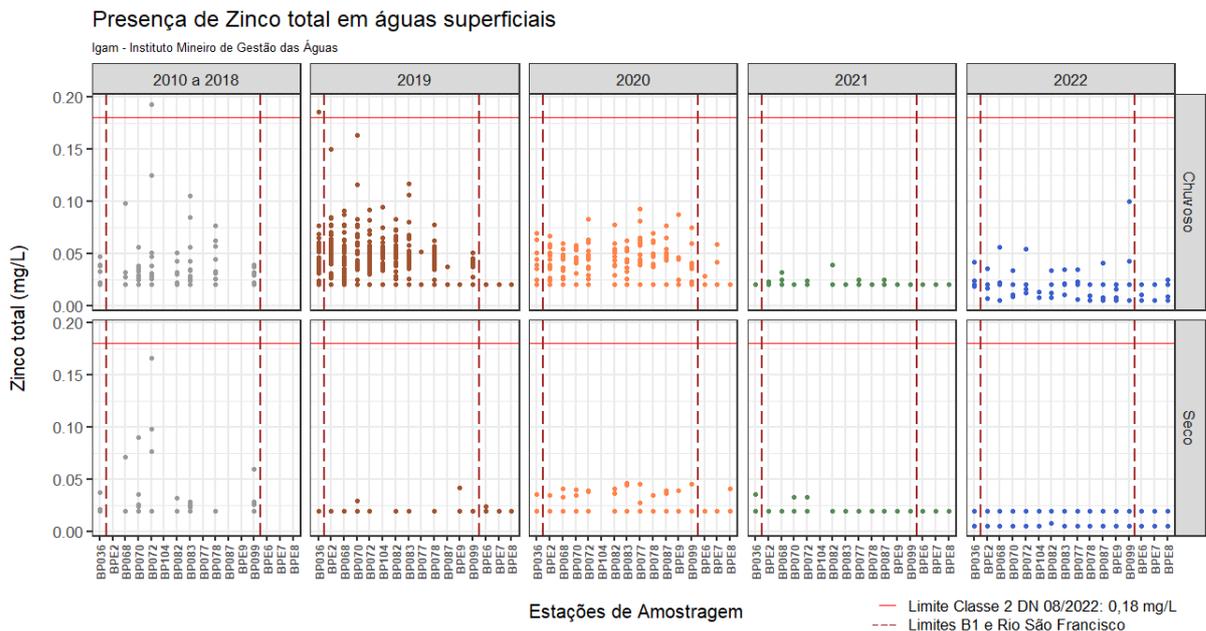
Uma das fontes de contaminação do meio aquático pelo zinco é por meio de rejeitos da atividade de mineração e de efluentes industriais e domésticos não tratados.

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 08 de 2022 estabelece o limite de 0,18 mg/L para o zinco total em águas de Classe 2. A Figura 24 apresenta os resultados de zinco total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IVA (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022).

Os resultados de zinco total no ano de 2019 identificaram violações ao limite de Classe 2 somente nas estações de amostragem localizadas a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036 - Brumadinho) e em Mário Campo (BP068), sendo que no ponto a montante do desastre o valor registrado foi superior ao máximo da série histórica. Como demonstrado na Figura 24 e Tabela 11, também não foi possível identificar um padrão no comportamento dos resultados que pudesse indicar relação com o rompimento das barragens da Vale S.A., uma vez que a maior parte dos máximos ocorreram antes do rompimento.

Durante o período de monitoramento pós-rompimento (2020, 2021, 2022), a maior parte dos resultados se encontraram abaixo do limite legal e em conformidade com os dados da série histórica. Vale ressaltar que durante os períodos chuvosos observa-se que os valores de zinco total apresentam uma elevação quando comparados com o período seco, porém abaixo dos valores máximos da série histórica.

Figura 24 – Resultados de zinco total em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 11 - Valor extremo de zinco total obtido no ano de 2015, 2018 e 2019

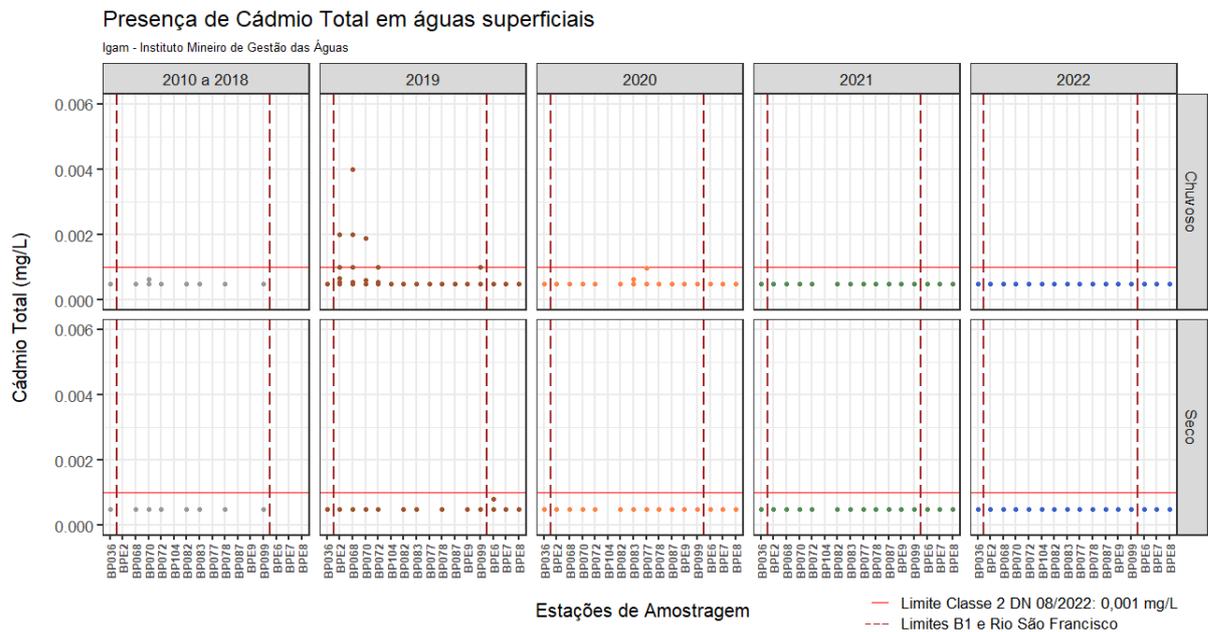
Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP083	05/11/2015	Zinco total	mg/L	0,268	Chuvoso
BP082	09/08/2018	Zinco total	mg/L	0,349	Seco
BP083	09/08/2018	Zinco total	mg/L	0,325	Seco
BP078	10/08/2018	Zinco total	mg/L	0,337	Seco
BP099	10/08/2018	Zinco total	mg/L	0,375	Seco
BP068	26/01/2019	Zinco Total	mg/L	0,250	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Cádmio total

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 8 de 2022 estabelece o limite de 0,001 mg/L para cádmio total em águas de Classe 2. A Figura 25 apresenta os resultados de cádmio total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IVA (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022). Pode ser observado que o cádmio extrapolou o limite para classe 2 somente nos primeiros meses (janeiro e fevereiro de 2019) após o rompimento, especialmente no trecho localizado nos primeiros 40 km, a jusante das barragens, ou seja, entre os municípios de Brumadinho (BPE2) e São Joaquim de Bicas (BP070). Para cádmio total, todos os valores da série histórica de monitoramento do Igam estiveram abaixo do limite de quantificação do método analítico.

Figura 25 – Resultados de cádmio total em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



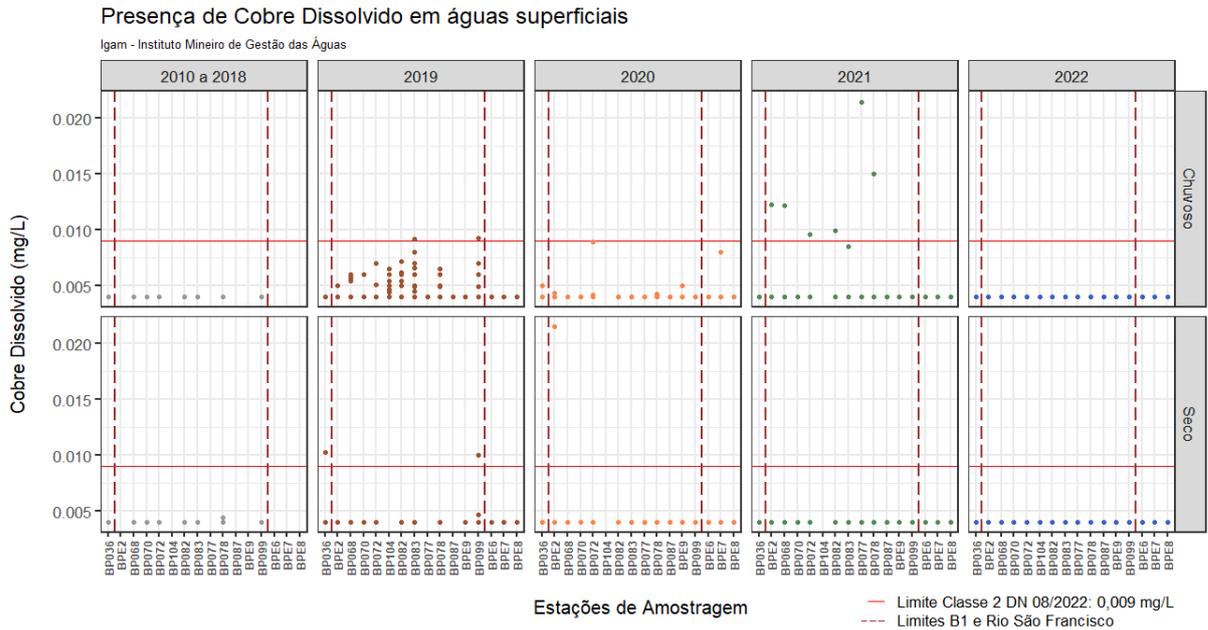
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Cobre dissolvido

O cobre (Cu) é um metal essencial presente naturalmente no ambiente (Royer & Sharman, 2020). A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 8 de 2022 estabelece o limite de 0,009 mg/L para este metal em águas de Classe 2. A Figura 26 apresenta os resultados de cobre dissolvido no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos quatro anos após o rompimento das barragens B1, B-IV e B-IVA (26 de janeiro de 2019 a 2 de dezembro de 2022).

Em relação aos valores de cobre dissolvido apresentados na Figura 26 e Tabela 12, observa-se que a maior parte das maiores concentrações foram detectadas no ano de 2019. No entanto, no período chuvoso de 2019, logo após o rompimento das barragens da Vale S.A, as violações de cobre dissolvido em desconformidade com o limite de Classe 2 ocorreram apenas nas estações BP083 (Papagaios/Paraopeba) e BP099 (Felixlândia - estação a jusante da UHE Retiro Baixo), sendo que a maior concentração foi verificada nessa última estação de amostragem (Tabela 12). No período seco de 2019 as desconformidades ocorreram no BP099 (Felixlândia), bem como no trecho não impactado (antes da foz com o ribeirão Ferro-Carvão - BP036 - Brumadinho).

Figura 26 – Resultados de cobre dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 12- Valores extremos de cobre dissolvido em 2019 e 2020

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP099	23/03/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,034	Chuvoso
BP099	03/04/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,054	Seco
BP099	04/04/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,107	Seco
BP099	07/04/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,070	Seco
BP036	03/06/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,061	Seco
BP082	07/04/2020	Cobre Dissolvido	mg/L	0,031	Seco

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Em 2020, ocorreu violação de cobre dissolvido no mês de abril (período seco) na estação localizada em Esmeraldas/São José da Varginha (BP082) (Tabela 12). Todos os demais registros de cobre dissolvido estiveram abaixo do limite de quantificação do método de análise (0,004 mg/L).

O ano de 2021 (período chuvoso) foi o que apresentou mais violações do limite legal estabelecido nos pontos monitorados em Brumadinho (BPE2), Mário Campos (BP068), Betim (BP072), Esmeraldas/São José da Varginha (BP082), Papagaios/Paraopeba (BP077) e Curvelo/Pompéu (BP078), sendo que no ano subsequente não foram observadas violações. Durante o monitoramento, em todos os pontos da represa de Três Marias, este parâmetro se apresentou constante e abaixo do limite legal vigente.

Ressalta-se que o trecho de Brumadinho a São Joaquim de Bicas, considerado como o mais impactado, não sofreu variações significativas nos valores de cobre dissolvido que pudessem estar relacionados diretamente com o rejeito proveniente do rompimento da barragem B1, visto que o cobre não faz parte da composição do rejeito.

A sua presença na coluna d'água pode ser favorecida por atividades antrópicas e, ocasionalmente, uma fração do cobre é disponibilizado para o curso d'água.

Para os demais metais avaliados: bário total, boro total, cromo total, selênio total, vanádio total, além dos parâmetros cianeto livre, nitrito e nitrogênio amoniacal não foram registradas violações do limite de classe, segundo a Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 8 de 2022, de Minas Gerais, as exceções em 2019 para nitrato (BP082-Esmeraldas) e 2021 para fenóis totais (BP036 - Brumadinho).

No Apêndice A pode ser consultado o mapa síntese que mostra o total de parâmetros que violaram os limites de classe (janeiro de 2019 a dezembro de 2022) e apresentaram resultados superiores a Série histórica (2010 a 2018). Na elaboração das tabelas ilustradas no mapa é representado o número de vezes que cada parâmetro excedeu o limite e a Série histórica em cada ponto de monitoramento.

Acompanhamento das coletas de água e sedimentos nos pontos de monitoramento da Vale pelo Igam

A equipe da Gerência de Monitoramento da Qualidade das Águas (Gemoq) da Diretoria de Monitoramento de Eventos Críticos (Dmec) do Igam, em 2022 e 2023, acompanhou as amostragens de campo em água superficial e sedimentos realizadas pelo laboratório contratado pela Vale S.A., no rio Paraopeba nos municípios de Brumadinho, Igarapé, Juatuba, Esmeraldas, Pará de Minas, Paraopeba, Pompéu, Curvelo, Felixlândia e nos afluentes ribeirão Casa Branca e córrego Samambaia (Figura 27).

