



Caderno
Especial

Avaliação da Qualidade das Águas e Sedimentos do Rio Paraopeba

Acompanhamento da Qualidade das Águas do
Rio Paraopeba Após 2 anos do Rompimento
da Barragem da Mina Córrego Feijão da
Mineradora Vale/SA - Brumadinho/MG

Belo Horizonte, setembro de 2021

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS E SEDIMENTOS DO RIO PARAOPEBA

Acompanhamento da Qualidade das Águas
do Rio Paraopeba Após 2 anos do Rompimento da
Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora
Vale/SA – Brumadinho/MG

Belo Horizonte, setembro de 2021



*Caderno
Especial*

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 2 anos
do Rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA –
Brumadinho/MG

Belo Horizonte

2021

Governo do Estado de Minas Gerais

Governador

Romeu Zema Neto

SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

Secretária

Marília Carvalho de Melo

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

Diretora Geral

Marcelo da Fonseca

Diretora de Operações e Eventos Críticos

Wanderlene Ferreira Nacif

Gerente de Monitoramento de Qualidade das Águas

Katiane Cristina de Brito Almeida

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 2 anos do
rompimento da barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA –
Brumadinho/MG / Instituto Mineiro de Gestão das Águas . --- Belo
Horizonte: Igam, 2021.
130 p.; il.

Caderno especial.

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

CDU: 556:550.4

Ficha catalográfica elaborada por Márcia Beatriz Silva de Azevedo – CRB 1934/6

IGAM

Rodovia João Paulo II, 4143 - Bairro Serra Verde - Belo Horizonte/MG
Cidade Administrativa - CEP: 31630-900 – (31) 39151000
www.igam.mg.gov.br

© 2021 Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM

Equipe Técnica

Antoniél Silva Fernandes, Geógrafo

Carolina Cristiane Pinto, Engenheira Química

Jéssica de Oliveira Santos, Engenheira Química

Mariana Elissa Vieira de Souza, Geógrafa

Matheus Duarte Santos, Geógrafo

Marina Santos Oliveira, graduanda em Engenharia Ambiental

Marina Caldeira Tonucci, Química

Patricia Franklin Mayrink Nogueira, Bióloga

Regina Márcia Pimenta Assunção, Bióloga

Sérgio Pimenta Costa, Biólogo

Vanessa Kelly Saraiva, Química

Vitor Faria, Estatístico

Normalização bibliográfica

Foto Capa: Sisema

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	7
1 INTRODUÇÃO	8
2 DESASTRE DE BRUMADINHO – AÇÕES 2019 e 2020	9
3 PRINCIPAIS USOS DA ÁGUA NA CALHA DO RIO PARAOPEBA	15
4 AVALIAÇÃO DA ANOMALIA DE PRECIPITAÇÃO TRIMESTRAL NO ANO DE 2020 NA BACIA DO PARAOPEBA	16
5 PROGRAMA DE MONITORAMENTO EMERGENCIAL DO RIO PARAOPEBA – ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS.....	22
5.1 Plano de amostragem – Metodologia.....	22
5.2 Rede de monitoramento.....	23
5.3 Frequência de amostragem.....	28
5.4 Parâmetros monitorados e padrões de qualidade	31
6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2020, NA CALHA DO RIO PARAOPEBA.....	33
7 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2020, NA REPRESA DE TRÊS MARIAS (TRECHO 5).....	88
8 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE SEDIMENTOS DE JANEIRO DE 2019 A DEZEMBRO DE 2020	103
9 CONCLUSÕES	127
REFERÊNCIAS	130

APRESENTAÇÃO

A bacia do Paraopeba é um território estratégico para o Estado de Minas Gerais, uma vez que está localizada no quadrilátero ferrífero, região de importante produção mineral e relevância econômica. Adicionalmente, três reservatórios que abastecem a região metropolitana de Belo Horizonte estão localizados na bacia, bem como um ponto de captação no próprio rio Paraopeba instalado em 2015 para reverter a condição de estresse hídrico ao qual estavam submetidos os reservatórios de abastecimento de água.

No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem de rejeito no complexo da Mina Córrego Feijão, designada B1, da empresa Vale S/A rompeu no ribeirão Ferro-Carvão, tributário do rio Paraopeba. A partir de então, tem sido observado diversos impactos na qualidade das águas, comprometendo os usos múltiplos deste recurso nas áreas afetadas. Neste sentido, o 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.

Nesse encarte estão apresentados os dados de monitoramento das águas superficiais decorrido 2 anos do rompimento da barragem em Brumadinho. O programa de monitoramento visa fornecer à sociedade o conhecimento da situação da qualidade das águas dos corpos de água atingidos pelo desastre, bem como permitir o acompanhamento das ações de recuperação da bacia do rio Paraopeba. Além disso, estão apresentadas as principais ações e entregas do órgão gestor de recursos hídricos no que se refere ao tema impacto na qualidade da água e usos múltiplos do rio Paraopeba.

Marcelo da Fonseca
Diretora Geral Igam

1 INTRODUÇÃO

No dia 25 de janeiro de 2019, ocorreu o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, de propriedade da mineradora Vale S.A, localizada em Brumadinho, na Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG. A estrutura da barragem tinha uma área total de aproximadamente 27 hectares, 87 metros de altura e não recebia rejeitos desde 2016. A ruptura da barragem provocou a liberação de cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de produção mineral (IMAGEM 1), sendo que a maior parte ficou contido na calha do ribeirão Ferro-Carvão até sua confluência com rio Paraopeba, e uma parte se espalhou até o remanso da Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo. O material depositado no rio Paraopeba continua a se mover carregado pelo rio e pela ocorrência de chuvas na região.

O rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, tem sido considerado um desastre ambiental de grandes proporções, e o de maior acidente de trabalho da história brasileira. Tal fato, suscitou grande preocupação não só na bacia do rio Paraopeba como também em toda a bacia do rio São Francisco, que já vem atravessando uma longa crise hídrica, o que ocasionou manifestações por parte dos Governos dos Estados banhados pelo São Francisco e várias instituições públicas e da sociedade civil.

Imagem 1 – Área da Barragem I da Mina do Córrego Feijão, antes e depois do rompimento



Fonte: Google Earth

2 DESASTRE DE BRUMADINHO – AÇÕES 2019 e 2020

Programa de monitoramento da qualidade das águas superficiais e sedimentos

Imediatamente após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, 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 (FIGURA 1).

No âmbito do monitoramento, no dia subsequente ao rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, pertencente à empresa Vale S.A, 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, o Igam adicionou ao monitoramento 8 estações de amostragem para um melhor acompanhamento do impacto causado sobre as águas do rio Paraopeba.

Atualmente, o Igam monitora, mensalmente, 16 pontos na calha do rio Paraopeba e os resultados tem sido consolidados na forma de relatórios técnicos e boletins informativos, com o intuito de orientar as ações dos órgãos competentes, tanto na esfera estadual quanto na federal, bem como para fornecer à sociedade o conhecimento da situação da qualidade das águas atingidas pelo desastre.

Dentre os produtos elaborados pelo Igam, o Informativo referente à qualidade da água do rio Paraopeba está em sua 61ª edição. Em 2020 sua divulgação passou a ser trimestral. O Igam, também, publica mensalmente o Boletim do Cidadão, bem como avaliação dos níveis de poluição e degradação ambiental do rio Paraopeba, através do relatório de Qualidade dos Sedimentos. Todas 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.

Demais ações:

Fiscalização: Emissão dos Autos de Fiscalização nº 61.250/2019, nº 64.499/2019 e nº 61.255/2019, exigindo que a Vale iniciasse o monitoramento da qualidade da água e sedimentos a partir de janeiro de 2019.

Recomendação de Suspensão dos Usos no rio Paraopeba: Recomendação das Secretarias de Estado de Saúde (SES), de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Semad); e de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Seapa), em 31/01/2019, para suspensão da água bruta

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

do Rio Paraopeba desde a confluência com o Córrego Ferro-Carvão até o município de Pompéu e dos poços e cisternas até 100 metros da calha do Paraopeba até o município de Três Marias.

Segurança hídrica: Emissão de 112 outorgas emergências, sendo 83% delas para água subterrânea, para captação visando garantir o abastecimento público, consumo humano, dessedentação animal e minimização do impacto ambiental.

Vistorias Igam: Visitas a campo para verificação e acompanhamento do avanço da pluma, das obras das ETAF I e II, das operações de dragagem e da localização das cortinas anti-turbidez.

Expedição Conjunta: Em maio de 2019, o Igam participou da expedição coordenada pela Polícia Federal ao longo dos Rios Paraopeba, por onde se espalharam os rejeitos da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, São Francisco e reservatório de Três Marias.

Elaboração Notas Técnicas Conjuntas Igam e SES: para apresentar os resultados da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, definir e manter a suspensão dos usos da água bruta do rio Paraopeba, abrangendo os municípios de Brumadinho até Pompéu.

Abastecimento RMBH: Concessão para a nova captação da Copasa, em substituição da captação paralisada, a 2,3 km a montante do trecho do Paraopeba que foi impactado pelos rejeitos com o objetivo de restabelecer as fontes de abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte e garantir segurança hídrica à população.

Acompanhamento do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba – Vale/Arcadis: Elaboração de documentos técnicos e participação em reuniões e *workshops* para avaliação do Plano de Reparação Socioambiental de Brumadinho apresentado pela Vale ao Sisema.

Plano de contingência Três Marias: Acompanhamento junto a Agência Nacional de Águas - ANA do Plano de Contingência de Usuários Prioritários na Região de Três Marias elaborado pela Vale por definição da ANA, bem como o acompanhamento das alterações na qualidade das águas após a UHE Retiro Baixo.

Placas informativas ao longo do rio Paraopeba: Por solicitação do Ministério Público de Minas Gerais, o Igam, em parceria com a SES, definiu a arte para placas informativas quanto aos usos não recomendados à população ao longo do rio Paraopeba e dos poços artesianos. A Vale concluiu em fevereiro de 2020 a instalação das placas, no trecho entre Brumadinho e a UHE Retiro Baixo.

Avaliação de Risco a Saúde Humana: Acompanhamento de estudos de avaliação de risco à saúde humana e de risco ecológico em todos os municípios atingidos, visando a identificação dos possíveis riscos à saúde humana e ao meio ambiente derivados do material oriundo do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A. Avaliação de Risco à Saúde Humana (ARSH) avalia os potenciais riscos à saúde humana associados ao contato com o rejeito e, caso necessário, a definição de estratégias de reabilitação, remediação e monitoramento ambiental. Já os estudos de Avaliação de Risco Ecológico (ARE) avaliam os potenciais riscos a fauna e flora, e, caso necessário, a definição de estratégias de reabilitação e monitoramento ambiental. Os estudos serão realizados em quatro fases: Fase I - Modelo Conceitual Segmentação de Áreas Alvo; Fase II - Investigação Geoambiental Seleção de SQIs; Fase III - Avaliação de Risco; Fase IV - Gestão Integrada. Atualmente se encontram na FASE I, que tem previsão de término em 02/22, a FASE II tem previsão de término em 08/22; a FASE III em 01/23 e a FASE IV em 06/23. Sendo essas datas apenas uma estimativa, sendo passíveis de alterações, uma vez que são fases interdependentes.

TAC Monitoramento: Em novembro de 2019 foi formalizado o Termo de Ajustamento de Conduta, denominado “TAC Monitoramento”, entre o Ministério Público de Minas Gerais e a Vale S.A., com interveniência do Governo de Minas Gerais e do Igam. O IGAM, em conjunto à empresa de auditoria externa do MPMG – Aecom, trabalharam na implementação das ações previstas no TAC Monitoramento. Para o ano de 2021, está prevista a continuidade das ações:

- Transferência do Programa de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais, Subterrâneas e de Sedimentos do rio Paraopeba, da Vale (PME) para o Igam;

- Criação de um sistema de armazenamento e tratamentos dos dados de Qualidade das Águas;
- Contratação e gestão de equipe que irá atuar na execução do monitoramento na bacia do rio Paraopeba.

Acompanhamento dos Programas de Monitoramento da Vale: O Igam, juntamente com a Agência Nacional de Águas – ANA, também realiza o acompanhamento do plano de contingência da região de Três Marias. Esse acompanhamento é feito por meio do monitoramento diário na região próxima da UHE Retiro Baixo, no intuito de identificar possíveis alterações na qualidade das águas no trecho a jusante de Retiro Baixo em função da presença dos rejeitos nesse trecho e reservatório de Três Marias. Nas terças e sextas-feiras, são enviados os Relatórios Ambientais com os resultados das coletas de amostras de água realizadas em campo para os parâmetros metais e turbidez, na região da UHE de Retiro Baixo. Além disso, são enviados, nas sextas-feiras, os relatórios de águas superficiais (ASUP), os quais apresentam os resultados do Plano de Monitoramento Emergencial de Qualidade da Água Superficial e Sedimento (PME), trecho entre Brumadinho/MG e Piaçabuçu/AL, implantado em 25/01/2019. Esse relatório semanal apresenta a comparação entre os resultados das duas últimas semanas do monitoramento de água superficial, água salobra e sedimento. Além desses, são acompanhados os relatórios quinzenais, referentes à eficiência das estruturas de contenção implantadas na bacia do ribeirão Ferro-Carvão e por fim, os informes de gatilho de turbidez monitorados durante a operação de dragagem referentes ao Programa de Monitoramento da Dragagem (PMD).

Figura 1 – Principais ações do Igam no pós-rompimento da Barragem

Ações realizadas pelo Igam

Programa de Monitoramento



Coletas e análises de águas e sedimentos desde o dia subsequente ao rompimento da barragem. São avaliados parâmetros em água bruta e sedimentos em 16 pontos no monitoramento especial da qualidade das águas do rio Paraopeba.

Fiscalização



Emissão dos Autos de Fiscalização nº 61.250/2019, nº 64.499/2019 e nº 61.255/2019, exigindo que a Vale iniciasse o monitoramento da qualidade da água e sedimentos a partir de janeiro de 2019.

Recomendação de Suspensão dos Usos no rio Paraopeba



Recomendação das Secretarias de Estado de Saúde (SES), de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Semad) e de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Seapa), em 31/01/2019, para suspensão da água bruta do Rio Paraopeba desde a confluência com o Córrego Ferro-Carvão até o município de Pompéu e dos poços e cisternas até 100 metros da calha do Paraopeba até o município de Três Marias.

Segurança Hídrica



Emissão de 112 outorgas emergências, sendo 83% delas para água subterrânea, para captação visando garantir o abastecimento público, consumo humano, dessedentação animal e minimização do impacto ambiental.

Divulgação de informações para a sociedade



Divulgação dos resultados do monitoramento emergencial da qualidade da água do rio Paraopeba por meio do Informativo de Qualidade da água e do Boletim Informativo ao Cidadão, bem como, do Informativo Hidrometeorológico Paraopeba. Disponível em: <https://url.gratis/bfuyy>

Vistorias Igam



Visitas a campo para verificação e acompanhamento do avanço da pluma, das obras das ETAF I e II, das operações de dragagem e da localização das cortinas anti-turbidez.

Expedição Conjunta



Em maio de 2019, o Igam participou da expedição coordenada pela Polícia Federal ao longo do Rio Paraopeba, por onde se espalharam os rejeitos da Barragem 1 da Mina Córrego do Feijão, São Francisco e reservatório de Três Marias.

Elaboração Notas Técnicas Conjuntas Igam e SES



Para apresentar os resultados da qualidade das águas superficiais e subterrâneas, definir e manter a suspensão dos usos da água bruta do rio Paraopeba, abrangendo os municípios de Brumadinho até Pompéu.

Abastecimento RMBH



Concessão para a nova captação da Copasa, em substituição da captação paralisada, a 2,3 km a montante do trecho do Paraopeba que foi impactado pelos rejeitos com o objetivo de restabelecer as fontes de abastecimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte e garantir segurança hídrica à população.

Acompanhamento do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba Vale/Arcadis:



Elaboração de documentos técnicos e participação em reuniões e workshops para avaliação do Plano de Reparação Socioambiental de Brumadinho apresentado pela Vale ao Sisema.

Plano de contingência Três Marias



Acompanhamento junto a Agência Nacional de Águas - ANA do Plano de Contingência de Usuários Prioritários na Região de Três Marias elaborado pela Vale por definição da ANA, bem como, o acompanhamento das alterações na qualidade das águas após a UHE Retiro Baixo.

Placas informativas ao longo do rio Paraopeba



Por solicitação do Ministério Público de Minas Gerais, o Igam, em parceria com a SES, definiu a arte para placas informativas quanto aos usos não recomendados à população ao longo do Rio Paraopeba e dos poços artesanais. A Vale concluiu em fevereiro de 2020 a instalação das placas, no trecho entre Brumadinho e a UHE Retiro Baixo.

Avaliação de Risco a Saúde Humana



Acompanhamento de estudos de avaliação de risco à saúde humana e de risco ecológico em todos os municípios atingidos, visando a identificação dos possíveis riscos à saúde humana e ao meio ambiente derivados do material oriundo do rompimento da Barragem B1.

3 PRINCIPAIS USOS DA ÁGUA NA CALHA DO RIO PARAOPEBA

A Deliberação Normativa COPAM 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, da 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 01, de 5 de maio de 2008, 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 2020 NA BACIA DO PARAPEBA

O diagnóstico da precipitação foi realizado pelo SIMGE com base nas estações meteorológicas convencionais e automáticas da rede de observação de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), distribuídas na Bacia do Paraopeba e nas bacias vizinhas para melhor representatividade das bordas da UPGRH, uma vez que dentro da mesma somente 3 estações puderam ser utilizadas. Os dados foram interpolados para estimativa da chuva em áreas em que não existem estações.

A análise foi realizada considerando o ano civil de 2020, dividido em 4 trimestres: JFM, AMJ, JAS e OND. Para cada um dos trimestres são apresentados os campos de anomalia da

precipitação observada no Paraopeba. Foi realizada a análise considerando a chuva total registrada durante o ano, também apresentada em forma de anomalia.

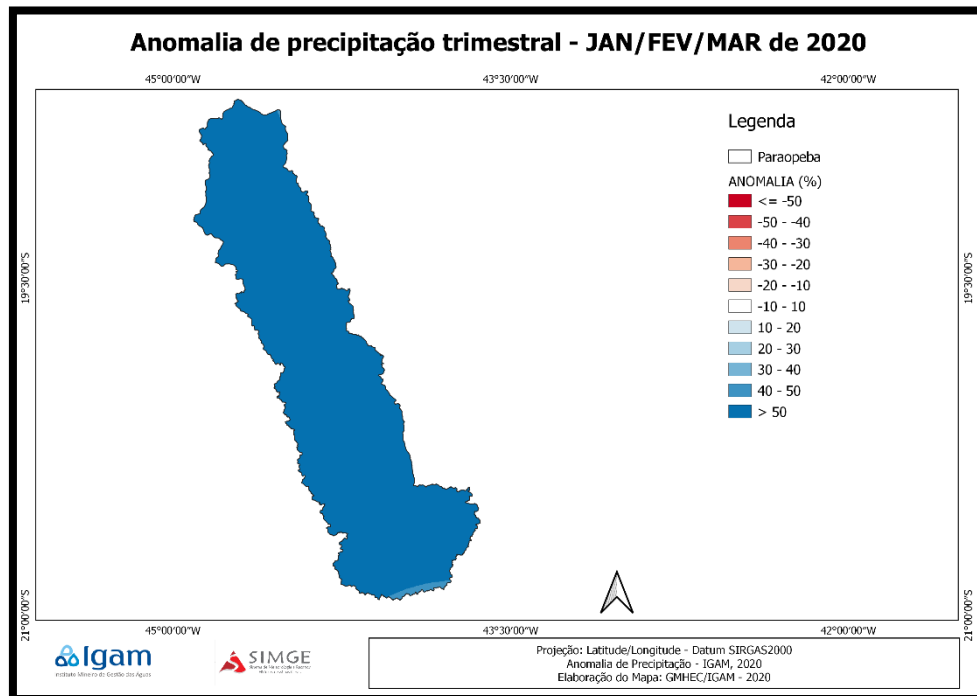
A anomalia de precipitação é variação da chuva observada (para mais ou para menos) tendo como referência a Normal climatológica. A anomalia positiva de chuvas ocorre quando a chuva fica acima da climatologia. Já a anomalia negativa ocorre quando a chuva fica abaixo da climatologia. A climatologia utilizada ilustra os valores das Normais climatológicas das chuvas publicadas pelo INMET, com referência aos 30 anos entre 1981-2010.

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

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

O trimestre JFM é caracterizado climatologicamente pela ocorrência de chuvas em torno de 500mm e 650mm no Paraopeba, com as maiores precipitações ocorrendo no alto Paraopeba. Verifica-se que a anomalia na precipitação ocorrida no primeiro trimestre (JFM) de 2020, exibido na Figura 2, foi predominantemente positiva em toda a área do Paraopeba. Os totais observados variaram entre 740 mm e 1200 mm. Uma característica muito importante observada nesse primeiro trimestre de 2020 foi a precipitação volumosa ocorrida nos meses de janeiro e fevereiro. Houve quebra de recordes históricos de precipitação, principalmente no mês de janeiro.

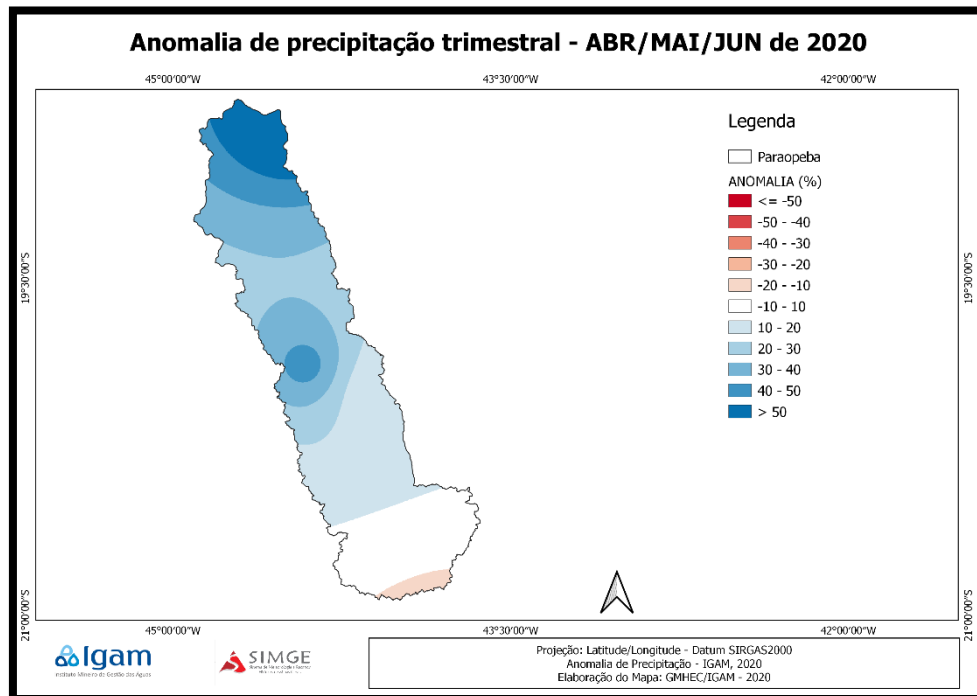
Figura 2 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação no trimestre JFM de 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

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 80mm a 110 mm. Conforme exibido na Figura 3, em 2020 observa-se ocorrência de anomalias predominantemente positivas no Paraopeba. Os totais observados dentro do trimestre ficaram entre 90mm e 130mm. É importante ressaltar que embora as anomalias em grande parte da bacia tenham sido superiores à média histórica, essas chuvas não foram bem distribuídas ao longo dos três meses, mas sim ocorreram em sua maior parte nos meses de abril e maio.

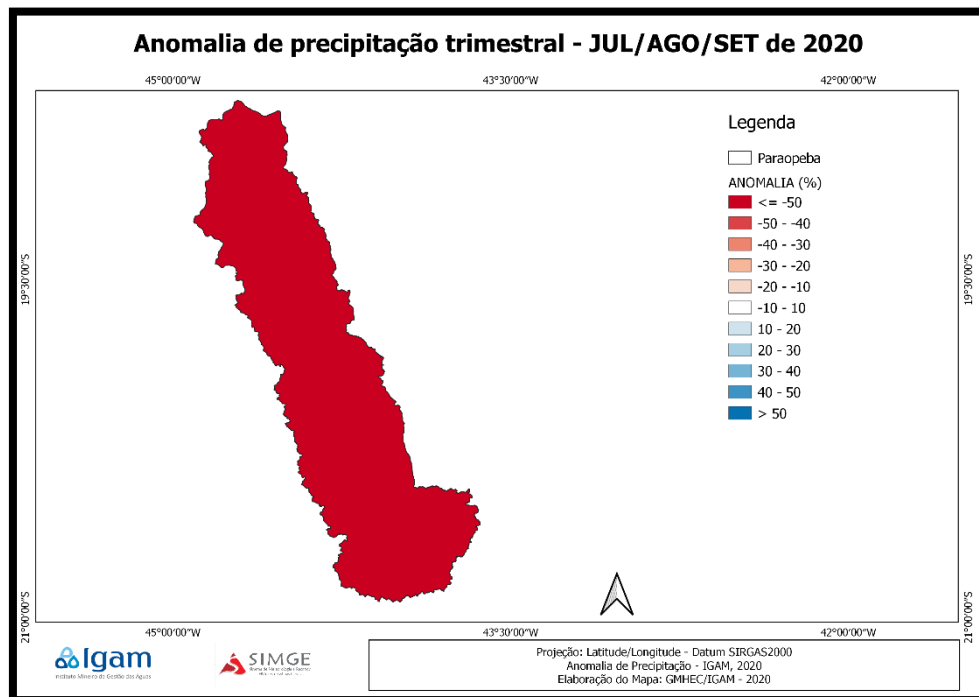
Figura 3 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação no trimestre AMJ de 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

O terceiro trimestre (JAS) é o segundo trimestre do período seco, que é também climatologicamente o pior trimestre do ano na contribuição de chuvas, já que as precipitações totais no Paraopeba nesse período variam entre 40mm e 80mm. Em 2020 esse trimestre, exibido na Figura 4, se apresentou ainda pior do que a climatologia, com anomalias negativas ao longo de toda a área, com precipitações observadas variando entre 5 mm e 40mm.

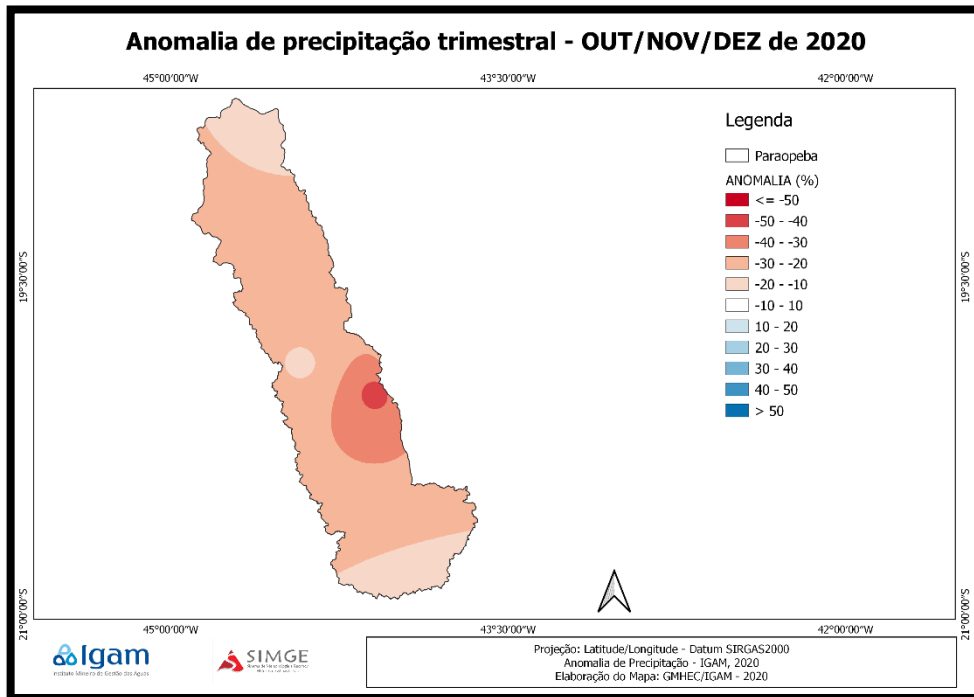
Figura 4 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação no trimestre JAS de 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

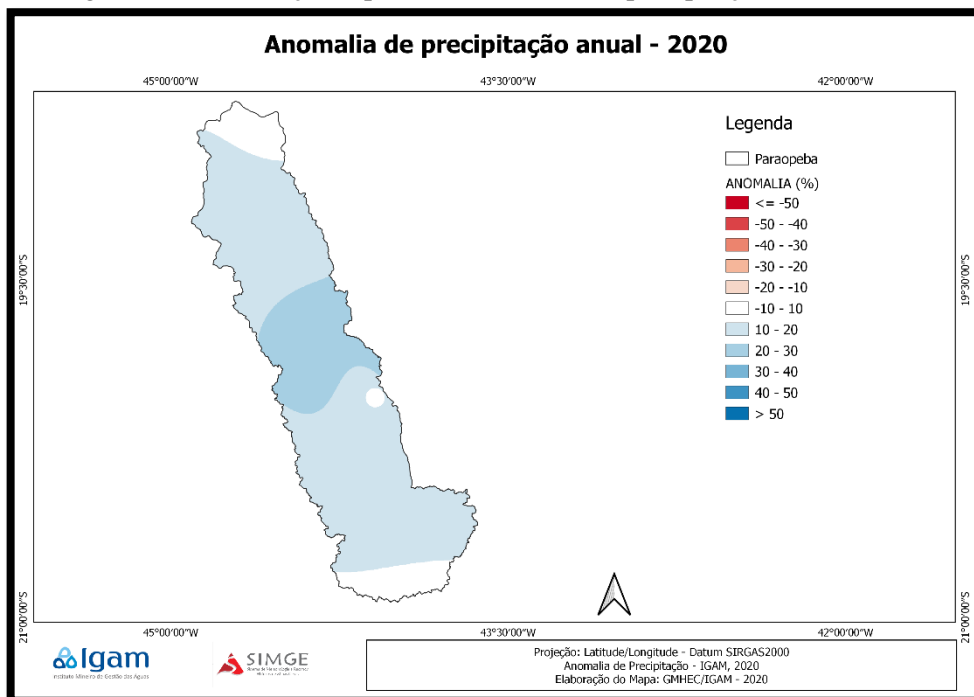
O quarto trimestre (OND) marca o início do período chuvoso em Minas. Nesse trimestre as precipitações, conforme a climatologia variam entre 530mm e 670mm. Para 2020, conforme exibido na Figura 5, o que se observa é que o último trimestre do ano se caracterizou por anomalias negativas de precipitação em todo o Paraopeba, registrando valores totais entre 400mm e 540 mm.

Figura 5 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação no trimestre OND de 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Figura 6 – Distribuição espacial da anomalia de precipitação anual de 2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

A análise das anomalias referentes ao ano (calculadas entre janeiro e dezembro) mostra que o acumulado anual ocorreu acima da climatologia, conforme exibido na Figura 6. No entanto, devido aos baixos acumulados ocorridos no segundo semestre, 2020 foi um ano classificado como seco no norte do Paraopeba. Por outro lado, devido às chuvas abundantes ocorridas no primeiro trimestre, o ano foi classificado como chuvoso no setor centro sul Paraopeba.

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

Visando avaliar o impacto na qualidade da água e nos sedimentos e acompanhar o deslocamento da pluma do rejeito nos primeiros dias após o desastre, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igama) instituiu uma rede de monitoramento emergencial integrada com a participação do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), da Agência Nacional de Águas (ANA) e da Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais (Copasa). O objetivo foi de integrar os dados gerados por estas instituições a fim de garantir maior abrangência na avaliação e na transparência dos impactos gerados pelo rompimento da barragem no ribeirão Ferro-Carvão e no rio Paraopeba. Inicialmente, essa rede abrangeu 24 pontos de monitoramento entre os municípios de Brumadinho e Felixlândia, perfazendo 18 municípios² ao longo do trecho monitorado, desde de o dia subsequente ao desastre.

5.1 Plano de amostragem – Metodologia

O plano de amostragem do Igama inclui a realização de coletas e análises da qualidade da água e sedimentos no rio Paraopeba, trabalho este que se iniciou no dia seguinte ao evento com o planejamento do roteiro e deslocamento da equipe para a área. O início do monitoramento seguiu uma sequência de montante para jusante, à medida que os rejeitos avançavam ao longo do rio.

² Brumadinho, Mário Campos, São Joaquim de Bicas, Betim, Igarapé, Juatuba, Esmeraldas, Florestal e Pará de Minas, São José da Varginha, Fortuna de Minas, Pequi, Maravilhas, Paraopeba, Papagaios, Pompéu, Curvelo e Felixlândia.

A avaliação da qualidade da água superficial e dos sedimentos foi feita comparando-se os resultados do monitoramento emergencial com os resultados da série histórica de monitoramento do Igam entre 2000 a 2018. Os resultados do monitoramento emergencial também foram confrontados com os limites legais previstos na Deliberação Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008 (COPAM; CERH, 2008) e na Resolução nº 454 de 1 de novembro de 2012 do Conselho de Meio Ambiente (CONAMA, 2012).

5.2 Rede de monitoramento

Antes do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A da Vale, o Igam realizava, desde 1997, o monitoramento trimestral da qualidade das águas superficiais em 37 pontos distribuídos na bacia do rio Paraopeba, que constitui a rede básica de monitoramento do estado no âmbito do Programa Águas de Minas, sendo 8 deles na extensão da calha do rio Paraopeba, que foi impactada pelo rompimento da Barragem.

Após o desastre, instituiu-se uma rede emergencial para o acompanhamento do impacto do rompimento da Barragem. A rede emergencial contemplou os 8 pontos de monitoramento da rede básica na calha do rio Paraopeba e foi continuamente ampliada ao longo do ano de 2019 (TABELA 1). Atualmente a rede emergencial possui 16 pontos monitorados pelo Igam, sendo 1 no rio Paraopeba a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão e, 14 a jusante até o reservatório de Três Marias. A rede também foi acrescida de mais 1 ponto localizado em um afluente próximo ao reservatório de Três Marias. A existência de uma rede prévia permitiu comparar a condição do rio antes e após o rompimento da barragem.

Tabela 1 – Descrição das estações de monitoramento avaliadas no monitoramento do rio Paraopeba pelo Igam

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Distância até a Barragem B1 (km)	Descrição	Início da coleta
BP036	-20,197	-44,123	Brumadinho	10*	Rio Paraopeba na localidade de Melo Franco	28/jan
BPE2	-20,135	-44,215	Brumadinho	19,7	Rio Paraopeba na captação da COPASA	26/jan

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Distância até a Barragem B1 (km)	Descrição	Início da coleta
BP068	-20,093	-44,211	São Joaquim de Bicas	24,8	Rio Paraopeba 5 km a jusante da captação da COPASA em Brumadinho	26/jan
BP070	-20,04	-44,256	Betim, São Joaquim de Bicas	42	Rio Paraopeba a jusante da foz do Ribeirão Sarzedo, próximo à cidade de São Joaquim de Bicas	26/jan
BP072	-19,949	-44,305	Betim	59	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Betim, na divisa dos municípios de Betim e Juatuba	26/jan
BPE3	-19,709	-44,470	Esmeraldas	112,8	Rio Paraopeba a montante da captação de Pará de Minas	12/fev
BPE4**	-19,711	-44,497	Pará de Minas	115,9	Rio Paraopeba na captação de Pará de Minas	08/fev
BP082	-19,670	-44,480	Esmeraldas, São José da Varginha	123,1	Rio Paraopeba na localidade de São José, em Esmeraldas	27/jan
BP083	-19,370	-44,530	Papagaios, Paraopeba	192,4	Rio Paraopeba logo após a foz do Ribeirão São João em Paraopeba	27/jan
BP077	-19,33	-44,53	Papagaios, Paraopeba	203	Rio Paraopeba na captação da Copasa entre os municípios de Paraopeba e Papagaios	11/nov
BP078	-19,170	-44,710	Curvelo, Pompéu	250,9	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Pardo em Pompéu	27/jan
BP087	-19,02	-44,73	Curvelo, Pompéu	279	Rio Paraopeba a montante da UHE Retiro baixo	11/nov
BPE5***	-18,987	-44,776	Pompéu	289	Rio Paraopeba logo a montante da UHE de Retiro Baixo, em seu remanso	08/mar
BP099	-18,871	-44,787	Felixlândia	318,3	Rio Paraopeba a montante de sua foz na barragem de Três Marias	27/jan

Estação	Coordenadas Lat/long		Município	Distância até a Barragem B1 (km)	Descrição	Início da coleta
BPE6	-18,816	-45,015	Felixlândia	Aprox. 353,1	Remanso da represa de Três Marias no Município de Felixlândia	02/mar
BPE7	-18,929	-45,241	Abaeté	Aprox. 400,1	Remanso da represa de Três Marias no Município de Abaeté	02/mar
BPE8	-18,493	-45,283	Três Marias	Aprox. 423,1	Corpo da represa de Três Marias no Município de Três Marias	02/mar
BPE9	17,13	43,23	Felixlândia	317****	Ribeirão do Gomes próximo a confluência com o rio Paraopeba	27/03

*Estações a montante do local do desastre. A distância medida se refere da estação até a confluência do Ribeirão Ferro-Carvão com o rio Paraopeba.

