

Avaliação da Qualidade das Águas e Sedimentos do Rio Paraopeba - 5 anos

Foto: arquivo Igam

Caderno Especial . 2024

Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Paraopeba após 5 anos do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA Brumadinho/MG

Avaliação da Qualidade das Águas e Sedimentos do Rio Paraopeba

Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Paraopeba após 5 anos do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA

Belo Horizonte
2024

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 5 anos
do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale S.A
– Brumadinho/MG

Belo Horizonte

2024

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

Diretor Geral

Marcelo da Fonseca

Diretora de Operações e Eventos Críticos

Wanderlene Ferreira Nacif

Gerente de Monitoramento de Qualidade das Águas

Bernardo do Vale Beirão

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 5 anos do
rompimento da barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA –
Brumadinho/MG / Instituto Mineiro de Gestão das Águas. --- Belo Horizonte:
Igam, 2024.
153 p.: il.

Caderno especial.

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

CDU: 556:550.4

© 2024 Instituto Mineiro de Gestão das Águas - Igam

Equipe Técnica - Gerência de Monitoramento de Qualidade das Águas

Átalo Pinto Coelho Durso, Engenheiro Ambiental

Cláudia Alves Ferreira, Química

Hélio Correia da Silva Jhuniór, Engenheiro Civil

Katiane Cristina de Brito Almeida, Bióloga

Marco Antônio Ribeiro Silva, graduando em Ciências Biológicas

Mariana Elissa Vieira de Souza, Geógrafa

Matheus Duarte Santos, Geógrafo

Maurílio César de Faria, Técnico em Química

Natália Carolina Neto Pereira, Engenheira Química

Rafael Luís Silva Dias, Engenheiro Ambiental

Regina Pimenta Assunção, Bióloga

Sara Alves Mota, Bióloga

Sérgio Pimenta Costa, Biólogo

Vanessa Kelly Saraiva, Química

Yasmin Andrade Lima, graduanda em Engenharia Ambiental

SIMGE - Sistema de Meteorologia e Recursos Hídricos de Minas Gerais

Paula Pereira de Souza, Meteorologista

Normalização bibliográfica

Foto Capa: Igam

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	2
2. DESASTRE AMBIENTAL DA VALE NO MUNICÍPIO DE BRUMADINHO – AÇÕES 2019 a 2024.....	4
3. PRINCIPAIS USOS DA ÁGUA NA CALHA DO RIO PARAOPEBA.....	7
4. AVALIAÇÃO DA ANOMALIA DE PRECIPITAÇÃO TRIMESTRAL NO ANO DE 2023 NA BACIA DO PARAOPEBA.....	8
5. PROGRAMA DE MONITORAMENTO EMERGENCIAL DO RIO PARAOPEBA – ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS.....	15
5.1 Plano de amostragem – Metodologia.....	15
5.2 Rede de monitoramento.....	15
5.3 Frequência de amostragem.....	20
5.4 Parâmetros monitorados e padrões de qualidade.....	23
6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO DE 2019 A JUNHO DE 2024, NA CALHA DO RIO PARAOPEBA.....	25
7. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE SEDIMENTOS DE JANEIRO DE 2019 A JUNHO DE 2024.....	83
8. INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES.....	135
9. CONCLUSÕES.....	139
REFERÊNCIAS.....	144

APRESENTAÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba, com seus 48 municípios abrangidos e 35 sediados em seu interior, representa um dos mais significativos sistemas hídricos de Minas Gerais. A bacia possui três reservatórios que abastecem a região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) e um ponto de captação no próprio rio, implantado em 2015 para mitigar a crise hídrica da região. Além de abrigar o Quadrilátero Ferrífero, que é uma região importante para a produção mineral e de relevância econômica, a bacia possui uma rica biodiversidade e um ecossistema único no Estado, os campos ferruginosos, local de ocorrência de espécies endêmicas de anfíbios e plantas e riqueza de fauna em geral.

No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem B-I do complexo da Mina Córrego do Feijão, da empresa Vale S.A., se rompeu em Brumadinho, afetando também as barragens B-IV e B-IVA. O rompimento espalhou cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos minerais, atingindo o ribeirão Ferro-Carvão até o rio Paraopeba. Desde então, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), 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. O programa de monitoramento tem por objetivo acompanhar os impactos do desastre e informar a situação da qualidade das águas dos corpos de água atingidos pelo rompimento da barragem à sociedade

Cinco anos após o desastre em Brumadinho, esse caderno apresenta os dados das águas superficiais e sedimentos coletados pelo Igam no período entre 2019 e 2024, bem como o progresso das medidas 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 tange a qualidade da água e usos múltiplos do rio Paraopeba.

Boa leitura!

Marcelo da Fonseca

Diretor Geral Igam

1. INTRODUÇÃO

A bacia do rio Paraopeba, sub bacia do rio São Francisco, possui uma extensão de 12.054,25 km², o que equivale a aproximadamente 2,5% da área total do Estado de Minas Gerais (MG). A bacia abrange 48 municípios e possui grande relevância socioeconômica, pois contribui para o abastecimento de água da Região Metropolitana de Belo Horizonte e concentra uma área de significativa produção mineral.

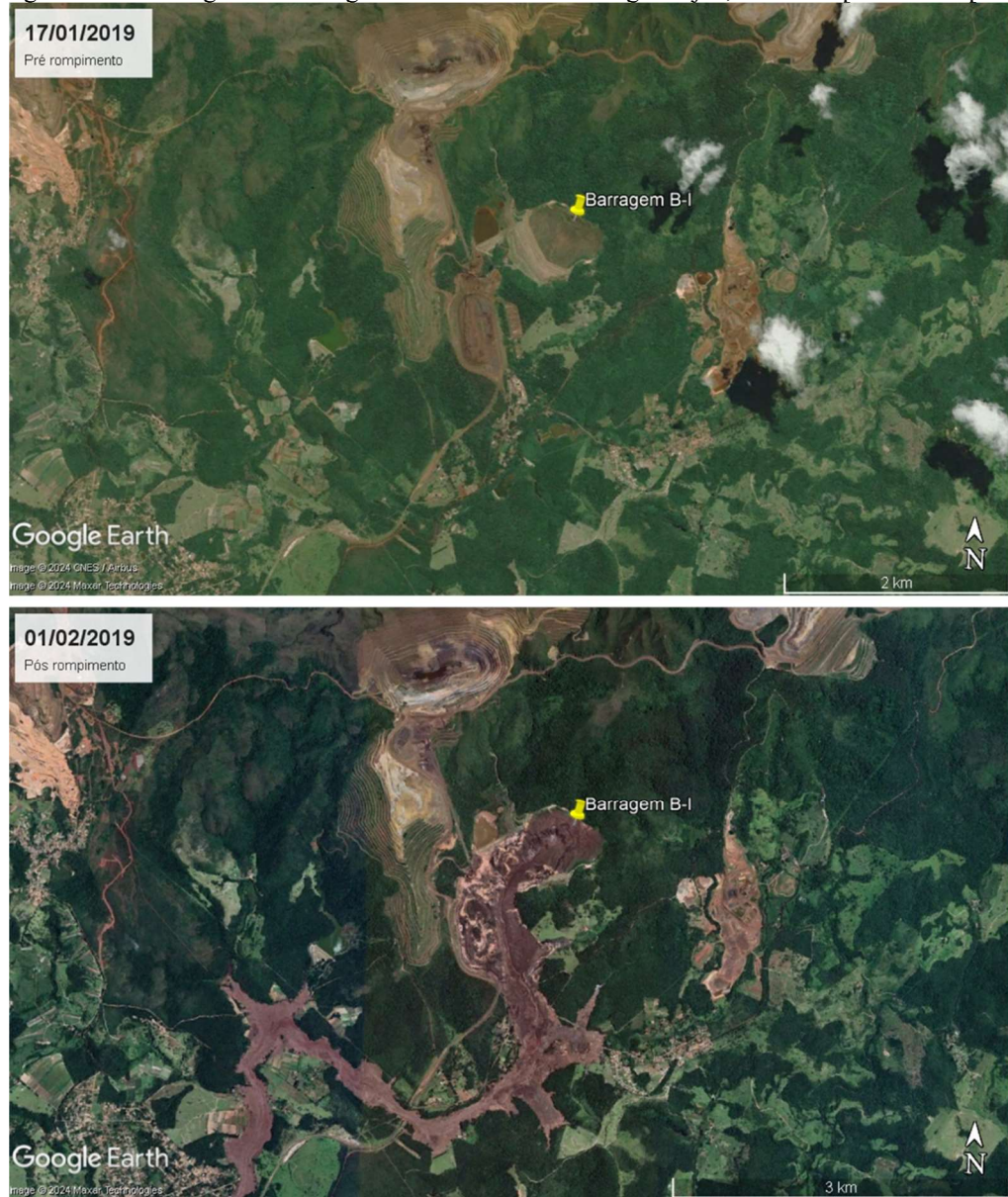
Em 25 de janeiro de 2019, o rompimento das barragens B-I e, na sequência, B-IV e B-IVA do complexo da Mina Córrego do Feijão, situado no município de Brumadinho, da empresa Vale S.A, provocou a liberação de cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de produção mineral (Figura 1) atingindo o ribeirão Ferro-Carvão, o rio Paraopeba e uma parte se espalhou até o remanso da Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo. O material depositado no Paraopeba é constantemente arrastado pela correnteza, especialmente durante o período de chuvas intensas. O rompimento da barragem de 27 hectares e 87 metros de altura teve consequências imensuráveis, tanto do ponto de vista ambiental quanto social, configurando-se como um dos piores acidentes de trabalho da história brasileira.

De acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2023, os ecossistemas de água doce estão entre os mais ameaçados do mundo. A combinação de diversos fatores humanos vem provocando uma rápida deterioração na grande maioria dos indicadores de ecossistemas e biodiversidade. Sendo assim, o monitoramento da qualidade da água é fundamental para embasar a tomada de decisão dos órgãos competentes e fundamentar as ações de controle e qualidade ambiental da bacia do Paraopeba, visando à manutenção e melhoria das condições ambientais.

Nesse contexto, o Igam vem orientando ações que monitoram corpos hídricos e têm 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 - Imagens aéreas da região da Barragem B-I da Mina do Córrego Feijão, antes e depois do rompimento



Fonte: Google Earth (2019)

2. DESASTRE AMBIENTAL DA VALE NO MUNICÍPIO DE BRUMADINHO – AÇÕES 2019 a 2024

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 (B-I, 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, os 51 pontos na bacia do rio Paraopeba e trimestralmente outros 3 pontos 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, destaca-se o Boletim Informativo do Cidadão, que contém informações mensais sobre a qualidade da água do rio Paraopeba. 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.

Durante o ano de 2023 foram realizadas 38 fiscalizações pelas equipes técnicas do Sisema na região do rompimento da Barragem B-I, no município de Brumadinho. Os analistas ambientais monitoraram as obras de reparação nas áreas do Remanso 1, do Marco Zero, dos DTRs, da dragagem do rio Paraopeba, entre outras. Destaca-se ainda a visita técnica do Comitê de Bacia Hidrográfica do rio Paraopeba nas obras de recuperação ambiental na bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

Além disso, em janeiro de 2024, quando se completaram cinco anos do rompimento das barragens da Vale S.A., em Brumadinho, o Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Sisema), lançou o [Caderno 5 anos](#) (Figura 2) das ações de recuperação da bacia do Rio Paraopeba. O documento lista as principais ações executadas no ano de 2023, dentre as quais, relacionadas à operação de dragagem do rio, aos Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e Risco Ecológico, bem como as atividades de acompanhamento de coletas para o monitoramento da água e sedimentos, realizadas pelo Igam.

¹ <http://repositorioIgam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/3166>

Figura 2 - Caderno de 5 anos das ações de recuperação da bacia do Rio Paraopeba



Rio Paraopeba - 5 anos

Ações de recuperação desempenhadas em 2023



Fonte: https://liferay.meioambiente.mg.gov.br/documents/117662/6984690/5anos_compressed_1/17f5ab93-08dd-fe8d-c0b4-c093ba50fcef?version=1.0&t=1723497956106

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 PARAOPEBA

A Deliberação Normativa Copam-MG nº 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 nº 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 nº 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 nº 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 2023 NA BACIA DO PARAÓPEBA

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. Os dados foram interpolados para estimativa da chuva em áreas em que não existem estações.

A análise foi realizada considerando o ano civil de 2023, dividido em 4 trimestres: JFM (janeiro, fevereiro e março), AMJ (abril, maio e junho), JAS (julho, agosto e setembro) e OND (outubro, novembro e dezembro). 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. As Normais Climatológicas são valores médios de variáveis meteorológicas calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas, e representa as características médias do clima em um determinado local. O órgão responsável pelo cálculo e divulgação das Normais Climatológicas do Brasil é o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), órgão oficial responsável pelo monitoramento climático do Brasil e membro da Organização Meteorológica Mundial (OMM). As Normais Climatológicas do Brasil podem ser acessadas no site do Inmet, em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>.

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 nessa análise se refere aos valores das Normais climatológicas das chuvas referência aos 30 anos entre 1991-2020.

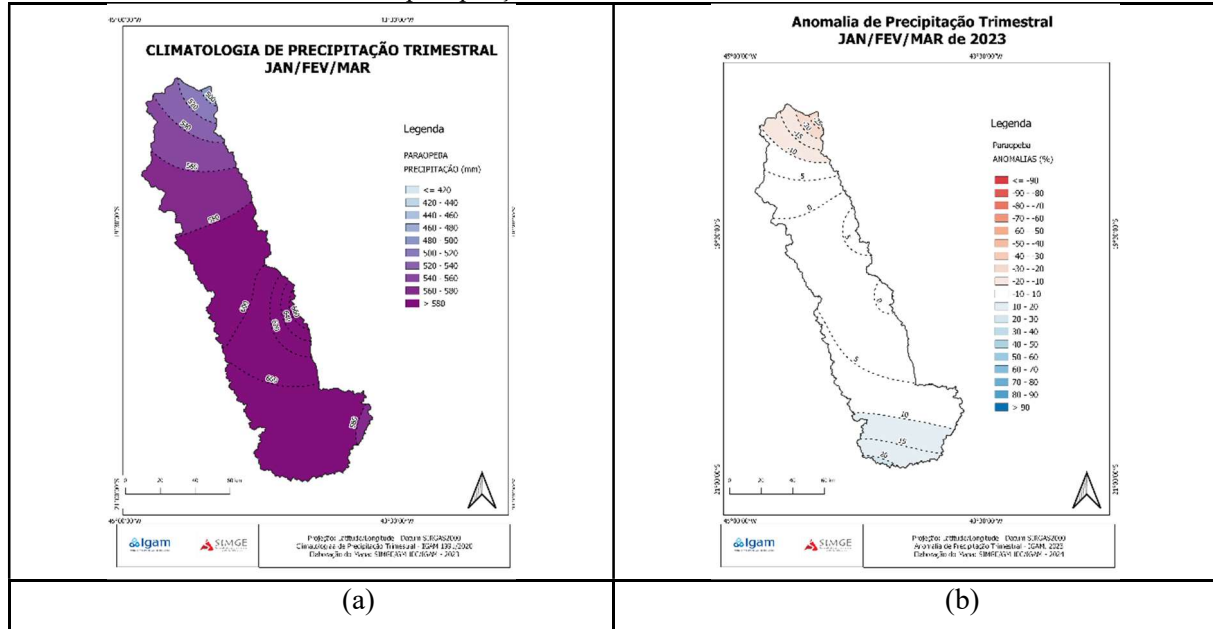
A distribuição espacial da anomalia através destes campos permite a observação do comportamento espacial dela, dado que estas podem se comportar diferentemente mesmo dentro de uma mesma porção geográfica.

As áreas com cor branca nas figuras, indicam as áreas em que se observou precipitação em torno da climatologia, que para a escala utilizada nos mapas a seguir correspondem as anomalias entre -10% e 10%. Já as cores em tons azuis representam as áreas nas quais ocorreram anomalias positivas (superiores a 10%). As áreas preenchidas em cores quentes representam as áreas de anomalias negativas (a partir de -10%). Os valores das anomalias 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 2023, no decorrer do mês de janeiro, foram registrados grande acumulados de precipitação em toda a extensão da bacia. Já em fevereiro e março, houve uma queda brusca nos acumulados. O balanço final da precipitação ocorrida no primeiro trimestre de 2023, (Figura 3), mostra um cenário de chuvas predominantemente em torno da climatologia em toda bacia do Paraopeba, com exceção do setor extremo norte, em que as anomalias foram negativas em torno de 20%, e

do extremo sul, onde as chuvas ficaram superiores à média em até 20%.

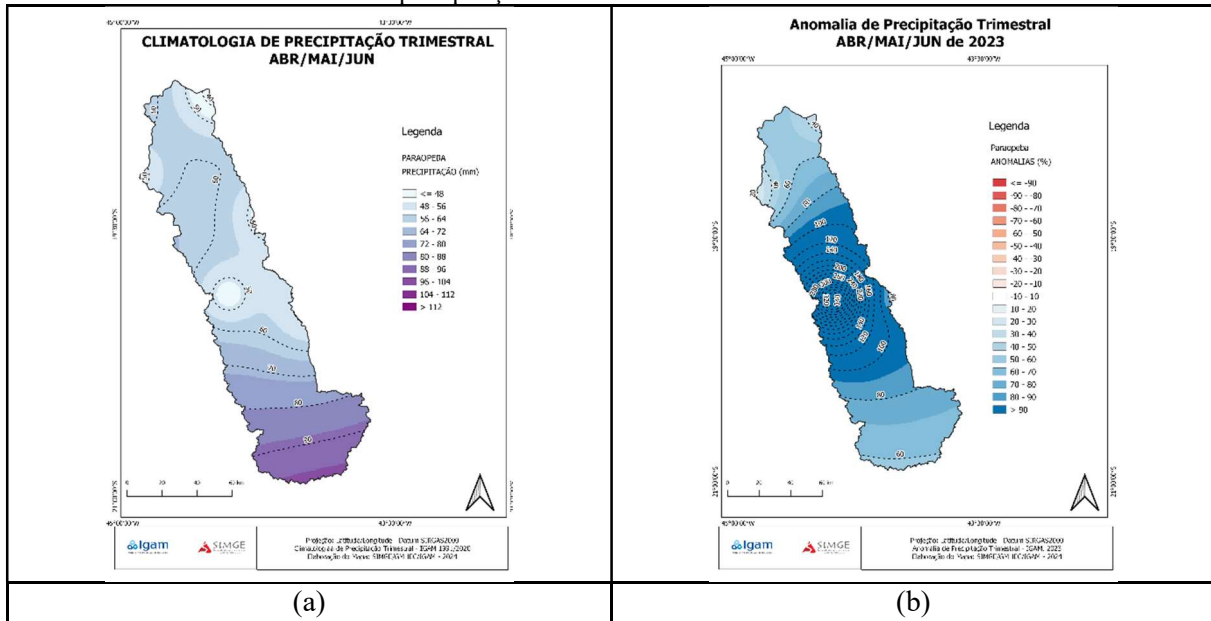
Figura 3 - Distribuição espacial da: (a) climatologia de precipitação no trimestre JFM; (b) anomalia de precipitação no trimestre JFM de 2023



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 40mm a 90 mm, como exibido na Figura 4(a). Em 2023, no mês de abril ainda ocorreram registros de chuvas em vários dias, o que resultou em acumulados expressivos quando consideramos a climatologia do mês. Embora nos demais meses do trimestre tenham ocorrido chuvas abaixo da climatologia, anomalias trimestrais de precipitação foram predominantemente positivas no Paraopeba, conforme observamos na Figura 4(b). Os totais de precipitação observados dentro do trimestre foram superiores à climatologia em até 300% na área central da bacia.

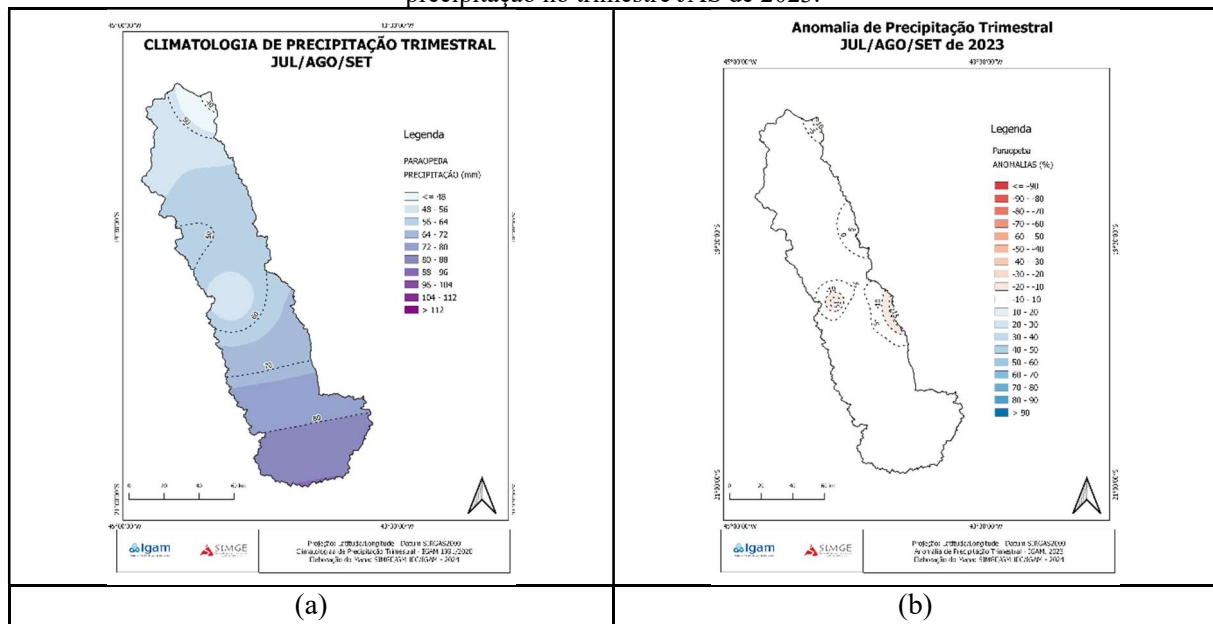
Figura 4 - Distribuição espacial da: (a) climatologia de precipitação no trimestre AMJ; (b) anomalia de precipitação no trimestre AMJ de 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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(a), variam climatologicamente entre 40mm e 90mm. Em 2023, as precipitações do trimestre (Figura 5(b)), ficaram de forma geral dentro da climatologia em grande parte da bacia, com exceção da parte central, onde as chuvas tiveram desvios negativos em torno de 15% em relação à climatologia.

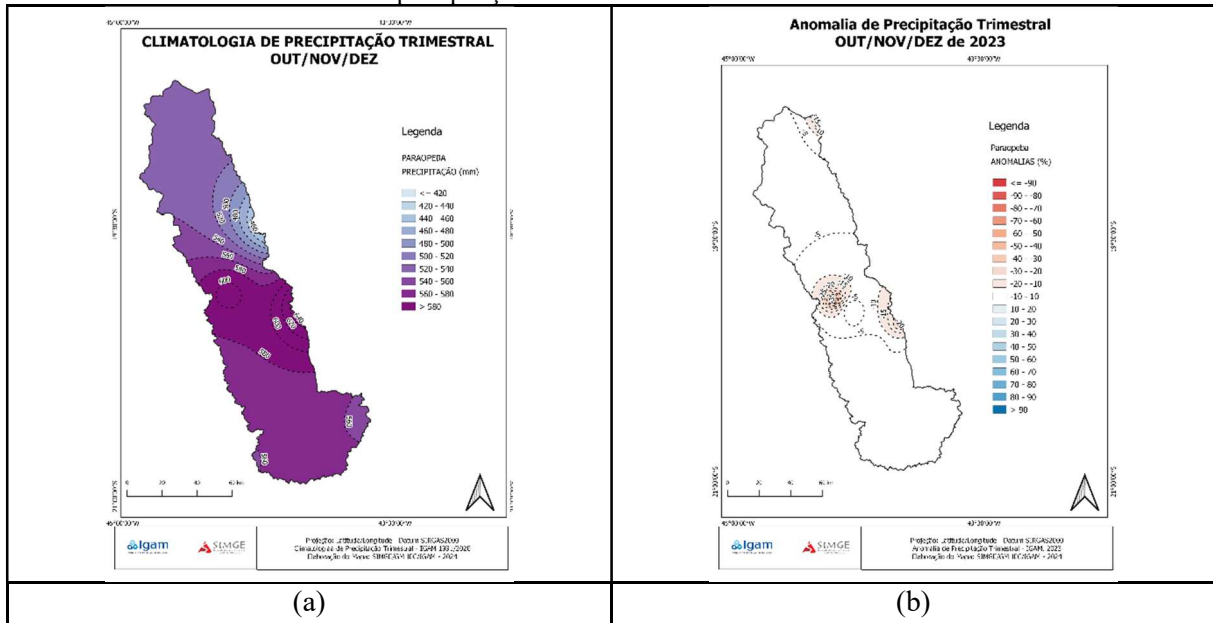
Figura 5 - Distribuição espacial da: (a) climatologia de precipitação no trimestre JAS; (b) anomalia de precipitação no trimestre JAS de 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

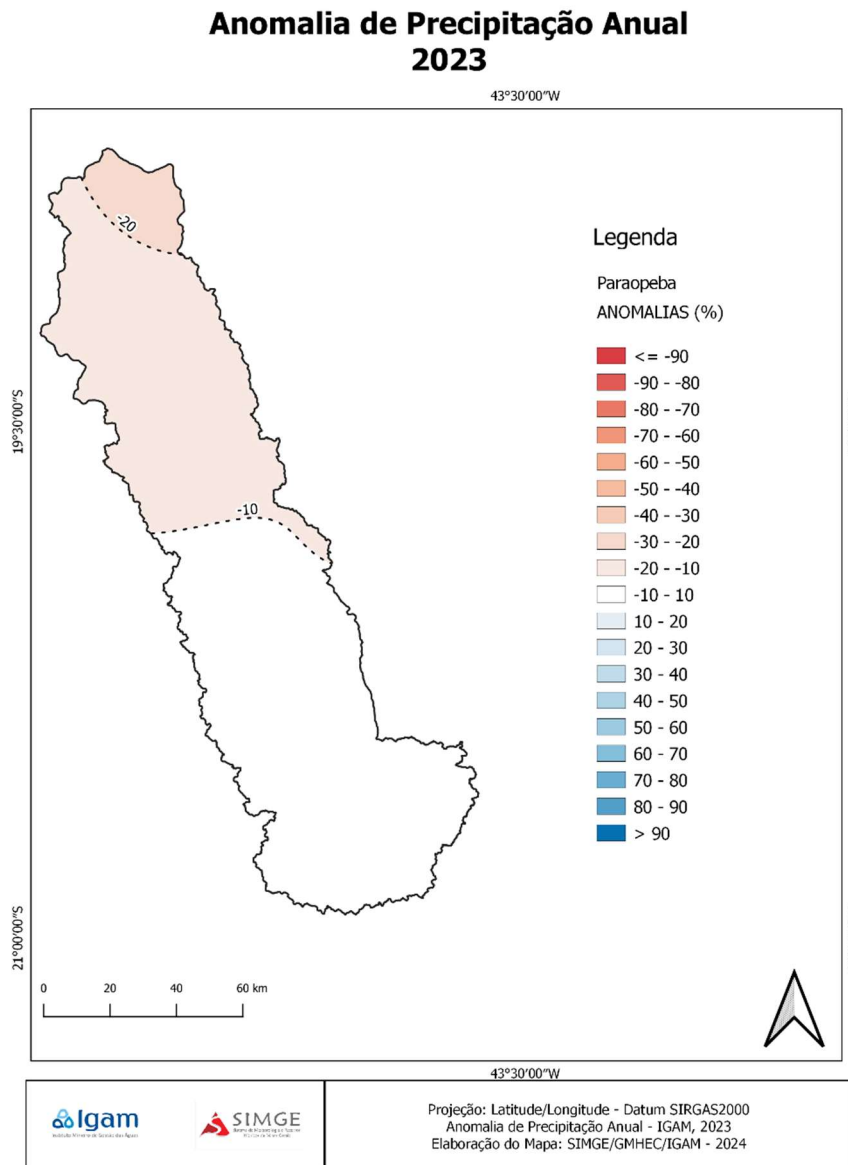
O quarto trimestre (OND) marca o início do período chuvoso em Minas. Nesse trimestre as precipitações, conforme a climatologia exibida na Figura 6(a), variam entre 430mm e 650mm. Em 2023, no mês de outubro, em grande parte da bacia ocorreram grandes acumulados superiores à climatologia do mês. No entanto, as chuvas ocorridas em novembro e dezembro alcançaram acumulados inferiores à climatologia em grande parte da bacia o que resultou no cenário que podemos observar na Figura 6(b), com grande parte da bacia ficando com chuvas em torno da climatologia, com exceção da parte central, onde a chuvas ficaram abaixo da média em até 35mm.

Figura 6 - Distribuição espacial da: (a) climatologia de precipitação no trimestre OND; (b) anomalia de precipitação no trimestre OND de 2023.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 7 - Distribuição espacial da anomalia de precipitação anual de 2023



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A análise das anomalias referentes ao ano (calculadas entre janeiro e dezembro) mostra a cenários distintos na extensão da bacia do Paraopeba. Enquanto no setor centro-norte as precipitações anuais ficaram até 20% abaixo da climatologia, o setor centro-sul fechou o ano dentro da normalidade conforme podemos observar 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 e 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

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. A existência de uma rede prévia permitiu comparar a condição do rio antes e após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA da Vale S.A.

Após o desastre, instituiu-se uma rede emergencial para o acompanhamento do impacto que, atualmente possui 17 pontos monitorados pelo Igam, sendo dois pontos a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (BP036 e BP093) e 15 a jusante até o reservatório de Três Marias (BPE2, BP068, BP070, BP072, BP104, BP082, BP083, BP077, BP078, BP087, BPE9, BP099, BPE6, BPE7, BPE8) conforme descrito na Tabela 1. Além disso, para uma melhor avaliação dos trechos impactados, foram incluídas neste Caderno as análises de mais dois pontos a montante (BP027 e BP029).

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

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Descrição
BP027	-20,51	-43,98	Congonhas	Rio Paraopeba, na localidade de Congonhas
BP029	-20,41	-44,03	Belo Vale	Rio Paraopeba, na localidade de Belo Vale, próximo à estação fluvio-sedimentográfica operada pela ANEEL
BP036	-20,197	-44,123	Brumadinho	Rio Paraopeba (Melo Franco)
BP093	-20,16	-44,15	Brumadinho	Ribeirão Casa Branca à jusante do lançamento da ETAF 1 (Estação de Tratamento de Águas Fluviais 1)
BPE2	-20,135	-44,215	Brumadinho	Rio Paraopeba (captação da Copasa)
BP068	-20,093	-44,211	Mário Campos	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
BP104**	-19,711	-44,497	Pará de Minas	Rio Paraopeba (captação SAAE 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 (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
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
BPE9	17,13	43,23	Felixlândia	Ribeirão do Gomes próximo a confluência com o rio Paraopeba
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

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Descrição
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

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

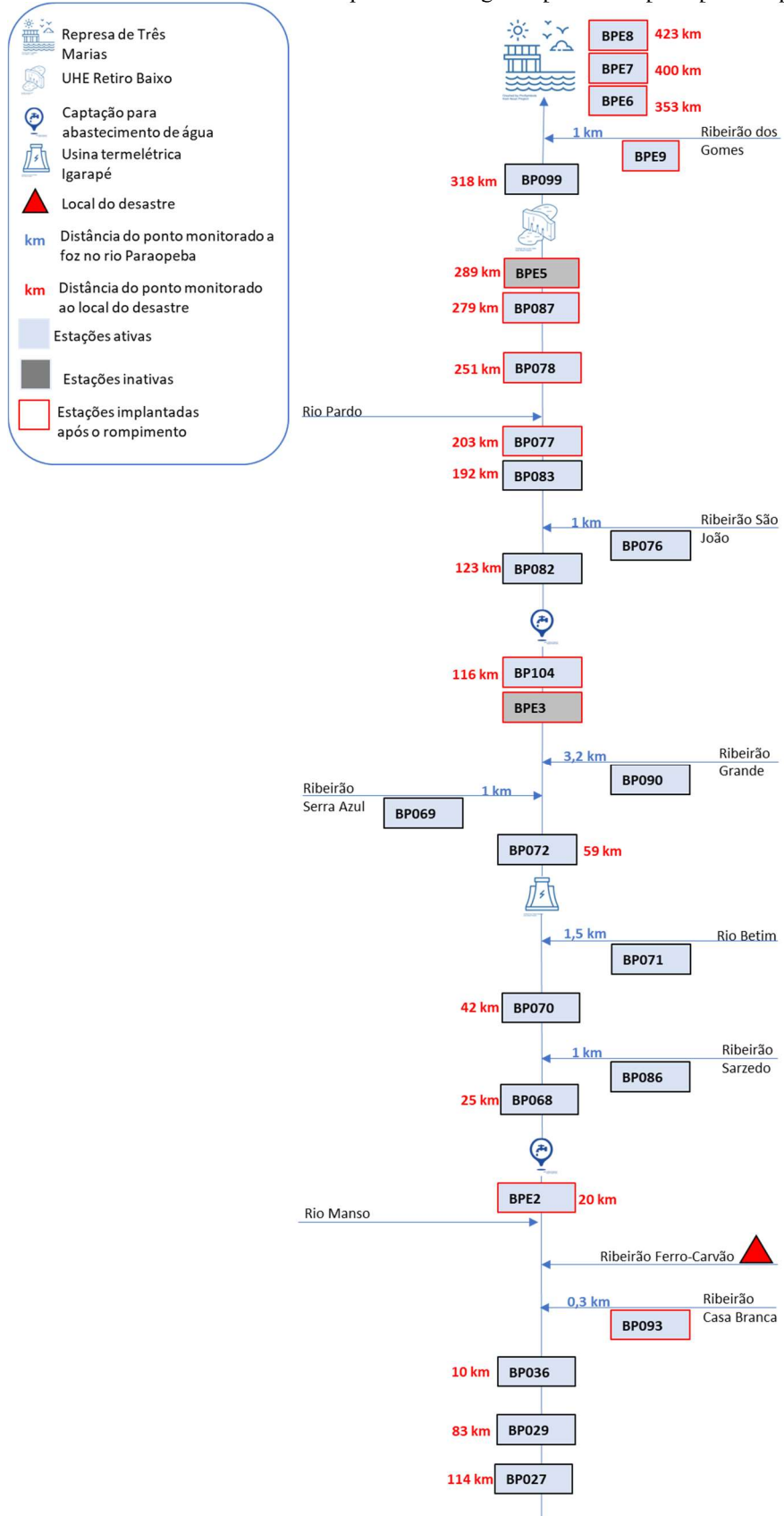
**BPE4 foi renomeado para BP104

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

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

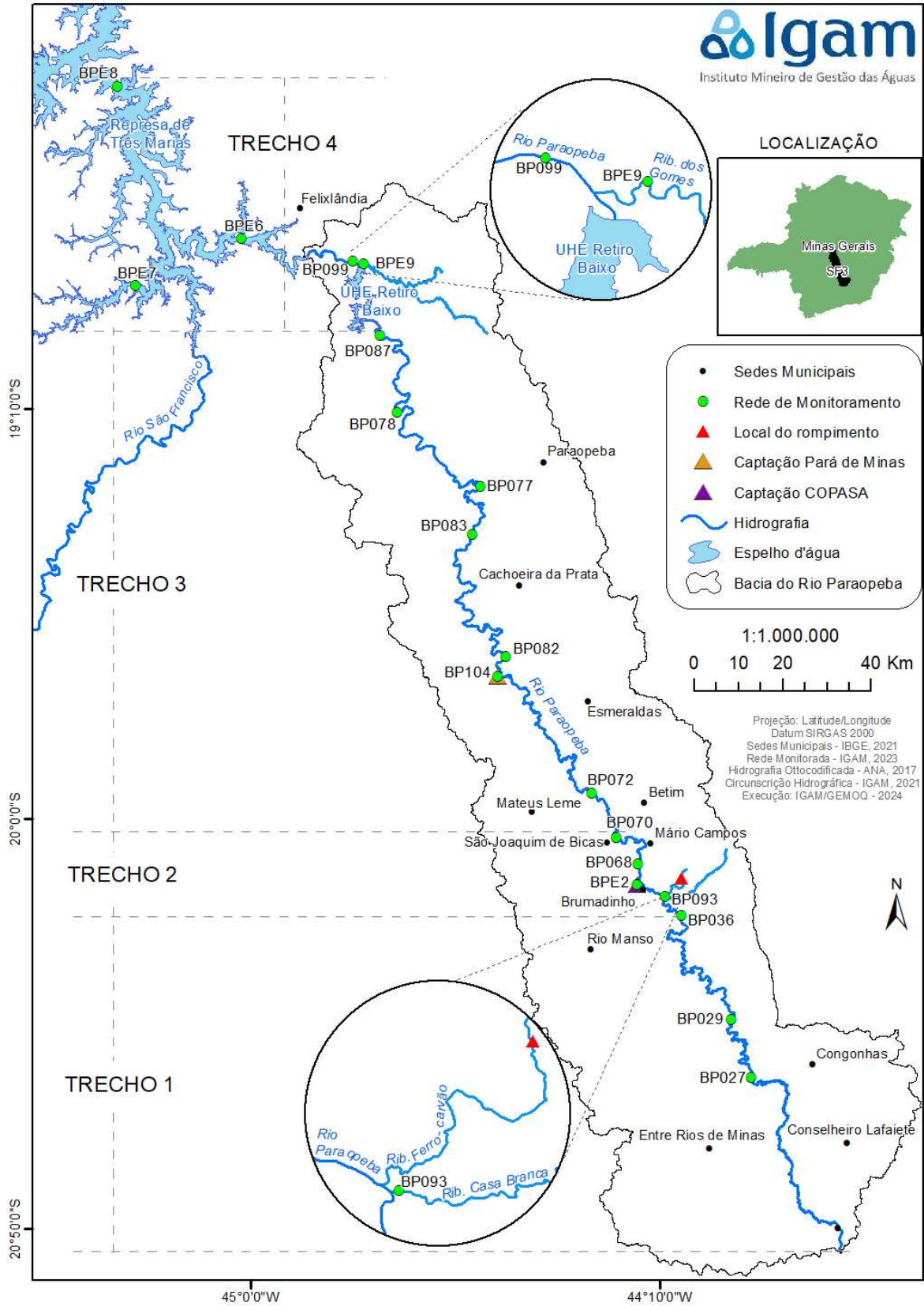
De forma a facilitar a visualização dos pontos de monitoramento antes do rompimento (série histórica) e após o rompimento (2019), são apresentadas as Figuras 8 e 9, com a localização da Rede de Monitoramento Emergencial na bacia do rio Paraopeba.

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



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 9 - Mapa com a localização geográfica dos pontos de monitoramento da qualidade superficial da água



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

5.3 Frequência de amostragem

Após o rompimento da Barragem B-I, 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															
	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	2023
Estações	8 pontos Todos da calha: BP036 BP068 BP070 BP072 BP082 BP078 BP083 BP099	11 pontos Todos da calha: BPE2 BP036 BP068 BP070 BP072 BP082 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	Todos da calha: BPE2 BP036 BP068 BP070 BP072 BP082 BPE3 BP083 BP077 BP078 BP087 BPE9 BP099	Represa de Três Marias BPE6 BPE7 BPE8	Todos os pontos	51 estações da bacia
Frequência (Água)	Trimestral	Diária	Diária	Mensal	Diária	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal	Mensal
Frequência (Sedimentos)	-x-	Semanal	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal									Trimestral

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

-x-: Não era realizado o monitoramento de sedimentos antes do desastre.

Tendo em vista o início das atividades de dragagem do rio Paraopeba, 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 de mensal a semanal, 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 B-I, 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 voltou a mensal novamente.

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. Atualmente a frequência de monitoramento é realizada mensalmente nas águas superficiais e trimestralmente nas 51 estações de amostragem da bacia do rio Paraopeba.

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);
- Guia nacional de coleta e preservação de amostras (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo; Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2ª edição, - 2023);
- *Standart Mehods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association – APHA - 23ª edição , 2017).
- *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 24ª edição (2023)

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 (2024)

No caso de sedimentos, considerou-se os limites estabelecidos pelo Conselho Nacional 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
Alumínio Total (% Al)	4,52 ¹	*
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 (%)	28,10 ¹	*
Manganês Total (%)	0,33 ¹	*
Mercúrio Total (mg/Kg Hg)	0,17	0,486
Níquel Total (mg/Kg Ni)	18,0	35,9
Estrôncio (mg/kg Sr)	*	*
Titânio (% Ti)	*	*
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 (2024)

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 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.

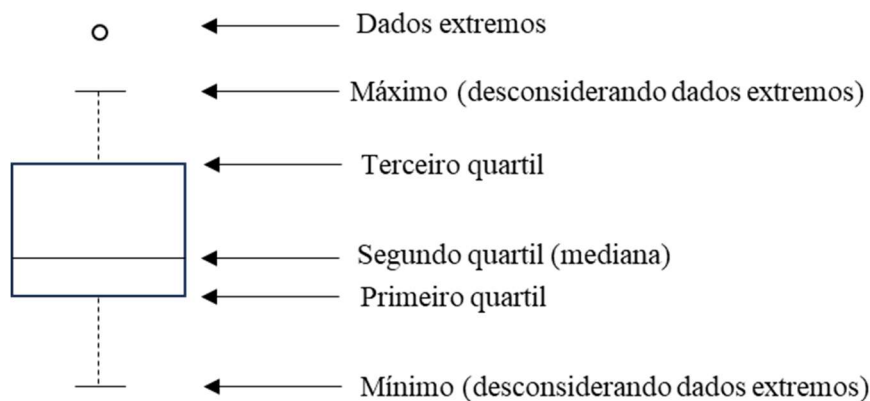
6. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO DE 2019 A JUNHO DE 2024, NA CALHA DO RIO PARAPEBA

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 e 20/06/2024. Foram utilizados para complementar essa análise a Série Histórica com dados de águas superficiais do IGAM entre os anos de 2010 e 2018.

No presente relatório, são apresentados gráficos de dispersão e boxplot com os resultados de monitoramento. O boxplot é composto por seis elementos: mínimo, primeiro

quartil, segundo quartil (mediana), terceiro quartil, máximo e dados extremos, conforme representado no esquema a seguir (Figura 10).

Figura 10 - Elementos do boxplot



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Os parâmetros analisados foram 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 divididas por trechos, de montante a jusante do rio Paraopeba e o tributário ribeirão dos Gomes BPE9, sendo eles:

- Trecho 1: BP036, BP029 e BP027 (pontos no rio Paraopeba a montante do rompimento);
- Trecho 2: BPE2, BP068 e BP070 (pontos no rio Paraopeba, a jusante do rompimento, até a Usina Termoelétrica de Igarapé);
- Trecho 3: BP072, BP104, BP082, BP083, BP077, BP078 e BP087 (pontos após a Usina Termoelétrica de Igarapé até a Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo);

- Trecho 4: BP099, BPE6, BPE7, BPE8 (pontos após a Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo até a represa de Três Marias) e BPE9 (ribeirão dos Gomes).

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. Para evidenciar os pontos de monitoramento com características distintas e fazer uma análise mais apurada no trecho 4, identificou-se separadamente os pontos BP099 (rio Paraopeba) dos demais, uma vez que este ponto é o único representante, neste trecho, amostrado antes do desastre. Os pontos BPE9 (ribeirão dos Gomes) e BPE6, BPE7 e BPE8 (reservatório de Três Marias) passaram a compor o monitoramento logo após o desastre.