Figura 27 – Acompanhamento de coletas de água superficial e sedimentos na bacia do rio Paraopeba entre 2022 a 2023



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O acompanhamento teve por objetivo verificar as metodologias utilizadas para os procedimentos de coleta de amostras de água superficial e sedimentos, bem como o histórico de cada ponto monitorado: localizações, alternativas de coordenadas, dificuldades de acesso pelo rio, margens, propriedades privadas e tipos de manutenções necessárias nos períodos chuvosos e secos, meios de transporte utilizados etc. Ressalta-se que está prevista a transferência da operação de alguns pontos de monitoramento da mineradora Vale S.A para o IGAM.

INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Dragagem

De maneira a promover a recuperação do rio Paraopeba e do ribeirão Ferro-Carvão impactados pelo rejeito da barragem B1, foi proposto como uma das ações emergenciais a realização da atividade de dragagem do rio Paraopeba no trecho dos primeiros 2 Km.

A operação de dragagem corresponde à remoção do rejeito depositado na calha do rio Paraopeba, partindo do Marco Zero até a Termoelétrica Igarapé, totalizando 45 Km. O primeiro trecho é o canal do rio de 0 a 550 m, o segundo será de 551 m a 2 Km de distância e posteriormente serão definidos os demais trechos a jusante.

A dragagem iniciou as atividades em agosto de 2019 com a disposição do material dragado nos *geobags* localizados nos platôs da ETAF2 (Estação de Tratamento de Águas Fluviais 2), com o objetivo de tratar as águas oriundas da operação de dragagem e retorná-la ao rio Paraopeba. A água tratada era proveniente do desaguamento dos *geobags*, para os quais o material dragado era encaminhado para disposição dos sólidos. Essa primeira fase ocorreu entre 15/08/19 a 24/11/2021, com volume dragado de 83.226 m³ (áreas de corte dragadas parcialmente: 6, 7, 8, 13 e 23). Devido à baixa produtividade da dragagem, a mineradora Vale S.A propôs em 2022 uma alteração desse projeto no intuito de melhorar sua efetividade. Foi proposta a realização de testes de eficiência alterando o local da disposição do material dragado para *sumps* na região do ribeirão Ferro-Carvão, onde são realizadas batimetrias de acompanhamento e o controle de vazão e turbidez vertidas para o reservatório da EP-01.

Nesta nova proposta, a água proveniente do processo de dragagem é vertida para os reservatórios da EP-01 (Cortina Metálica em Estaca Prancha 01) e o tratamento da água é realizado na ETAF1 (Estação de Tratamento de Águas Fluviais 1), onde o deságue desse tratamento ocorre no ribeirão Casa Branca afluente do rio Paraopeba. Ressalta-se que desde julho 2022 a ETAF1 não estava operando em sua capacidade máxima de tratamento a qual foi projetada, ou seja, de 2000 m³/hora. Essa nova proposta teve como premissa melhorar a eficiência da produtividade da operação da dragagem. A segunda fase das atividades de dragagem considerada uma fase de testes, iniciou com o material dragado para os *sumps* e, após, para DTRs (Depósitos temporários de rejeitos) e Cava entre 09/03/22 a 05/12/2022, com

volume dragado de 45.010 m³. Esse volume também ficou aquém do esperado, devido a problemas operacionais. Salienta-se que a draga permaneceu paralisada de dezembro/22 a junho/23, inicialmente para manutenções dos equipamentos e posteriormente para aquisição de uma nova draga. Até esse período o volume total dragado foi de 128.236 m³.

Portanto, na terceira fase, esperara-se que com a nova empresa draguista e o emprego de equipamento mais robusto uma maior eficiência na retirada da totalidade dos rejeitos dos primeiros 550 m e posteriormente no trecho compreendido entre 551 m a 2 km do rio Paraopeba. Ressalta-se que o retorno das atividades de dragagem ocorreu em 26/07/23, sem que as adequações necessárias para que a capacidade da ETAF1 retornasse, pelo menos, à vazão nominal de tratamento de 2.000 m³/h implantada e prevista em projeto, a fim de minimizar o extravasamento de polpa oriunda da dragagem sobre a Estaca Prancha. Atualmente, até a publicação deste Caderno a ETAF1 voltou a operar em sua capacidade máxima.

8 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE SEDIMENTOS DE JANEIRO DE 2019 A OUTUBRO DE 2022

Nesse Caderno Especial é apresentada uma análise dos resultados de sedimentos coletados ao longo do rio Paraopeba, para os dados do monitoramento emergencial obtidos entre 27 de janeiro de 2019 a 7 de outubro de 2022. Conforme detalhado no Item 5.3 Frequência de amostragem, o monitoramento da qualidade dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba teve início logo após o rompimento das barragens (B1, B-IV, BIV-A). Durante os primeiros 60 dias, o monitoramento de sedimentos foi semanal e no decorrer do tempo passou a ser mensal.

As concentrações dos metais e arsênio nos sedimentos foram comparadas com os Níveis 1 e 2, definidos para águas doces, da Resolução CONAMA nº 454 de 2012 (Tabela 3). Esta Resolução não estabelece valores orientadores para os metais ferro, alumínio e manganês, o que se fez foi utilizar os valores de referência da pesquisa de Vicq (2015), os quais correspondem a 28,10% (ferro), 0,33% (manganês) e 4,52% (alumínio), conforme detalhado no item 5.4. Tanto o ferro como o manganês e alumínio são expressos em porcentagem de peso seco (%), dada a importância relativa desses metais quanto à composição dos sedimentos que geralmente são encontrados.

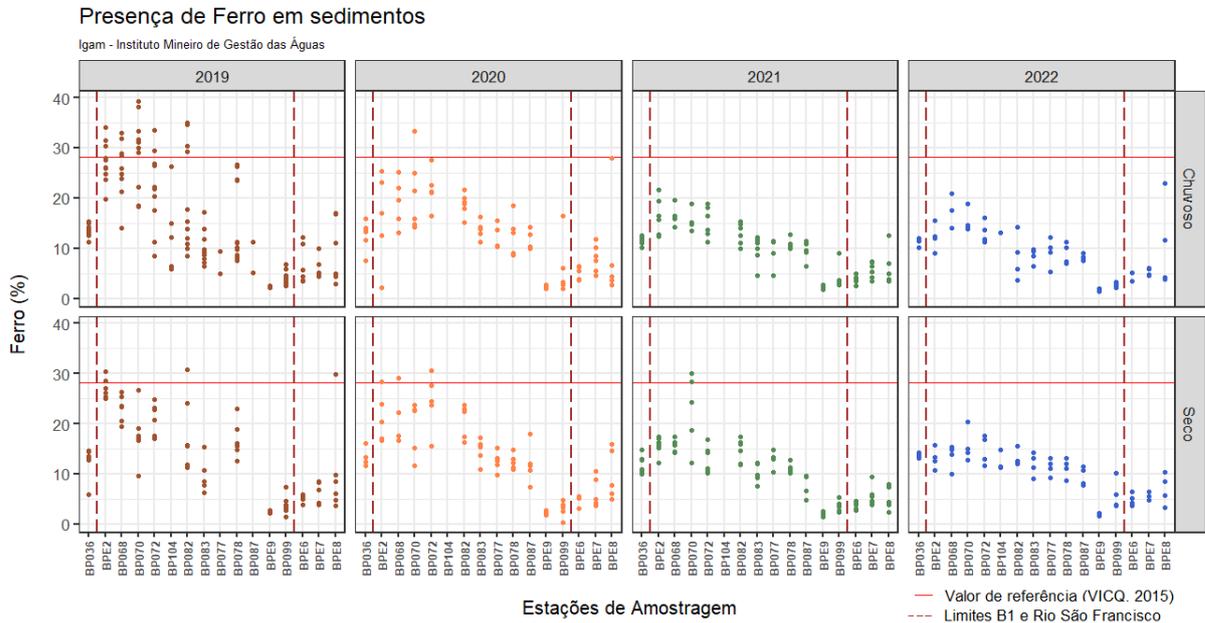
O presente estudo avaliou os parâmetros ferro, manganês, alumínio, arsênio, cádmio, chumbo, mercúrio, cobre, cromo, níquel, vanádio, zinco, estrôncio e titânio.

A seguir são apresentados os gráficos de resultados desses parâmetros nos sedimentos de fundo.

Ferro em sedimentos

Na Figura 28 são apresentados os resultados do parâmetro ferro nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, do monitoramento especial no período chuvoso e seco entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda do gráfico, a linha vermelha representa o limite de referência (28,10%) usado por Vicq (2015) para esse parâmetro.

Figura 28 – Resultados de ferro em sedimentos de fundo da bacia do rio Paraopeba para períodos chuvosos e secos de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O material proveniente da Barragem B1 é originário da mineração de ferro, sendo o elemento de maior abundância no rejeito. Por essa razão, o ferro juntamente com o manganês, foram considerados metais traçadores do avanço do rejeito sobre os sedimentos de fundo.

Observa-se que nos primeiros 40 km do rio Paraopeba (trecho da estação BPE2 até BP070), a jusante da B1, o um aumento expressivo dos valores de ferro e resultados superiores aos valores de referência de Vicq (2015) em 2019 (período chuvoso), quando comparado com a estação a montante (BP036 - Brumadinho) da área impactada pelo rompimento. A partir da Termelétrica de Igarapé (BP072 - Betim) até a montante da UHE Retiro Baixo (BP087 - Pompéu/Curvelo) verifica-se uma redução gradual dos teores de ferro e registros abaixo (linha vermelha) da referência de Vicq (2015), com exceção dos resultados mais elevados em Esmeraldas (BP082).

Já no período seco de 2019, os resultados mais elevados e acima do reportado na referência ocorreram nos pontos de monitoramento em Brumadinho (BPE2), Esmeraldas (BP082) e Três Marias (BPE8 - estação localizada dentro da represa de Três Marias).

Ao avaliar os resultados do ano de 2020, no período chuvoso, é possível verificar uma redução dos teores de ferro total nos sedimentos em relação ao ano de 2019, para a maioria dos pontos

monitorados, sendo os valores mais elevados e acima da referência identificados no ponto BP070, em São Joaquim de Bicas. Já no período seco de 2020, registrou-se poucos resultados superiores ao ano de 2019, como os pontos BP068 (Mário Campos) e BP072 (Betim), que apresentaram registros maiores que a referência de Vicq (2015). O ponto BPE2 em Brumadinho também ultrapassou o limite de referência, porém permaneceu abaixo do valor registrado em 2019. Contudo, os registros ainda permanecem elevados aos observados no trecho a montante do desastre (BP036).

Em relação ao ano de 2021 e 2022, é possível observar redução dos teores de ferro total nos sedimentos em comparação aos anos de 2019 e 2020, em toda a calha do rio Paraopeba desde a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão até a montante da UHE Retiro Baixo. Entretanto, destaca-se o ponto BP070, em São Joaquim de Bicas, que apresentou em 2021 resultados superiores aos demais pontos adjacentes, e o BPE8 localizado no reservatório de Três Marias que apresentou em 2022 valores próximos aos resultados monitorados em 2019, nesse mesmo trecho.

Na comparação entre os anos de 2019 a 2022 verificou-se que os trechos onde os sedimentos de fundo não receberam impacto direto do rompimento das barragens, quais sejam a jusante de Retiro Baixo (BP099) e represa de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), em sua maioria os valores de seus máximos se mostraram inferiores ao valor máximo encontrado no trecho a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036).

De acordo com os dados do Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimentos Fechamento de Ciclo (25/01/2019 a 30/06/2019), disponibilizados pela Vale S.A, o ferro presente nos rejeitos se encontra, principalmente, na forma do óxido Fe_2O_3 , conhecido como hematita. A hematita possui uma densidade elevada (4,9 a 5,3 g/cm^3), contribuindo para uma deposição mais rápida, principalmente nos primeiros trechos a jusante do rompimento das barragens. Essa característica do rejeito ratifica os valores de ferro obtidos nos sedimentos e discutidos acima.

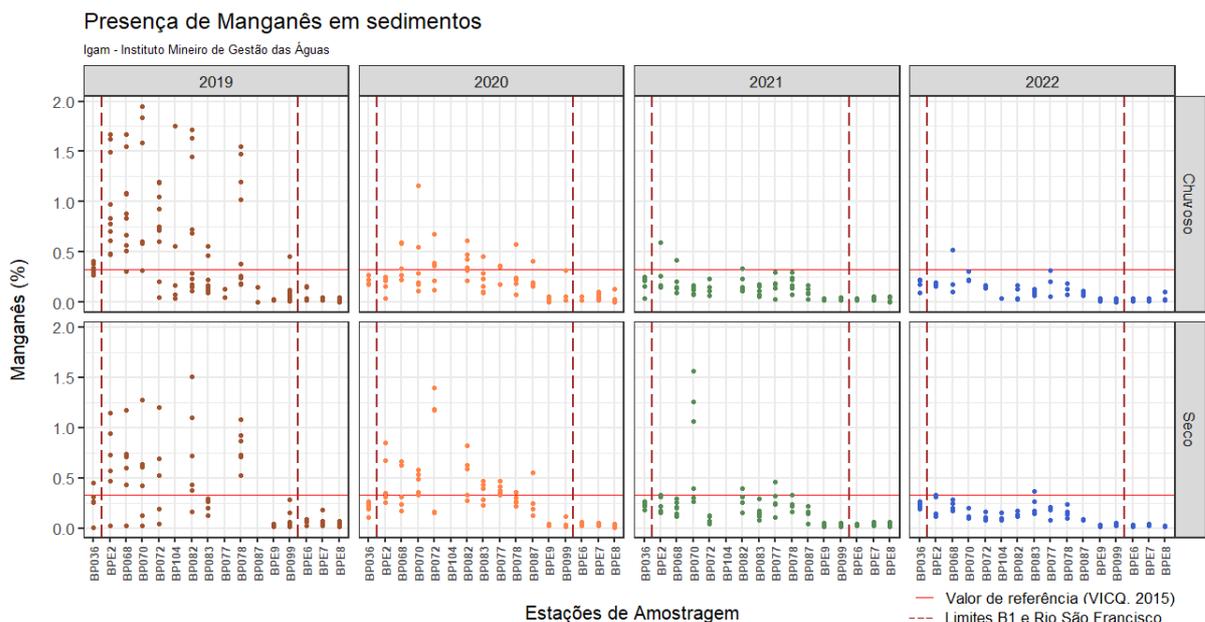
Manganês em sedimentos

Na Figura 29 são apresentados os dados obtidos no monitoramento especial para manganês em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, referente ao período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na

legenda do gráfico, a linha vermelha representa o limite de referência (0,33%) usado por Vicq (2015) para esse parâmetro.