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

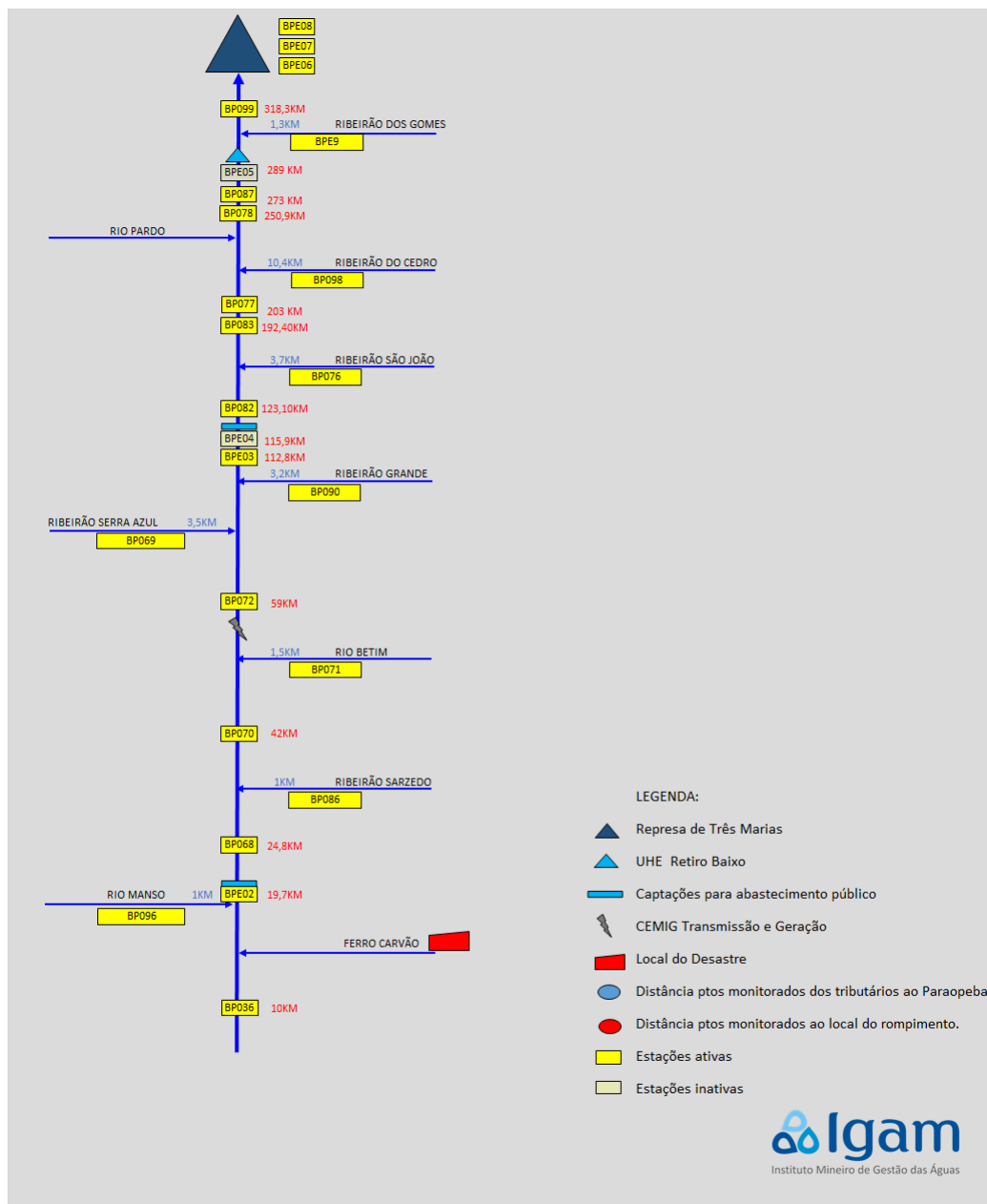
***Estação desativada por dificuldade de acesso. Última medição realizada em 21/04/19

****Distância da foz do rio Paraopeba com o ribeirão dos Gomes

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

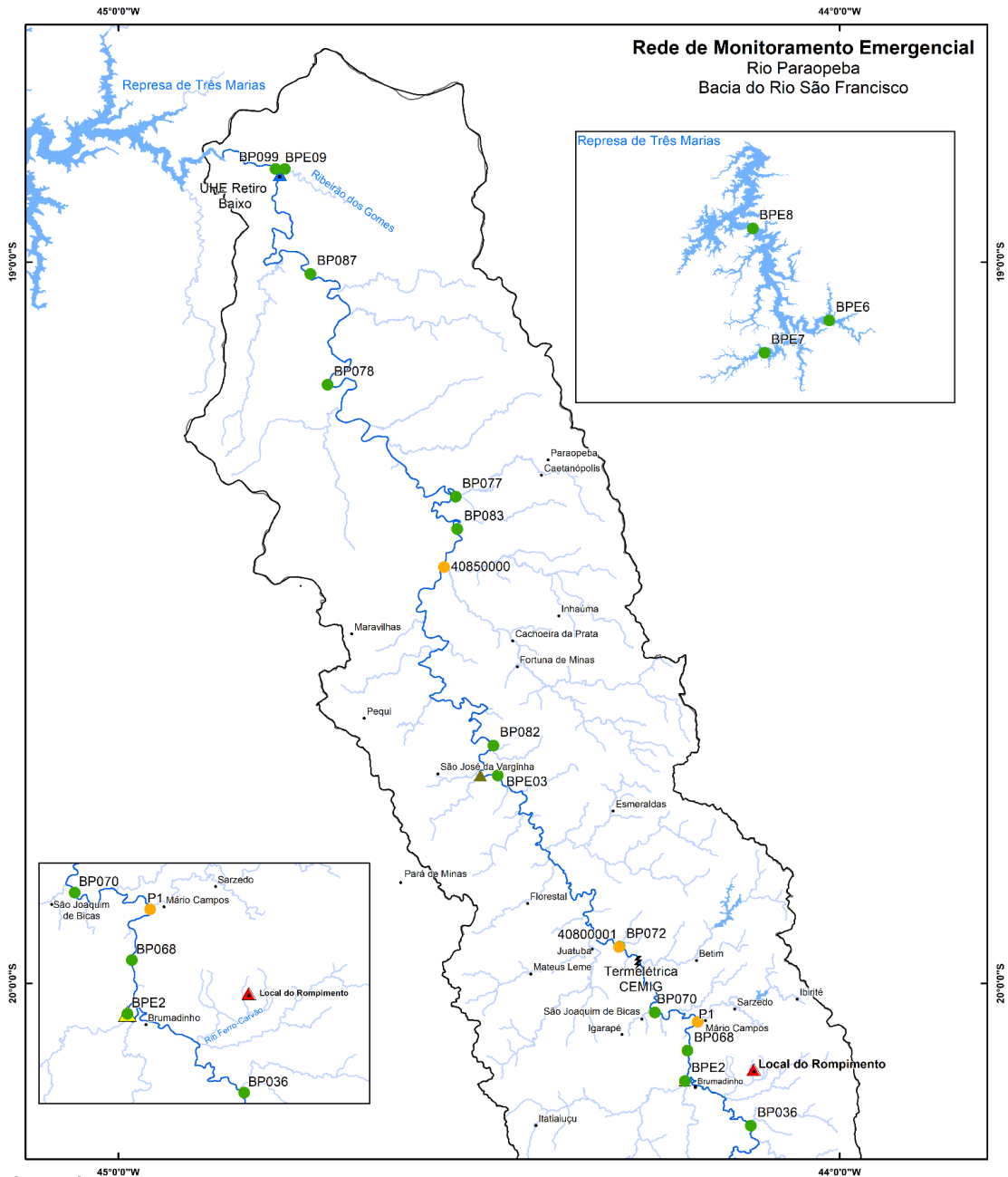
De forma a facilitar a visualização da localização dos pontos de monitoramento utilizados antes do rompimento (série histórica) e após o rompimento (2019), bem como os trechos de agrupamento utilizados para a discussão dos resultados no presente estudo, é apresentado no Diagrama 1 e no Mapa 1 a localização da Rede de Monitoramento Emergencial na bacia do rio Paraopeba.

Diagrama 1 – Pontos de monitoramento da qualidade da água superficial – pré e pós-rompimento



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Mapa 1 – Localização Geográfica da Rede de Monitoramento Emergencial do rio Paraopeba







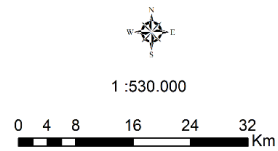
Legenda

Pontos de Monitoramento

Instituição

- IGAM
- CPRM
- ▲ UHE Retiro Baixo
- ⚡ CEMIG Geração e Transmissão
- ▲ Captação Copasa
- ▲ Captação Pará de Minas
- Sedes Municipais

-  Reservatório de Três Marias
-  Hidrografia - Rio Paraopeba
-  Hidrografia
-  SF3



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

5.3 Frequência de amostragem

Após o rompimento da Barragem 1, 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.

O monitoramento diário em todos os pontos foi mantido durante os primeiros 60 dias após o rompimento. Com o desenvolvimento dos trabalhos, e a diminuição de alterações significativas nas concentrações dos parâmetros, esta frequência foi modificada. Nas águas superficiais passou a ser semanal, e depois mensal, e nos sedimentos passou a ser mensal.

Tendo em vista o início das atividade de dragagem e contenção de rejeitos no trecho do rio Paraopeba na confluência com o ribeirão Ferro-Carvão desde o início do mês de setembro de 2019, além da contenção/fixação dos rejeitos no ribeirão Ferro-Carvão, realizada pela Vale, o monitoramento nas estações BPE2, BP036, BP068 e BP070 (primeiros 50 km) foi intensificado, passando a ser realizado semanalmente.

Desde o início de novembro, com a chegada do período chuvoso, o Igam intensificou o acompanhamento sistemático dos resultados do monitoramento da qualidade da água da sua rede própria, incluindo a região do reservatório de Três Marias. O trabalho visa verificar quaisquer anomalias que possam indicar, na água, a presença de partículas do rejeito, provenientes do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, em Brumadinho.

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

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

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

Tipo de amostra / Estações	Antes do Desastre	Data a partir da qual houve alteração da frequência de coleta													
	1997 a 25/01/2019	26/01/19	13/03/19		18/03/19			03/06/19		01/07/19	03/09/19		01/11/19		01/05/20
Estações	8 pontos Todas da calha (BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BP078, BP083, BP099)	11 pontos Todas da calha (BPE2, BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BPE4**, BPE3, BP078, BP083, BP099)	BPE2, BP082, BP099 e BPE5*	Demais estações	BPE5, BPE9 ¹ e BP099	BPE2, BP072, BP082 e BP078	BP036, BP068, BP070, BPE3, BP083, BPE6, BPE7 e BPE8	BPE9 e BPE099	BPE2, BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BPE3, BP078, BP083, BPE6, BPE7 e BPE8	Todos os 14 pontos	BPE2, BP036, BP068 e BP070	Demais estações	Todas da calha (BPE2, BP036, BP068, BP070, BP072, BP082, BPE3, BP083, BP077 ² , BP078, BP087 ³ , BPE9, BP099)	Represa de Três Marias (BPE6, BPE7, BPE8)	Todos os 16 pontos
Frequência Água	Trimestral	Diária	Diária	Mensal	Diária	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal
Frequência Sedimentos	Trimestral	Semanal	Semanal	Mensal	Semanal	Mensal	Mensal								Mensal

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

5.4 Parâmetros monitorados e padrões de qualidade

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

- Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB, 2011);
- *Standart Mehods for the Examination of Water and Watewater* (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA, 2005).

As amostragens e análises foram realizadas pelo Instituto SENAI de Tecnologia em Meio Ambiente seguindo a 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. As águas do rio Paraopeba da 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 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 01, de 5 de maio de 2008. Os limites para os parâmetros físico-químicos definidos segundo a Deliberação Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01/2008 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 01/2008 dos limites para águas de Classe 1, 2 e 3 avaliados

Parâmetro	LIMITE DN COPAM/CERH-MG – 01/2008			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 (2020)

No caso de sedimentos, considerou-se os limites estabelecidos pelo Conselho de Meio Ambiente (CONAMA) por meio de sua Resolução nº 454 de 8 de novembro de 2012 (TABELA 3). Essa resolução define limites de contaminantes em sedimentos para fins de dragagem de leitos de cursos d'água, bem como outras orientações. De acordo com Barbieri (2015), 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

Parâmetros Sedimento de Fundo	Limites da Res. CONAMA nº 454/2012	
	Nível 1	Nível 2
Nitrogênio Total (mg/Kg N)	--	--
Alumínio Total (mg/Kg Al)	--	--
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 (%)	--	--
Manganês Total (%)	--	--
Mercúrio Total (mg/Kg Hg)	0,17	0,486
Níquel Total (mg/Kg Ni)	18,0	35,9
Selênio (mg/Kg Se)	--	--
Vanádio Total (mg/Kg V)	--	--
Zinco Total (mg/Kg Zn)	123,0	315,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Vale destacar que a Resolução Conama nº 454/2012 não estabelece valores orientadores para os metais ferro, alumínio e manganês. Dessa forma utilizou-se os valores orientadores obtidos por Costa (2015), que realizou um mapeamento geoquímico e estabeleceu valores de referência (*Background*) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero. Portanto, os valores de referência de 28,10%, 4,52% e 0,33%, para ferro, alumínio e manganês, respectivamente, utilizando a técnica de análise fractal, estabelecidos por Costa (2015), foram utilizados no presente relatório como referência.

6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2020, NA CALHA DO RIO PARAPEBA

A seguir é apresentada uma análise dos resultados obtidos no monitoramento emergencial ao longo do rio Paraopeba, para os dados obtidos entre 26/01/19 a 30/12/2020.

Para melhor visualização dos resultados, as estações monitoradas foram agrupadas em cinco trechos a jusante do rompimento e um ponto a montante, conforme listado abaixo:

- A montante - Rio Paraopeba a montante da foz do ribeirão Ferro Carvão (BP036);

- Trecho 1 - localizado nos primeiros 40 km após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão até a montante da termelétrica de Igarapé (BPE2, BP068 e BP070);
- Trecho 2 - localizado entre 40 e 123 km após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, entre a termelétrica de Igarapé e Esmeraldas (BP072, BPE3, BPE4, BP082);
- Trecho 3 - localizado entre 190 a 279 km após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão até a montante da UHE Retiro Baixo (BP083, BP077, BP078 e BP087);
- Trecho 4 - localizado a 318 km após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099);
- Trecho 5 - localizado no corpo da represa de Três Marias (BPE6, BPE7, BPE8).

No presente relatório, são apresentados os gráficos de dispersão dos valores máximo registrados no mês, por trecho, para os parâmetros oxigênio dissolvido, pH *in loco*, turbidez, sólidos em suspensão totais, ferro dissolvido e total, alumínio dissolvido, manganês total, chumbo total, mercúrio total, arsênio total, cádmio total, cobre total, cromo total, níquel total, zinco total. Os valores máximos da série histórica por mês, considerando o período de 2000 a 2018, também são apresentados nos gráficos.

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 1 de 2008.

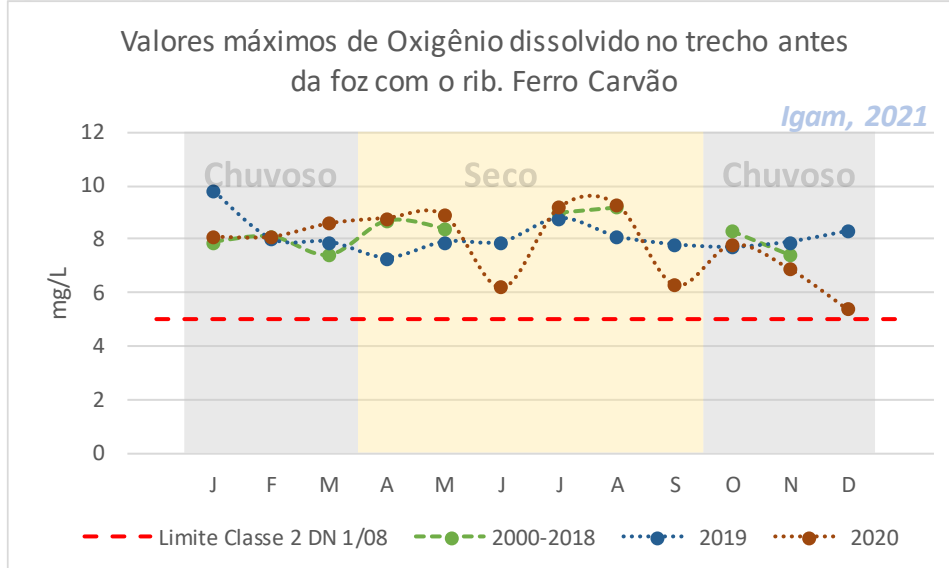
Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido, o pH e a condutividade elétrica *in loco* são parâmetros físico-químicos que ajudam a entender primariamente a qualidade geral da água, inclusive podendo indicar a contaminação por outros parâmetros a serem monitorados, como metais dissolvidos e matéria orgânica.

Observa-se que no monitoramento realizado em 2019 e 2020 os valores de oxigênio dissolvido variaram entre 6,0 a 9,0 mg/L O₂, aproximadamente, estando dentro da normalidade histórica (2000-2018) de cada trecho. Também não houve variação significativa ao longo de todo o curso do rio Paraopeba durante os primeiros dias após o desastre. Durante o monitoramento realizado

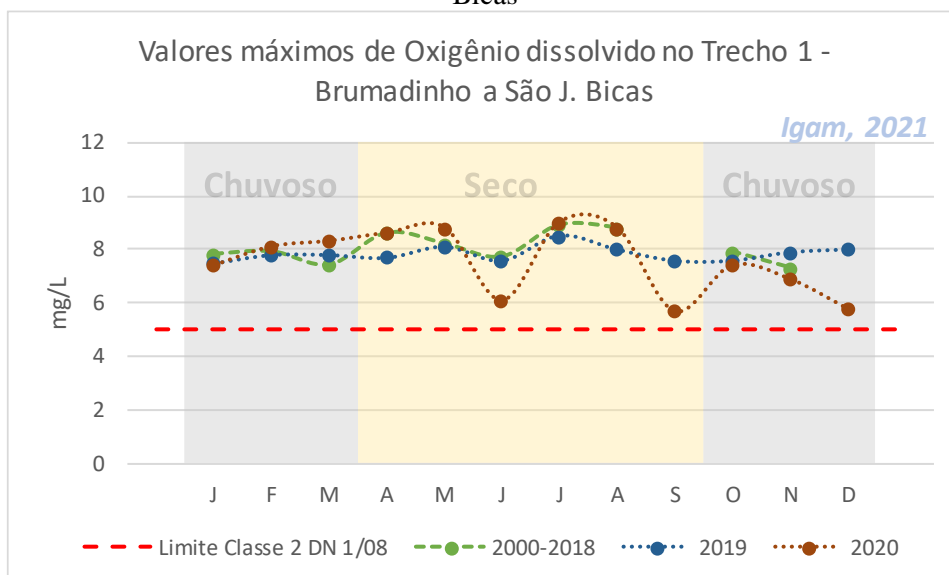
em 2019, todos os resultados estiveram dentro dos limites legais (valores acima de 5 mg/L). No entanto, em 2020, foram registradas violações ao limite legal para Classe 2 (abaixo de 5mg/L) no trecho 4, após UHE Retiro Baixo, nos meses de junho e dezembro.

Gráfico 1 – Valores máximos mensais de oxigênio dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho antes da foz com o ribeirão Ferro Cravão



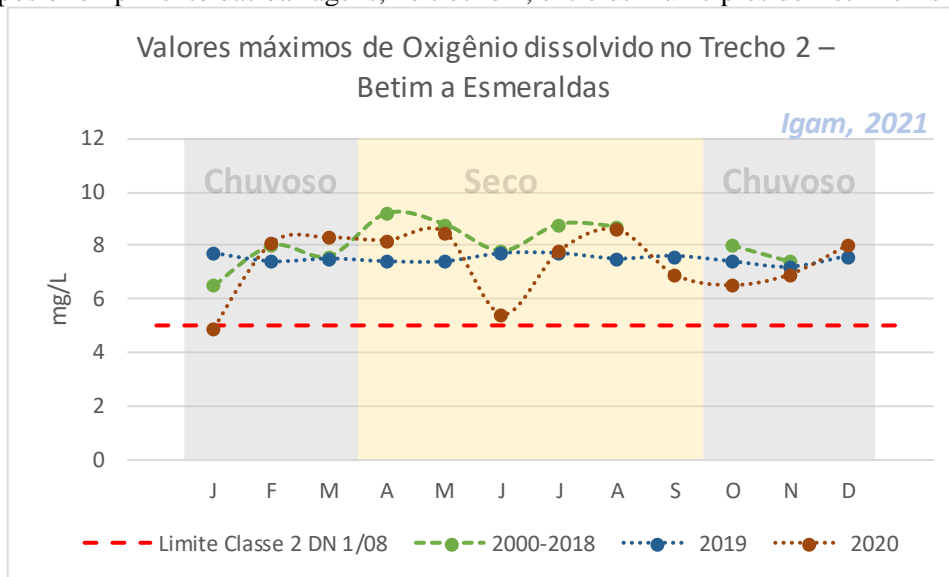
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 2 – Valores máximos mensais de oxigênio dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São João de Bicas



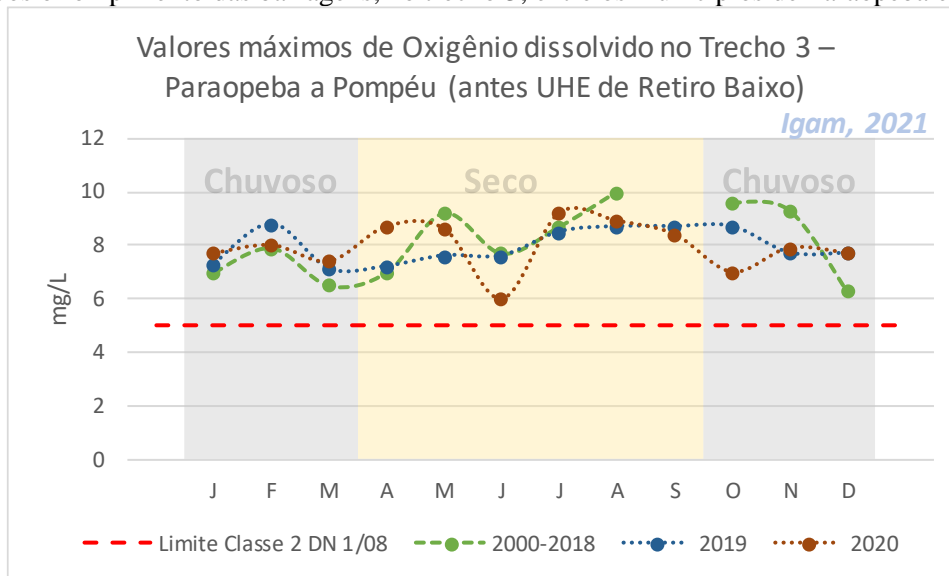
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 3 – Valores máximos mensais de oxigênio dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 2, entre os municípios de Betim e Esmeraldas



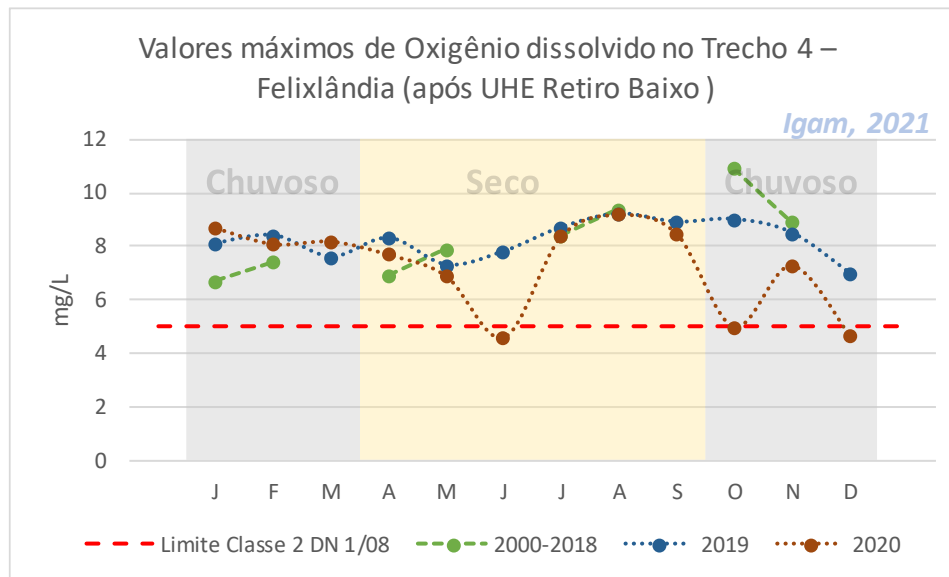
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 4 – Valores máximos mensais de oxigênio dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 3, entre os municípios de Paraopeba e Pompéu



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 5 – Valores máximos mensais de oxigênio dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 4, no município de Felixlândia

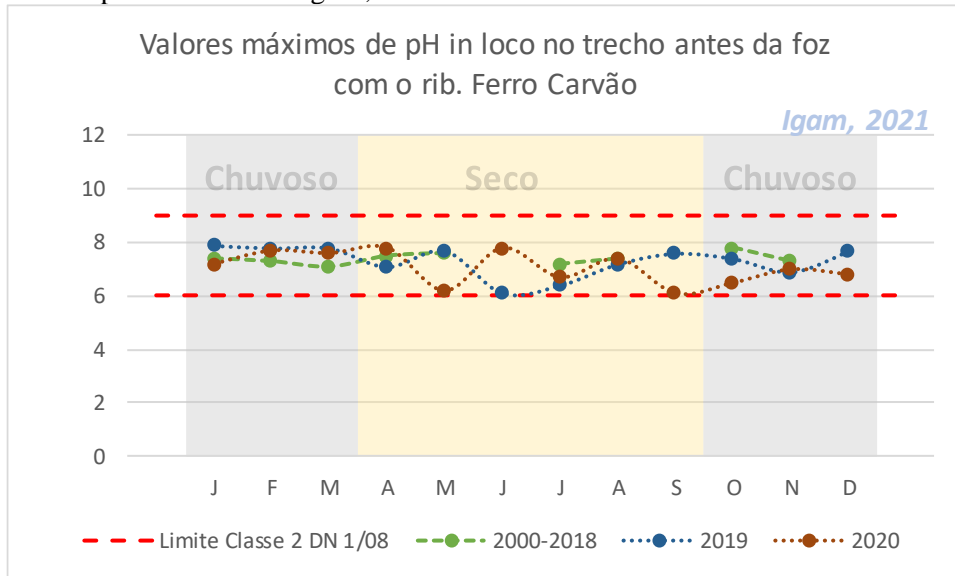


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

pH in loco

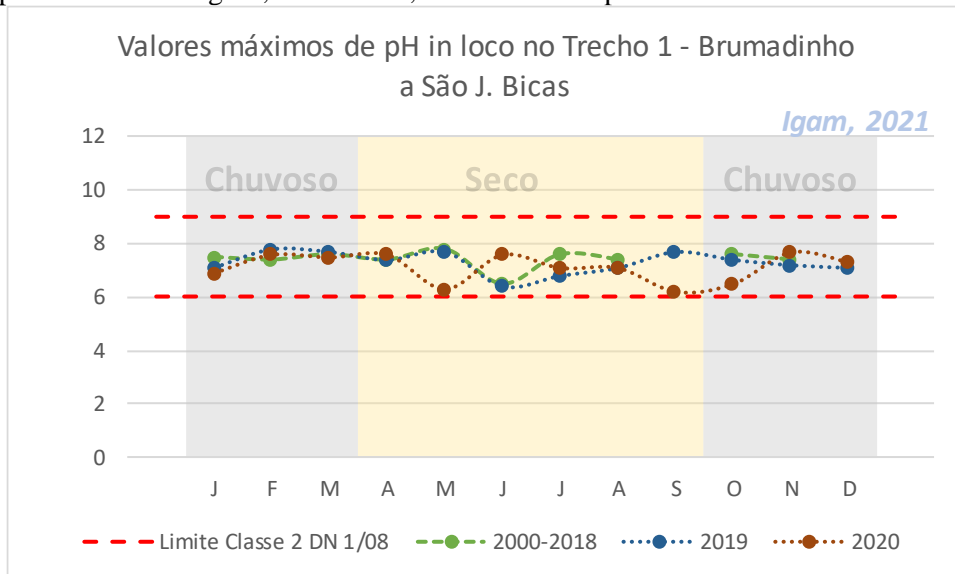
Observa-se que, semelhante ao comportamento dos dados de oxigênio dissolvido, não houve variação significativa do pH no monitoramento realizado em 2019 e 2020. Em cada trecho do rio Paraopeba, o comportamento geral dos dados apresentou uma variação de pH entre o intervalo de 6,0 a 8,0 nos anos de 2019 e 2020, assim como no período anterior ao rompimento (2000-2018). Os 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.

Gráfico 6 – Valores máximos mensais de pH, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho antes da foz com o ribeirão Ferro-Carvão



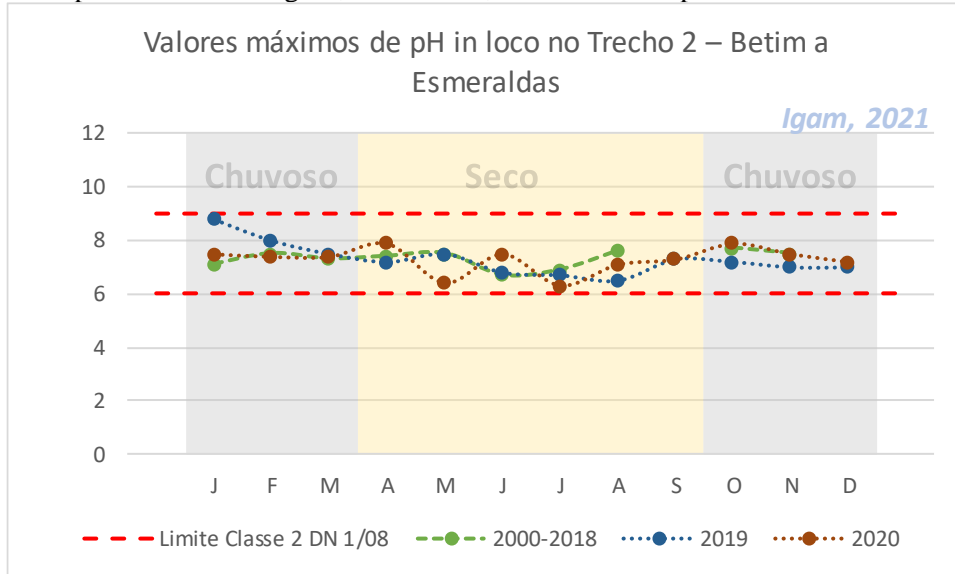
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 7 – Valores máximos mensais de pH, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São João de Bicas



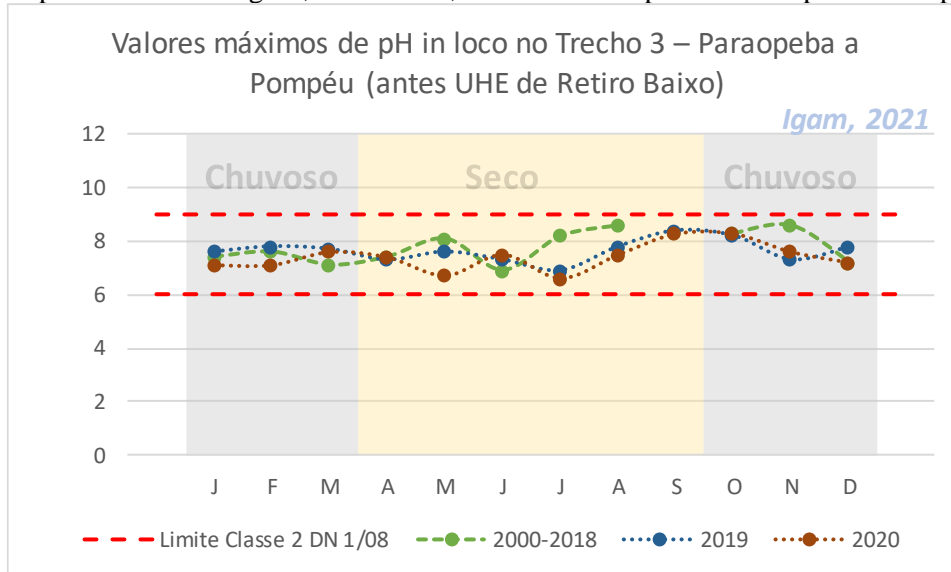
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 8 – Valores máximos mensais de pH, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 2, entre os municípios de Betim e Esmeraldas



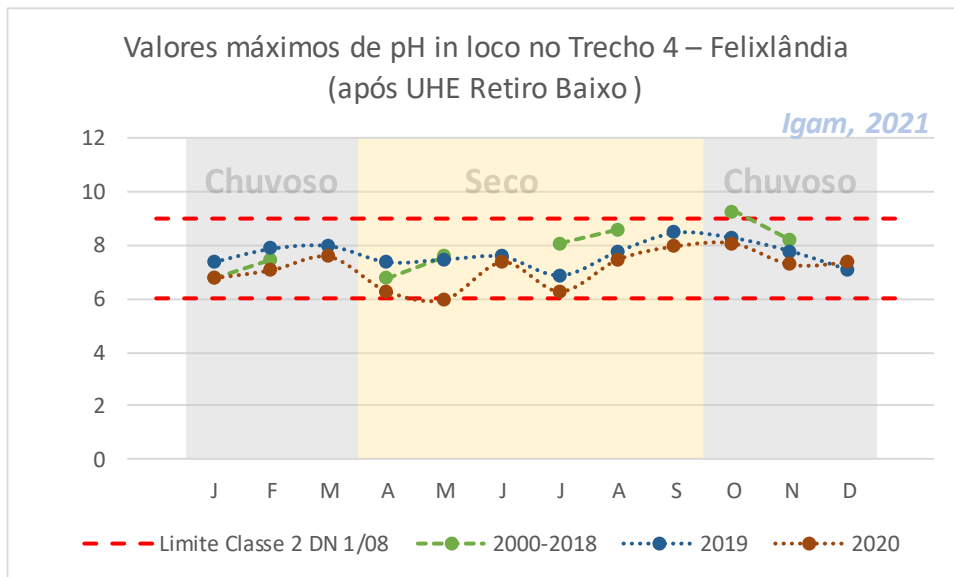
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 9 – Valores máximos mensais de pH, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 3, entre os municípios de Paraopeba e Pompéu



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

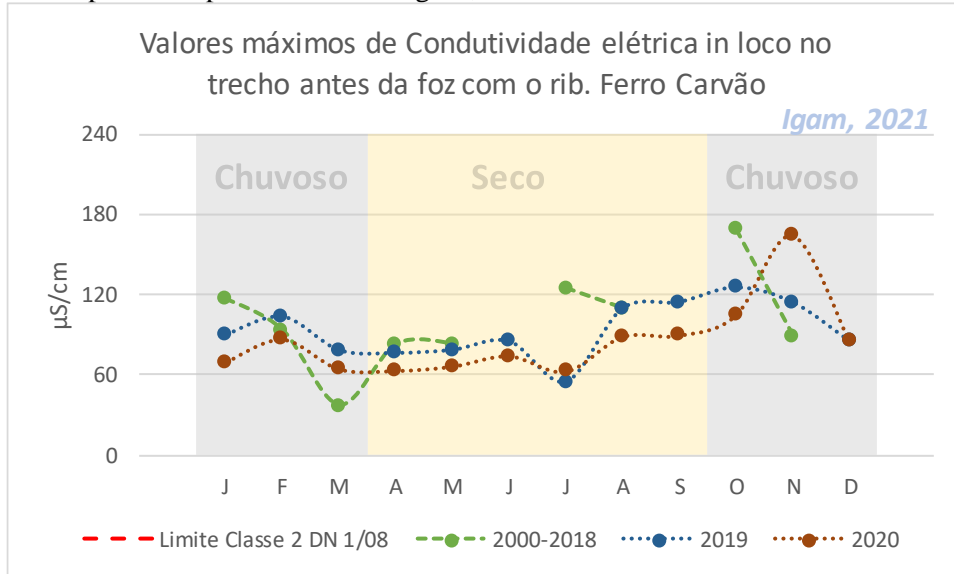
Gráfico 10 – Valores máximos mensais de pH, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 4, no município de Felixlândia



Condutividade elétrica

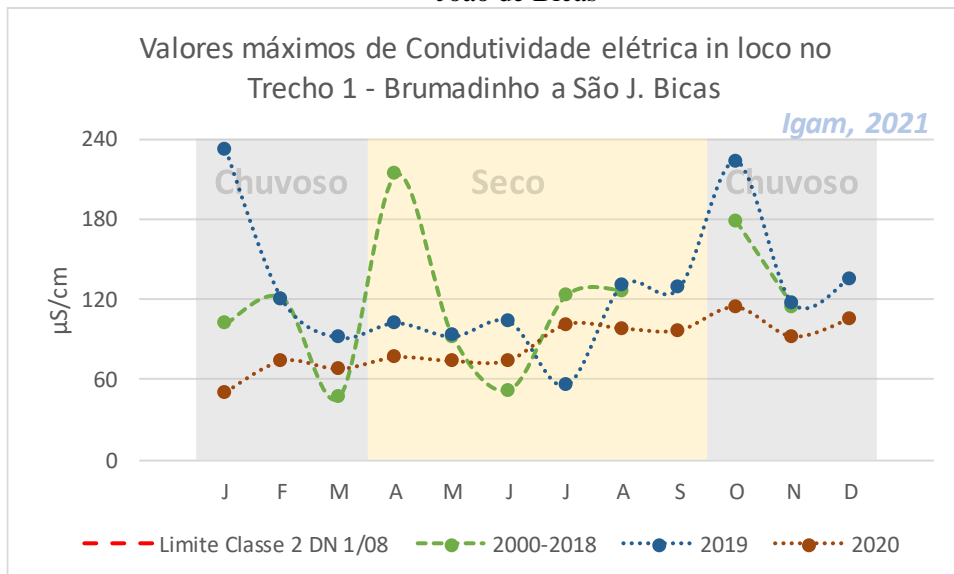
A condutividade elétrica apresentou resultados, de forma geral, próximos da normalidade histórica (2000-2018) no monitoramento de realizado em 2019 e 2020. Observa-se um aumento da condutividade nos meses chuvosos, principalmente após um longo período de estiagem. Este comportamento também foi registrado nos dados pré-rompimento. No mês de janeiro de 2019, há um aumento na condutividade, no trecho 1, entre Brumadinho e São Joaquim de Bicas, provavelmente associado ao período mais crítico pós desastre. Registra-se também ligeira redução dos valores de condutividade em 2020 se comparados com os registros do ano anterior.

Gráfico 11 – Valores máximos mensais de condutividade elétrica, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho antes da foz com o ribeirão Ferro-Cavão



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 12 – Valores máximos mensais de condutividade elétrica, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São João de Bicas



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 13 – Valores máximos mensais de condutividade elétrica, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 2, entre os municípios de Betim e Esmeraldas

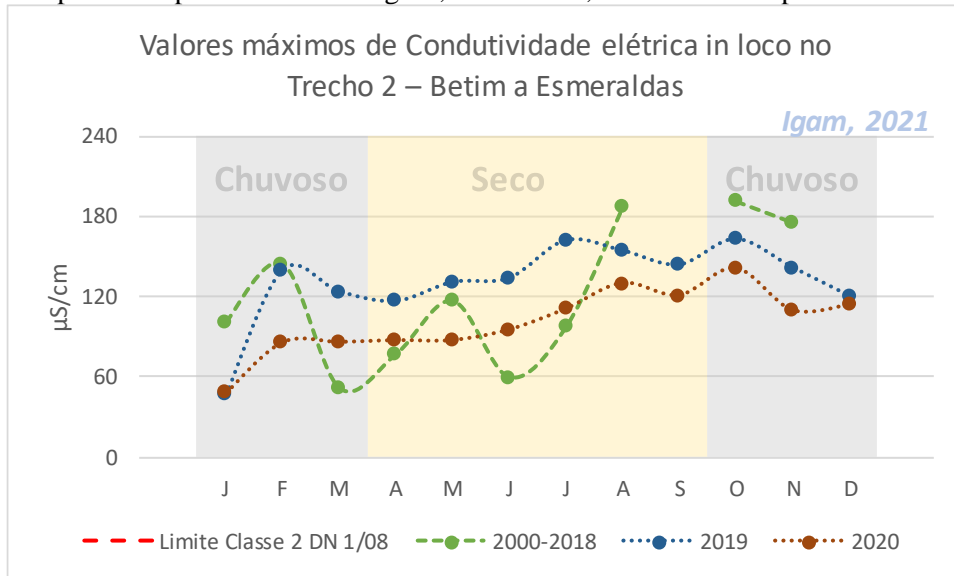


Gráfico 14 – Valores máximos mensais de condutividade elétrica, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 3, entre os municípios de Paraopeba e Pompéu

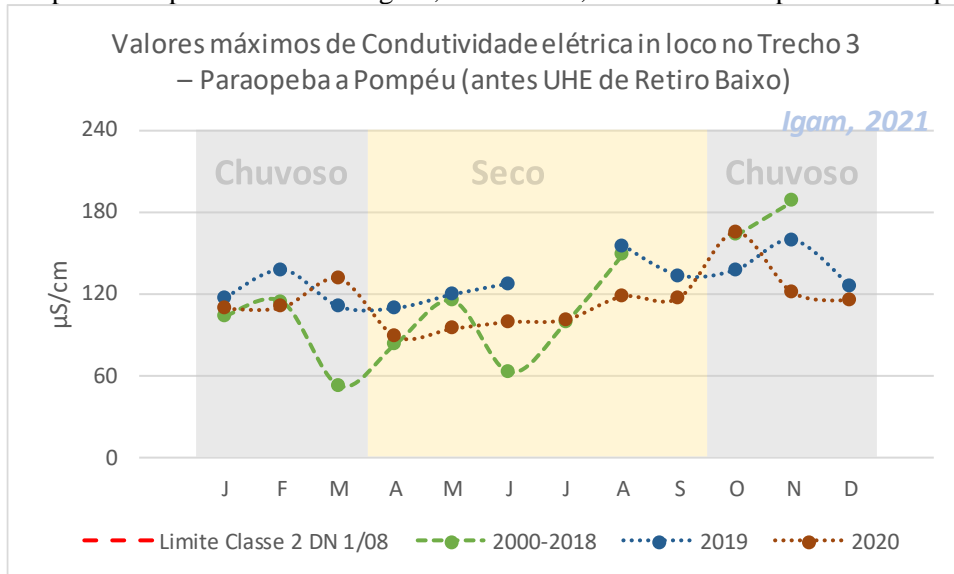
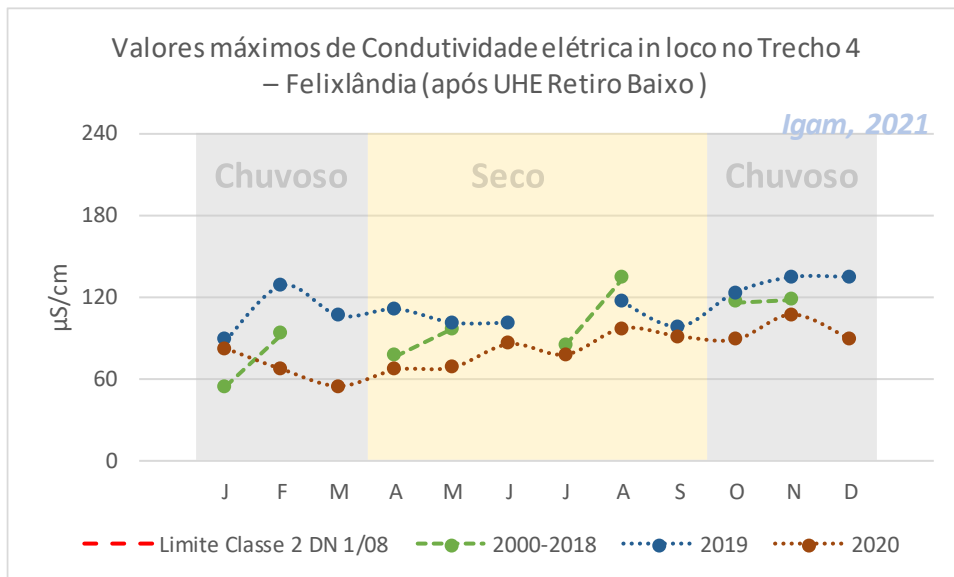


Gráfico 15 – Valores máximos mensais de condutividade elétrica, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 4, no município de Felixlândia



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Turbidez

O parâmetro turbidez mostra-se como um dos principais indicativos da presença do impacto decorrente do avanço dos rejeitos. Nos Gráficos 16 a 20, são apresentados os valores máximos de turbidez, por mês, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A (26 de janeiro a 30 de dezembro de 2020), considerando todos os trechos ao longo do rio Paraopeba.