Oxigênio dissolvido

As análises de oxigênio dissolvido (OD) fornecem informações sobre a capacidade de autodepuração de um corpo d'água, evidenciando o equilíbrio entre os processos de oxigenação (provenientes da atmosfera e da fotossíntese) e do consumo de oxigênio para a oxidação da matéria orgânica. A concentração de OD é um parâmetro fundamental para a manutenção da biota aquática, sendo influenciada por fatores físicos, como temperatura e pressão atmosférica, químicos e biológicos. Ambientes lóticos apresentam, em geral, maior concentração de OD em comparação aos ambientes lênticos. Na ausência de poluição, a concentração de OD em equilíbrio com a atmosfera pode variar entre 8 e 11 mg/L, dependendo da temperatura e da altitude.

A Figura 11 e Figura 12 apresentam os resultados de oxigênio dissolvido no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos cinco anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A (janeiro de 2019 a junho de 2024), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

No trecho 1, a montante do rompimento, observa-se que não houve variação significativa nos primeiros dois anos após o desastre ambiental. Contudo, verificou-se violações (valores abaixo de 5 mg/L) no período seco de 2021 e nos períodos chuvoso e seco de 2024, sendo as variações com padrões característicos para período chuvoso e de estiagem.

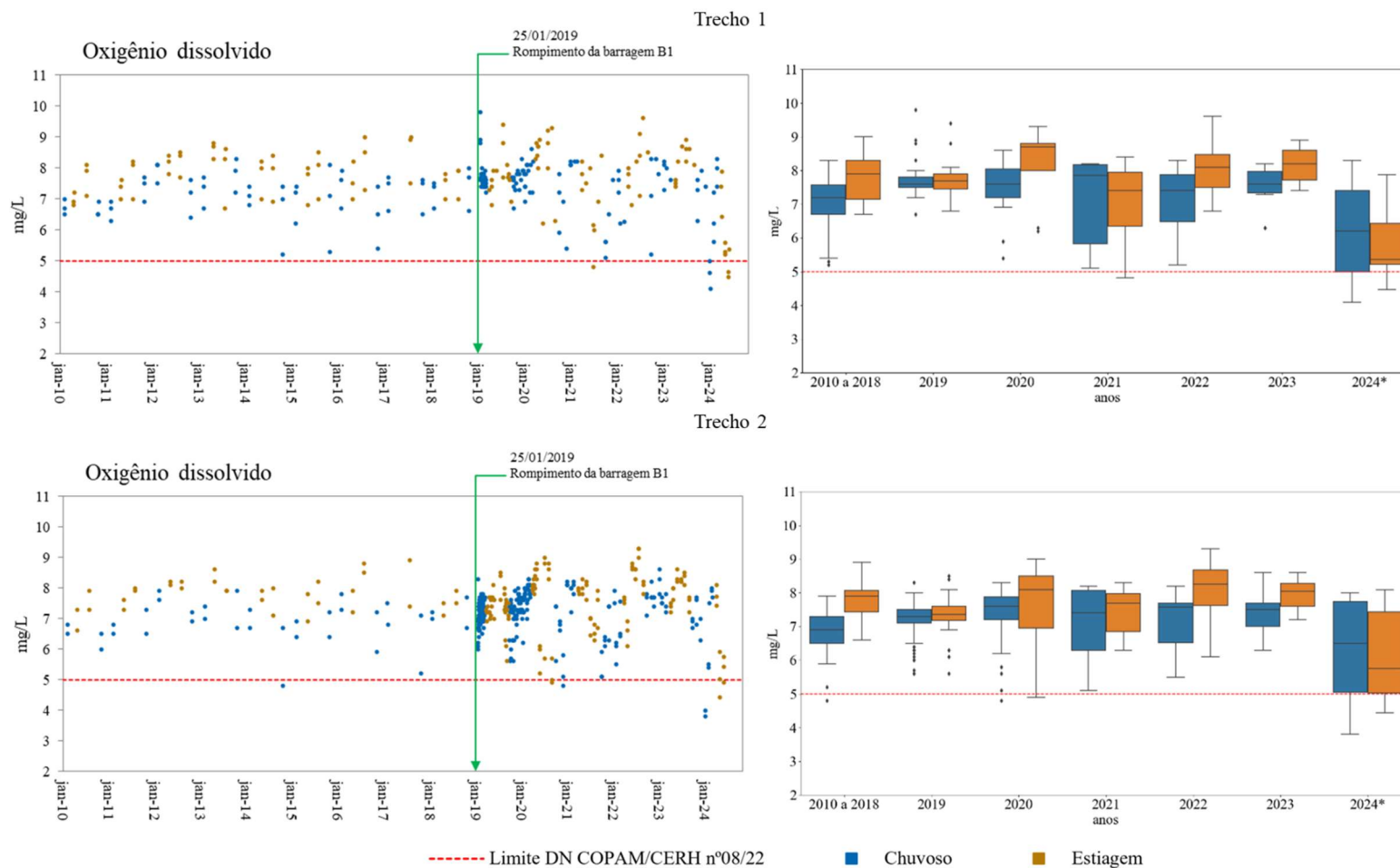
No trecho 2, observa-se que a concentração de oxigênio dissolvido atingiu valores inferiores que 5 mg/L nos anos de 2020 e 2024, quando as concentrações atingiram os menores valores desde 2010 (série histórica). Neste caso, os resultados em desconformidade podem estar relacionados indiretamente ao desastre, devido ao aporte difuso, atividade de dragagem e outros. Ressalta-se que, para este trecho, houve uma violação para este parâmetro registrada no período chuvoso de 2015.

Já no trecho 3, a série histórica do Igam mostra violações no período chuvoso de 2011 e 2018. Após o rompimento da barragem, registrou-se violações nos períodos chuvosos dos anos 2020, 2021 e 2024, também no período seco, com distribuição similar ao período pré rompimento.

No trecho 4, as violações foram registradas nos anos de 2019, 2020 e 2024, foram registradas no rio Paraopeba (BP099) e no ribeirão dos Gomes (BPE9). Esses resultados podem estar associados a operação da usina de Retiro Baixo, e aportes difusos provenientes da bacia de drenagem do ribeirão dos Gomes.

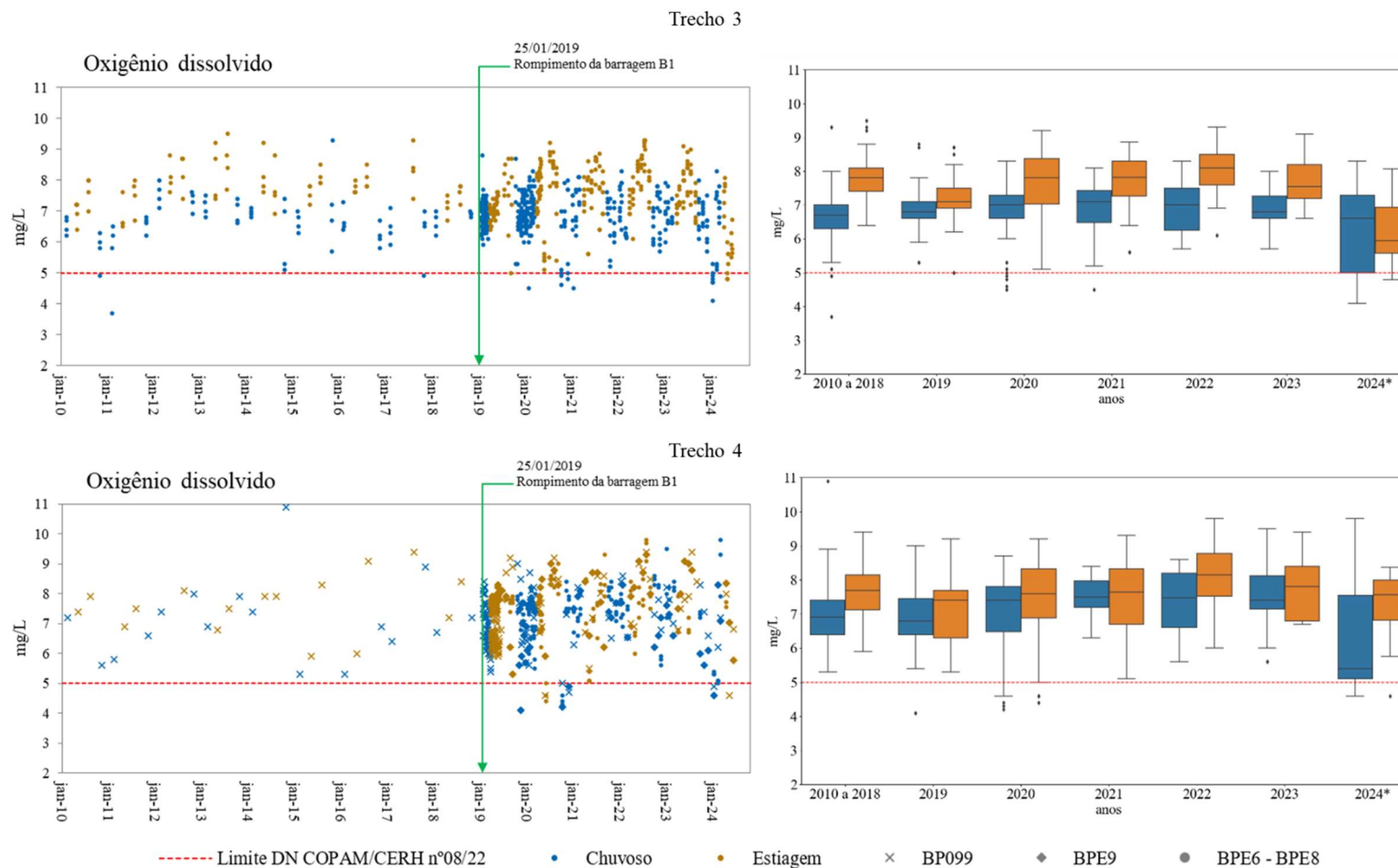
Em resumo, observa-se que não houve variação expressiva ao longo de todo o curso do rio Paraopeba durante os primeiros dias após o desastre ambiental. Durante o monitoramento realizado em 2019, todos os resultados estiveram dentro dos limites legais (valores acima de 5 mg/L). No entanto, em 2020 e 2024, foram registrados valores abaixo do limite de 5mg/L, sendo 2024 o ano com a maior quantidade de violações, tanto no período chuvoso quanto no período seco. Estes resultados indicam um aumento de matéria orgânica no rio Paraopeba, que consome o oxigênio disponível na água para sua decomposição.

Figura 11 - Resultados de oxigênio dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 12 - Resultados de oxigênio dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

pH in loco

As medições de pH visam verificar 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 13 e Figura 14 apresentam os resultados de pH no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos cinco anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A (janeiro/2019 a junho/2024), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba

A montante do rompimento (trecho 1), no período pré-rompimento, verificou-se apenas uma violação de pH abaixo de 6. Após o desastre, as violações neste trecho ocorreram no período chuvoso em 2019 e em 2020.

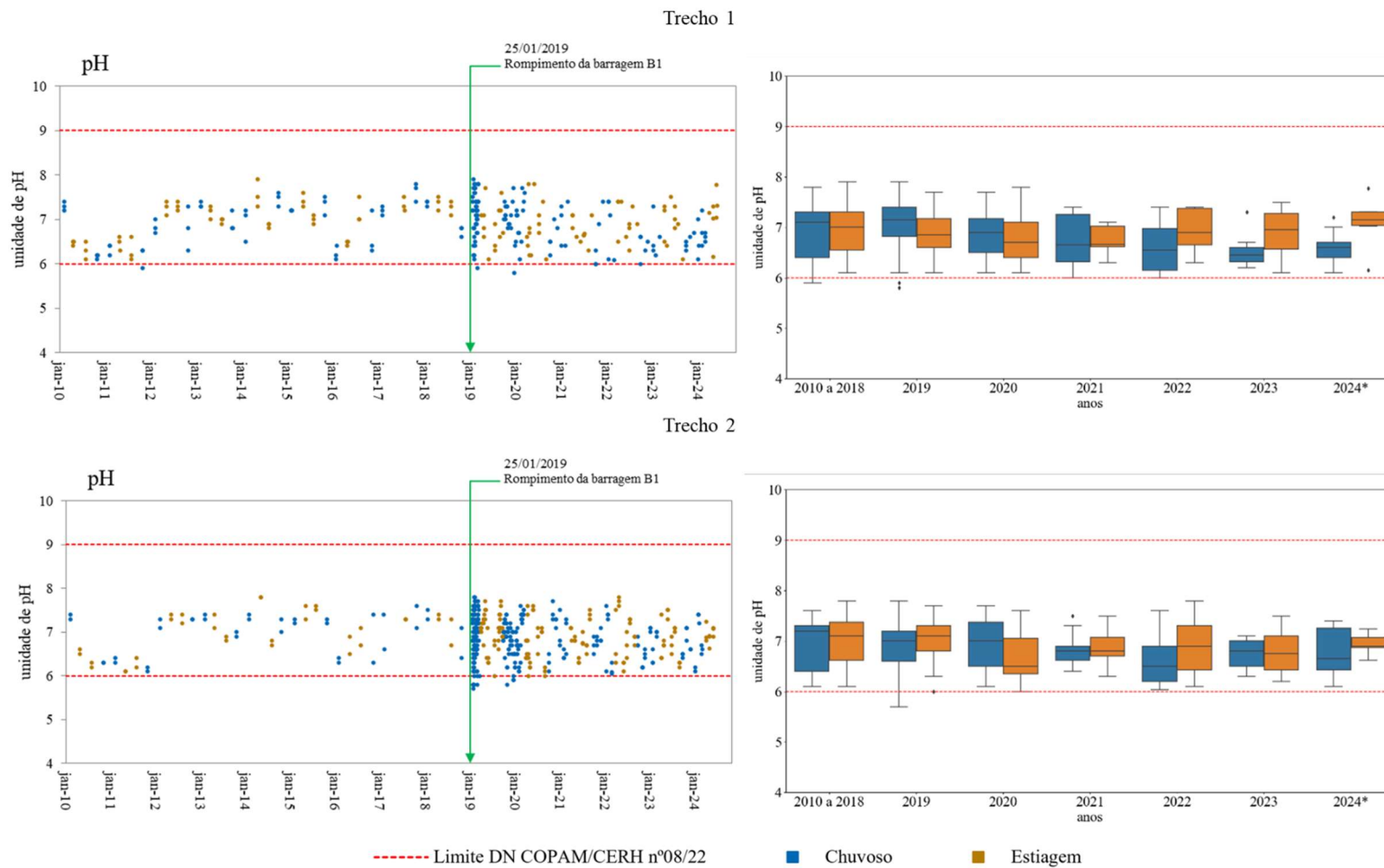
Já no trecho 2, as violações ocorreram no período chuvoso de 2019 (logo após o rompimento). Em 2020 se observa uma queda da mediana em relação ao histórico. As alterações do pH podem estar relacionadas a presença do rejeito no rio Paraopeba e sua movimentação durante o período chuvoso.

No trecho 3, observou-se um maior número de violações nos anos de 2022 e 2023, contudo verificou-se resultados desconformes no período chuvoso de 2019 e no período seco de 2024.

Por fim, no trecho 4, foram identificadas violações nos anos de 2020, 2021 e 2024.

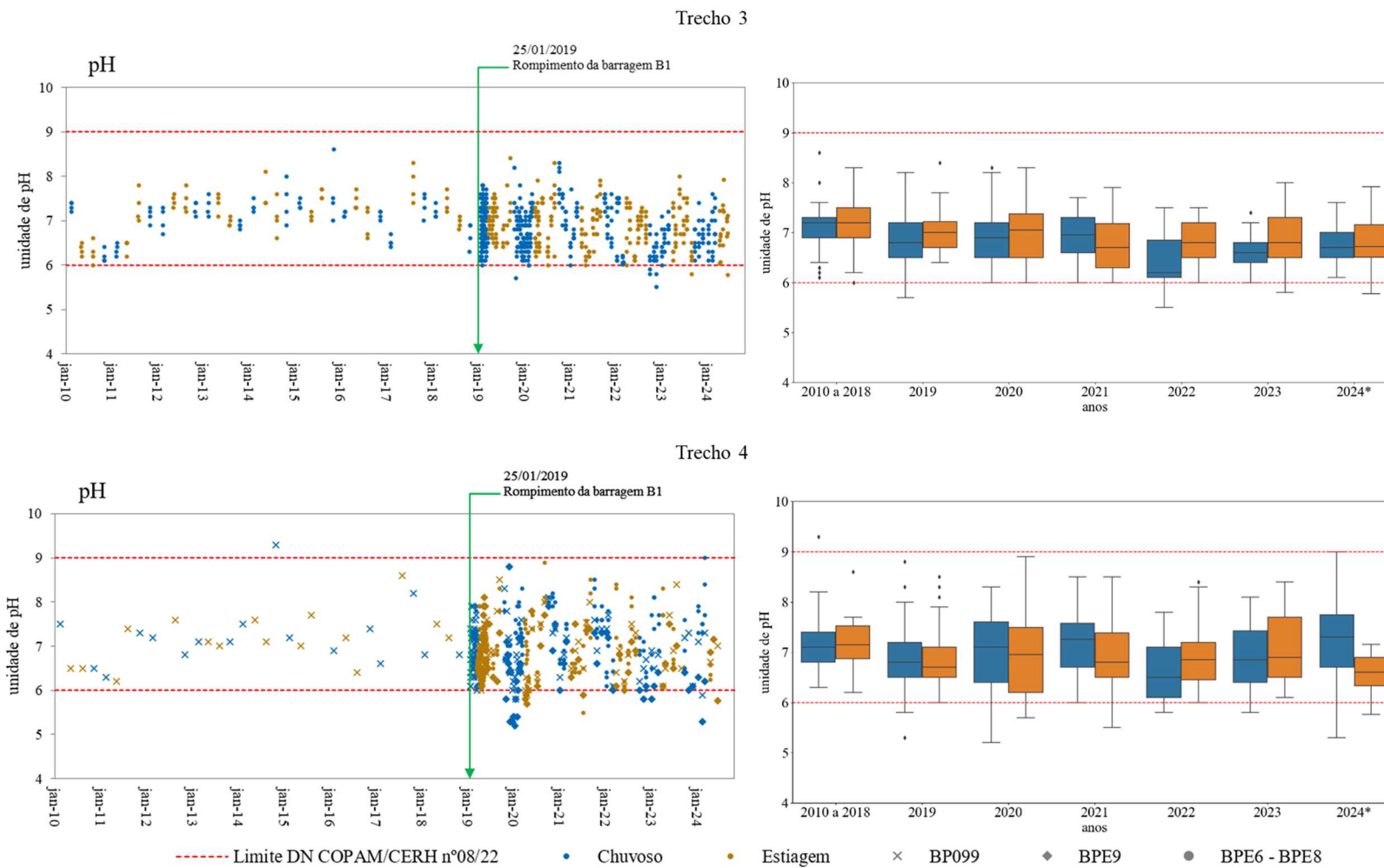
De maneira geral, houve algumas violações para o parâmetro pH com resultados inferiores a 6, no monitoramento realizado entre 2019 e 2024, mas a maioria dos resultados estão dentro do intervalo aceitável para rios de Classe 2 (entre 6 e 9), que de acordo com os limites estabelecidos na legislação, são valores adequados para a proteção da vida aquática.

Figura 13 - Resultados de pH em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 14 - Resultados de pH em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Condutividade elétrica

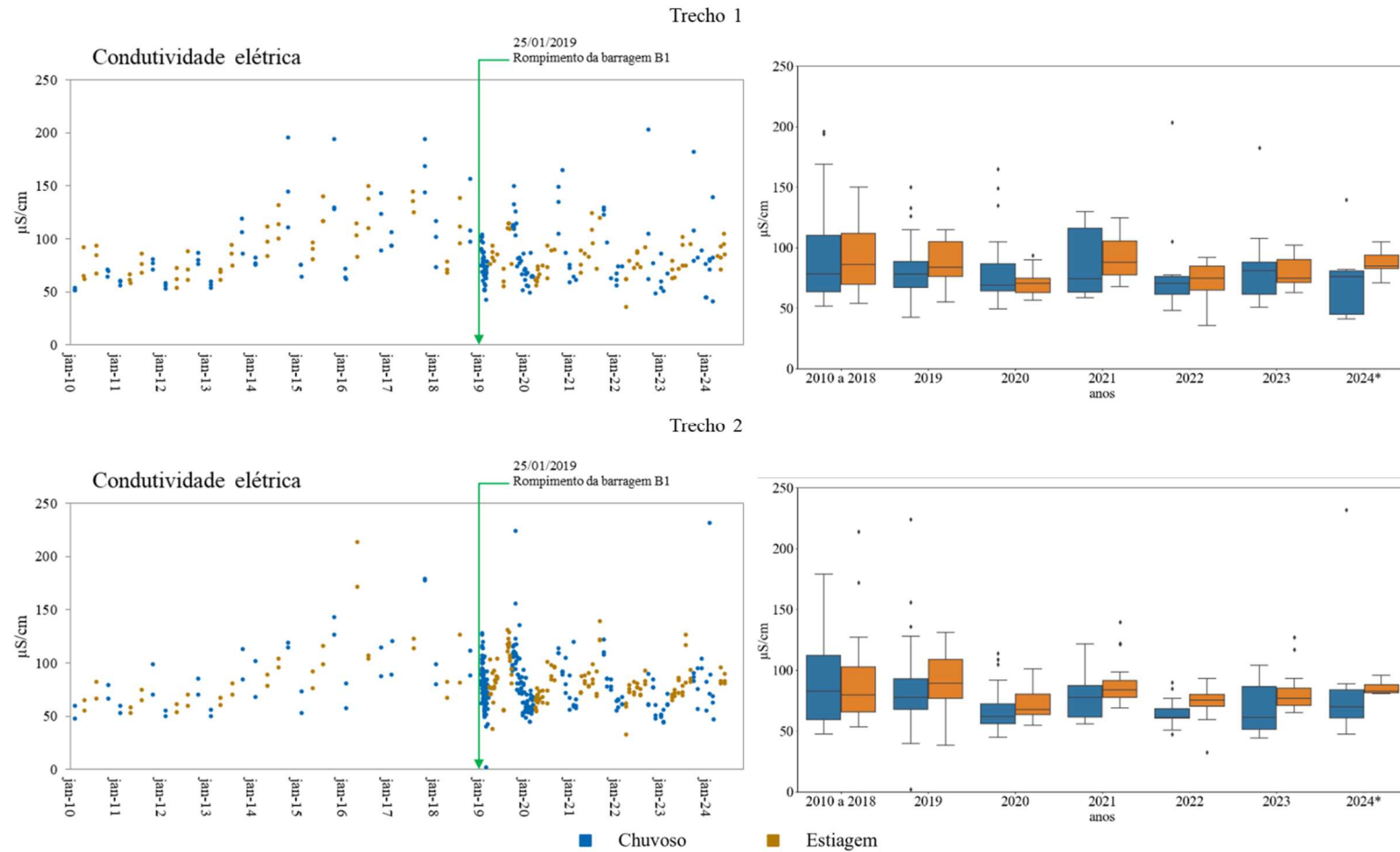
As medições de condutividade elétrica se referem à potencialidade de aportes de compostos solúveis em geral, uma vez que esse parâmetro indica o grau de condução elétrica de uma amostra de água, determinado pela sua concentração iônica. Apesar de não ter um limite de referência na DN COPAM/CERH 08/2022, 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. Os resultados de condutividade estão apresentados nos gráficos da Figura 15 e Figura 16.

Nos trechos 1 (BP036, BP029 e BP027) e 2 (BPE2, BP068 e BP070) a condutividade elétrica apresentou resultados de mediana, de forma geral, próximos da série histórica (2010 a 2018), inclusive em 2019, variando na faixa entre 50 e 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

No trecho 3 (BP072, BP104, BP082, BP083, BP077, BP078 e BP087), observou-se que a mediana dos períodos chuvoso e seco na série histórica foi de aproximadamente 100 $\mu\text{s}/\text{cm}$ e, nos anos subsequentes ao rompimento das barragens, houve pouca oscilação desse valor no período chuvoso. Já no período seco, verificou-se uma maior variação desses valores, mas, ainda entre 100 e 150 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

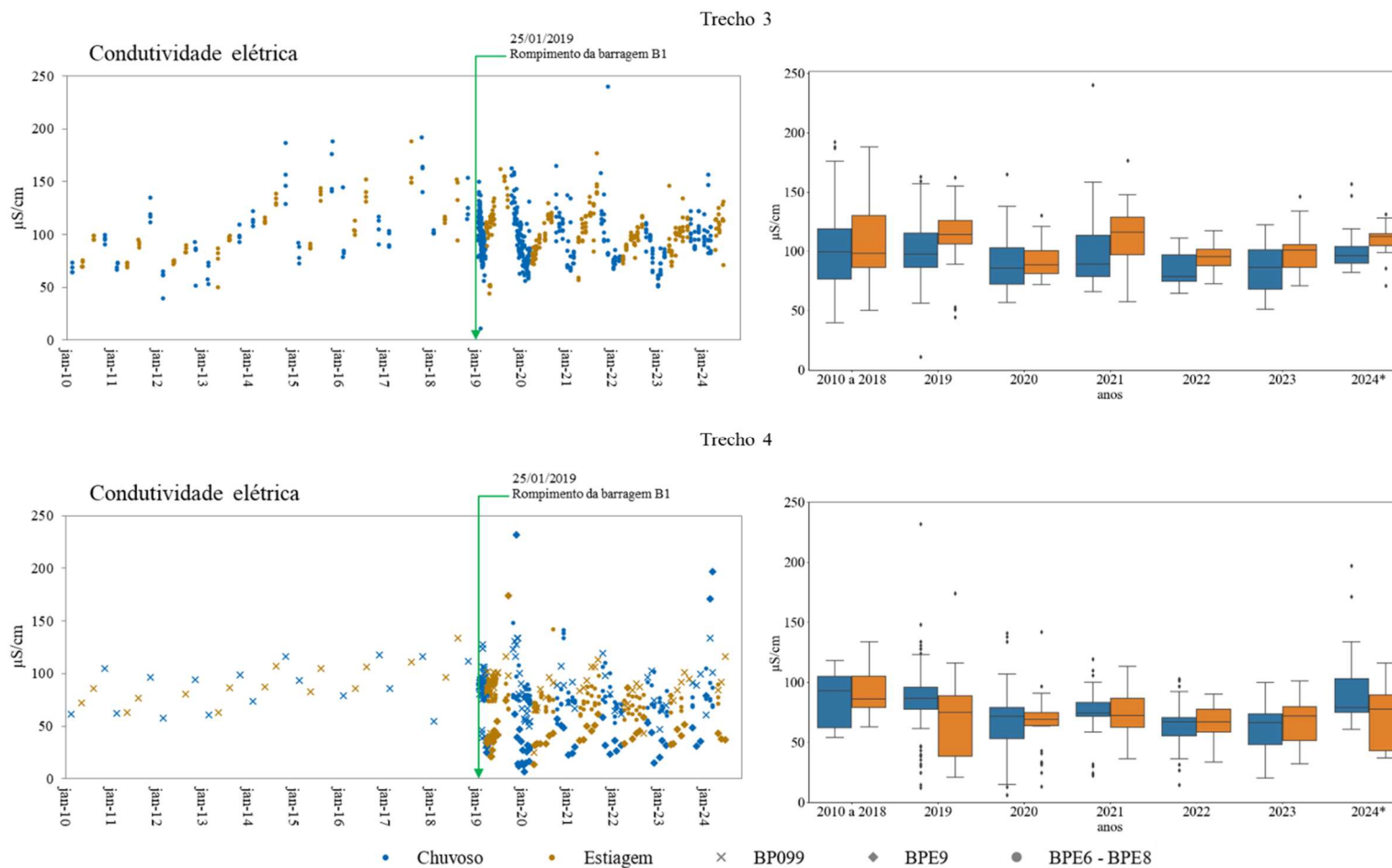
Por fim, no trecho 4 (BP099, BPE6, BPE7, BPE8 e BPE9), verificou-se que as medianas dos resultados de condutividade elétrica na série histórica do Igam foi de 93,1 $\mu\text{s}/\text{cm}$ no período chuvoso e 86,3 $\mu\text{s}/\text{cm}$ no período seco. De 2019, ano do desastre, até junho de 2024 observou-se pouca oscilação nos valores das medianas em relação aos anos de 2010 a 2018.

Figura 15 - Resultados de condutividade elétrica em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 16 - Resultados de condutividade elétrica em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Turbidez e cor verdadeira

As análises de turbidez reportam a quantidade de material particulado em suspensão na água, o que compromete a passagem da luz e afeta diversos processos ecológicos. A elevada turbidez contribui para o aumento da temperatura da água, reduzindo a solubilidade do oxigênio e limitando a atividade fotossintética dos organismos aquáticos. (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 16 a 19 apresentam respectivamente os resultados de turbidez e cor verdadeira no período pré-rompimento (2010 a 2018) e dos cinco anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e BIV-A (janeiro de 2019 a junho de 2024).

No trecho a montante do rompimento (Trecho 1), entre 2010 e 2018, é possível verificar que houve algumas violações do limite de 100 NTU no período chuvoso. Após o rompimento da barragem B-I, observou-se um comportamento similar, com exceção de algumas poucas violações nos anos de 2020 a 2023 no período seco.

O trecho 2, localizado nos 40 km após o local do rompimento (BPE2, BP068 e BP070), foi o mais impactado e apresentou resultados mais elevados de turbidez (entre 18.588 e 34.500 NTU) no ano de 2019. A partir de 2020, observou-se que, no período chuvoso, a maioria dos resultados de turbidez excede o limite da legislação de 100 NTU bem mais do que, na estiagem. Após o rompimento, apenas os anos de 2021 e 2024 não apresentaram resultados em desconformidade no período de seca.

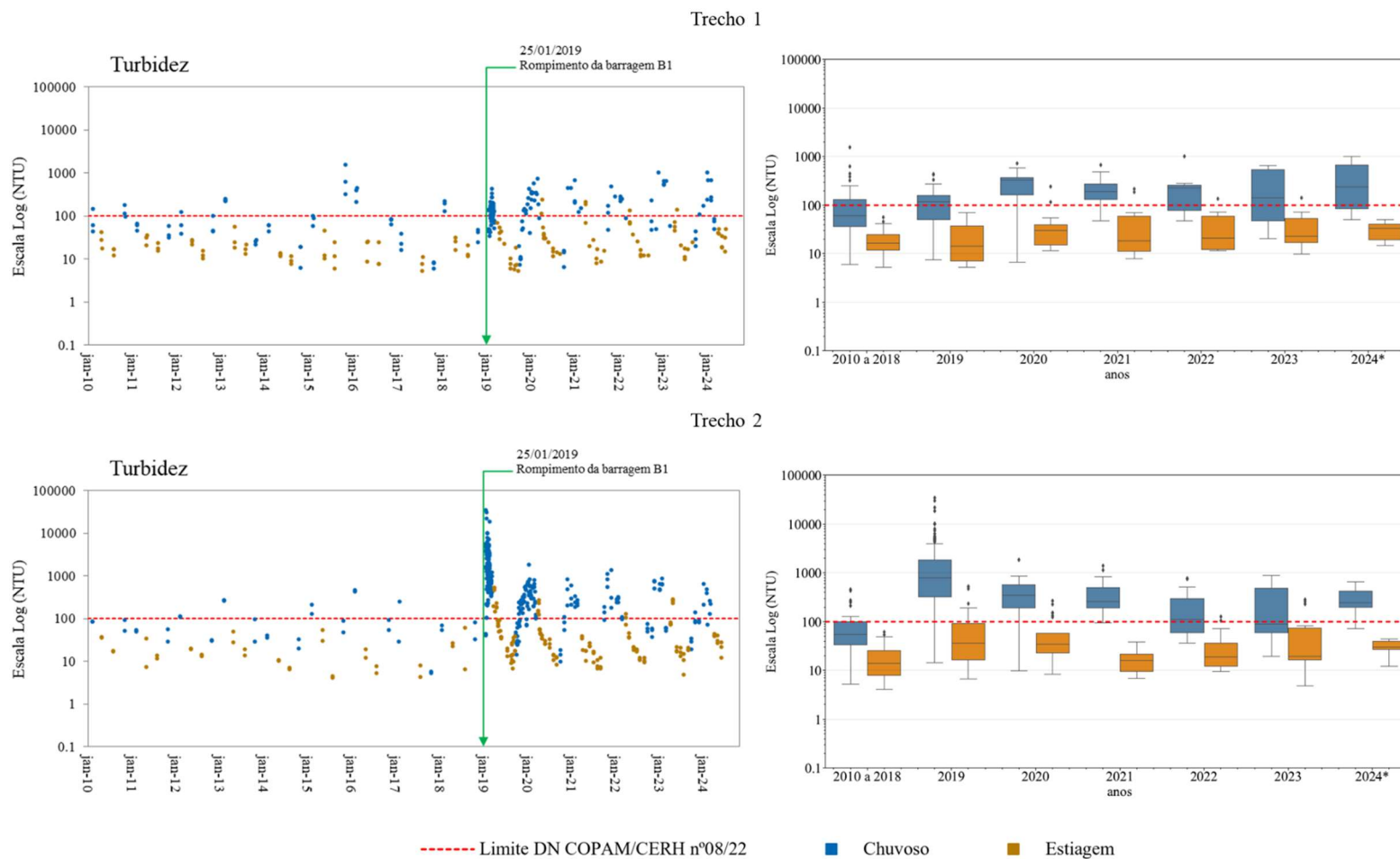
No trecho 3, entre a termelétrica de Igarapé e a hidrelétrica de Retiro Baixo, também foi observado o impacto da pluma de rejeitos, principalmente no período chuvoso. Observa-se uma redução paulatinamente dos resultados ao longo dos anos, contudo todos os percentis nos últimos dois anos de monitoramento (2023 e 2024) ainda se apresentam acima daqueles observados para a série histórica de monitoramento do Igam.

Já no trecho 4, entre a hidrelétrica de Retiro Baixo e o reservatório de Três Marias, verificou-se que a maioria dos resultados após o rompimento, manteve-se abaixo do limite da legislação, com alguns resultados acima de 100 NTU no período chuvoso, especialmente na

estação de amostragem localizada no ribeirão dos Gomes (BPE9). Importante salientar que esse corpo de água está localizado em trecho logo a montante do último ponto do rio Paraopeba (BP099) e influencia diretamente na qualidade das águas desse último.

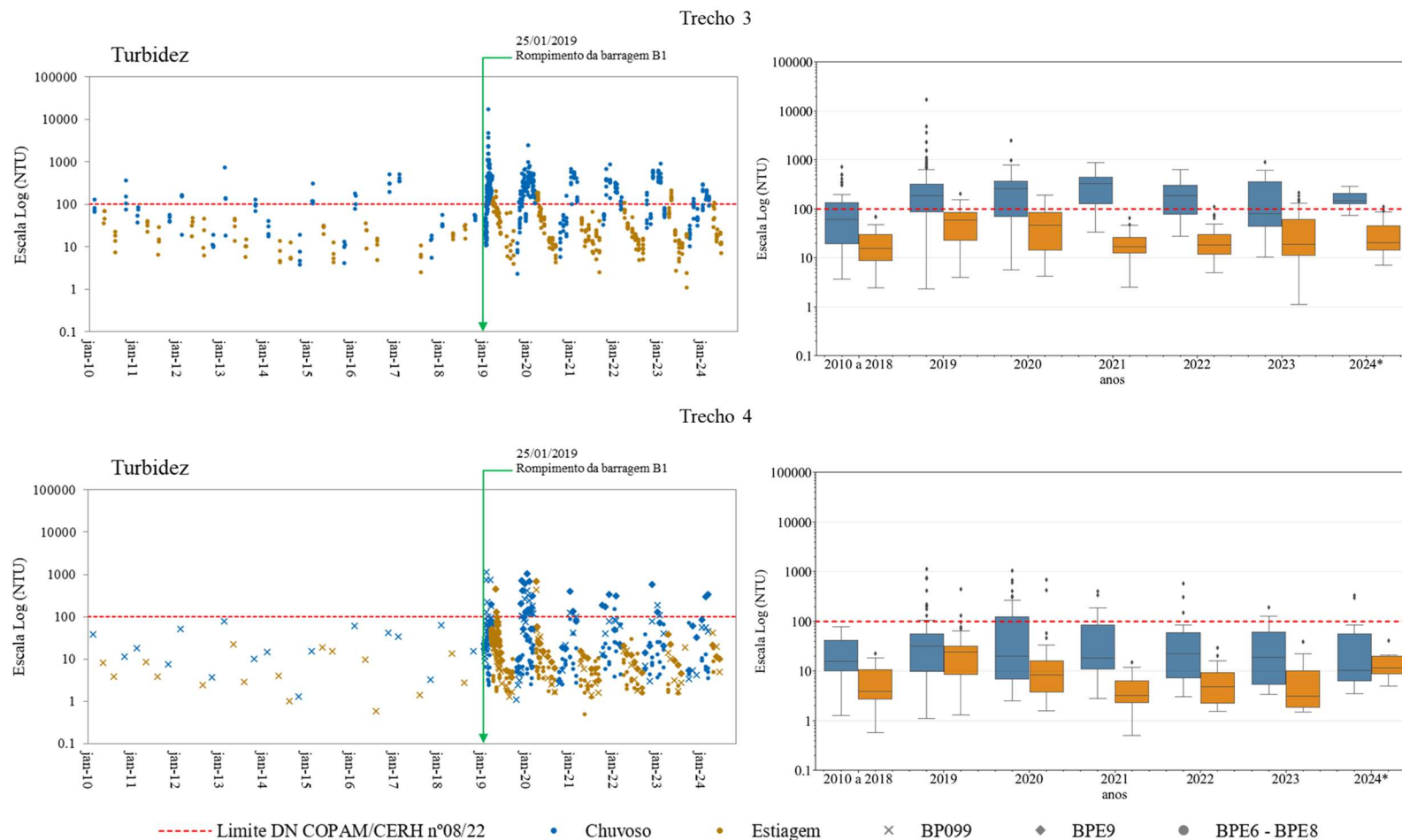
Conclui-se o aumento do escoamento superficial e da vazão do rio nos períodos chuvosos acarretam a remobilização do material depositado no leito e aportes de rejeitos no rio Paraopeba, sobretudo nas áreas próximas ao rompimento. Esse fato foi observado em todos os períodos chuvosos do período de 2019 a 2024. 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 em todos os trechos analisados. A mesma análise pode ser feita para o parâmetro cor verdadeira.

Figura 17 - Resultados de turbidez em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2



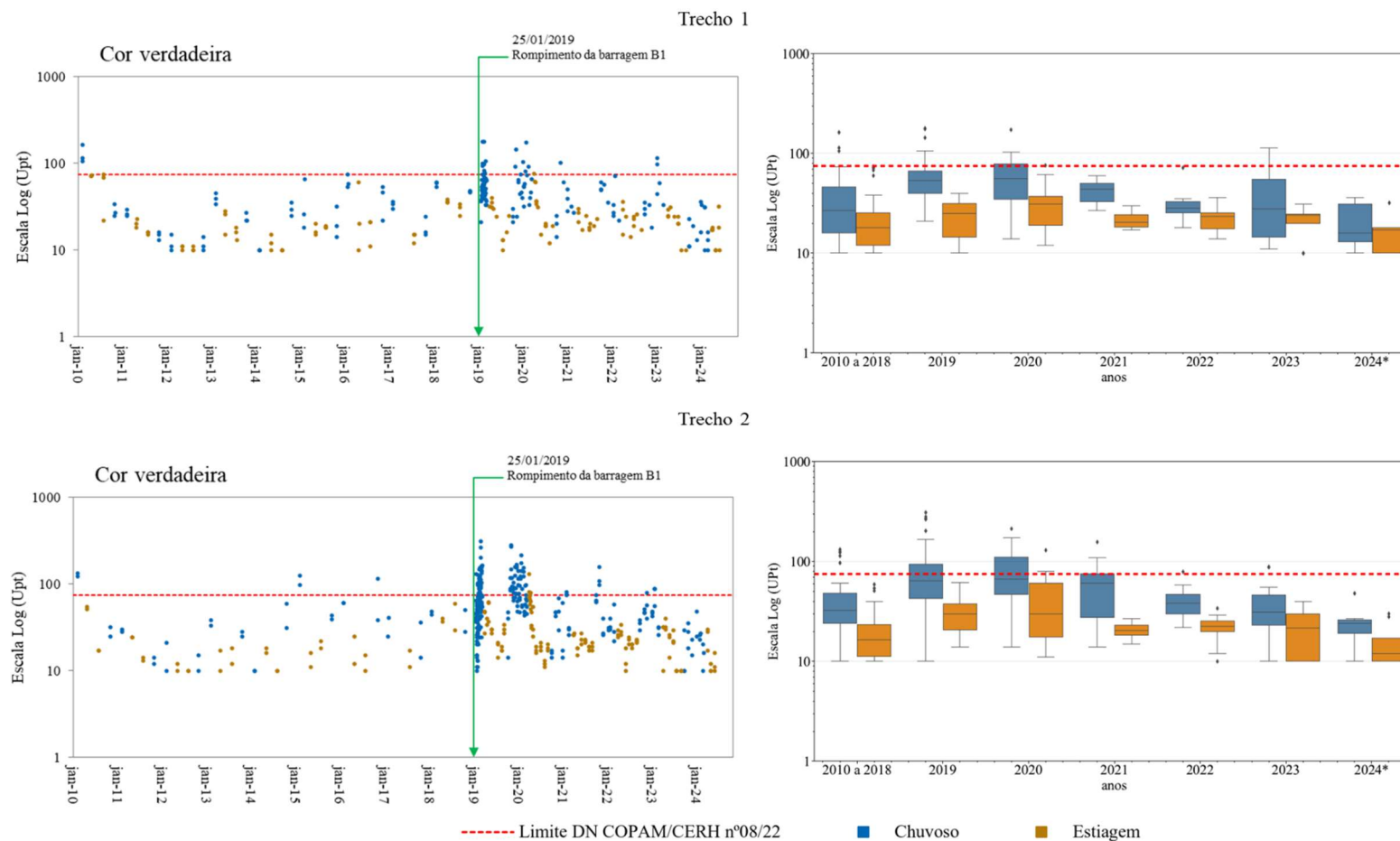
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 18 - Resultados de turbidez em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



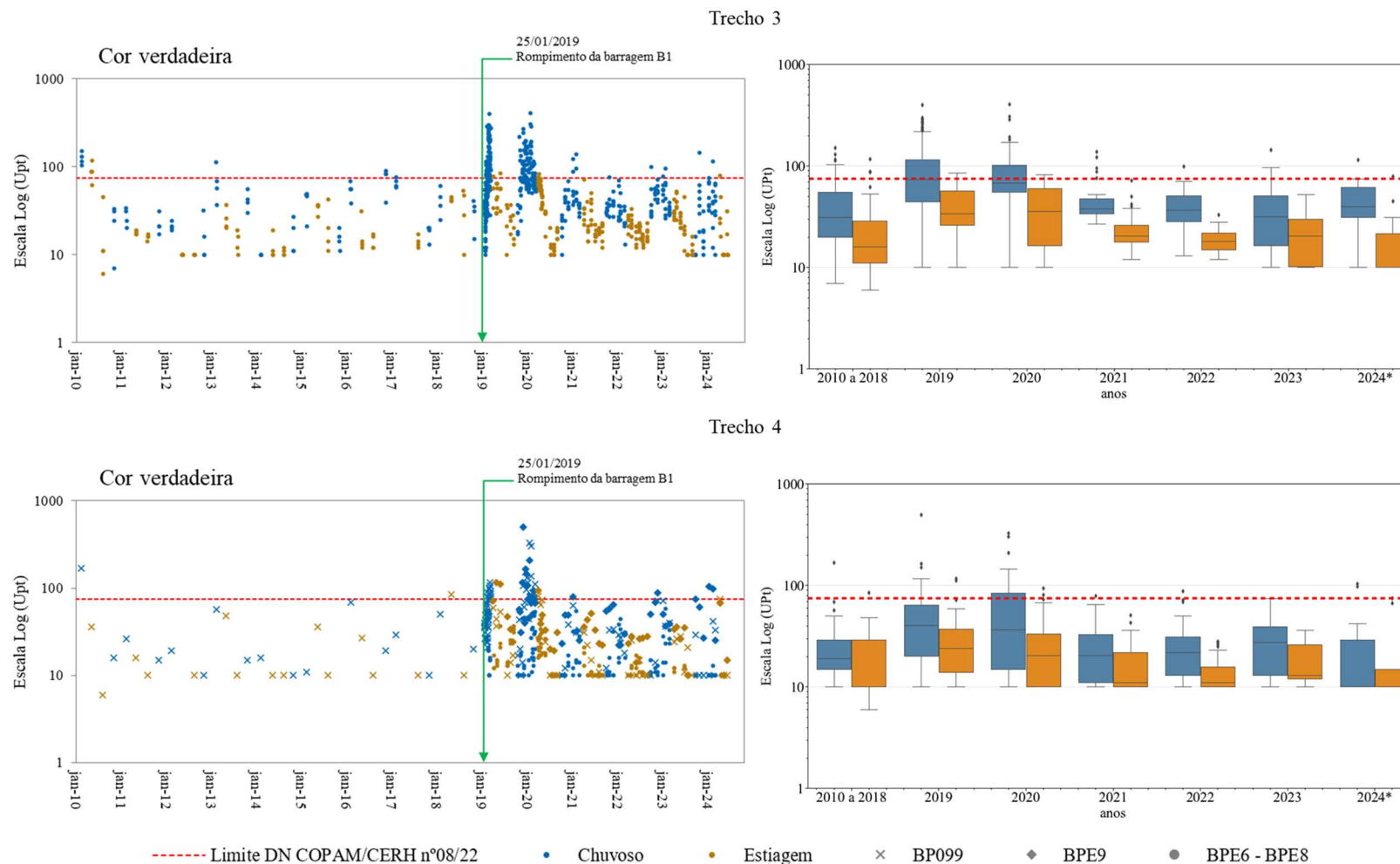
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 19 - Resultados de cor verdadeira em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 20 - Resultados de cor verdadeira em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Sólidos em suspensão totais

Os sólidos em suspensão são pequenas partículas que possuem uma fração mineral ou inorgânica e outra orgânica que se encontram suspensas na água. A alta concentração de material em suspensão compromete a qualidade da água, influenciando diretamente sua turbidez, salinidade e dureza. Esses níveis variam significativamente ao longo do tempo e do espaço, sendo influenciados por fatores como dinâmica da água, constituição de fundo, características das margens do meio hídrico e condições climáticas. Um outro aspecto importante a ser levado em conta é que em 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 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.