É possível observar que este metal apresentou comportamento bastante semelhante ao do ferro total, o que era esperado, tendo em vista que são os metais de maior abundância na composição dos rejeitos provenientes das barragens da Vale S.A.

Figura 29 – Resultados de manganês em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O parâmetro de manganês total apresentou valores elevados durante quase todo o ano de 2019 na calha do rio Paraopeba, superando o valor de referência citado de Vicq (2015), desde à montante do rompimento (BP036) até à montante da UHE Retiro Baixo (BP078). Neste ano foram verificados os maiores valores (Tabela 13). Salienta-se que a estação de amostragem localizada a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) apresentou um único registro superior (0,46%), com base no limite de referência de (VICQ, 2015). Contudo nas semanas seguintes esse comportamento não se manteve, possivelmente sendo uma alteração pontual e não relacionada ao desastre.

Tabela 13- Valores extremos de ferro em 2019 com base na referência de Vicq (2015) – em período chuvoso

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período	Nível 1	Nível 2
BPE2	28/01/2019	Manganês	%	2,56	Chuvoso	0,33	0,33
BP070	28/01/2019	Manganês	%	2,52	Chuvoso	0,33	0,33
BP070	04/02/2019	Manganês	%	2,89	Chuvoso	0,33	0,33
BP070	11/02/2019	Manganês	%	2,17	Chuvoso	0,33	0,33
BP070	18/02/2019	Manganês	%	2,36	Chuvoso	0,33	0,33
BP072	18/02/2019	Manganês	%	2,46	Chuvoso	0,33	0,33
BP082	04/03/2019	Manganês	%	2,21	Chuvoso	0,33	0,33

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

No ano de 2019 os resultados para manganês total, nos primeiros 60 km a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, foram superiores aos valores encontrados no trecho a montante do desastre. O que indicou impacto dos rejeitos nos sedimentos de fundo oriundo da Barragem B1.

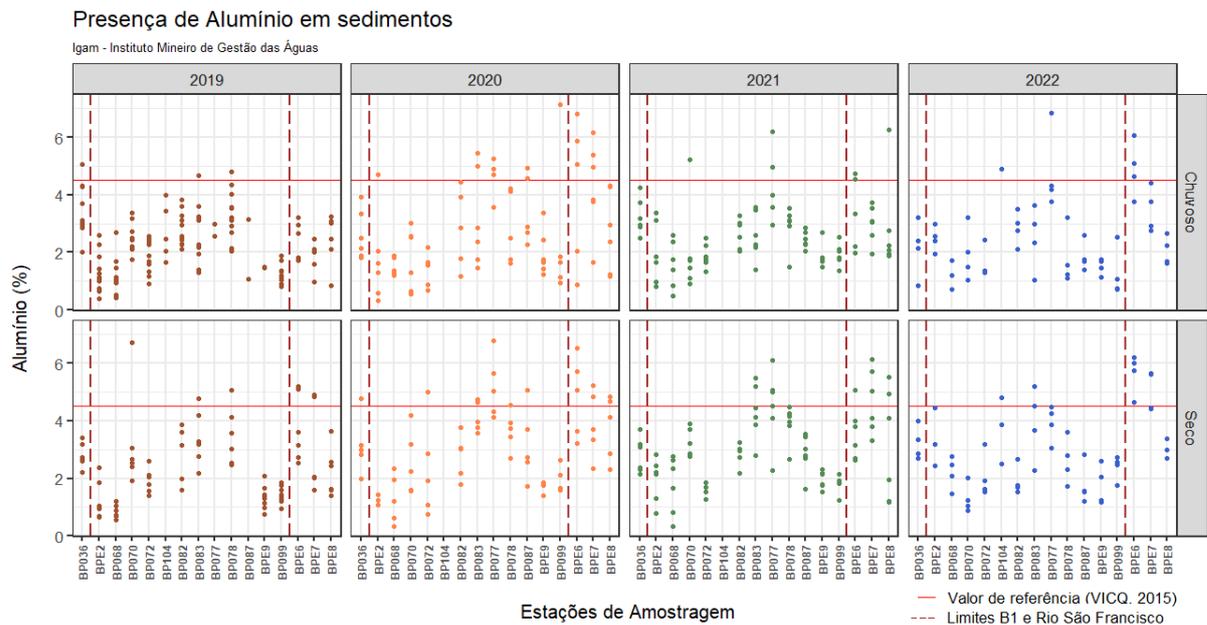
Nos anos 2020, 2021 e 2022 observa-se uma redução dos teores de manganês nos sedimentos nos pontos de monitoramento que receberam impacto direto dos rejeitos provenientes das barragens, tendendo a uma aproximação dos teores registrados no trecho de montante ao ribeirão Ferro-Carvão (BP036). Contudo, apesar dessa redução observa-se que nos anos seguintes os valores máximos ainda se encontram acima do valor de referência citado por Vicq (2015).

Nas estações de amostragem a jusante da UHE de Retiro Baixo (BP099) e no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7, BPE8) todos os registros de manganês total (períodos chuvosos e secos) foram inferiores ou próximos aos obtidos na estação de monitoramento localizada a montante (BP036) do rompimento. Esses resultados reforçam que os sedimentos de fundo nos trechos após o reservatório de Retiro Baixo não registraram alterações devido ao impacto dos rejeitos até o momento.

Alumínio em sedimentos

Na Figura 30 é apresentado o gráfico para alumínio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda do gráfico, a linha vermelha representa o limite de referência (4,52%) usado por Vicq (2015) para esse parâmetro.

Figura 30 – Resultados de alumínio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Os resultados de alumínio total apresentaram comportamento distinto comparado com os resultados de ferro total e manganês total para o mesmo período chuvoso e seco (Figura 30). De maneira geral, é possível verificar valores mais baixos de alumínio total nos primeiros 60 km, a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BPE2) até Betim (BP072). Os resultados mais elevados começam a surgir a partir da estação BP104, captação de Pará de Minas até a estação de monitoramento BP087 (Pompéu) localizada antes de Retiro Baixo, durante todo o período analisado. Inclusive, observa-se que o trecho de montante apresenta valores mais elevados que o trecho mais impactado pelo rompimento (primeiros 60km).

Registra-se ainda que, a maioria dos resultados de 2019, estiveram abaixo da referência indicada por Vicq (2015), no entanto, o mesmo não foi observado para os anos seguintes. É possível observar um maior número de resultados acima da referência em 2020. Em 2021 e 2022 verifica-se uma redução desses registros.

Observa-se valores mais altos de alumínio total nas estações de amostragem localizadas no reservatório de Três Marias em 2020, 2021 e 2022. Os resultados desses anos, nesses pontos, em sua maioria foram superiores aos registrados em 2019. Tais resultados são o oposto ao observado para os valores de manganês total e ferro total.

Os resultados indicam que o alumínio total nos sedimentos não está associado de forma direta com a presença dos rejeitos ao longo da calha do rio Paraopeba.

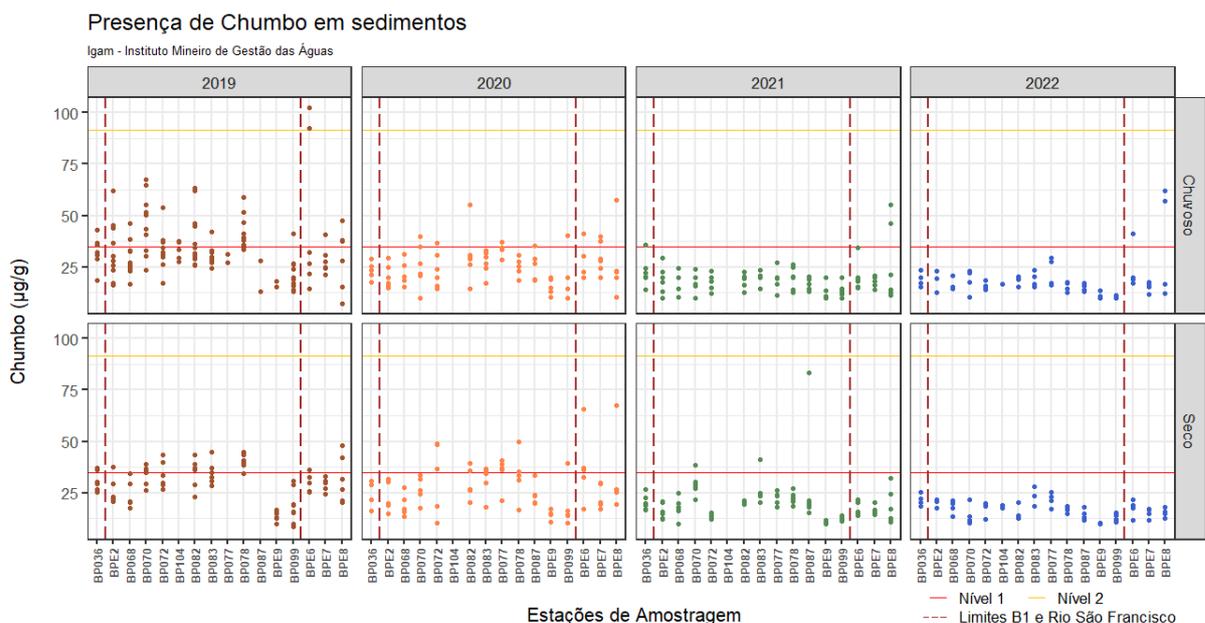
É importante mencionar que os resultados de qualidade da água bruta superficial também acompanham este comportamento, ou seja, o parâmetro alumínio dissolvido apresenta-se de forma inconsistente com o comportamento geral de ferro total e manganês total, ao revés, com valores próximos da normalidade histórica justamente a jusante da barragem, aumentando muito além dessa normalidade em todos os outros trechos, inclusive em trechos não impactados, como o trecho após a UHE Retiro Baixo.

Chumbo em sedimentos

As concentrações de chumbo nos sedimentos foram comparadas com os Níveis 1 e 2, definidos para águas doces, da Resolução CONAMA nº 454 de 2012 (Tabela 3).

Na Figura 31 são apresentados os resultados para chumbo em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dados esses obtidos no monitoramento especial no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda do gráfico, a linha vermelha representa o limite máximo do nível 1 (35 µg/g) enquanto a linha amarela o nível 2 (limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota aquática – 91,3 µg/g).

Figura 31 – Resultados de chumbo em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Os registros de chumbo acima do Nível 1 foram observados no ano de 2019 ao longo do rio Paraopeba, desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036 - trecho não impactado pelo rompimento das barragens) até o corpo da represa de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), a exceção da estação de monitoramento do ribeirão do Gomes (BPE9).

Apesar dos maiores valores de chumbo em 2019 terem ocorrido principalmente a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, ou seja, nos primeiros 40 km mais impactados, as ocorrências acima do Nível 1 nos trechos a montante do desastre (BP036) e no corpo do reservatório de Três Marias podem estar associadas ao rompimento de forma indireta, assim como podem ser provenientes de outras fontes antrópicas presentes na bacia. O material depositado nos leitos, ao longo dos anos, pode ter sido arrastado durante a passagem da lama e remobilizado, alterando os teores de chumbo, tanto na água quanto nos sedimentos. É importante lembrar que o chumbo total não é comumente encontrado em mineralização de ferro (RODRIGUES, 2012).

Registros eventuais de chumbo total acima do Nível 2 ocorreram duas vezes no monitoramento especial do rio Paraopeba, ambos em março de 2019 no remanso da represa de Três Marias (BPE6), município de Felixlândia. Os valores encontrados corresponderam a 92,26 $\mu\text{g/g}$ e 102,39 $\mu\text{g/g}$. Ressalta que esses registros não estão associados ao rompimento das barragens (B-I, B-IV e B-IV-A) da Vale S.A, em Brumadinho, e possivelmente as alterações podem estar relacionadas a outras fontes antrópicas presentes na bacia e que drenam para o reservatório.

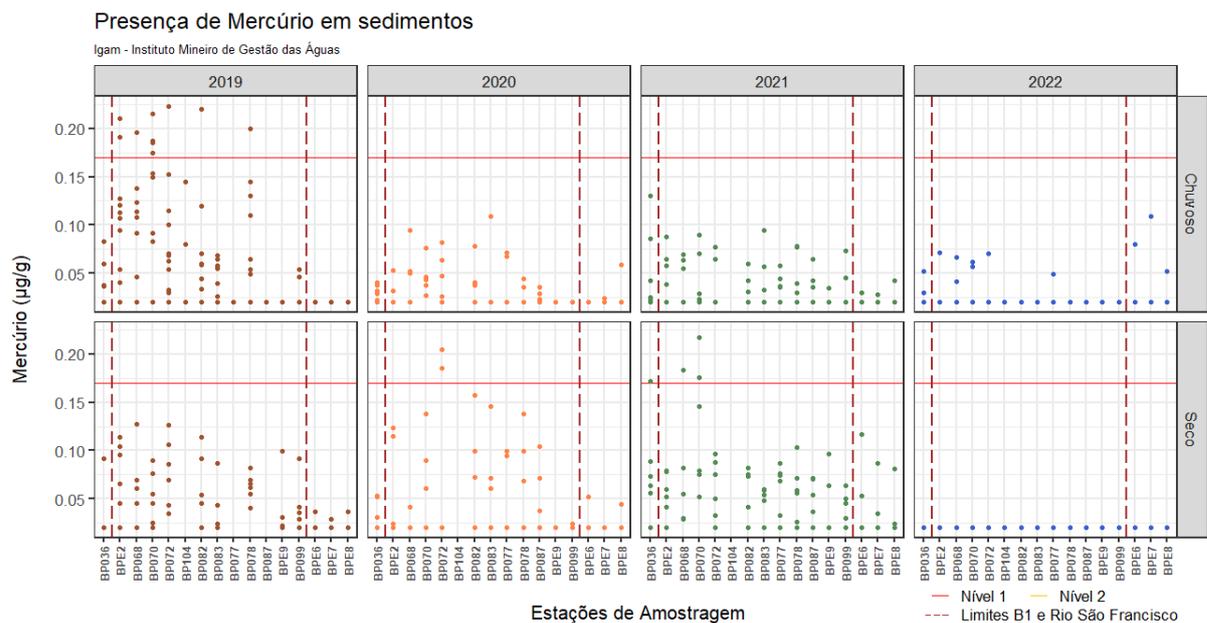
No ano de 2020, o número de resultados que extrapolaram o Nível 1 foi inferior aos obtidos no ano de 2019, desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036) até a represa de Três Marias. Em 2021 foram registradas violações em quatro estações na calha do rio Paraopeba (BP036 – Brumadinho, BP070 - São Joaquim de Bicas, BP083 – Paraopeba, BP087 - Pompéu) e duas dentro do reservatório de Três Marias (BPE8 - Três Marias). No ano de 2022, os resultados de chumbo em desconformidade foram obtidos apenas no reservatório de Três Marias (BPE6 - Felixlândia, BPE8 - Três Marias).