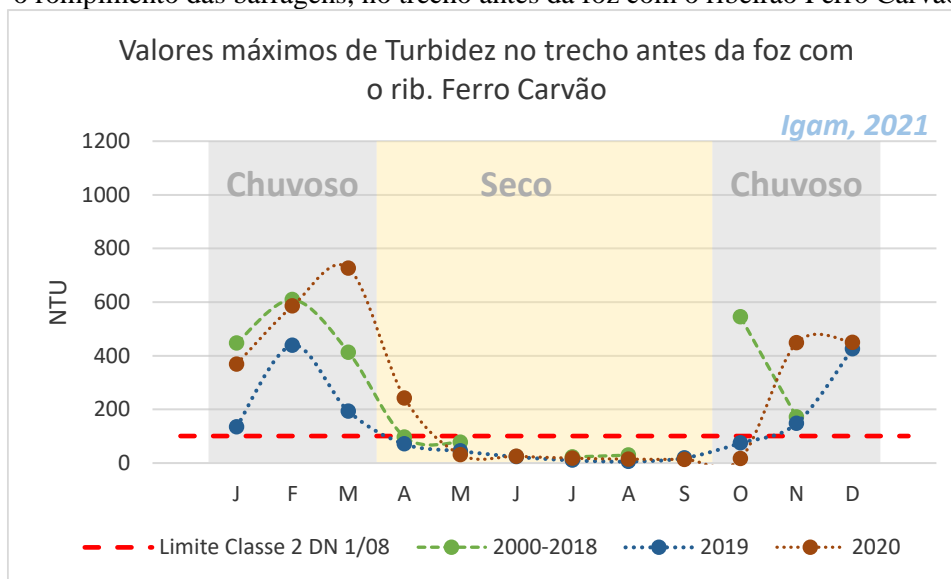
De forma geral, observa-se que, nos períodos chuvosos, há elevação dos valores de turbidez registrados, em todos os trechos. Esses resultados são esperados tendo em vista que, nesses períodos, o aumento do escoamento superficial e da vazão do rio acarretam a remobilização do material depositado no leito do rio e nas margens.

Além disso, nos períodos chuvosos de 2020, foram observadas elevações nos valores de turbidez, ainda que inferiores àsquelas observados no ano de 2019, exceto no trecho localizado a montante da foz com o ribeirão Ferro-Carvão.

No período chuvoso de março de 2020, no trecho compreendido antes da foz com o ribeirão Ferro-Carvão (Gráfico 16), o valor máximo de 727 NTU foi registrado. No mês de abril de 2020, correspondente ao período seco ocorreu violação do limite legal de turbidez para águas de Classe 2 (100 NTU), considerando-se o valor máximo. Em contrapartida, no período chuvoso, os valores máximos em todos os meses violaram o limite legal, à exceção dos valores máximos de outubro de 2019 e 2020.

Observa-se que apesar desse trecho estar localizado a montante da área de confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, também apresentou valores acima do limite legal nas medições realizadas nos períodos chuvosos, contudo os níveis de turbidez foram inferiores aos medidos nos trechos a jusante da foz com o ribeirão Ferro-Carvão.

Gráficos 16 – Valores máximos mensais de turbidez, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho antes da foz com o ribeirão Ferro Carvão



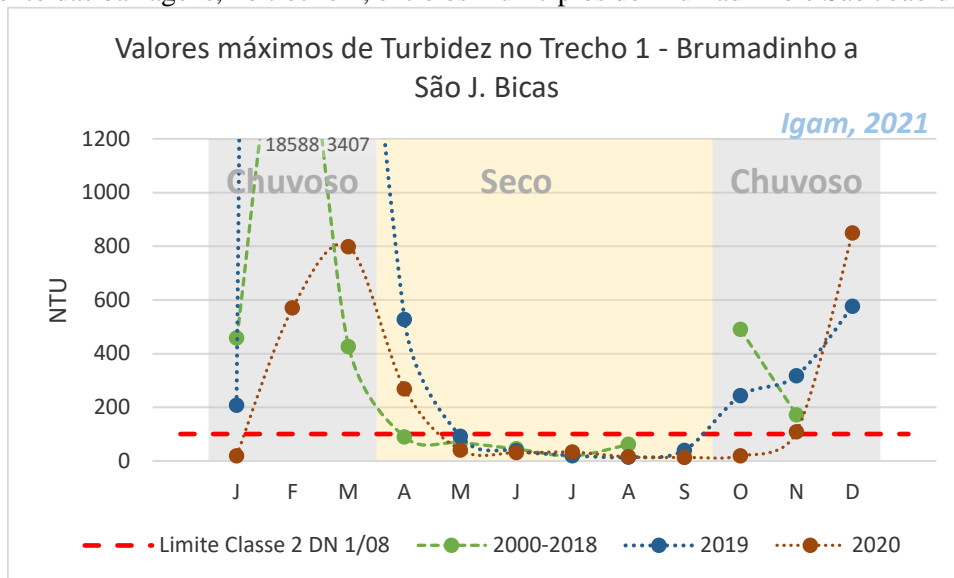
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

O trecho 1, localizado nos primeiros 40 km após o rompimento (Gráfico 17), foi o mais impactado e apresentou os níveis mais elevados de turbidez, seguido dos trechos 2 (Gráfico 18) e 3 (Gráfico 19). Nos trechos 1, 2 e 3, os maiores valores máximos foram observados em fevereiro de 2019, com resultados iguais a 18.588 NTU, 17.148 NTU e 1.545 NTU, respectivamente. Valores que são superiores aos registrados na série histórica do Igam (2000-2018).

Esses resultados demonstram os impactos causados pelos rejeitos das barragens B1, BIV e BIV-A, e evidencia o amortecimento dos impactos nos trechos localizados a jusante dos barramentos presentes ao longo do curso de água (Termelétrica de Igarapé e UHE Retiro Baixo).

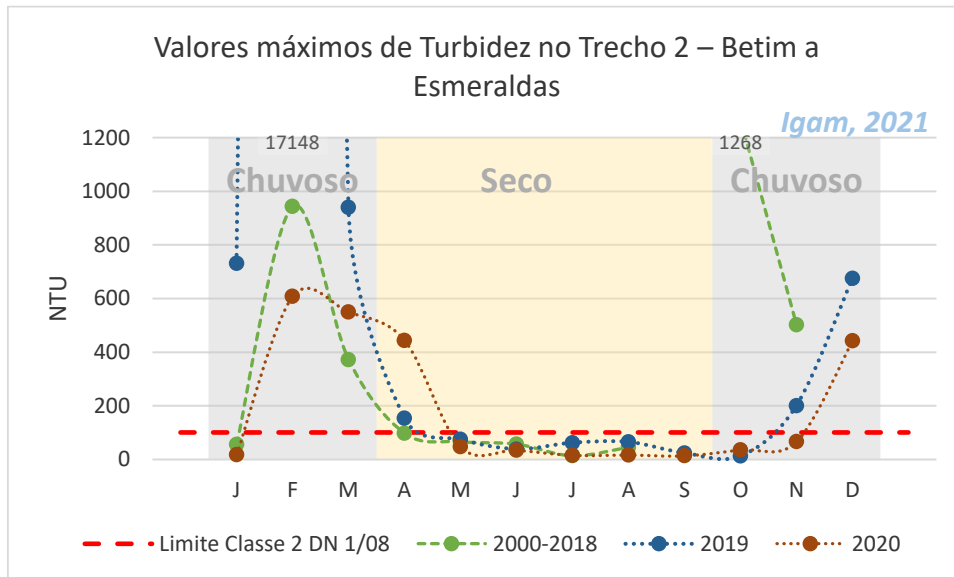
A ocorrência de chuvas na região ocasiona o aumento das vazões e o revolvimento do rejeito depositado no leito do rio, principalmente nas áreas próximas ao rompimento. A piora da qualidade da água do rio Paraopeba no trecho mais impactado (entre Brumadinho e Esmeraldas - trechos 1 e 2), durante o período chuvoso, também está relacionada às atividades de dragagem realizadas pela Vale no rio Paraopeba logo após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão.

Gráfico 17 – Valores máximos mensais de turbidez, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São João de Bicas



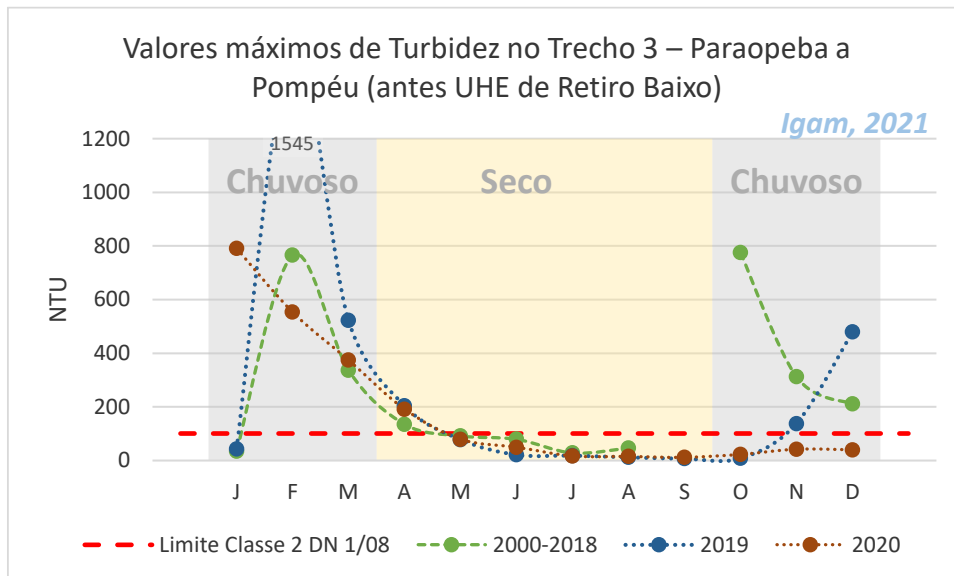
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 18 – Valores máximos mensais de turbidez, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 2, entre os municípios de Betim e Esmeraldas



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 19 – Valores máximos mensais de turbidez, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 3, entre os municípios de Paraopeba e Pompéu



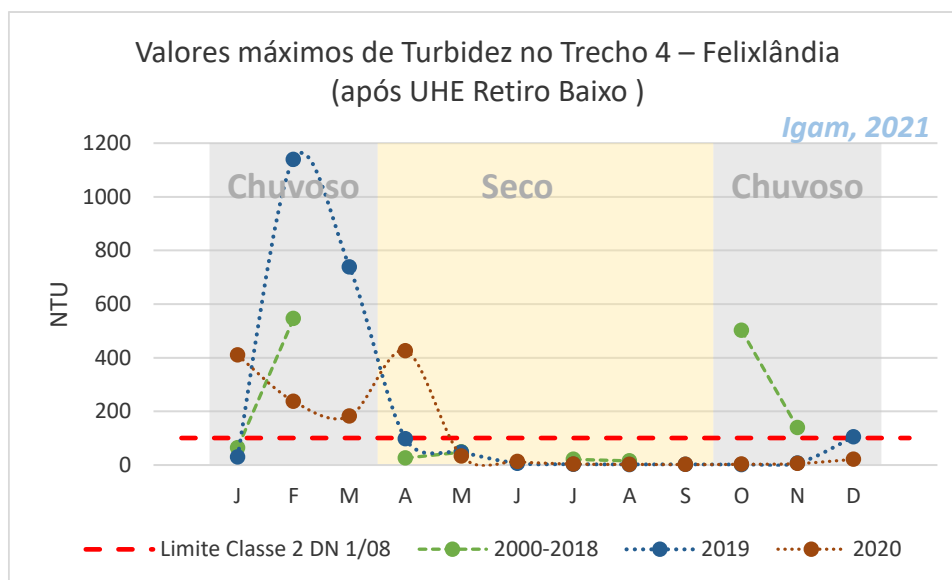
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Considerando os resultados analisados, até a data de 30 de dezembro de 2020, não foi possível identificar alterações nos níveis de turbidez que refletissem a chegada da lama no trecho a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) (Gráfico 20).

O maior valor máximo de turbidez registrado nesse trecho foi de 1.140 NTU, no mês de fevereiro de 2019. Registra-se que nos meses de maio a novembro, todos os valores máximos estiveram abaixo do limite legal (100 NTU).

Ressalta-se que este trecho recebe influência direta do ribeirão dos Gomes, o que pode explicar a ocorrência dos picos de turbidez nos períodos chuvosos.

Gráfico 20 – Valores máximos mensais de turbidez, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 4, no município de Felixlândia



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

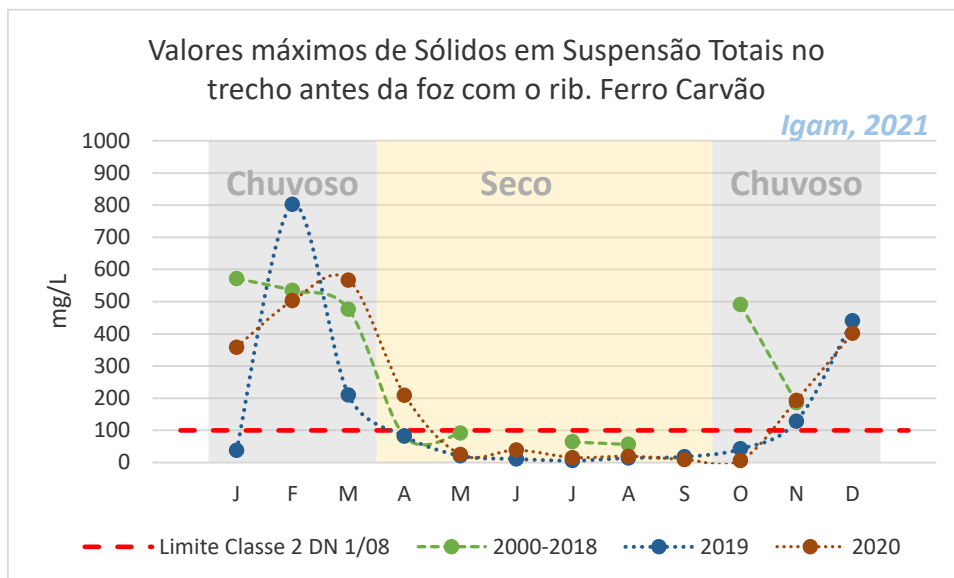
Sólidos em suspensão totais

Nos Gráficos 21 a 25, são apresentados os valores de concentração máxima de sólidos em suspensão totais, por mês, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A (26 de janeiro a 30 de dezembro de 2020), considerando todos os trechos ao longo do rio Paraopeba.

Observa-se que os resultados apresentaram comportamento semelhante ao observado para turbidez, com valores superiores ao limite de Classe 2 (100 mg/L), sobretudo no período chuvoso. Os resultados de sólidos em suspensão, assim como os de turbidez, demonstraram que o primeiro trecho localizado no rio Paraopeba, a jusante do ribeirão Ferro-Carvão, foi o que recebeu o maior impacto, seguido dos trechos 2 e 3.

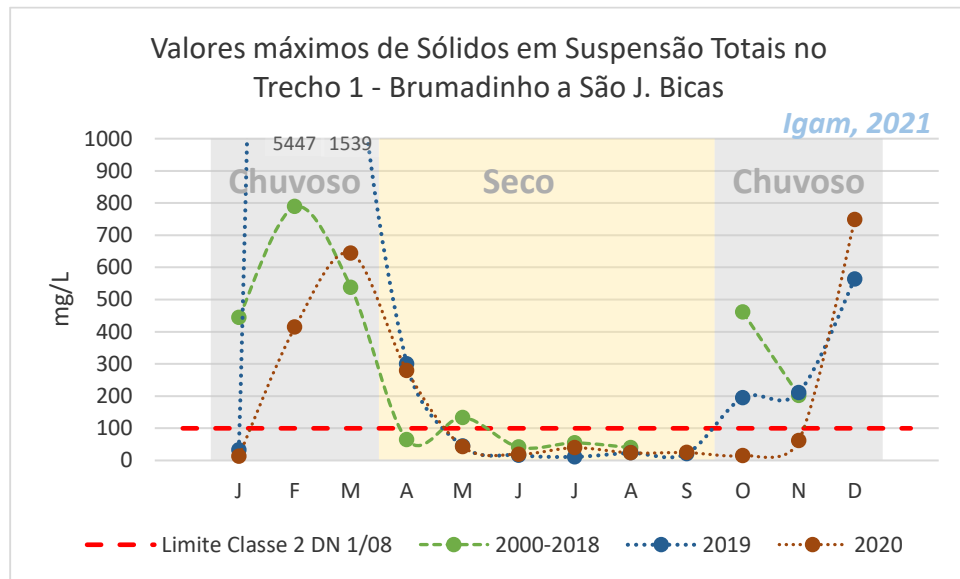
Nos períodos chuvosos de 2019 (janeiro a março e outubro a dezembro) foram observados valores mais elevados de concentração de sólidos em suspensão totais, se comparados àqueles observados no ano de 2019, a semelhança dos resultados de turbidez.

Gráfico 21 – Valores máximos mensais de sólidos em suspensão totais, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho antes da foz com o ribeirão Ferro-Carvão



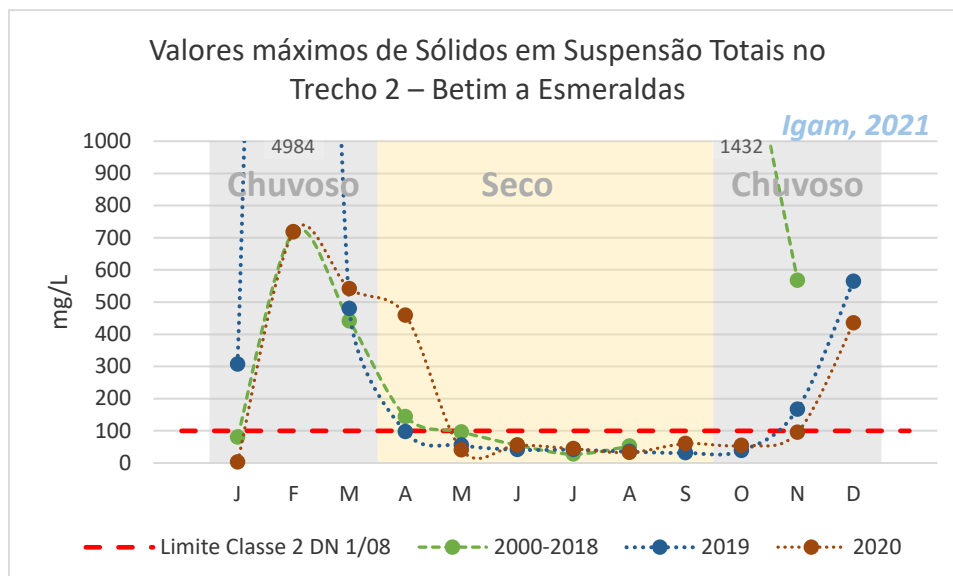
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 22 – Valores máximos mensais de sólidos em suspensão totais, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São João de Bicas



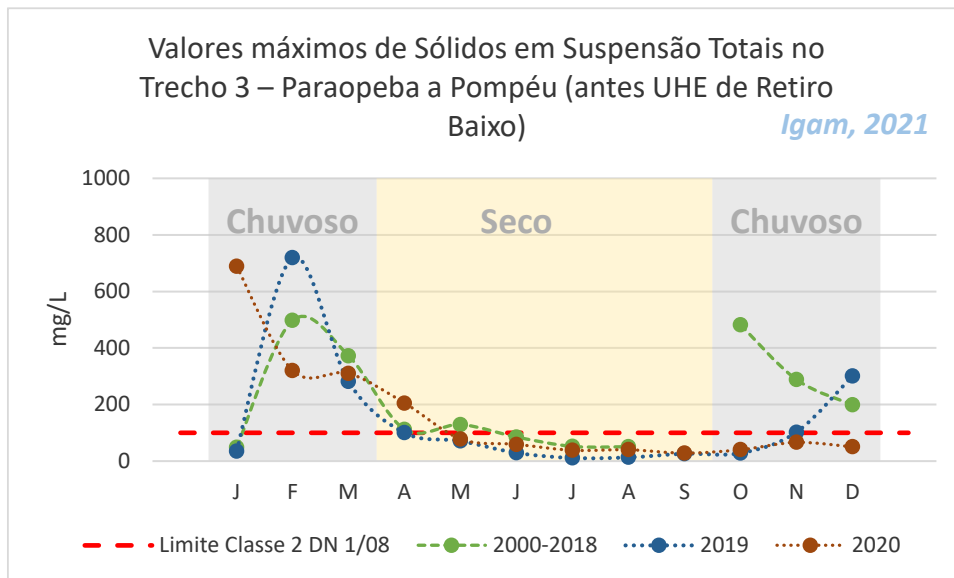
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 23 – Valores máximos mensais de sólidos em suspensão totais, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 2, entre os municípios de Betim e Esmeraldas



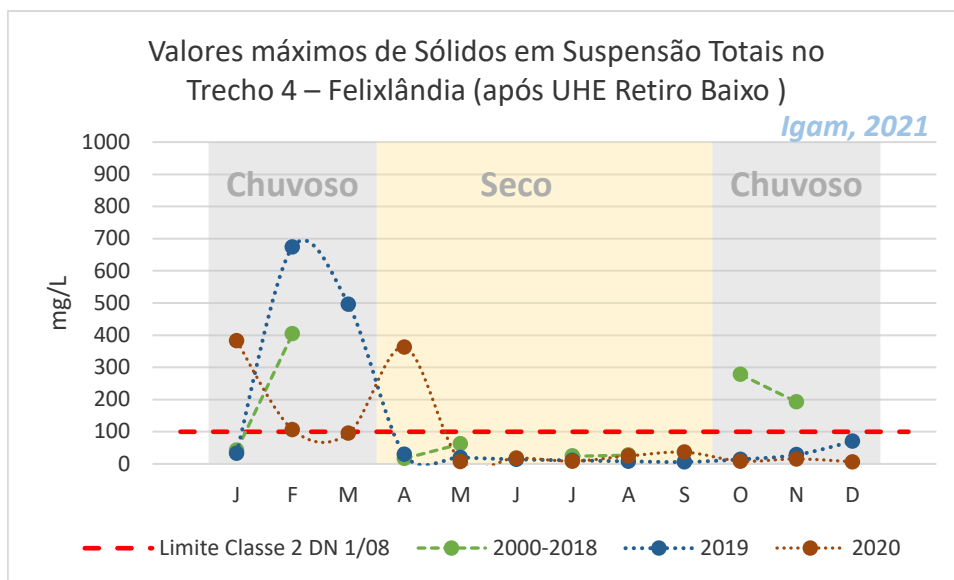
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 24 – Valores máximos mensais de sólidos em suspensão totais, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 3, entre os municípios de Paraopeba e Pompéu



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 25 – Valores máximos mensais de sólidos em suspensão totais, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 4, no município de Felixlândia



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Ferro dissolvido e total

Os metais ferro total e manganês total estão diretamente relacionados às atividades de mineração desenvolvidas na área do desastre, pois são encontrados no rejeito de minério, sobretudo, no minério de ferro. Por ser o principal insumo da mina, os resultados desses dois metais são essenciais para o entendimento do impacto do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A. Assim, quando são encontradas variações significativas de ferro e manganês, principalmente no período que sucedeu o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, estas podem ser um indicativo da contaminação do corpo d'água pelo rejeito.

O ferro, um dos principais constituintes do material proveniente do rompimento da barragem, no estado ferroso (Fe^{+2}), forma compostos solúveis, principalmente hidróxidos. Em ambientes oxidantes, tais como águas superficiais, o Fe^{+2} passa a Fe^{+3} dando origem ao hidróxido férrico, que é insolúvel, assim espera-se que a maior parte do ferro esteja associado ao particulado em suspensão na forma de ferro total. O padrão normativo para o ferro prevê apenas a forma dissolvida. Porém, constatou-se que a liberação de ferro no rio Paraopeba seria melhor detectada, se fosse considerada a fração total desse parâmetro. Dessa forma, essas duas formas de ferro, dissolvida e total, foram analisadas.

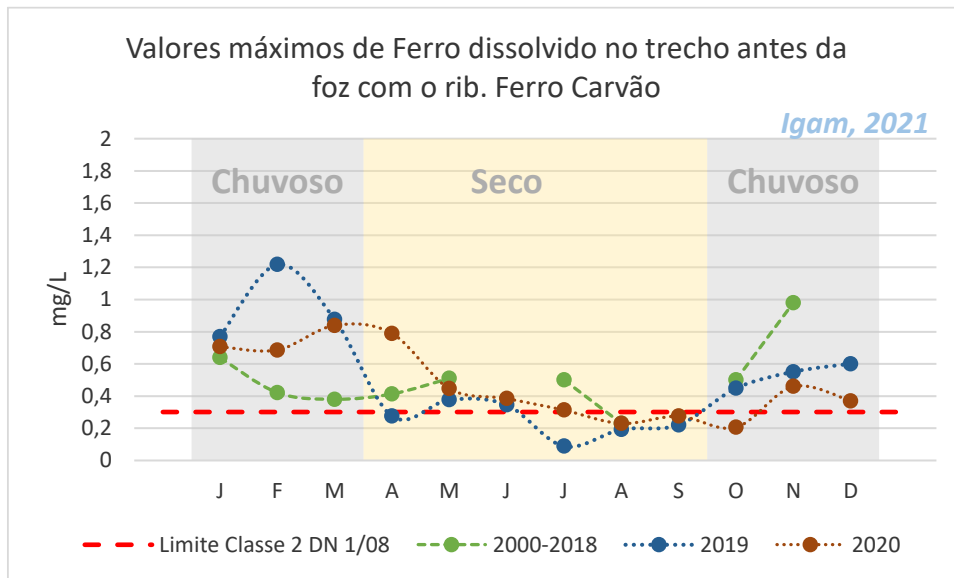
Nos Gráficos 26 a 30, são apresentados os valores máximos de ferro dissolvido, por mês, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A (26 de janeiro a 30 de dezembro de 2020), considerando todos os trechos ao longo do rio Paraopeba.

No trecho antes da foz com o ribeirão Ferro-Carvão (Gráfico 26), o maior valor máximo de 1,218 mg/L foi registrado, no período chuvoso de fevereiro de 2019. Ainda, em todos os meses do período chuvoso, os valores máximos violaram o limite legal (0,3 mg/L), à exceção do valor máximo de outubro de 2020.

No período seco, também ocorreram violações do limite legal de ferro dissolvido para águas de Classe 2, considerando o valor máximo. Observa-se que, valores acima do limite legal já eram registrados nesta estação, sendo o maior valor registrado igual a 0,98 mg/L, no mês de

novembro. Apesar desse trecho estar localizado a montante da área de confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, e apresentar valores acima do limite legal nas medições, as concentrações de ferro dissolvido registradas foram inferiores às medidas nos trechos a jusante da foz com o ribeirão Ferro-Carvão.

Gráfico 26 – Valores máximos mensais de ferro dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho antes da foz com o ribeirão Ferro Carvão

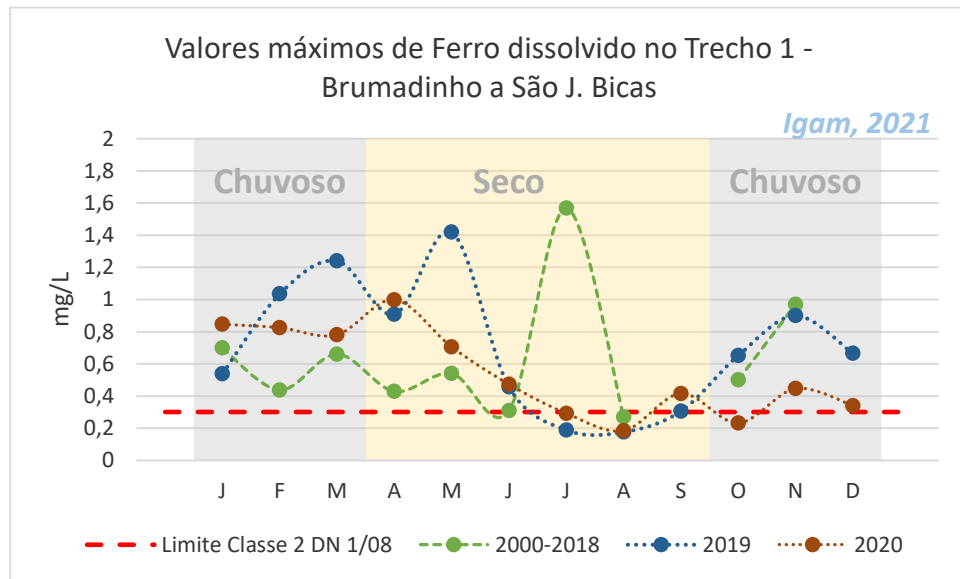


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Observa-se que os maiores valores máximos de ferro dissolvido foram registrados nos trechos 1, 2 e 3 (Gráficos 27 a 29), com resultados iguais a 1,57 mg/L (mês de julho da série histórica do Igam), 1,678 mg/L (mês de março de 2019) e 1,817 mg/L (mês de março de 2019), respectivamente.

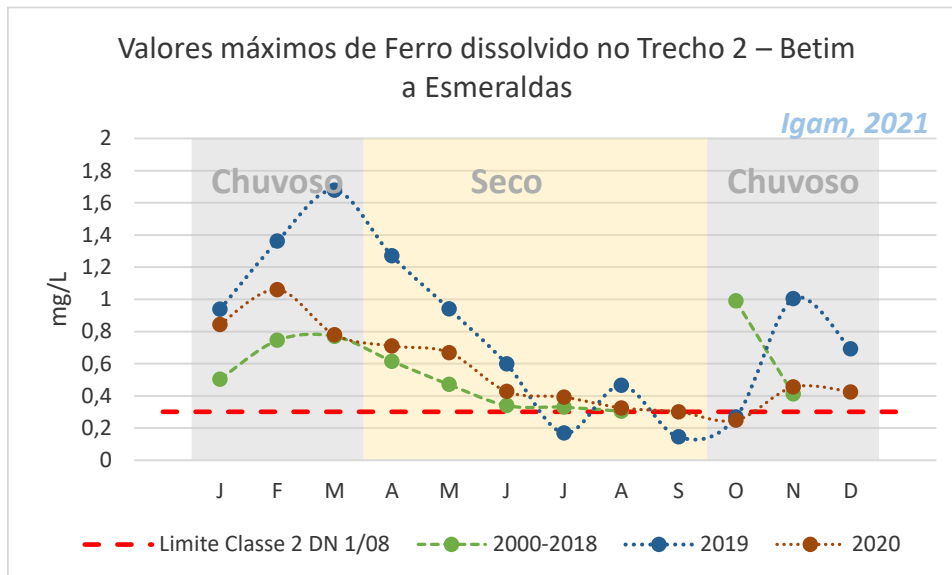
Ademais, observa-se que até cerca de 192 km a jusante do rompimento não há uma redução dos valores de ferro dissolvido nos conjuntos de dados dos pontos, como ocorre com a turbidez. E que valores elevados foram registrados tanto no período chuvoso quanto no período seco.

Gráfico 27 – Valores máximos mensais de ferro dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São João de Bicas



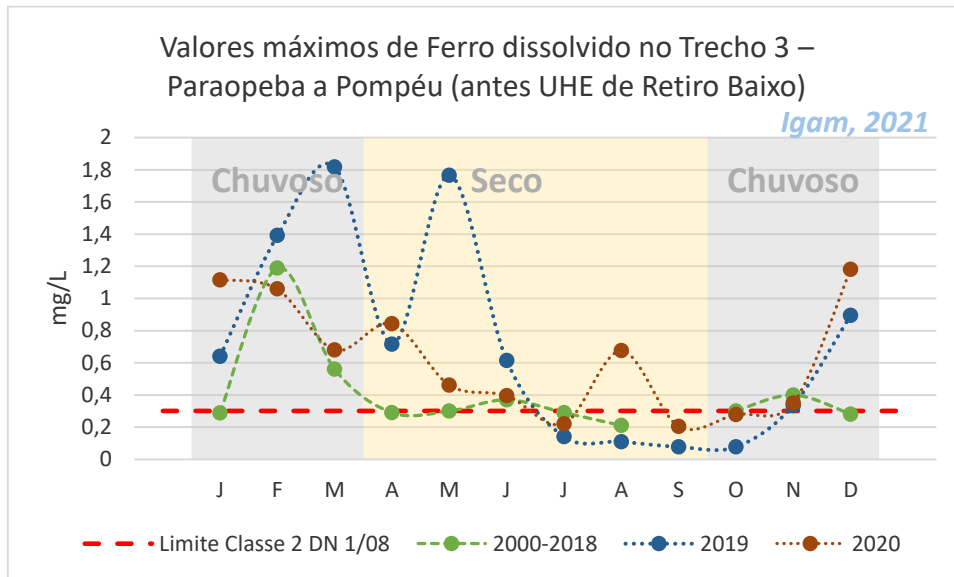
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 28 – Valores máximos mensais de ferro dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 2, entre os municípios de Betim e Esmeraldas



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

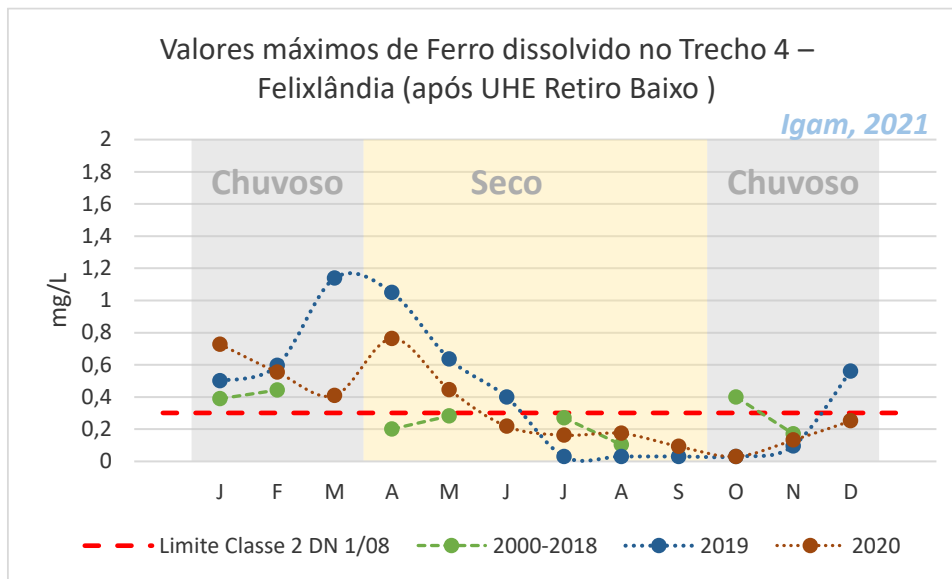
Gráfico 29 – Valores máximos mensais de ferro dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 3, entre os municípios de Paraopeba e Pompéu



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Considerando os resultados do trecho 4, localizado a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) (Gráfico 30), o maior valor máximo de ferro dissolvido registrado nesse trecho foi de 1,14 mg/L, no mês de março, em 2019. Observa-se que quase todos os resultados dos anos de 2019 e 2020, se apresentaram acima dos valores da série histórica do Igam (2000 a 2018). Registra-se que nos meses de julho a novembro, considerando os dados após o rompimento, todos os valores máximos estiveram abaixo do limite legal (0,3 mg/L). Ressalta-se ainda, que este trecho recebe influência direta do ribeirão dos Gomes, o que pode explicar a ocorrência dos picos de concentração, principalmente nos períodos chuvosos.

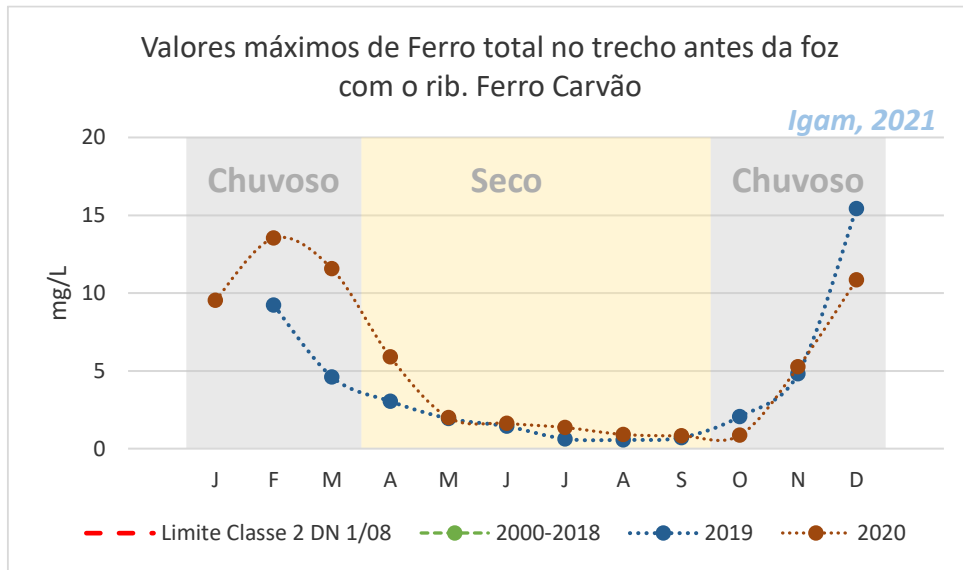
Gráfico 30 – Valores máximos mensais de ferro dissolvido, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 4, no município de Felixlândia



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

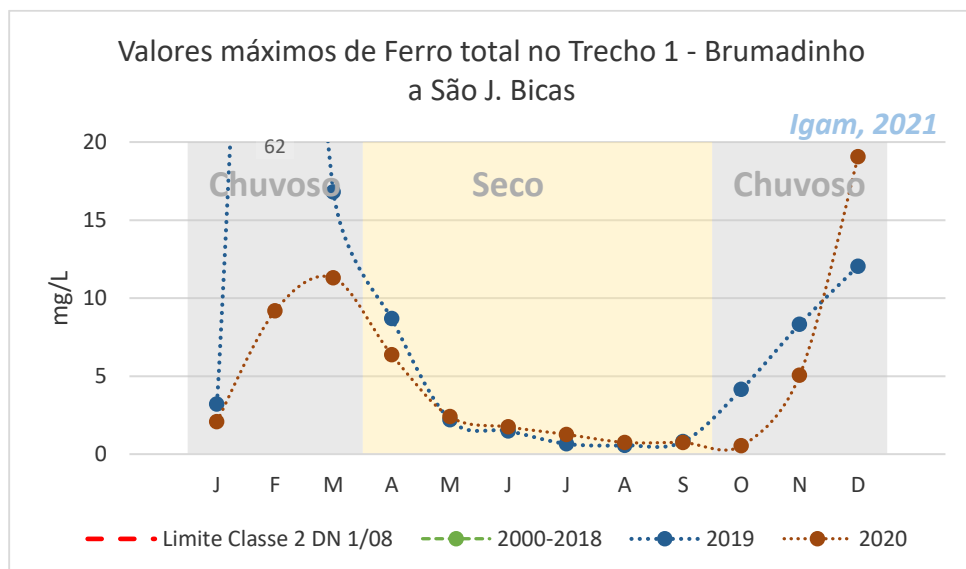
Ao avaliar os resultados de ferro total (Gráficos 31 a 35), observa-se que os maiores registros de ferro foram obtidos no trecho 1. Esses resultados demonstram que no material proveniente das barragens B1, BIV e BIV-A a maior parte do ferro está associada à fração total e não a dissolvida. Em complemento, os dados de ferro total alinham-se melhor à análise feita para turbidez, com valores mais altos mais próximos da barragem e redução a partir do município de Paraopeba, a 192 km (trecho 3), sendo menos evidente a partir do reservatório de Retiro Baixo (trecho 4). Isso ocorre devido à sedimentação do ferro adsorvido a partículas sólidas, que avança em velocidade muito inferior à de matéria dissolvida.