A Figura 21 e Figura 22 apresenta os resultados dos sólidos em suspensão totais, no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos cinco anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA, considerando todos os trechos citados anteriormente ao longo do rio Paraopeba.

No trecho 1, a partir de 2020 verificou-se que a maioria dos resultados no período chuvoso encontram-se acima do limite de 100 mg/L. Apesar de algumas oscilações, para o período seco, os resultados ficaram abaixo do limite da legislação.

Já no trecho 2, verifica-se um aumento expressivo na concentração de sólidos suspensos no período chuvoso, a partir do rompimento das barragens. Os resultados no período chuvoso, em sua maioria, excedem o limite de 100 mg/L e as medianas ainda permanecem acima do esperado para a série histórica de monitoramento. Por outro lado, no período de estiagem, com algumas exceções, as amostragens realizadas possuem concentrações abaixo do limite da legislação e possuem pouca oscilação comparadas aos resultados da série histórica do Igam.

No trecho 3, verifica-se que entre 2010 e 2018, embora a maioria dos resultados nos períodos chuvoso e seco se apresentarem abaixo do limite estabelecido pela legislação, houve registros de violações ao limite legal. A partir de 2019 observou-se o incremento das

concentrações de sólidos suspensos no período chuvoso, com maioria dos resultados acima de 100 mg/L, em relação a série histórica do Igam. No período seco, a concentração de sólidos suspensos nos anos subsequentes ao rompimento das barragens oscilou em relação à série histórica, mas a maioria dos resultados encontrou-se abaixo do limite estabelecido na legislação.

Por fim, o trecho 4 apresentou resultados, de forma geral, próximos da série histórica (2010 a 2018) e, sua grande maioria, encontra-se dentro do limite imposto pela DN 08/2022. Contudo, foram registradas algumas concentrações com valores extremos, acima do limite legal, durante os anos subsequentes ao rompimento das barragens, especialmente na estação de amostragem localizada no afluente do rio Paraopeba, o ribeirão dos Gomes (BPE9).

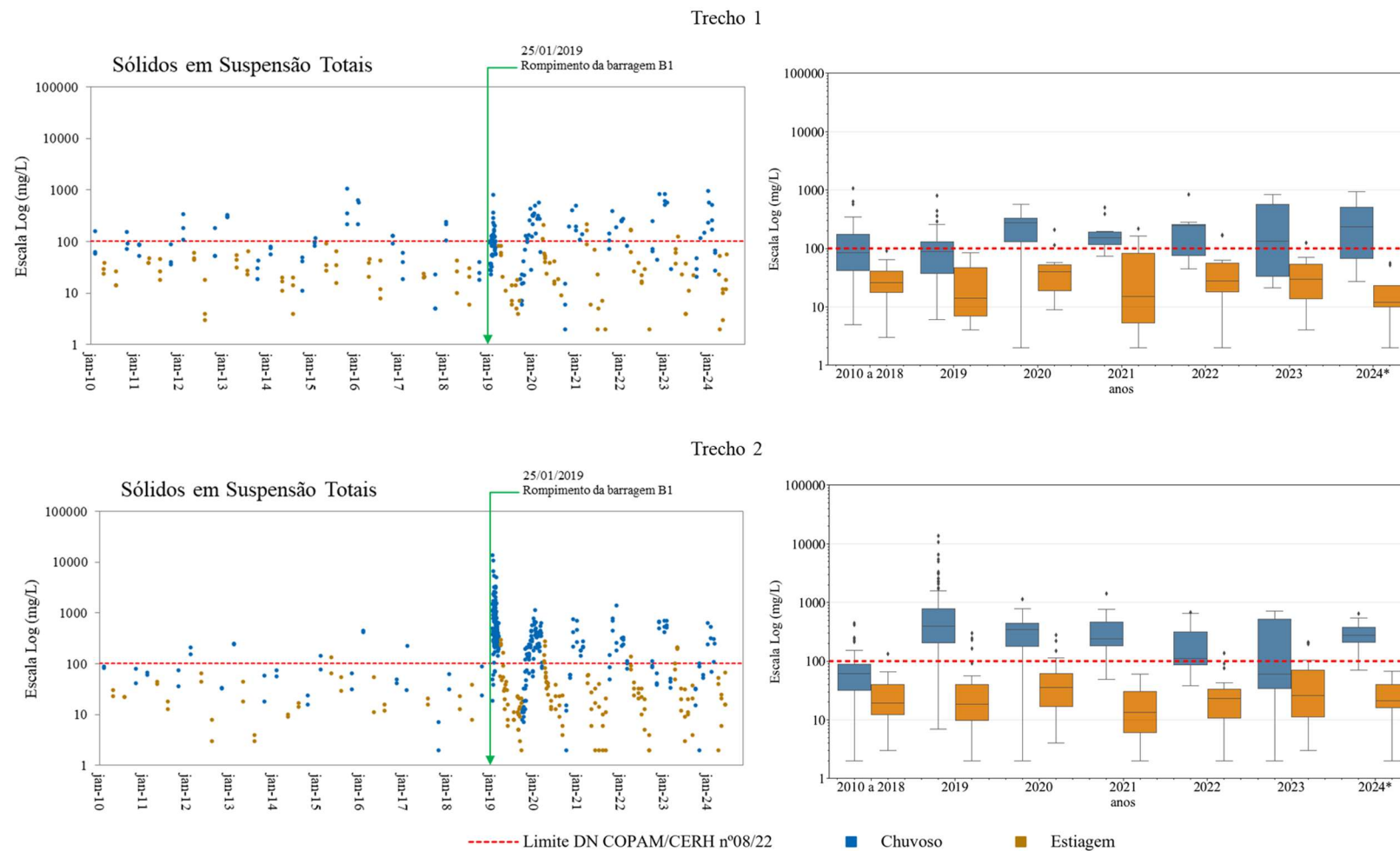
Nota-se que os resultados apresentaram comportamento semelhante ao observado para turbidez, com valores superiores ao limite de Classe 2 (100 mg/L), sobretudo no período chuvoso. As maiores concentrações de sólidos em suspensão foram verificadas no ano de 2019, como mostrado na Tabela 4, em comparação com os anos seguintes, principalmente no trecho mais impactado pelo desastre, trecho 2, seguido do trecho 3. O valor máximo registrado foi no município de Mário Campos/BP068 (13.688 mg/L)

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

Trecho	Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
2	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
3	BP072	18/02/2019	Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	4.984	Chuvoso
2	BP070	27/02/2019	Sólidos em Suspensão Totais	mg/L	5.000	Chuvoso

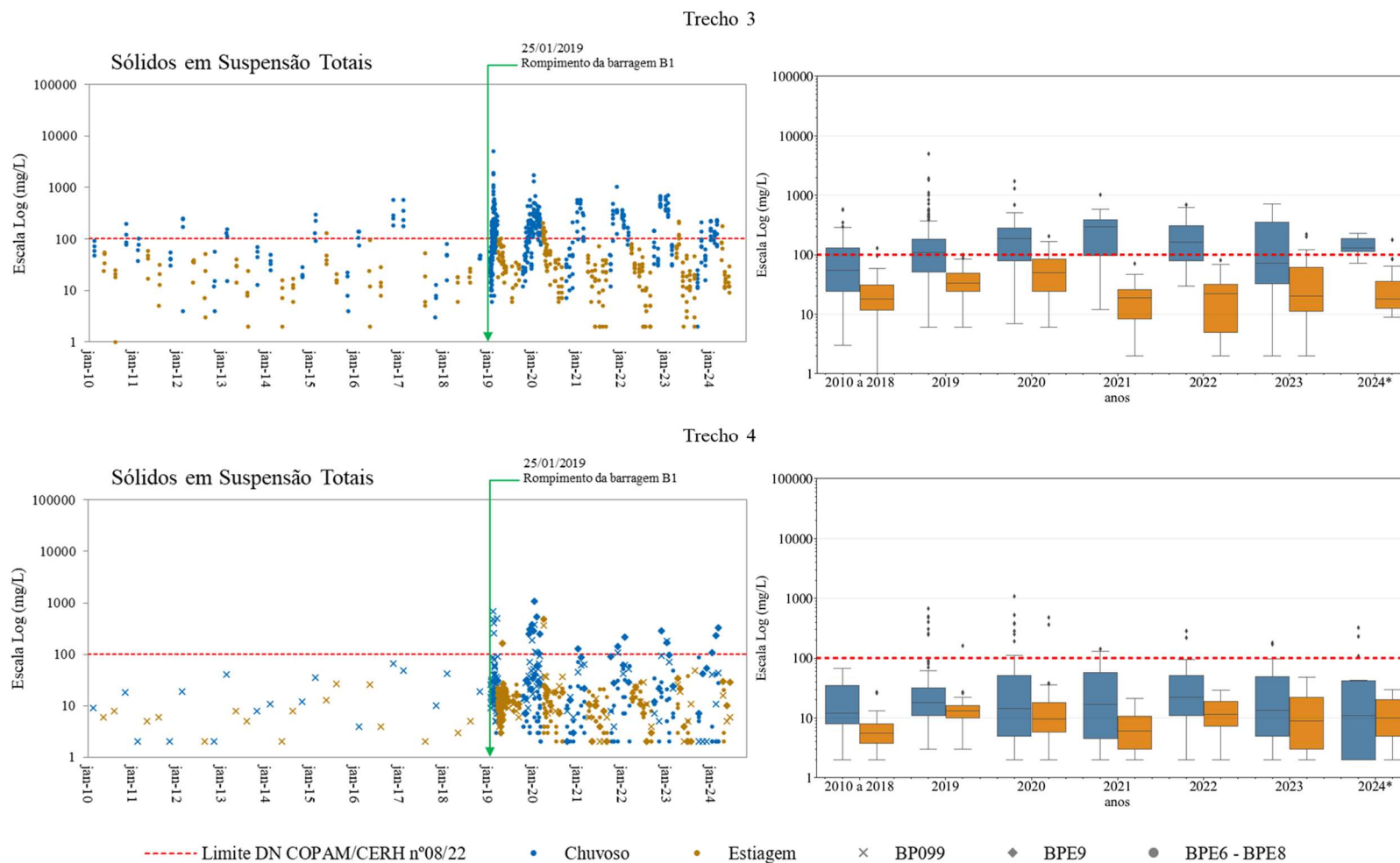
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 21 - Resultados de sólidos em suspensão totais em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 22 - Resultados de sólidos em suspensão totais em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 B-I. 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 B-I, B-IV e B-IV-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 23 e Figura 24 apresentam os resultados de ferro dissolvido, no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos cinco anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A.

É possível observar na análise dos resultados do trecho 1, que apesar dos pontos estarem a montante do desastre, a concentração de ferro dissolvido a partir do ano de 2019 aumentou tanto no período chuvoso quanto no período de estiagem. Com exceção da estiagem de 2021,

os resultados se apresentaram majoritariamente acima do limite legal. Em 2024, verificou-se que a mediana dos resultados no período chuvoso se aproximou da série histórica do Igam. Esse comportamento não foi verificado no período de estiagem, que apresentou a maior mediana da série avaliada.

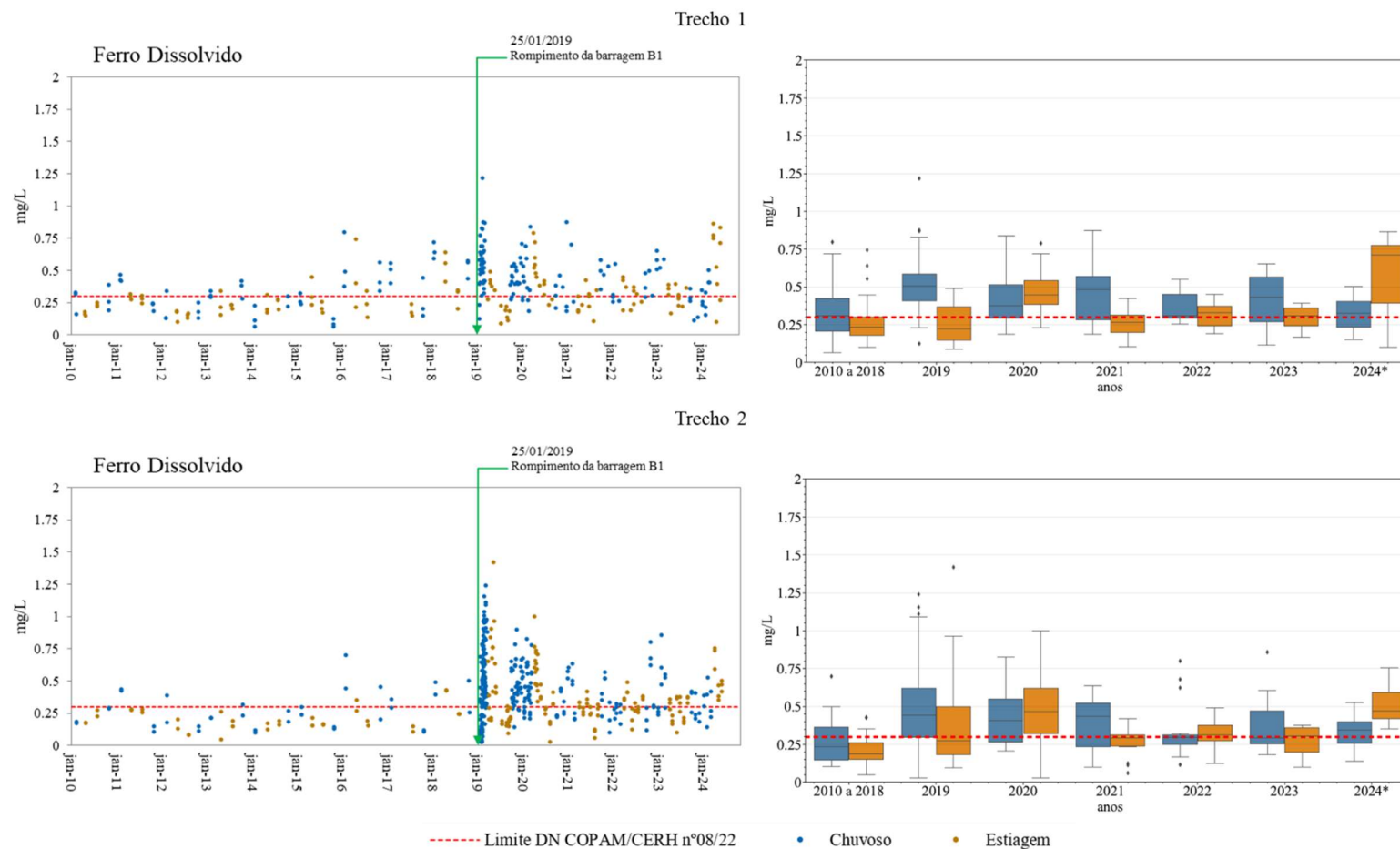
No trecho 2, verificou-se que a maioria das violações (valores superiores a 0,3 mg/L) ocorreu no período chuvoso dos anos 2019, 2020 e 2021. Nos anos de 2022 e 2023, apesar das violações, observou-se que as medianas dos resultados para ambos os períodos sazonais ficaram próximas do limite estabelecido na legislação. Em 2024, a concentração de ferro dissolvido voltou a se apresentar majoritariamente superiores a 0,3 mg/L, principalmente no período seco.

No trecho 3, verificou-se um aumento expressivo das concentrações no período chuvoso dos anos 2019 e 2020. Nos anos de 2021, 2022 e 2023, apesar das violações, observou-se que as medianas dos resultados no período chuvoso ficaram próximas do limite estabelecido na legislação e, as medianas dos resultados no período de estiagem, ficaram abaixo do limite de 0,3 mg/L. Diferentemente do trecho 2, em 2024, no trecho 3 as concentrações de ferro dissolvido no período seco ficaram, em sua grande maioria, abaixo do permitido pela legislação, enquanto no período chuvoso, a maioria dos resultados foram acima do estabelecido.

No trecho 4, as concentrações se elevaram um pouco em 2019, mas desde 2020 que se assemelham a série histórica registrada pelo Igam.

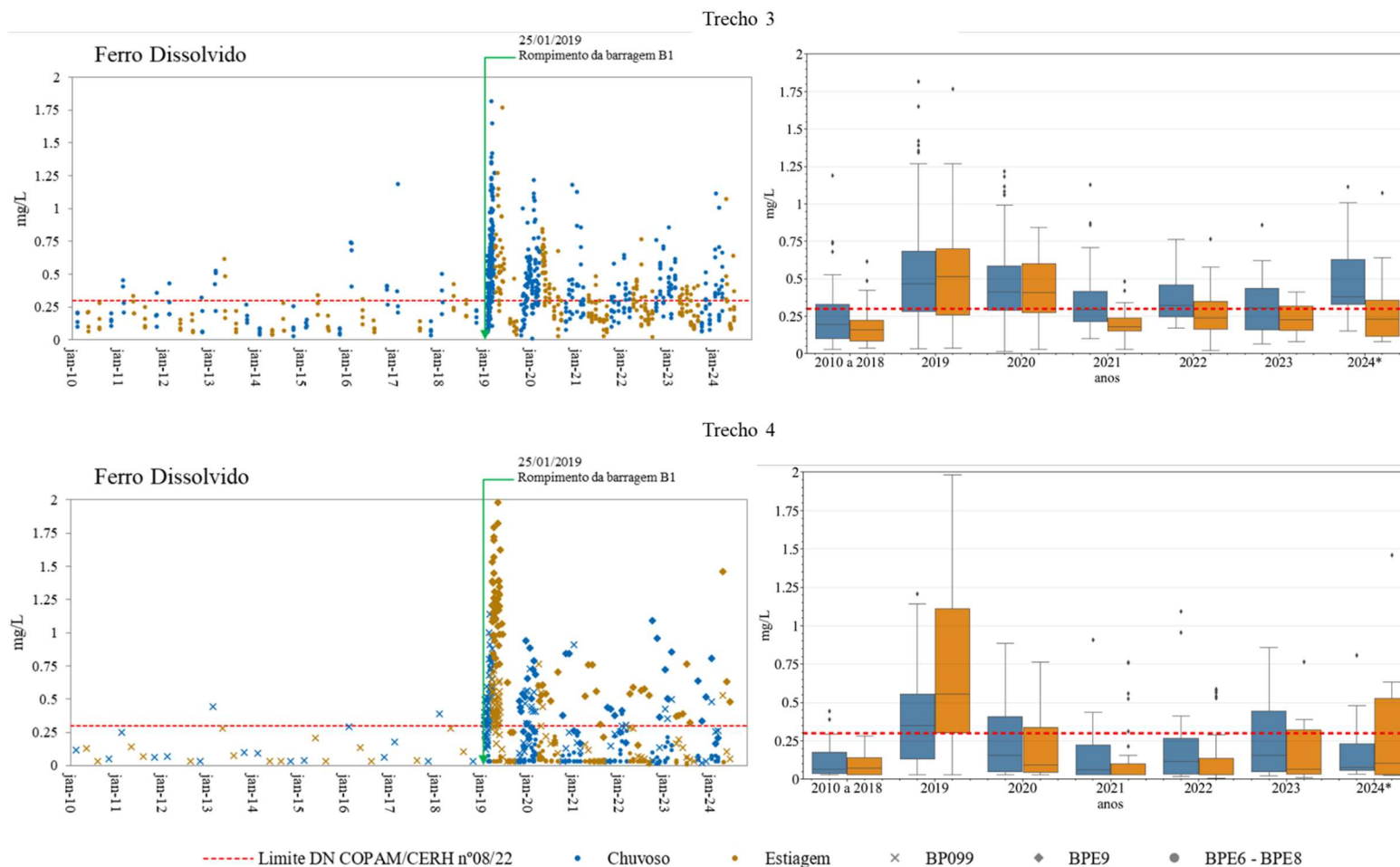
É importante ressaltar que o valor máximo obtido para esse parâmetro foi de 2,875 no município de Paraopeba/BP083 em 2022. Em 2024, o aumento das concentrações de ferro dissolvido nos trechos 1 e 2 na estiagem e no trecho 3 principalmente durante o período chuvoso pode estar relacionada à atividade de dragagem, no qual há um revolvimento do rejeito e dos sedimentos ao longo do rio Paraopeba. Ressalta-se que as análises do ano de 2024 são referentes ao período entre janeiro e junho.

Figura 23 - Resultados de ferro dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 24 - Resultados de ferro dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Na Figura 25e Figura 26 estão apresentados os resultados de ferro total nos cinco anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA, considerando todos os trechos citados anteriormente ao longo do rio Paraopeba. No caso específico deste parâmetro superficial, o monitoramento teve início imediatamente após o desastre, em janeiro de 2019, com frequência semanal nos primeiros dois meses e, posteriormente, mensal.

No trecho 1, a montante do rompimento, observou-se que desde 2019 as concentrações se mantiveram majoritariamente abaixo de 10,0 mg/L, com uma distinção evidente entre o período chuvoso, com valores superiores, e seco, com maior parte das concentrações entre 1,0 mg/L e 0,1 mg/L.

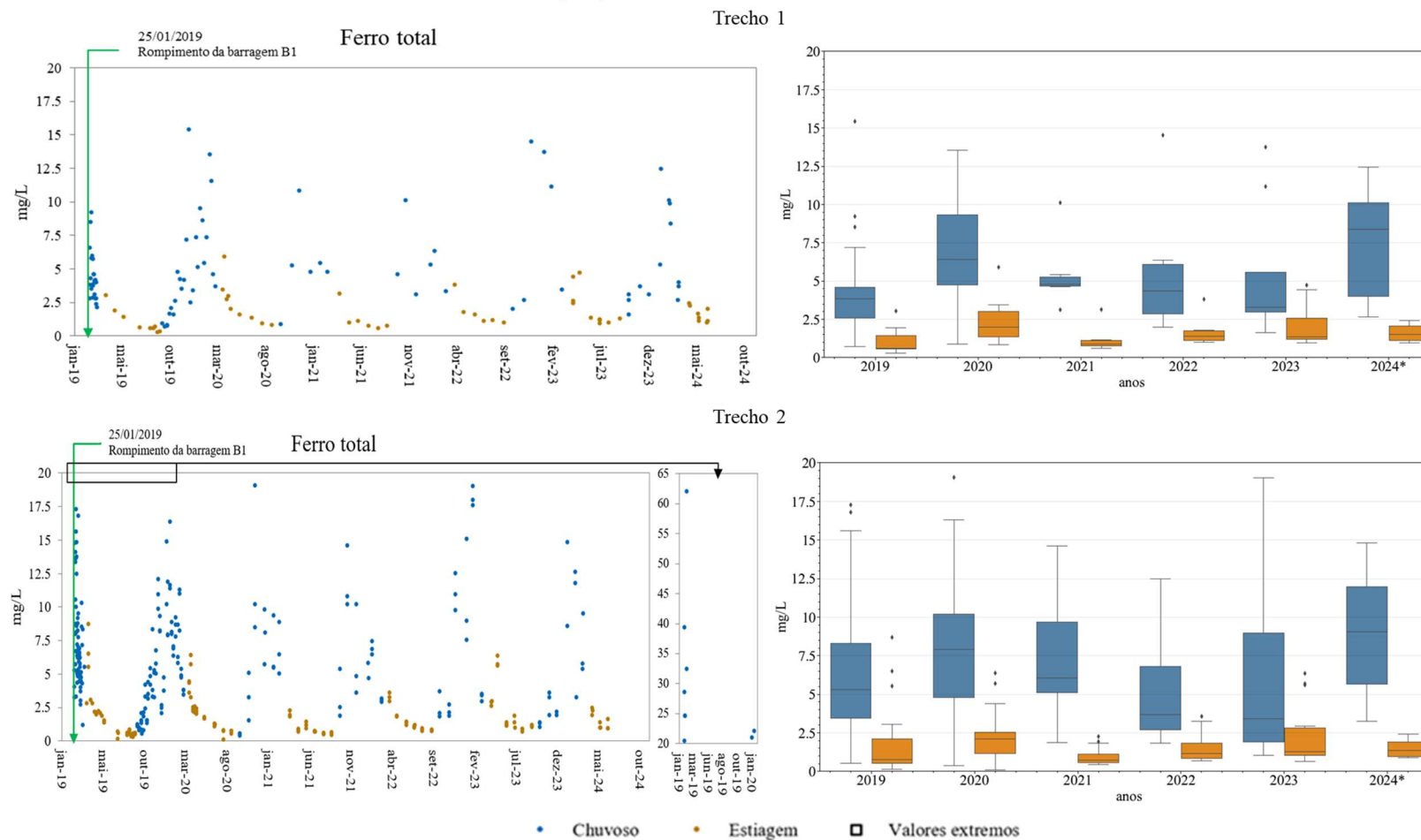
No trecho 2, observou-se o aumento das concentrações de ferro total durante quase todo o ano de 2019. Neste ano foram verificados os maiores valores, com máximos em torno de 20,0 mg/L, e extremos de próximos a 60,0 mg/L. Esta elevação nos valores ao se comparar com o trecho a montante do desastre indica o impacto dos rejeitos oriundos da Barragem B-I. A partir de 2020, verifica-se uma redução atenuada e gradativa nas concentrações de ferro total, porém com valores superiores aos monitorados a montante, com intervalo superior entre 10 mg/L e 50 mg/L, referente ao período chuvoso. Assim como no trecho 1, é possível observar a diferença entre os períodos, com os meses de seca também apresentando os menores valores. Esta distribuição de concentrações está diretamente ligada ao carregamento de aporte difuso pela chuva, onde, possivelmente, os rejeitos remanescentes do desastre presentes no solo contribuem de forma significativa.

No trecho 3, verifica-se medianas superiores ao limite estabelecido na legislação nos anos de 2019 e 2020. Apesar da queda da concentração de ferro dissolvido a partir de 2021, ainda se observa resultados que extrapolam o limite, principalmente no período chuvoso de 2024.

No trecho 4 são observadas as menores concentrações de ferro total, permanecendo em sua maioria no patamar entre 1,0 mg/L e 0,1 mg/L. A distribuição de valores com a distinção entre período chuvoso e seco não é clara como nos trechos anteriores, devido principalmente aos pontos BPE9, no Ribeirão dos Gomes, e BP099, após o barramento da UHE Retiro Baixo

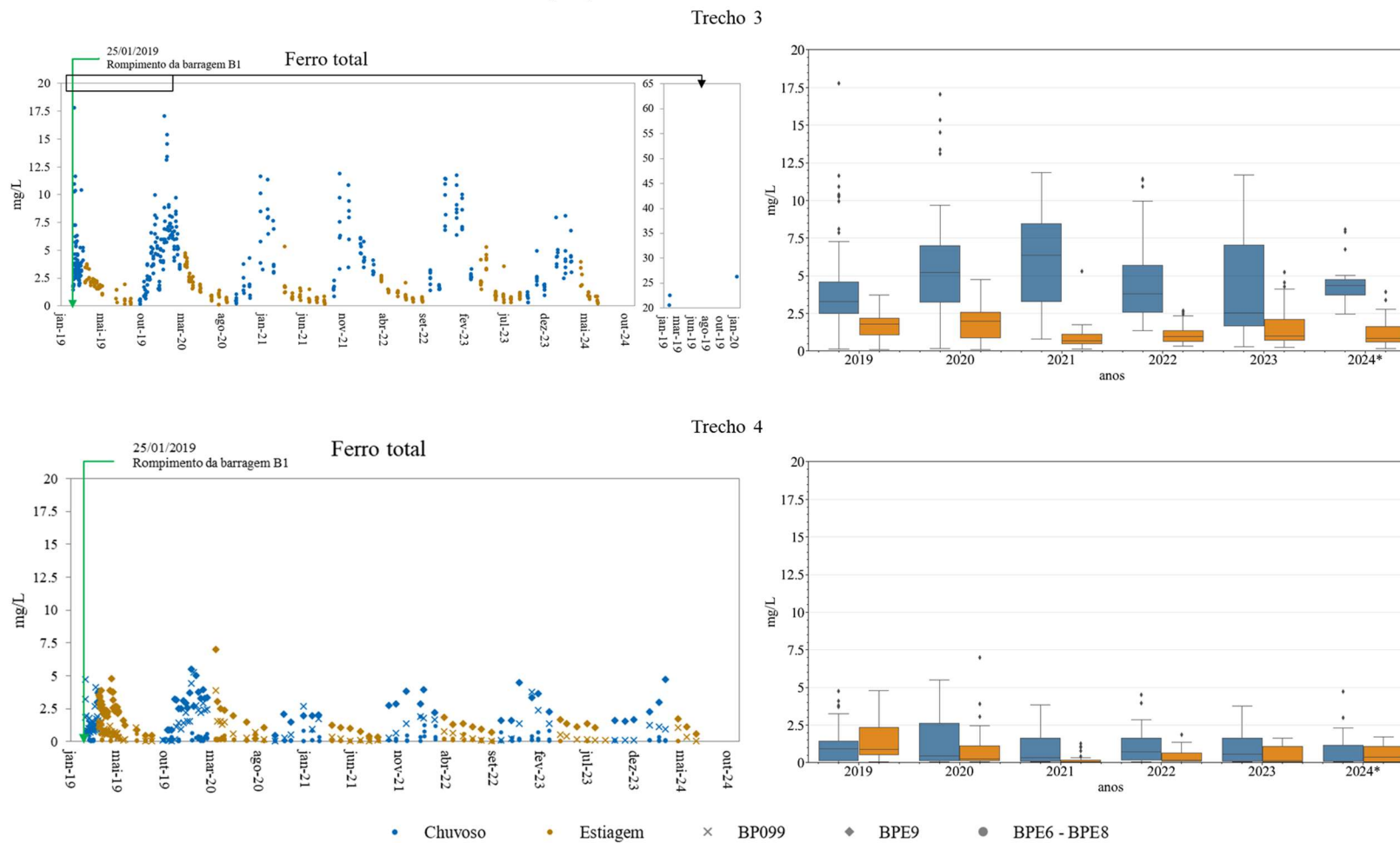
e confluência com o Ribeirão dos Gomes. Pode-se observar a influência direta dos dados monitorados no ponto BPE9 nos valores do BP099, sendo também relacionados as maiores concentração do trecho.

Figura 25 - Resultados de ferro total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2019 e 2024 nos trechos 1 e 2, com destaque para os valores extremos alcançados nos anos de 2019 e 2020 no trecho 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 26 - Resultados de ferro total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2019 e 2024 nos trechos 3 e 4, com destaque para os valores extremos alcançados nos anos de 2019 e 2020 no trecho 3



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 B-I, 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 27 e Figura 28 apresentam os resultados de manganês total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos cinco anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A (janeiro de 2019 a junho de 2024), considerando os pontos de monitoramento ao longo do rio Paraopeba. Os valores extremos foram registrados nos anos de 2019 e 2020 (Tabela 5).

No trecho 1, a montante do rompimento, verifica-se que entre os anos de 2010 e 2018, a maioria dos resultados já se encontravam acima do limite de 0,1 mg/L estabelecido pela DN 08/2022. A partir de 2019, verificou-se que no período chuvoso de todos os anos a grande maioria dos resultados estão concentrados acima do limite. Para o período seco, verifica-se uma redução nas concentrações em relação ao período chuvoso, mas, salienta-se que, a maioria dos resultados também se encontra acima de 0,1 mg/L.

Nos trechos 2 e 3, região mais impactada pelo desastre, verificou-se altas concentrações de manganês nos anos de 2019 e 2020. Entre 2021 e 2024, verifica-se um comportamento similar das concentrações que, apesar de reduzirem, ainda estão acima do limite estabelecido pela legislação e acima dos registros da série histórica do Igam (2010 a 2018). Ressalta-se que no trecho 3 a partir de 2021, durante o período seco, verificou-se uma redução das concentrações, com medianas abaixo do limite estabelecido pela legislação, exceto no ano de 2023.

O trecho 4, apesar de ter apresentado violações, principalmente no período chuvoso, entre 2019 e 2024, concentrou seus resultados abaixo do limite de 0,1 mg/L estabelecido na

legislação. Destaca-se nesse trecho que, todas as medianas dos anos posteriores ao desastre se apresentaram abaixo da mediana da série histórica do Igam.

Nota-se que, durante o monitoramento apresentado, os valores das concentrações reduziram, porém ainda se encontram acima dos registros da série histórica do Igam nos trechos 1 a 3. Os pontos localizados no trecho 4 (BPE6, BPE7, BPE8 e BP099) permaneceram abaixo do limite legal no ano de 2024.

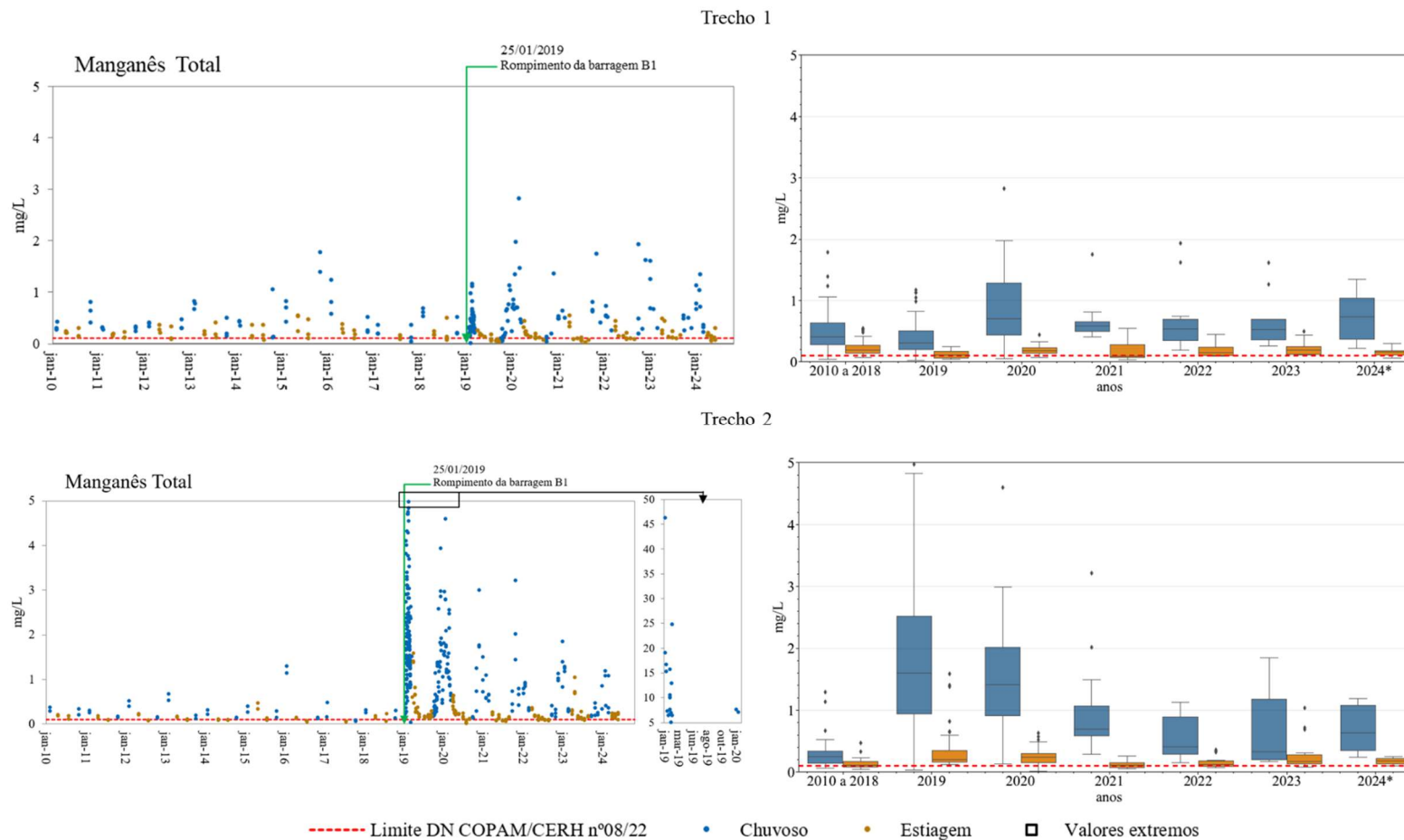
Na Tabela 5 apresentada a seguir, observa-se que o primeiro período chuvoso, logo após o rompimento das barragens da Vale S.A, os registros de manganês se mostraram os mais altos em quase todo monitoramento. Esse comportamento é o mesmo apresentado pelos parâmetros de turbidez e os sólidos totais em suspensão. 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 também consequência dessa influência.