Mercúrio em sedimentos

Na Figura 32 é apresentado o gráfico para chumbo em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda do gráfico, a linha vermelha representa o limite máximo do nível 1 (0,17 mg/g) e a linha amarela o nível 2 (0,486 mg/g) preconizados na legislação CONAMA nº 454/2012.

No período chuvoso de 2019, registrou-se valores de mercúrio total acima do Nível 1. Tais resultados foram observados nas estações de amostragem localizadas nos primeiros 60 km, a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BPE2, BP068, BP070 e BP072), e nas estações localizadas em Esmeraldas (BP082) e Curvelo (BP078). Registrou-se também nesse mesmo ano, em novembro, um valor anômalo na estação BP070 em São Joaquim de Bicas que ultrapassou o Nível 2, valor esse igual a 3,40 mg/g (Tabela 14).

Figura 32 – Resultados de mercúrio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 14 – Valor obtido para o mercúrio que ultrapassou o nível 2 (0,486 µg/g) no período de 27/01/2019 a 07/10/2022

Estação	Data da amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP070	18/11/2019	Mercúrio	µg/g	3,40	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Em 2020 foram registradas duas violações na estação monitorada em Betim (BP072) no período seco. No ano de 2021 foram verificados resultados com violações nas estações a montante do desastre em Brumadinho (BP036), Mário Campos (BP068) e São Joaquim de Bicas (BP070). Já em 2022 os resultados estiveram em conformidade com os Níveis 1 e 2 da resolução CONAMA nº 454/12. Destaca-se que nenhum registro de mercúrio superior ao Nível 2 foi encontrado em toda a calha do rio nos anos analisados.

Esses resultados demonstram que o aumento das concentrações de mercúrio nos sedimentos pode estar relacionado com o rompimento das barragens (B-I, B-IV e B-IVA), pois as elevações ocorreram no trecho localizado logo após a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. Todavia, a presença desse contaminante nas águas superficiais do rio Paraopeba reforça que, apesar do mercúrio total não estar diretamente relacionado ao rejeito contido nas barragens, as elevações dos seus teores estão associadas indiretamente ao rompimento, uma vez que, o arraste de materiais que se misturaram à lama de rejeito propiciaram esse aumento.

Além disso, as estações de amostragem localizada no tributário ribeirão dos Gomes (BPE9), no ponto a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) e no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7, BPE8) apresentaram valores de mercúrio inferiores ou próximos aos obtidos no trecho a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036) e não registraram alterações acima do nível 1 e 2 nos quatro anos avaliados.

Níquel e Cobre em Sedimentos

As Figura 33 e 34 apresentam os gráficos para níquel e cobre em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda dos gráficos, as linhas vermelhas e amarelas são referentes aos Níveis 1 e 2 (18 e 35,9 µg/g para níquel e 35,7 e 197 µg/g para cobre, respectivamente), definidos pela resolução CONAMA 454/2012.

Figura 33 – Resultados de níquel em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022

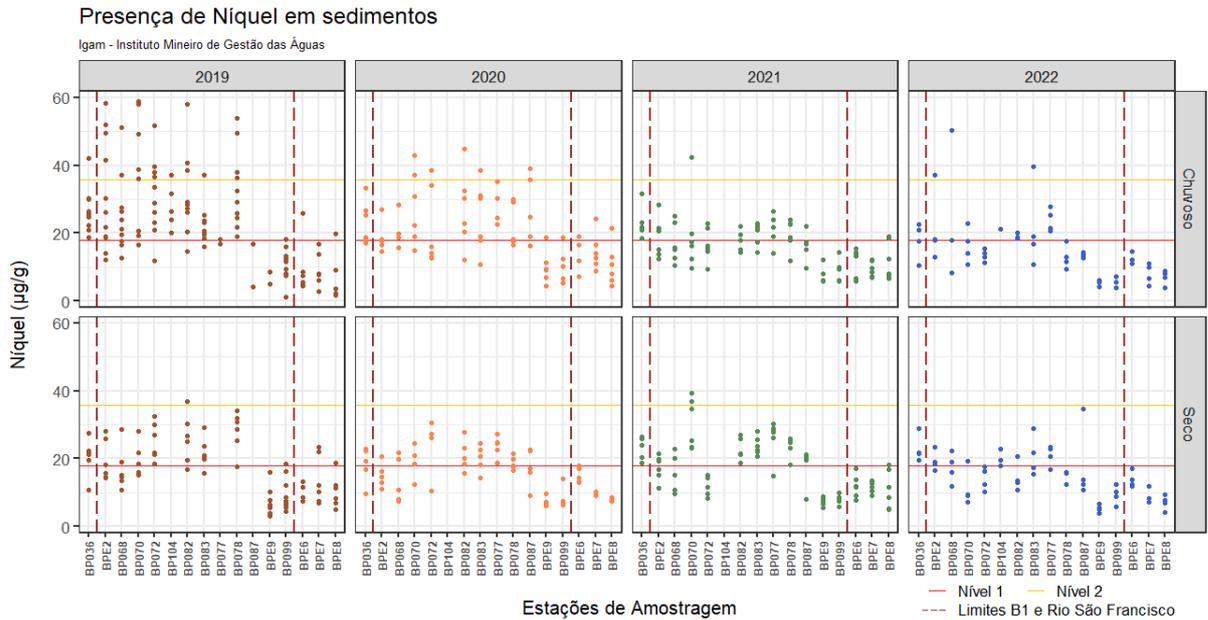
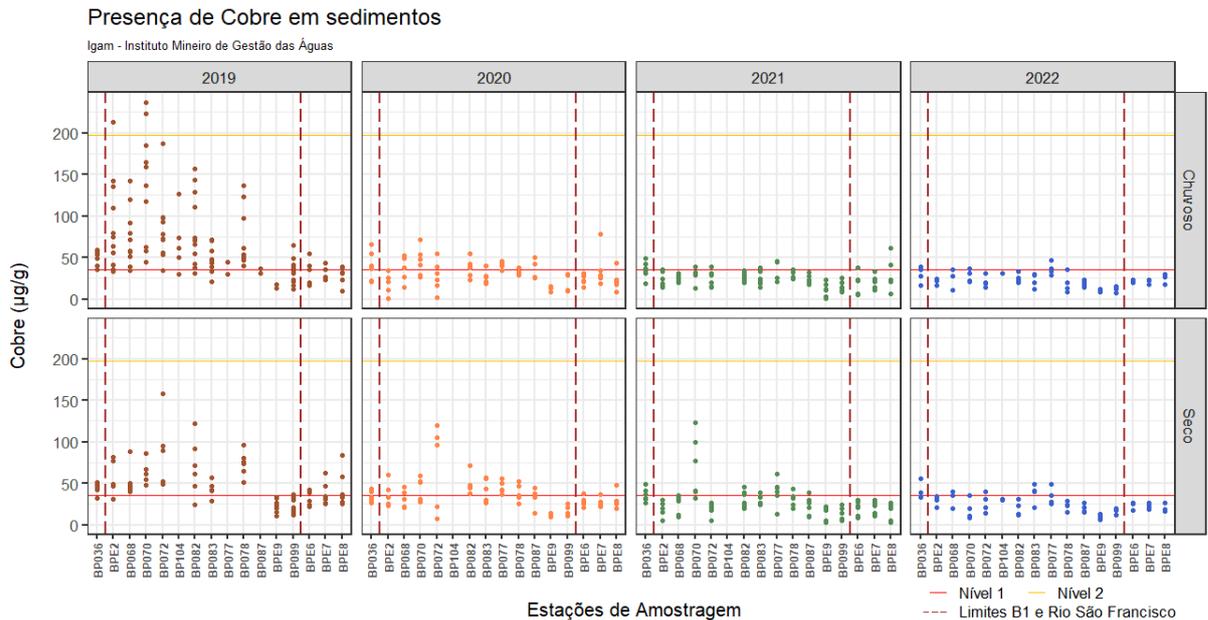


Figura 34 – Resultados de cobre em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Em 2019 os valores acima do Nível 1 foram registrados para ambos os metais em quase todos os pontos monitorados na calha do rio Paraopeba, inclusive a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036), trecho que não recebeu impacto do rompimento das barragens. Contudo, foi observado aumento dos valores de níquel e cobre nos primeiros 60 km mais

impactados a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão e trechos adjacentes, em comparação com a região localizada a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (trecho montante – BP036), sobretudo no primeiro ano após os rompimentos das barragens (2019).

Apesar desses metais não fazerem parte da composição do rejeito, esses resultados demonstram que a elevação dos valores de níquel e cobre nos sedimentos podem estar relacionados de maneira indireta com o rompimento das barragens B1, BIV e B-IV-A, bem como, com a presença de outras atividades antrópicas na bacia do rio Paraopeba. Assim, o material depositado no leito dos trechos afetados, ao longo dos anos, pode ter sido arrastado e remobilizado, alterando os valores de cobre total e níquel total nos sedimentos.

O Nível 2 também foi extrapolado para ambos os metais em 2019. Os resultados de cobre total acima do Nível 2 (limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota aquática) foram detectados nos pontos de monitoramento (BPE2 - Brumadinho) e (BP070 - São Joaquim de Bicas) com valores iguais a (212,89 µg/g) e (222,87 µg/g; 236,79 µg/g), respectivamente.

No que se refere a extrapolação do Nível 2 para níquel foram observados valores superiores no ponto a montante (BP036) de Brumadinho a Paraopeba (BPE2 a BP083) e em Curvelo (BP078) no ano de 2019. Em 2020, os pontos do BP070 a BP083 (São Joaquim de Bicas a Paraopeba) e a estação BP087 (Pompéu) também apresentaram resultados que ultrapassaram o limite do Nível 2. Em 2021, somente o ponto BP070 apresentou violação superior ao nível 2. No ano de 2022 foram verificados registros em desconformidades ao Nível 2 em Brumadinho (BPE2), Mário Campos (BP068), Esmeraldas (BP082) e em Paraopeba (BP083). Os máximos foram verificados em 2019 e 2022 (Tabela 15).

Tabela 15 – Valor obtido para o níquel que ultrapassou o nível 2 (35, 9 µg/g) no período de 27/01/2019 a 07/10/2022

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP070	04/02/2019	Níquel	µg/g	79,47	Chuvoso
BP082	11/03/2019	Níquel	µg/g	70,07	Chuvoso
BP082	06/10/2022	Níquel	µg/g	68,93	Chuvoso

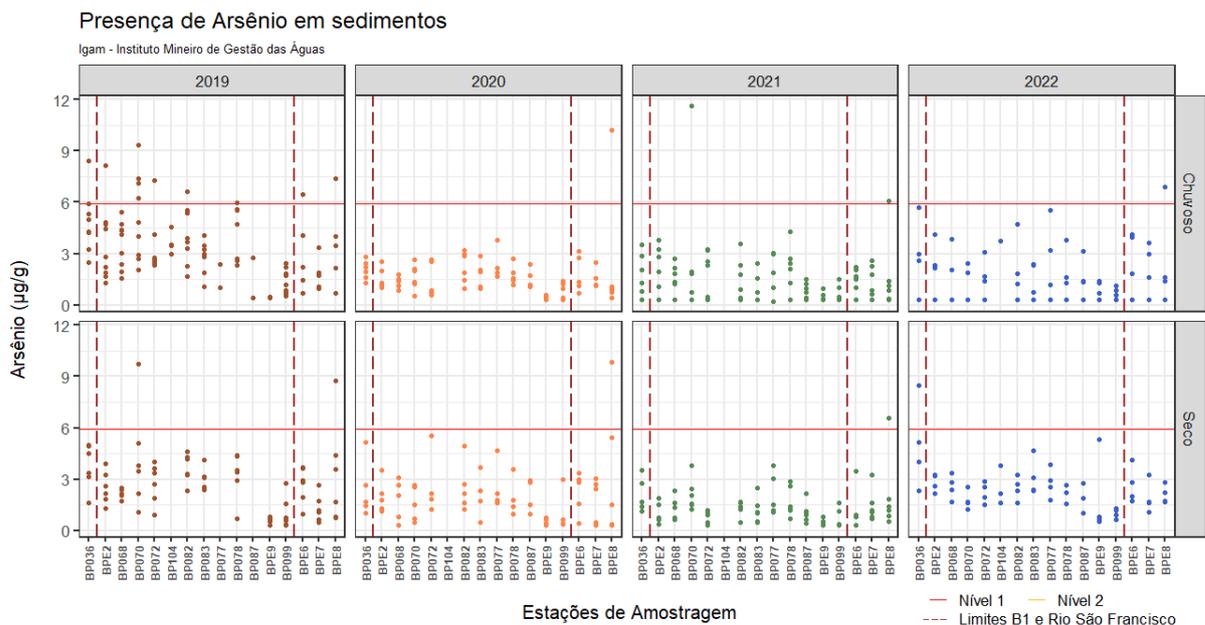
Os trechos localizados a jusante da UHE Retiro Baixo e no reservatório de Três Marias apresentaram pouca variação entre os anos de 2019 a 2022, para ambos os metais. Desta forma,

os registros de cobre e níquel nesses trechos sugerem ter relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem em outras fontes presentes na bacia que drenam para o reservatório.

Arsênio em Sedimentos

Na Figura 35 é apresentado o gráfico para arsênio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda do gráfico, a linha vermelha é referente aos valores orientadores do Nível 1 ($5,9 \mu\text{g/g}$) e a linha amarela os limites do Nível 2 ($17 \mu\text{g/g}$), estabelecidos na CONAMA n°454/2012.