Gráfico 31 – Valores máximos mensais de ferro total, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho antes da foz com o ribeirão Ferro Carvão



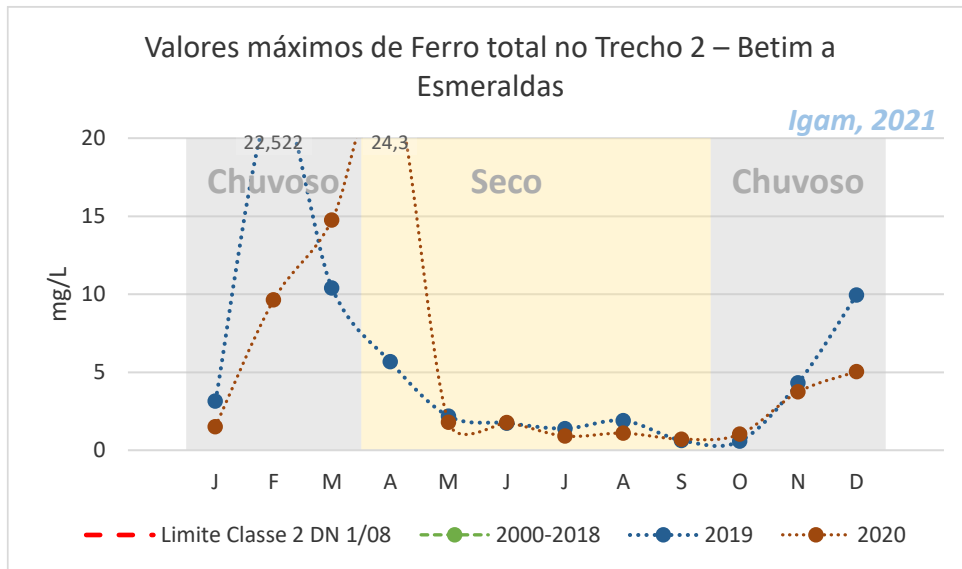
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 32 – Valores máximos mensais de ferro total, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São João de Bicas



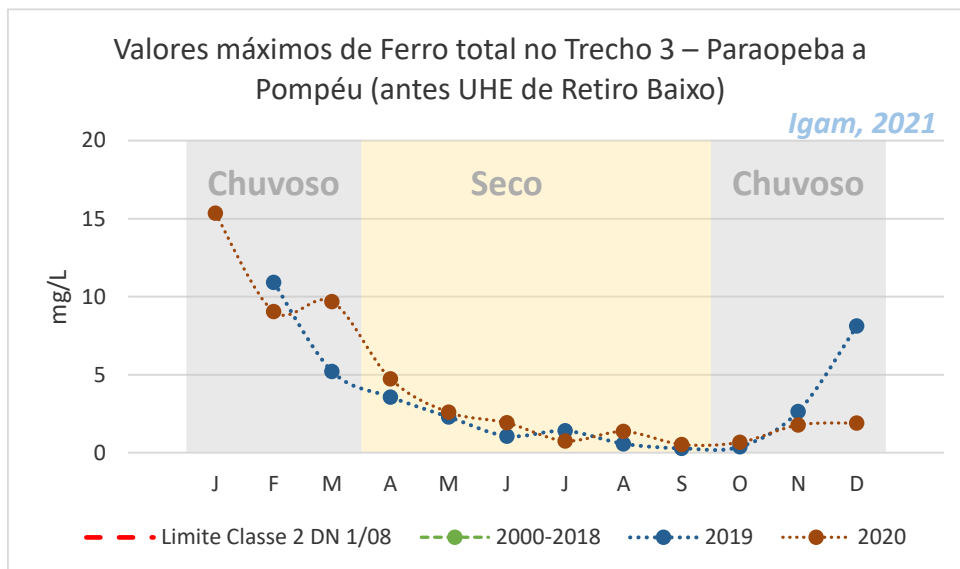
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 33 – Valores máximos mensais de ferro total, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 2, entre os municípios de Betim e Esmeraldas



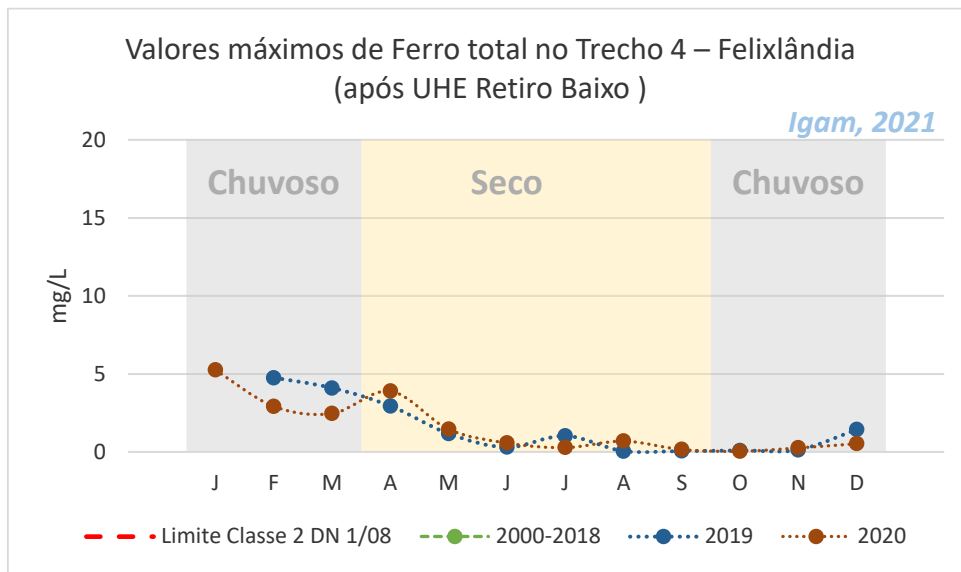
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 34 – Valores máximos mensais de ferro total, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 3, entre os municípios de Paraopeba e Pompéu



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 35 – máximos mensais de ferro total, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 4, no município de Felixlândia



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

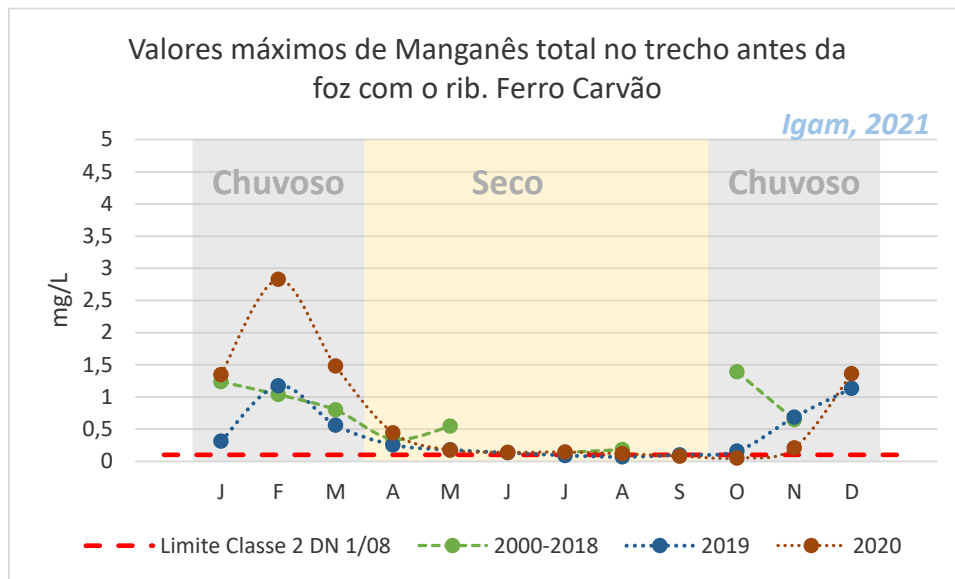
Manganês total

Nos Gráficos 36 a 40, são apresentados os valores máximos de concentração de manganês total, por mês, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A (26 de janeiro a 30 de dezembro de 2020), considerando todos os trechos ao longo do rio Paraopeba.

Observa-se que o trecho localizado a montante da área de confluência com o ribeirão Ferro Carvão apresentou valores de manganês total acima do limite legal, principalmente nas medições realizadas nos períodos chuvosos. Os maiores valores máximos foram registrados no ano de 2020, se comparados ao ano de 2019 e à série histórica do Igam.

Apesar do trecho localizado a montante também apresentar valores de manganês total acima do limite legal (0,1 mg/L), eles são muito inferiores aos registrados no trecho 1.

Gráfico 36 – Valores máximos mensais de manganês total, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho antes da foz com o ribeirão Ferro Carvão



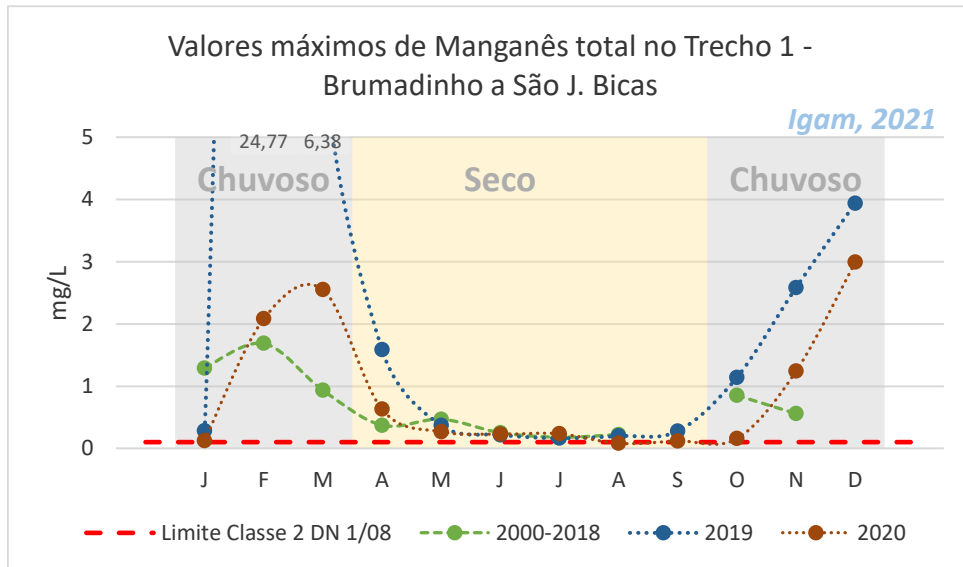
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Assim como ocorre com a turbidez e os sólidos em suspensão totais, os teores mais elevados de manganês total foram registrados no trecho 1, primeiros 40 km após a confluência com o ribeirão Ferro-Carvão (Gráfico 37), seguidos dos trechos 2 e 3 (Gráficos 38 e 39).

Nos trechos 1, 2 e 3, os maiores valores máximos foram observados em fevereiro de 2019, com resultados iguais a 24,77 mg/L, 10,31 mg/L e 3,91 mg/L, respectivamente. Valores que são superiores aos registrados na série histórica do Igam (2000-2018).

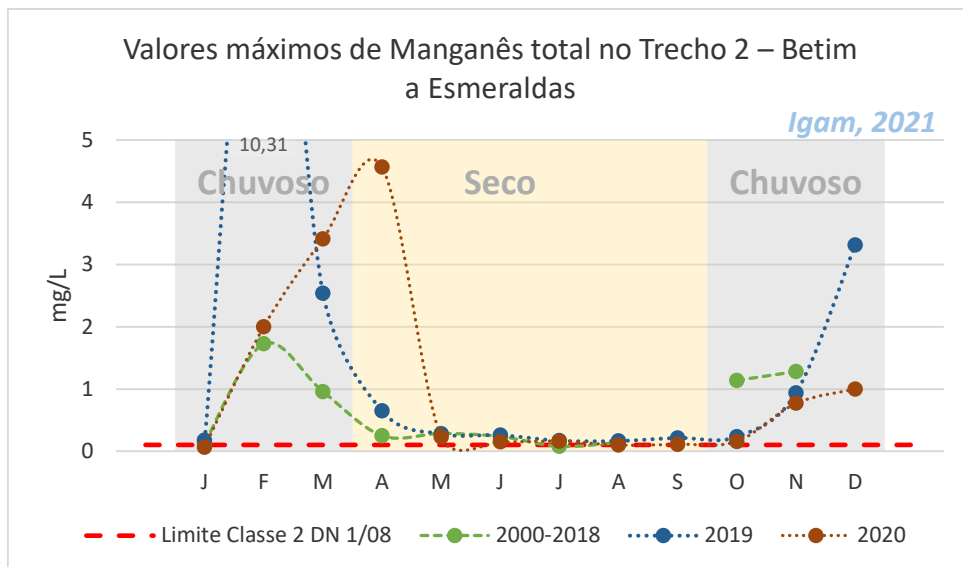
Nos períodos chuvosos, observa-se que há elevação dos valores de turbidez registrados, em todos os trechos. Estes resultados são esperados, tendo em vista que nesses períodos o aumento do escoamento superficial e da vazão do rio acarretam a remobilização do material depositado no leito do rio e nas margens, conforme mencionado anteriormente.

Gráfico 37 – Valores máximos mensais de manganês total, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São João de Bicas



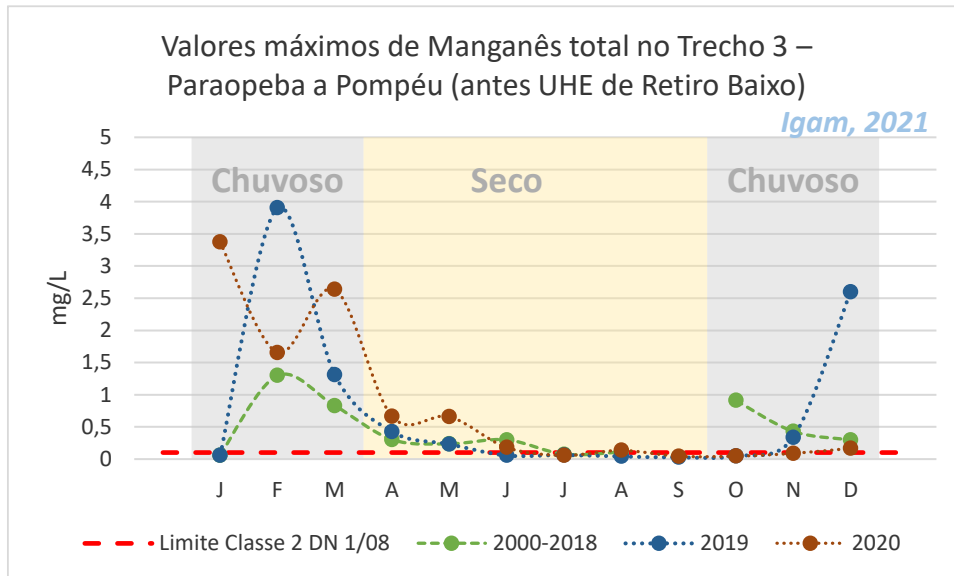
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 38 – Valores máximos de concentração de manganês total, por mês, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 2, entre os municípios de Betim e Esmeraldas



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

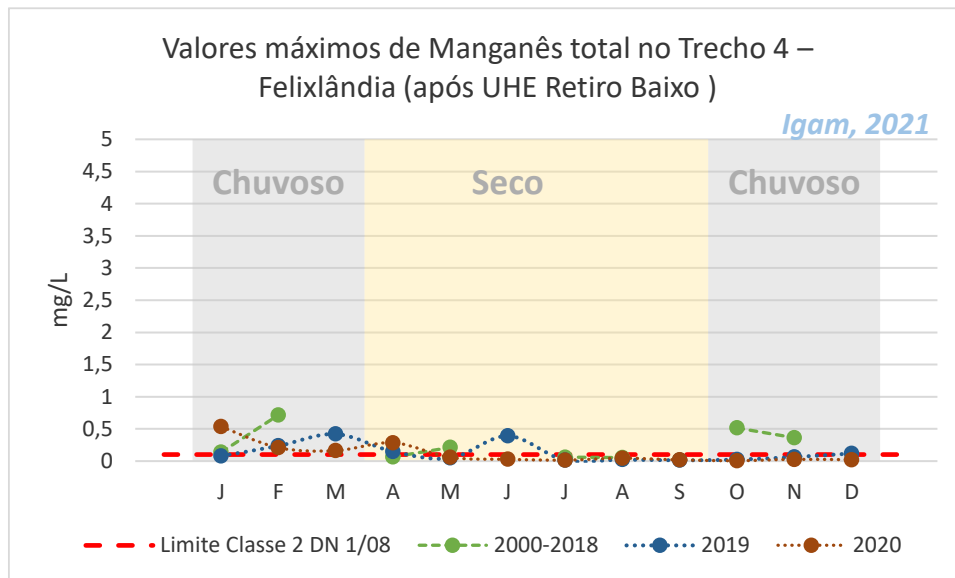
Gráfico 39 – Valores máximos de concentração de manganês total, por mês, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 3, entre os municípios de Paraopeba e Pompéu



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

No trecho a jusante da UHE Retiro Baixo (BP099) (Gráfico 40), o maior valor máximo de manganês total registrado foi de 0,716 mg/L, no mês de fevereiro, na série histórico do Igam. Esse trecho recebe influência direta do ribeirão dos Gomes, dessa forma a ocorrência dos picos de manganês total, principalmente nos períodos chuvosos, podem ser consequência dessa influência.

Gráfico 40 – Valores máximos de concentração de manganês total, por mês, no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, no trecho 4, no município de Felixlândia



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

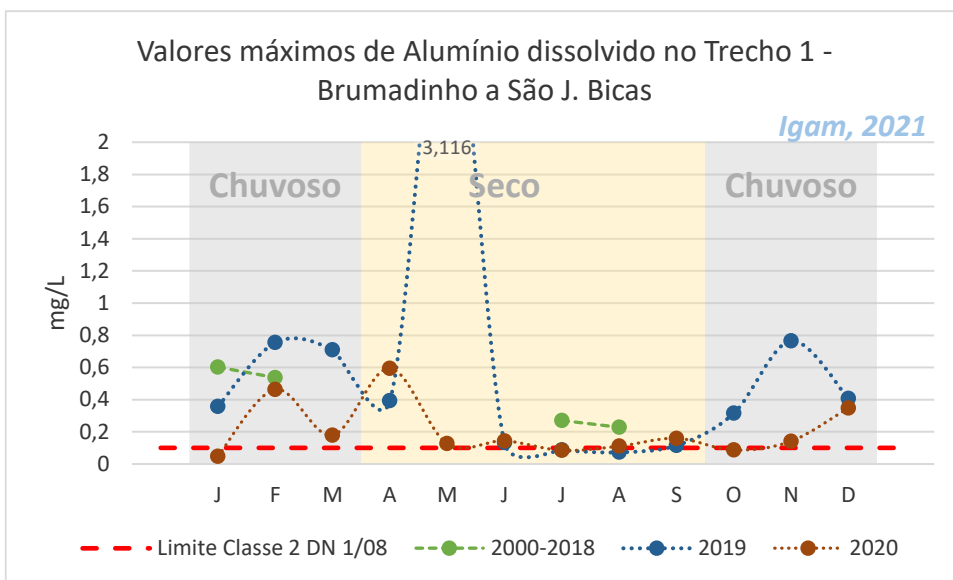
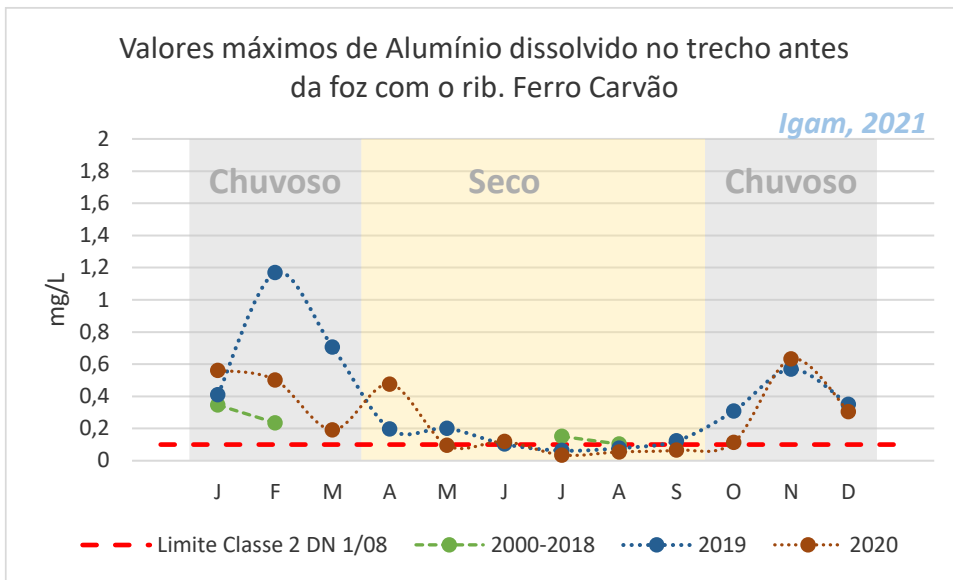
Alumínio dissolvido

Nos resultados de alumínio dissolvidos de 2019 e 2020, observa-se que para os trechos 1 a 4 (Brumadinho a Felixlândia), e para o trecho localizado a montante da foz com o ribeirão Ferro Carvão, os resultados superiores ao limite de classe 2 (0,1 mg/L) foram registrados durante o período chuvoso e no início do período seco. No período entre os meses de julho a setembro, considerado o mais seco, não foram registrados valores acima do limite de classe. Os valores mais elevados foram verificados entre janeiro a abril e no último trimestre do ano (outubro, novembro e dezembro). Em todos os trechos do rio Paraopeba, a comparação dos resultados obtidos em 2020 em relação ao ano anterior (2019), revela que houve uma redução nos valores de alumínio dissolvido, contudo, os resultados observados no primeiro trimestre do período chuvoso de 2020 ainda não atingiram a normalidade histórica.

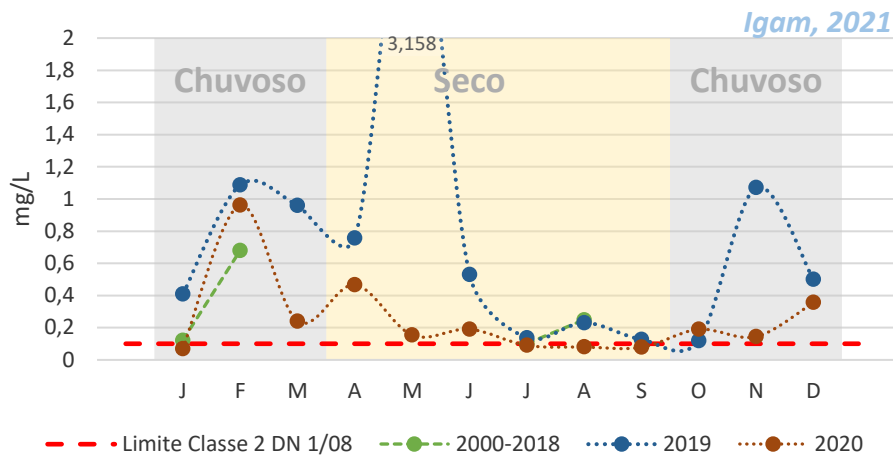
A presença natural do alumínio dissolvido no corpo d'água está relacionada ao carreamento do solo nos períodos chuvosos. Ressalta-se que as variações de alumínio dissolvido na bacia não foram correlacionadas diretamente com a presença do rejeito. O parâmetro alumínio dissolvido apresentou-se de forma inconsistente com o comportamento geral de ferro total e turbidez, ao

revés, com valores próximos do máximo histórico, justamente no trecho 1, primeiros 40 km a jusante da barragem, aumentando em todos os outros trechos ao longo da calha do rio Paraopeba, inclusive no trecho de montante.

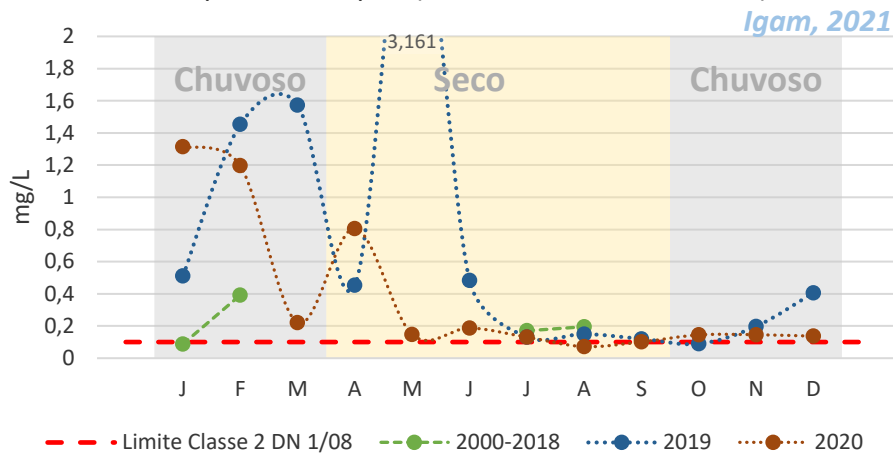
Gráficos 41 a 45 – Valores máximos mensais de alumínio dissolvido no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, para cada trecho da calha do rio Paraopeba

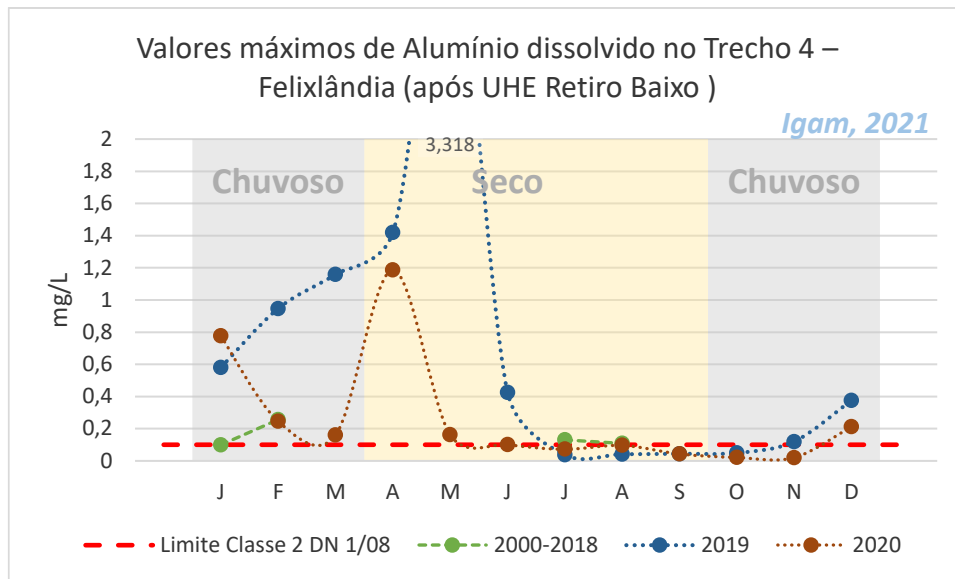


Valores máximos de Alumínio dissolvido no Trecho 2 –
Betim a Esmeraldas



Valores máximos de Alumínio dissolvido no Trecho 3 –
Paraopeba a Pompéu (antes UHE de Retiro Baixo)





Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Chumbo Total

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

Observa-se que em todo o trecho do rio Paraopeba monitorado (Brumadinho a Felixlândia incluindo o trecho a montante do desastre), os resultados superiores ao limite de Classe 2 (0,01 mg/L) foram registrados durante o período chuvoso, sendo mais recorrente nos meses de janeiro a março, período em que foram registrados os valores mais elevados. Em 2020, as ocorrências de chumbo total, acima do limite legal, se estenderam até o mês de abril de 2020 para os trechos 1 e 2, em função da presença de chuvas intensas na região no início do ano. Durante os meses de maio a outubro, não foram registrados valores acima do limite de classe.

A comparação dos resultados obtidos em 2020 em relação ao ano anterior (2019), indica redução nos valores de chumbo total no trecho 1, de Brumadinho a São Joaquim de Bicas, sendo este considerado o mais impactado. Os valores registrados em 2020 para esse trecho também

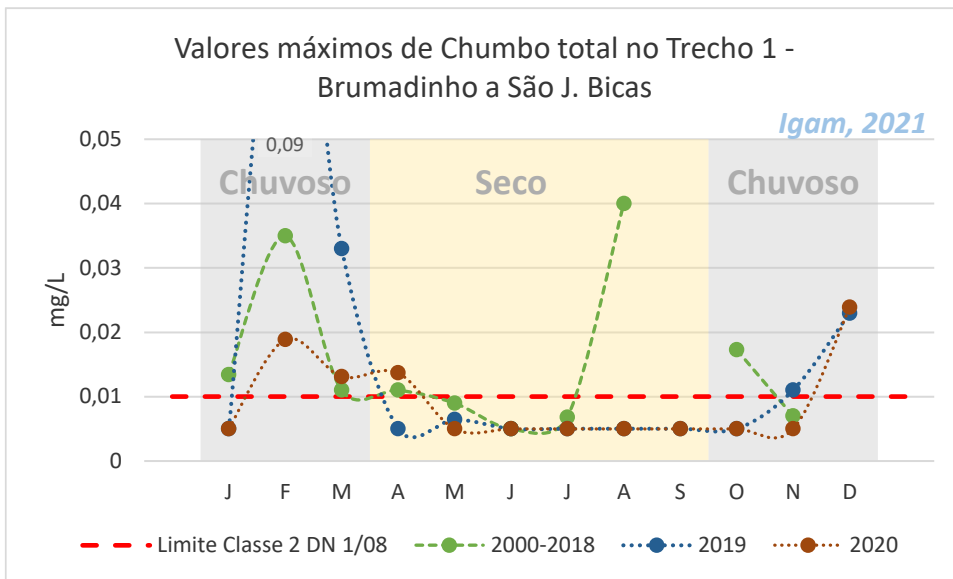
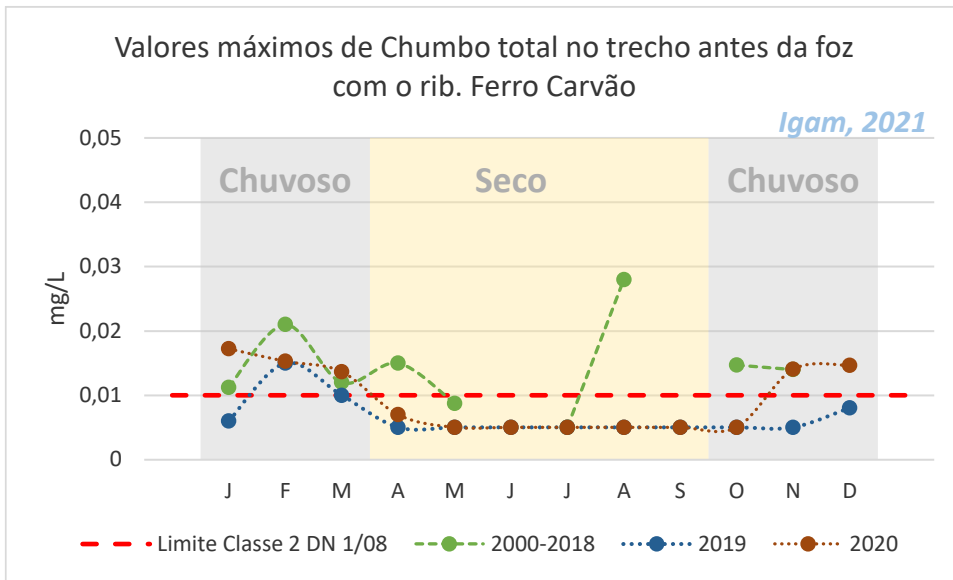
indicam proximidade com os valores máximos da série histórica, ficando próximos também, dos valores registrados no trecho de montante.

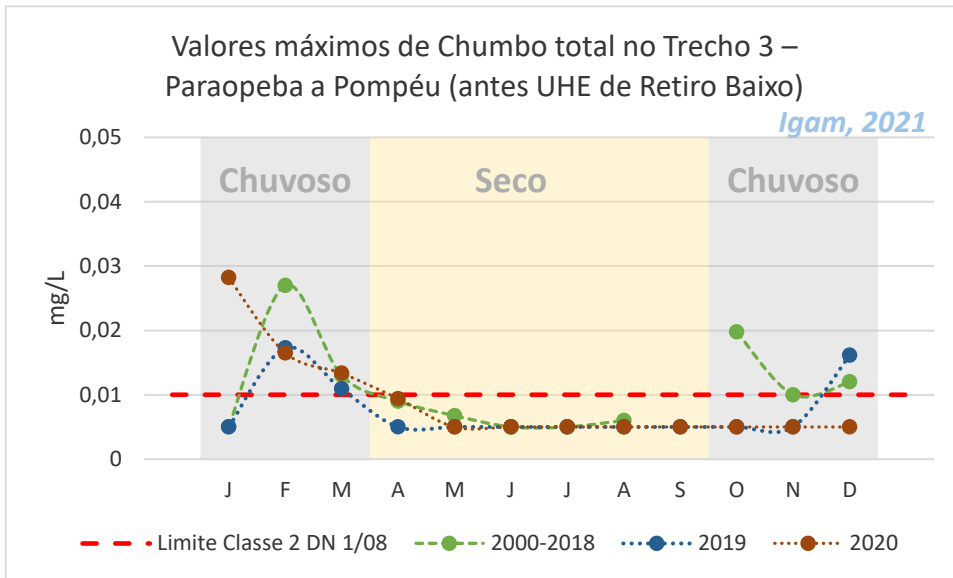
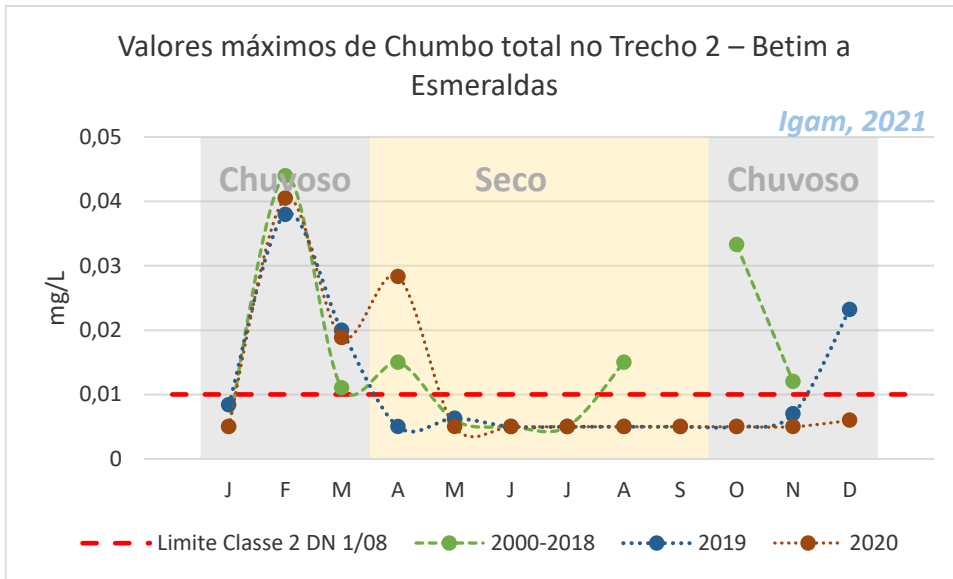
Para o trecho 2, entre Betim e Esmeraldas, não foi identificado variação significativa entre os resultados de 2019 e 2020, com exceção dos registros elevados de chumbo total em abril de 2020. Nos meses de fevereiro a abril de 2020, os valores de chumbo registrados no trecho 2 foram superiores aos observados no trecho 1 no mesmo período. Novamente, infere-se que o intenso período chuvoso de 2020 tenha contribuído para o aumento das concentrações de chumbo, principalmente no ponto localizado a montante da antiga captação de Pará de Minas (113 km da foz do ribeirão Ferro Carvão). Os valores de chumbo total registrados em 2020, para esse trecho, também indicaram proximidade com os valores máximos da série histórica.

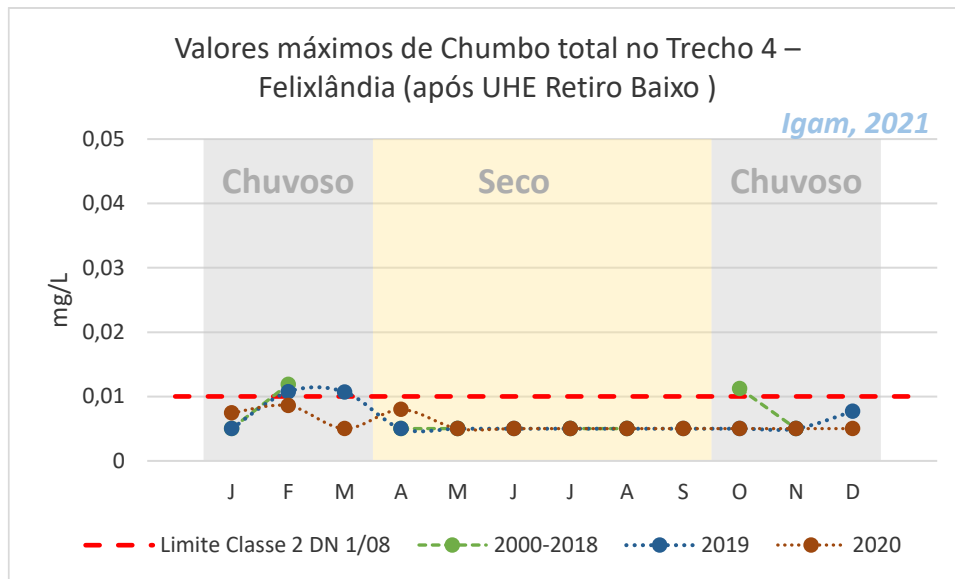
No trecho 3, entre as cidades de Paraopeba e Pompéu, os valores de chumbo total são inferiores aos registrados no trecho 2. Também não há variação significativa entre os resultados de 2019 e 2020 registrados nesse trecho, contudo, os valores de chumbo total registrados entre janeiro e abril de 2020 estiveram mais elevados que em 2019 para o mesmo período. A exceção de janeiro de 2020, nenhum outro resultado, no trecho 3, esteve em concentração superior ao máximo da série histórica

No trecho 4, a jusante da UHE Retiro Baixo, em Felixlândia, não foi identificado violação do limite de Classe 2 para chumbo total (0,01 mg/L) nas amostras coletadas em todo o monitoramento do ano de 2020. Os resultados registrados em 2019 e 2020 estiveram em concentração inferior ao máximo da série histórica.