Tabela 5 - Valor extremo de manganês total obtido no ano de 2019 e 2020

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

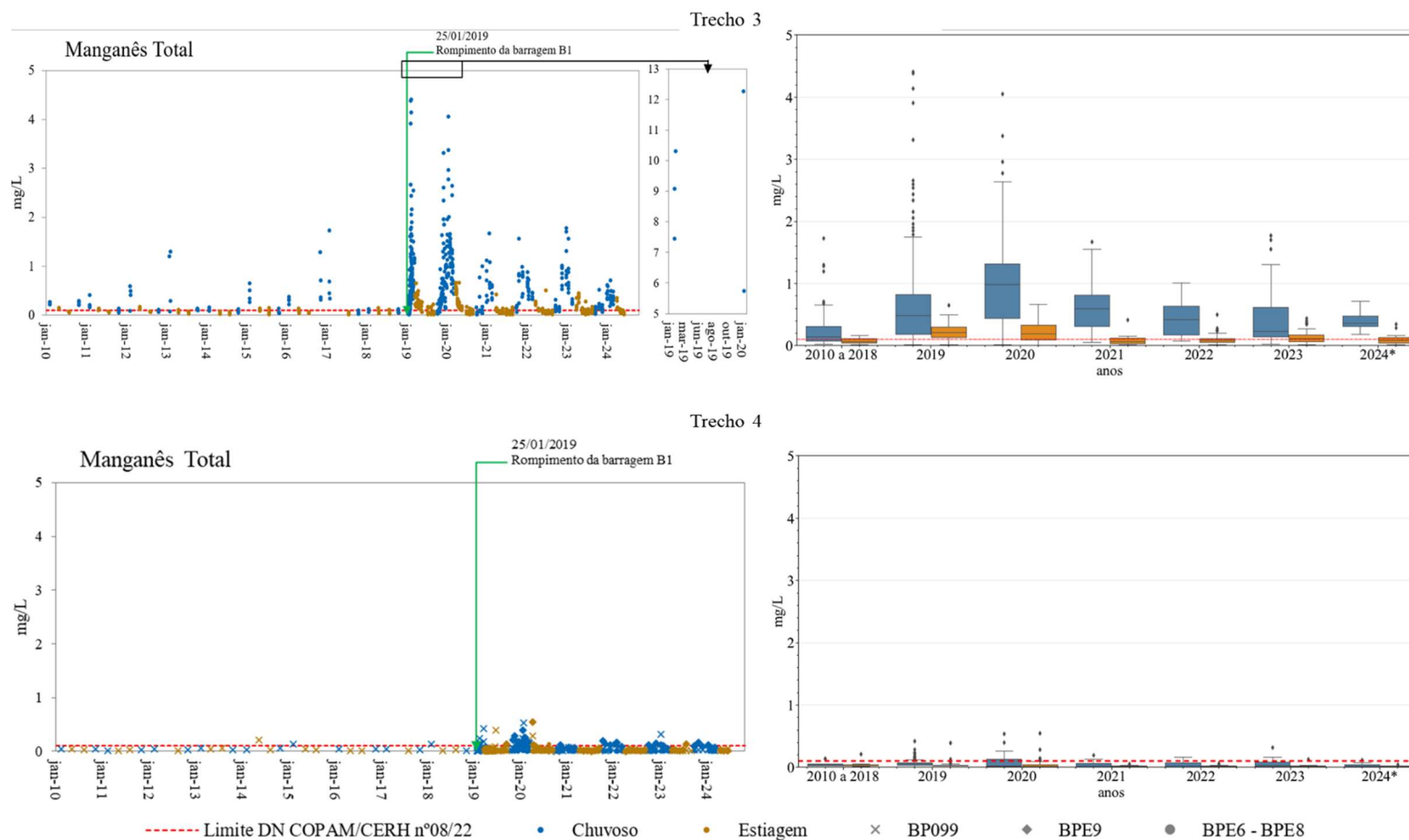
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 27 - Resultados de manganês total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2, com destaque para os valores extremos alcançados nos anos de 2019 e 2020 no trecho 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 28 - Resultados de manganês total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4, com destaque para os valores extremos alcançados nos anos de 2019 e 2020 no trecho 3



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Alumínio dissolvido

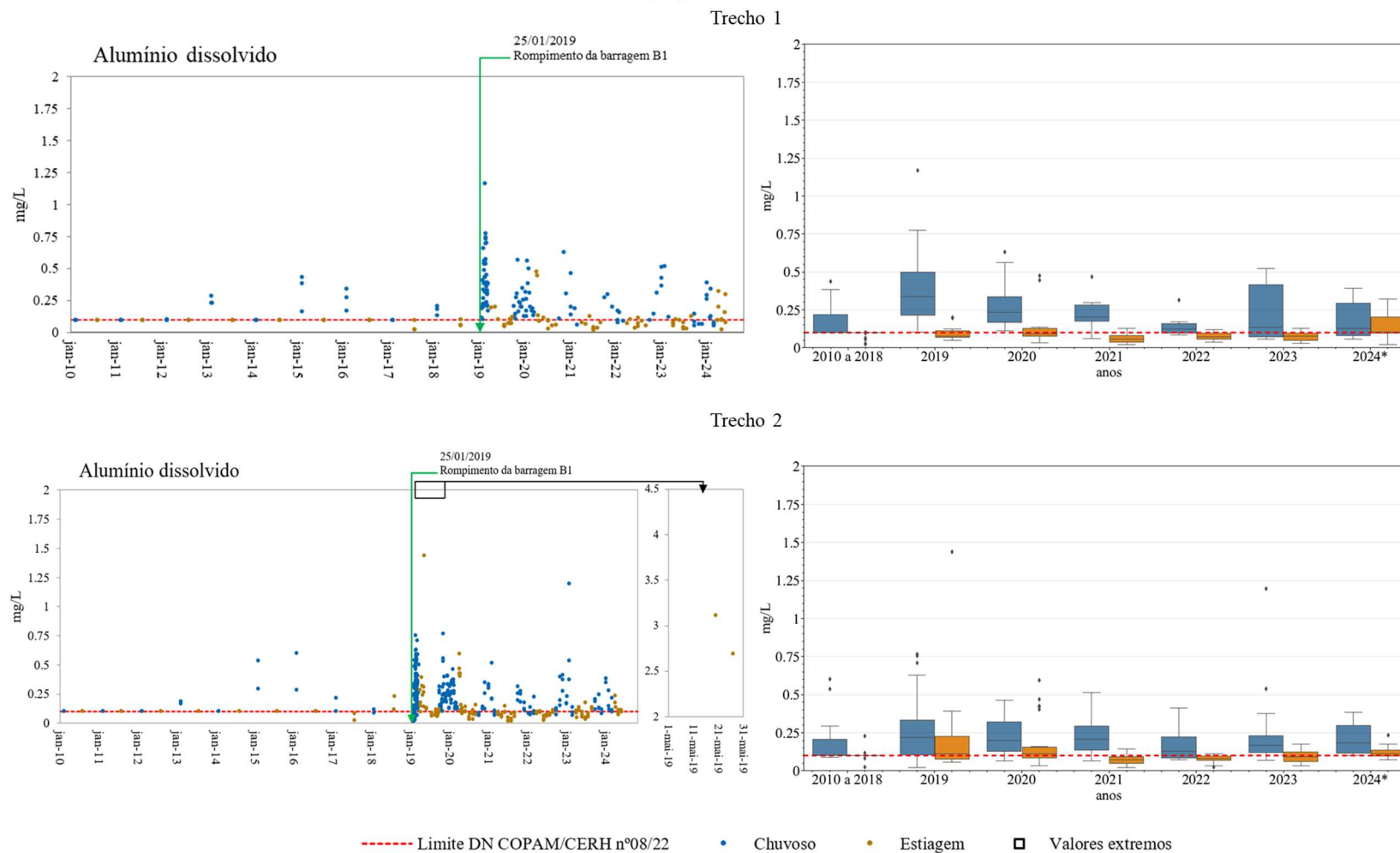
O alumínio (Al) é o terceiro metal mais abundante na crosta terrestre, estando presente em grandes quantidades no solo e na água. Em pH ácido, ocorre um aumento de sua solubilidade e, conseqüentemente da sua biodisponibilidade.

A Figura 29 e Figura 30 apresentam os resultados de alumínio dissolvido no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos cinco anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A (janeiro de 2019 a junho de 2024), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

Nos trechos 1, 2 e 3 observa-se nos anos de 2019 e 2020 um comportamento elevação de concentrações no período chuvoso; nos Trechos 2 e 3 isso ocorre também no período seco. A partir de 2021 esses trechos apresentam queda de concentrações e aproximação a série histórica do Igam, com resultados majoritariamente abaixo do limite classe 2 (0,1 mg/L) na estiagem entre 2021 e 2022 para os Trechos 1 e 2. Para o Trecho 4, embora tenha ocorrido elevação dos resultados em 2019, entre 2021 e 2022 é observada expressiva redução incluindo o período chuvoso abaixo da série histórica, com manutenção de resultados na estiagem majoritariamente abaixo do limite até 2024.

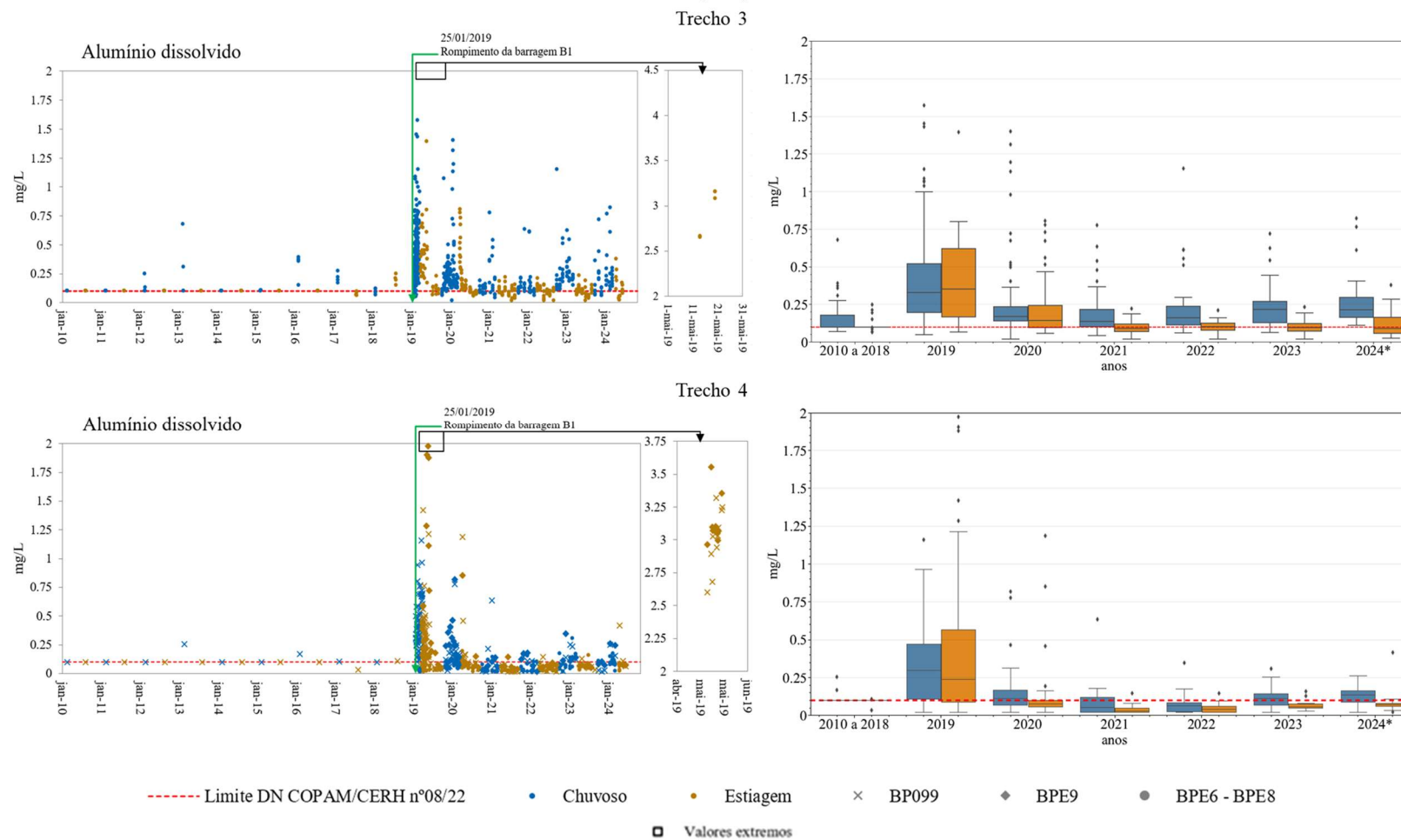
Em resumo, observa-se que esse parâmetro já apresentava violações ao limite estabelecido pela legislação ao longo de toda a calha do Paraopeba incluindo a no trecho 1 (a montante do rompimento). Observa-se também que para 2023 e 2024 as medianas referentes ao período chuvoso se apresentam acima do limite e do histórico do Igam nos quatro trechos avaliados.

Figura 29 - Resultados de alumínio dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2, com destaque para os valores extremos alcançados no ano de 2019 no trecho 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 30 - Resultados de alumínio dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4 com destaques para os valores extremos alcançados no ano de 2019



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Chumbo Total

A presença de metais traço em ecossistemas aquáticos pode ser atribuída a fontes naturais (processos geológicos) e a fontes antropogênicas. As concentrações de chumbo total na bacia do rio Paraopeba já apresentavam registros históricos acima do limite permitido pela legislação vigente, ficando mais elevadas logo após o rompimento das barragens. 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. É importante mencionar que, o chumbo total, apesar de não fazer parte da composição do rejeito, pode ter sua presença na água 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.

A Figura 31 e Figura 32 apresentam os resultados de chumbo total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A (janeiro de 2019 a junho de 2024), considerando todos os pontos ao longo do rio Paraopeba.

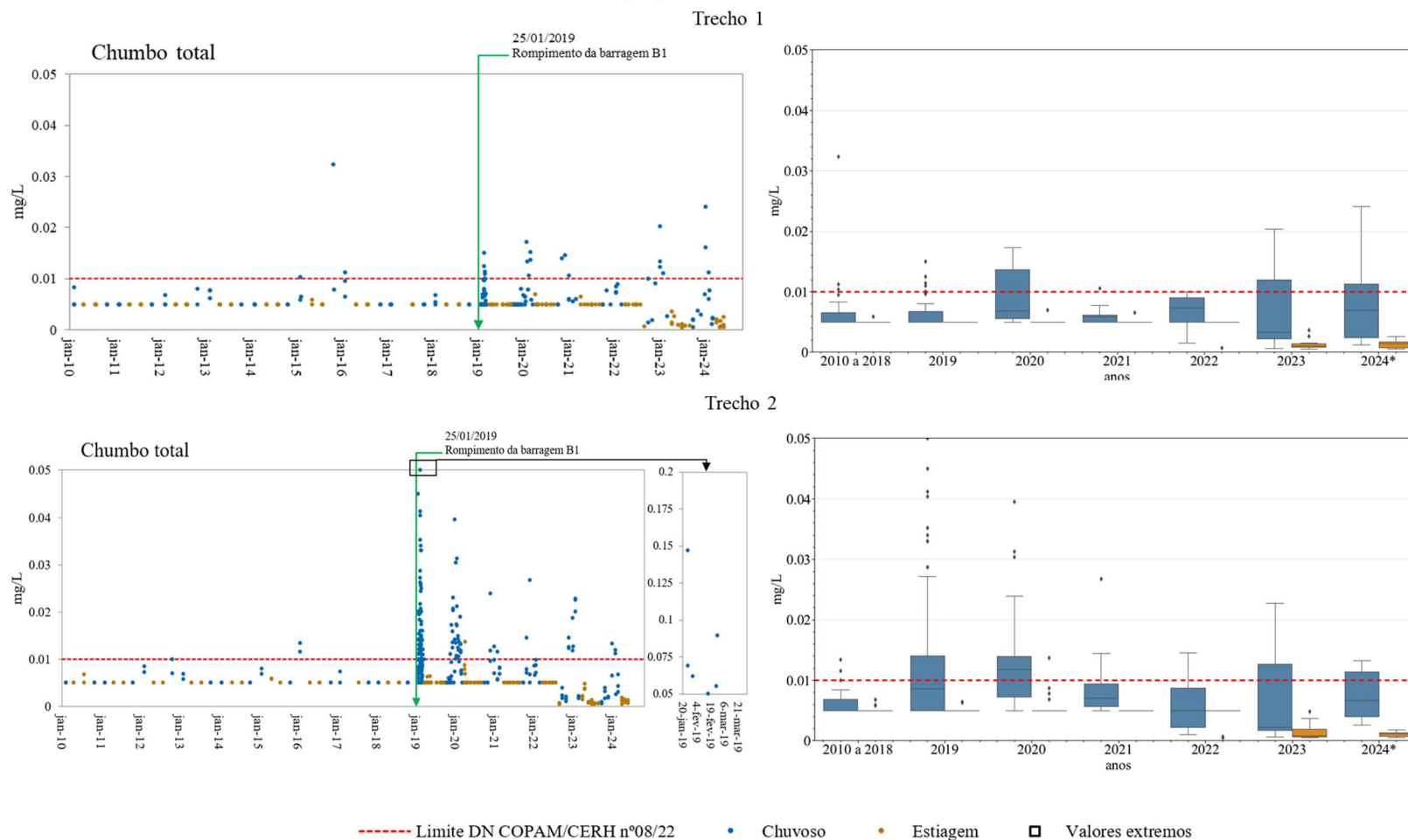
No trecho 1, que está a montante do rompimento da B-I, é possível observar violações de chumbo total acima dos limites da legislação apenas nos períodos chuvosos.

No trecho 2, que corresponde as estações monitoradas após o rompimento da B-I (2019) observa-se um aumento significativo de chumbo total e inclusive acima dos máximos históricos da série histórica do Igam, em especial, nas estações chuvosas. Embora, as medianas do gráfico box plot se encontram abaixo do limite da legislação a partir de 2021, os limites superiores ainda demonstram desconformidades até os dias atuais.

No trecho 3, já é possível observar em 2024, os resultados inferiores ao limite de 0,01 mg/L estabelecidos na legislação e à série histórica do Igam, considerando que esse parâmetro ainda era recorrente na estação chuvosa nos anos seguintes ao desastre ambiental.

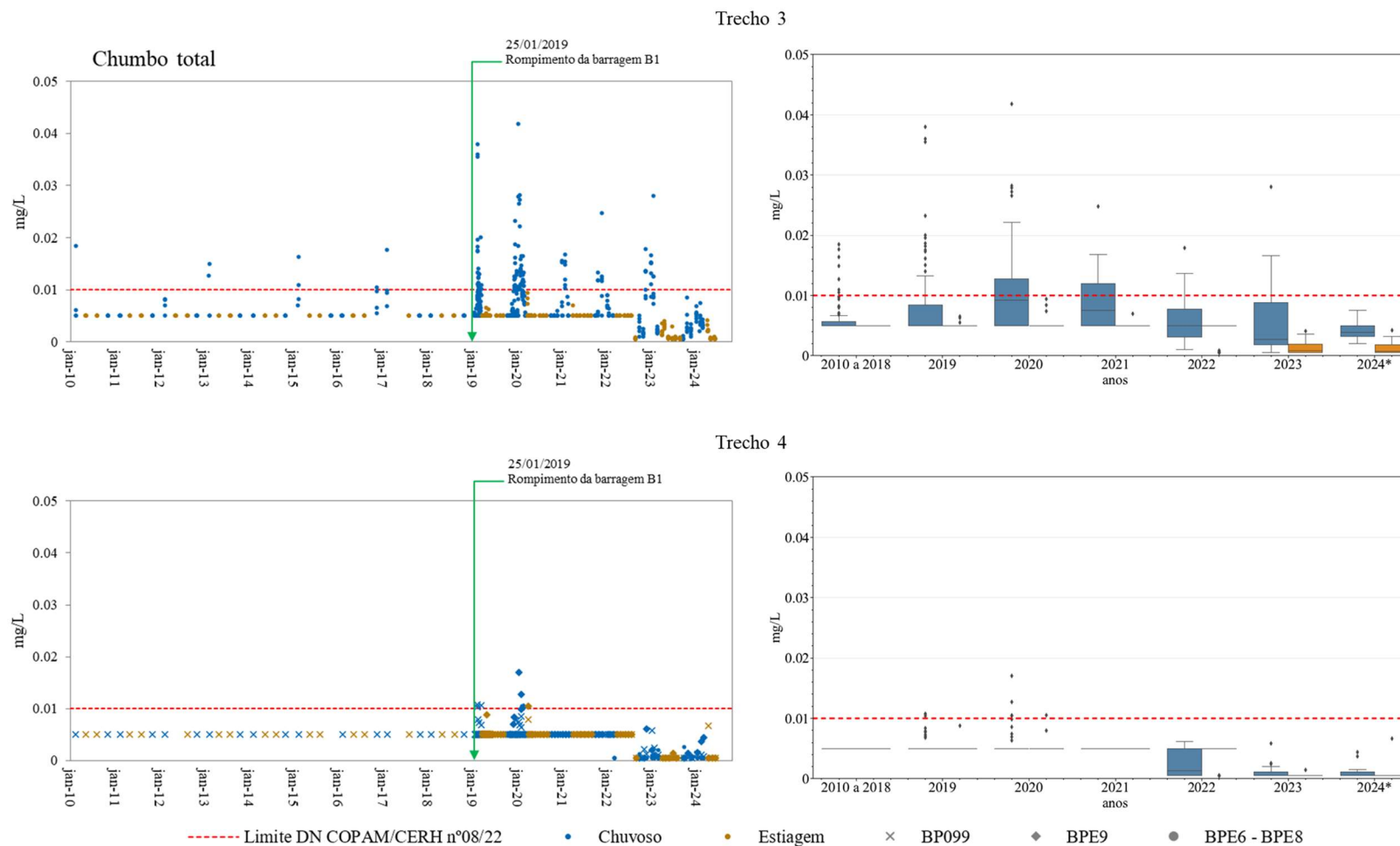
No trecho 4, tomando como referência a série histórica do Igam, esse parâmetro apresentou violações ao limite somente após o rompimento das barragens, ocorridas em 2019 e 2020, no BPE9 (ribeirão dos Gomes), sobretudo no período chuvoso.

Figura 31 - Resultados de chumbo total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2, com destaque para os valores extremos alcançados no ano de 2019 no trecho 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 32 - Resultados de chumbo total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 a 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Mercúrio Total

O mercúrio total, que não tinha sido detectado historicamente na bacia do rio Paraopeba, foi identificado nos trechos 2 e 3 em concentrações acima do permitido pela legislação, logo após o rompimento da barragem da B-I. 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 33 estão apresentados os resultados de mercúrio total na série histórica do Igam (2010 a 2018) e nos anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A (2019 a 2024), considerando os quatro trechos ao longo do rio Paraopeba.

Observou-se que no trecho 1 (a montante do rompimento) e no trecho 4 (a jusante da hidrelétrica de Retiro Baixo), não houve ocorrências de violações em todo o período analisado (2010 a 2024). Já nos trechos 2 e 3, em 2019, verificou-se concentrações de mercúrio acima do limite estabelecido na legislação. Esses registros de violações ocorreram nos três primeiros meses, com determinação de concentrações máximas verificadas em janeiro e fevereiro (Tabela 6). A partir de abril de 2019, todos os registros de mercúrio estiveram inferiores ao limite de quantificação do método analítico.

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

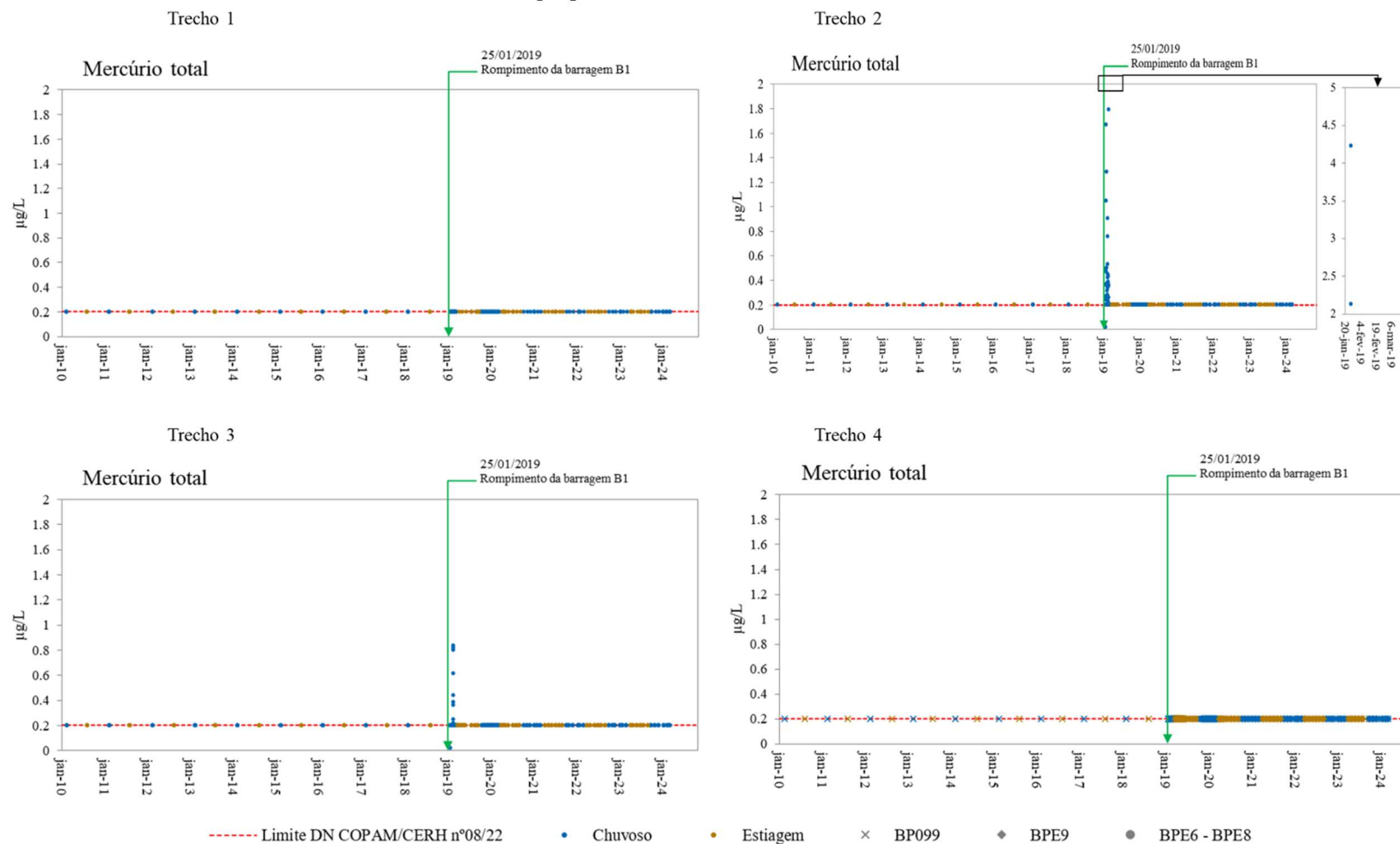
Trecho	Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
2	BPE2	26/01/2019	Mercúrio Total	µg/L	2,130	Chuvoso
2	BP068	26/01/2019	Mercúrio Total	µg/L	4,230	Chuvoso
2	BPE2	31/01/2019	Mercúrio Total	µg/L	1,050	Chuvoso
2	BP068	31/01/2019	Mercúrio Total	µg/L	1,670	Chuvoso
2	BPE2	06/02/2019	Mercúrio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

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 B-I, 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).

Figura 33 - Resultados de mercúrio total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 com destaque para os valores extremos alcançados no ano de 2019 no trecho 2



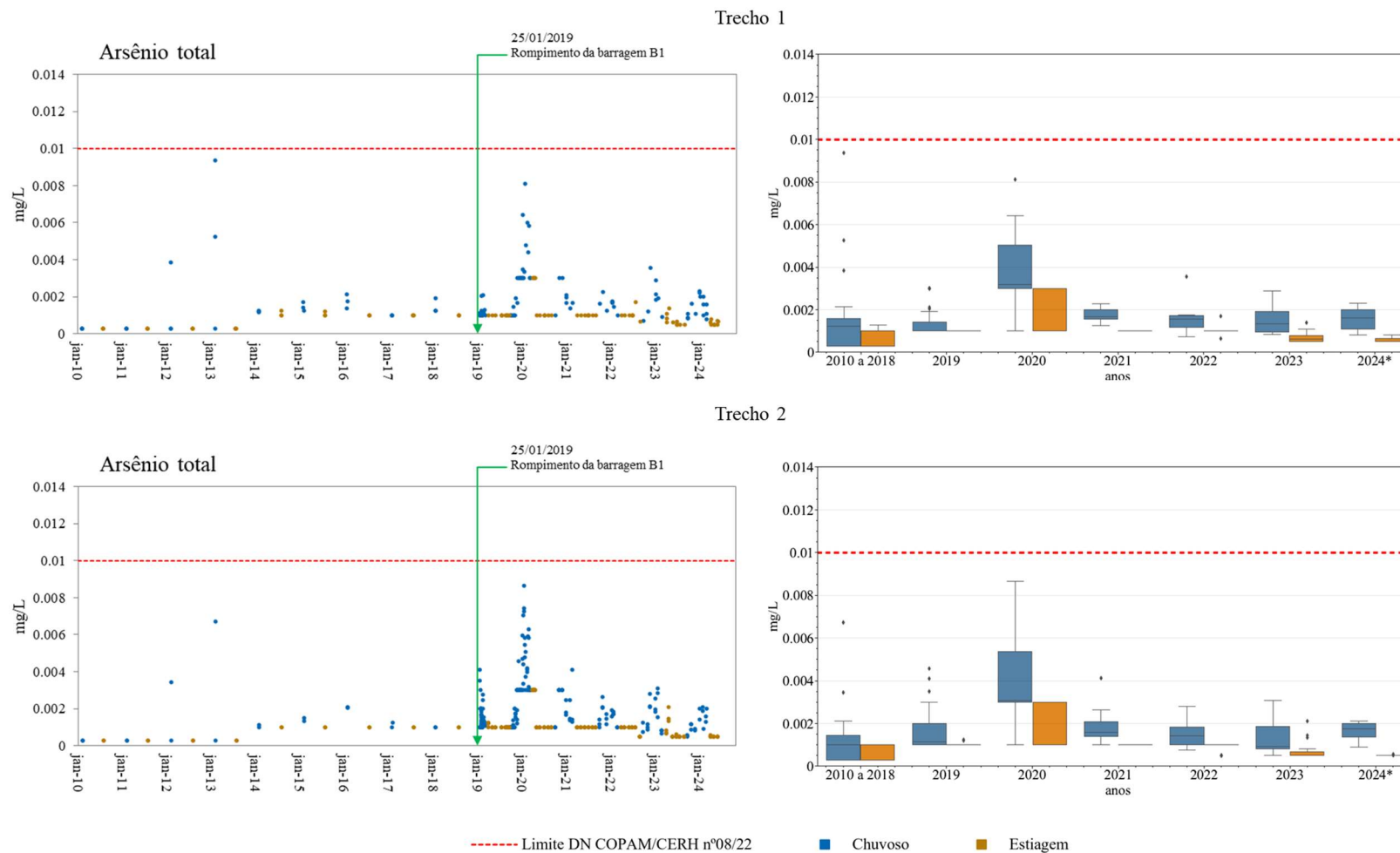
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 34 e Figura 35 apresentam os resultados de arsênio total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A (2019 a 2024).

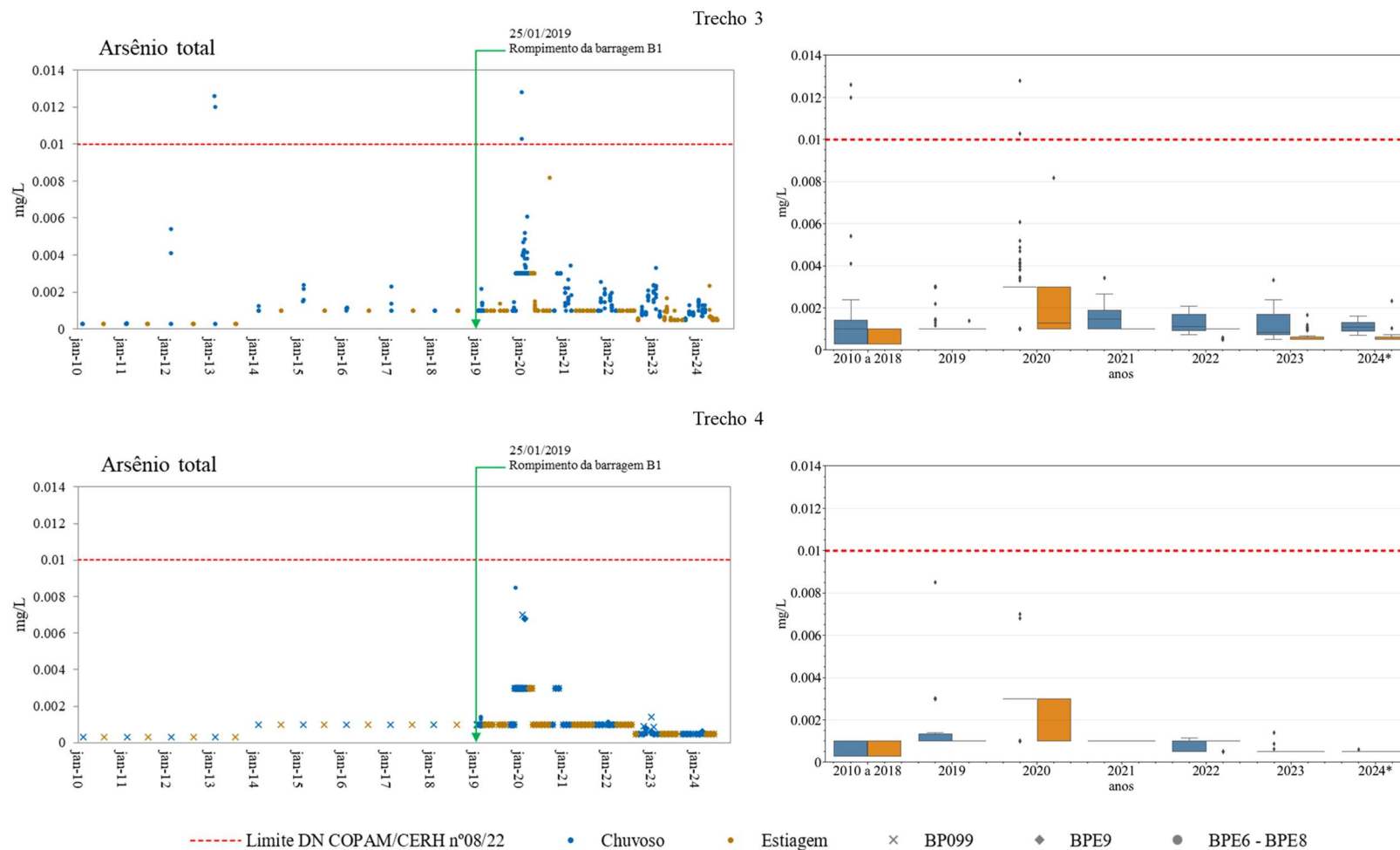
Nos trechos 1 (BP036, BP029 e BP027) e 4 (BP099, BPE6, BPE7, BPE8 e BPE9), verificou-se que não houve ocorrência de concentrações acima do limite de 0,01 mg/L em todo o período monitorado. No trecho 2 (BPE2, BP068 e BP070), identificou-se apenas uma violação do limite no período chuvoso de 2020. No trecho 3, identificou-se, no período chuvoso de 2013, registros de concentração acima de 0,01 mg/L. Identificou-se também violações pontuais no período chuvoso de 2020. Todos os demais registros estiveram em conformidade com a legislação vigente e dentro do esperado para a série histórica de monitoramento do Igam. Embora o arsênio não faça parte da composição do rejeito, se observa que, sobretudo nos Trechos 2 e 3 os dados apontam uma manutenção de resultados acima do histórico no período posterior ao desastre. Podendo essa condição decorrente ressuspensão de sedimentos durante a passagem da lama. A presença do arsênio na coluna d'água pode estar relacionada com outras atividades antrópicas.

Figura 34 - Resultados de arsênio total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 35 - Resultados de arsênio total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 36 e Figura 37 apresentam os resultados de níquel total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IV-A (janeiro de 2019 a junho de 2024), considerando os quatro trechos descritos anteriormente ao longo do rio Paraopeba.

Conforme observado nos gráficos a seguir (Figura 36 e Figura 37), os trechos 1 e 4 não apresentaram violações durante todo o período analisado. No trecho 2 verificou-se concentrações acima do limite de 0,025 mg/ estabelecido pela DN 08/2022 no período chuvoso de 2019, com seus máximos observados principalmente em janeiro e fevereiro (Tabela 7), 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). No trecho 3 verificou-se também concentrações acima do limite, porém no período chuvoso de 2020, nos pontos BP077 – Papagaios/Paraopeba e BP072 – Betim (Tabela 7). Contudo, a maioria dos resultados 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. Nos últimos anos, 2023/2024, se observa resultados abaixo da série histórica do Igam nos quatro trechos apresentados.

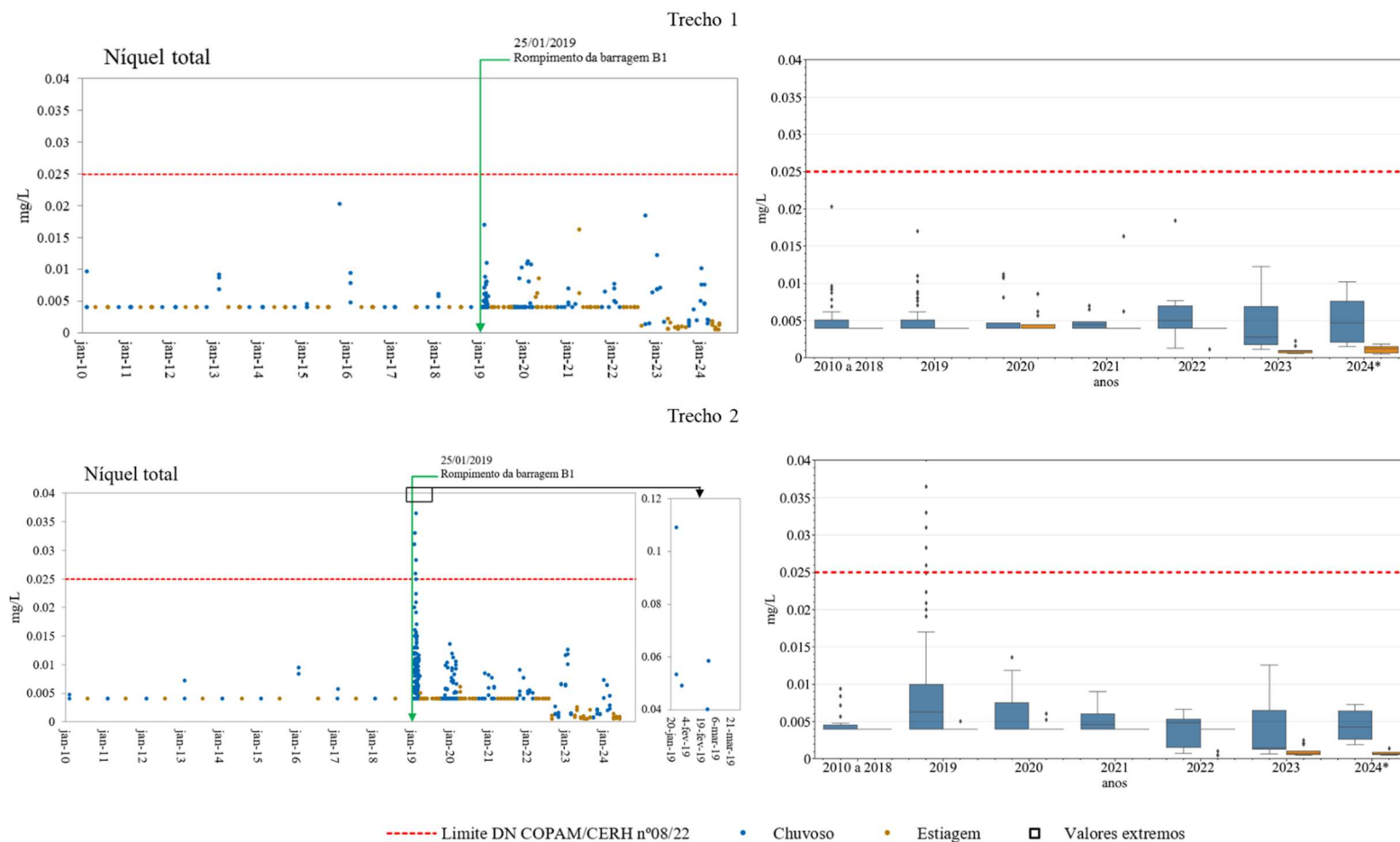
Assim como ocorreu com o chumbo e mercúrio total, a disponibilização de níquel para o corpo d'água não têm relação direta com o rejeito da B-I, uma vez que não faz parte da sua composição. Entretanto, a presença deste elemento pode estar associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante 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. Destaca-se que a partir de 2021 não são observadas violações de níquel em nenhum trecho analisado.

Tabela 7 - Valor extremo de níquel total obtido no ano de 2016, 2019 e 2020

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

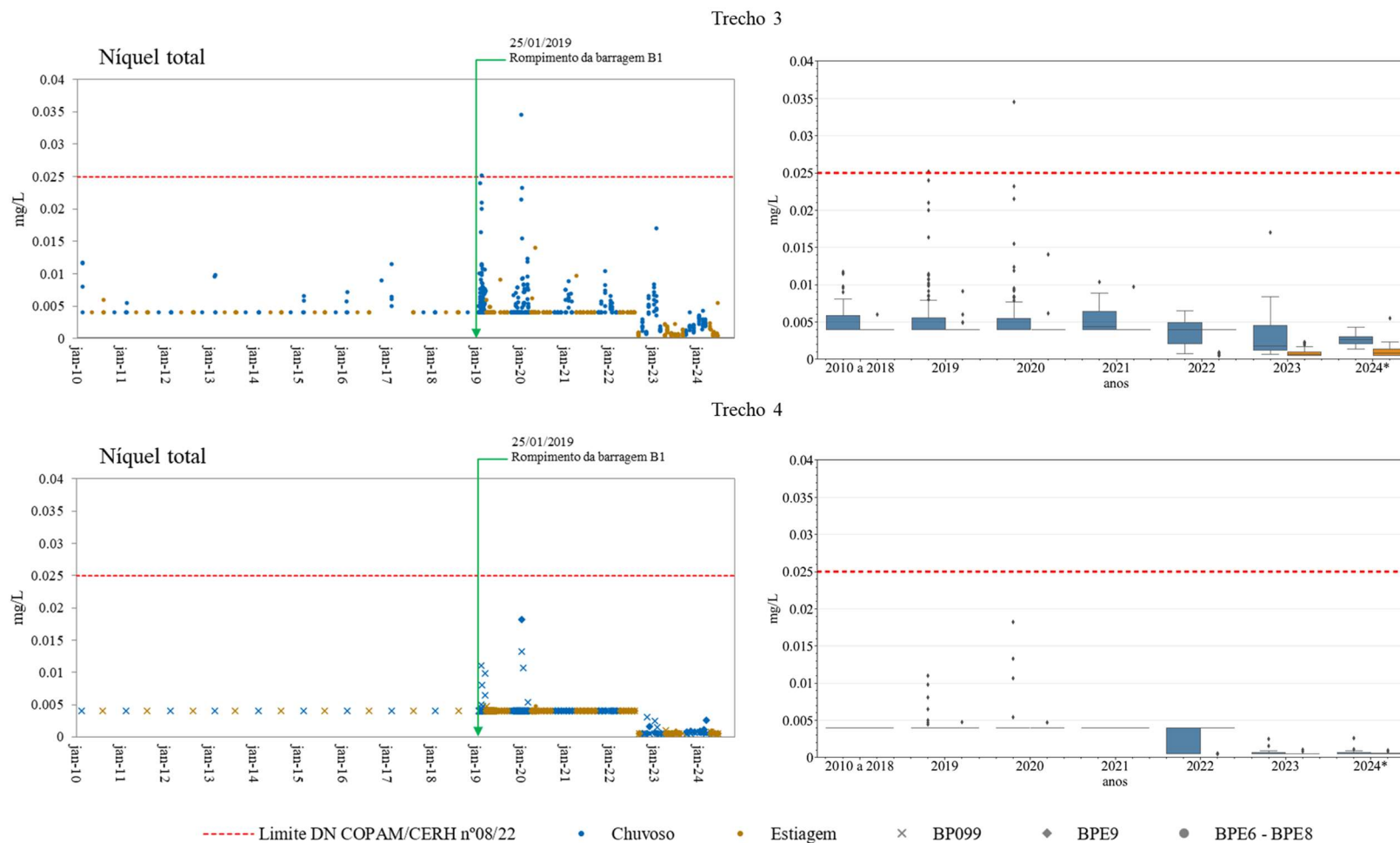
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 36 - Resultados de níquel total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2, com destaque para os valores extremos alcançados no ano de 2019 no trecho 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 37 - Resultados de níquel total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 38 e Figura 39 apresentam os resultados de zinco total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA (janeiro de 2019 a junho de 2024).

A montante do desastre (trecho 1), os resultados de zinco total não ultrapassaram o limite estabelecido pela DN 08/2022. No ano de 2019 identificou-se violações ao limite de Classe 2 somente no trecho 2. Nos trechos 3 e 4 houve ocorrência de concentrações acima do permitido no período anterior ao desastre (série histórica do Igam).

Como demonstrado nos gráficos e na Tabela 8, 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.