Figura 35 – Resultados de arsênio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Observa-se que os valores de arsênio estiveram acima do Nível 1 ($5,9 \mu\text{g/g}$) em ao menos uma medição realizada no ano de 2019 em vários pontos da calha do rio Paraopeba e no corpo da represa de Três Marias. É possível verificar violações nos pontos (BP036, BPE2, BP070, BP072, BP082, BP078) e no reservatório de Três Marias (BPE6 e BPE8). Salienta-se que os valores de arsênio obtidos acima do Nível 1 incluem o trecho a montante (BP036) da influência do ribeirão Ferro-Carvão, trecho que não recebeu impacto do rompimento da Barragem B1. Desta maneira, pode-se associar a presença de arsênio nos sedimentos ao material presente no leito do rio Paraopeba, antes do rompimento da Barragem B1.

O período chuvoso destaca-se por apresentar mais resultados em 2019 acima do Nível 1 em comparação com os demais anos.

Nos anos seguintes ao desastre ambiental nota-se uma redução dos registros em desconformidades. Em 2021 verificou-se um registro no ponto BP070 (São Joaquim de Bicas - período chuvoso), enquanto no período seco de 2022 ocorreu uma violação no ponto a montante (BP036 – Brumadinho).

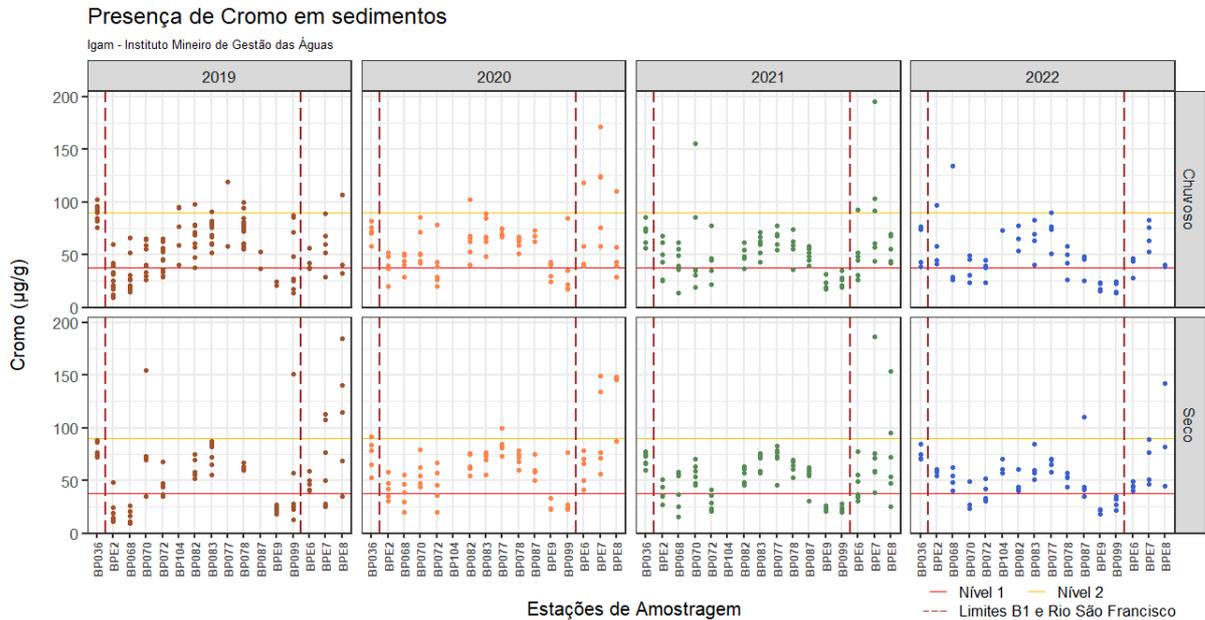
Por fim, vale destacar que nos anos de 2020, 2021 e 2022 observou-se valores superiores de arsênio nos sedimentos acima do Nível 1 no reservatório de Três Marias (BPE8), período chuvoso e seco. Esse fato tem relação com agentes externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes presentes na bacia que drenam para o reservatório.

Durante o monitoramento especial não foram registrados resultados de arsênio total em sedimentos acima do Nível 2 na bacia do rio Paraopeba e no corpo do reservatório de Três Marias.

Cromo em Sedimentos

Na Figura 36 é apresentado o gráfico para cromo em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda no gráfico, a linha vermelha é referente aos limites orientadores do Nível 1 (37,3 µg/g) e a linha amarela os limites do Nível 2 (90 µg/g) estabelecidos pela CONAMA n°454/2012.

Figura 36 – Resultados de cromo em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

É possível verificar nos quatro anos de monitoramento pelo IGAM valores de cromo em desconformidades com a legislação em toda calha do rio Paraopeba. Observa-se que, durante todo o período avaliado, o trecho localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036), que não recebeu impacto do rompimento das barragens da Vale S.A, todos os registros de cromo estiveram acima do Nível 1. Esse comportamento também foi observado na região do médio e baixo curso do rio Paraopeba, nas estações situadas no trecho entre o município de Esmeraldas (BP082) e a montante da UHE Retiro Baixo (BP087). Já as estações de amostragem localizadas próximas da foz do ribeirão Ferro-Carvão (BPE2, BP068, BP070 e BP072) apresentaram registros mais baixos, inclusive as duas estações mais próximas à área do desastre (BPE2 e BP068). Desta forma, boa parte dos seus registros ficaram abaixo do Nível 1, principalmente no ano de 2019. Esses resultados indicam que a presença de cromo nos sedimentos do rio Paraopeba está associada a fontes antrópicas existentes na bacia, tais como atividades de siderurgia desenvolvidas especialmente nas regiões a montante do ribeirão Ferro-Carvão, em municípios tais como: Jeceaba, Congonhas e Ouro Branco.

Registros pontuais de cromo acima do Nível 2 foram verificados nos anos de 2019 a 2022, desde montante (BP036) a jusante de UHE Retiro Baixo (BP099), e valores bem mais altos no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8). Nas medições realizadas dentro da represa de Três Marias foram encontrados teores anômalos de cromo (acima de 200 µg/g), chegando a

registrar o valor de 1.074 µg/g no mês de abril de 2019 (Tabela 16). Isso sugere que as alterações de cromo têm relação com algum fator externo ao material proveniente da Barragem B1 da Vale S.A, podendo ter origem de outras fontes presentes nas bacias que drenam para a represa de Três Marias.

Segundo o levantamento de dados do Atlas Geoquímico da Bacia do Rio São Francisco da CPRM (Viglio, 2018), valores de cromo nos sedimentos no entorno do reservatório de Três Marias foram registrados entre 12 e 1.046 µg/g, no ano de 2009.

Tabela 16 – Valores obtidos para o cromo que ultrapassaram o nível 2 (90 µg/g) no período de 27/01/2019 a 07/10/2022

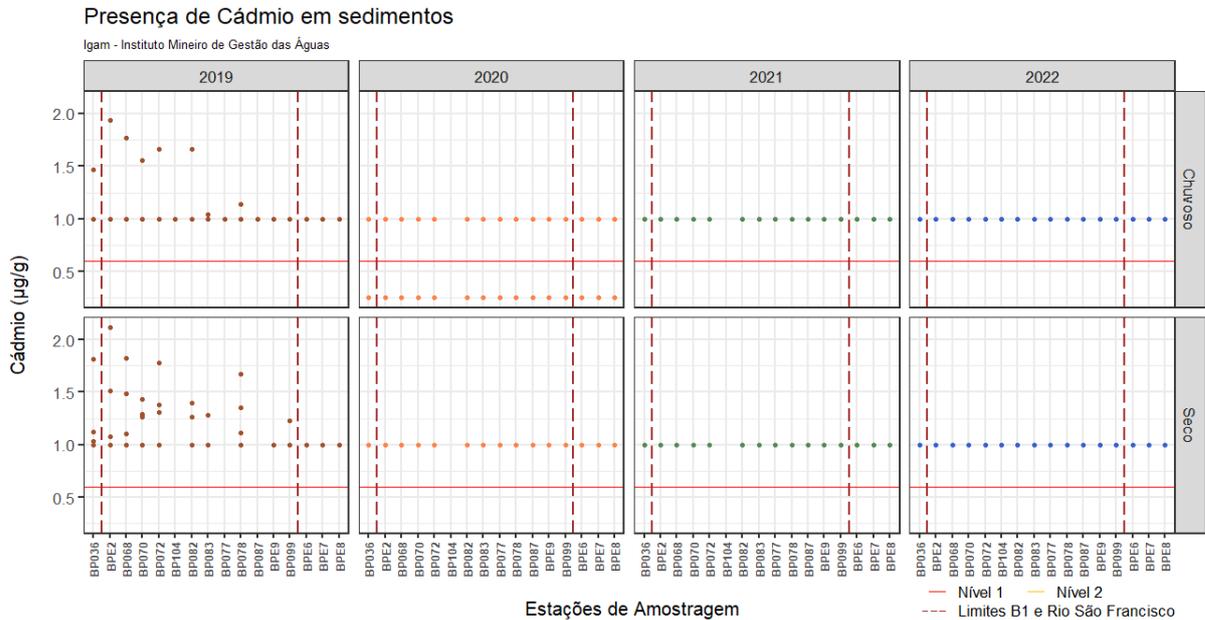
Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BPE7	02/03/2019	Cromo	µg/g	288,10	Chuvoso
BPE8	02/03/2019	Cromo	µg/g	220,75	Chuvoso
BPE6	07/03/2019	Cromo	µg/g	347,37	Chuvoso
BPE6	14/03/2019	Cromo	µg/g	379,08	Chuvoso
BPE8	11/04/2019	Cromo	µg/g	1.074,22	Seco
BPE8	20/11/2019	Cromo	µg/g	226,60	Chuvoso
BPE8	12/12/2019	Cromo	µg/g	741,16	Chuvoso
BPE8	13/02/2020	Cromo	µg/g	729,03	Chuvoso
BPE8	13/08/2020	Cromo	µg/g	419,93	Seco
BPE8	10/09/2020	Cromo	µg/g	264,51	Seco
BPE7	05/12/2020	Cromo	µg/g	876,24	Chuvoso
BPE8	09/12/2021	Cromo	µg/g	270,81	Chuvoso
BPE8	21/01/2022	Cromo	µg/g	348,22	Chuvoso
BPE8	10/03/2022	Cromo	µg/g	356,42	Chuvoso
BPE8	09/06/2022	Cromo	µg/g	237,13	Seco
BP082	06/10/2022	Cromo	µg/g	250,68	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Cádmio em Sedimentos

Na Figura 37 é apresentado o gráfico para cádmio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda do gráfico, a linha vermelha é referente ao Nível 1 (0,6 µg/g) definido pela Resolução Conama nº 454 de 2012, o Nível 2 é de 3,5 µg/g. Registra-se que não foram identificados valores de cádmio acima do Nível 2 da Resolução CONAMA 454/12.

Figura 37 – Resultados de cádmio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Salienta-se que a maioria dos dados entre os anos de 2019, 2020, 2021 e 2022 apresentaram valores onde não se observa diferenças expressivas de um período para o outro. Contudo, vale destacar que o limite de quantificação² para a análise de cádmio em sedimentos (1 µg/g) é superior ao Nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 (0,6 µg/g).

Os valores acima do limite de quantificação do método analítico, e por consequência acima no Nível 1, foram encontrados em 2019 ao longo de toda a calha do rio Paraopeba, desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036) até a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099), exceto nas estações localizadas em Pará de Minas (BP104), Paraopeba (BP077) e em Curvelo (BP087). Nas estações localizadas no corpo do reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) e na estação localização no ribeirão do Gomes (BPE9) todos os registros foram inferiores ao limite de quantificação do método analítico.

Todos os registros de cádmio a partir do ano de 2020 estiveram inferiores ao limite de quantificação do método analítico.

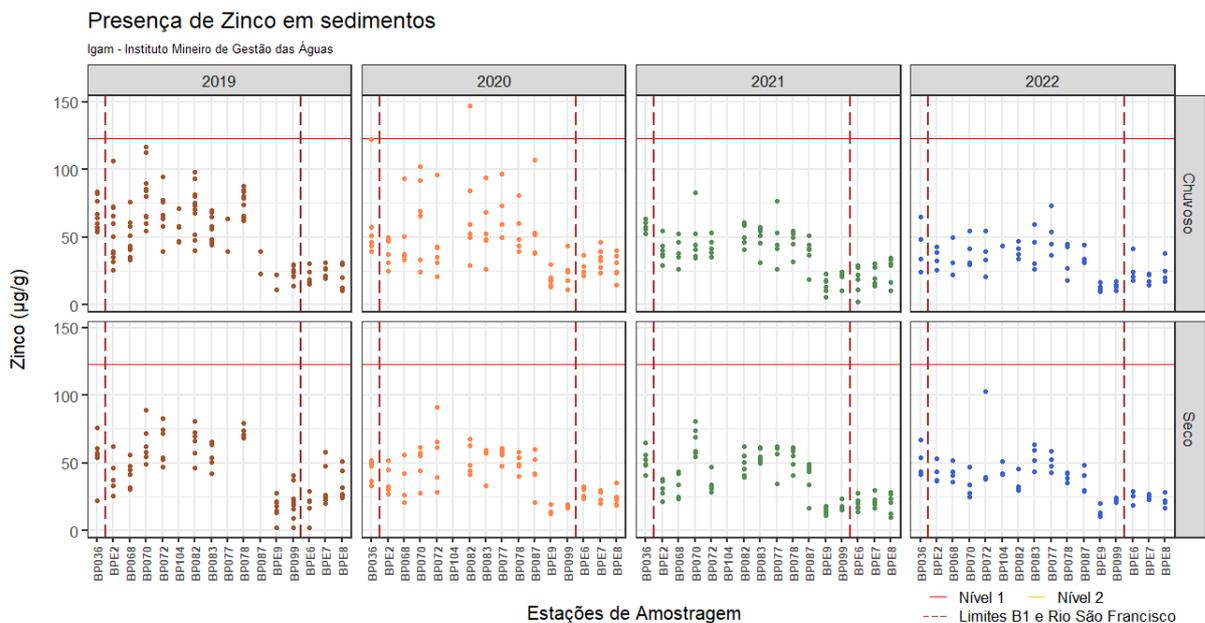
² Limite de quantificação é a menor quantidade ou concentração do parâmetro, que pode ser determinada pelo método de análise empregado.