Gráficos 46 a 50 – valores máximos mensais de chumbo total no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, para cada trecho da calha do rio Paraopeba







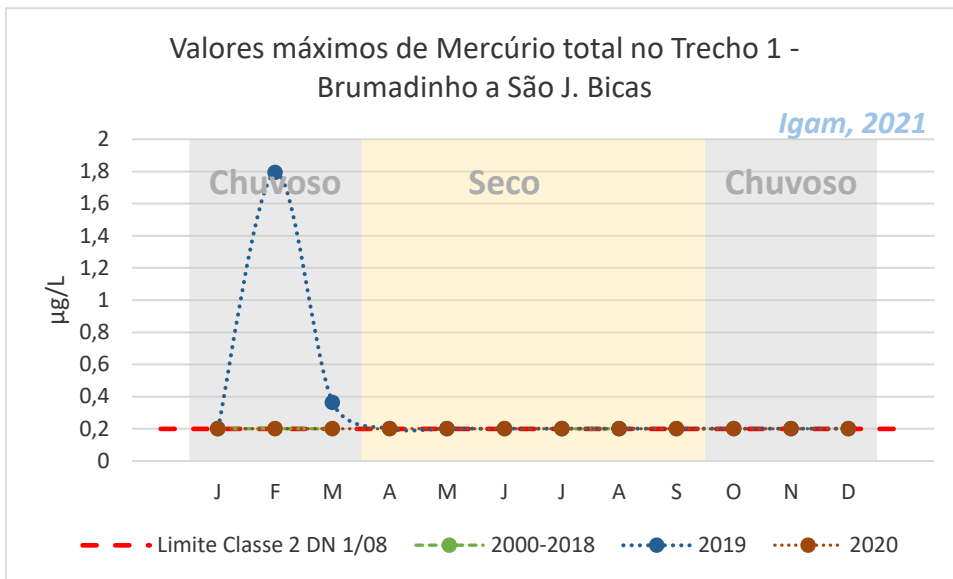
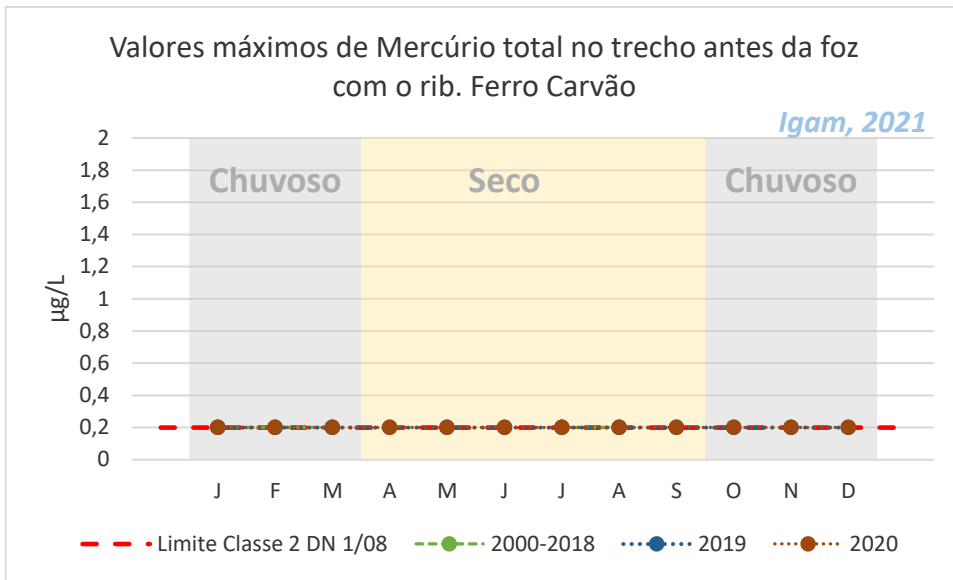
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

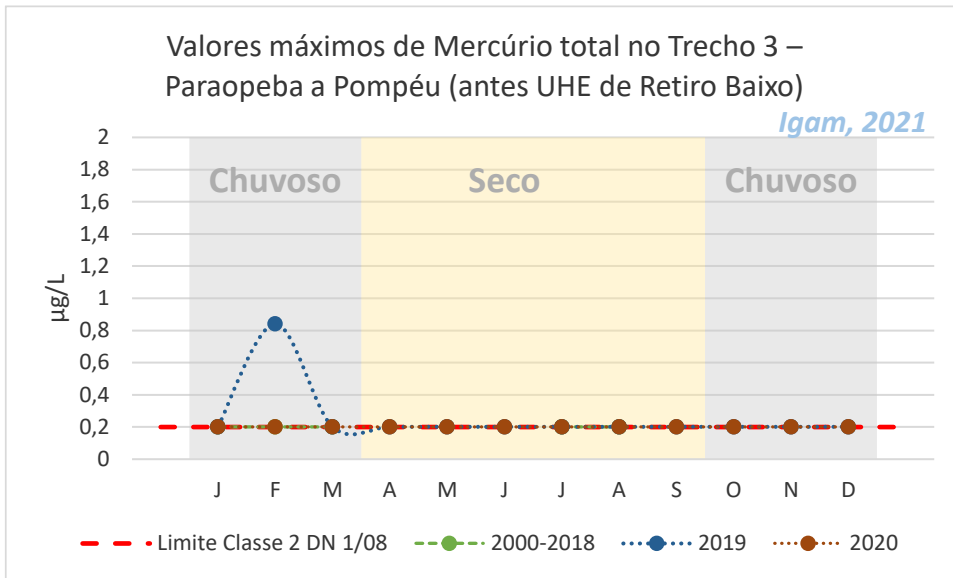
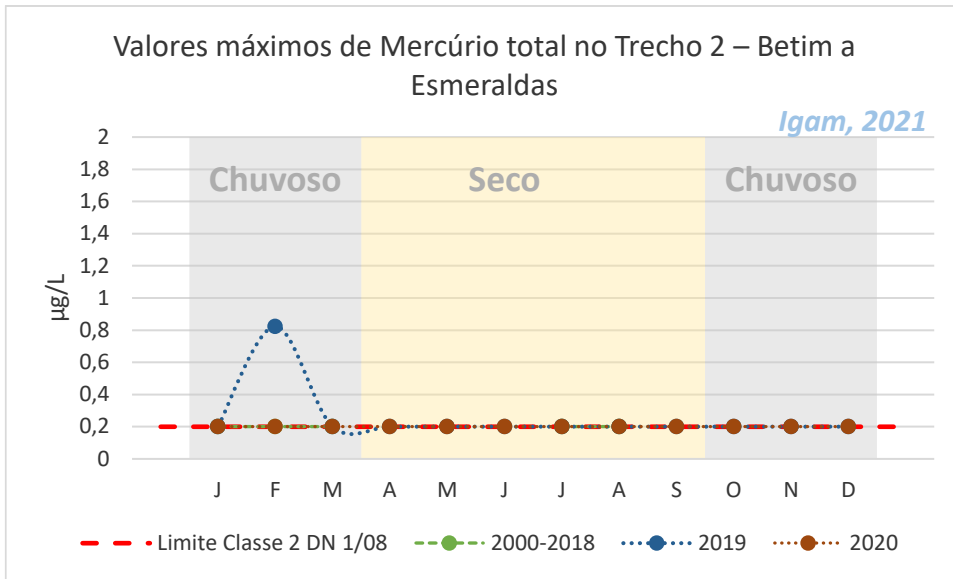
Mercurio Total

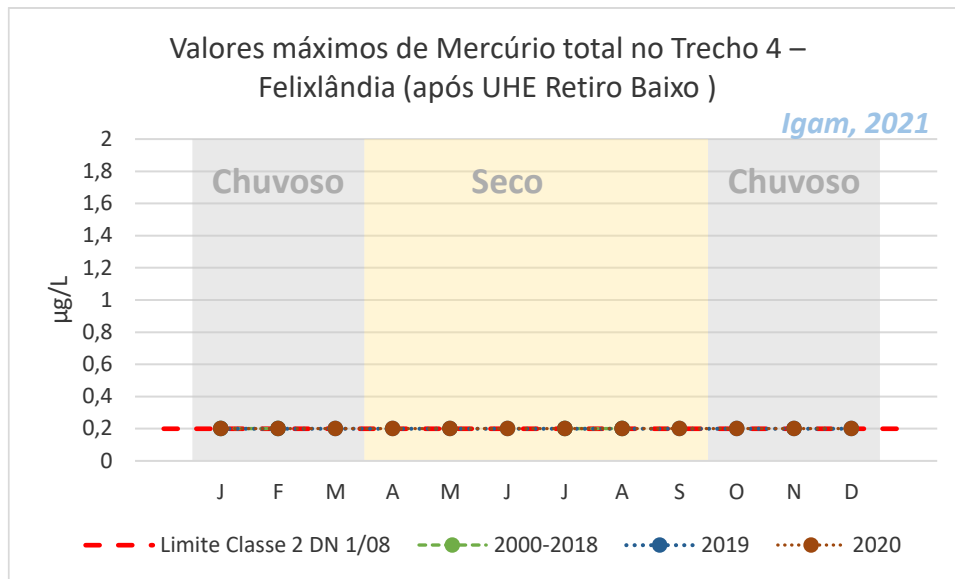
O mercúrio total, que não tinha sido detectado historicamente na bacia do Rio Paraopeba, passou a ser identificado em valores acima do permitido pela legislação, logo após o rompimento da barragem. Assim como ocorre com o chumbo, a disponibilização do mercúrio para o corpo d'água não têm relação direta com o rejeito da barragem 1, uma vez que não faz parte da composição do rejeito. Contudo, a presença do mercúrio em água está associada ao arraste de materiais que se misturaram à lama durante a passagem da frente de rejeito, o que propiciou um aumento nas concentrações desse contaminante no período pós-desastre.

Observa-se que as violações de mercúrio total (valores acima de 0,2 µg/L) foram registrados apenas nos três primeiros meses de 2019 nos trechos 1 a 3, sendo o primeiro trecho (entre Brumadinho a São Joaquim de Bicas) o que apresentou valores mais elevados de mercúrio. Nos resultados obtidos nos trechos 2 e 3, os valores de mercúrio total, em desconformidade ao limite de classe, foram registrados somente no mês de fevereiro e em níveis inferiores aos registrados no trecho 1. Em 2020 não houve registros de mercúrio total na calha do rio Paraopeba (todos os resultados estiveram abaixo do limite do método analítico - 0,2 µg/L).

Gráficos 51 a 55 – Valores máximos mensais de mercúrio total no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, para cada trecho da calha do rio Paraopeba





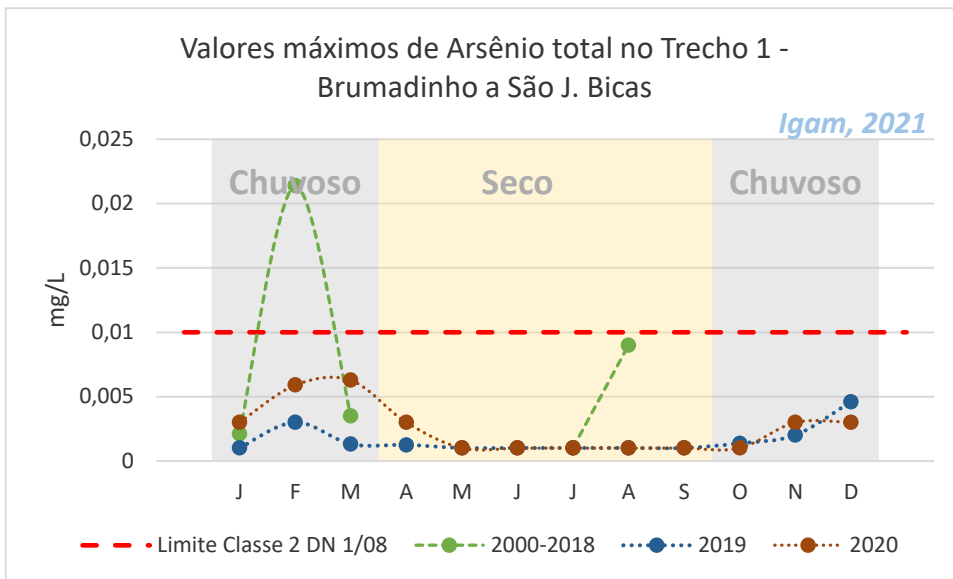
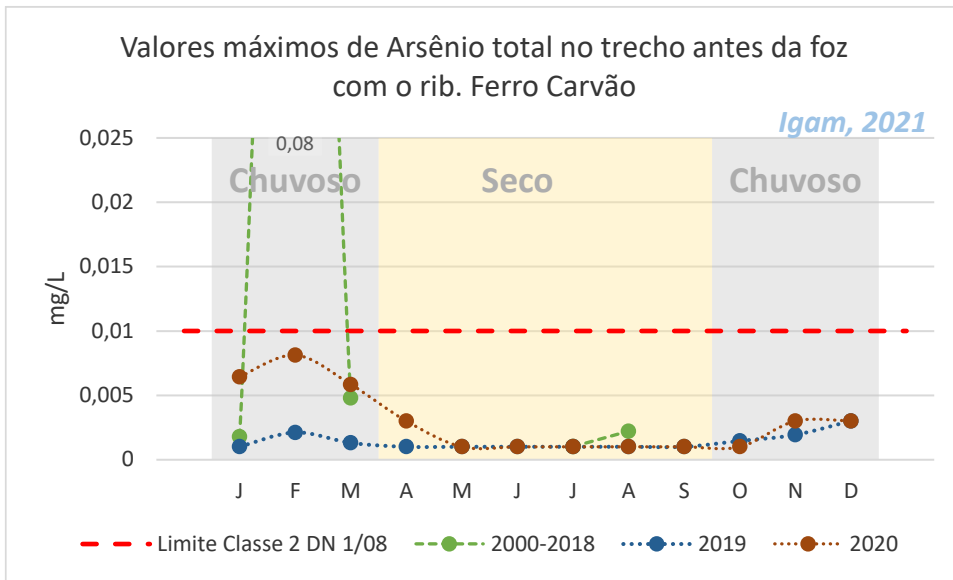


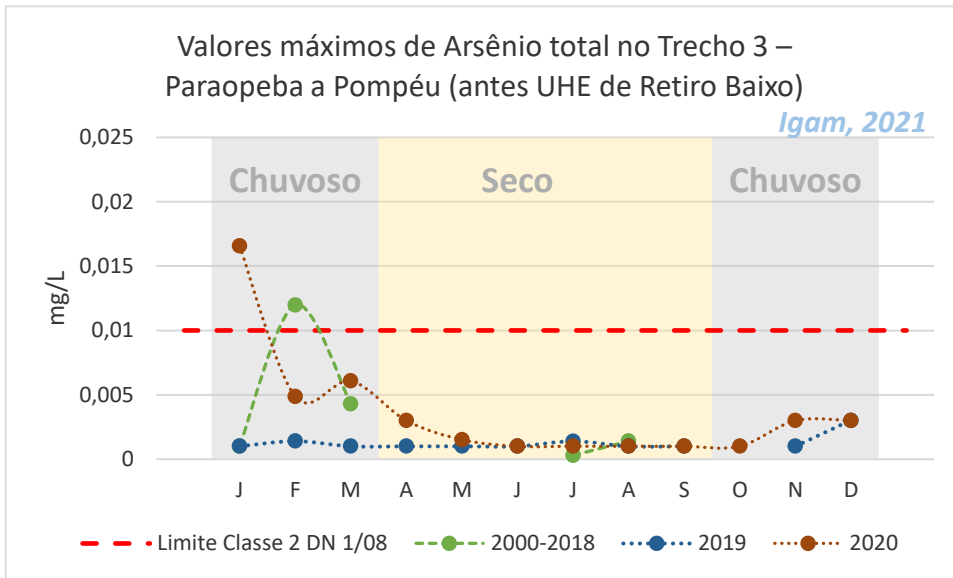
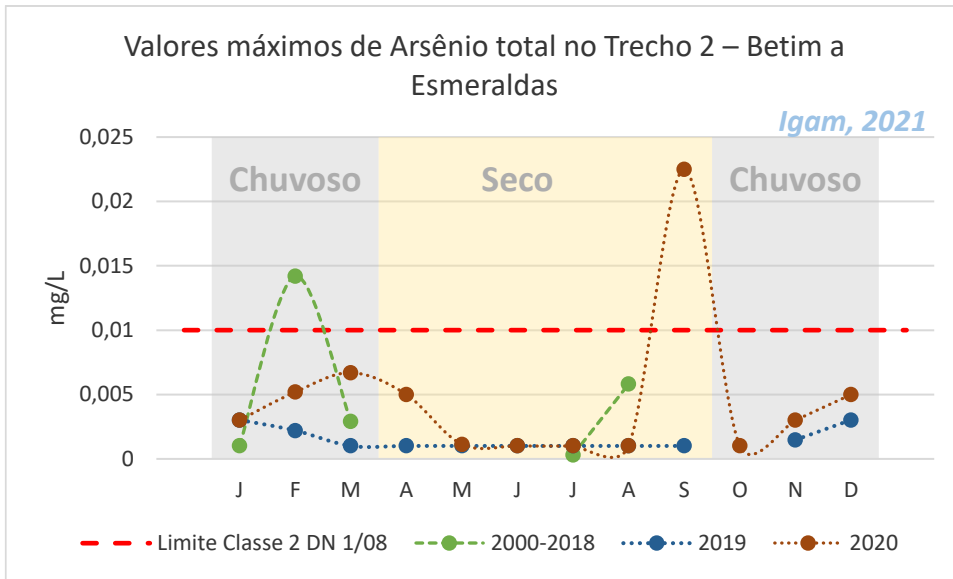
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

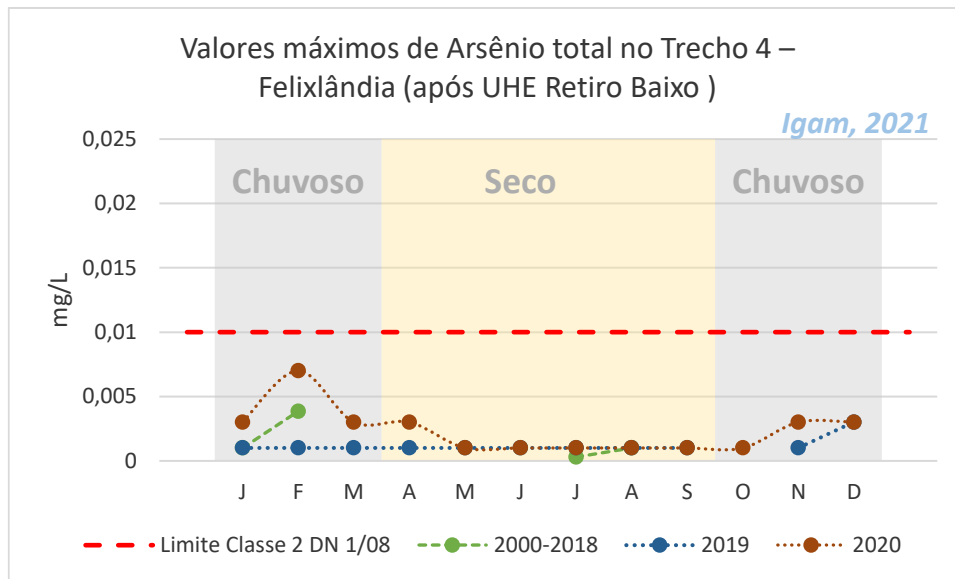
Arsênio total

No que se refere aos resultados de arsênio total, não foram registradas violações ao limite de classe 2 (0,01 mg/L), durante o ano de 2019. Em 2020, valores de arsênio total acima do limite legal foram registrados nos meses de janeiro, no trecho 3, entre as cidades de Paraopeba e Pompéu, e em setembro, no trecho 2, entre as cidades de Betim e Esmeraldas. A ocorrência do arsênio no rio Paraopeba não tem relação direta com o rejeito proveniente da barragem 1, uma vez que não faz parte da sua composição. Além disso, os valores máximos da série histórica do Igam para cada trecho indicam que, mesmo antes do rompimento da barragem, o arsênio já havia sido detectado em concentrações acima do limite estabelecido para a classe de enquadramento, inclusive na estação de amostragem localizada antes da confluência com o ribeirão Ferro Carvão. A presença do arsênio na coluna d'água pode estar relacionada com outras atividades antrópicas.

Gráficos 56 a 60 – Valores máximos mensais de arsênio total no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, para cada trecho da calha do rio Paraopeba





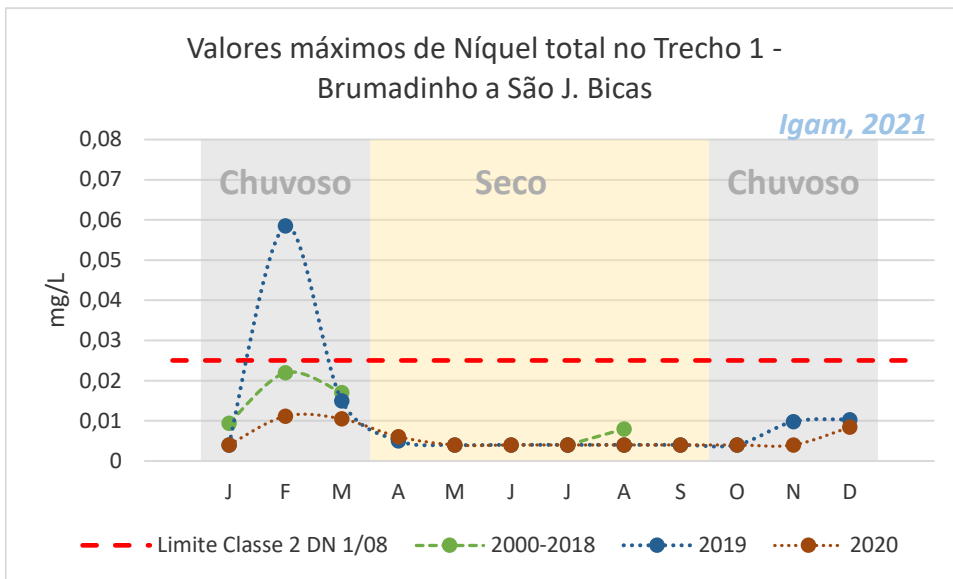
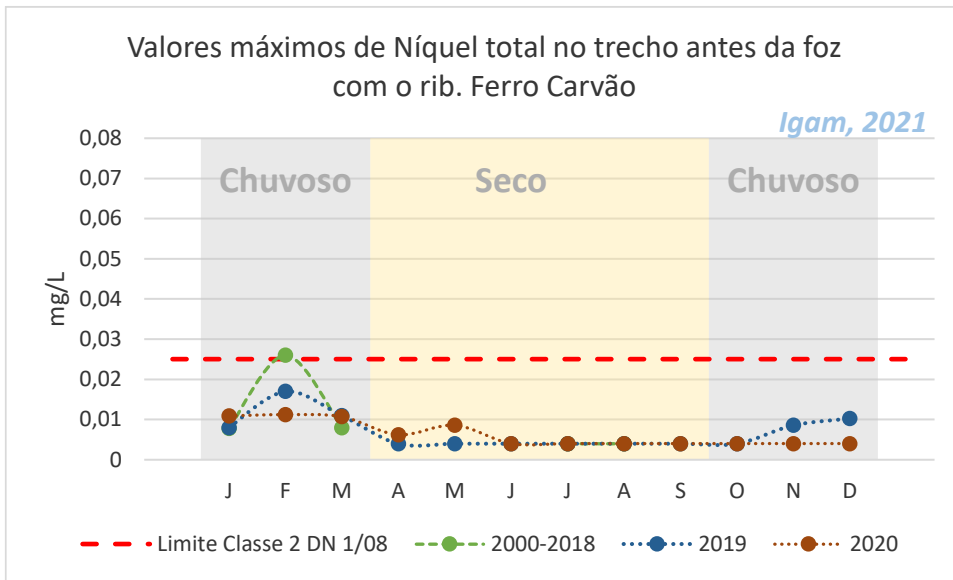


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

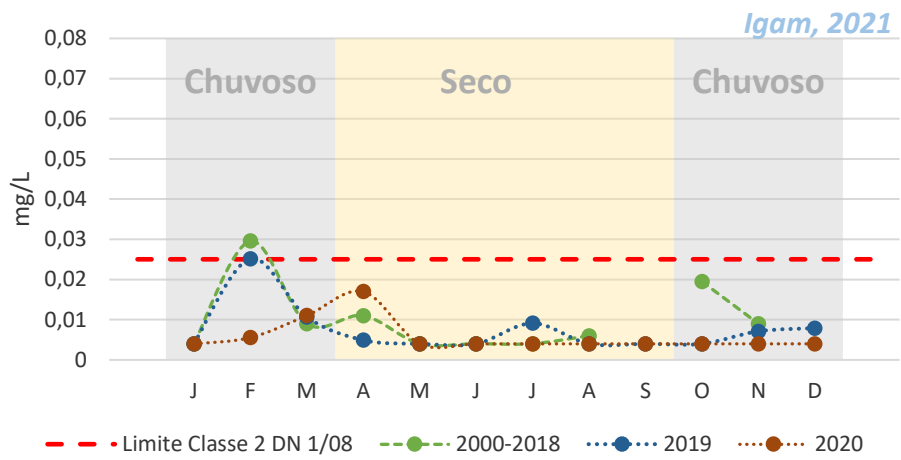
Níquel total

Com relação ao parâmetro níquel total, foram registradas violações ao limite de classe 2 (0,025 mg/L) no primeiro trimestre de 2019. Essas violações ocorreram no trecho 1, de Brumadinho a São Joaquim de Bicas, e atingiram valores superiores aos máximos registrados para a série histórica. Para os trechos de 2 a 4 (Betim a Felixlândia) e o trecho a montante do desastre, não foram observados valores de níquel total acima do limite legal, estando os resultados próximos ou abaixo do máximo histórico. Em 2020, o níquel total, que não era mais detectado desde o mês de fevereiro de 2019, na medição realizada em janeiro, registrou valores acima do limite legal no trecho 3, entre os municípios de Betim e Paraopeba. Ressalta-se que o intenso período chuvoso no primeiro trimestre de 2020, tenha contribuído para o aumento das concentrações de níquel. Para os demais trechos não foram registrados resultados de níquel total acima do limite legal em 2020.

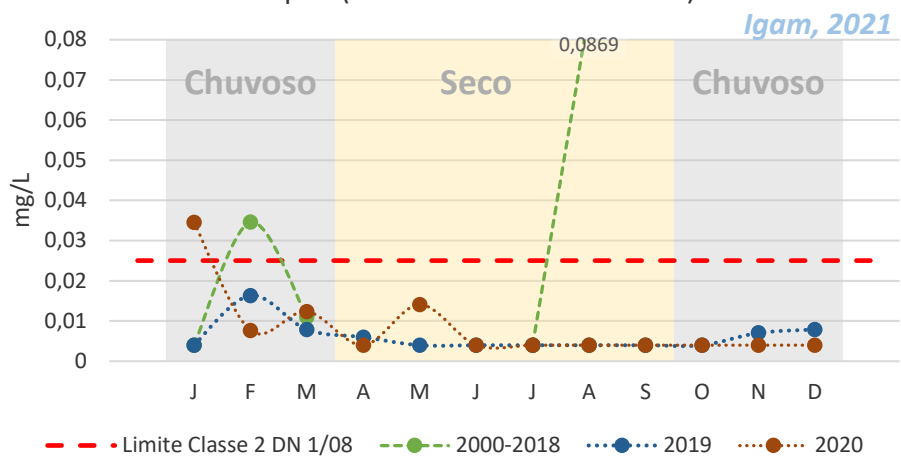
Gráficos 61 a 65 – Valores máximos mensais de níquel total no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, para cada trecho da calha do rio Paraopeba

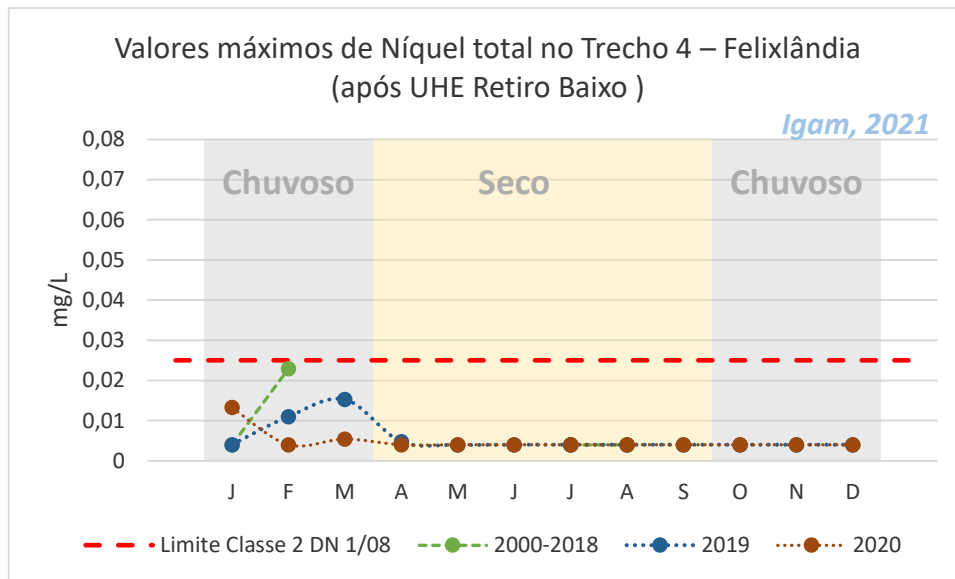


Valores máximos de Níquel total no Trecho 2 – Betim a Esmeraldas



Valores máximos de Níquel total no Trecho 3 – Paraopeba a Pompéu (antes UHE de Retiro Baixo)



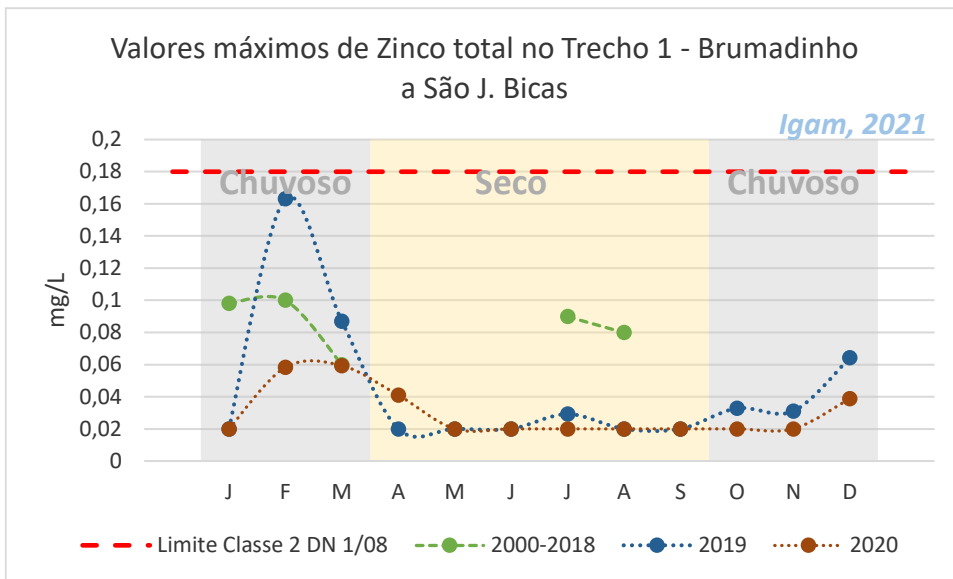
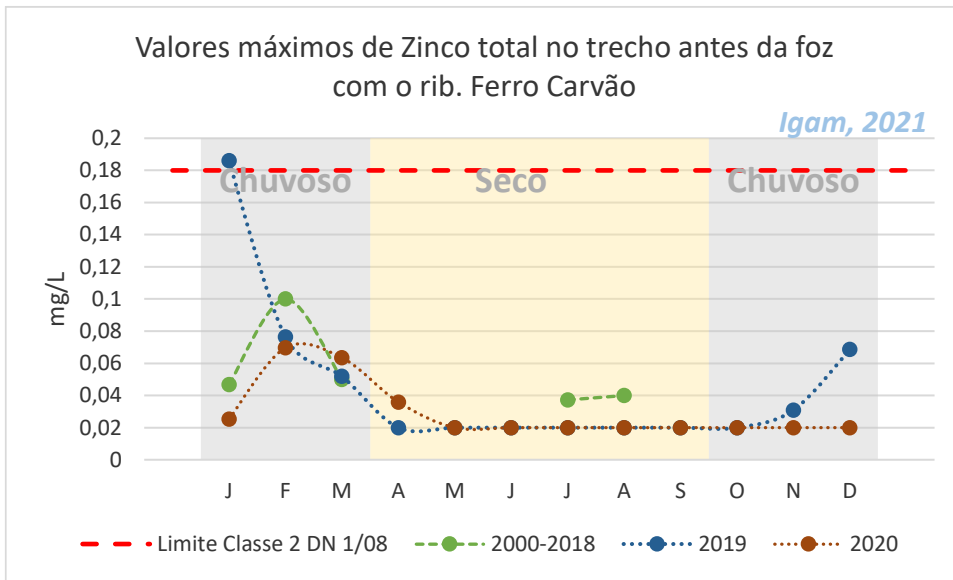


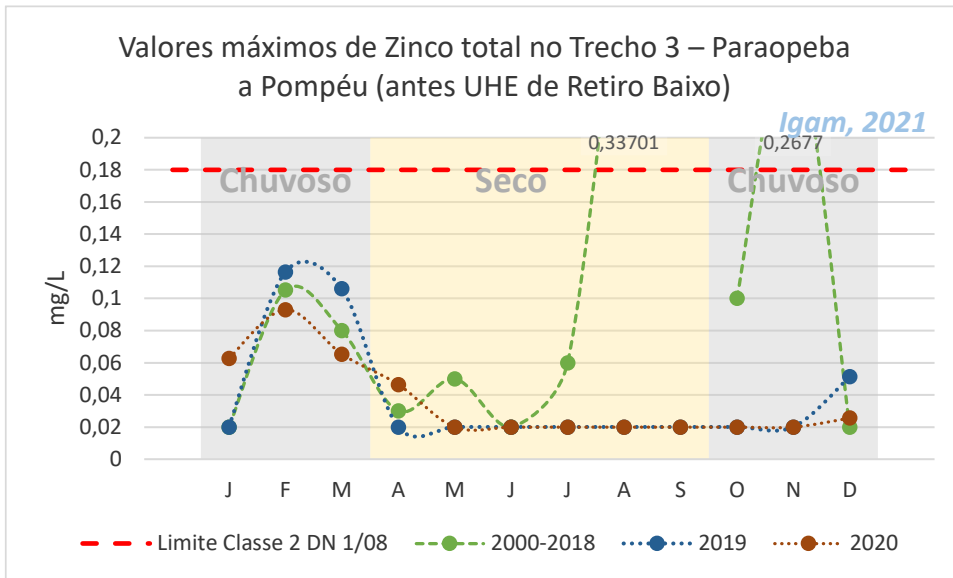
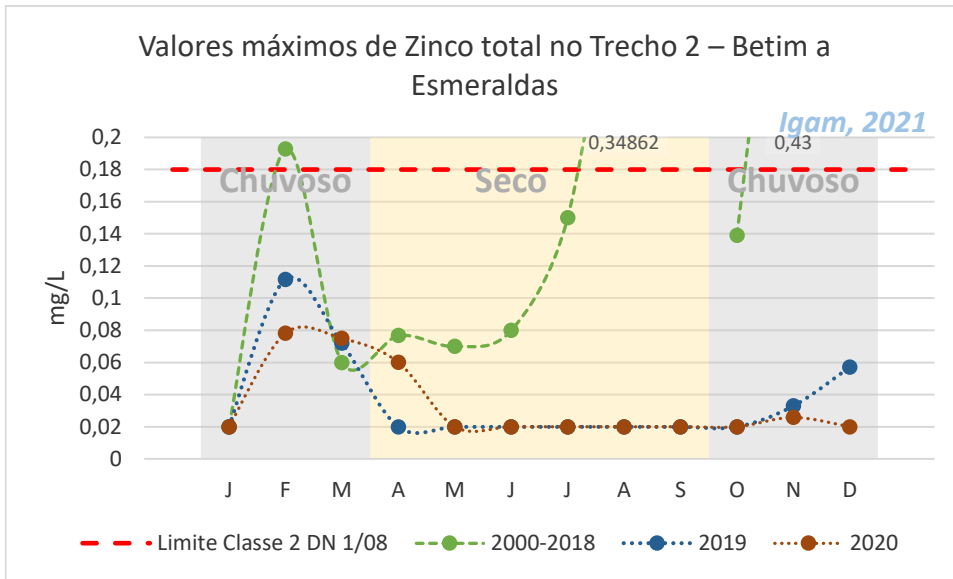
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

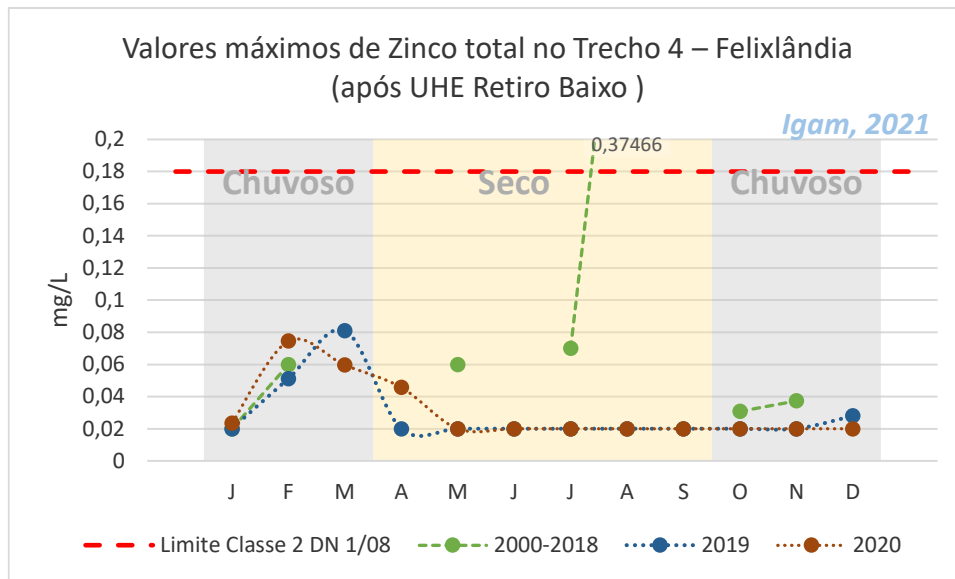
Zinco total

Para o zinco total observa-se que os registros acima do limite de detecção do método analítico (0,02 mg/L) ocorreram durante o período chuvoso, principalmente entre os meses de janeiro e março. Contudo, no mês de janeiro de 2019, no trecho a montante do desastre, foi registrada violação ao limite de classe 2 (0,18 mg/L), tendo atingido valor superior ao máximo da série histórica nesse trecho. Para os demais trechos da calha do rio Paraopeba não foram identificados valores de zinco total em desconformidade com o limite legal. Em 2019, observa-se que os valores de zinco total registrados foram superiores aos de 2020, no entanto todos os resultados indicam proximidade ou estão abaixo dos valores máximos da série histórica (2000-2018).