Em resumo, durante o período de monitoramento pós-rompimento (2020 a 2024), a maior parte dos resultados se encontraram abaixo do limite legal e em conformidade com os dados da série histórica

Tabela 8 - Valor extremo de zinco total obtido no ano de 2015, 2018 e 2019

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

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 38 - Resultados de zinco total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 1 e 2

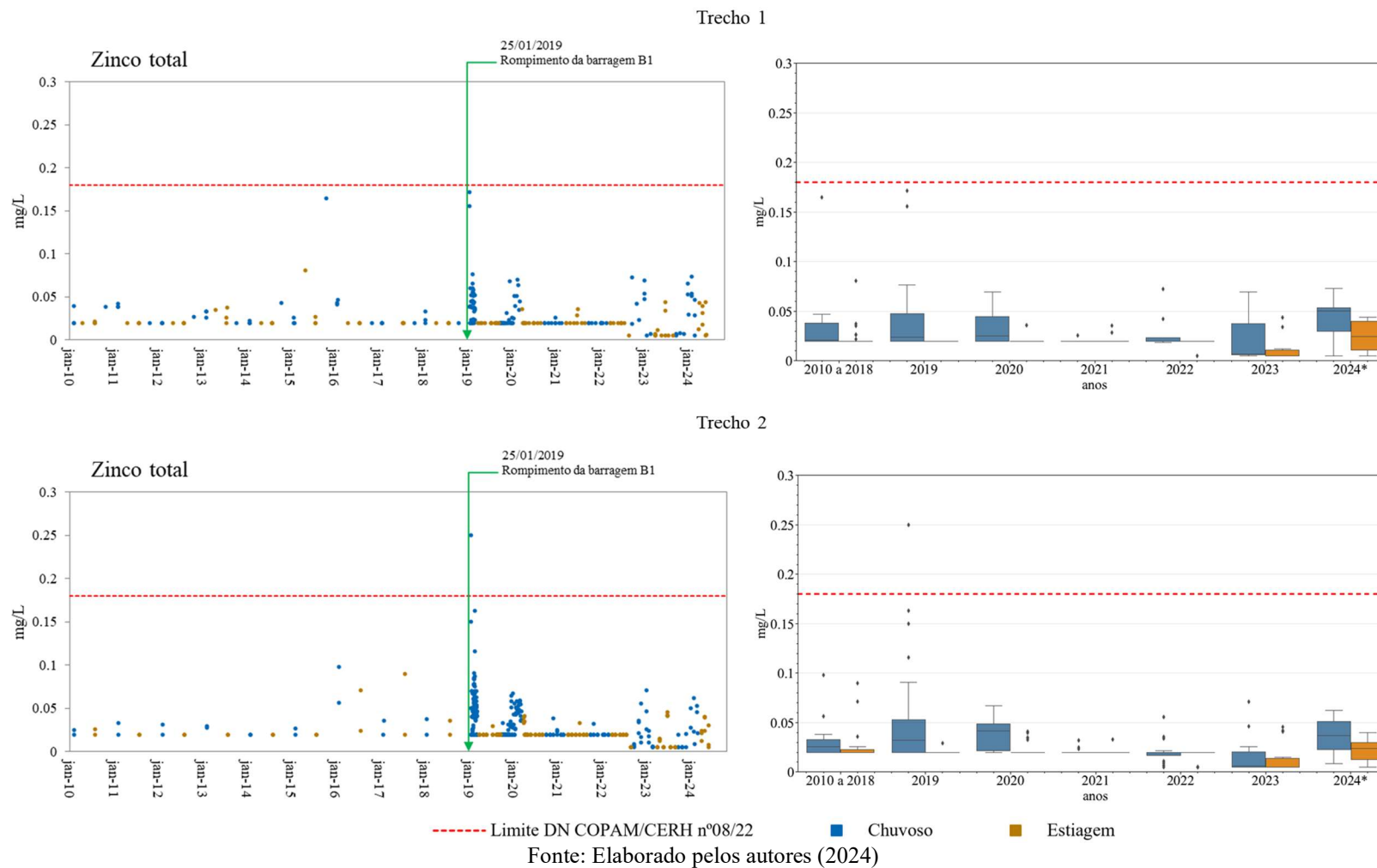
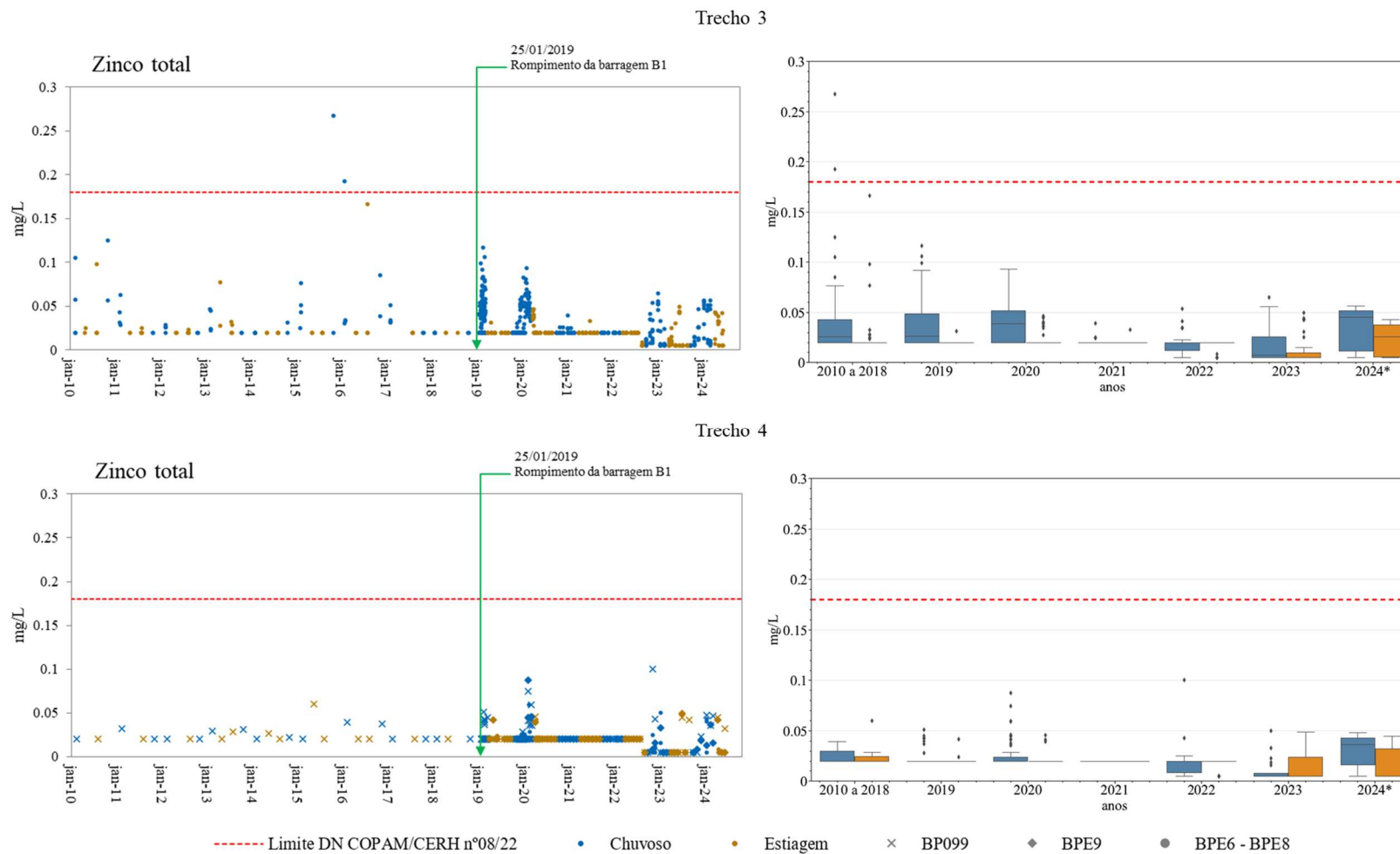


Figura 39 - Resultados de zinco total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024 nos trechos 3 e 4



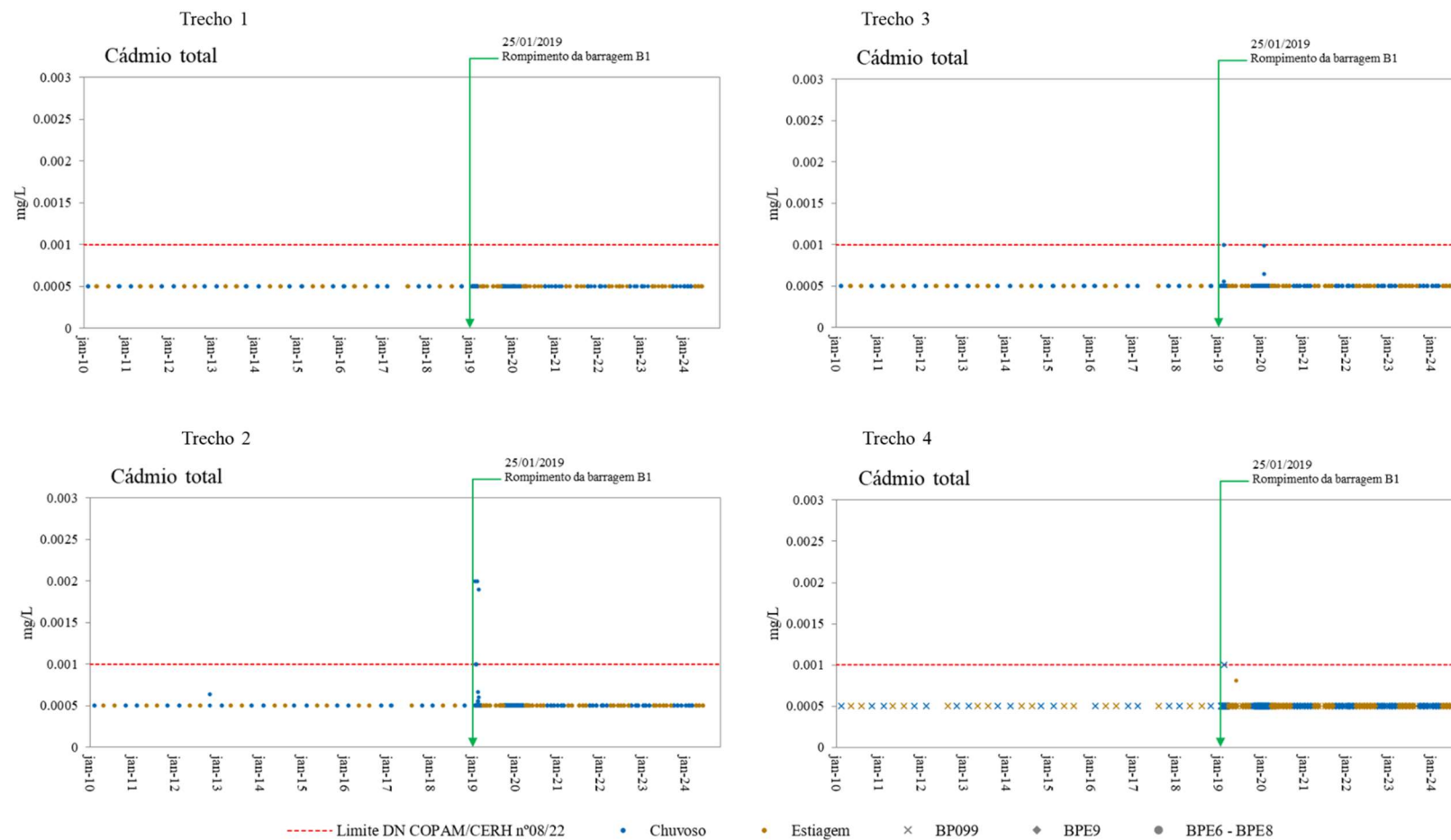
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 40 apresenta os resultados de cádmio total no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA (janeiro de 2019 a junho de 2024).

Pode ser observado que em todos os trechos o cádmio extrapolou o limite para classe 2 pontualmente no período seco de 2021. Porém, ressalta-se que no trecho 2 verificou-se também concentrações acima de 0,01 mg/L nos primeiros meses (janeiro e fevereiro de 2019) após o rompimento. Para cádmio total, todos os valores da série histórica de monitoramento do Igam estiveram abaixo e/ou próximos do limite de quantificação do método analítico.

Figura 40 - Resultados de cádmio total em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 41 apresenta os resultados de cobre dissolvido no período pré-rompimento (2010 a 2018) e nos anos após o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA (janeiro de 2019 a dezembro de 2022).

Em relação aos valores de cobre dissolvido apresentados na Figura 41 e Tabela 9, observa-se duas violações no período seco de 2019 no trecho a montante do desastre (trecho 1). No trecho 2 verificou-se duas concentrações acima do limite estabelecido pela legislação, sendo uma no período seco de 2020 e uma no período chuvoso de 2021. Já no trecho 3 ocorreram violações no período de estiagem de 2020 e chuvoso dos anos de 2021 e 2024. No trecho 4 foram detectadas concentrações superiores a 0,009 mg/L em 2019 em ambos os períodos sazonais.

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 9). 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).

Tabela 9 - Valores extremos de cobre dissolvido em 2019 e 2020

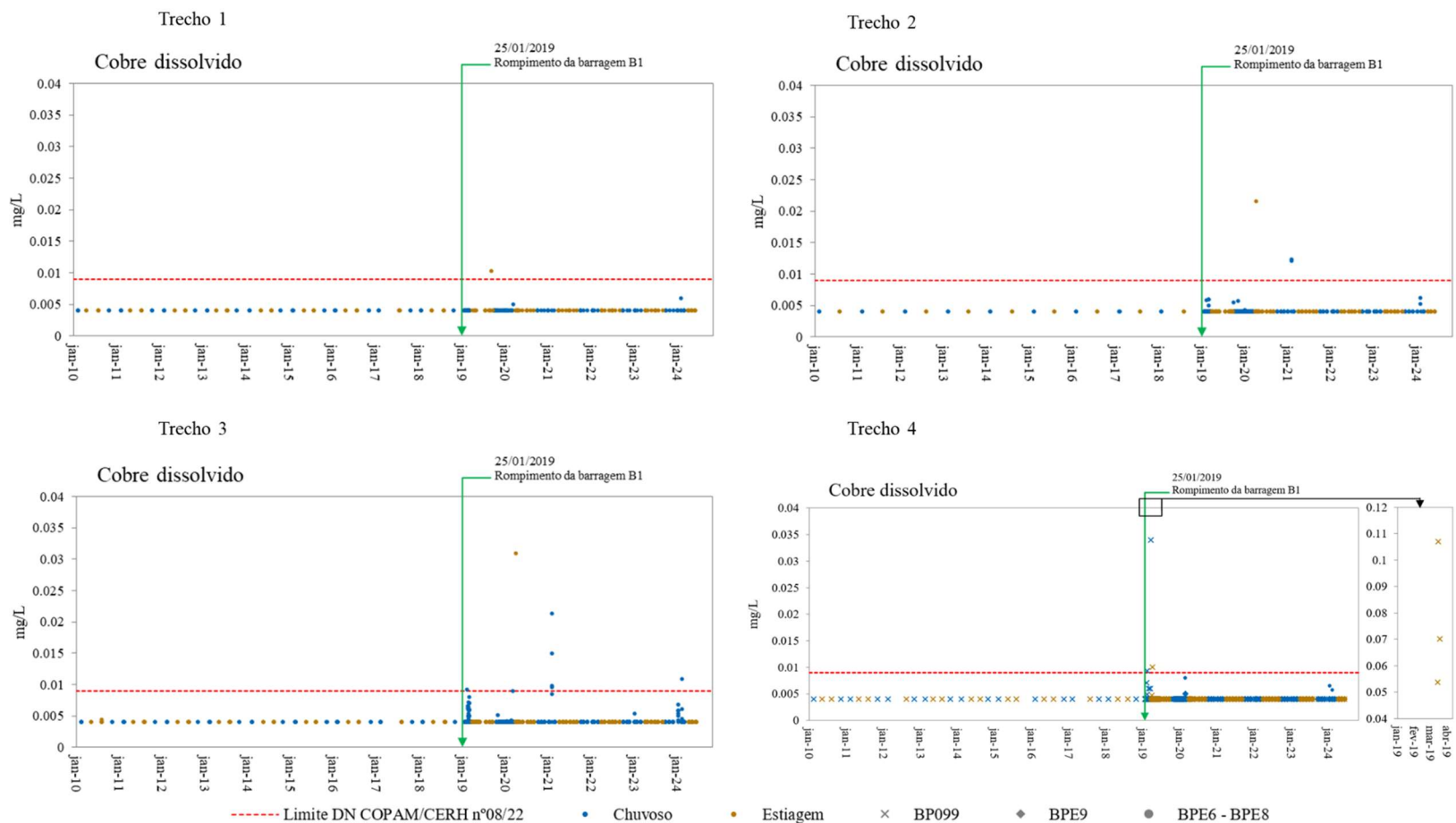
Trecho	Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
4	BP099	23/03/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,034	Chuvoso
	BP099	03/04/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,054	Seco
	BP099	04/04/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,107	Seco
	BP099	07/04/2019	Cobre Dissolvido	mg/L	0,070	Seco
1	BP036	03/06/2019	Cobre Dissolvido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

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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.

Ressalta-se que o trecho 2 (entre Brumadinho e 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 B-I, 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.

Figura 41 - Resultados de cobre dissolvido em água superficial da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot para períodos chuvosos e secos entre 2010 e 2024, com destaque para os valores extremos alcançados em 2019 no trecho 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

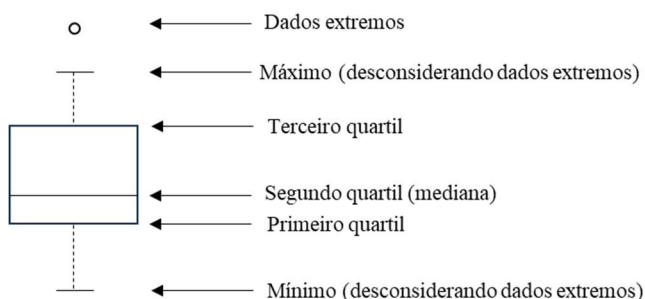
7. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE SEDIMENTOS DE JANEIRO DE 2019 A JUNHO DE 2024

Este Caderno Especial apresenta uma análise detalhada dos dados de monitoramento de sedimentos do rio Paraopeba, coletados entre janeiro de 2019 e junho de 2024. O monitoramento, iniciado imediatamente após o desastre, ocorreu semanalmente nos primeiros dois meses e, posteriormente, mensalmente, desde janeiro de 2023 a frequência é trimestral para os sedimentos.

Para a avaliação das concentrações de metais e arsênio nos sedimentos, utilizou-se como referência os Níveis 1 e 2 estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 454/2012 para águas doces (Tabela 3). No caso do ferro, alumínio e manganês, que não possuem valores de referência específicos para sedimentos nessa resolução, foram adotados os valores percentuais do estudo de Vicq (2015), sendo 28,10% (ferro), 0,33% (manganês) e 4,52% (alumínio), valores indicados para o Quadrilátero Ferrífero. Essa referência foi adotada no intuito de identificar valores anômalos para o Quadrilátero Ferrífero, podendo nesse caso indicar a presença do rejeito nos sedimentos. Tanto o ferro como o manganês e alumínio são expressos em porcentagem de peso seco (%) considerando a relevância desses elementos na composição dos sedimentos.

Os resultados do monitoramento são apresentados gráficos de dispersão e boxplot. O boxplot é composto por seis elementos: mínimo, primeiro quartil, segundo quartil (mediana), terceiro quartil, máximo e dados extremos, conforme representado no esquema a seguir (Figura 42)

Figura 42 - Elementos do boxplot



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

No presente estudo, os sedimentos de fundo foram analisados quanto à presença de 14 elementos (ferro, manganês, alumínio, arsênio, cádmio, chumbo, mercúrio, cobre, cromo, níquel, vanádio, zinco, estrôncio e titânio). Os resultados desta análise são apresentados graficamente nas próximas figuras.

Ferro em sedimentos

Na Figura 43 e Figura 44 são apresentados os resultados do parâmetro ferro nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, do monitoramento especial no período chuvoso e seco entre janeiro de 2019 e junho de 2024. Na legenda do gráfico, a linha vermelha representa o valor de 28,10% proposto por Vicq (2015) para esse parâmetro.

O material proveniente da Barragem B-I 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.

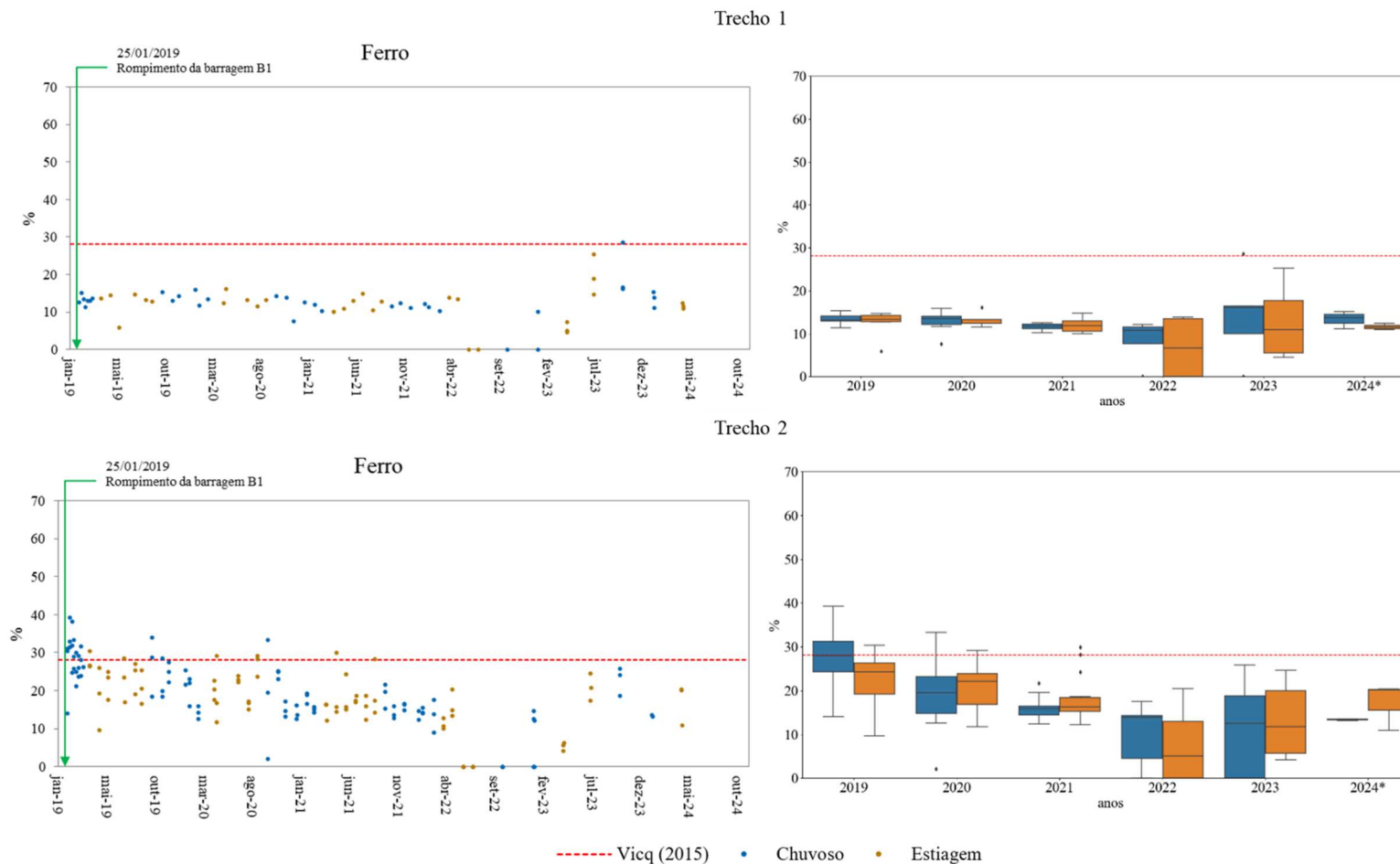
Observa-se que nos primeiros 40 km do rio Paraopeba (trecho 2 da estação BPE2 até BP070), a jusante da B-I, ocorreu o um aumento expressivo dos valores de ferro em 2019, quando comparado com a estação a montante (BP036 – Brumadinho – trecho 1) da área impactada pelo rompimento, além disto, os resultados estiveram bastante superiores aos valores propostos por Vicq (2015) no período chuvoso de 2019. No período seco de 2019 também são observados alguns registros acima de 28,10%. A partir de 2020, verifica-se o decréscimo da concentração de ferro nos sedimentos, com as medianas que se aproximam dos valores observados no trecho 1 (montante do impacto).

No trecho 3, a partir da Termelétrica de Igarapé (BP072 - Betim) até a montante da UHE Retiro Baixo (BP087 - Pompéu/Curvelo), verifica-se que em 2019 o percentual de ferro nos sedimentos ultrapassou o valor de Vicq (2015) em alguns pontos monitorados em ambos os períodos sazonais. Ao longo dos anos observa-se uma redução gradual dos teores de ferro e registros abaixo (linha vermelha) do valor de Vicq (2015), com exceção dos resultados mais elevados no período chuvoso de 2023. Durante todo o período monitorado, verifica-se que a mediana dos resultados se encontra abaixo de 20%.

No trecho 4, a partir Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo (BP099) até a represa de Três Marias (BPE9), com a contribuição do ribeirão dos Gomes (BPE9), verifica-se que no período chuvoso de 2019 não houve resultados acima do estudo de Vicq (2015). Os valores mais elevados foram registrados sobretudo na estação de monitoramento BPE8), chegando a registrar o valor de 29,82% em abril de 2019. Nos anos entre 2020 e 2022, observa-se um comportamento similar na concentração de ferro nos sedimentos, com poucas variações e as medianas dos resultados próximas dos 5%. Em 2023, observa-se um incremento na concentração de ferro comparado aos anos anteriores. Ressalta-se que apesar do aumento, os resultados não ultrapassaram os valores de 28,10% de Vicq (2015). Em 2024 observa-se uma redução nas concentrações em relação ao ano de 2023, principalmente no período de estiagem.

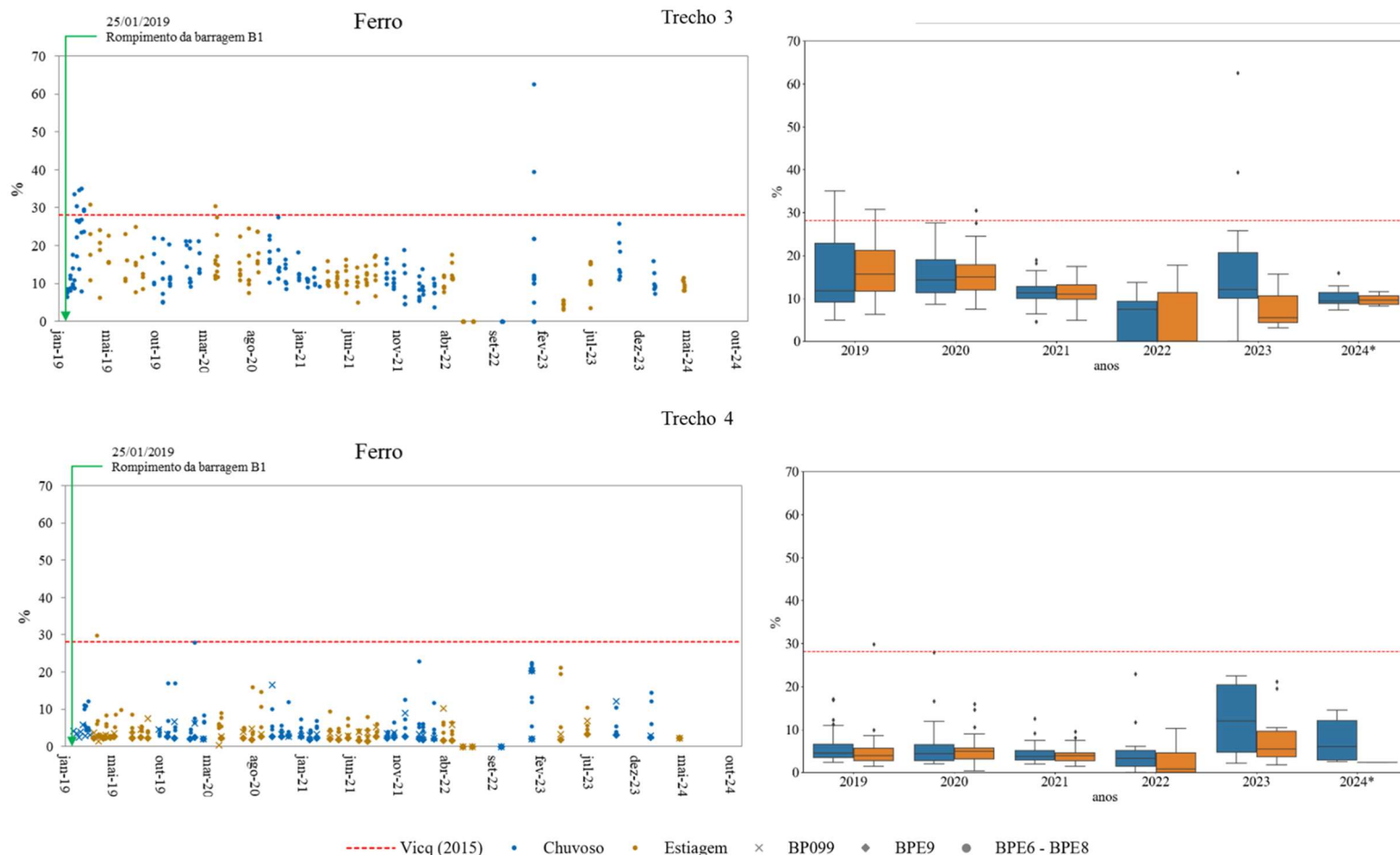
Conforme o relatório de Fechamento de Ciclo da Vale S.A. (25/01/2019 a 30/06/2019), o ferro presente nos rejeitos está predominantemente na forma de hematita (Fe_2O_3), um mineral com alta densidade (4,9 a 5,3 g/cm³). Essa característica física da hematita, aliada ao evento do rompimento, contribuiu para a rápida sedimentação do ferro nos primeiros trechos do rio, o que corrobora os resultados obtidos nas análises dos sedimentos.

Figura 43 - Resultados de ferro em sedimentos de fundo da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot comparados a referência de 28,10% proposta por Vicq (2015) para períodos chuvosos e secos de 2019 a 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 44 - Resultados de ferro em sedimentos de fundo da bacia do rio Paraopeba apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot comparados a referência de 28,10% proposta por Vicq (2015) para períodos chuvosos e secos de 2019 a 2024 nos trechos 2 e 3



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Manganês em sedimentos

Na Figura 45 e Figura 46 são apresentados os dados obtidos no monitoramento especial para manganês em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, referente ao período entre janeiro de 2019 e junho de 2024. Na legenda do gráfico, a linha vermelha representa o valor de 0,33% proposto 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 da barragem B-I da Vale S.A.

No trecho 1, a montante do rompimento, observou-se que desde 2019 as concentrações se mantiveram majoritariamente abaixo do proposto por Vicq (2015) de 0,33%. Resultados superiores a esta referência foram identificados em 2019.

No trecho 2, observou-se altas concentrações de manganês durante quase todo o ano de 2019. Neste ano foram verificados os maiores valores (Tabela 13) e os resultados foram superiores aos valores encontrados no trecho a montante do desastre, o que indicou impacto dos rejeitos nos sedimentos de fundo oriundo da Barragem B-I. Entre 2020 e 2023, verifica-se uma redução na concentração de manganês nos sedimentos, porém com alguns valores superiores ao proposto por Vicq (2015). Nas amostragens realizadas no primeiro semestre de 2024 não foram verificadas concentrações superiores ao estudo de Vicq (2015).

No trecho 3 é possível observar resultados acima de 0,33% em 2019, ano do rompimento das barragens. Em 2020 verificou-se um pequeno decréscimo nos resultados, mas ainda com concentrações acima do limite verificados na pesquisa de Vicq (2015). Já no período entre 2021 e 2023 verificou-se uma redução expressiva na concentração de manganês nos sedimentos, com violações pontuais ao limite. Em 2024 as concentrações de ambos os períodos sazonais estão abaixo do proposto por Vicq (2015) de 0,33%.

No trecho 4 observou-se que os resultados se mantiveram sem grandes oscilações no período analisado, com apenas um resultado acima do valor proposto por Vicq (2015) no período chuvoso de 2019 no BP099. Desde 2020 as concentrações de manganês no sedimento estão abaixo de 0,33% verificado por Vicq (2015).

Na Tabela 10 encontram-se apresentados os maiores valores medidos em 2019.

Tabela 10 - Valores extremos de manganês em 2019 e 2024 com base na referência de Vicq (2015)

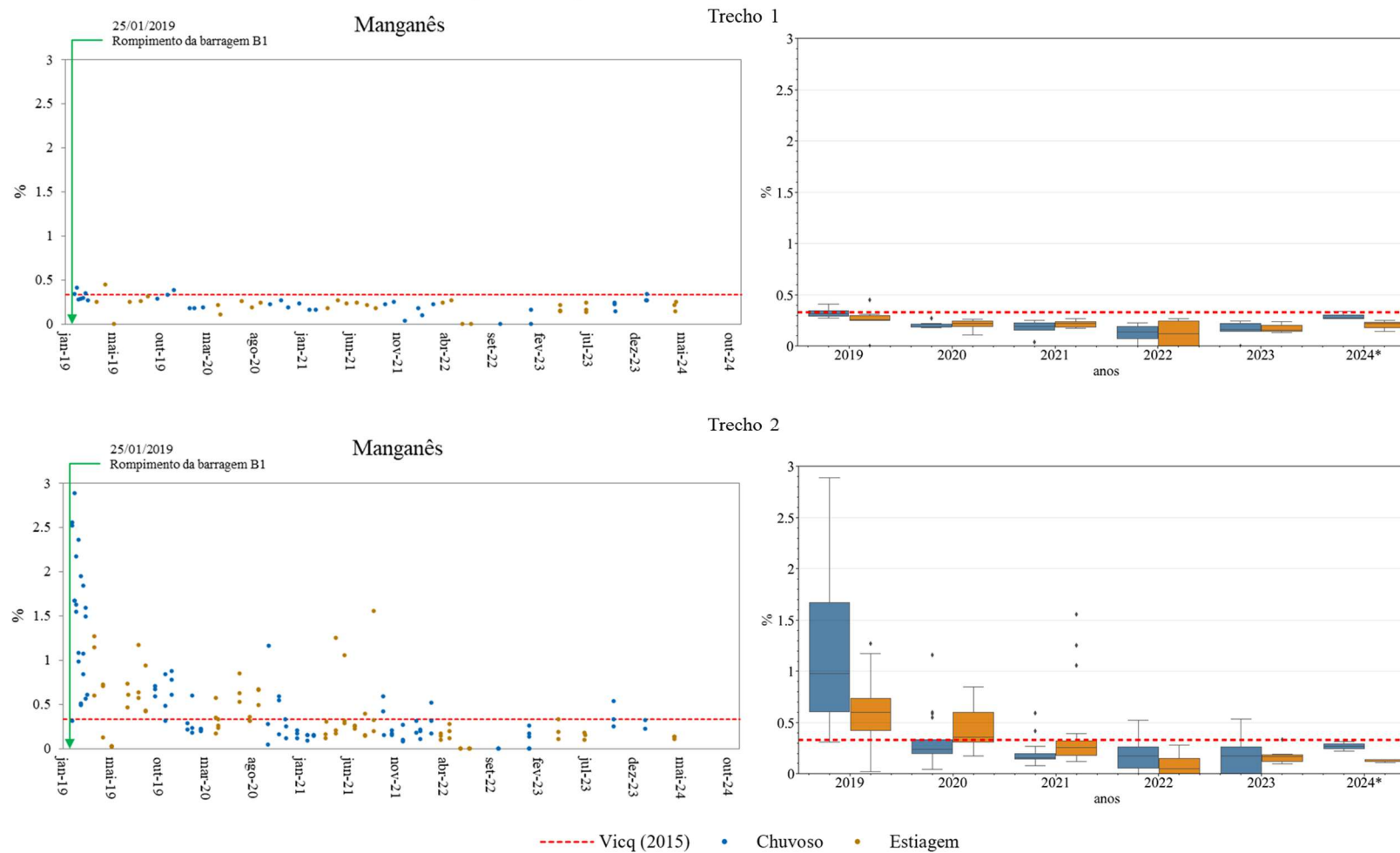
Trecho	Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período	Nível 1	Nível 2
2	BPE2	28/01/2019	Manganês	%	2,56	Chuvoso	0,33	0,33
2	BP070	28/01/2019	Manganês	%	2,52	Chuvoso	0,33	0,33
	BP070	04/02/2019	Manganês	%	2,89	Chuvoso	0,33	0,33
	BP070	11/02/2019	Manganês	%	2,17	Chuvoso	0,33	0,33
	BP070	18/02/2019	Manganês	%	2,36	Chuvoso	0,33	0,33
3	BP072	18/02/2019	Manganês	%	2,46	Chuvoso	0,33	0,33
	BP082	04/03/2019	Manganês	%	2,21	Chuvoso	0,33	0,33
	BP104	12/01/2023	Manganês	%	29.5	Chuvoso	0,33	0,33
	BP072	12/01/2023	Manganês	%	29.2	Chuvoso	0,33	0,33
	BP082	12/01/2023	Manganês	%	28.8	Chuvoso	0,33	0,33
	BP083	12/01/2023	Manganês	%	28.3	Chuvoso	0,33	0,33
	BP077	12/01/2023	Manganês	%	28	Chuvoso	0,33	0,33
	BP078	13/01/2023	Manganês	%	20.1	Chuvoso	0,33	0,33
	BP087	13/01/2023	Manganês	%	20.1	Chuvoso	0,33	0,33

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Em resumo, nos anos a partir de 2021 observa-se uma redução dos teores de manganês nos sedimentos nos trechos 2 e 3, que receberam impacto direto dos rejeitos provenientes das barragens. Ressalta-se que, apesar da redução dos teores, ainda são encontrados valores superiores à referência.

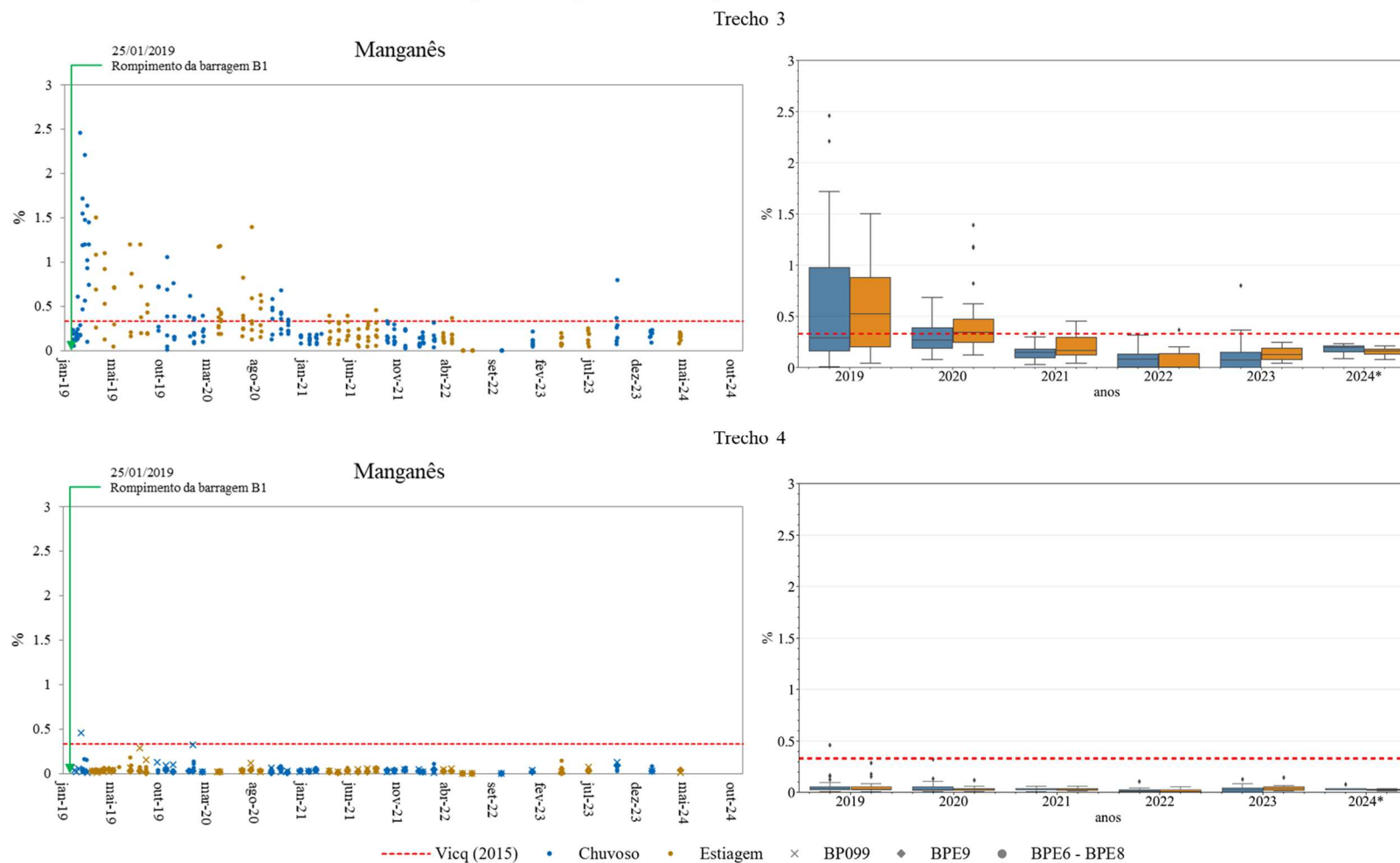
No trecho 4, os resultados estão majoritariamente abaixo e/ou muito próximos aos resultados obtidos no trecho a montante do rompimento (trecho 1). Esses resultados reforçam que os sedimentos de fundo nos trechos após o reservatório de Retiro Baixo não registraram alterações devido ao impacto dos rejeitos até o momento. O comportamento dos resultados observados em 2023 pode ser proveniente de outras fontes antrópicas presentes na bacia.

Figura 45 - Resultados de manganês em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot comparados a referência de 0,33% proposta por Vicq (2015) no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 46 - Resultados de manganês em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot comparados a referência de 0,33% proposta por Vicq (2015) no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Alumínio em sedimentos

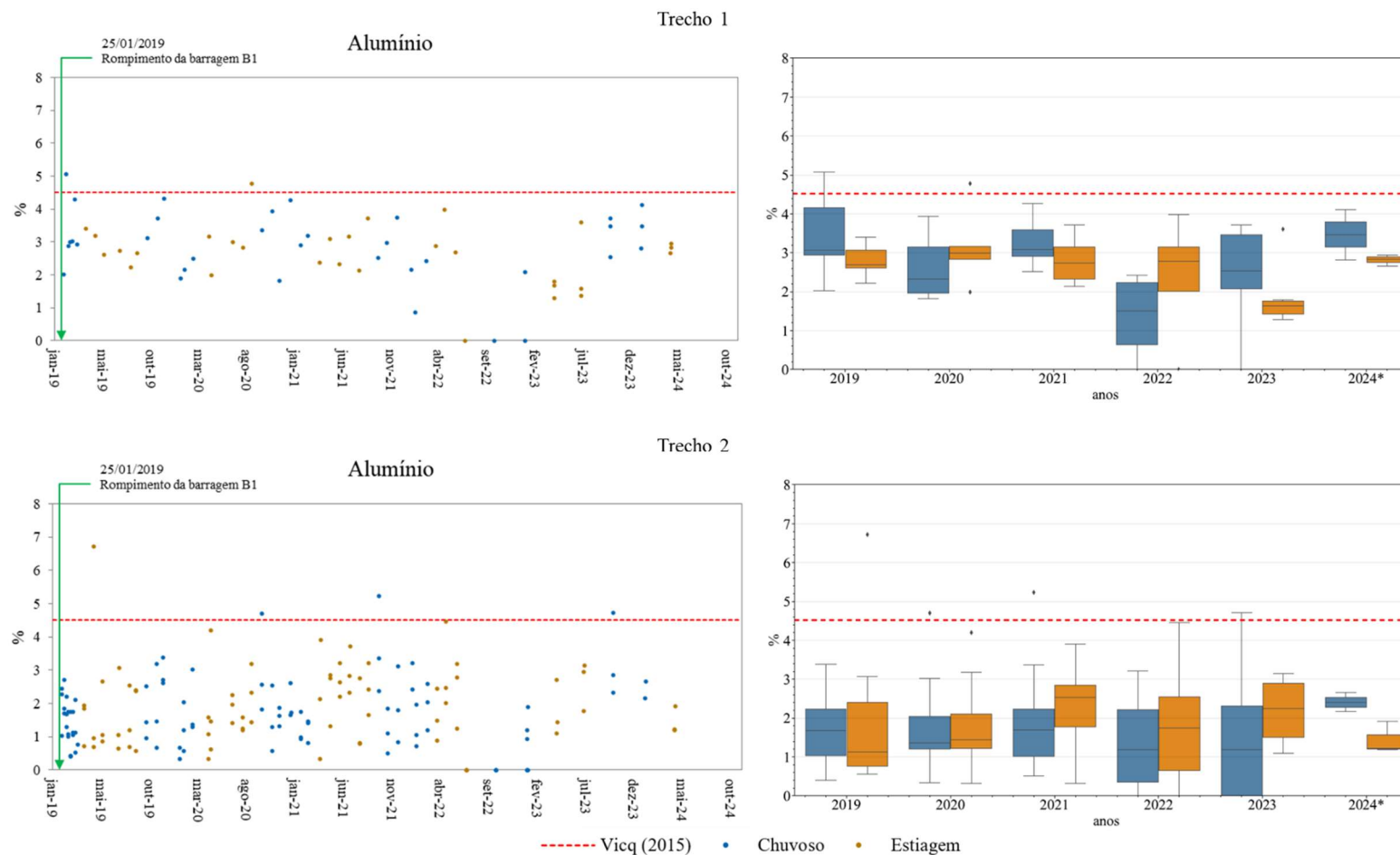
Na Figura 47 e Figura 48 é apresentado o gráfico para alumínio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre janeiro/2019 e junho/2024. Na legenda do gráfico, a linha vermelha representa o valor (4,52%) proposto por Vicq (2015) para esse parâmetro para a região do Quadrilátero Ferrífero.