Possivelmente, as ocorrências de cádmio podem estar associadas ao rompimento das barragens como também a fatores externos, uma vez que foram registrados valores acima do Nível 1 ao longo de toda a calha em 2019, inclusive no trecho fora da área impactada.

Zinco em Sedimentos

Na Figura 38 é apresentado o gráfico para zinco em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Na legenda do gráfico, a linha em vermelho representa o Nível 1 (123 µg/g) e a linha amarela o Nível 2 (315 µg/g) da resolução CONAMA 454/12.

Figura 38 – Resultados de zinco em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Durante os quatro anos de monitoramento especial na bacia do rio Paraopeba foi registrado um único valor acima do Nível 1 na estação de amostragem localizada em Esmeraldas (BP082) no período chuvoso de 2020, com registro de 147 µg/g no mês de janeiro.

Nota-se que durante os anos de 2019, 2020, 2021 e 2022 as estações de amostragem localizadas no rio Paraopeba logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BPE2 e BP068) mostraram que seus máximos estiveram inferiores aos obtidos na estação localizada a montante

(BP036) da área afetada pelos rejeitos, a exceção do BPE2 (Mário Campos) no período chuvoso de 2019. Dessa forma, o padrão no comportamento dos resultados indica relação indireta com o rompimento das barragens da Vale S.A, uma vez que, há um aumento desse metal apenas para algumas estações adjacentes.

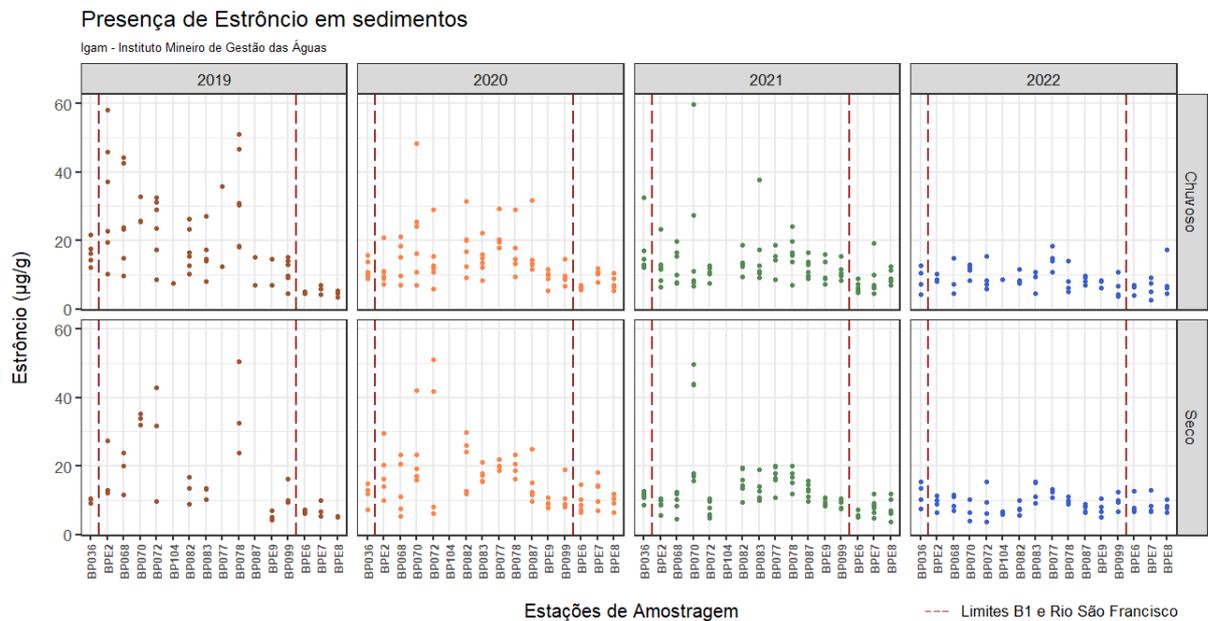
Observa-se que nas estações localizadas a jusante de Retiro Baixo (BP099) e no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), os valores para zinco no período entre 2019 e 2022 foram inferiores aos reportados a montante (BP036) e não sofreram alteração significativa entre os anos.

Estrôncio em sedimento

Na Figura 39 é apresentado o gráfico de estrôncio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Esse metal não possui limites de acordo com a Resolução CONAMA 454/12.

De maneira geral, observa-se que os valores de estrôncio seguiram o padrão apresentado pelo manganês e ferro, com elevação dos teores especialmente nos primeiros 60 km após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BPE2, BP070 e BP072). Já nas estações de amostragem localizadas a jusante de Retiro Baixo (BP099) e no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) os valores foram próximos ou inferiores aos obtidos no trecho a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036), que não sofreu impactos do rejeito provenientes das barragens da Vale S.A, a exceção registrada em 2020 no ponto BPE7 (Tabela 17).

Figura 39 – Resultados de estrôncio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Tabela 17 – Valores extremos obtidos para o estrôncio no período de 27/01/2019 a 07/10/2022

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BP070	28/01/2019	Estrôncio	µg/g	63,57	Chuvoso
BP070	04/02/2019	Estrôncio	µg/g	90,26	Chuvoso
BP070	11/02/2019	Estrôncio	µg/g	66,35	Chuvoso
BP072	10/08/2020	Estrôncio	µg/g	67,25	Seco
BPE7	05/12/2020	Estrôncio	µg/g	141,73	Chuvoso
BP077	09/02/2021	Estrôncio	µg/g	151,54	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Observa-se que o trecho localizado nos primeiros 60 km logo após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão apresentou os maiores valores no ano de 2019. Já nos anos de 2020 e 2021 observa-se uma leve redução dos valores ao longo da calha do rio Paraopeba em comparação com o ano de 2019. Em 2022 os valores apresentaram-se mais baixos em relação aos anos anteriores, tanto no período chuvoso quanto na estação seca, e se aproximam consideravelmente dos resultados da estação de montante (BP036).

Registra-se que a elevação dos valores de estrôncio nos sedimentos pode estar relacionada com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, pois apresenta-se mais evidente a partir da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, sobretudo no ano do rompimento (2019).

Destaca-se que nas estações localizadas a jusante de Retiro Baixo (BP099, BPE6, BPE7 e BPE8), os valores para estrôncio, nos anos de 2019 a 2022, foram inferiores aos obtidos no

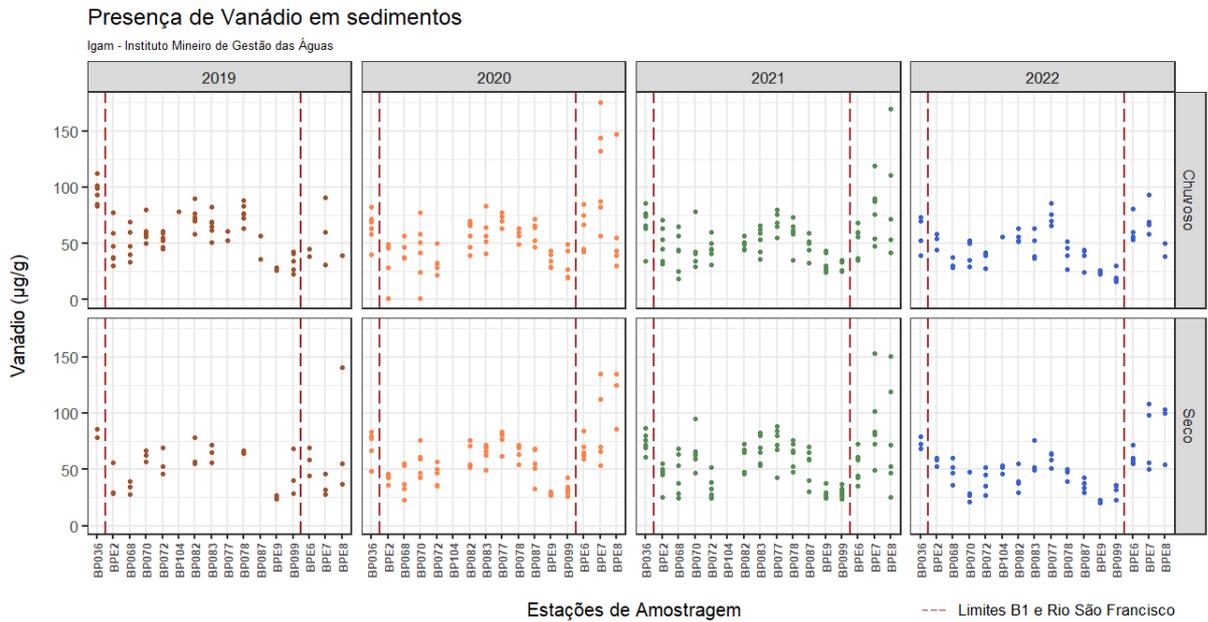
trecho localizado a montante da foz do ribeirão Ferro-Carvão e não sofreram alteração significativa entre os anos. Os resultados da avaliação composicional de óxidos nos sedimentos apresentados no Capítulo 2, do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba da Vale S.A, também apontaram que os óxidos de estrôncio se destacaram proporcionalmente no trecho de maior impacto, entre a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão e a termoeletrica de Igarapé, corroborando com os resultados obtidos no monitoramento especial do Igam.

Titânio e Vanádio em sedimentos

Nos gráficos das Figuras 40 e 41 são apresentados os resultados do vanádio e titânio, respectivamente, em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 07/10/2022. Salienta-se que a legislação CONAMA 454/12 não preconiza limites de referência para o Nível 1 e Nível 2 para esses metais.

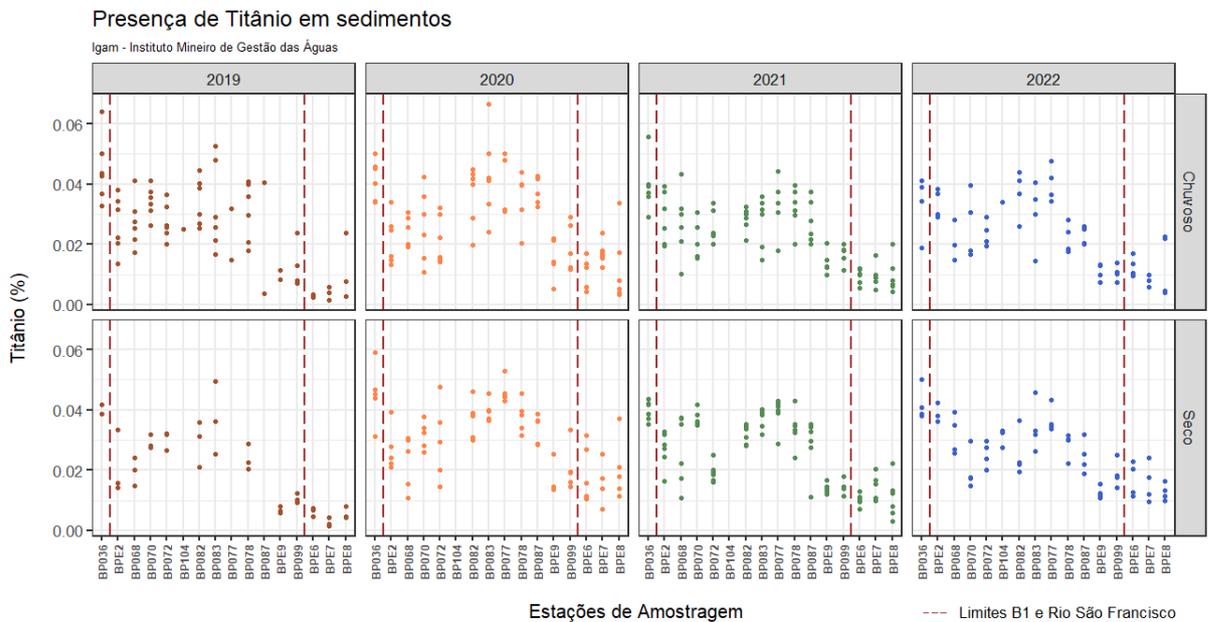
Os resultados de vanádio e titânio apresentaram um comportamento bastante similar. Ambos os parâmetros apresentaram redução dos teores a partir do trecho localizado a jusante da confluência do ribeirão Ferro-Carvão (BPE2 - Brumadinho) até a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099 - Felixlândia), em comparação com a área não impactada (BP036 - Brumadinho), período chuvoso e seco.

Figura 40 – Resultados de vanádio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Figura 41 – Resultados de titânio em sedimentos de fundo, no período de 27/01/2019 a 07/10/2022



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Nas estações de monitoramento do reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), os resultados de vanádio foram mais proeminentes, principalmente, para os anos de 2020, 2021 e

2022, com registros anômalos na estação BPE8 (município de Três Marias) (Tabela 18). Em fevereiro de 2020 o BPE8 registrou 690 $\mu\text{g/g}$, sendo o valor mais atual em 2022 de 562,06 $\mu\text{g/g}$. Como não se observou interferência do material proveniente da Barragem B1 nos trechos montante (BP036) e 5 (reservatório de Três Marias), esses resultados demonstram que essas localidades são influenciadas por fatores externos ao rompimento, podendo ter origem de outras fontes presentes nas bacias que drenam para o rio Paraopeba e para a represa de Três Marias.

Tabela 18 – Valores extremos obtidos para vanádio no período de 27/01/2019 a 07/10/2022

Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
BPE8	20/11/2019	Vanádio	$\mu\text{g/g}$	326,08	Chuvoso
BPE8	12/12/2019	Vanádio	$\mu\text{g/g}$	383,41	Chuvoso
BPE8	13/02/2020	Vanádio	$\mu\text{g/g}$	690,56	Chuvoso
BPE8	13/08/2020	Vanádio	$\mu\text{g/g}$	355,76	Seco
BPE8	10/09/2020	Vanádio	$\mu\text{g/g}$	259,00	Seco
BPE8	21/01/2022	Vanádio	$\mu\text{g/g}$	562,06	Chuvoso
BPE8	10/03/2022	Vanádio	$\mu\text{g/g}$	257,22	Chuvoso
BPE8	09/06/2022	Vanádio	$\mu\text{g/g}$	218,49	Seco

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

De acordo com o levantamento de dados do Atlas Geoquímico da Bacia do Rio São Francisco realizado pela CPRM (2018) foram registradas anomalias em amostras de sedimentos contendo vanádio na cabeceira do Paraopeba e na represa de Três Marias. Os registros apresentaram teores de vanádio até 363 $\mu\text{g/g}$.