Gráficos 66 a 70 – Valores máximos mensais de zinco total no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, para cada trecho da calha do rio Paraopeba





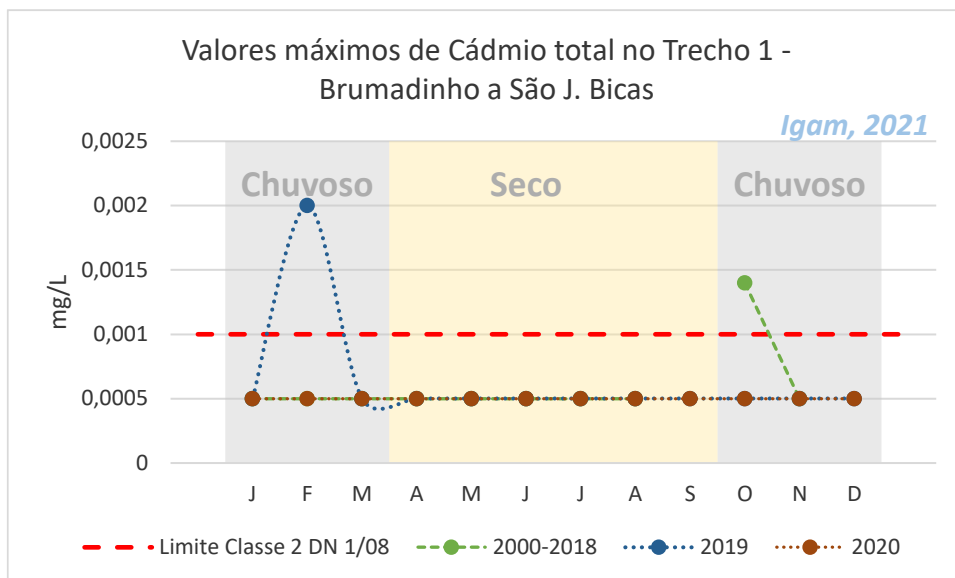
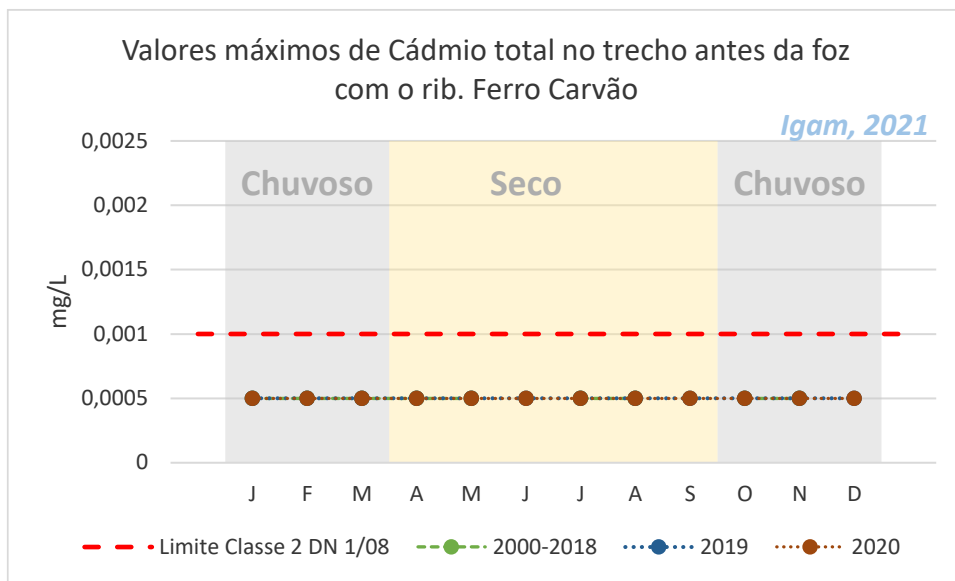


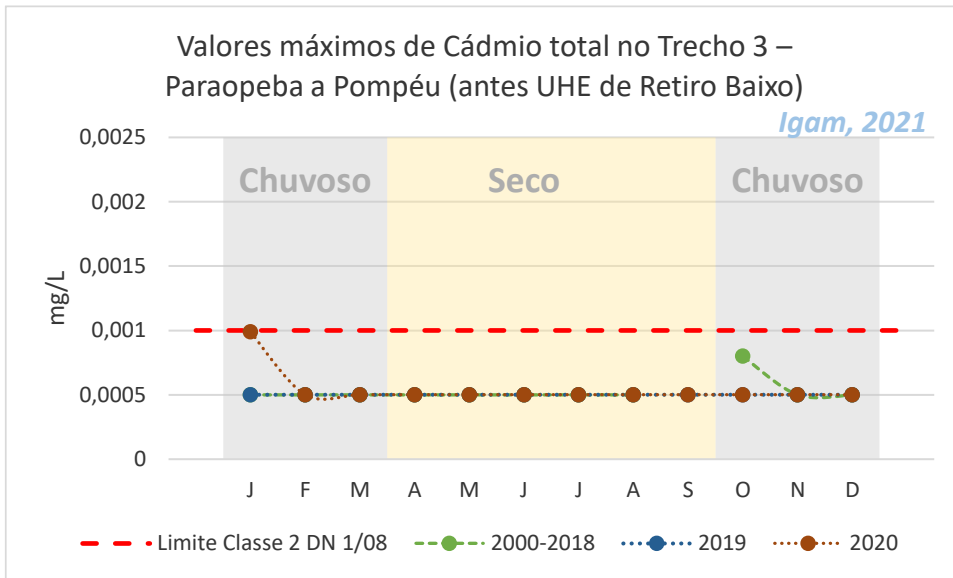
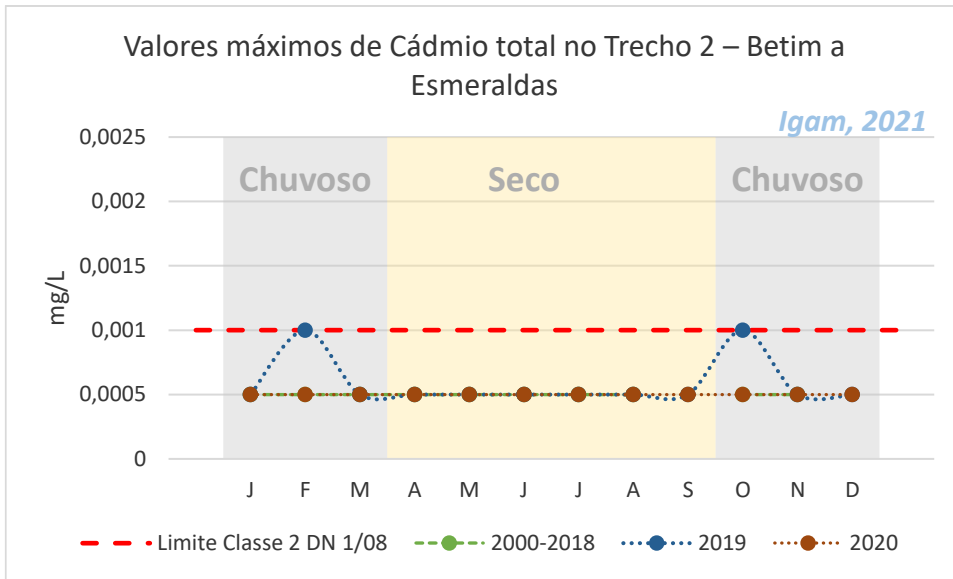
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

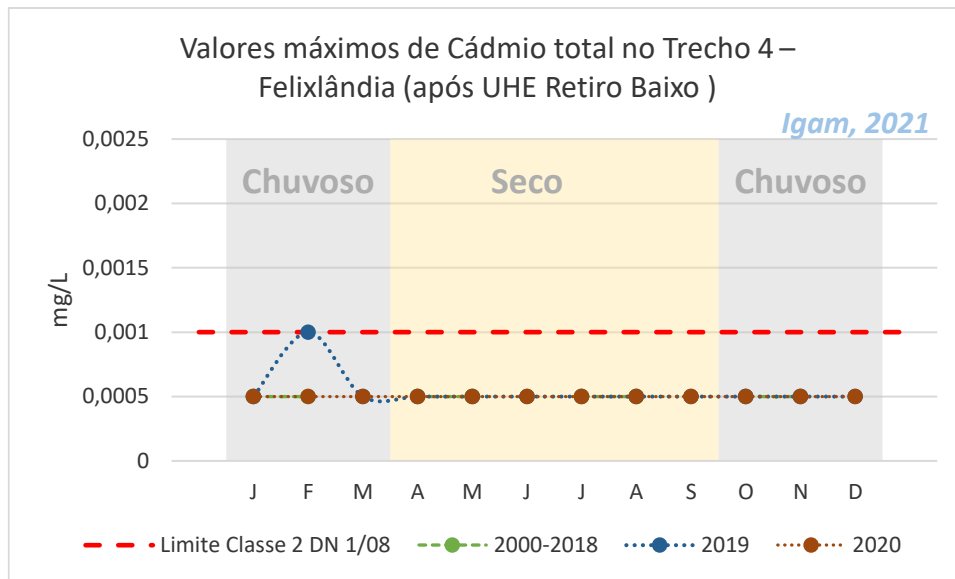
Cádmio total

Para os resultados de cádmio total, observa-se que as violações ao limite de classe 2 (0,001 mg/L) ocorreram no início de 2019 (fevereiro), no trecho 1, entre os municípios de Brumadinho e São Joaquim de Bicas. Nos trechos 2 e 4 foi identificada a presença de cádmio próximo ao limite legal. Em 2020, houve apenas um registro de cádmio abaixo do limite de classe no trecho 3 (entre Paraopeba e Pompéu) e, assim como registrado em 2019, todos os demais resultados de cádmio estiveram abaixo do limite de quantificação do método de análise.

Gráficos 71 a 75 – Valores máximos mensais de cádmio total no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, para cada trecho da calha do rio Paraopeba







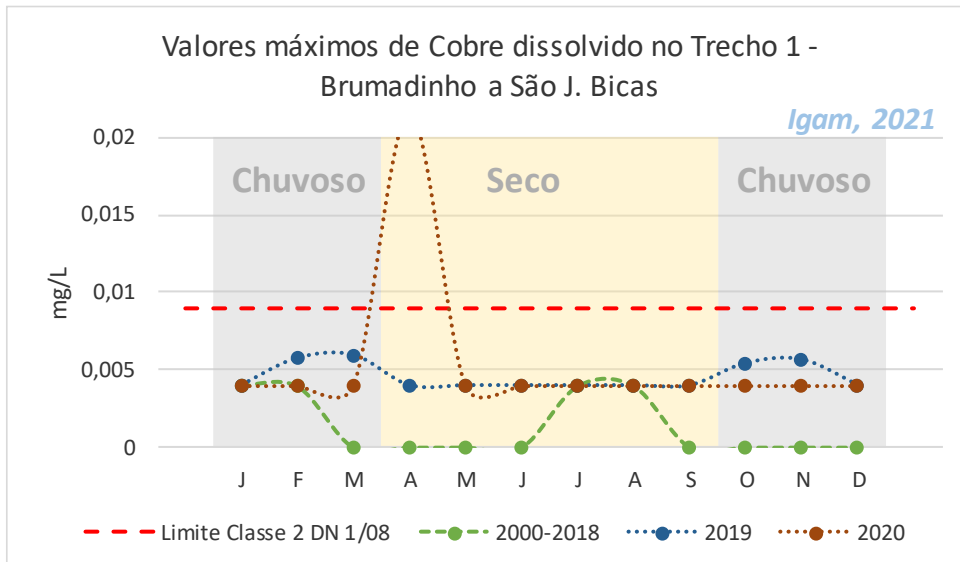
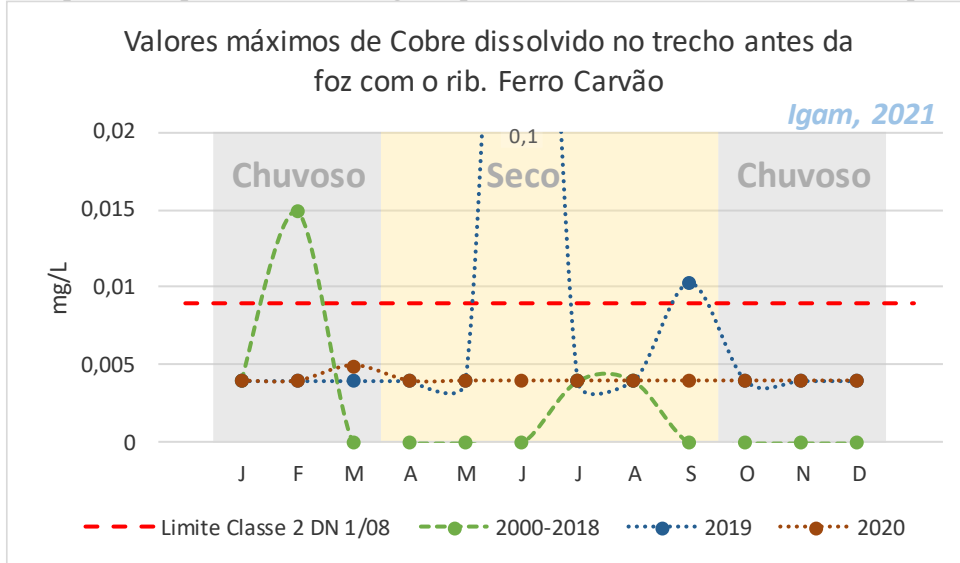
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

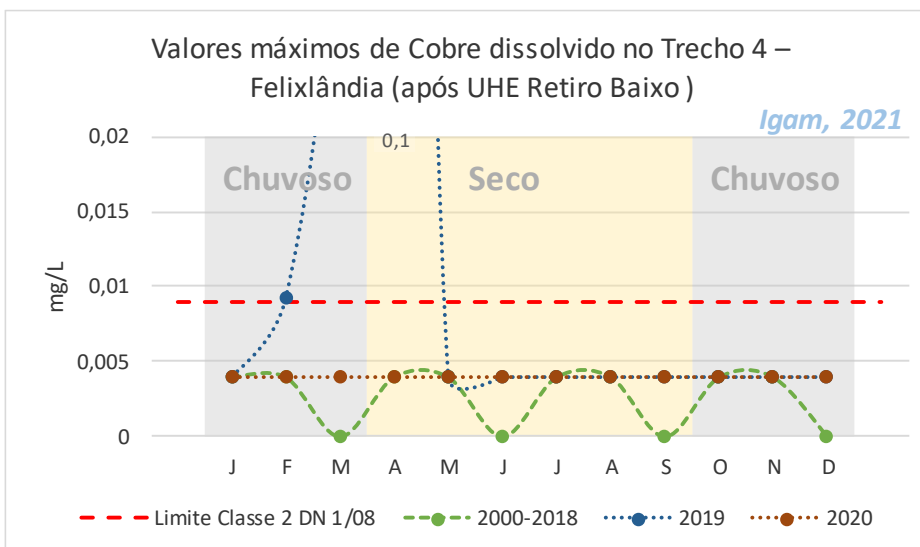
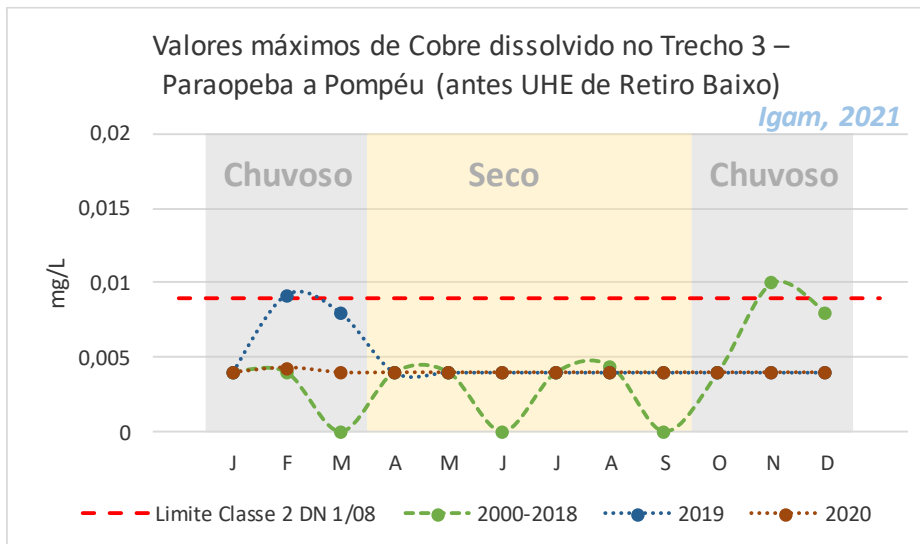
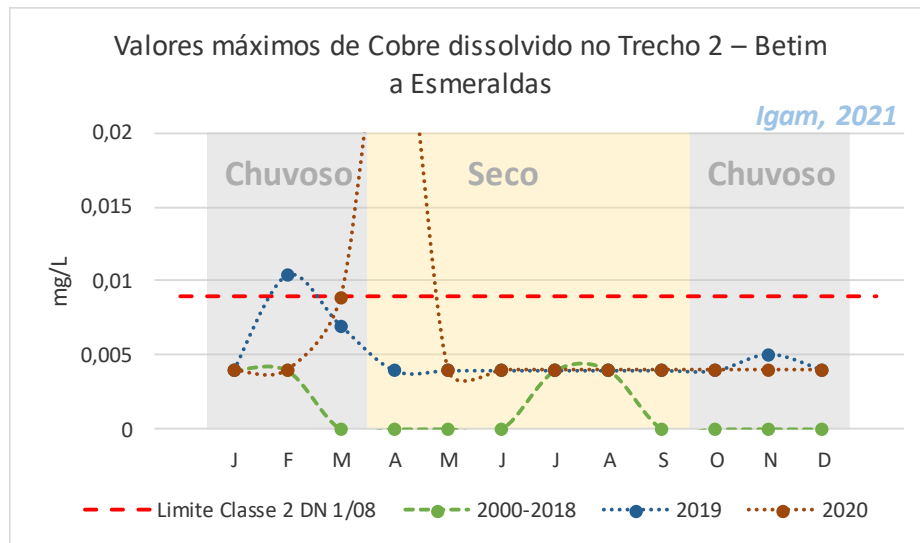
Cobre dissolvido

Observa-se que no ano de 2019, as violações de cobre dissolvido ao limite de classe 2 (0,009 mg/L) ocorreram nos meses de fevereiro, março, abril e setembro entre os trechos 2 a 4 (Betim a Felixlândia), bem como no trecho não impactado (antes da foz com o ribeirão Ferro Carvão). Em 2020, as violações de cobre dissolvido ocorreram no mês de abril, nos trechos 1 e 2, entre os municípios de Brumadinho e Esmeraldas. Todos os demais registros de cobre dissolvido estiveram abaixo do limite de classe 2 (0,009 mg/L) ou abaixo do limite de quantificação do método de análise (0,004 mg/L). Ressalta-se que o trecho 1 (Brumadinho a São Joaquim de Bicas), considerado como mais impactado, não sofreu variações significativas nos valores de cobre dissolvido que pudessem estar relacionados diretamente com o rejeito proveniente do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, visto que o cobre não faz parte da composição do rejeito.

Os valores máximos da série histórica do Igam indicam que a presença do cobre na bacia do rio Paraopeba é anterior ao rompimento da barragem. O cobre já havia sido detectado em concentrações acima do limite estabelecido para a classe de enquadramento, inclusive na estação de amostragem localizada a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão. 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.

Gráficos 76 a 80 – Valores máximos mensais de cobre dissolvido total no período pré-rompimento e nos dois anos após o rompimento das barragens, para cada trecho da calha do rio Paraopeba





Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Para os demais metais avaliados: bário total, boro total, cromo total, selênio total, vanádio total, além dos parâmetros cianeto livre, fenóis totais, nitrato, nitrito e nitrogênio amoniacal não foram registradas violações do limite de classe, segundo a Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH n° 1 de 2008, de Minas Gerais.

7 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE ÁGUAS SUPERFICIAIS, DE JANEIRO A DEZEMBRO DE 2020, NA REPRESA DE TRÊS MARIAS (TRECHO 5)

A usina hidrelétrica de Três Marias, construída entre 1957 e 1960, começou a operar em 1962, tendo como principais objetivos: a produção de energia elétrica, a regulação do Rio São Francisco para solucionar os problemas de transbordamento anual, melhorar a navegação e impulsionar a indústria e a agricultura da região. Atualmente, a presença do reservatório tem influência direta no desenvolvimento de alguns municípios, como Três Marias, São Gonçalo do Abaeté, Morada Nova de Minas, Felixlândia e Corinto. A área de influência do reservatório é amplamente utilizada para a agricultura, pastagem, silvicultura, pesca, piscicultura, navegação e turismo (PRADO; POMPEU, 2014). Por ser uma área de grande importância ambiental e econômica, o recente rompimento da barragem do córrego do Feijão trouxe bastante preocupação por ter sido um evento de risco ambiental considerável ao rio Paraopeba, um dos principais afluentes do reservatório de Três Marias, e que pode ser afetado direta ou indiretamente pelo desastre.

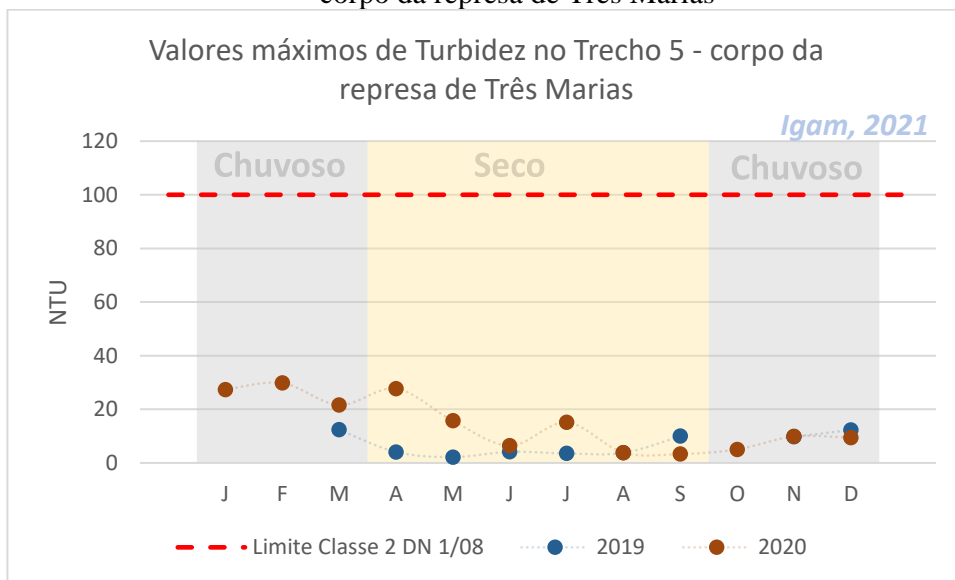
Visando avaliar o possível impacto do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão na qualidade da água na represa de Três Marias (Trecho 05), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) vem realizando monitoramento constante nos pontos BPE6, BPE7, BPE8. A seguir é apresentada uma análise dos resultados obtidos entre março de 2019 a dezembro de 2020.

Turbidez

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

Este parâmetro tem se mostrado um dos principais indicativos da presença do impacto causado pelo rompimento da barragem ao longo do rio Paraopeba. A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 100 NTU para turbidez em águas de Classe 2. No período monitorado, a turbidez se encontrou abaixo do estabelecido pela norma, como demonstrado na Gráfico 81. No entanto, pode-se observar que os valores de turbidez compreendido entre janeiro a maio de 2020 e no mês de julho de 2020 foram superiores aos encontrados no mesmo período de 2019. Vale ressaltar que, a partir do mês de agosto de 2020, a turbidez retorna aos padrões encontrados em 2019, e que as concentrações encontradas no período monitorado não interferem na dinâmica do ecossistema e nas atividades econômicas da região, uma vez que estão bem abaixo do limite permitido.

Gráfico 81 – Valores máximos de turbidez no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Sólidos em suspensão

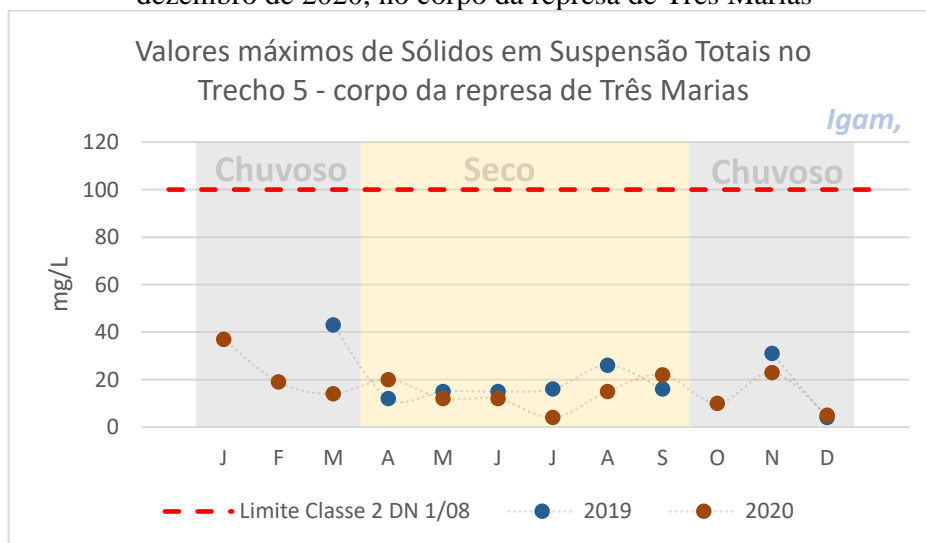
Os resíduos sólidos podem afetar as características físicas e químicas da água ou advertir para a qualidade dos efluentes em determinados locais. Entre os resíduos mais importantes estão o material em suspensão, que é constituído de pequenas partículas que se encontram suspensas na água, as quais têm uma fração mineral ou inorgânica e outra orgânica. As altas concentrações de material em suspensão limitam a qualidade da água bruta, por estarem relacionadas com a turbidez, a salinidade e a dureza da água (ABU SHMEIS, 2018). Causam ainda, danos à flora

e fauna aquáticas, e como diminui a penetração de luz na água, prejudica a fotossíntese do fitoplâncton e da vegetação submersa de macrófitas. Favorece ainda o desenvolvimento de bactérias e fungos, que se proliferam nessas partículas, e influenciam no aspecto econômico do tratamento da água com vistas a torná-la potável (LAMPERT; SOMMER, 2007).

As concentrações do material em suspensão são bastante variáveis no tempo e no espaço, e dependem da hidrodinâmica, da constituição do substrato de fundo, das margens do meio hídrico e ainda de fatores meteorológicos. Um outro aspecto importante a ser levado em conta é que, 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 1 de 2008 estabelece o limite de 100 mg.L⁻¹ para sólidos em suspensão em águas de Classe 2. No período monitorado, este parâmetro se encontrou abaixo do estabelecido pela Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 como demonstrado na Gráfico 82. No período de maior pluviosidade observa-se um aumento de sólidos em suspensão, devido provavelmente ao aumento da turbulência das águas e da entrada de material particulado por escoamento superficial, característicos desta época.

Gráfico 82 – Valores máximos de sólidos em suspensão totais no período de março de 2019 dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Metais

Na natureza, os metais ocorrem livres ou associados a outros elementos e, embora alguns tenham um papel biológico importante, doses de metais acima dos níveis fisiológicos podem provocar efeitos prejudiciais, alterando várias funções celulares, estruturas moleculares e teciduais, e assim comprometendo todo o organismo. Estes efeitos tóxicos podem ser potencializados pela sua capacidade de bioacumulação em diversos organismos e cadeias tróficas, produzindo efeitos subletais e letais decorrentes de disfunções metabólicas (ALI; KHAN; ILAHI, 2019). Portanto, os metais são uma classe de poluentes de grande impacto ambiental. Desastres ambientais envolvendo a contaminação por metais, como no caso do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão, são extremamente perigosos à saúde humana e ao meio ambiente.

Nos ecossistemas aquáticos, os metais podem estar presentes tanto na água como nos sedimentos. Portanto, mesmo que os metais não sejam detectados analiticamente na água, podem estar concentrados nos sedimentos de fundo de um rio, lago ou reservatório. Sob determinadas condições físicas e químicas (pH, temperatura, concentração de oxigênio dissolvido), os metais presentes nos sedimentos podem ser liberados para a coluna d'água (ALI; KHAN; ILAHI, 2019). Pelo fato de serem tóxicos em determinadas concentrações para quase todas as formas de vida, eles possuem suas concentrações rigidamente controladas pela legislação.

Ferro total e dissolvido

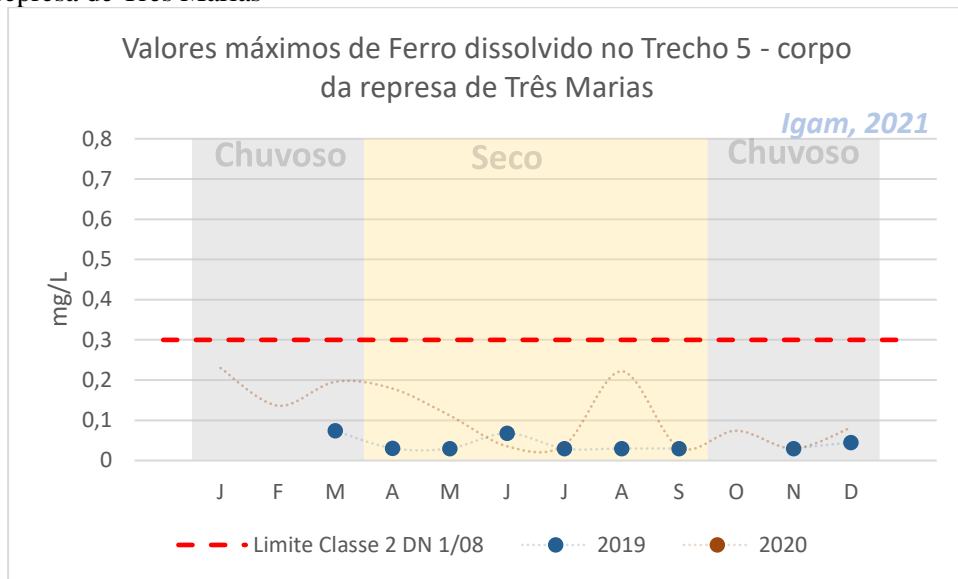
O Ferro (Fe) foi um dos primeiros metais utilizados pelo ser humano e na natureza pode ser encontrado associado a outros minerais, dentre eles muitos óxidos. Nos seres vivos tem papel fundamental, como constituinte de biomoléculas. Em doses elevadas, o ferro apresenta caráter tóxico ao meio celular, uma vez que desencadeia processos oxidativos capazes de danificar membranas e outras estruturas celulares (BAUTISTA; VERGARA; SEGOVIA, 2016). Além disso, o Fe é um irritante direto do trato gastrointestinal, causando necrose de mucosa, provocando vômitos, diarreia, dor abdominal, ulceração da mucosa e sangramento logo após uma ingestão significativa.

Além dos efeitos toxicológicos, o Fe 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 Fe é um dos principais elementos associados às atividades extrativistas do quadrilátero ferrífero e está diretamente associado ao rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A de contenção de rejeitos da mina Córrego do Feijão. A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$ para ferro dissolvido em águas de Classe 2. Pode-se observar que os valores de ferro total e dissolvido (Gráficos 83 e 84) foram maiores no período de março a maio de 2020 e em agosto do mesmo ano comparados com o mesmo período de 2019. Apesar dos valores de ferro dissolvido terem aumentado no período de 2020, ainda se encontram abaixo do limite estabelecido pela Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008.

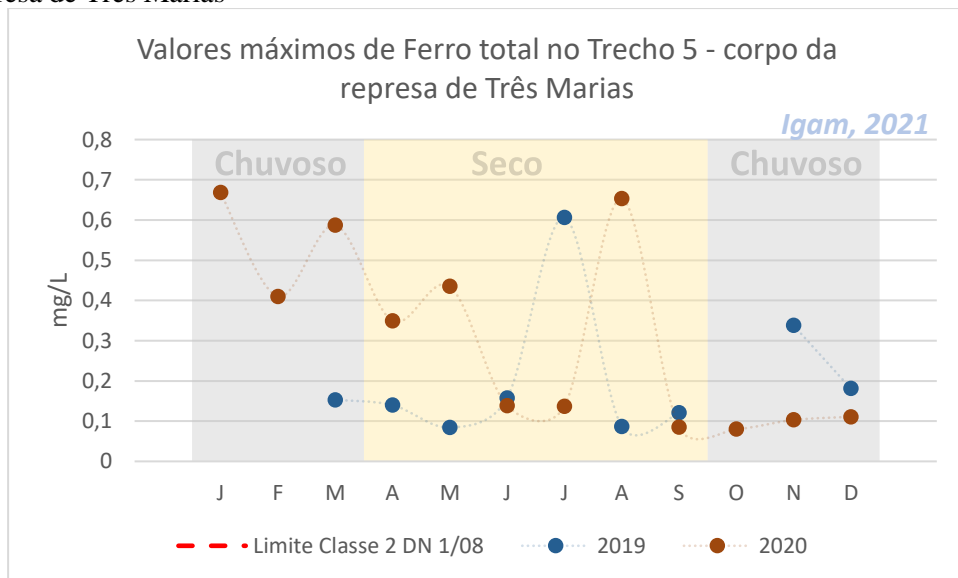
Apesar da concentração de ferro total (Gráfico 84) não ter um limite estabelecido pela legislação, seus valores são muito superiores aos de ferro dissolvido, principalmente nos períodos sazonais de 2020, chegando a ter o dobro (aproximadamente $0,6 \text{ mg.L}^{-1}$) do valor permitido para ferro dissolvido ($0,3 \text{ mg.L}^{-1}$).

Gráfico 83 – Valores máximos de Ferro dissolvido no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 84 – Valores máximos de Ferro total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Manganês Total

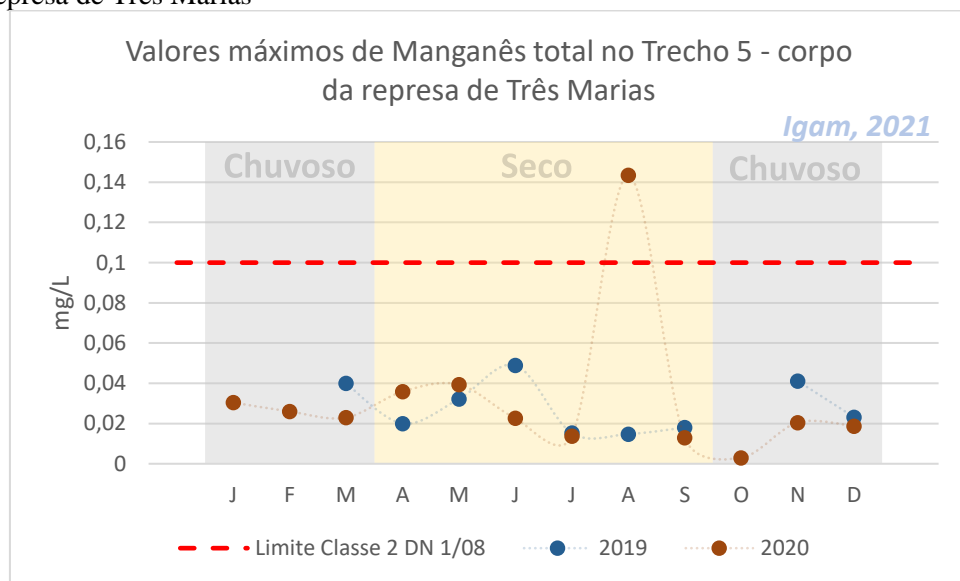
O Manganês é um sal mineral de extrema importância no metabolismo humano, no entanto seu excesso pode estar relacionado com distúrbios no sistema nervoso, o que provoca

permanentemente tremores, dificuldades de coordenação motora e problemas de memória (MICHALKE; FERNSEBNER, 2014).

Nos ecossistemas aquáticos, o manganês 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).

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ para manganês total em águas de Classe 2. No período monitorado, este parâmetro se mostrou constante e abaixo do limite estabelecido como demonstrado na Gráfico 85, com exceção do mês de agosto de 2020. Como esta elevação foi isolada, pode ter sido consequência de alguma atividade local e não do rompimento da barragem.

Gráfico 85 – Valores máximos de Manganês Total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

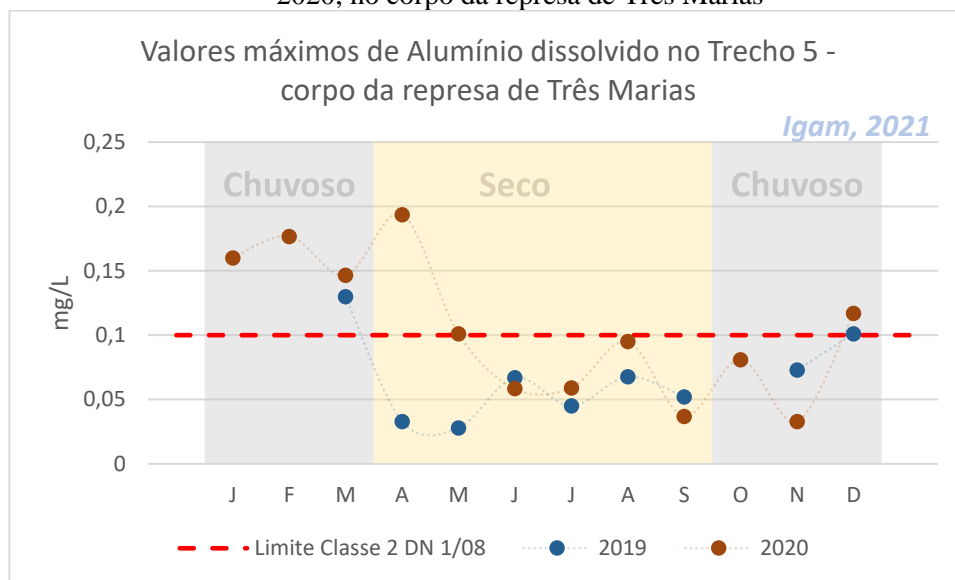
Alumínio dissolvido

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. O Al é considerado um metal não essencial, por não possuir nenhuma função biológica descrita, no entanto, é considerado um agente neurotóxico e se acumula no sistema nervoso. Sua capacidade de causar danos ao sistema nervoso é descrita desde o século 19 e está relacionada com o aparecimento de diversas doenças neurodegenerativas. De fato, este metal está implicado na encefalopatia de diálise, osteomalácia, anemia, doença de Alzheimer e esclerose lateral amiotrófica (ESPARZA; GÓMEZ; DOMINGO, 2019).

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 0,1 mg.L⁻¹ para alumínio dissolvido em águas de Classe 2. No período monitorado, este parâmetro se encontrou acima do limite permitido, nos períodos de março de 2019 e de janeiro a maio de 2020 como demonstrado na Gráfico 86. No entanto, no decorrer do ano observa-se uma diminuição da concentração a qual permanece abaixo do limite requerido até o mês de dezembro, onde volta a ter uma tendência de aumento.

Gráfico 86 – Valores máximos de Alumínio dissolvido no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



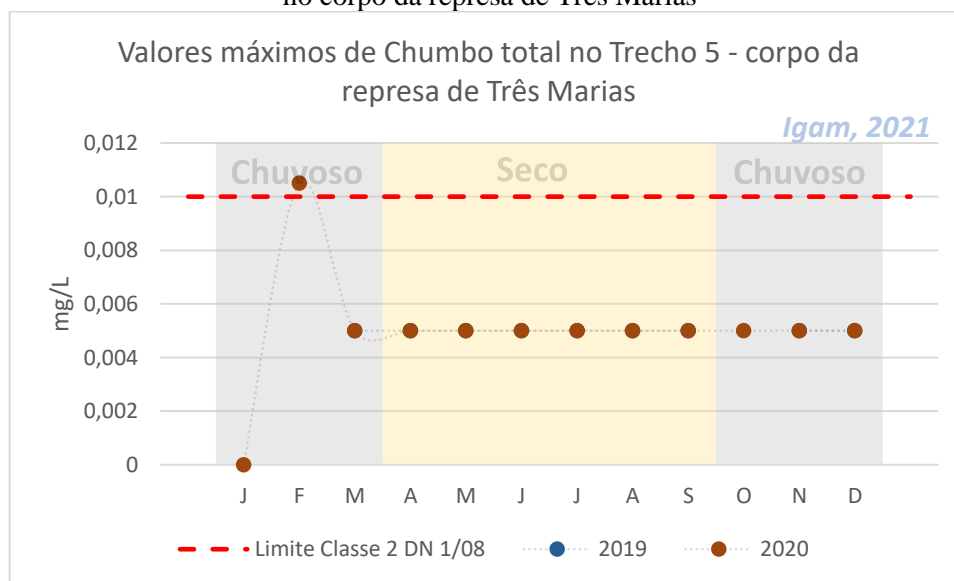
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Chumbo Total

O Chumbo é um metal pesado e perigoso podendo atingir concentrações 1400 vezes maiores nos organismos do que as encontradas na água. Não sendo essencial ao metabolismo celular, é tóxico mesmo em pequenas concentrações podendo provocar inibição de algumas enzimas e alterações no metabolismo das células (GIDLOW, 2015). Em peixes, a contaminação por chumbo pode provocar lesões nas brânquias prejudicando as trocas gasosas (JUNEJO *et al.*, 2019). O homem quando ingere animais contaminados por chumbo também bioacumula o metal, podendo apresentar alterações no sistema nervoso, sanguíneo e problemas renais, além de poder contrair o saturnismo, que pode provocar o retardamento mental e anemia em crianças (GIDLOW, 2015).