Nos trechos 1 (BP036, BP029 e BP027) e 2 (BPE2, BP068 e BP070) observa-se um comportamento similar nas concentrações de alumínio nos sedimentos. Nestes trechos, verifica-se a maioria dos resultados abaixo do limite de 4,52% proposta por Vicq (2015), com exceção de violações pontuais ocorridas na estiagem de 2019 e no período chuvoso de 2021. Estes 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.

Entre os anos de 2019 e 2021 no trecho 3 (BP072, BP104, BP082, BP083, BP077, BP078 e BP087) e trecho 4 (BP099, BPE6, BPE7, BPE8 e BPE9), verifica-se a maioria dos resultados abaixo dos valores de Vicq (2015), com alguns valores que excederam em ambos os períodos sazonais. Em 2022 observa-se uma redução expressiva nas concentrações de alumínio no sedimento nos períodos seco e chuvoso. Contudo, também foram identificadas concentrações pontuais superiores a 4,52%. Já no período chuvoso de 2023, observou-se o aumento das concentrações, sendo a mediana dos resultados acima do proposto por Vicq (2015). Apesar da elevação também no período seco, os valores se apresentaram majoritariamente abaixo do estabelecido no estudo. No ano de 2024, os resultados estão próximos ao limite de 4,52%, com uma violação pontual no trecho 3.

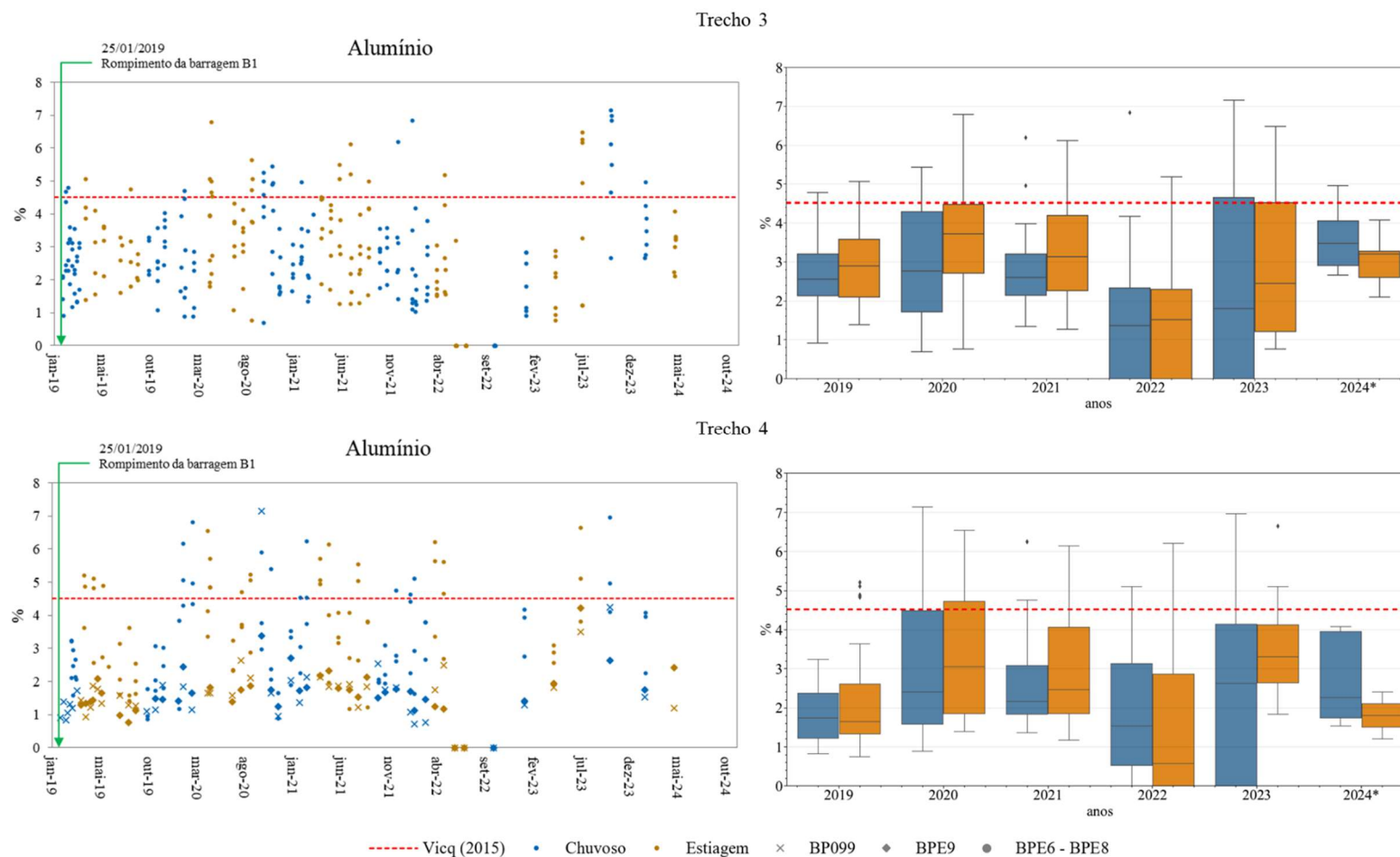
De maneira geral, é possível verificar valores mais baixos de alumínio total nos primeiros 60 km. Os resultados mais elevados começam a surgir a partir do trecho 3, durante todo o período analisado. Registra-se ainda que, a maioria dos resultados de 2019, estiveram abaixo do indicado por Vicq (2015), no entanto, o mesmo não foi observado para os anos seguintes. Em 2021 e 2022 verifica-se uma redução desses registros, elevando novamente em 2023, com maior número de resultados acima de 4,52% principalmente neste ano.

Figura 47 - Resultados de alumínio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot comparados a referência de 4,52% proposta por Vicq (2015) no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 48 - Resultados de alumínio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot comparados a referência de 4,52% proposta por Vicq (2015) no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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.

Na Figura 49 e Figura 50 são apresentados os resultados para chumbo em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dados esses obtidos no monitoramento especial no período entre janeiro de 2019 a junho de 2024. Na legenda do gráfico, a linha amarela representa o limite máximo do nível 1 (35 µg/g) enquanto a linha vermelha o nível 2 (limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota aquática – 91,3 µg/g).

No trecho 1, que está a montante do rompimento da B-I, é possível observar violações no limite de nível 1 no ano de 2019 em ambos os períodos sazonais. Em 2020 verificou-se a redução nas concentrações, sendo que não houve extrapolação do nível 1 em nenhum monitoramento. Entre 2021 e 2022 a tendência de redução da concentração de chumbo no sedimento continuou, porém houve extrapolação do limite de nível 1 em 2021. Em 2023 e 2024 verificou-se que, apesar do incremento nas concentrações, todas as amostragens realizadas obtiveram resultados abaixo do limite da CONAMA nº 454 de 2012.

No trecho 2, que corresponde as estações monitoradas a jusante o rompimento da B-I (2019) observa-se que o número de resultados que extrapolam o Nível 1 ocorrem principalmente no ano do desastre, em ambas as estações chuvosas e seca. Já os anos de 2020, 2021 e 2023 também apresentaram desconformidades com os limites do Nível 1 da CONAMA nº454/2012, porém com medianas inferiores quando comparados ao ano de 2019. Para os anos de 2022 e 2024 os gráficos não demonstram registros de violações, entretanto as medianas do ano de 2024 ainda se apresentam próximas de 2023, ano que apresentou resultados superiores ao estabelecido na legislação.

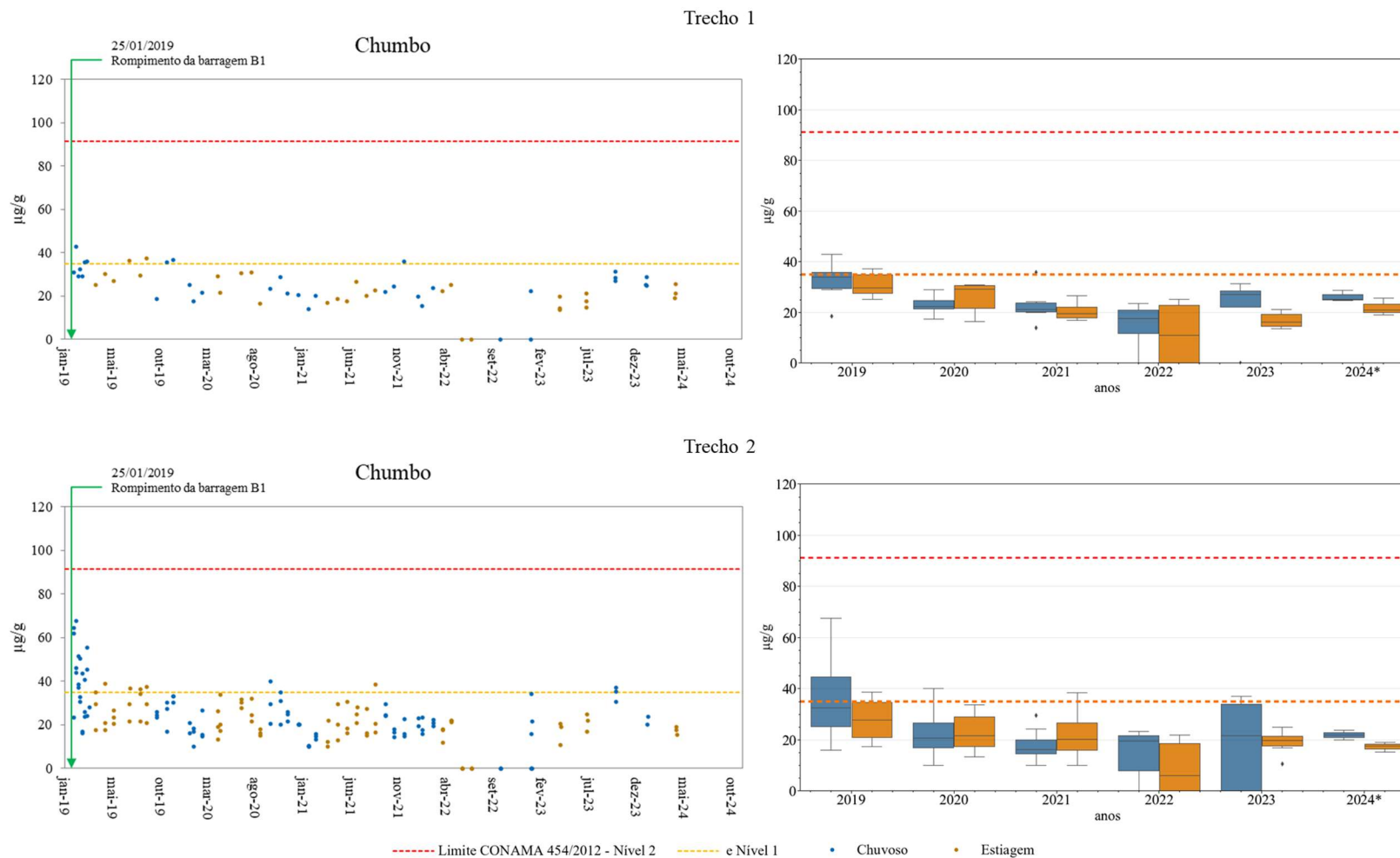
No trecho 3, que correspondente as estações monitoradas após usina Termoeletrica Igarapé até usina Hidrelétrica de Retiro Baixo, as maiores concentrações ocorreram no ano de 2019 e ainda é possível observar extrapolação do Nível 1 até 2024, exceto para o ano de 2022.

No trecho 4, estações monitoradas desde o afluente ribeirão do Gomes, incluindo a pontos a jusante da usina Hidrelétrica de Retiro Baixo até o reservatório de Três Marias, os

gráficos demonstram registros acima do Nível 1 até os dias atuais. Ressalta-se que as violações a partir de 2020 foram observadas apenas nos pontos localizados no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8). Apesar dos maiores valores de chumbo em 2019 terem ocorrido principalmente nos trechos 2 e 3, as ocorrências acima do Nível 1 nos trechos a montante do desastre 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).

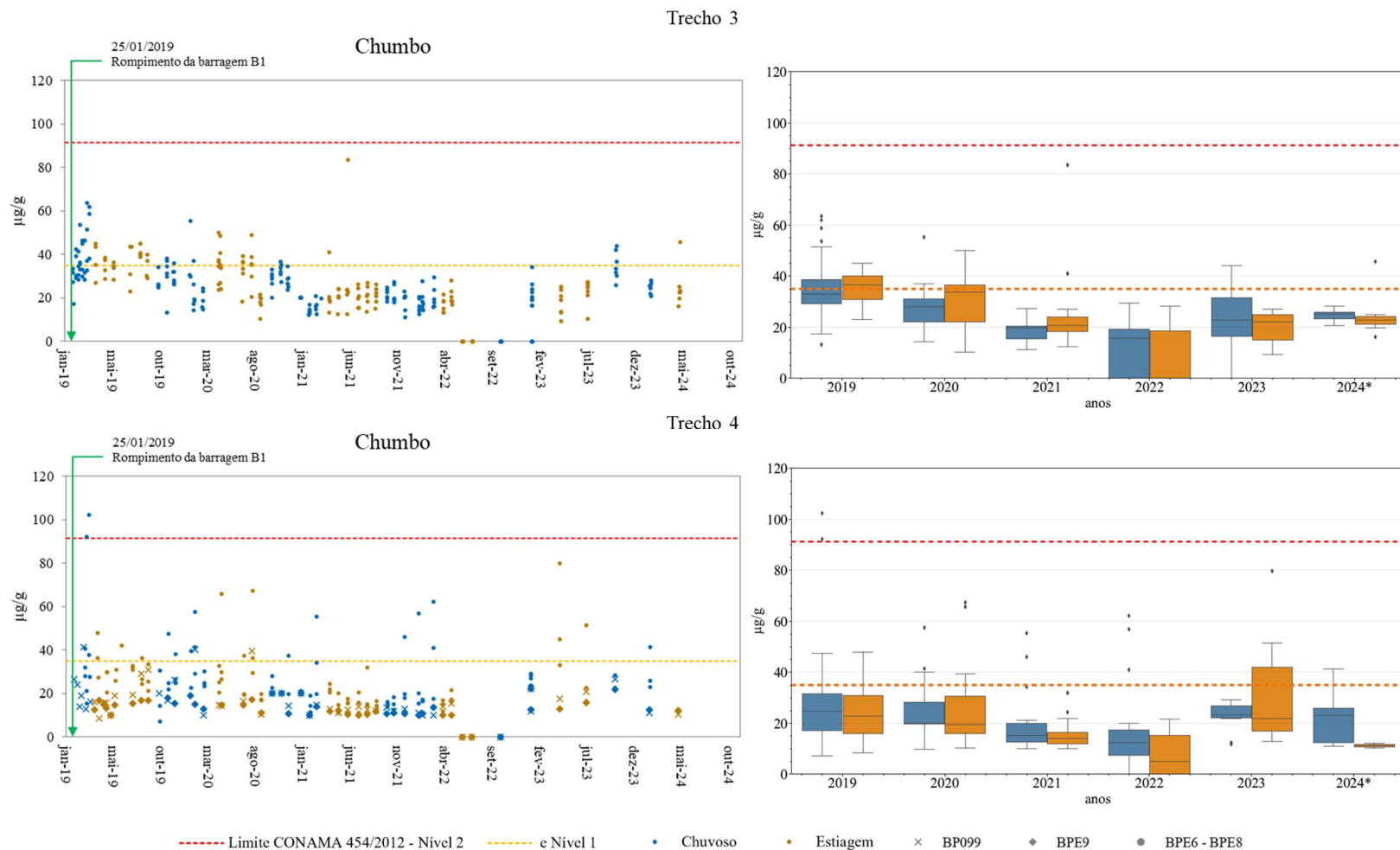
Registros eventuais de chumbo total acima do Nível 2 ocorreram duas vezes no monitoramento especial do rio Paraopeba, ambos em março de 2019 no remanso da represa de Três Marias. Os valores encontrados corresponderam a 92,26 mg/g e 102,39 mg/g. Ressalta que esses registros não estão associados ao rompimento 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.

Figura 49 - Resultados de chumbo em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro de 2019 a junho de 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 50 - Resultados de chumbo em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro de 2019 a junho de 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Mercúrio em sedimentos

Na Figura 51 e Figura 52 são apresentados os gráficos para mercúrio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre janeiro/2019 e junho/2024. Na legenda do gráfico, a linha amarela representa o limite máximo do nível 1 (0,17 µg/g) e a linha vermelha o nível 2 (0,486 µg/g) preconizados na legislação CONAMA nº 454/2012.

No trecho 1 (BP036, BP029 e BP027), a montante do rompimento, verifica-se que, em todo o período analisado as concentrações de mercúrio se encontraram abaixo do limite de nível 1 com exceção de uma amostragem pontual no período seco de 2021, na qual a concentração ficou no limite de 0,17 µg/g).

No trecho 2 (BPE2, BP068 e BP070), apesar da maioria dos resultados estar abaixo do limite da legislação, observou-se registros de concentrações de mercúrio acima do nível 1 estabelecido pela legislação nos anos de 2019, logo após o desastre, e em 2021. Registrou-se também em 2019, em novembro, um valor anômalo na estação BP070 em São Joaquim de Bicas que ultrapassou o Nível 2, valor esse igual a 3,40 µg/g (Tabela 11). Ressalta-se que após o período de estiagem de 2021 não houve registros de violações para este trecho.

Tabela 11 - Valor obtido para o mercúrio que ultrapassou o nível 2 (0,486 µg/g) no ano de 2019

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

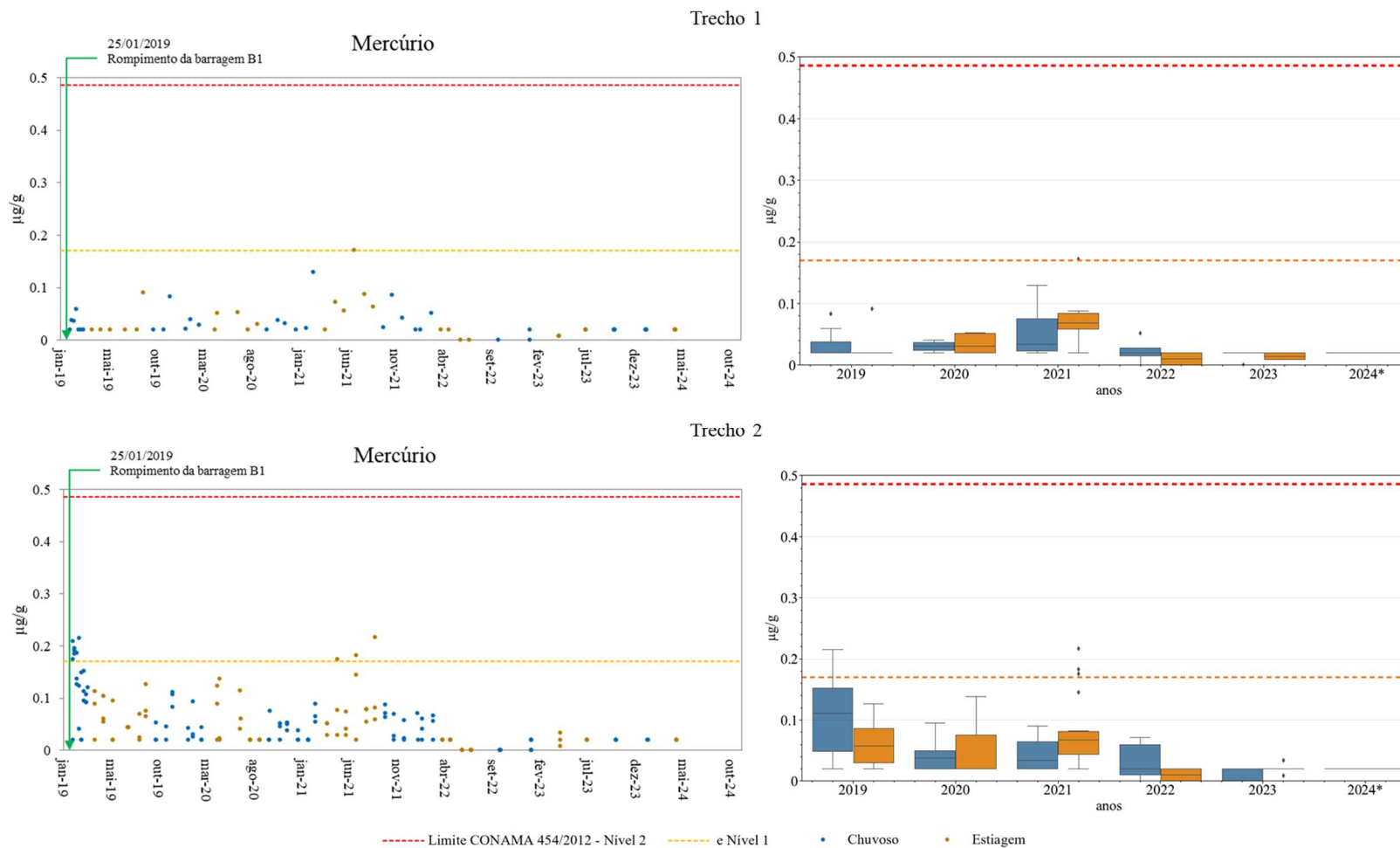
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

No trecho 3 (BP072, BP104, BP082, BP083, BP077, BP078 e BP087) verifica-se que ocorreram poucas violações do limite nível 1 no período chuvoso de 2019 e no período seco de 2020. Destaca-se também, uma violação do nível 2 no período chuvoso de 2023.

No trecho 4 foram registradas violações de nível 2 no BP099 e BPE9 no período chuvoso de 2023. Os demais resultados ficaram abaixo do limite estabelecido na legislação.

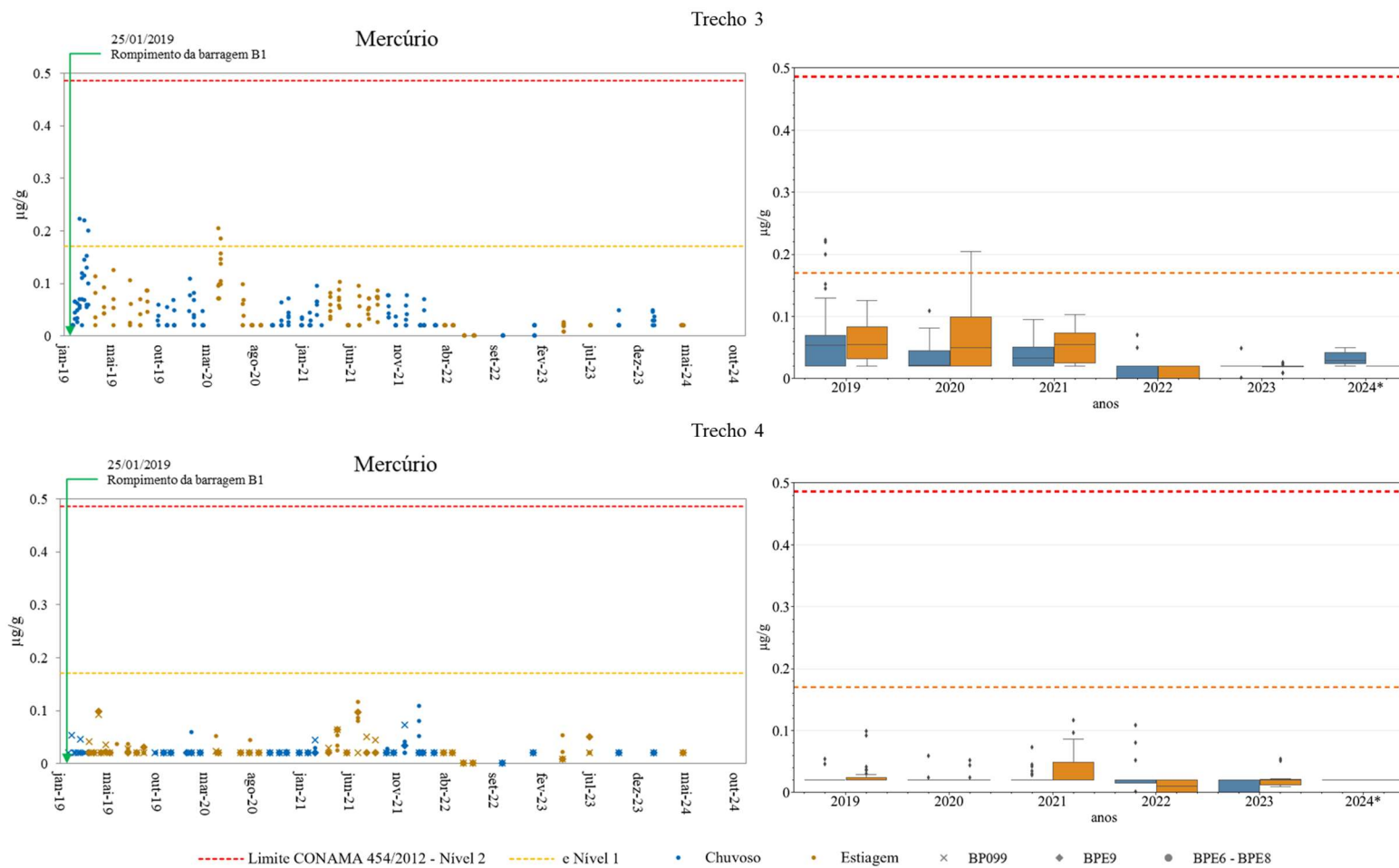
Em resumo, observa-se que houve um acréscimo na concentração de mercúrio no sedimento, mas a maioria dos resultados ainda se mantiveram abaixo do limite de nível 1 estabelecido na legislação. Esses resultados demonstram que o aumento das concentrações de mercúrio nos sedimentos pode estar relacionado 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, 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.

Figura 51 - Resultados de mercúrio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 52 - Resultados de mercúrio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Níquel em Sedimentos

A Figura 53 e Figura 54 apresentam os gráficos para níquel em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre janeiro/2019 e junho/2024. Na legenda dos gráficos, as linhas amarelas e vermelhas são referentes aos limites de níveis 1 e 2 (18 e 35,9 $\mu\text{g/g}$, respectivamente), definidos pela resolução CONAMA 454/2012.

No trecho a montante do rompimento (trecho 1), verificou-se que no período chuvoso de 2019 todas as concentrações de níquel ficaram acima do limite de nível 1 (18 $\mu\text{g/g}$) e uma ocorrência acima do limite de nível 2 (35,9 $\mu\text{g/g}$). No período de estiagem todos os resultados, com exceção de uma amostragem, encontram-se acima do limite de nível 1. Nos períodos chuvoso dos anos 2020 e 2021 e seco de 2021, verificou-se que todas as concentrações de níquel excederam o nível 1. Na estiagem de 2020 verifica-se que a maioria dos resultados também excederam o nível 1, porém identificou-se alguns resultados ficaram dentro do padrão. No ano de 2022 observou-se uma queda na concentração de níquel, com as medianas dos resultados abaixo de 15 $\mu\text{g/g}$. Ressalta-se que ainda foram registradas violações de nível 1, principalmente no período de estiagem. A partir de 2023 verificou-se o aumento dos resultados, principalmente no período chuvoso, no qual todos os valores excederam o limite de nível 1. No período chuvoso de 2024, a mediana dos resultados ultrapassou o limite de nível 2.

No trecho 2, o mais impactado pelo rompimento das barragens, a maioria das concentrações de níquel medidas no sedimento no período chuvoso de 2019 (logo após o desastre) ultrapassaram os limites de nível 1 e 2, sendo que os maiores valores se aproximam de 80 $\mu\text{g/g}$. Na estiagem de 2019 as concentrações encontradas foram menores, porém, em sua grande maioria acima do limite de nível 1. Nos anos de 2020 e 2021 verificou-se um comportamento similar a estiagem de 2019, porém com algumas violações de nível 2. A partir de 2022 observou-se um decréscimo das concentrações, contudo, ainda são verificados resultados majoritários acima do nível 1. Ressalta-se ainda que no período chuvoso de 2022, ocorreram violações de nível 2.

No trecho 3, que corresponde após a Usina Termoelétrica de Igarapé até a Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo, a mediana das concentrações de níquel medidas em 2019 no sedimento para ambos os períodos sazonais é da ordem de 25 $\mu\text{g/g}$, valor que ultrapassa o limite nível 1. No período chuvoso houve violações de nível 2, que alcançaram a faixa dos 70 $\mu\text{g/g}$.

No ano de 2020, apesar de ser observado um pequeno decréscimo nas concentrações, a maioria dos resultados ultrapassa o limite de nível 1 e ainda são verificadas violações de nível 2. Já no ano de 2021, são verificadas violações apenas do nível 1. Em 2022 é verificada uma redução das concentrações que, em sua maioria encontram-se abaixo do limite da legislação. No entanto, são verificadas violações dos níveis 1 e 2 para ambos os períodos sazonais. Para os anos de 2023 e 2024 observa-se novamente um aumento das concentrações de níquel, sendo que as medianas dos resultados ultrapassam o limite nível 1. No trecho 4, a jusante de retiro Baixo até o Reservatório de Três Marias, em 2019 verifica-se que a maioria dos resultados se encontram na faixa entre 5 e 12 $\mu\text{g/g}$, com mediana dos valores abaixo de 10 $\mu\text{g/g}$ para ambos os períodos sazonais. Contudo, foram observadas violações de nível 1. Em 2020, verificou-se um acréscimo das concentrações de níquel no sedimento no período chuvoso. Apesar da maioria dos resultados ter ficado dentro do padrão estabelecido pela legislação, com a mediana inferior a 15 $\mu\text{g/g}$, também verificou-se violações de nível 1. O período seco de 2020 e 2021 se manteve similar ao de 2019, assim como o período chuvoso de 2021. Em 2022 verificou-se a redução das concentrações, sem violações. Já em 2023 as concentrações voltaram a se elevar para ambos os períodos sazonais, com violações de nível 1. Em 2024 as concentrações reduziram e voltaram a ficar abaixo do limite de 18 $\mu\text{g/g}$. Em resumo, os resultados de níquel apresentaram pouca variação entre os anos de 2019 e 2024.

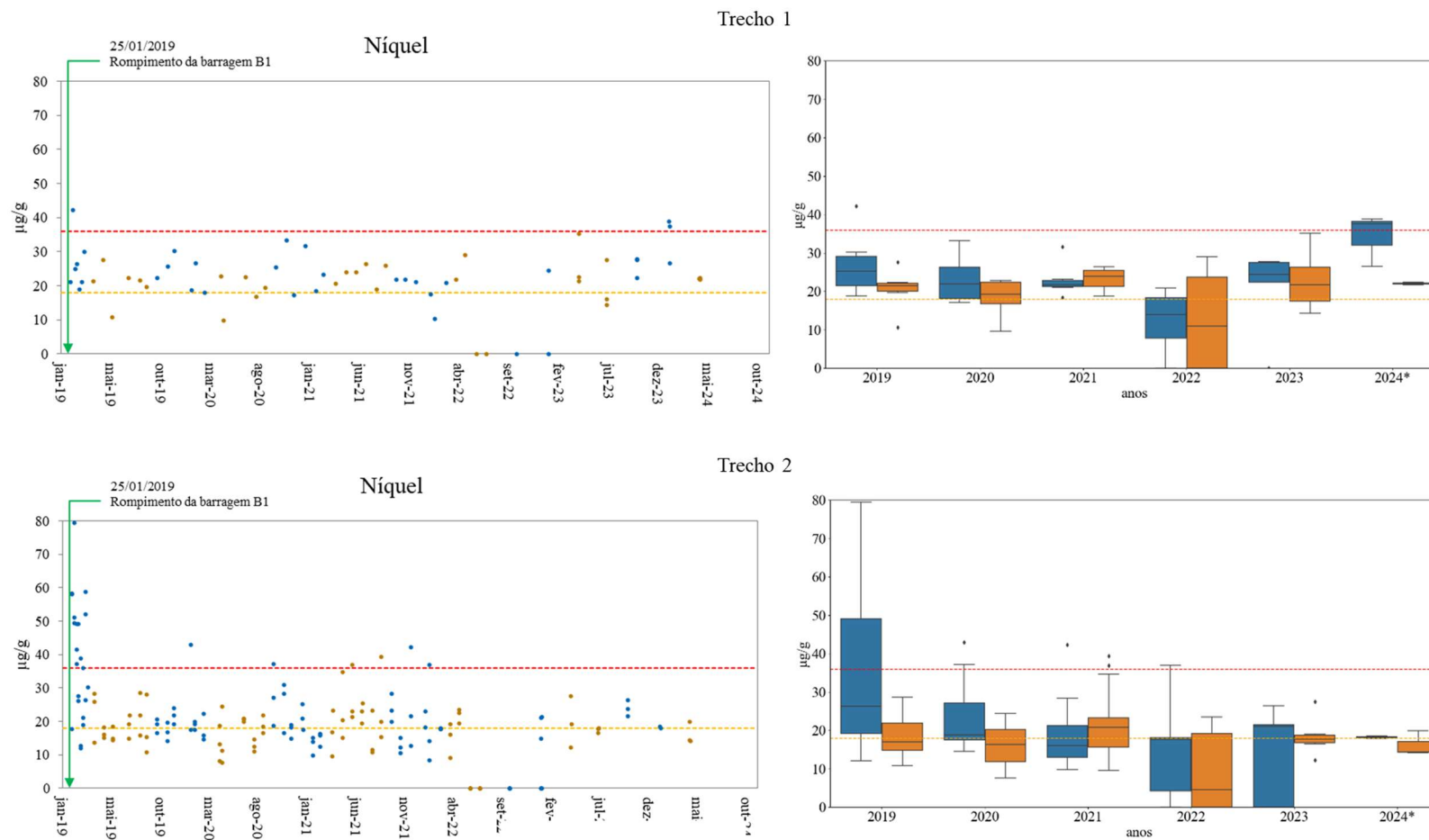
Apresenta-se na Tabela 12 a seguir os valores máximos de níquel, que foram verificados em 2019 e 2022.

Tabela 12 - Valor obtido para o níquel que ultrapassou o nível 2 (35,9 $\mu\text{g/g}$) no período de janeiro/2019 a junho/2021

Trecho	Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
2	BP070	04/02/2019	Níquel	$\mu\text{g/g}$	79,47	Chuvoso
3	BP082	11/03/2019	Níquel	$\mu\text{g/g}$	70,07	Chuvoso
	BP082	06/10/2022	Níquel	$\mu\text{g/g}$	68,93	Chuvoso

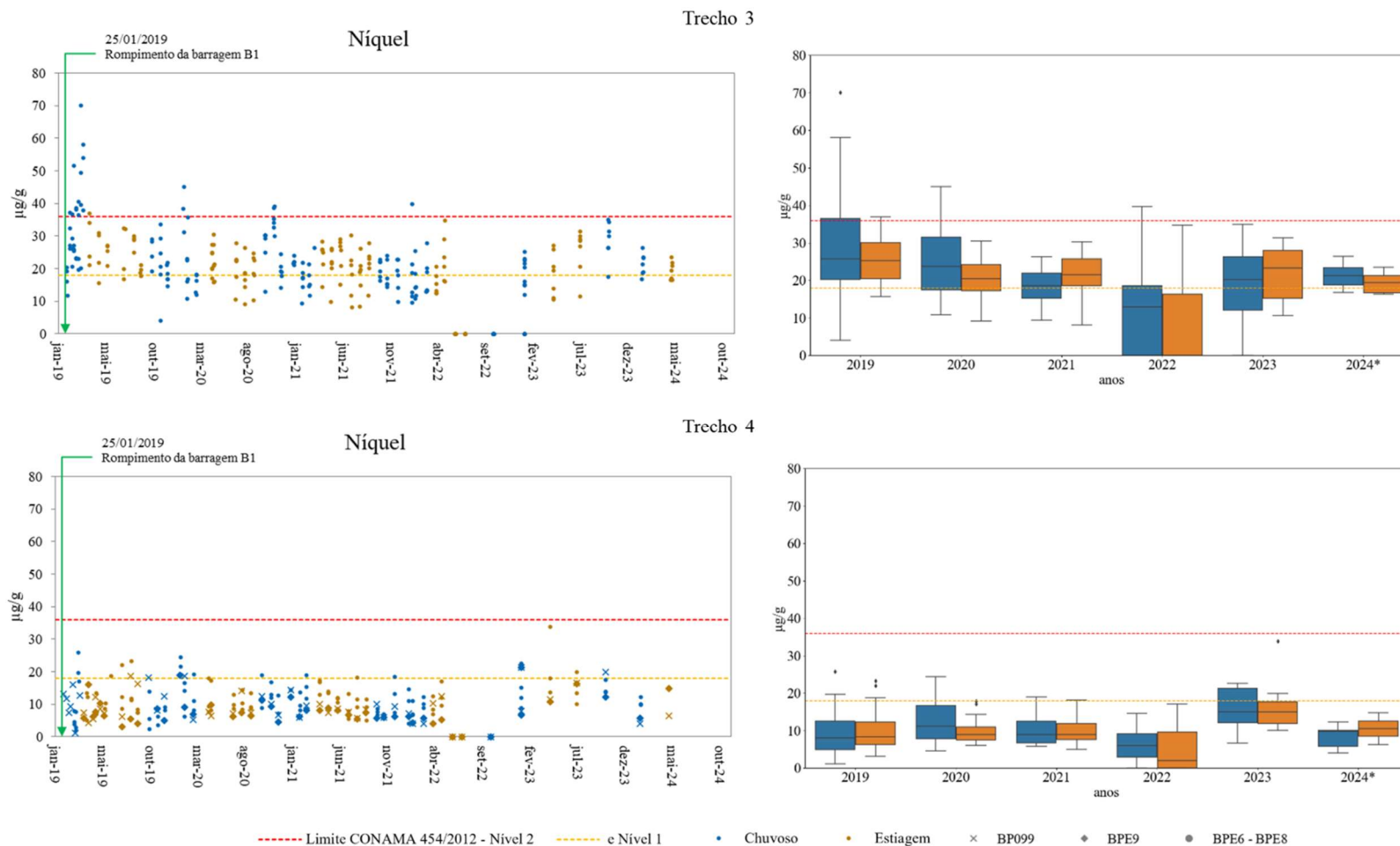
Elaborado pelos autores (2024)

Figura 53 - Resultados de níquel em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 54 - Resultados de níquel em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Cobre em sedimentos

A Figura 55 e a Figura 56 apresentam os gráficos para cobre em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre janeiro/2019 e junho/2024. Na legenda dos gráficos, as linhas amarela e vermelha são referentes aos limites de níveis 1 e 2 (35,7 e 197 µg/g, respectivamente), definidos pela resolução CONAMA 454/2012.

No ano do desastre, em 2019, observa-se no trecho 1 (montante) que apenas um resultado ficou abaixo do limite nível 1 de 35,7 µg/g. Em 2020 e 2021, observou-se uma redução na concentração de cobre nos sedimentos, porém, ainda com violações nível 1, sendo as medianas dos resultados próximas a concentração de 35,7 µg/g para ambos os períodos sazonais. No período chuvoso de 2022, verificou-se que não ocorreram violações, enquanto no período seco, observou-se algumas violações de nível 1. Já os resultados do período chuvoso de 2023 foram todos acima do limite de nível 1, enquanto todos os resultados do período seco ficaram abaixo do limite da legislação. Em 2024 não se identificou violações em ambos os períodos sazonais.

No trecho 2, logo após o rompimento das barragens em janeiro de 2019 (período chuvoso), todos os resultados ultrapassam o limite nível 1 e verificou-se ainda algumas violações do nível 2. 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 período seco de 2019 observou-se uma redução na concentração de cobre nos sedimentos, mas, apenas um resultado ficou abaixo do limite nível 1. Em ambos os períodos sazonais de 2020 as concentrações de cobre decresceram. Contudo, foram verificadas violações de nível 1. A partir de 2021 verifica-se a redução das concentrações, inclusive de resultados que ultrapassam o limite da legislação. No primeiro semestre de 2024 não houve ocorrência de concentrações acima do limite da legislação.