Para os resultados de titânio, nas estações monitoradas no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8) registrou-se os menores teores nos quatro anos consecutivos.

Esse comportamento do titânio e do vanádio também foi registrado no Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimentos Fechamento de Ciclo da Vale S.A (25/01/2019 a 30/06/2019), uma vez que indicou que os resultados desses parâmetros, também avaliados nos sedimentos, não apresentaram relação com o rompimento das barragens.

No Apêndice B pode ser consultado o mapa síntese que mostra o total de parâmetros que estiveram acima dos Níveis 1 e 2 estabelecidos na CONAMA n°454/2012, e os valores orientadores de Vicq (2015) (janeiro de 2019 a outubro de 2022), sendo utilizado cores mais escuras para maiores números de violações por estação. Nas tabelas ilustradas do mapa estão representados os números de vezes que cada parâmetro excedeu o Nível 1 e Nível 2 definidos

na CONAMA n°454/2012, e os valores orientadores de Vicq (2015) em cada ponto de monitoramento.

9 CONCLUSÕES

O rompimento da Barragem B1 de rejeito operada pela mineradora Vale S.A, no dia 25/01/19, causou impactos na qualidade hídrica do rio Paraopeba em diferentes graus de intensidade. Nos 60 dias subsequentes ao rompimento (final de janeiro a abril de 2019) aconteceram as maiores alterações sobre a qualidade das águas do ribeirão Ferro-Carvão e rio Paraopeba, especialmente no trecho mais próximo ao rompimento da barragem, aproximadamente 40 km de extensão (distância medida desde a barragem que rompeu), localizado entre os municípios de Brumadinho e São Joaquim de Bicas. Os resultados do monitoramento do Igam mostraram impactos significativos nesse trecho decorrente da presença de rejeito, inviabilizando o uso da água para as mais diversas finalidades, pois registraram-se teores elevados e acima da série histórica para turbidez, ferro e manganês, além da presença de metais como chumbo e mercúrio.

Nas semanas subsequentes ao rompimento foi detectada oscilações na qualidade das águas do rio Paraopeba, que se estendeu ao longo da calha, sendo observadas até o município de Pompéu (a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo).

De forma geral, após quatro anos de monitoramento, observou-se que o ano de 2019 foi o de maior impacto sobre a qualidade das águas do rio Paraopeba, quando foram sentidos os efeitos imediatos da passagem dos rejeitos. Uma redução gradual dos valores dos parâmetros associados ao desastre foi observada ao longo desses anos. Contudo, nos períodos chuvosos de cada ano monitorado observa-se elevações nos valores de turbidez e nas concentrações dos principais parâmetros analisados quando comparados ao período de estiagem, mas com valores inferiores àqueles observados em 2019.

Durante os períodos chuvosos têm-se a combinação de fatores sazonais (chuva e vazão), sobretudo nas áreas próximas ao rompimento, uma vez que o aumento do escoamento superficial e da vazão do rio acarretam a remobilização do material depositado no leito e novos aportes de rejeitos no rio Paraopeba. A piora da qualidade da água do rio Paraopeba no trecho mais impactado (entre Brumadinho e Esmeraldas), também está relacionada às atividades de dragagem realizadas pela Vale S.A no rio Paraopeba nas imediações da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. Salienta-se que no período seco de 2022 os valores de turbidez estiveram

ligeiramente elevados em comparação à 2021, em parte devido às ações de dragagem no rio Paraopeba, que objetivaram melhorias e adaptações do processo de operação da draga.

Ao avaliar os resultados dos parâmetros físico-químicos observou-se que a turbidez, sólidos em suspensão totais, ferro e manganês total foram aqueles que apresentaram relação direta com o material que extravasou das barragens da Vale S.A. Os valores mais elevados desses parâmetros foram observados no trecho localizado nos primeiros 40 km a partir da Barragem B1, especialmente no período chuvoso de 2019. Ao longo dos anos de 2020 a 2022 houve uma atenuação nos valores de turbidez, sólidos em suspensão totais, ferro e manganês total. Todavia, os valores desses parâmetros ainda se encontram acima do esperado para a série histórica do Igam e extrapolam o limite de classe, com os maiores valores registrados nos períodos chuvosos. Com relação ao limite de classe, os valores históricos desses parâmetros já se apresentavam acima do estabelecido para rios de classe 2. Os valores desses parâmetros nos períodos de estiagem já se aproximam da normalidade histórica.

Com relação as ocorrências de chumbo total observaram-se que os maiores valores foram registrados em 2019, logo após o desastre. Apesar de não fazer parte da composição do rejeito, a presença de chumbo na água está associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito, e propiciaram o aumento das concentrações de alguns contaminantes no período pós-desastre. Essa elevação, especialmente no momento logo após o desastre, foi observada para os metais: mercúrio total, níquel total, zinco total e cádmio total. Destaca-se que os valores de chumbo vêm reduzindo paulatinamente, porém esse parâmetro ainda é recorrente nos períodos chuvosos, nos anos seguintes ao rompimento, e apresenta resultados em desconformidade com a legislação no trecho após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BPE2) até a montante da UHE Retiro Baixo (BP087). Para os demais metais citados: mercúrio total, níquel total, zinco total e cádmio total não foi registrada nenhuma extrapolação do limite de classe no ano de 2022 na calha do rio Paraopeba.

No que se refere as ocorrências de arsênio total, cobre dissolvido e zinco total no rio Paraopeba observou-se que estas não têm relação direta com o rejeito proveniente da Barragem B1, uma vez que o trecho de Brumadinho a São Joaquim de Bicas, considerado como mais impactado, não sofreu variações significativas nos valores desses elementos que pudessem estar relacionados diretamente com o rejeito proveniente do rompimento das barragens B1, B-IV e

B-IVA. Isso se deve ao fato de que os mesmos não fazem parte da composição do rejeito. Além disso os valores máximos da série histórica do Igam para cada ponto indicam que, mesmo antes do rompimento da barragem B1, esses elementos já haviam sido detectados em concentrações acima do limite estabelecido para a classe de enquadramento, inclusive na estação de amostragem localizada antes da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. Assim, sua presença na coluna d'água pode estar relacionada com outras atividades antrópicas. Destaca-se que em 2022 não foram registradas desconformidades com o limite de classe para o arsênio, zinco e cobre. As últimas violações para o cobre dissolvido foram registradas em fevereiro de 2021 nas estações localizadas em Brumadinho (BPE2), Mário Campos (BP068), Betim (BP072), Esmeraldas (BP082), Paraopeba (BP077) e Pompéu (BP078).

Observou-se que a turbidez e os metais ferro e manganês nas águas superficiais destacam-se como os principais indicativos do impacto decorrente da chegada do rejeito, no entanto, o alumínio dissolvidos apresentou um padrão de comportamento distinto quando comparado a esses traçadores, pois seus resultados demonstraram valores próximos da normalidade histórica justamente nos primeiros 40 km a jusante da barragem, aumentando muito além dessa normalidade em todos os outros pontos ao longo da calha do rio Paraopeba, inclusive no trecho de montante (BP036 – anterior ao desastre). Dessa forma, não se pode afirmar que os registros estão associados exclusivamente ao rompimento das barragens. Ressalta-se que no ano de 2022, ainda se observa registros acima do limite legal para alumínio dissolvido.

No que se refere aos resultados da qualidade dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba e represa de Três Marias, conclui-se que após 4 anos do desastre ambiental da mineradora Vale S.A, os valores dos metais analisados em sedimento de fundo apresentaram redução das concentrações em relação ao ano do rompimento das barragens (2019).

De maneira geral, pela análise dos dados foi observada alteração nas concentrações de metais no sedimento de fundo do rio Paraopeba no trecho desde a jusante da confluência do ribeirão Ferro-Carvão até a montante da represa de Retiro Baixo. Esse trecho apresentou ainda em 2022 alteração dos valores de qualidade dos sedimentos relativa ao impacto do rejeito proveniente dos rompimentos das barragens. Em contrapartida, nos trechos localizados a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) e no reservatório de Três Marias não foi observada a presença de material com características do rejeito nos sedimentos de fundo.

Os resultados de ferro e manganês em sedimentos de fundo do rio Paraopeba apresentaram comportamento bastante semelhantes, uma vez que, são os metais de maior abundância na composição do rejeito. Assim, já se verifica atenuação das concentrações desses metais em relação ao ano de 2019, porém alguns resultados (BPE2/Brumadinho, BP068/Mário Campos e BP083/Paraopeba) de manganês ainda estiveram acima do valor de referência de Vicq (2015) no ano de 2022.

O alumínio apresentou o mesmo padrão de comportamento discrepante na água superficial como também em sedimentos de fundo, onde se observa redução de seus valores no trecho logo após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, seguido de um aumento gradual para os demais trechos. Os resultados desse metal em 2022 ainda se apresentam acima dos valores orientadores (VICQ, 2015), inclusive nos pontos de monitoramento em Três Marias. Esses registros indicam, que o alumínio não está associado de forma direta com a presença do rejeito ao longo da calha do rio Paraopeba.

Em relação aos metais nos sedimentos em que a Resolução Conama nº 454 de 2012 apresenta limites para águas doce de Nível 1 e 2, destaca-se que o mercúrio, cádmio e zinco, não apresentaram valores superiores ao Nível 1 nos registros de 2022. Já os resultados de arsênio apresentaram valores em desconformidade nos pontos de monitoramento em Brumadinho (BP036) e no reservatório de Três Marias (BPE8).

Os valores de chumbo, cobre e níquel superaram o Nível 1 na maioria dos pontos monitorados na calha do rio Paraopeba, inclusive no trecho que não sofreu impacto dos rejeitos provenientes das barragens da Vale S.A, logo após o rompimento. Já em 2022 foram verificados poucos registros para esses elementos, a exceção do níquel onde os resultados extrapolaram também o Nível 2. Ressalta-se, que os valores dos metais chumbo, cobre e níquel, no trecho que sofreu o maior impactado pelo rompimento das barragens (primeiros 60 km), no ano de 2022, apresentaram em sua maioria valores inferiores aos obtidos na estação de amostragem localizada a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, trecho que não sofreu impacto dos rejeitos das barragens que romperam.

Há que se destacar que os resultados dos metais mercúrio, cobre e estrôncio demonstraram que a presença dos seus teores nos sedimentos pode estar relacionada com o rompimento das

barragens B1, B-IV e B-IVA, uma vez que apresentaram elevação mais evidente no trecho localizado logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão. Para os metais chumbo, níquel, zinco e cádmio, os resultados indicaram que sua presença pode estar associada não somente com o rompimento das barragens, mas também à outras fontes antrópicas presentes nas bacias dos rios Paraopeba e São Francisco. Apesar da elevação dos teores terem ocorrido, principalmente, a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, os trechos não impactados pelo rejeito proveniente da Barragem B1, tais como a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão e no corpo do reservatório de Três Marias, também apresentaram valores em desconformidade, principalmente, com o Nível 1 da Resolução CONAMA 454/12. Já os resultados dos parâmetros arsênio, cromo, titânio e vanádio não demonstraram relação de seus teores com a presença dos rejeitos nos sedimentos de fundo, ou seja, pode-se associar a presença desses parâmetros nos sedimentos ao material presente no leito do rio Paraopeba e na represa de Três Marias, antes do rompimento das barragens da Vale S.A.

Ressalta-se que diversas ações estão sendo tomadas no intuito de atenuar os impactos ambientais ocasionados pelo rompimento das barragens da Vale, dentre elas estão:

- As intervenções promovidas de forma emergencial no ribeirão Ferro-Carvão que visam cessar o carreamento de rejeitos e sedimentos ao rio Paraopeba (barreiras de estabilização das calhas -BECs, barreiras hidráulicas -BH-0 e BH-1, Dique 2 e as Cortinas Metálicas em Estaca Prancha 1);
- A ETAF 1 é responsável por tratar (reduzir a turbidez) as águas do ribeirão Ferro-Carvão, de forma que seu efluente é direcionado ao ribeirão Casa Branca, que por sua vez deságua no Rio Paraopeba. Durante o ano de 2022, verificou-se a eficiência desta estrutura, sendo que o efluente de saída da estação apresentou turbidez média de 2,6 NTU;
- O Marco Zero é considerado um piloto para a recuperação da bacia do ribeirão Ferro-Carvão, de forma que as ações empreendidas nesta área são norteadoras para as demais áreas da bacia. Atualmente, está em fase de reavaliação o novo Projeto de Recuperação do Marco Zero.
- Remoção total dos rejeitos intra e extra calha que foram carreados para a bacia do ribeirão Ferro-Carvão. Essa premissa vem sendo cumprida à medida em que avançam as buscas pelo Corpo de Bombeiros, liberando as áreas para a remoção total do rejeito;

- Dragagem rio Paraopeba no trecho imediatamente após a confluência do ribeirão Ferro-Carvão (2 km). No período de 15/08/2019 a 5/12/2022, as operações de dragagem removeram um total de 128.236 m³ de rejeito do rio Paraopeba.

O Igam continuará realizando o acompanhamento dos impactos as águas do rio Paraopeba por meio da continuidade do monitoramento sistemático ao longo de todo o rio Paraopeba até o corpo do reservatório de Três Marias, podendo o programa ser revisto de acordo com a necessidade, bem como, todas as ações para remoção dos rejeitos e recuperação da bacia do rio Paraopeba, pela empresa Vale S.A.

O Igam reforça que ainda segue vigente a recomendação de restrição da não utilização da água bruta do rio Paraopeba para qualquer fim, como medida preventiva, no trecho que abrange os municípios de Brumadinho até o limite da UHE de Retiro Baixo em Pompéu (aproximadamente 250 km de distância do rompimento). O uso da água nos trechos que estão antes do município de Brumadinho (antes do trecho afetado pelo rompimento) e depois da UHE Retiro Baixo, estão liberados para os mais diversos fins e não existe nenhuma restrição pelos órgãos públicos.