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 0,01 mg.L⁻¹ para chumbo total em águas de Classe 2. No período monitorado, com exceção do mês de fevereiro de 2020, este parâmetro se apresentou constante e abaixo do estabelecido pela Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008, como apresentado na Gráfico 87. Este aumento de chumbo no mês de fevereiro de 2020, provavelmente está associado com alguma descarga isolada na região, aliado ao aumento de intensa pluviosidade.

Gráfico 87 – Valores máximos de Chumbo Total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



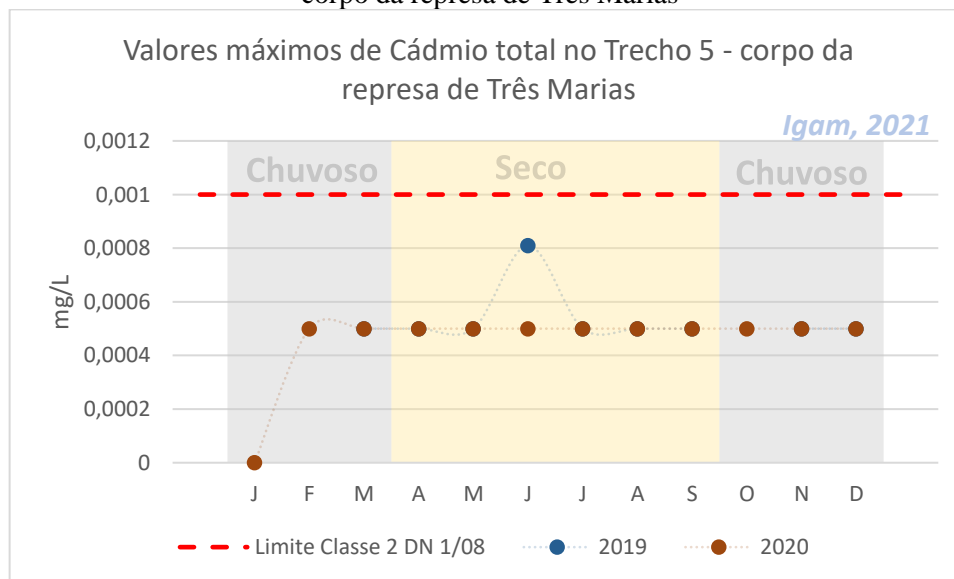
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Cádmio Total

A exposição a esse metal causa sintomas parecidos aos de envenenamento por alimentos, sendo que sua acumulação no homem resulta na doença Itai- Itai, que produz problemas de metabolismo do cálcio, acompanhado de descalcificação, reumatismo, nevralgias e problemas cardiovasculares. Altas concentrações destroem o tecido testicular e as hemácias sanguíneas e podem levar a efeitos mutagênicos e teratogênicos (BERNHOF, 2013).

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 0,001 mg.L⁻¹ para cádmio total em águas de Classe 2. No período monitorado, este parâmetro se apresentou constante e abaixo do limite estabelecido, como apresentado na Gráfico 88. Um aumento de cádmio no mês de Junho de 2019, está provavelmente associado com alguma descarga isolada na região, como no caso do chumbo.

Gráfico 88 – Valores máximos de Cádmio total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

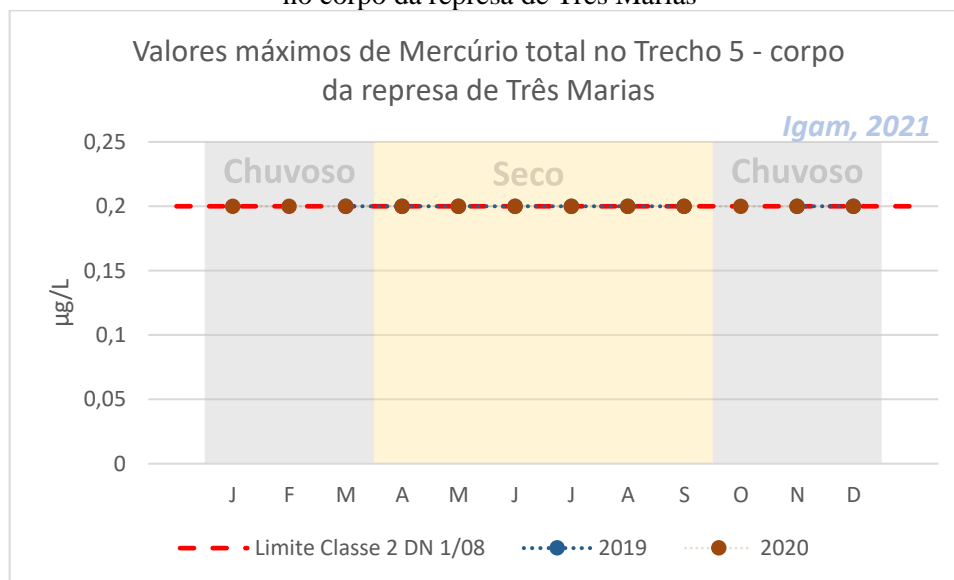
Mercúrio Total

O mercúrio combina-se fortemente com as proteínas dos seres vivos, e no homem pode causar a destruição de células nervosas, gerando paralisia, irritabilidade, insanidade e depressão (BJØRKLUND *et al.*, 2017).

Nos ecossistemas aquáticos, o mercúrio e sobretudo os compostos organo-mercúricos reduzem a fotossíntese do fitoplâncton. Em meio redutor rico em sulfeto, este metal pode apresentar-se precipitado, formando assim moléculas de solubilidade muito baixa o que acaba enriquecendo o sedimento (LUO; CHENG; PAN, 2020).

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de $0,2 \mu\text{g.L}^{-1}$ para mercúrio total em águas de Classe 2. Nos dois períodos monitorado, este parâmetro se apresentou com os mesmos valores e no limite estabelecido pela norma, como apresentado na Gráfico 89.

Gráfico 89 – Valores máximos de Mercúrio total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

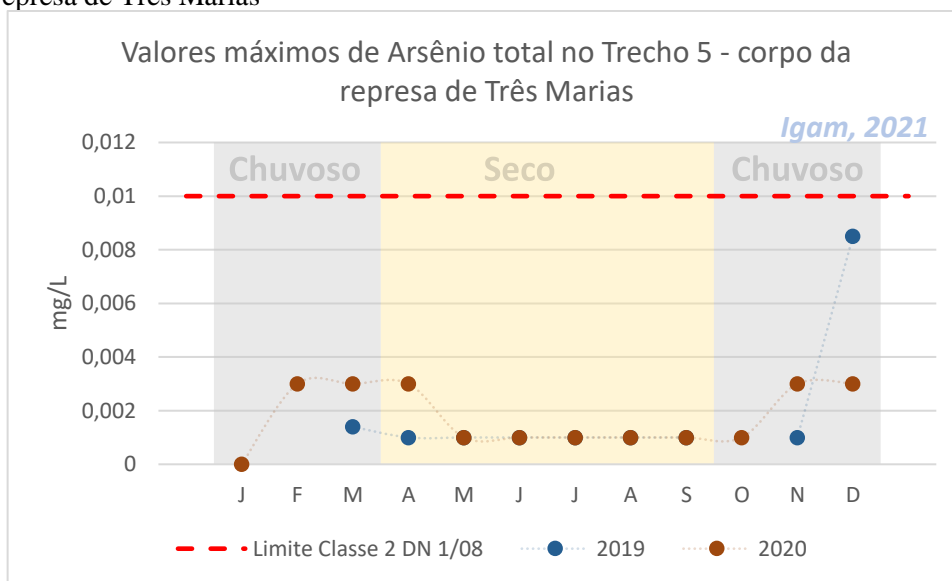
Arsênio Total

O arsênio é um metaloide amplamente distribuído na crosta terrestre, comumente encontrado em forma de sulfeto em uma grande variedade de minerais. Na intoxicação aguda, exerce ação, principalmente, sobre o tubo digestivo e secundariamente, sobre o fígado, rins e músculos cardíacos. Na intoxicação crônica, atua principalmente sobre o tegumento e sobre os nervos periféricos (polineurite arsênicas) por sua afinidade com o sistema nervoso. Pode provocar

diversas patologias como: hiperpigmentação da pele, diarreias, hemorragias, anemia e dores de cabeça (RATNAIKE, 2003).

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 0,01 mg.L⁻¹ para o arsênio total em águas de Classe 2. No período monitorado, este parâmetro se apresentou no limite do estabelecido pela norma, como apresentado na Gráfico 90, com exceção de dezembro de 2019, não tendo uma relação direta com o rejeito da barragem.

Gráfico 90 – Valores máximos de Arsênio Total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



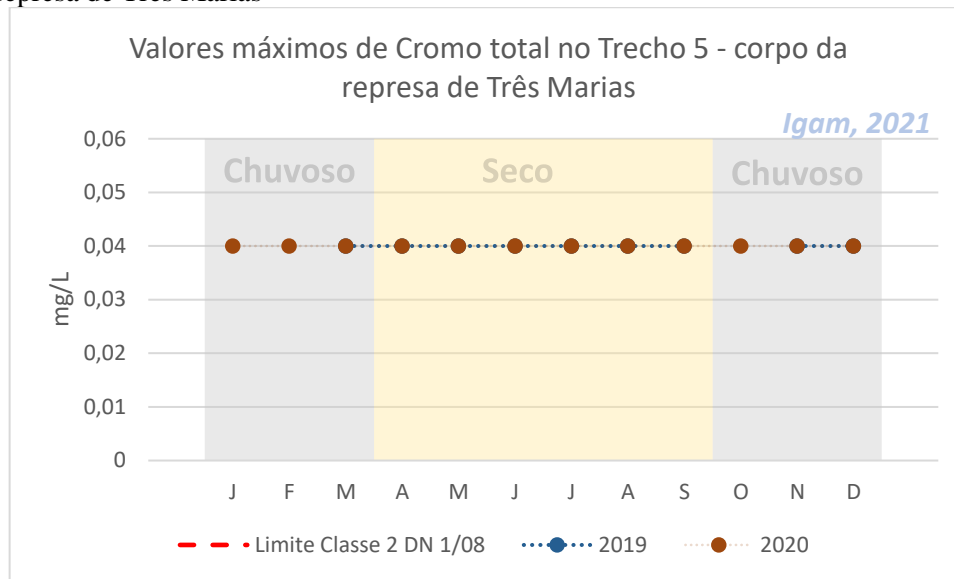
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Cromo Total

O cromo é um metal extremamente tóxico na sua forma hexavalente, por ser corrosivo no corpo humano. No entanto, é rapidamente convertido em Cromo III (trivalente) e não registra uma acumulação biológica no meio ambiente (GAD, 1989).

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 0,05 mg.L⁻¹ para o cromo total em águas de Classe 2. No período monitorado, este parâmetro se apresentou abaixo do limite estabelecido pela norma, como apresentado na Gráfico 91.

Gráfico 91 – Valores máximos de Cromo Total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



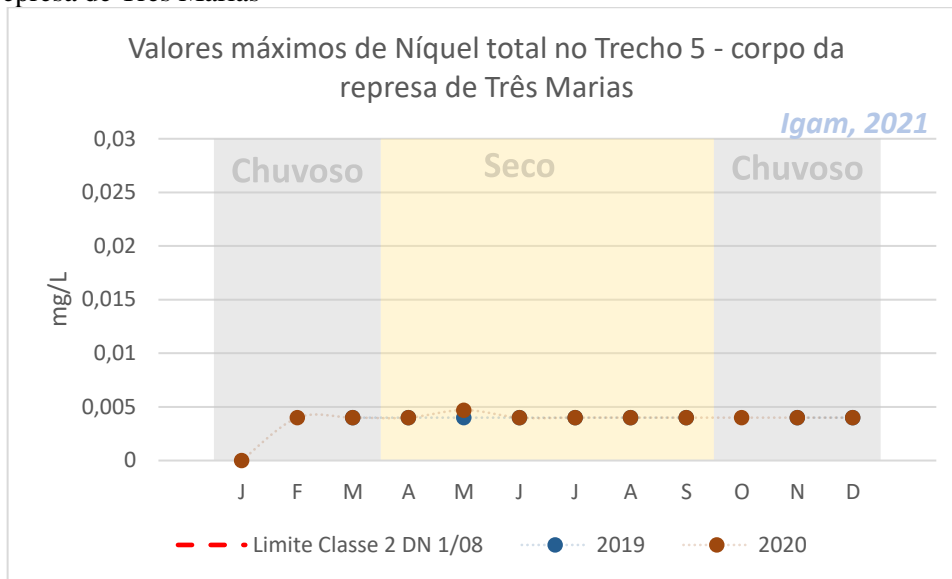
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Níquel Total

O níquel é um metal traço que ocorre na natureza em meteoritos e em depósitos naturais. Contaminações ambientais por níquel podem causar alterações dos processos metabólicos, problemas respiratórios e dermatites (DAS *et al.*, 2019).

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 0,025 mg.L⁻¹ para o níquel total em águas de Classe 2. No período monitorado, este parâmetro se apresentou abaixo do limite estabelecido pela norma, como apresentado na Gráfico 92.

Gráfico 92 – Valores máximos de Níquel total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



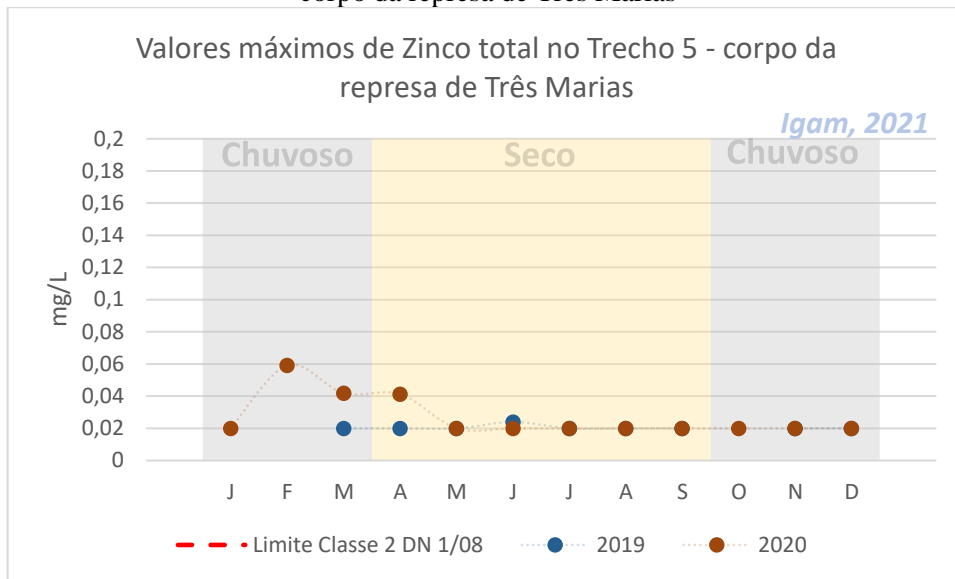
Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Zinco Total

O zinco é um metal essencial ao metabolismo celular, sendo requerido para o funcionamento celular em concentrações muito baixas. Entretanto, quando em concentrações demasiadamente altas pode interferir no metabolismo do cobre e do ferro, e reduzir as concentrações de proteínas de alto peso. Além disso, por ter afinidade pelas células do sistema nervoso e do pâncreas, altas concentrações de zinco podem resultar em toxicidade neuronal e pancreática (CAI *et al.*, 2005). Uma das fontes de contaminação do meio aquático é através de rejeitos da atividade de mineração e de efluentes industriais e domésticos não tratados.

A Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 1 de 2008 estabelece o limite de 0,18 mg.L⁻¹ para o zinco total em águas de Classe 2. No período monitorado, este parâmetro se apresentou abaixo do limite estabelecido pela norma, como apresentado na Gráfico 93.

Gráfico 93 – Valores máximos de Zinco total no período de março de 2019 a dezembro de 2020, no corpo da represa de Três Marias



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

8 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DE SEDIMENTOS DE JANEIRO DE 2019 A DEZEMBRO DE 2020

A seguir é apresentada uma análise dos resultados de sedimentos coletados ao longo do rio Paraopeba, para os dados do monitoramento emergencial obtidos entre 27 de janeiro de 2019 a 06 de dezembro de 2020. Conforme detalhado no Item 5.3 Frequência de amostragem, o monitoramento da qualidade dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba teve início logo após o rompimento das Barragens B1, BIV e BIV-A. Durante os primeiros 60 dias, o monitoramento de sedimentos foi semanal e a partir de então passou a mensal.

Para melhor visualização dos resultados, as estações monitoradas foram agrupadas em cinco trechos ao longo do rio Paraopeba a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão, e um ponto a montante, conforme apresentado na análise das águas superficiais, detalhado no Item 6.

A seguir são apresentados os gráficos de *boxplot* de todos os valores registrados, por trecho, para os anos de 2019 e 2020, para os metais nos sedimentos de fundo. O *boxplot* é um gráfico que representa a variação dos dados obtidos por meio dos percentis, 25, 50 e 75%, além dos máximos e mínimos obtidos para cada ponto, bem como os *outlier*, definido como: valores extremos medidos, ou seja, valores que não estão dentro do seguinte intervalo:

$[(\text{percentil } 25 - 1,5 * (\text{percentil } 75 - \text{percentil } 25)) \text{ até } (\text{percentil } 75 + 1,5 * (\text{percentil } 75 - \text{percentil } 25))]$.

Vale destacar que o trecho a montante, assim como o trecho 4 (UHE de Retiro Baixo), possuem apenas um ponto de coleta e por isso apresentam uma variância menor comparados aos demais trechos, os quais possuem três ou quatro pontos de coleta.

Os metais ferro, manganês e alumínio foram analisados, além dos seguintes contaminantes: arsênio, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel, zinco, estrôncio, titânio e vanádio.

As concentrações dos metais e arsênio nos sedimentos foram comparadas com os Níveis 1 e 2, definidos para águas doces, da Resolução Conama nº 454 de 2012 (Tabela 3). A Resolução Conama nº 454/2012 não estabelece valores orientadores para os metais ferro, alumínio e manganês. Contudo, Costa (2015) em sua pesquisa intitulada “Mapeamento Geoquímico e Estabelecimento de Valores e Referência (Background) de Sedimentos Fluviais do Quadrilátero Ferrífero”, encontrou os valores de referência de 28,10%, 4,52% e 0,33%, para ferro, alumínio e manganês, respectivamente, utilizando a técnica de análise fractal.

Ferro e manganês em sedimentos

Nos Gráficos 94 e 95 são apresentados os *boxplot* para ferro e manganês dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020. Nos gráficos foram contemplados os resultados por trecho e por ano de análise (2019 e 2020). Os resultados desses metais são expressos em porcentagem de peso seco (%) dada as suas importâncias relativas quanto à composição dos sedimentos que geralmente são encontrados.

O material proveniente da Barragem 1, é originário da mineração de ferro, e por consequência esse é 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.

Ao avaliar o comportamento geral dos trechos estudados, observa-se um aumento expressivo no trecho 1, localizado logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, seguido de uma redução gradual a partir da Termelétrica de Igarapé (trecho 2) até a represa de Três Marias (trecho 5). Destaca-se que após a UHE de Retiro Baixo (trecho 4 e 5), os valores de ferro em sua maioria foram inferiores aos registrados no trecho a montante do rompimento da barragem. Esses dados sugerem que o rejeito depositado nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba não transpôs o reservatório de Retiro Baixo.

Os teores mais elevados de ferro, acima do valor de referência de Costa (2015) (28,10%), ocorreram apenas nos trechos localizados logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro

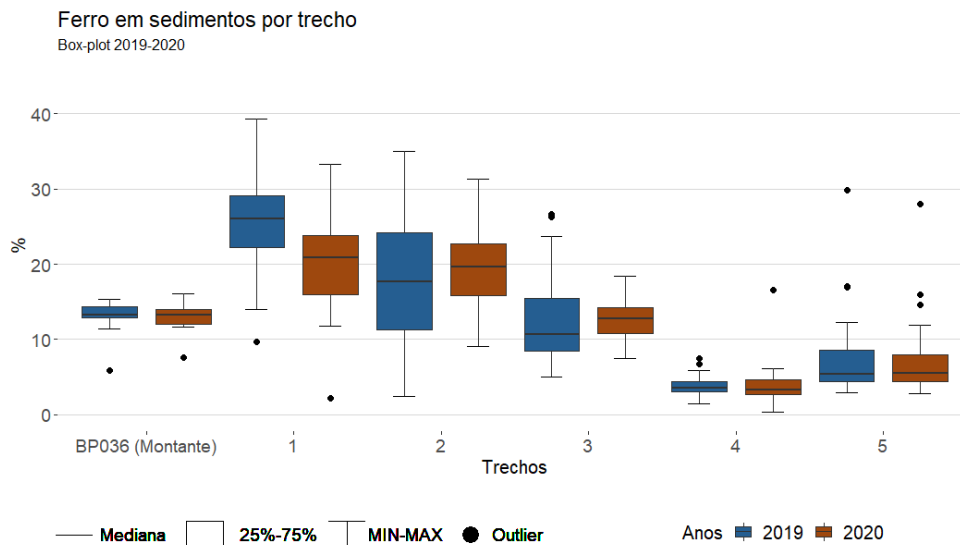
Carvão (trecho 1), e entre a termelétrica de Igarapé e Esmeraldas (trecho 2), principalmente no ano de 2019. Em contrapartida, nos demais trechos analisados, todos os valores obtidos nas coletas de 2019 e 2020 foram inferiores ao valor da referência, exceto dois resultados anômalos na represa de Três Marias (trecho 5). De acordo com os dados do Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimentos Fechamento de Ciclo (25/01/2019 a 30/06/2019), disponibilizados pela Vale, o ferro presente no sedimento se encontra, principalmente, na forma do óxido Fe_2O_3 , conhecido como hematita. A hematita possui uma densidade elevada (4,9 a $5,3 \text{ g/cm}^3$), contribuindo para uma deposição mais rápida, principalmente nos primeiros trechos a jusante do rompimento da barragem. Essa característica do rejeito ratifica os valores de ferro obtidos nos sedimentos e discutidos acima.

Na comparação entre os anos de 2019 e 2020 observou-se que os trechos onde os sedimentos de fundo não receberam impacto direto do rompimento das barragens BI, BIV e BIV-A (trechos a montante, 4 e 5), as medianas foram bastante similares. Já no trecho 1, trecho mais impactado, observou-se redução de 26% para 21% nas medianas. Já os trechos 2 e 3, observou-se uma elevação das medianas na comparação entre os anos de 2019 e 2020, passando de 17,6% para 19,6% no trecho 2, e de 10,7% para 12,7% no trecho 3. Contudo, os valores máximos e o percentil 75 reduziram nesses 2 últimos trechos citados.

Ao comparar os trechos 1 e 2 do rio Paraopeba, nota-se uma aproximação entre os valores das medianas, dos percentis e máximos no ano de 2020, indicando um possível deslocamento do rejeito depositado ao longo do leito do rio Paraopeba. Esse deslocamento foi mais evidente apenas até o trecho 2. Na comparação entre os trechos 2 e 3, no ano de 2020, observa-se que o máximo obtido do teor de ferro no trecho 3, foi 13% mais baixo que no trecho 2.

Ressalta-se que a região localizada a jusante da UHE Retiro Baixo (trechos 4 e 5), continuou sem indicativos de terem recebido o material extravasado proveniente das barragens B1, BIV e BIV-A nos sedimentos de fundo, uma vez que não apresentaram variação na mediana, máximos e mínimos de 2019 a 2020, e possuem porcentagem de ferro inferior à encontrada no trecho a montante da foz do ribeirão Ferro Carvão.

Gráfico 94 – Gráfico de *boxplot* dos valores de ferro em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

No Gráfico 95 é apresentado o *boxplot* para manganês em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020, e pode ser observado que o manganês apresentou comportamento bastante semelhante ao do ferro, o que é esperado uma vez que são os metais de maior abundância na composição do rejeito.

Os valores mais expressivos (acima da referência adotada 0,33% de Mn) e com maior variabilidade foram observados, assim como para o ferro, nos primeiros trechos após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão (trechos 1, 2 e 3). O valor máximo de manganês do trecho 1, em 2019, foi de 2,89%, sendo aproximadamente seis vezes maior que o máximo do mesmo ano no trecho a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (0,45%), trecho em que não houve impacto do rejeito. Já nos trechos a jusante da UHE de Retiro Baixo (trechos 4 e 5), os valores obtidos foram bastante inferiores, inclusive inferiores aos encontrados no trecho a montante do rompimento, com 75% dos dados abaixo de 0,2% de manganês.

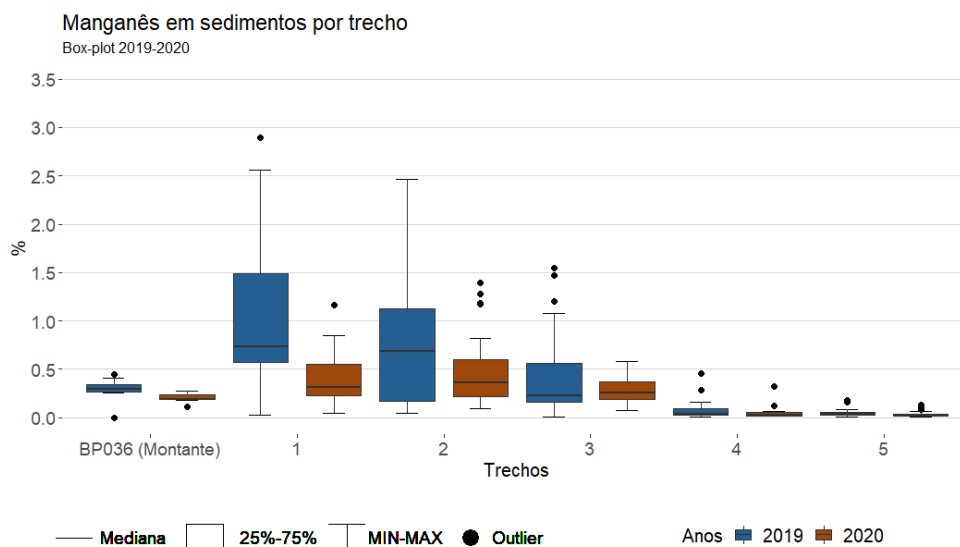
Ao analisar os dados de 2020, nota-se que os valores de mediana dos trechos imediatamente após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão (trechos 1, 2 e 3) aproximaram-se entre si e

estão na faixa de 0,30% de teor de manganês. No entanto, o valor máximo do trecho 3 é inferior aos demais, sendo registrado o valor de 0,58% de manganês, o que contribuiu para uma redução na variabilidade dos dados nesse trecho na comparação com os trechos 1 e 2.

Vale ressaltar, que apesar da redução do teor de manganês registrado em 2020, os valores máximos ainda se encontram acima do valor de referência (0,33%) citado por Costa (2015) nos trechos que receberam pluma de rejeito do rompimento das Barragens da Vale (trechos 1, 2 e 3).

Nos trechos 4 e 5 (jusante de Retiro Baixo e na represa de Três Marias), assim como observado para o ferro, os registros foram inferiores aos obtidos no trecho de montante, reforçando que os sedimentos de fundo não apresentaram alterações de qualidade devido ao impacto dos rejeitos provenientes das barragens da Vale até o momento.

Gráfico 95 – Gráfico de *boxplot* dos valores de manganês em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Alumínio em sedimentos

No Gráfico 96 é apresentado o *boxplot* para alumínio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, onde pode-se observar um comportamento bastante distinto ao observado para ferro e manganês.

Os resultados de alumínio são expressos em porcentagem de peso seco (%) dada a sua importância relativa quanto à composição dos sedimentos que geralmente são encontrados.

Na análise dos dados de alumínio verificou-se que valores mais elevados foram registrados nos trechos mais afastados do rompimento, trechos 3 e 5. Inclusive, ao avaliar os dados ao longo da calha do rio Paraopeba, observa-se que o trecho de montante apresenta valores mais elevados que o trecho mais impactado pelo rompimento (trecho 1). No trecho de montante, a mediana foi de 3%, em 2019; já no trecho logo a jusante do ribeirão Ferro Carvão (trecho 1), a mediana foi de 1,46%, em 2019,. Essa redução no trecho 1 foi seguida de uma elevação gradual até o trecho 3. Já no trecho 4 (jusante do reservatório de Retiro Baixo) ocorreu uma queda dos valores de alumínio (mediana de 1,28%) seguida novamente de uma elevação no trecho dentro do reservatório de Três Marias (trecho 5), em torno de 2,47% de alumínio. O trecho 5 foi o que apresentou os maiores teores de alumínio em 2020, em torno de 4%. Esses resultados, opostos ao observado para os valores de manganês e ferro, evidenciam que a presença do alumínio nos sedimentos não está associada à presença do rejeito ao longo da calha do rio Paraopeba.

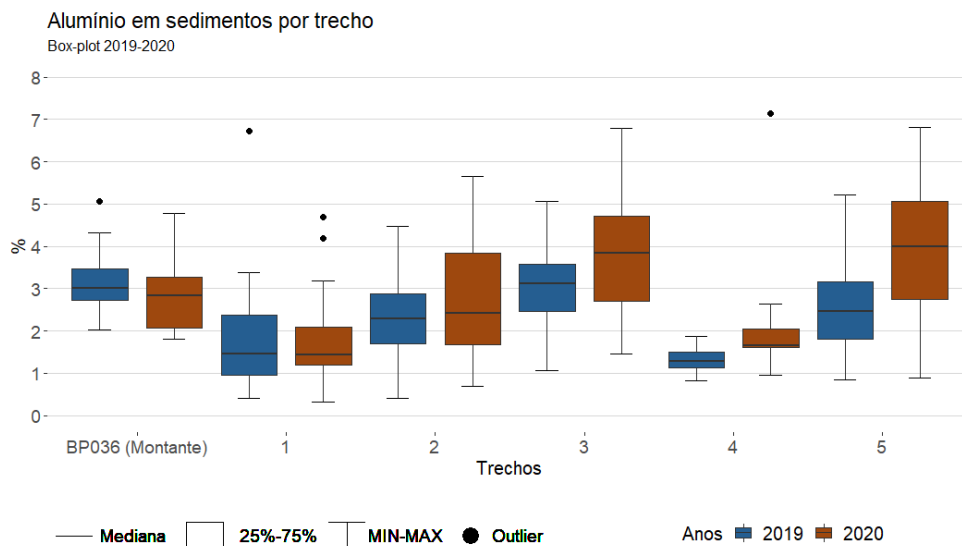
Destaca-se que os resultados de qualidade da água bruta superficial também acompanham este comportamento, ou seja, o parâmetro alumínio dissolvido apresentou-se de forma inconsistente com o comportamento geral de ferro total e manganês total, ao revés, com valores próximos da normalidade histórica justamente a jusante da barragem, aumentando muito além dessa normalidade em todos os outros trechos, inclusive em trechos não impactados, como o trecho 5.

Os dados de 2020 evidenciaram um aumento do valor máximo para todos os trechos, com exceção dos trechos a montante e a jusante (trecho 1) da confluência com o ribeirão Ferro Carvão. Além disso, os trechos 3, 4 e 5 apresentaram aumento nos valores de mediana em

0,72%, 0,37% e 1,51%, respectivamente de 2019 para 2020, ao contrário do observado para os primeiros trechos (montante, 1 e 2) nos quais praticamente não houve essa variação das medianas.

Registra-se ainda que, ao observar o terceiro quartil de 2019, ao menos 75% dos resultados estiveram abaixo da referência indicada por Costa (2015), que é de 4,52%. Em 2020, o mesmo não foi observado nos trechos 3 e 5, nos quais os valores de mediana estão próximos a 4,52%, sendo que 33% dos valores obtidos para o trecho 3 e 40% para o trecho 5 superaram o indicado por Costa (2015).

Gráfico 96 – Gráfico de *boxplot* dos valores de alumínio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Chumbo em sedimentos

No Gráfico 97 são apresentados os resultados de chumbo em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2021. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (35 e 91,3 µg/g, respectivamente), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012.

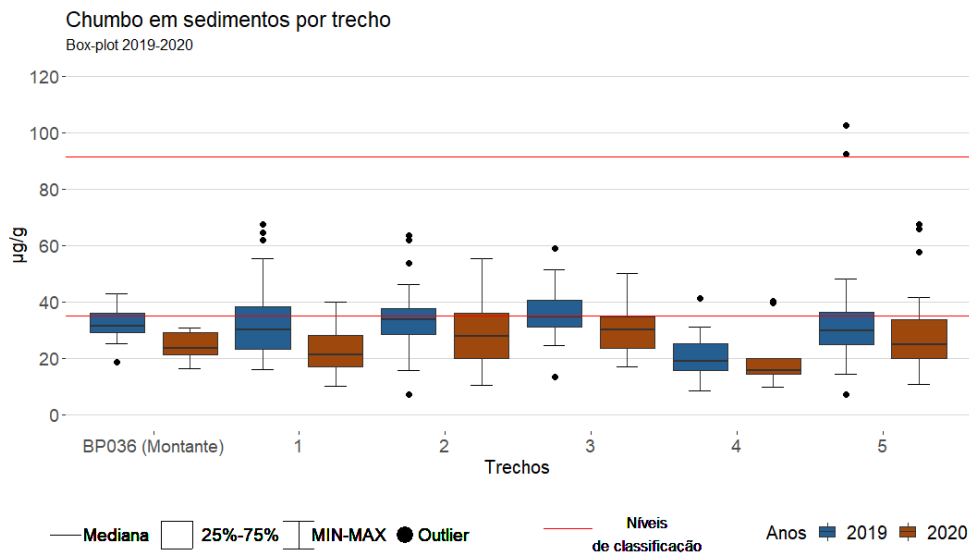
Os dados de chumbo, em 2019, apresentaram valores acima do Nível 1 ao longo de toda a calha do rio Paraopeba, desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão até o corpo da represa de Três Marias (trecho 5). Os trechos 2 e 3 apresentaram as maiores quantidades de dados acima desse limite (aproximadamente 50% de todos os valores), enquanto o trecho 1 apresentou mediana inferior ao Nível 1. Valores de chumbo acima do Nível 2 não foram registrados na calha do rio Paraopeba, sendo que os dois únicos registros acima do Nível 2 ocorreram na represa de Três Marias. Como até o momento não foi constatada a chegada do rejeito no trecho a jusante do reservatório de Retiro Baixo, os registros de chumbo acima do Nível 1 e 2 no reservatório de Três Marias tem relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes antrópicas presentes na bacia e que drenam para o reservatório.

Os dados de mediana de 2020 foram inferiores aos de 2019 em todos os trechos, com destaque para o trecho 1, que apresentou maior redução (de 30,1 µg/g para 21,1 µg/g de Pb). Vale destacar que 75% dos valores obtidos em todos os trechos em 2020 estiveram próximos ou inferiores ao Nível 1 e nenhum valor foi superior ao Nível 2.

Esses resultados indicam que a presença de chumbo pode estar associada não somente com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, mas também a outras fontes antrópicas presentes nas bacias dos rios Paraopeba e São Francisco. Apesar da elevação dos teores de chumbo terem ocorrido principalmente a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, os trechos não impactados pelo rejeito, tais como a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão e no corpo do reservatório de Três Marias, também apresentaram valores acima do Nível 1. É importante lembrar que chumbo não é comumente encontrado em mineralização de ferro³.

³ 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.

Gráfico 97 – Gráfico de *boxplot* dos valores de chumbo em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Mercúrio em sedimentos

No Gráfico 98 é apresentado o *boxplot* de mercúrio em sedimentos de fundo do rio Paraopeba dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2021. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (0,17 e 0,486 µg/g, respectivamente), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012. Também foi citado um valor na Tabela 4, discrepante dos demais valores observados, e que complementa o Gráfico 98. O dado da tabela não foi incluído no gráfico, pois atrapalharia a visualização do *boxplot*.

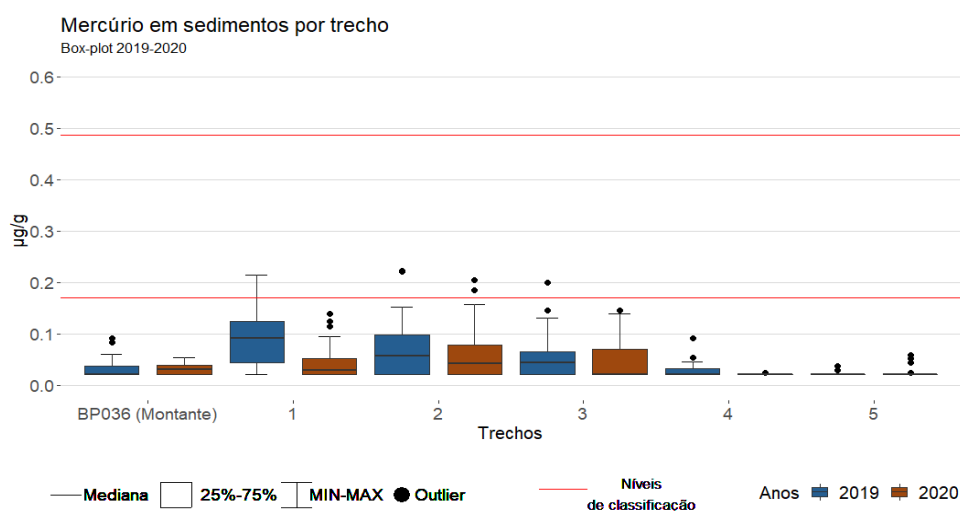
De acordo com o gráfico, pode-se notar que, apesar de todos os trechos apresentarem 75% dos valores de concentração de mercúrio abaixo do Nível 1 em 2019, nos trechos 1, 2 e 3 foram encontrados valores superiores a esse limite. Em 2020, apenas dois pontos ultrapassaram o Nível 1 na calha do rio Paraopeba, ambos localizados no trecho 2, entre a termoeletrica de Igarapé e Esmeraldas. Nenhum valor de mercúrio encontrado foi superior ao Nível 2 em todo a calha do rio durante os anos analisados.

Além disso, há que se esclarecer que na série histórica de monitoramento da qualidade das águas do Igam, todos os valores encontrados para mercúrio estiveram abaixo do limite de quantificação do método analítico (0,2 µg/L). Esses resultados demonstram que a elevação dos teores de mercúrio nos sedimentos pode estar relacionada com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, pois apresentaram elevação apenas no trecho localizado logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (trechos 1, 2 e 3).

Ao comparar os dados 2019 e 2020 nos trechos mais impactados (trechos 1, 2 e 3), nota-se redução dos valores de mediana, principalmente para o trecho 1 com redução de aproximadamente 0,063 µg/g, passando de 0,092% em 2019 para 0,029% em 2020. Registra-se o valor de 3,4 µg/g Hg obtido no trecho 1, no ano de 2019, que foi atípico aos demais registros de mercúrio da bacia do rio Paraopeba. Nos trechos 2 e 3 foram registradas poucas variações entre os valores de máximos de 2019 e 2020, os quais apresentaram valores na faixa de 0,2 µg/g.

Ressalta-se que os trechos localizados a jusante da UHE Retiro Baixo (trechos 4 e 5) apresentaram valores de mercúrio inferiores aos obtidos no trecho localizados a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (trecho Montante).

Gráfico 98 – Gráfico de *boxplot* dos valores de mercúrio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Tabela 4 – Valor obtido para o Mercúrio que ultrapassou 0,6 µg/g no período de 27/01/2019 a 06/12/2020

Mercúrio - µg/g			
Valores que ultrapassaram os limites gráficos			
Estação	Trecho localizado	Ano	Valor Observado
BP070	1	2019	3,40

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Níquel e Cobre em Sedimentos

Nos Gráficos 99 e 100 são apresentados os *boxplot* de níquel e cobre em sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020. Em ambos os gráficos, as linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (18 e 35,9 µg/g, para níquel, e 35,7 e 197 µg/g para cobre, respectivamente), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012. Em 2019 os valores acima do Nível 1 foram registrados para ambos os metais em todos os trechos da calha do rio Paraopeba, inclusive a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, trecho que não recebeu impacto do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A. Contudo, foi observado aumento dos valores de níquel e cobre nos trechos 1, 2 e 3, em comparação com o trecho localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (trecho Montante), sobretudo no primeiro ano logo após o rompimento da barragem (2019).