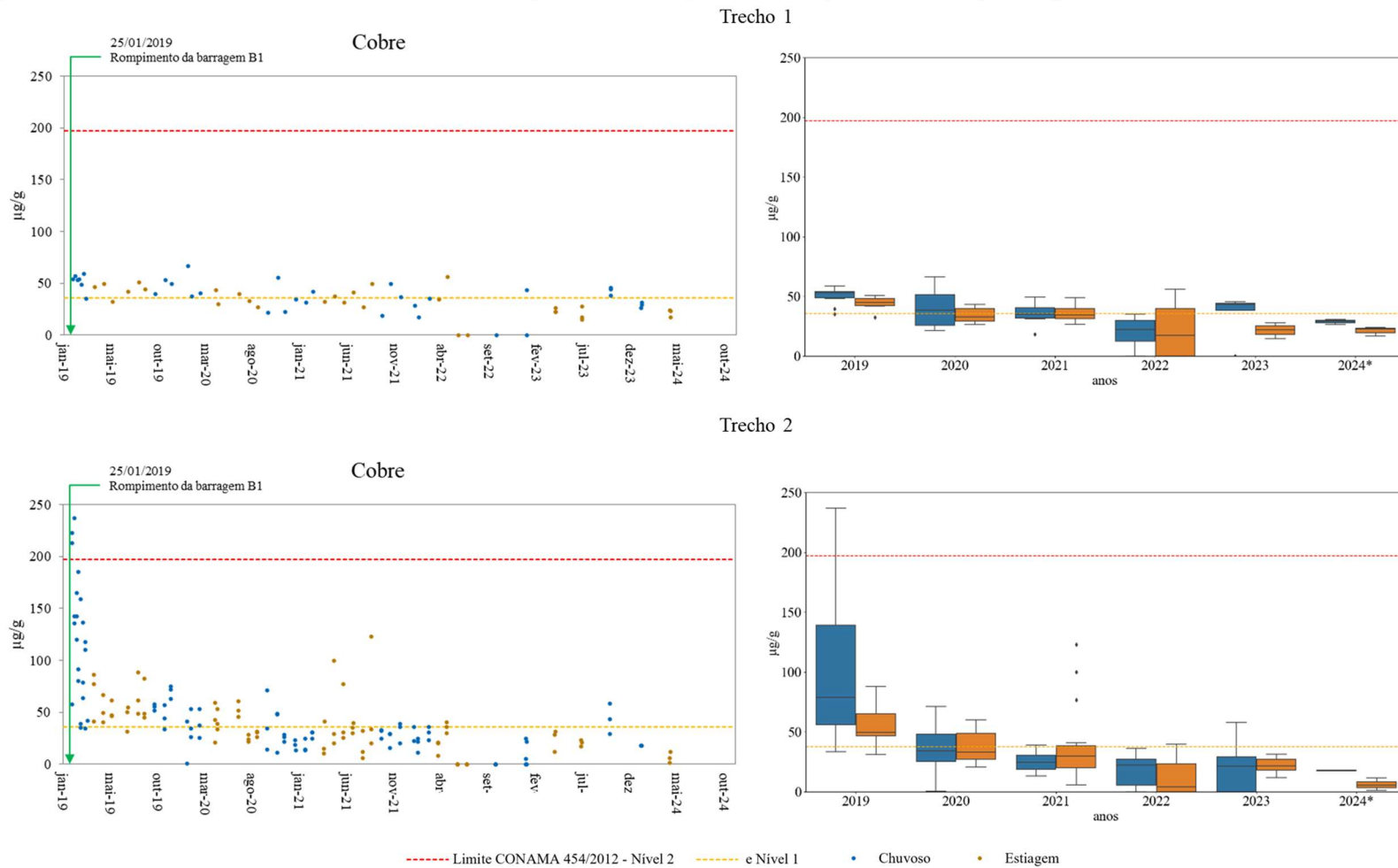
No trecho 3, a jusante da termoelétrica de Igarapé até Retiro Baixo, verifica-se em 2019, um comportamento similar para ambos os períodos sazonais. Os resultados estão concentrados na faixa abaixo de 100 µg/g e acima de 35,7 µg/g. No ano de 2020, observa-se o decréscimo

das concentrações, principalmente no período chuvoso, mas ainda com muitas violações de nível 1. Nos anos de 2021 e 2022 verifica-se que a maioria dos resultados encontram-se abaixo do limite estabelecido pela legislação. Já no período chuvoso de 2023, verifica-se um aumento da concentração de cobre no sedimento, com violações ao limite nível 1. As concentrações de cobre no período de estiagem se mantiveram abaixo de 35,7 µg/g. Até junho de 2024 todos os resultados estão abaixo do limite nível 1. Ressalta-se que, neste trecho, não ocorreram violações de nível 2.

No trecho 4, de Retiro Baixo até o reservatório de Três Marias, verifica-se que ocorreram violações de nível 1 no ano de 2019, mas a maioria dos resultados encontra-se abaixo do limite da legislação. Em 2020 e 2021 a maior parte dos resultados está abaixo de 35,7 µg/g, com violações pontuais nos pontos BPE6, BPE7 e BPE8. Em 2022 todas as concentrações de cobre no sedimento estão abaixo do limite nível 1. Já em 2023, verificou-se um pequeno acréscimo nos resultados, porém, apesar de algumas violações de nível 1, a maioria dos valores está abaixo do limite. Até junho de 2024 todos os resultados estão abaixo do limite nível 1. Ressalta-se que, neste trecho, não ocorreram violações de nível 2. Desta forma, os registros de cobre nesse trecho sugerem ter relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B-I, podendo ter origem em outras fontes presentes na bacia que drenam para o reservatório.

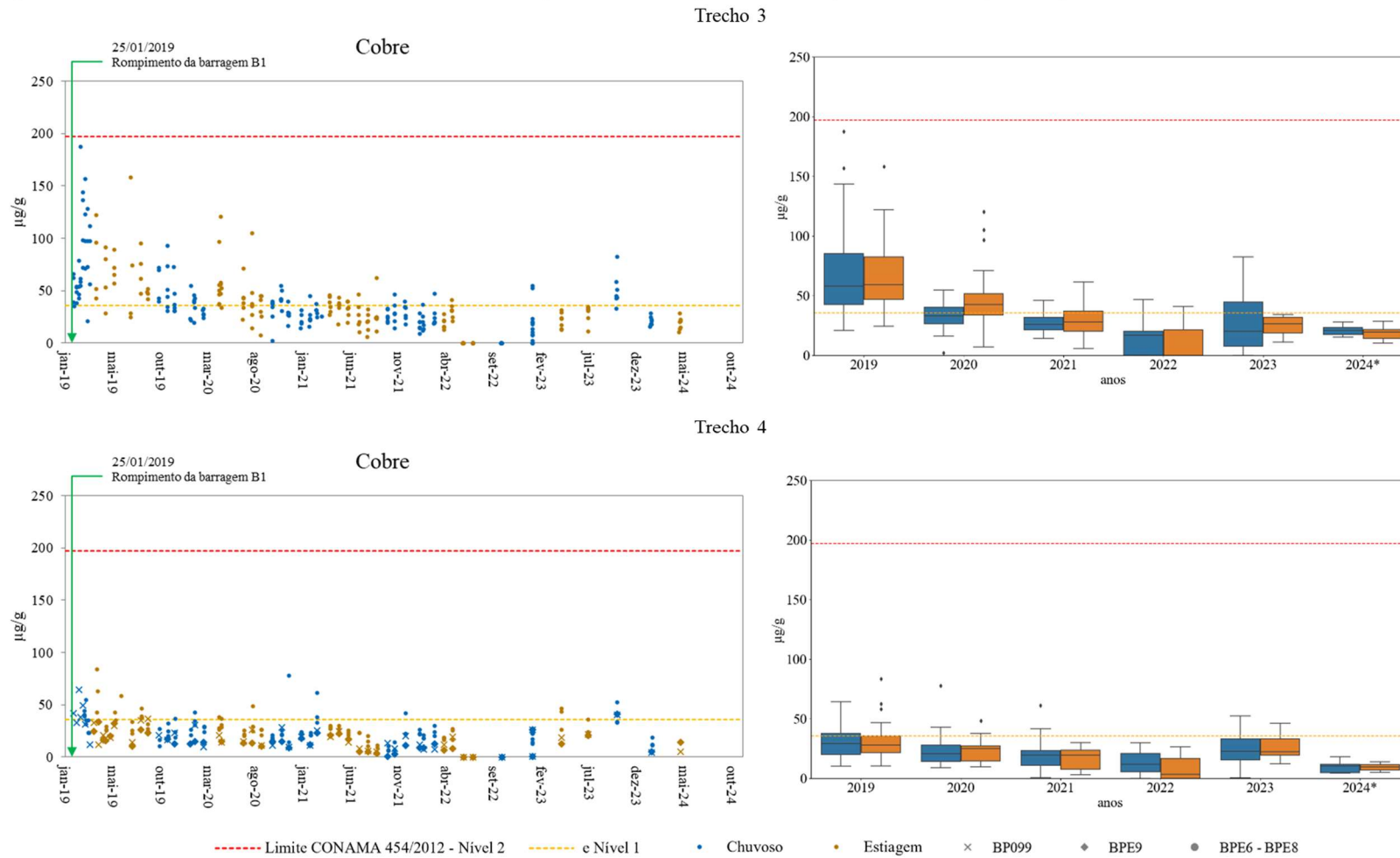
Apesar do cobre não fazer parte da composição do rejeito, esses resultados demonstram que a elevação de sua concentração nos sedimentos pode estar relacionada de maneira indireta com o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA, bem como, com a presença de outras atividades antrópicas na bacia do rio 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.

Figura 55 - Resultados de cobre em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 56 - Resultados de cobre em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Arsênio em Sedimentos

Na Figura 57 e na Figura 58 são apresentados os gráficos para arsênio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre janeiro/2019 e junho/2024. Na legenda do gráfico, a linha amarela é referente aos valores orientadores do Nível 1 (5,9 µg/g) e a linha vermelha os limites do Nível 2 (17 µg/g), estabelecidos na CONAMA n°454/2012.

O comportamento da concentração de arsênio no trecho a montante (trecho 1) e logo a jusante do rompimento (trecho 2) é similar. Verificou-se violações de nível 1 (5,9 µg/g) no ano de 2019. No trecho 1 ainda foram verificados alguns resultados acima de 5,9 µg/g no período seco de 2022 e 2023 e no período chuvoso de 2024. No trecho 2 também ocorreram violações nível 1 no período chuvoso de 2021 e no período seco de 2023.

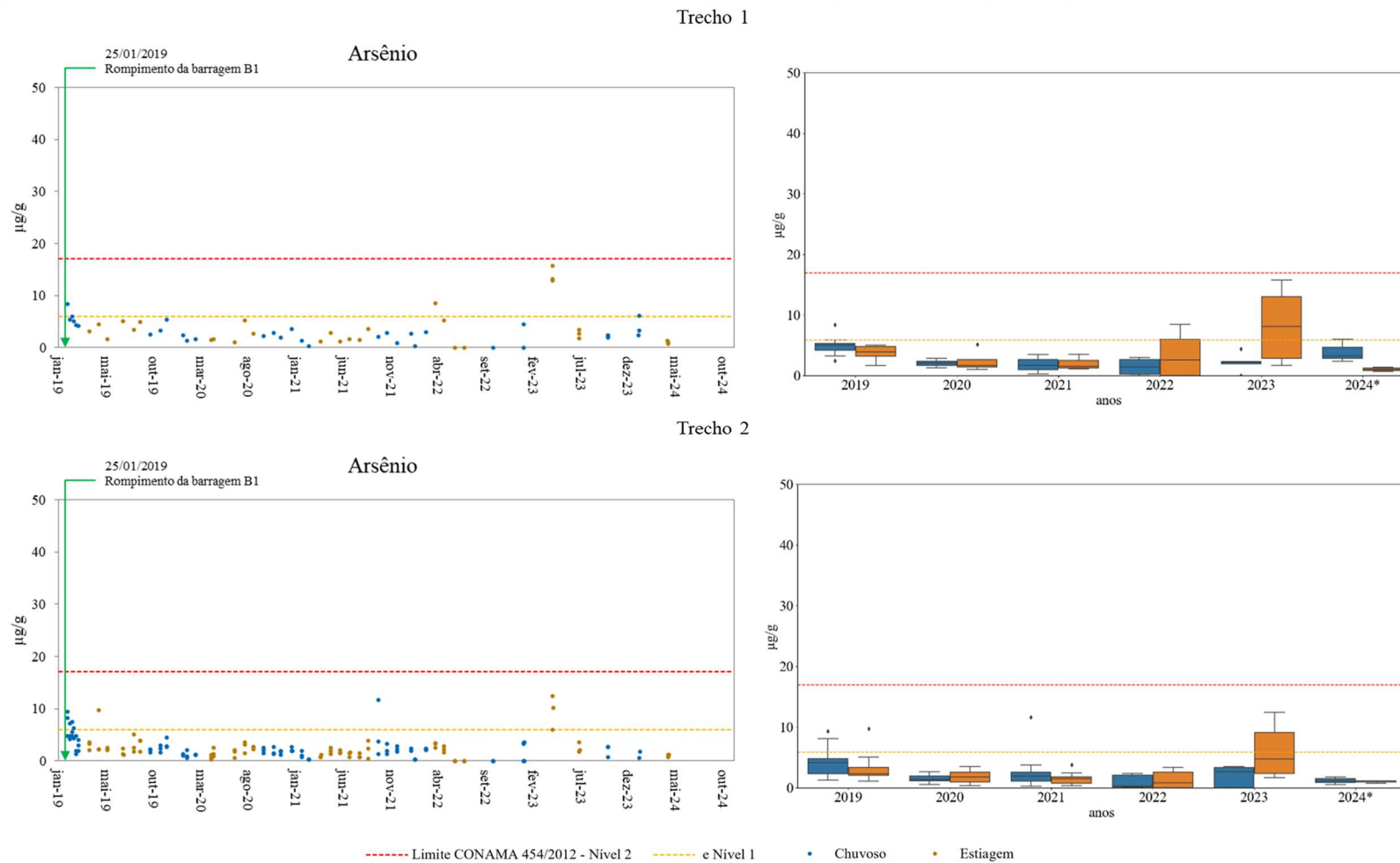
No trecho a jusante de Igarapé até Retiro Baixo (trecho 3), foram observadas violações de nível 1 logo após o rompimento das barragens, no período chuvoso de 2019. Entre a estiagem de 2019 e 2022 todos os resultados encontraram-se abaixo do limite estabelecido pela legislação. Contudo, no período chuvoso de 2023 observou-se violações de nível 2 (17 µg/g), com resultados que ultrapassaram 30 µg/g. Na estiagem de 2023 verificou-se resultados acima do limite nível 1. Já em 2024, todos os resultados se encontram abaixo do limite estabelecido na legislação.

No trecho a jusante de Retiro Baixo até o reservatório de Três Marias (trecho 4), entre os anos de 2019 e 2022 verificou-se que, com exceção de alguns valores extremos, os resultados encontram-se abaixo de 5,9 µg/g (nível 1). Em 2023, observou-se o aumento das concentrações de arsênio nos sedimentos, com resultados que superam o limite de nível 2. Cabe ressaltar que as medianas dos resultados no ano foram inferiores ao limite nível 1. Esse fato pode ser decorrente de agentes externos ao rompimento da Barragem B-I, podendo ter origem de outras fontes presentes na bacia que drenam para o reservatório. Em 2024, todos os resultados estão abaixo do limite da legislação no período analisado.

Em resumo, os valores de arsênio obtidos acima do Nível 1 incluem o trecho a montante da influência do ribeirão Ferro-Carvão, trecho que não recebeu impacto do rompimento da

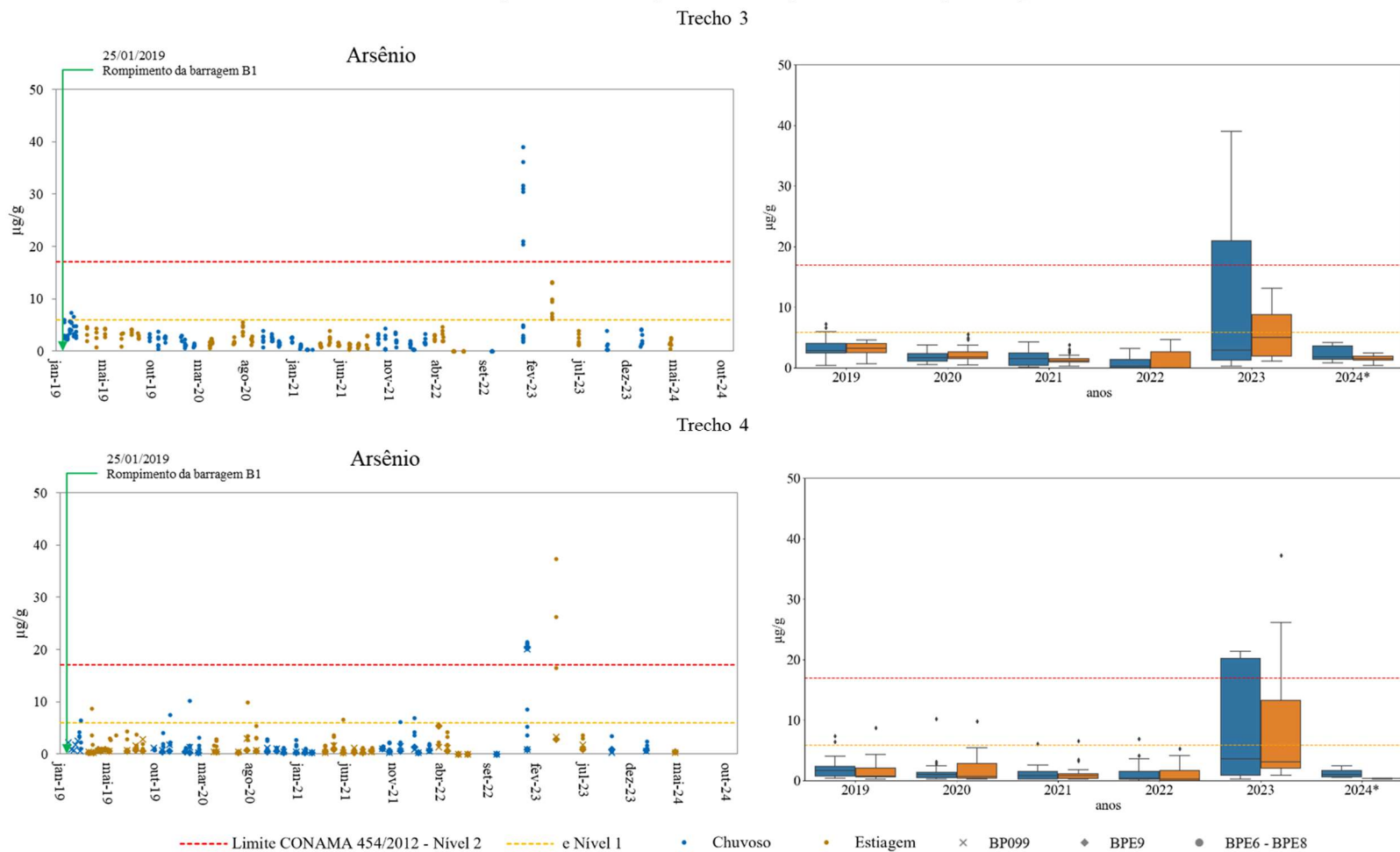
Barragem B-I. Desta maneira, pode-se associar a presença de arsênio nos sedimentos ao material presente no leito do rio Paraopeba, antes do desastre.

Figura 57 - Resultados de arsênio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 58 - Resultados de arsênio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Cromo em Sedimentos

Na Figura 59 e na Figura 60 são apresentados os gráficos para cromo em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre janeiro/2019 a junho/2024. Na legenda no gráfico, a linha amarela é referente aos limites orientadores do Nível 1 (37,3 µg/g) e a linha vermelha os limites do Nível 2 (90 µg/g) estabelecidos pela CONAMA n°454/2012. É possível verificar no período de monitoramento pelo Igam valores de cromo em desconformidades com a legislação em toda calha do rio Paraopeba.

No trecho 1, localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, que não recebeu impacto do rompimento das barragens da Vale S.A, todos os registros de cromo estiveram acima do Nível 1, com exceção de algumas amostragens realizadas no ano de 2022 e 2023.

No trecho 2, localizado nos primeiros quilômetros a jusante do desastre, verificou-se que em 2019 apesar das extrapolações do limite nível 1, as medianas dos resultados nos períodos chuvoso e seco encontram-se abaixo de 37,3 µg/g. Em 2020 e 2021 observou-se um acréscimo nas concentrações, nas quais as medianas dos valores registrados ultrapassaram o limite nível 1. Em 2021 ainda verificou-se violações de nível 2 no período chuvoso. Em 2022 e 2023 as concentrações de cromo nos sedimentos reduziram em ambos os períodos sazonais. Contudo, ainda foram observadas violações de nível 1. Cabe ressaltar que a grande parte das concentrações no período seco de 2023 está acima do limite nível 1. Em 2024 observou-se que todas as concentrações medidas estão entre o limite de nível 1 e 2 no período chuvoso, porém todos os resultados do período seco estão abaixo do limite estabelecido na legislação.

No trecho 3, localizado a jusante da termoeletrica de Igarapé até Retiro Baixo, observa-se um comportamento similar nos anos de 2019, 2020 e 2021, no qual a maioria dos resultados encontram-se entre o limite de nível 1 e 2, com alguns resultados abaixo do limite legal e outros acima do nível 2. Assim como no trecho 2, em 2022 verificou-se uma redução na concentração de cromo nos sedimentos, mas ainda com extrapolações do limite nível 2. Em 2023 as concentrações voltaram a aumentar, com medianas dos resultados acima do limite de nível 1 e

extrapolação do limite de nível 2 no período chuvoso. No período chuvoso de 2024 verifica-se que todos os resultados estão próximos do limite de 90 µg/g, enquanto as concentrações no período seco reduziram quando comparadas ao ano de 2023, contudo com violações de limite nível 1.

No trecho 4, localizado a jusante de Retiro Baixo até o reservatório de Três Marias, observa-se extrapolações de nível 2 durante todo o período analisado, com exceção da estiagem dos anos de 2022 e 2024. Nos anos de 2019, 2020, 2021 e 2023 observa-se um comportamento similar da concentração de cromo no sedimento, com a maioria dos resultados na faixa entre os limites 1 e 2. A redução das concentrações de cromo é observada no ano de 2022, no qual, apesar das extrapolações dos dois limites, as medianas dos resultados está abaixo do limite de nível 1. No período chuvoso de 2024 verifica-se o aumento dos resultados, com muitas extrapolações de nível 2 no remanso do reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8). No período seco as concentrações estão no limite nível 1 ou abaixo dele.

A partir da análise dos 4 trechos analisados, 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 de cromo acima do Nível 2 foram verificados nos anos de 2019 a 2024, desde montante da confluência com o Ribeirão Ferro Carvão até UHE Retiro Baixo. 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 13). Isso sugere que as alterações de cromo têm relação com algum fator externo ao material proveniente da Barragem B-I 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.

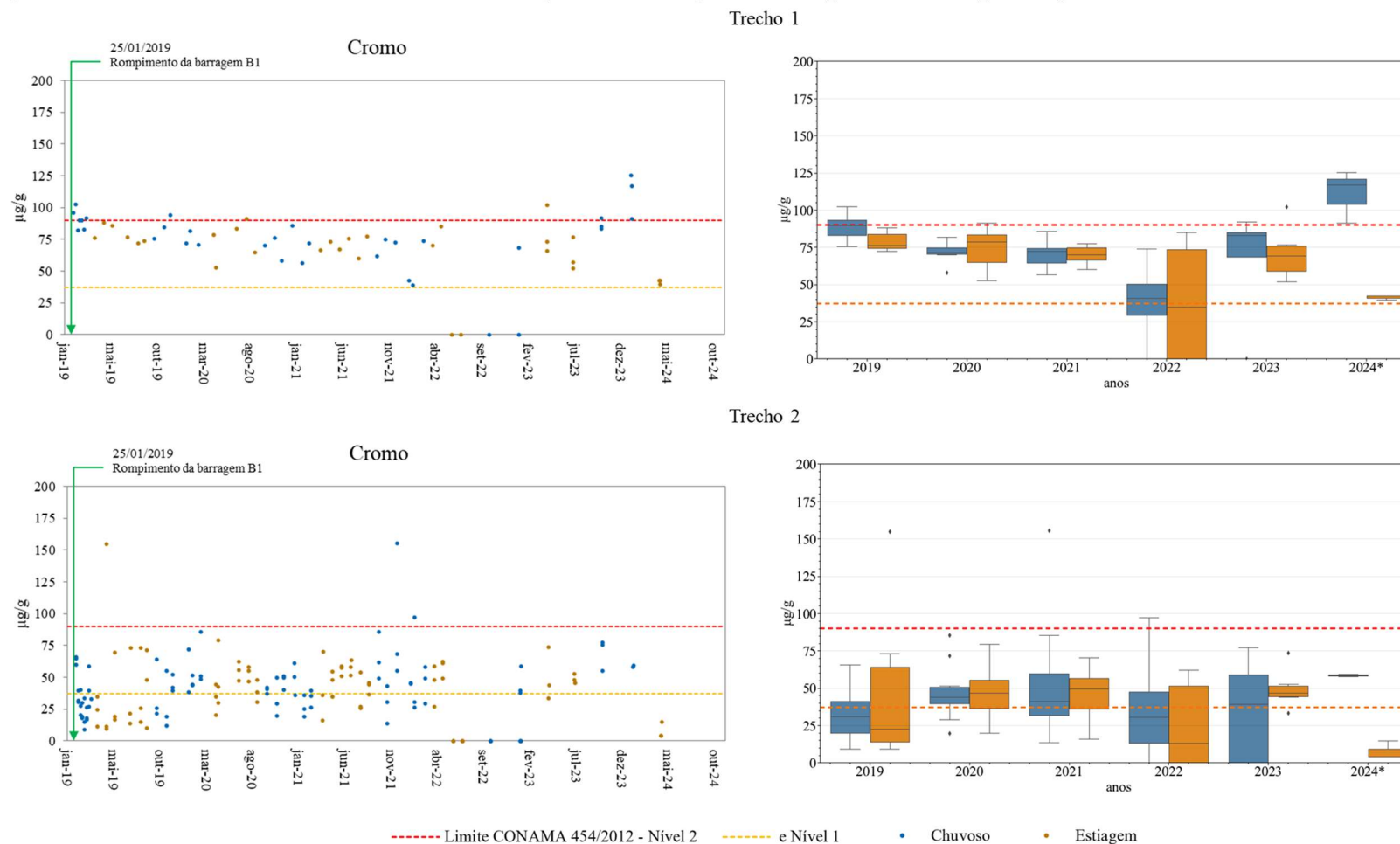
Tabela 13 - Valores obtidos para o cromo que ultrapassaram o nível 2 (90 µg/g) no período de janeiro/2019 a junho/2024

Trecho	Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
4	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
	BPE6	07/07/2023	Cromo	µg/g	103,35	Seco
	BPE7	13/01/2023	Cromo	µg/g	253,75	Chuvoso
	BPE7	14/04/2023	Cromo	µg/g	743,18	Seco
	BPE7	24/01/2024	Cromo	µg/g	368,18	Chuvoso
	3	BPE8	13/01/2023	Cromo	µg/g	304,08
BPE8		14/04/2023	Cromo	µg/g	810,55	Seco
BPE8		07/07/2023	Cromo	µg/g	234,38	Seco
1	BPE8	05/10/2023	Cromo	µg/g	191,49	Chuvoso
	BPE8	24/01/2024	Cromo	µg/g	591,71	Chuvoso
	BP082	06/10/2022	Cromo	µg/g	250,68	Chuvoso
	BP077	05/10/2023	Cromo	µg/g	101,12	Chuvoso
	BP104	04/10/2023	Cromo	µg/g	111,05	Chuvoso
1	BP027	11/04/2023	Cromo	µg/g	102,17	Seco
	BP027	08/01/2024	Cromo	µg/g	125,36	Chuvoso
	BP029	02/10/2023	Cromo	µg/g	91,97	Chuvoso
	BP029	10/01/2024	Cromo	µg/g	116,76	Chuvoso
	BP036	11/01/2024	Cromo	µg/g	91,23	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

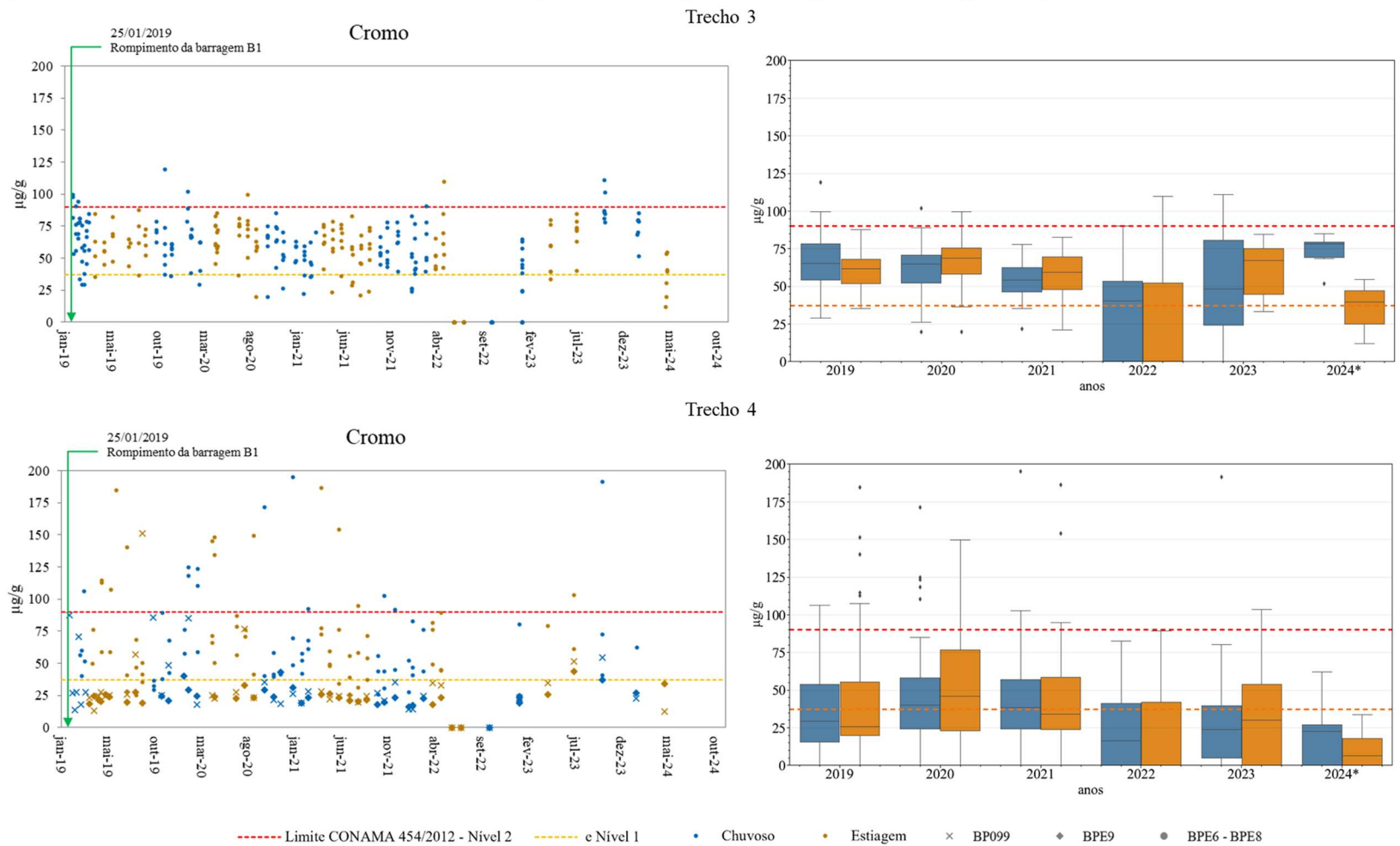
É possível verificar no período de monitoramento pelo Igam valores de cromo em desconformidades com a legislação em toda calha do rio Paraopeba.

Figura 59 - Resultados de cromo em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 60 - Resultados de cromo em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Cádmio em Sedimentos

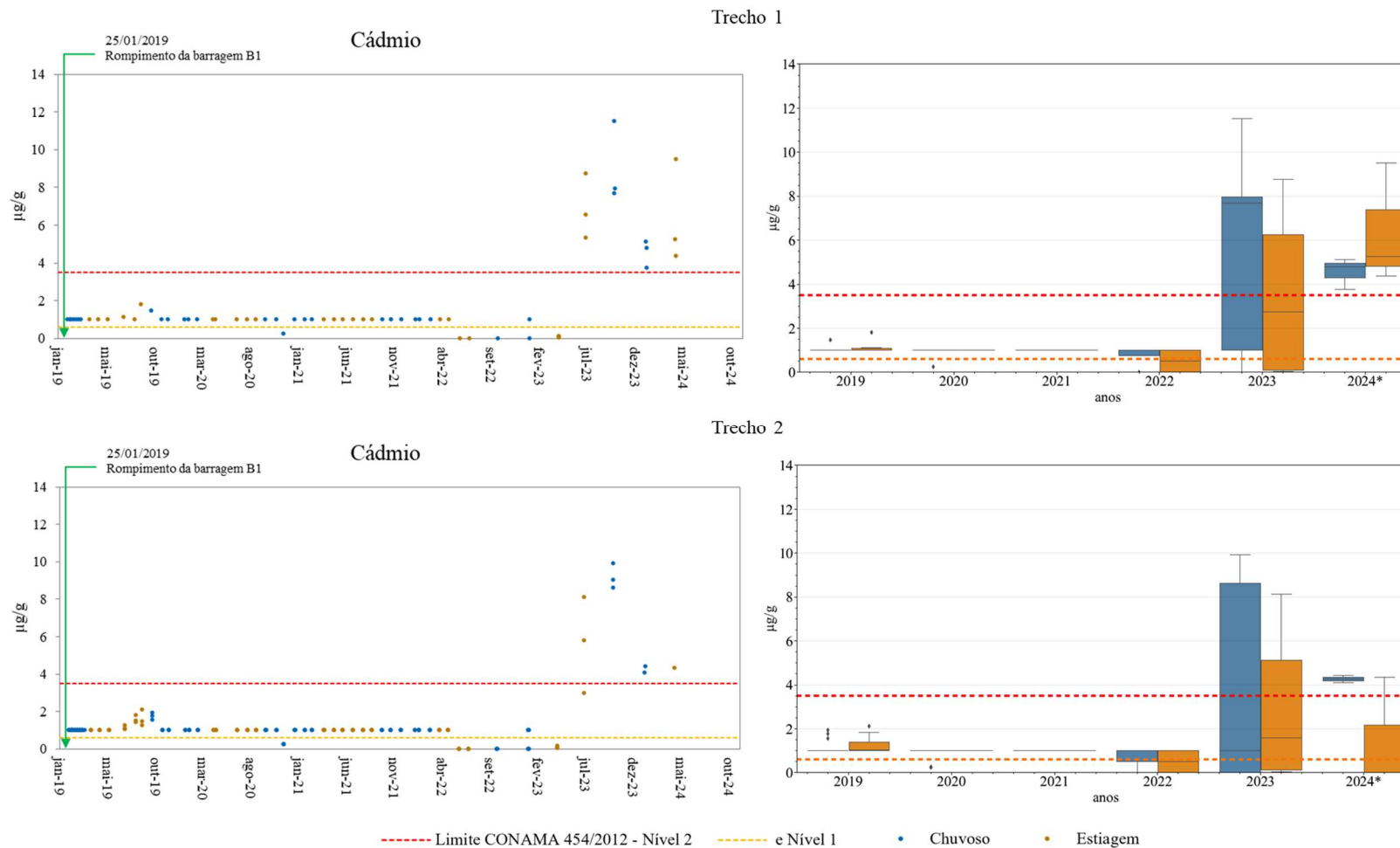
Na Figura 61 e na Figura 62 são apresentados os gráficos para cádmio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre janeiro/2019 e junho/2024. Na legenda do gráfico, a linha amarela é referente ao Nível 1 (0,6 µg/g) definido pela Resolução Conama nº 454 de 2012, o Nível 2 é de 3,5 µg/g, representado pela linha vermelha.

Para os quatro trechos analisados, desde o BP027 (Congonhas) até o BPE8 (Reservatório de Três Marias) observou-se um comportamento similar na presença de cádmio no sedimento. Entre os anos de 2019 e 2021 os resultados se concentraram na faixa entre o limite nível 1 (0,6 µg/g) e 2 (3,5 µg/g), sem diferenças expressivas nas concentrações. Contudo, vale destacar que o limite de quantificação² para o método de análise de cádmio em sedimentos (1 µg/g) no período é superior ao Nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 (0,6 µg/g).

Em 2022, verificou-se uma queda nas concentrações, sendo que maioria dos resultados foram abaixo do limite de nível 1. Contudo, foram verificados valores acima deste nível. Já em 2023, observou-se a elevação das concentrações de cádmio no sedimento e, com exceção do período seco no Trecho 4, foram identificados valores que ultrapassaram o limite de nível 2. No primeiro semestre de 2024 verificou-se que todas as amostragens nos trechos 1 (a montante do rompimento) e 2 (logo a jusante do rompimento), bem como a maioria dos resultados do Trecho 3 apresentaram concentrações acima do limite nível 2. No trecho 4 também foram identificadas violações de nível 2 para o período chuvoso e no período seco, todos os resultados ficaram entre os níveis 1 e 2. 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 desde 2019, inclusive no trecho fora da área impactada.

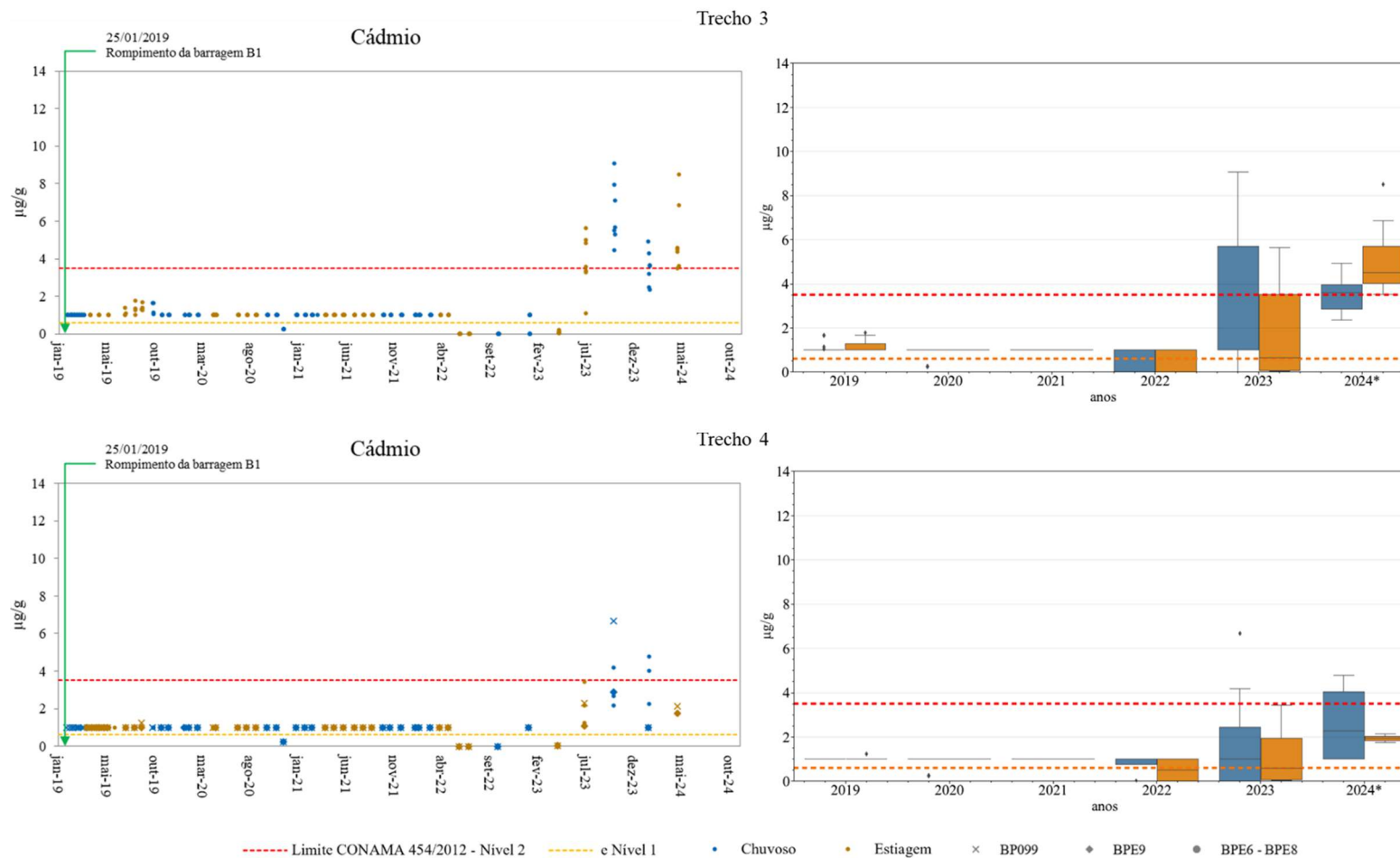
² Limite de quantificação é a menor quantidade ou concentração do parâmetro, que pode ser determinada pelo método de análise empregado.

Figura 61 - Resultados de cádmio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 62 - Resultados de cádmio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Zinco em Sedimentos

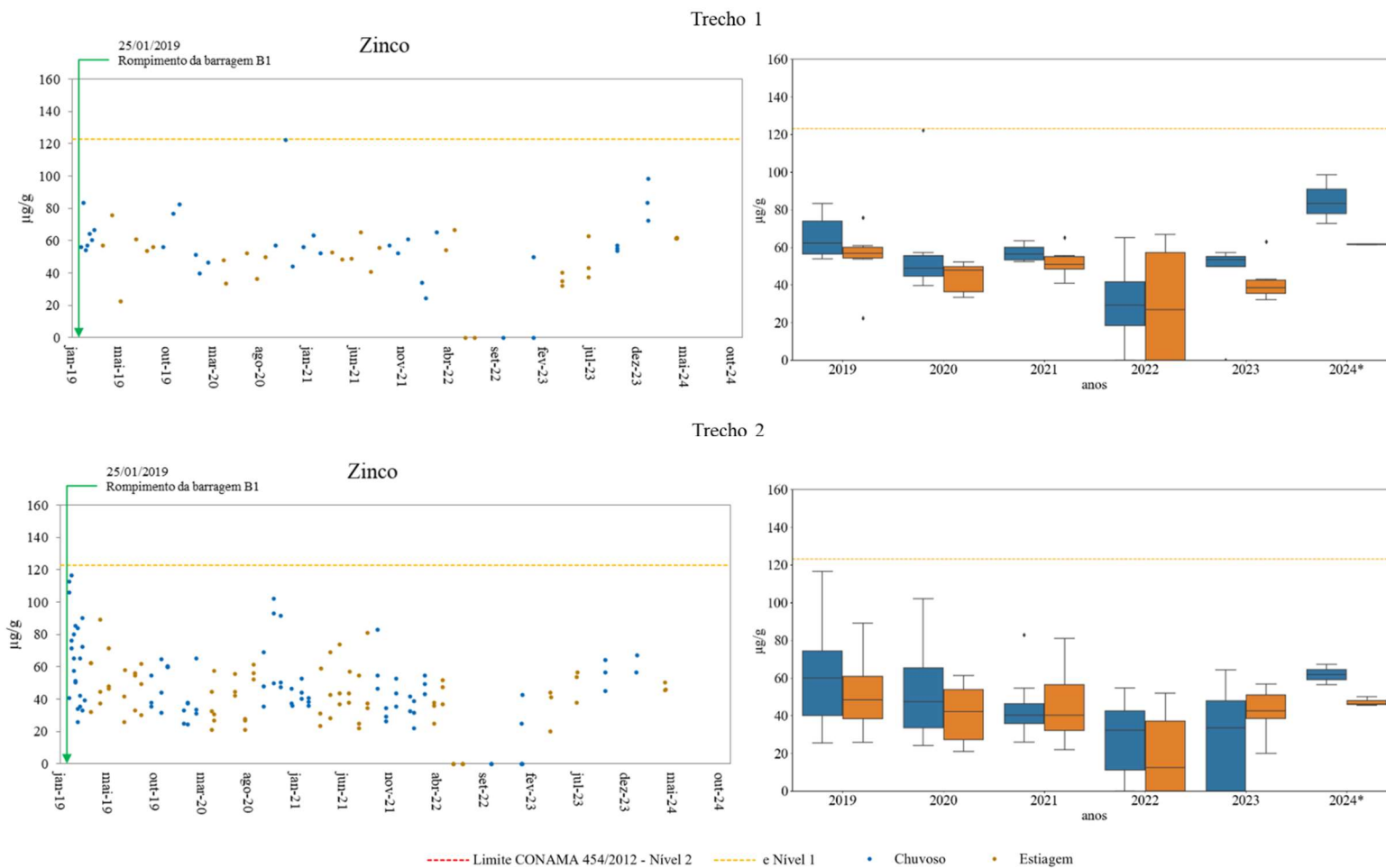
Na Figura 63 e na Figura 64 são apresentados os gráficos para zinco em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre janeiro/2019 e junho/2024. Na legenda do gráfico, a linha em amarelo representa o Nível 1 (123 µg/g) da resolução CONAMA 454/12. O limite nível 2 (315 µg/g) da resolução não foi representado graficamente, uma vez que não houve registros de resultados próximos a este valor.