REFERÊNCIAS

- ABU SHMEIS, Reham M. **Water Chemistry and Microbiology**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier B.V., 2018. v. 81. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/bs.coac.2018.02.001>>.
- ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. **Journal of Chemistry**, v. 2019, n. Cd, 2019. DOI 10.1155/2019/6730305.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington: APHA, 2017.
- BARBIERI, C. B. **Caracterização de crime ambiental de poluição por meio de abordagem multiparamétrica e incorporando incerteza de amostragem**. 2015. 194 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo.
- BAUTISTA, Elizabeth; VERGARA, Paula; SEGOVIA, José. Iron-induced oxidative stress activates AKT and ERK1/2 and decreases Dyrk1B and PRMT1 in neuroblastoma SH-SY5Y cells. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 34, p. 62–69, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2015.11.005>>.
- BERNHOF, R. A. Cadmium toxicity and treatment. **The Scientific World Journal**, v. 2013, 2013. DOI 10.1155/2013/394652.
- BJØRKLUND, Geir *et al.* The toxicology of mercury: Current research and emerging trends. **Environmental Research**, v. 159, n. July, p. 545–554, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2017.08.051>>.
- CAI, L. et al. Essentiality, Toxicology and Chelation Therapy of Zinc and Copper. **Current Medicinal Chemistry**, v. 12, n. 23, p. 2753–2763, 2005. DOI 10.2174/092986705774462950.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.
- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais). Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995. Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba. **Minas Gerais**, Belo Horizonte, 29 dez. 1995.
- CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais); CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (Minas Gerais). Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08, de 21 de novembro de 2022. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Minas Gerais**, Belo Horizonte, 21 novembro 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução CONAMA nº 274, de 29 de novembro de 2000. Define os critérios para a classificação de águas destinadas à recreação de contato primário. As águas doces, salobras e salinas terão sua condição avaliada por parâmetros e indicadores específicos, de modo a assegurar as condições de balneabilidade. **Diário Oficial [da] União**: Seção 1, Brasília, ano 18, p. 70-71, 25 jan. 2001.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 454, de 01 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, ano 216, 8 nov. 2012.

DAS, K. K. *et al.* Primary concept of nickel toxicity - An overview. **Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology**, v. 30, n. 2, p. 141–152, 2019. DOI 10.1515/jbcpp-2017-0171.

ESPARZA, J. L.; GÓMEZ, M.; DOMINGO, J. L. Role of Melatonin in Aluminum-Related Neurodegenerative Disorders: a Review. **Biological Trace Element Research**, v. 188, n. 1, p. 60–67, 2019. DOI 10.1007/s12011-018-1372-4.

GAD, S. C. Acute and chronic systemic chromium toxicity. **Science of the Total Environment**, v. 86, n. 1–2, p. 149–157, 1989. DOI 10.1016/0048-9697(89)90201-5. .
GIDLOW, D. A. Lead toxicity. **Occupational Medicine**, v. 65, n. 5, p. 348–356, 2015. DOI 10.1093/occmed/kqv018.

JUNEJO, S. H. *et al.* Cadmium and Lead Hazardous Impact Assessment of Pond Fish Species. **Biological Trace Element Research**, v. 191, n. 2, p. 502–511, 2019. DOI 10.1007/s12011-018-1628-z.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo hidrometeorológico de acompanhamento do deslocamento da pluma no percurso do rio Paraopeba**. 2019a. Disponível em: http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE_BARRAGEM_B1/informativos_hidrometeorol%C3%B3gicos/20190222_Informativo_Paraopeba_N25.pdf. Acesso em 30 mar 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do rio Paraopeba**. 2019b. http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE_BARRAGEM_B1/informativos_qualidade_agua/Informativo_18_IGAM_COPASA_CPRM_2.pdf. Acesso em 30 mar 2020.

LAMPERT, W.; SOMMER, U. Limnoecology: The ecology of lakes and streams. **Oxford: Oxford University Press**, n. 2, p. 324 pp, 2007.

LUO, H.; CHENG, Q.; PAN, X. Photochemical behaviors of mercury (Hg) species in aquatic systems: A systematic review on reaction process, mechanism, and influencing factor. **Science of the Total Environment**, v. 720, p. 137540, 2020. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.137540.

MICHALKE, B.; FERNSEBNER, K. New insights into manganese toxicity and speciation. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 28, n. 2, p. 106–116, 2014. DOI 10.1016/j.jtemb.2013.08.005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2013.08.005>.

MINAS GERAIS. Decreto nº 41.578, de 08 de março de 2001. Regulamenta a Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, que dispõe sobre Política Estadual de Recursos Hídricos. **Diário Oficial [do] Estado de Minas Gerais**: Diário do Executivo, Belo Horizonte, 9 março. 2001.

PRADO, I. G.; POMPEU, P. S. Vertical and seasonal distribution of fish in Três Marias reservoir. **Lake and Reservoir Management**, v. 30, n. 4, p. 393–404, 2014. DOI 10.1080/10402381.2014.955221.

RATNAIKE, R. N. Acute and chronic arsenic toxicity. **Postgraduate Medical Journal**, v. 79, n. 933, p. 391–396, 2003. DOI 10.1136/pmj.79.933.391.

RODRIGUES, A. S. L. **Caracterização da bacia do rio Gualaxo do Norte, MG, Brasil: avaliação geoquímica ambiental e proposição de valores de background**. 2012. 162 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

ROYER, Amor; SHARMAN, Tariq. **Copper toxicity**. 2020.

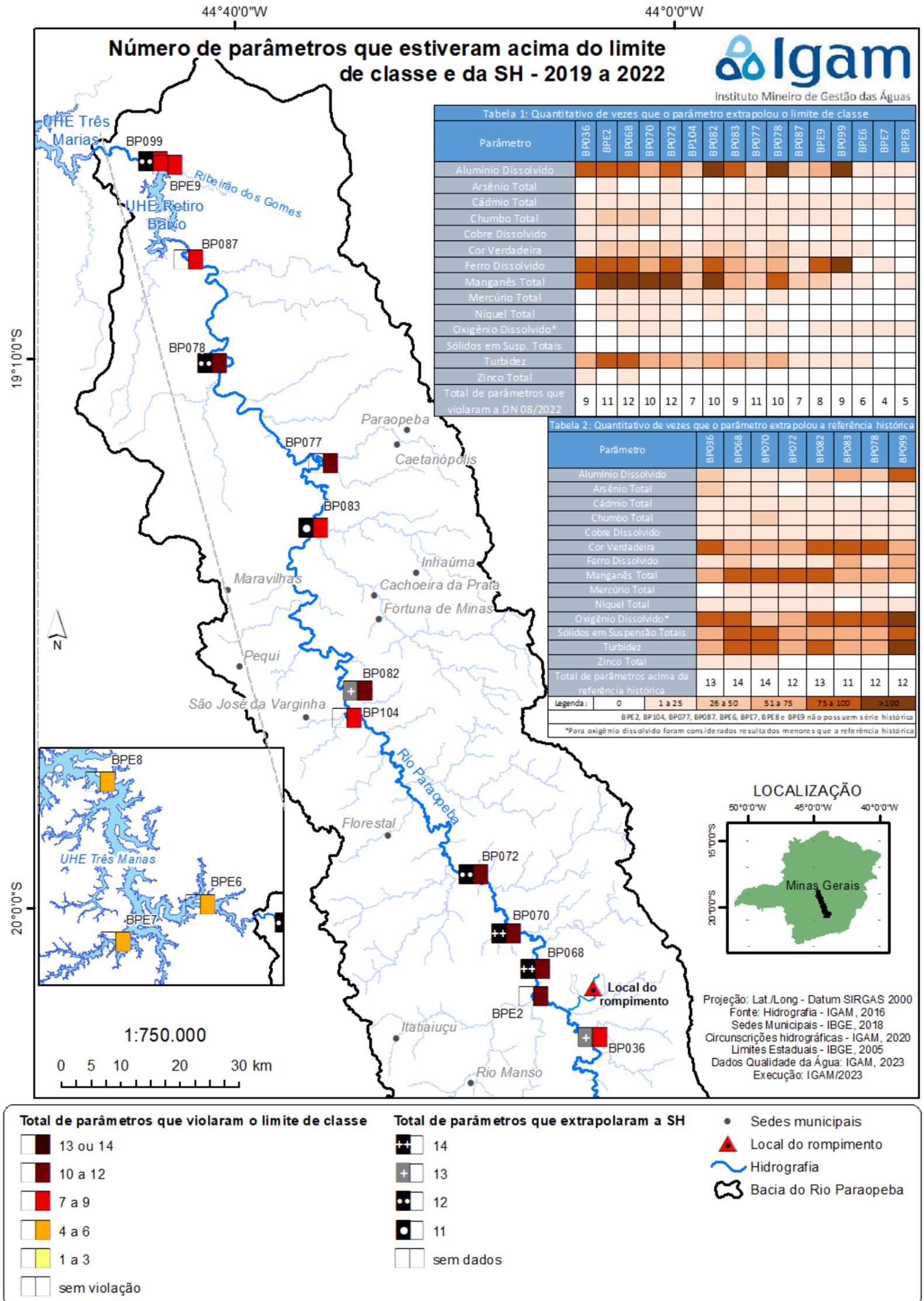
TRINDADE, Wallace Magalhães; HORN, Adolf Heinrich; RIBEIRO, Elizêne Veloso. Concentrações De Metais Pesados Em Sedimentos Do Rio São Francisco Entre Três Marias E Pirapora-Mg: Geoquímica E Classificação De Risco Ambiental. **Geonomos**, v. 20, n. 1, p. 64–75, 2012.

VICQ, Raphael Ferreira da Costa. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero**. 2015. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015, 185p.

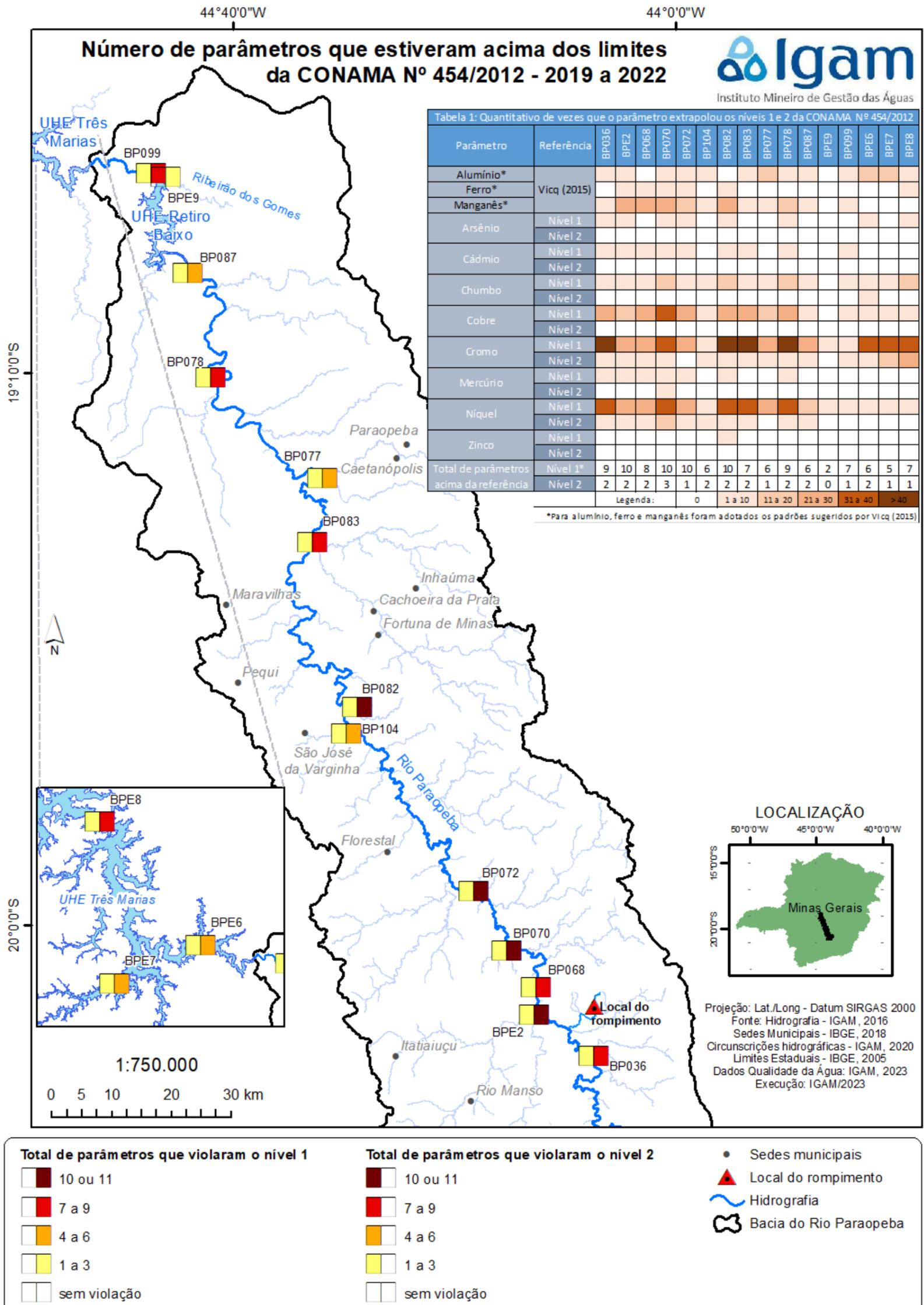
VIGLIO, E. P. **Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco: Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

ZHANG, S. *et al.* Dynamic sulfur–iron cycle promoted phosphorus mobilization in sediments driven by the algae decomposition. **Ecotoxicology**, 2020. DOI 10.1007/s10646-020-02316-y.

Mapa síntese do número de parâmetros que estiveram acima da Série Histórica (2010 a 2018) do Igam e acima do limite de classe no monitoramento especial do rio Paraopeba, no período de janeiro de 2019 a dezembro 2022.



Mapa síntese do número de parâmetros que estiveram acima dos níveis 1 e 2 da legislação CONAMA 454/2012, e valores orientadores de Vicq (2015), no monitoramento especial do rio Paraopeba em sedimentos, no período de janeiro de 2019 a outubro de 2022.





**REPARAÇÃO
BRUMADINHO**



**MINAS
GERAIS**

GOVERNO
DIFERENTE.
ESTADO
EFICIENTE.