Apesar desses metais não fazerem parte da composição do rejeito, esses resultados demonstram que a elevação dos níveis de níquel e cobre nos sedimentos podem estar relacionados de maneira indireta com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, bem como com a presença de outras atividades antrópicas na bacia do rio Paraopeba.

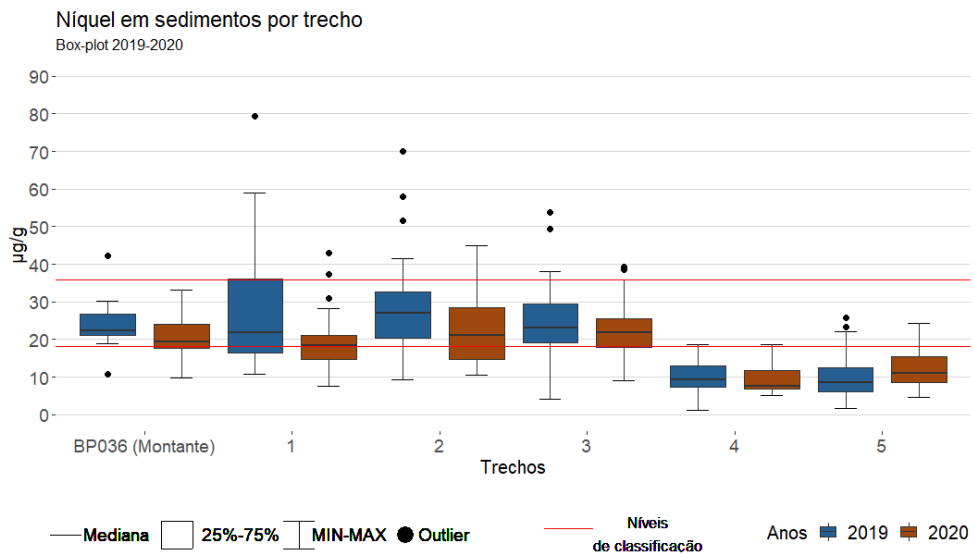
Na comparação entre os anos de 2019 e 2020, observou-se uma redução em todos os percentis (25, 50 e 75) para todos os trechos, para ambos metais níquel e cobre. A exceção se deu apenas para o níquel nos trechos 4 e 5, que apresentaram pouca variação entre os percentis observados em 2019 e 2020. Registra-se que em 2019, em torno de 75% dos resultados encontrados nos

trechos 1, 2 e 3, estavam acima do Nível 1 para ambos os metais. No entanto, em 2020 houve redução desses valores, dos quais aproximadamente 50% estiveram abaixo do Nível 1, com exceção para o níquel no trecho 3 que continuou a apresentar 75% dos valores acima desse limite.

No que se refere a extrapolação do Nível 2, observa-se que para o cobre, apenas os *outliers* do trecho 1 ultrapassaram o Nível 2 no ano de 2019. Já para o níquel no trecho 1, 25% dos dados ultrapassaram o Nível 2, bem como os outliers e/ou máximos dos trechos 2 e 3 que também atingiram o Nível 2 nos anos de 2019 e 2020.

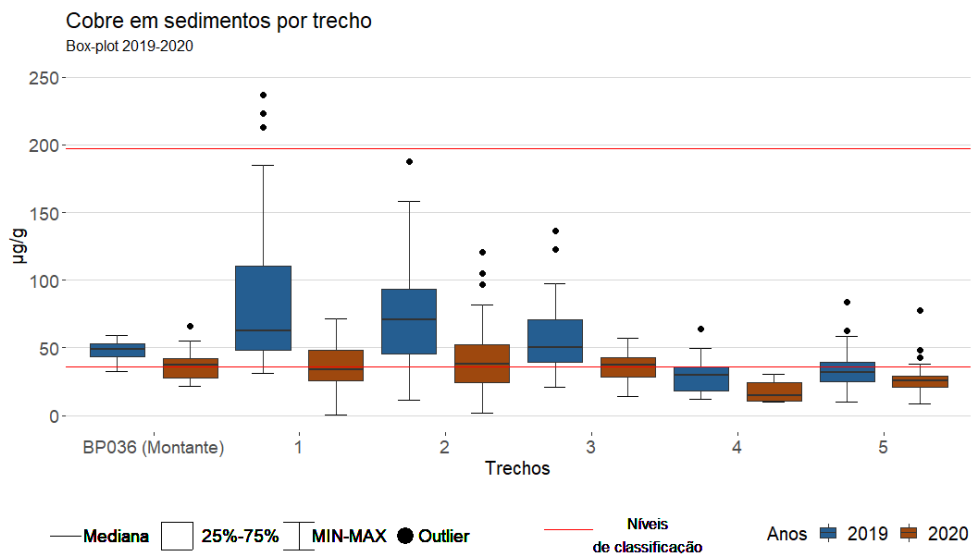
Os trechos 4 e 5, ao contrário dos demais, apresentaram 75% dos resultados de níquel e 50% dos resultados de cobre abaixo do Nível 1 e abaixo dos valores obtidos no trecho a montante do rompimento da barragem, o qual não recebeu rejeito. Ressalta-se que durante o monitoramento emergencial executado em 2019 e 2020 não se observou interferência do material proveniente da barragem B1 nos trechos 4 e 5. Desta forma, os registros de cobre e níquel nesses trechos sugerem ter relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes presentes na bacia que drenam para o reservatório. Nesses trechos, os pontos máximos de 2019 e 2020 apresentaram pouca ou nenhuma variação para o níquel, enquanto o cobre apresentou redução de 33,9 mg/g para o trecho 4 e 5,8 mg/g para o trecho 5.

Gráfico 99 – Gráfico de *boxplot* dos valores de níquel em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráfico 100 – Gráfico de *boxplot* dos valores de cobre em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Arsênio em Sedimentos

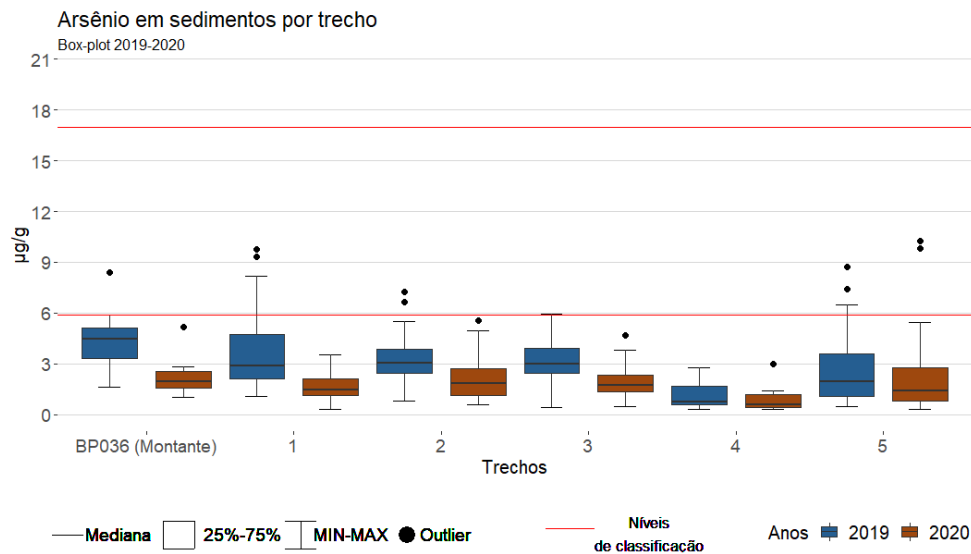
No Gráfico 101 é apresentado o *boxplot* de arsênio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (6 e 17 $\mu\text{g/g}$), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012.

Observa-se que os valores de arsênio estiveram acima do Nível 1 (5,9 $\mu\text{g/g}$) em ao menos uma medição realizada no ano de 2019 em todos os trechos da calha do rio Paraopeba e no corpo da represa de Três Marias, exceto no trecho 4 (localizado no rio Paraopeba a jusante da UHE Retiro Baixo). Salienta-se que 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 B1. Desta maneira, pode-se associar a presença de arsênio nos sedimentos ao material presente no leito do rio Paraopeba, antes do rompimento da barragem B1.

Em 2020, nota-se uma queda de todos os percentis avaliados (25, 50 e 75%) e máximos em todos os trechos. Além disso, destaca-se a proximidade entre os valores de mediana da calha do rio Paraopeba a Montante e nos trechos 1, 2 e 3 (~1,7 $\mu\text{g/g}$). Por fim, vale destacar que em 2020 apenas dois resultados, no trecho 5, apresentaram valores acima do Nível 1. Esse fato tem relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes presentes na bacia que drenam para o reservatório.

Durante o monitoramento especial do rio Paraopeba não foram registrados resultados de arsênio acima do Nível 2 (17 $\mu\text{g/g}$) em toda a calha do rio Paraopeba e no corpo do reservatório de Três Marias.

Gráfico 101 – Gráfico de *boxplot* dos valores de arsênio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Cromo em Sedimentos

No Gráfico 102 é apresentado o *boxplot* de cromo nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020. As linhas vermelhas são referentes aos Níveis 1 e 2 (37,3 e 90 µg/g), definidos pela Resolução Conama nº 454 de 2012. Também foram citados alguns valores na Tabela 5, discrepantes dos demais valores observados, e que complementam o Gráfico 102. Os dados da tabela não foram incluídos no gráfico, pois atrapalhariam a visualização do *boxplot*.

Observa-se que o trecho localizado a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, onde não recebeu impacto do rompimento das barragens da Vale, foi único trecho em que todos os registros de cromo, do monitoramento especial do Igam, estiveram acima do Nível 1 (37,3 µg/g). Esse também foi o trecho que apresentou as maiores medianas (85,2 e 72,1 µg/g Cr, nos anos de 2019 e 2020, respectivamente). Esses resultados indicam que a presença de cromo nos sedimentos do rio Paraopeba estão associados 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.

Os dados das medições do ano de 2019 mostram que, em todos os trechos, o cromo apresentou ao menos um valor acima do Nível 2 (90 µg/g) e, nos trechos a montante, 2, 3 e 5 mais de 50% dos valores registrados estiveram acima do Nível 1 (37,3 µg/g). Já nos trechos 1 e 4 as medianas de 2019 estiveram inferiores ao Nível 1.

Em 2020 os valores de mediana apresentaram pouca alteração em relação a 2019, no entanto, os valores máximos reduziram, exceção observada apenas no trecho 2. Além disso, nos primeiros quatro trechos (a montante, 1, 2 e 3), 75% dos resultados obtidos estão entre os Níveis 1 e 2, enquanto o trecho 4 apresentou somente dois valores acima de Nível 1.

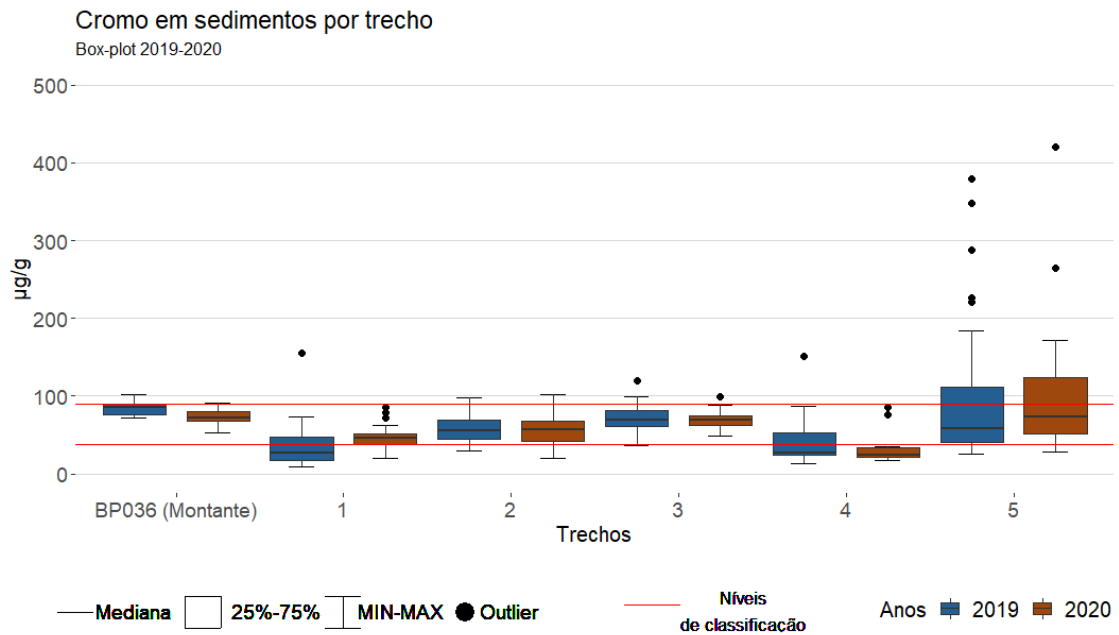
Nas medições realizadas dentro da represa de Três Marias foram encontrados teores anômalos de cromo (acima de 200 µg/g), em 2019 e 2020. Chegando a registrar o valor de 1.074 µg/g no mês de abril de 2019. Isso sugere que as alterações de cromo têm relação com algum fator externo ao material proveniente da Barragem B1 da Vale, podendo ter origem de outras fontes presentes nas bacias que drenam para a represa de Três Marias.

Segundo os dados do Atlas Geoquímico da Bacia do Rio São Francisco da CPRM⁴, 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.

Vale destacar que todos os resultados de cromo medidos pelo Igam na água superficial, no monitoramento diário do rio Paraopeba, no período de janeiro de 2019 a dezembro de 2020, foram inferiores ao limite de quantificação do método analítico (presença não detectada). Ratificando a informação de que as alterações de cromo, não estão associadas ao rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A.

⁴ VIGLIO, E. P. **Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco: Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

Gráfico 102 – Gráfico de *boxplot* dos valores de cromo em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Tabela 5 – Valores obtidos para o Cromo que ultrapassaram 500 µg/g no período de 27/01/2019 a 06/12/2020

Cromo - µg/g			
Valores que ultrapassaram os limites gráficos			
Estação	Trecho localizado	Ano	Valor Observado
BPE8	5	2019	1.074,22
BPE7	5	2020	876,24
BPE8	5	2019	741,16
BPE8	5	2020	729,03

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Cádmio em Sedimentos

Na Figura 103 são apresentadas as frequências de valores de cádmio, nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, que foram superiores ao Nível 1 (0,6 µg/g), para cada trecho, nos anos de 2019 e 2020, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020. Registra-se que não foram identificados valores de cádmio acima do Nível 2 (3,5 µg/g) da Resolução CONAMA 454/12.

As análises de cádmio realizadas entre janeiro de 2019 até novembro de 2020 possuíam um limite de detecção⁵ igual a 1 µg/g, que é superior ao limite do Nível 1 da Resolução CONAMA 454/12 (0,6 µg/g). A partir de dezembro de 2020, visando melhorar a sensibilidade do método analítico, o limite de quantificação desse parâmetro foi reduzido para 0,25 µg/g.

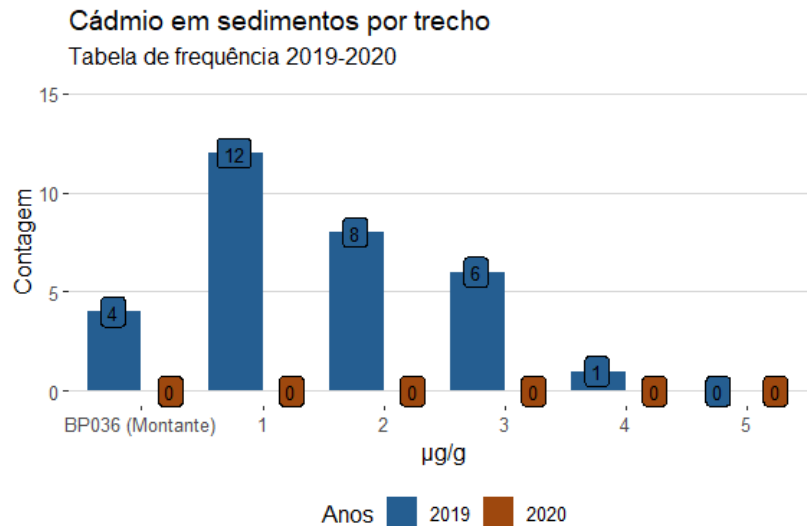
Devido à baixa variabilidade observada nos dados de cádmio em sedimentos, a maioria dos resultados (ao menos 96% dos dados de cada um dos trechos) estiveram inferiores ao limite de quantificação do método analítico, portanto, os dados são apresentados pela frequência de valores que foram superiores ao limite de quantificação e portanto, acima do Nível 1 para cada trecho nos anos de 2019 e 2020, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020 (Figura 103).

Foi observada extrapolação do Nível 1 para o cádmio, apenas no ano de 2019, em todos os trechos da calha do rio Paraopeba, desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão até a jusante da UHE de Retiro Baixo (trecho 4). No entanto, o trecho 1 apresentou a maior frequência de valores acima do Nível 1 (12 extrapolações), três vezes superior ao trecho a montante (sem impacto do rompimento, com 6 extrapolações). Nas estações localizadas no corpo do reservatório de Três Marias (trecho 5), todos os registros foram inferiores ao limite de quantificação do método analítico.

⁵ Limite de quantificação é a menor quantidade ou concentração do parâmetro, que pode ser determinada pelo método de análise empregado.

Já em 2020, nenhum trecho apresentou valor acima do limite de quantificação. Vale ressaltar ainda que, os dados referentes a dezembro de 2020 foram inferiores ao novo limite de detecção (0,25 µg/g), logo abaixo no Nível 1.

Gráfico 103 – Gráfico de frequência dos valores acima do Nível 1 de cádmio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

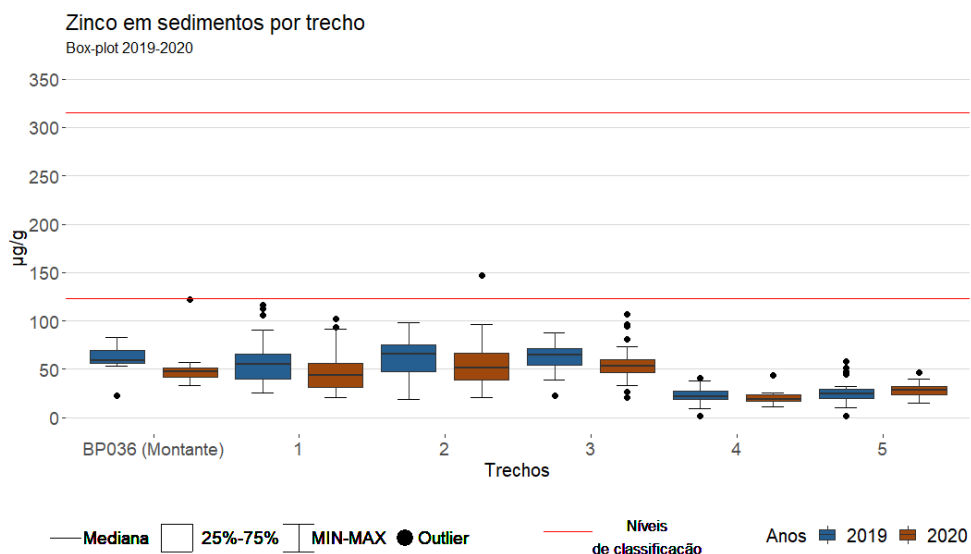
Zinco em Sedimentos

No Gráfico 104 é apresentado o *boxplot* de zinco nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020. As linhas em vermelho representam os Níveis 1 e 2 da Resolução CONAMA 454/12 (123 e 315 µg/g, respectivamente).

Durante todo o período do monitoramento especial do rio Paraopeba foi registrado um único valor acima do Nível 1 (123 µg/g Zn), no trecho 2, no ano de 2020 (o valor registrado foi de 147 µg/g Zn). Além disso, nota-se que em 2019, entre o trecho 1 (jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão) até o trecho 3, os valores de máximo foram superiores ao trecho a montante do rompimento da barragem B1, chegando a 117 µg/g no trecho 1.

Em 2020, pelos valores de mediana, nota-se que os resultados de zinco, obtidos nos trechos que receberam o impacto dos rejeitos das barragens da Vale (trechos 1, 2 e 3), se aproximaram do valor obtido no trecho de Montante (~ 50 µg/g), sem impacto de rejeito. Destaca-se que nos trechos localizados a jusante de Retiro Baixo (trechos 4 e 5), os valores para zinco, em 2019 e 2020, foram inferiores aos reportados a montante com a foz do ribeirão Ferro Carvão e não sofreram alteração significativa entre os anos.

Gráfico 104 – Gráfico de *boxplot* dos valores de zinco em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Estrôncio em sedimento

No Gráfico 105 é apresentado o *boxplot* de estrôncio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020. Esse metal não possui limites de acordo com a Resolução CONAMA 454/12.

Observa-se que os valores de estrôncio seguiram o padrão apresentado pelo manganês e ferro, com elevação dos teores a partir dos trechos localizados logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão até a montante de Retiro Baixo (trechos 1, 2 e 3). Já nos trechos localizados a jusante de Retiro Baixo (trechos 4 e 5), os valores foram próximos ou inferiores

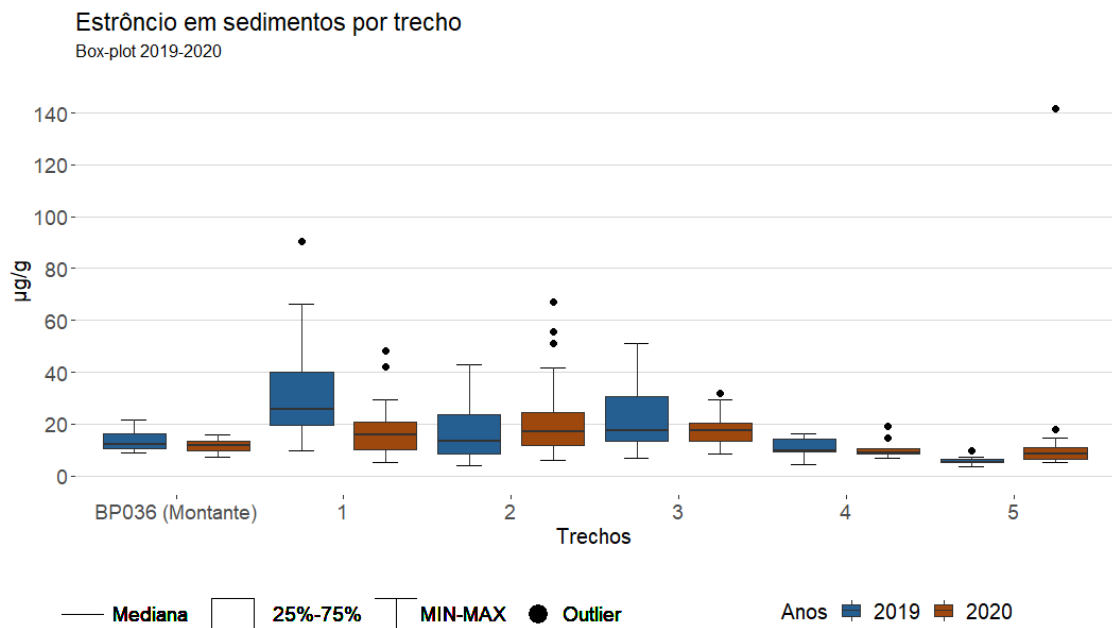
aos obtidos no trecho a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, que não sofreu impactos do rejeito provenientes das barragens da Vale.

Registra-se que o trecho 1 apresentou os maiores valores de máximos e dos percentis avaliados (25, 50 e 75%) no ano de 2019, dentre os trechos avaliados. Na comparação entre os trechos 1 e a montante da foz do ribeirão Ferro Carvão (trecho Montante), observa-se que em torno de 75% dos resultados do trecho 1 foram superiores ao máximo encontrado no trecho Montante. No entanto, em 2020, especialmente no trecho 1, ocorreu uma grande redução dos resultados, evidenciado pelos valores de mediana que passou de 25,7 µg/g em 2019, para 16 µg/g em 2020.

Registra-se que a elevação dos níveis de estrôncio nos sedimentos podem estar relacionados com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, pois apresentou elevação mais evidente a partir do trecho 1, sobretudo no ano do rompimento (2019), trecho esse que foi atingido diretamente pelo impacto dos rejeitos das barragens da Vale.

Destaca-se que nos trechos localizados a jusante de Retiro Baixo (trechos 4 e 5), os valores para estrôncio, em 2019 e 2020, foram inferiores aos obtidos no trecho localizado a montante da foz do ribeirão Ferro Carvão e não sofreram alteração significativa entre os anos. Os resultados da avaliação composicional de óxidos nos sedimentos apresentados no Capítulo 2, do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba da Vale, 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.

Gráfico 105 – Gráfico de *boxplot* dos valores de estrôncio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Titânio e Vanádio em sedimentos

No Gráfico 106 e 107 são apresentados os *boxplot* de titânio e vanádio nos sedimentos de fundo do rio Paraopeba, dos dados obtidos no monitoramento especial, no período entre 27/01/2019 a 06/12/2020. Esses metais não possuem limites estabelecidos na Resolução CONAMA 454/12.

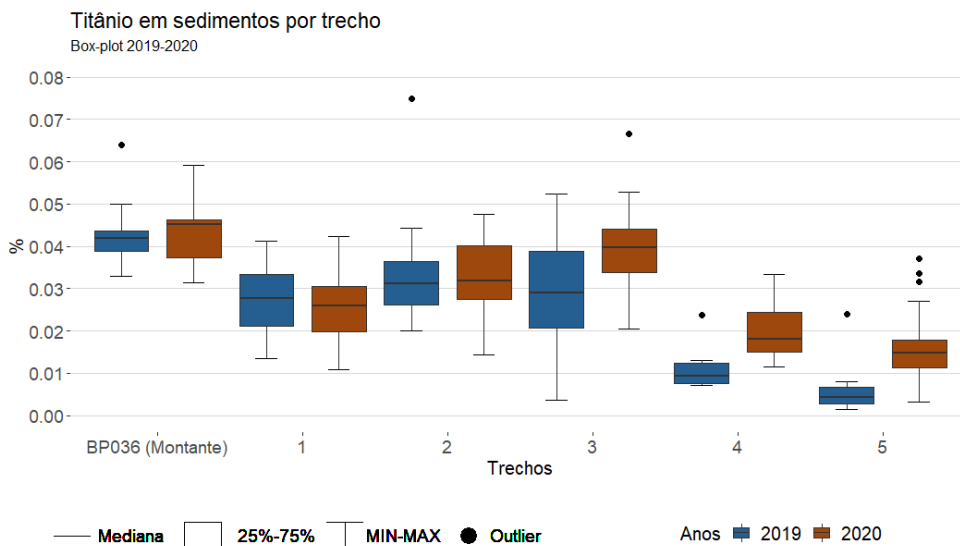
Os resultados de titânio e vanádio apresentaram um comportamento bastante similar. Ambos os parâmetros apresentaram redução dos teores a partir do trecho localizado a jusante da confluência do ribeirão Ferro Carvão até a jusante da UHE Retiro Baixo. O trecho localizado a montante da área do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A apresentou os maiores valores de todos os percentis avaliados (25, 50 e 75%), na comparação com os demais trechos da calha do rio Paraopeba, tanto no ano de 2019, quanto em 2020.

No corpo do reservatórios de Três Marias (trecho 5), registrou-se os menores teores de titânio, tanto em 2019, quanto em 2020. Já para os resultados de vanádio, registrou-se teores anômalos no trecho 5, chegando a registrar o valor de 690 µg/g em fevereiro de 2020. Assim, como não

se observou interferência do material proveniente da barragem B1 nos trechos Montante e 5, sugere-se que esses resultados tenham relação com fatores externos ao rompimento da Barragem B1, podendo ter origem de outras fontes presentes nas bacias que drenam para a represa de Três Marias e para o rio Paraopeba, na porção alta da bacia.

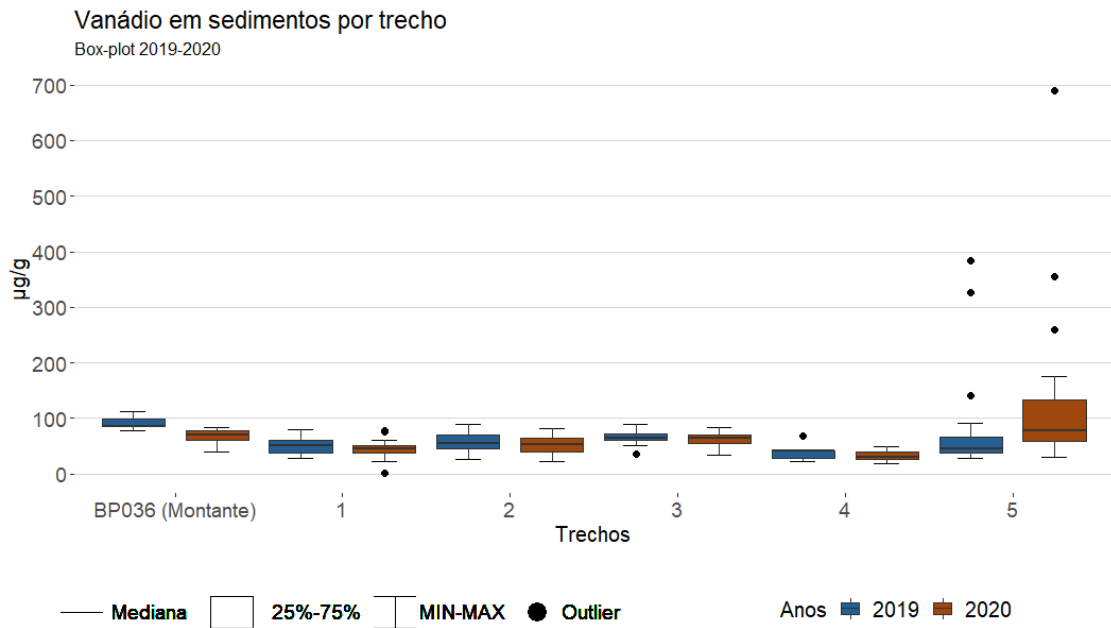
Esse comportamento do titânio e do vanádio também foi registrado no Relatório Mensal da Qualidade da Água Superficial e Sedimentos Fechamento de Ciclo da Vale (25/01/2019 a 30/06/2019), uma vez que indicou que os resultados desses parâmetros, também avaliados nos sedimentos, não apresentaram relação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

Gráfico 106 – Gráfico de *boxplot* dos valores de titânio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020

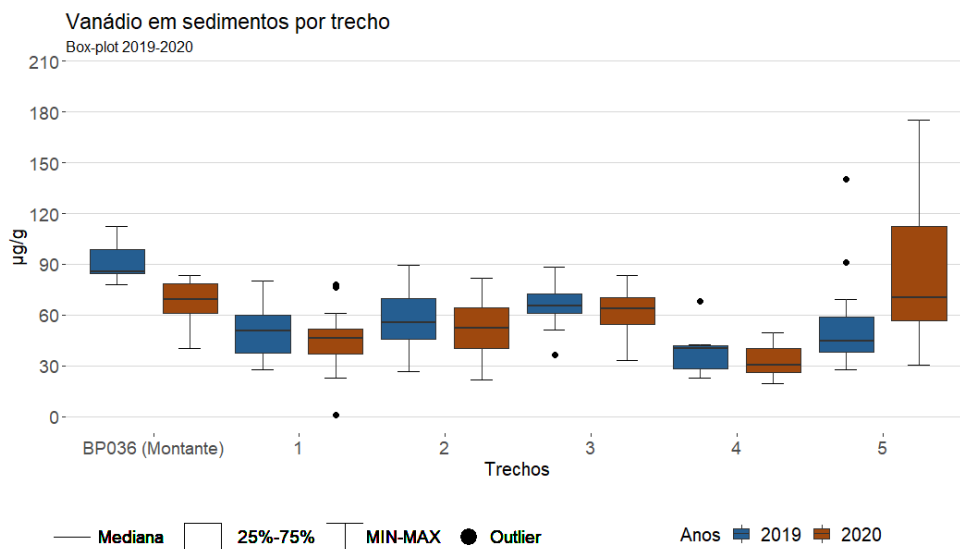


Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

Gráficos 107 e 108 – Gráficos de *boxplot* dos valores de vanádio em sedimentos de fundo, em cada trecho, no período de 27/01/2019 a 06/12/2020



a) *Boxplot* com resultados de 0 a 700



b) *Boxplot* com resultados de 0 a 500

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

9 CONCLUSÕES

O rompimento da barragem B1 operada pela Vale causou impactos na qualidade hídrica em diferentes graus de intensidade. Em relação à qualidade da água, baseado no monitoramento efetuado pelo Igam após o rompimento, as maiores alterações foram observadas, principalmente, nos valores de turbidez e nas concentração dos metais ferro dissolvido, alumínio dissolvido e manganês total.

Nos 60 dias subsequentes ao rompimento (final de janeiro a abril de 2019) aconteceram os maiores impactos sobre o ribeirão Ferro-Carvão e sobre o rio Paraopeba. O trecho 1, de aproximadamente 40 km de extensão (distância medida desde a barragem que rompeu), localizado entre os municípios de Brumadinho e São Joaquim de Bicas, ficou totalmente impactado inviabilizando o uso da água para as mais diversas finalidades, pois encontrava-se com valores significativos de turbidez, ferro, manganês, alumínio e presença de metais pesados como chumbo e mercúrio.

Nas semanas subsequentes ao rompimento foi detectado oscilação na qualidade da água do rio Paraopeba devido às ocorrências de chuvas, que contribuíram com a remobilização do material depositado no leito do rio ou aporte de rejeito oriundo da barragem que rompeu. Essa oscilação foi verificada nos arredores dos municípios de Betim, Esmeraldas, São José da Varginha, Papagaios, Paraopeba, Curvelo e Pompéu.

Durante os períodos chuvosos, na região, há o aumento das vazões e o revolvimento do material que ainda se encontra depositado no leito do rio, principalmente nas áreas próximas ao rompimento. A piora da qualidade da água do rio Paraopeba no trecho mais impactado (entre Brumadinho e Esmeraldas), durante o período chuvoso, também está relacionada às atividades de dragagem realizadas pela Vale no rio Paraopeba logo após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão.

De forma geral, nos períodos chuvosos de 2020 foram observadas elevações nos valores de turbidez e nas concentrações dos principais parâmetros, mas com valores inferiores àqueles observados no ano de 2019.

Durante o período de seca, a qualidade da água na calha do rio Paraopeba apresenta redução dos níveis de turbidez e das concentrações dos demais parâmetros avaliados. Essa redução das concentrações desses parâmetros na água superficial está relacionada ao período de estiagem, que favorece a deposição do rejeito presente na coluna d'água no leito do rio.

Destaca-se que a bacia do rio Paraopeba está inserida na região minerária conhecida como quadrilátero ferrífero, sendo natural a concentração de ferro e manganês e havendo a possibilidade de ser impactada por outros empreendimentos a ela adjacentes.

No que se refere aos resultados da qualidade dos sedimentos de fundo do rio Paraopeba e represa de Três Marias, conclui-se que após 2 anos do acidente da empresa Vale os valores dos metais analisados em sedimento de fundo apresentaram redução da concentração em relação a 2019, ano do rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A.

Pela análise dos dados foi observada alteração nas concentrações de metais no sedimento de fundo do rio Paraopeba no trecho de confluência entre o ribeirão Ferro Carvão (trecho 1) até a montante da represa de Retiro Baixo (trecho 3). Esses trechos, mais impactados, apresentaram, ainda em 2020, valores insatisfatórios nos dados de sedimento relativos ao impacto do rejeito do rompimentos das barragens B1, BIV e BIV-A. No entanto, nos trechos seguintes (trechos 4 e 5) não foi observada presença de material com características do rejeito nos sedimentos de fundo do reservatório de Três Marias.

Observou-se que os metais ferro e o manganês destacam-se como os metais traçadores da chegada dos rejeitos, e apesar de apresentarem quedas em relação a mediana e aos valores máximos entre 2019 e 2020, ainda é evidente que, entre o trecho 1 (após confluência com o ribeirão Ferro Carvão) até o trecho 3 (antes de Retiro Baixo), apresentem valores discrepantes com os demais trechos, não impactados. O alumínio apresentou um padrão de comportamento distinto dos metais supracitados, apresentou queda no trecho 1 seguido de um aumento gradual até a montante de Retiro Baixo (trecho 3). Além disso, os valores de 2020 foram superiores aos encontrados em 2019. Desataca-se ainda a presença desse metal na represa de Três Marias, que em 2020 chegou a máximo de aproximadamente 7%.

Em relação aos metais que a Resolução Conama nº 454 de 2012 apresenta limites para águas doce de Nível 1 e 2, destaca-se que o mercúrio, arsênio, cádmio e zinco, praticamente não apresentaram valores superiores ao Nível 1 nos dados de 2020. Já o chumbo e o cobre apesar de superarem o Nível 1 obtiveram resultados inferiores aos estabelecidos para Nível 2. Por fim o cromo e o níquel continuaram a apresentar valores insatisfatórios e superiores ao Nível 2 na região de montante do rompimento da barragem B1.

Há que se destacar que os resultados dos metais mercúrio, cobre e estrôncio demonstraram que a presença dos seus teores nos sedimentos pode estar relacionada com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, uma vez que apresentaram elevação mais evidente no trecho localizado logo a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão (trechos 1, 2 e 3). Para os metais chumbo, níquel, zinco e cádmio os resultados indicaram que sua presença pode estar associada não somente com o rompimento das barragens B1, BIV e BIV-A, mas também a outras fontes antrópicas presentes nas bacias dos rios Paraopeba e São Francisco. Apesar da elevação dos teores terem ocorrido, principalmente, a jusante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão, os trechos não impactados pelo rejeito proveniente da Barragem B1, tais como a montante da confluência com o ribeirão Ferro Carvão e no corpo do reservatório de Três Marias, também apresentaram valores em desconformidade, principalmente, com o Nível 1 da Resolução CONAMA 454/11. 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 represa de Três Marias, antes do rompimento das barragem da Vale. Apesar da redução de grande parte dos metais presentes em sedimentos ainda há metais com elevadas concentrações e em desconformidade com os níveis preconizados.

O Igam reforça seu compromisso de acompanhar os impactos sobre as águas do rio Paraopeba por meio da manutenção do monitoramento sistemático ao longo de todo o rio Paraopeba até o corpo do reservatório de Três Marias, podendo o programa ser revisto de acordo com a necessidade, bem como, todas as ações para remoção dos rejeitos e recuperação da bacia do rio Paraopeba, pela empresa Vale S/A, frente ao desastre ambiental ocorrido em Brumadinho.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed. Washington: APHA, 2005.

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.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos**. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2011.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais). Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995. Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba. **Minas Gerais**, Belo Horizonte, 29 dez. 1995.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais); CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (Minas Gerais). Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 05 de maio de 2008. 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, 13 maio 2008.

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.

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

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo hidrometeorológico de acompanhamento do deslocamento da pluma no percurso do rio Paraopeba**. 2019a. Disponível em: http://www.meioambiente.mg.gov.br/images/stories/2019/DESASTRE_BARRAGEM_B1/inf

ormativos_hidrometeorol%C3%B3gicos/20190222_Informativo_Paraopeba_N25.pdf. Acesso em 30 mar 2020.

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

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.

VEJA antes e depois de Brumadinho e imagens aéreas da lama na cidade. **Veja**, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/brasil/veja-antes-e-depois-de-brumadinho-e-imagens-aereas-de-lama-na-cidade/>. Acesso em: 22 fev. 2019.

VIGLIO, Eduardo Paim; CUNHA, Fernanda Gonçalves da. **Atlas geoquímico da bacia do rio São Francisco**: Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

ABU SHMEIS, R. 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.

BAUTISTA, E.; VERGARA, P.; SEGOVIA, J. 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. DOI 10.1016/j.jtemb.2015.11.005. 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, G. *et al.* The toxicology of mercury: Current research and emerging trends. **Environmental Research**, v. 159, n. July, p. 545–554, 2017. DOI 10.1016/j.envres.2017.08.051. 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.

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>.

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.

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 : Vanessa Saraiva



 **Igam**
Instituto Mineiro de Gestão das Águas



**MINAS
GERAIS**

GOVERNO DIFERENTE.
ESTADO EFICIENTE.