Durante o período de monitoramento especial analisado na bacia do rio Paraopeba foram registrados apenas dois resultados acima do Nível 1, sendo ambas no trecho 3 durante o período chuvoso, nos anos de 2020 e 2023.

Nota-se que desde 2019 as estações de amostragem localizadas no rio Paraopeba logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (trechos 2 e 3) mostraram concentrações próximos e até inferiores aos obtidos nas estações localizadas a montante (trecho 1) da área afetada pelos rejeitos. 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.

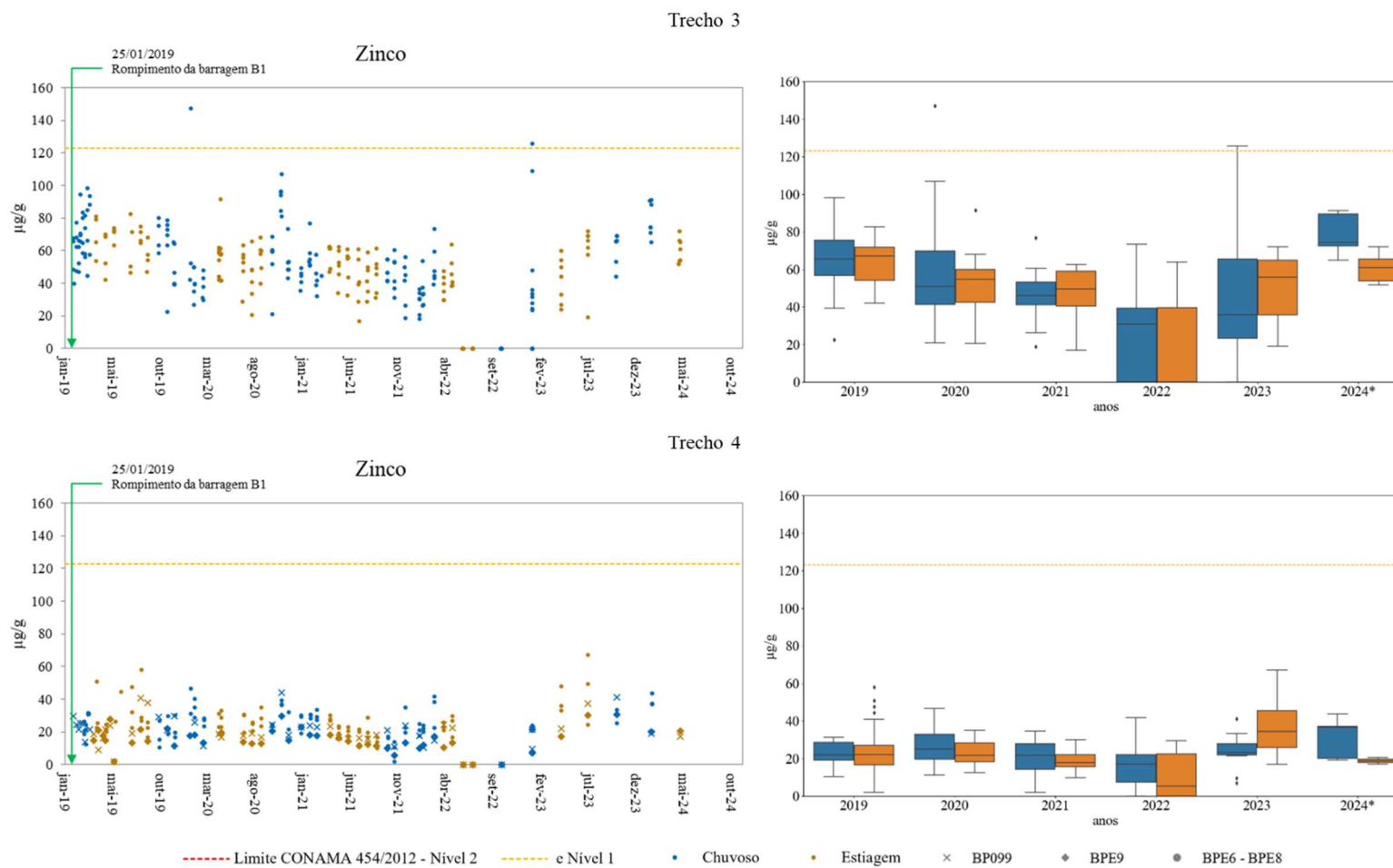
Observa-se que nas estações localizadas a jusante de Retiro Baixo e no reservatório de Três Marias (BPE6, BPE7 e BPE8), os valores para zinco no período entre 2019 e 2024 foram inferiores aos reportados a montante e não sofreram alteração significativa entre os anos.

Figura 63 - Resultados de zinco em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 64 - Resultados de zinco em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Estrôncio em sedimento

Na Figura 65 e na Figura 66 são apresentados os gráficos de estrôncio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 e 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 (trechos 2 e 3). Já nas estações de amostragem localizadas a jusante de Retiro Baixo e no reservatório de Três Marias (trecho 4) os valores foram próximos ou inferiores aos obtidos no trecho a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (trecho 1), que não sofreu impactos do rejeito provenientes das barragens da Vale S.A, a exceção registrada em 2020 no ponto BPE7 (Tabela 14).

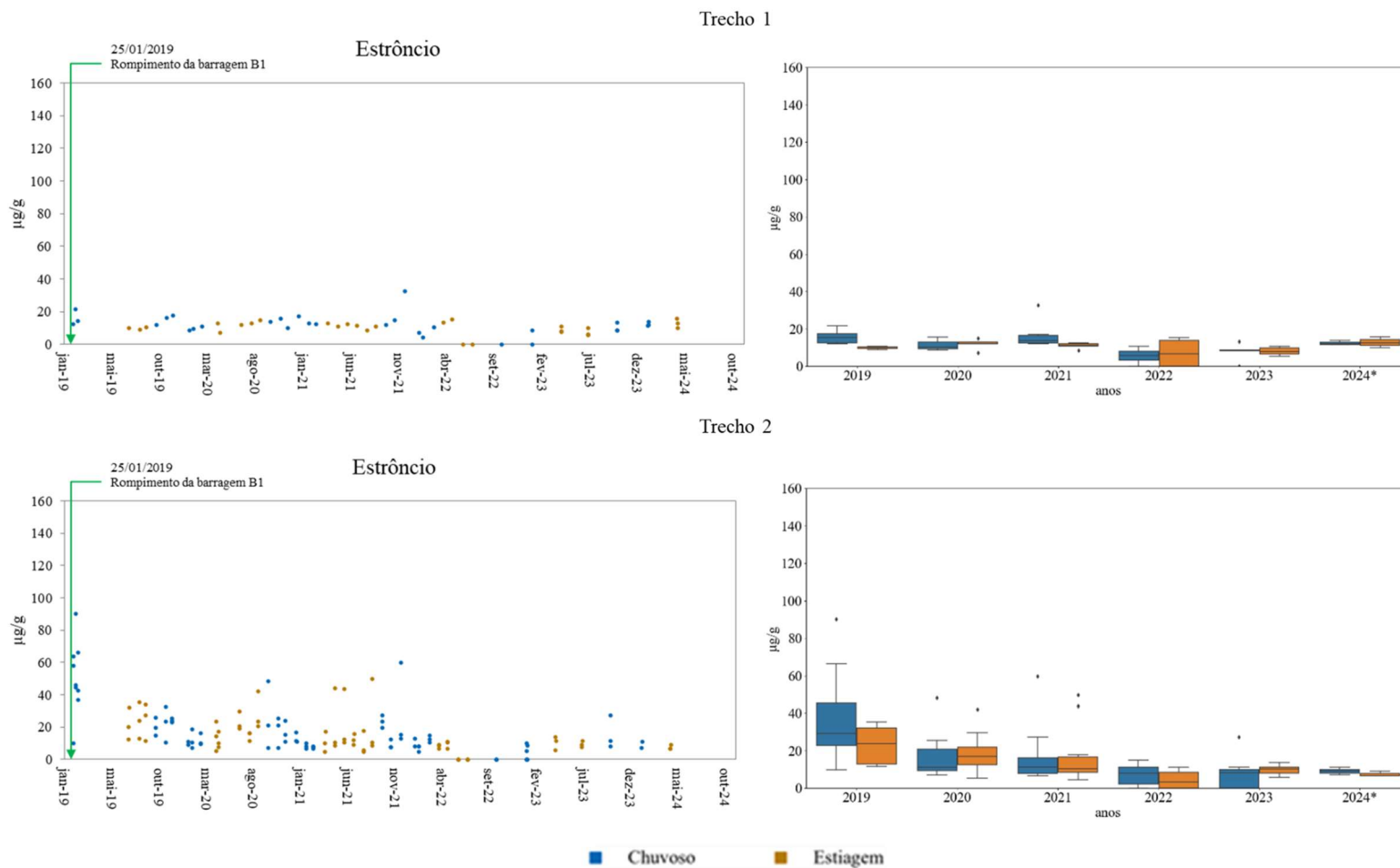
Tabela 14 - Valores extremos obtidos para o estrôncio no período de janeiro/2019 a junho/2024

Trecho	Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
3	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
4	BPE7	05/12/2020	Estrôncio	µg/g	141,73	Chuvoso
3	BP077	09/02/2021	Estrôncio	µg/g	151,54	Chuvoso

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

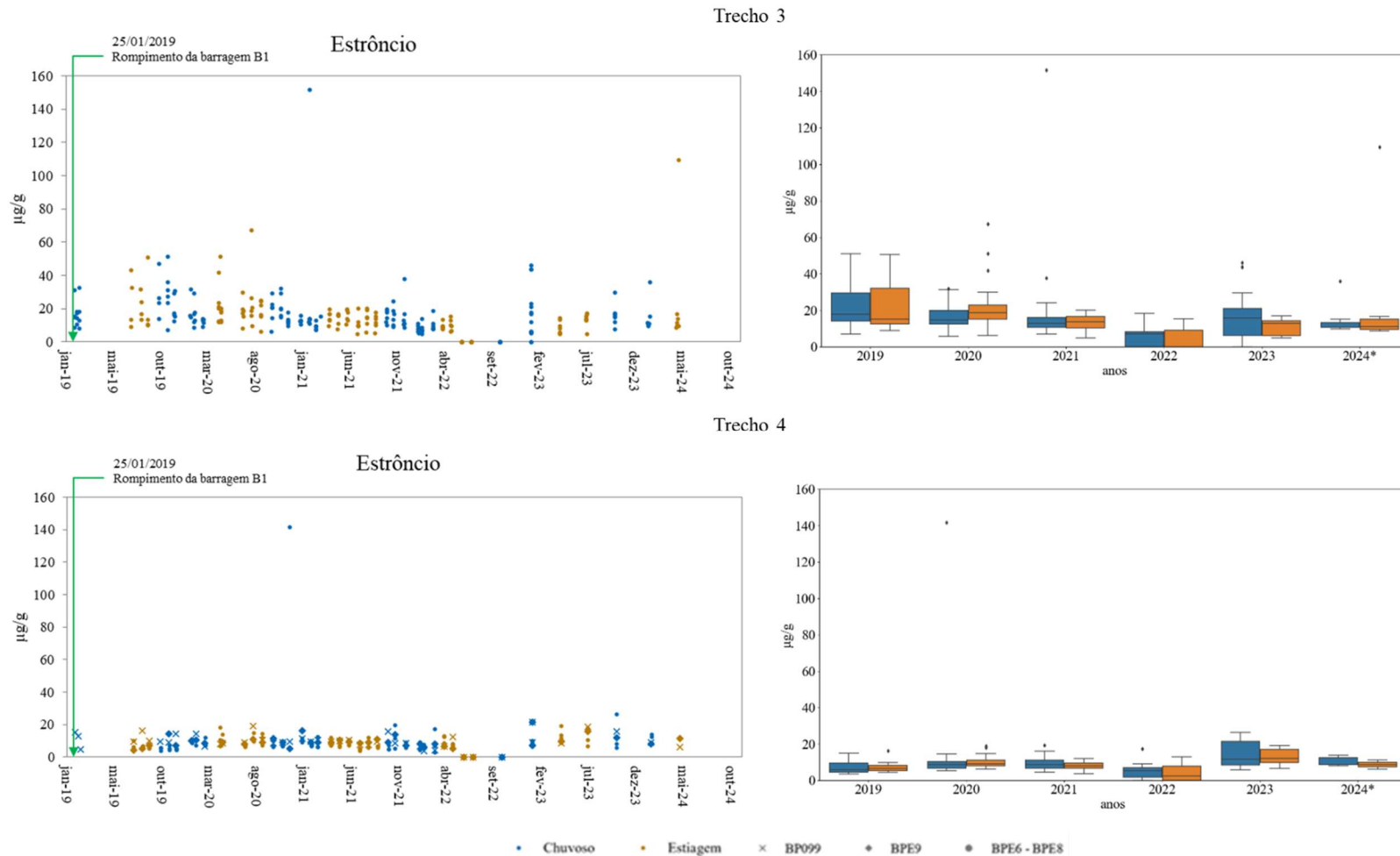
Registra-se que a elevação dos valores de estrôncio nos sedimentos pode estar relacionada com o rompimento das barragens B-I, BIV e BIV-A, pois apresenta-se mais evidente a partir da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, sobretudo no ano do rompimento (2019). Os resultados da avaliação composicional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

Figura 65 - Resultados de estrôncio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 66 - Resultados de estrôncio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de 2019 a 2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Titânio e Vanádio em sedimentos

Nos gráficos das Figuras 65 a 68 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 janeiro/2019 e junho/2024. 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 os teores majoritariamente inferiores a partir do trecho localizado a jusante da confluência do ribeirão Ferro-Carvão até a jusante da UHE Retiro Baixo, em comparação com a área não impactada, Trecho 1, período chuvoso e seco, com exceção do período seco no Trecho 3 em 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 a 2023, com registros anômalos (Tabela 15). Em fevereiro de 2020 o BPE8 registrou 690 µg/g, sendo o valor mais atual em 2023 de 592,17 µg/g. Como não se observou interferência do material proveniente da Barragem B-I nos trechos a montante do reservatório, 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 15 - Valores extremos obtidos para vanádio no período de janeiro/2019 a junho/2024

Trecho	Estação	Data amostragem	Parâmetro	Unidade	Resultado	Período
4	BPE8	20/11/2019	Vanádio	µg/g	326,08	Chuvoso
	BPE8	12/12/2019	Vanádio	µg/g	383,41	Chuvoso
	BPE8	13/02/2020	Vanádio	µg/g	690,56	Chuvoso
	BPE8	13/08/2020	Vanádio	µg/g	355,76	Seco
	BPE8	10/09/2020	Vanádio	µg/g	259,00	Seco
	BPE8	21/01/2022	Vanádio	µg/g	562,06	Chuvoso
	BPE8	10/03/2022	Vanádio	µg/g	257,22	Chuvoso
	BPE8	09/06/2022	Vanádio	µg/g	218,49	Seco
	BPE8	14/04/2023	Vanádio	µg/g	592,17	Seco

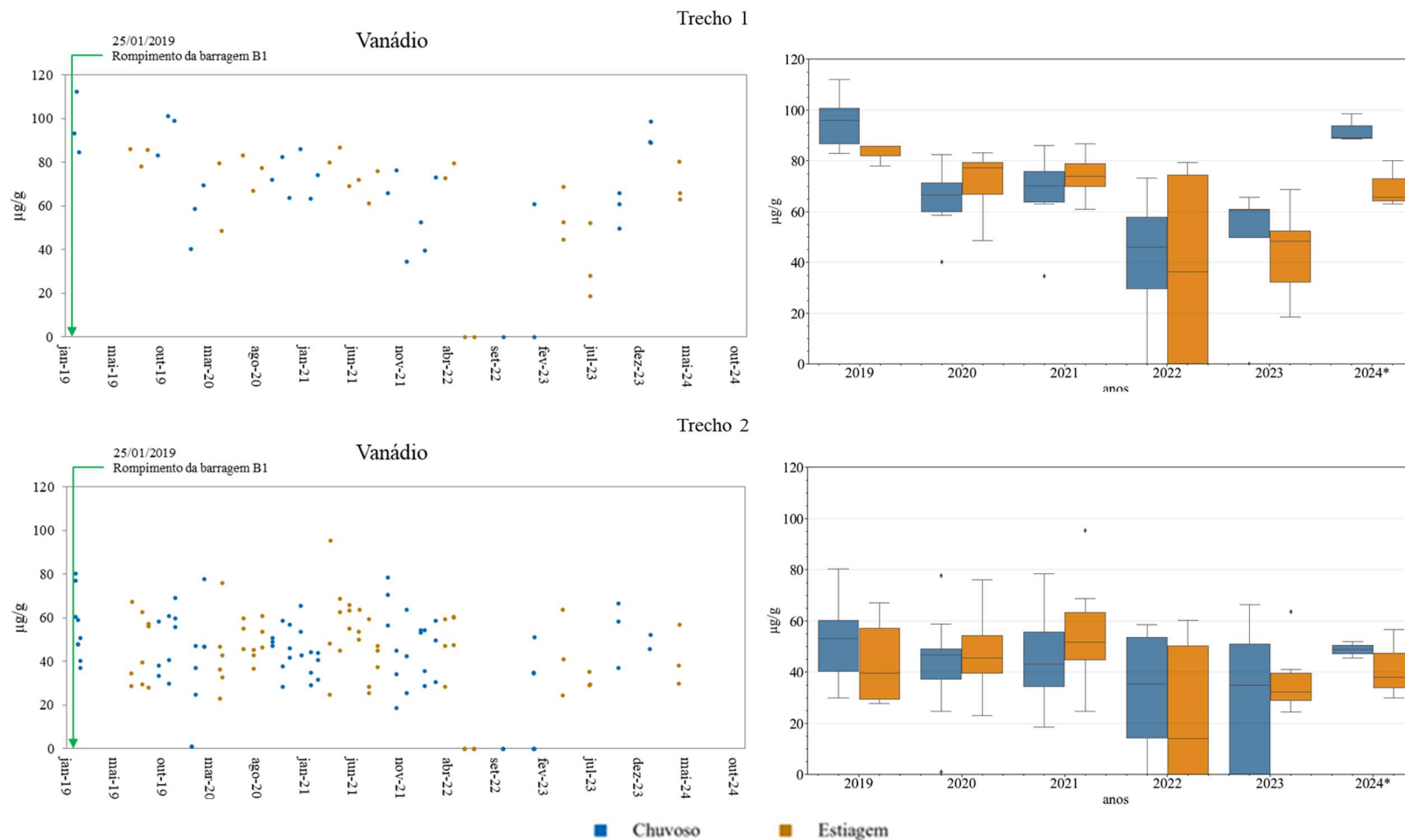
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

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 µg/g.

Para os resultados de titânio, nas estações monitoradas no trecho 4 (a jusante da UHE de Retiro Baixo até a represa de Três Marias) registrou-se os menores teores nos quatro primeiros anos consecutivos. Em 2023 observa-se que houve um acréscimo das concentrações, principalmente no período chuvoso. Esse comportamento também foi observado no trecho 3 (a jusante da usina termoelétrica de Igarapé até a UHE de Retiro Baixo).

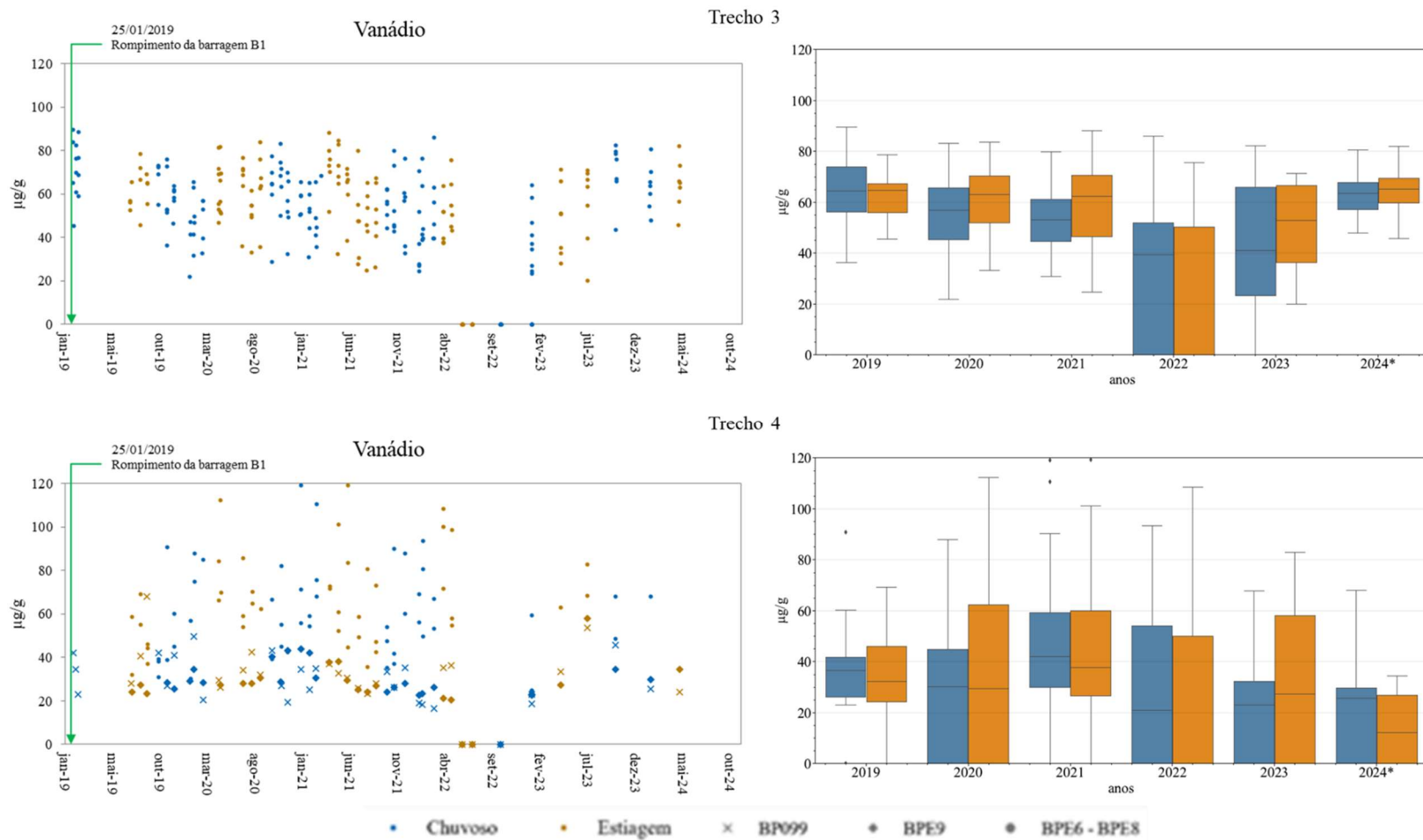
Esse comportamento do titânio e do vanádio também foi registrado no Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimentos Fechamento de Ciclo da Vale S.A (25/01/2019 a 30/06/2019), uma vez que indicou que os resultados desses parâmetros, também avaliados nos sedimentos, não apresentaram relação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

Figura 67 - Resultados de vanádio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 1 e 2



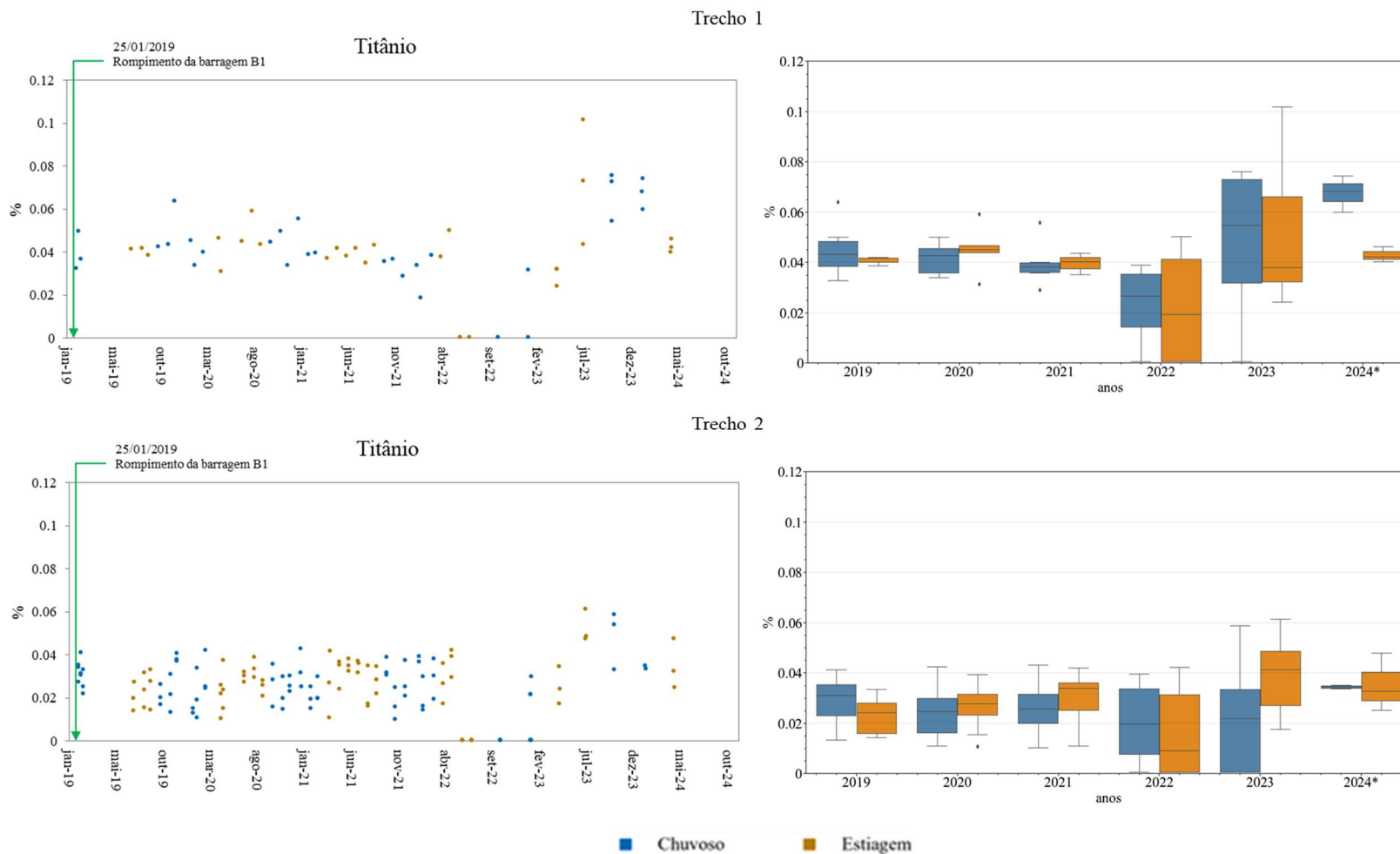
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 68 - Resultados de vanádio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 3 e 4



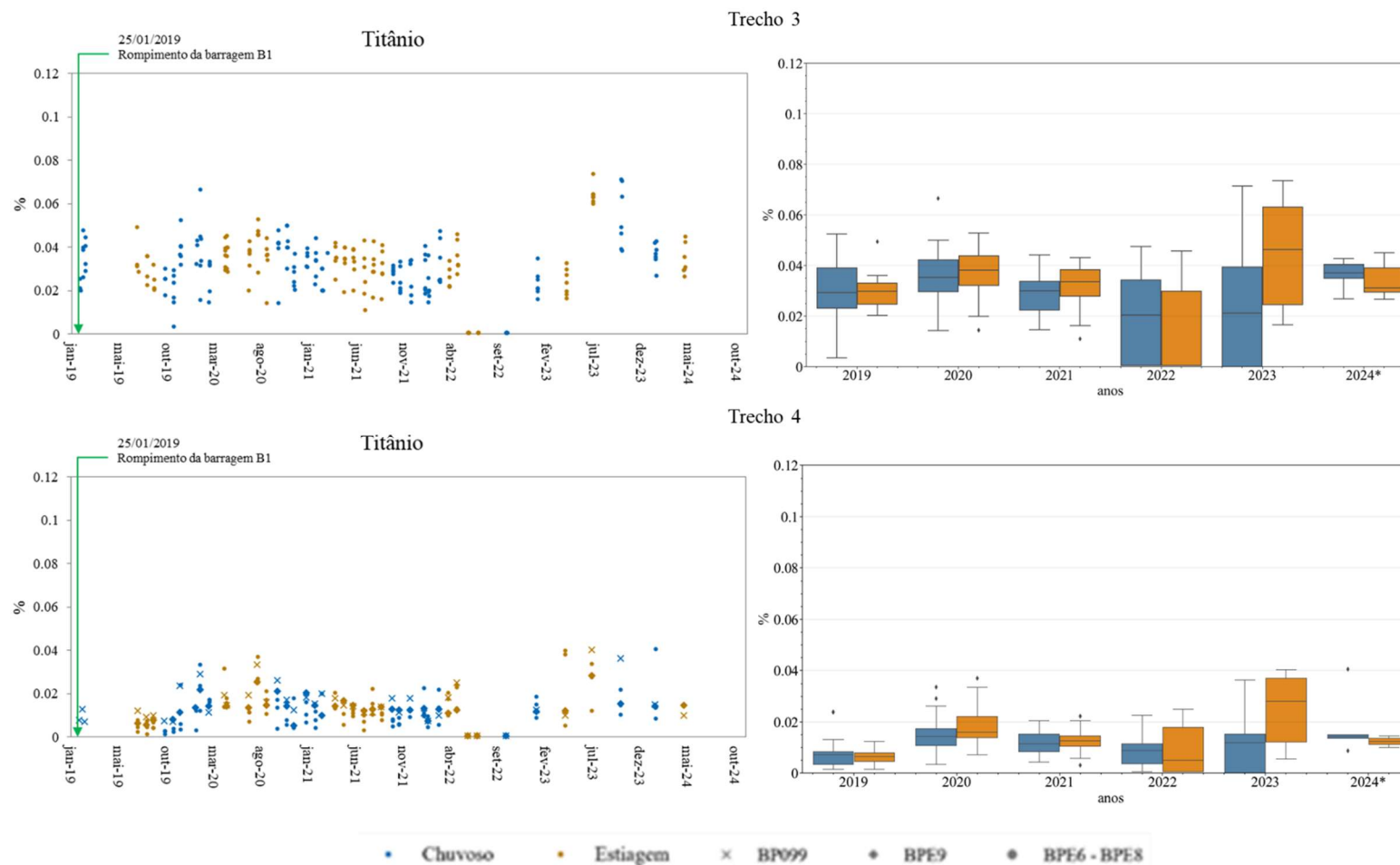
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 69 - Resultados de titânio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 1 e 2



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Figura 70 - Resultados de titânio em sedimentos de fundo apresentados em gráficos de dispersão e em boxplot, no período de janeiro/2019 a junho/2024 nos trechos 3 e 4



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

8. INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES

Acompanhamento aos pontos de monitoramento da Vale (PME) pelo Igam

A equipe da Gerência de Monitoramento da Qualidade das Águas (Gemoq) da Diretoria de Monitoramento de Eventos Críticos (Dmec) do Igam, em 2023 em conjunto com a Arcadis, empresa de consultoria de engenharia contratada pela Vale S.A, visitou os pontos PT-55, TT-08, PT-17, PT-18, PT-28, PT-20; PT-21, JRB-02 e PT-22 pertencentes a malha amostral do Programa de Monitoramento Emergencial (PME), no rio Paraopeba nos municípios de Curvelo, Papagaios, Fortuna de Minas, Pompéu e Felixlândia (Figura 71). Ressalta-se que está prevista a transferência da operação de alguns pontos de monitoramento, que ainda estão sendo avaliados e discutidos, da mineradora Vale S.A para o Igam.

Figura 71 - Visita a pontos do PME no rio Paraopeba em 2023



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A visita técnica teve como objetivo principal avaliar a viabilidade de determinados pontos de monitoramento da Vale para serem integrados à rede do Igam. Foram analisados diversos critérios, incluindo a localização geográfica, a acessibilidade por meio do rio, as condições das margens, a presença de propriedades privadas e as necessidades de manutenção em diferentes estações do ano.

Dragagem

A fim de promover a recuperação ambiental do rio Paraopeba e do ribeirão Ferro-Carvão, impactados pelo desastre socioambiental da Vale em Brumadinho, foi implementada a operação de dragagem como uma das medidas emergenciais. Essa técnica consiste na remoção mecânica dos rejeitos depositados no leito do rio, iniciando no trecho compreendido entre o Marco Zero e os primeiros 2 km. A operação prevê a dragagem de um total de 45 km do rio.

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). A primeira fase ocorreu entre 15/08/19 e 24/11/2021, com volume dragado de 83.226 m³ (áreas de corte dragadas parcialmente: 6, 7, 8, 13 e 23) e, durante sua operação, foram identificadas restrições no processo, que provocaram a baixa produtividade da dragagem. Sendo assim, a mineradora Vale S.A propôs em 2022 uma alteração desse projeto no intuito de melhorar sua efetividade, no qual houve a alteração do local da disposição do material dragado para *sumps* na região do ribeirão Ferro-Carvão, a montante da Estaca Prancha 01 (EP-01).

Nesta 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. 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 e 05/12/2022, com volume dragado de 45.010 m³. A draga permaneceu paralisada de dezembro/22 a junho/23, para manutenções dos equipamentos e aquisição de uma nova draga. Até esse período o volume total dragado foi de 128.236 m³. 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.

O retorno das atividades de dragagem ocorreu em 26/07/23 com a nova empresa draguista. Durante o 2º semestre de 2023 e 1º semestre de 2024, foi encerrada a dragagem nas áreas 3, 4, 5 e 6 do rio Paraopeba. Em 31/07/2024, a Vale S.A apresentou o relatório Teste de Dragagem Mecanizada, como uma nova estratégia de operação para acelerar a recuperação do

rio Paraopeba, que utiliza escavadeiras embarcadas para a retirada do rejeito do leito do rio Paraopeba. Após a remoção, o material dragado é carregado em um batelão para o transporte ao longo do rio Paraopeba até a área 14, onde o rejeito será disposto dentro da calha do rio e será transportado através de um bombeamento hidráulico da draga B45. A disposição dos rejeitos será realizada nos sumps localizados a montante da EP-01, conforme operação atual. A dragagem mecanizada encontra-se em fase de mobilização e montagem dos equipamentos, bem como de atendimento as solicitações do órgão ambiental para dar início aos testes que está previsto para janeiro de 2025.

Até 04/12/2024, o volume total de material dragado do rio Paraopeba desde o início das operações em 2019 soma 192.800,58 m³.

9. CONCLUSÕES

O rompimento da Barragem B-I da mineradora Vale S.A. provocou uma elevação substancial nos níveis de contaminantes no ribeirão Ferro-Carvão e no rio Paraopeba, especialmente no trecho localizado entre os municípios de Brumadinho e São Joaquim de Bicas, o que corresponde à aproximadamente 40 km de extensão a partir do desastre. Nas primeiras semanas após o rompimento da barragem, a qualidade da água do rio Paraopeba oscilou ao longo de toda a sua extensão, atingindo até mesmo o município de Pompéu (a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo). Dados do monitoramento do Igam indicam que, dois meses após o desastre, as concentrações de turbidez, ferro e manganês ultrapassaram significativamente os limites estabelecidos, além da presença de metais traço, como chumbo e mercúrio, tornando a água imprópria para consumo humano e outras atividades.

De acordo com o monitoramento realizado, verificou-se que 2019 foi o ano de maior impacto, com níveis elevados de contaminação. Apesar de uma melhora gradual ao longo dos anos, os períodos chuvosos ainda intensificam a turbidez e a concentração de outros poluentes, embora em menor proporção do que nos primeiros meses após o desastre. Destaca-se também a operação de dragagem que, por sua vez, movimenta os sedimentos contaminados e impactam a qualidade da água, mesmo em períodos de estiagem.

Durante as chuvas, o aumento da vazão d'água remobiliza os rejeitos depositados no leito do rio, elevando os níveis de turbidez e contaminação. A qualidade da água do rio Paraopeba, especialmente no trecho entre Brumadinho e Esmeraldas, é significativamente afetada no período chuvoso.

Nos primeiros 40 km a partir da Barragem B-I (trecho 2), o impacto do rompimento foi mais acentuado, como demonstrado pelos elevados valores de turbidez, sólidos em suspensão, ferro e manganês. Esses parâmetros, especialmente durante o período chuvoso de 2019, revelaram uma direta relação com a presença do material carregado pelos rejeitos da barragem da Vale. Ao longo dos anos de 2020 a 2022 houve uma atenuação nos valores de turbidez, sólidos em suspensão totais, ferro e manganês total. Todavia, a partir de 2023, verificou-se um incremento na turbidez (período chuvoso) e no ferro dissolvido (períodos chuvoso e seco) que, em parte, é devido às ações de dragagem no rio Paraopeba, que objetivaram melhorias e

adaptações do processo de operação da draga. Ressalta-se que os resultados de turbidez, sólidos em suspensão, ferro dissolvido e manganês ainda se encontram acima do esperado para a série histórica do Igam e extrapolam o limite de classe estabelecido na legislação.

Com relação as ocorrências de chumbo total observaram-se que os maiores valores foram registrados em 2019 e 2020, nos trechos 2 (a jusante do rompimento até a usina termoeletrica de Igarapé) e 3 (a jusante da usina termoeletrica de Igarapé até a usina hidrelétrica de Retiro Baixo). A presença de chumbo na água, embora não faça parte da composição original do rejeito, é resultado do arrasto de outros materiais durante o desastre. Essa contaminação, assim como a de mercúrio, níquel, zinco e cádmio, foi mais intensa nos primeiros momentos após o rompimento da barragem. Embora os níveis de chumbo tenham diminuído ao longo do tempo, eles ainda ultrapassam os limites permitidos na legislação, especialmente durante os períodos chuvosos. Para os demais metais citados: mercúrio total, níquel total, zinco total e cádmio total não foi registrada nenhuma extrapolação do limite de classe nos anos de 2023 e 2024 na calha do rio Paraopeba.

Os resultados das análises de arsênio total, cobre dissolvido e zinco total no rio Paraopeba, no trecho mais impactado pelo rompimento das barragens, não indicam uma associação direta com o rejeito. As concentrações desses elementos não apresentaram variações significativas, sugerindo que eles não fazem parte da composição do rejeito. Assim, sua presença na coluna d'água pode estar relacionada com outras atividades antrópicas. Destaca-se que, em 2023, não foram registradas desconformidades com o limite de classe para o arsênio, zinco e cobre, porém, em 2024, observou-se violação na concentração de cobre dissolvido no período chuvoso no trecho 3. Com relação ao alumínio, já eram observadas violações ao limite estabelecido pela legislação ao longo de toda a calha do Paraopeba incluindo no trecho 1, a montante do rompimento. Para 2023 e 2024 as medianas referentes ao período chuvoso se apresentam acima do limite e do histórico do Igam nos quatro trechos avaliados.

No que se refere aos resultados da qualidade dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba e represa de Três Marias, conclui-se que até 2022, os valores dos metais analisados em sedimento de fundo apresentaram redução das concentrações em relação ao ano do rompimento das barragens (2019). Contudo, cabe ressaltar que, principalmente no período chuvoso de 2023, observou-se um aumento das concentrações de parâmetros como manganês, alumínio, cobre,

arsênio, cromo, cádmio, titânio nos trechos 3 e 4 (a jusante da UHE de Retiro Baixo até o reservatório de Três Maria).

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. A concentração de ferro manteve-se abaixo do proposto por Vicq (2015) de 28,10% desde 2021, com exceção de alguns valores extremos nos anos de 2021 e 2023. Destaca-se que, em 2023 as concentrações de ferro no sedimento aumentaram em relação ao ano de 2022, ao longo do rio Paraopeba. Com relação ao manganês, foi observado um aumento expressivo dos resultados do período chuvoso de 2023 nos trechos 3 e 4, com extrapolação dos limites do estudo de Vicq (2015) de 0,33%. Ressalta-se que, em 2024, todos os resultados analisados se mantiveram abaixo do valor proposto no estudo.

O alumínio apresentou o mesmo padrão da maioria das concentrações abaixo do limite de 4,52% proposto por Vicq (2015) até o ano de 2022, com violações observadas nos trechos a jusante do rompimento. No período chuvoso de 2023, verificou-se o aumento das concentrações de alumínio nos trechos 3 e 4, que extrapolaram 4,52%. Para todos os trechos em 2024 verificou-se resultados dentro dos valores propostos em Vicq (2015).

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 zinco, não apresentou valores superiores ao Nível 1 nos registros de 2024 e, em 2023, verificou-se violação pontual no trecho 3. Já os resultados de 2023 de mercúrio e cádmio, apresentaram violações de nível 2 nos trechos 3 e 4 (mercúrio) e ao longo do rio Paraopeba (cádmio), desde montante do rompimento ao reservatório de Três Marias. Em 2024, os resultados de cádmio também se encontram acima dos limites de nível 1 (trecho 4) e nível 2 (trechos 1, 2 e 3). Para arsênio, as violações ocorreram em todo o trecho do rio Paraopeba analisado neste Caderno no ano de 2023, sendo que nos trechos 3 e 4 extrapolações de nível 2. Ressalta-se que, em 2024, a concentração de arsênio nos sedimentos está abaixo do limite estabelecido pela legislação.

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 2024 foram verificados

poucos registros para esses elementos, a exceção do níquel onde os resultados extrapolaram também o Nível 2.

A elevação dos teores de mercúrio, cobre e estrôncio nos sedimentos a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão sugere uma forte associação com o rompimento das barragens B-I, B-IV e B-IVA. No entanto, a presença de chumbo, níquel, zinco e cádmio nos sedimentos pode ter múltiplas origens, incluindo o desastre e outras atividades antrópicas na bacia do Paraopeba. 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 B-I, 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.

Com o intuito de atenuar os impactos ambientais ocasionados pelo rompimento das barragens da Vale, diversas ações estão sendo tomadas. Dentre elas é possível destacar:

- 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);
- Tratamento das águas do Ribeirão Ferro-Carvão na ETAF e direcionamento do efluente ao ribeirão Casa Branca, que deságua no Rio Paraopeba.
- 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 análise o Plano de Recuperação de Áreas Degradadas para a região.
- 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 4/12/2024, as operações de dragagem removeram um total de 192.800,58 m³ de rejeito do rio Paraopeba.

A recuperação da qualidade do rio Paraopeba é um processo contínuo que exige monitoramento constante. O Igam seguirá acompanhando a qualidade da água ao longo de todo o rio até o corpo do reservatório de Três Marias, e juntamente com o Sisema as operações de remoção dos rejeitos e a recuperação da bacia executada 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.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 24. ed. Washington: APHA, 2023.

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.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO; Organizadores: Renan Lourenço de O. Silva ... [et al.] **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos/ 2 ed.** - São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2023. 456 p.: il

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**, The, 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.

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.

UNESCO. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2023**. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659_por. Acesso em 14 nov 2024

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.

Foto: arquivo Igam



**REPARAÇÃO
BRUMADINHO**



**MINAS
GERAIS**

GOVERNO
DIFERENTE.
ESTADO
EFICIENTE.