

EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARAPEBA

EFFECTS OF THE COLLAPSE OF THE CÓRREGO DO FEIJÃO MINE DAM ON THE QUALITY OF SURFACE WATER IN THE PARAPEBA RIVER BASIN

Fernanda Loebel BRAIDO, Jandir Pereira BLASIUS, Marcia Regina STRADIOTO, Marcelo Loureiro GARCIA

Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Avenida 24-A, n° 1515, Bela Vista. Rio Claro – SP.
E-mail: fernanda.braido@unesp.br; jandir.blasius@unesp.br; marcia.stradioto@unesp.br; marcelo.garcia@unesp.br

Introdução
Material e métodos
 Área de estudo
 Qualidade das águas superficiais
Resultados e discussão
 Análise temporal
 Montante`
 Trecho 01
 Trecho 02
 Trecho 03
 Trecho 04
 Análise espacial
 Pré rompimento
 Pós rompimento
Conclusões
Referências

RESUMO - No dia 25 de janeiro de 2019, a barragem B1 da mina Córrego do Feijão colapsou, formou uma enxurrada com cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeito, que contaminou o Rio Parapeba, seus afluentes e causou a morte de 270 pessoas. Neste contexto, o objetivo deste estudo é avaliar os impactos ambientais negativos decorrentes da contaminação do Rio Parapeba - MG. Foram analisados dados do Instituto Mineiro de Gestão das Águas sobre o monitoramento da qualidade das águas superficiais da Bacia do Rio Parapeba, a partir de dados de nove estações de monitoramento, entre 2017 e 2022. Os resultados apontaram concentrações de alumínio, arsênio, chumbo, ferro, fósforo, manganês, selênio e zinco acima dos valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 357/2005 para corpos hídricos de Classe 2, ao longo de toda a Bacia Hidrográfica. A contaminação por arsênio, chumbo e selênio foram originadas pelo desastre de Brumadinho, já os altos teores de alumínio, ferro, fósforo e manganês já eram observados antes de 2019. A partir de 2021 todos os parâmetros apresentaram tendência de queda na região do alto curso da bacia e aumento dos teores no baixo curso, o que sugere a migração destes contaminantes pela bacia.

Palavras-chave: Barragem de rejeitos. Brumadinho. Qualidade das águas. Rio Parapeba. Monitoramento ambiental.

ABSTRACT - On 25 January 2019, the B1 dam at the Córrego do Feijão mine collapsed, resulting in a torrent of around 12 million cubic metres of tailings, which contaminated the Parapeba River, and caused the deaths of 270 individuals. This study aims to investigate the impacts of the disaster on the UPGRH SF3 - Parapeba River Basin and analyse the progression of inorganic element contamination within the Parapeba River. The data were obtained from the monitoring of surface water quality in the Parapeba River Basin, developed by the Minas Gerais Institute of Water Management, from nine monitoring stations, on a time interval from 2017 to 2022. The results revealed concentrations of aluminum, arsenic, lead, iron, phosphorus, manganese and selenium, above the reference values set by CONAMA Resolution 357/2005 for water bodies classified as Class 2, across the SF3 basin. Contamination of arsenic, lead and selenium has emerged as a consequence of the Brumadinho disaster, but high levels of aluminum, iron, phosphorus, and manganese had already been detected prior to 2019. From 2021, all the parameters discussed showed a decreasing trend in the upper reaches and an increasing trend in the lower reaches of the basin.

Keywords: Dam wall. Brumadinho. Water quality. Parapeba River. Environmental monitoring.

INTRODUÇÃO

Em 25 de janeiro de 2019 a barragem de contenção de rejeitos B1 da mina Córrego do Feijão, localizada no município de Brumadinho - MG, pertencente à empresa mineradora Vale S/A, rompeu. Inicialmente, a enxurrada com cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos atingiu as instalações da Empresa e percorreu o

Ribeirão Ferro-Carvão (Afluente do Rio Parapeba), atingiu propriedades particulares, até chegar à calha do Rio Parapeba. O fluxo de lama se espalhou por boa parte da bacia hidrográfica, até a Usina Hidrelétrica (UHE) de Retiro Baixo (IGAM, 2020a; Silva et al., 2020).

O rompimento dessa Barragem é dado como

um dos maiores crimes ambientais e desastres de trabalho já ocorridos no Brasil, totalizando 270 óbitos – desses, 127 (47%) eram trabalhadores diretos da Vale e os outros 118 (44%) terceirizados da empresa (Freitas et al., 2019). Tal evento provocou danos ambientais irreversíveis à qualidade do solo e das águas superficiais e subsuperficiais, provocando a destruição de 133,27 hectares de vegetação nativa do bioma

Mata Atlântica e 70,65 hectares de Áreas de Proteção Permanente (IBAMA, 2019).

Na figura 1 são apresentadas imagens de satélite da Mina Córrego do Feijão antes (a) e depois (b) do rompimento da barragem. É possível observar o rastro de lama de rejeito, rica em metais pesados, avançando sobre as instalações da mina, como os refeitórios e o prédio administrativo da empresa.



Figura 1 – Imagens de satélite com comparação do local antes e depois do local do rompimento da barragem B1 (Fonte: Google Earth (08/2018; 02/2019)).

A sub-bacia do Rio Paraopeba (UPGRH SF3) está inserida no contexto da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, ocupando 12.054 km² de sua área. A SF3 abrange 48 municípios, dos quais 35 possuem suas sedes municipais dentro da Bacia, entre eles Conselheiro Lafaiete, Betim e Brumadinho, totalizando uma população de 930.560 habitantes próximos aos corpos hídricos (IBGE, 2012).

O Rio Paraopeba, principal corpo hídrico da bacia, nasce na Serra do Espinhaço e percorre 510 km na direção NW-SE até desaguar na represa de Três Marias, e é dividida entre alto, médio e baixo curso, segundo o Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (COBRAPE, 2020). A bacia possui grande importância para o abastecimento de água público da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH). O conjunto de reservatórios Rio Manso, Serra Azul e Vargem das Flores formam o Sistema Paraopeba, que é responsável pelo abastecimento de 60% da RMBH, aproximadamente 3,5 milhões de pessoas (ANA, 2023; ARSAE, 2013).

O uso e ocupação do solo predominante na bacia é a pastagem, seguido pela formação florestal (MAPBIOMAS, 2020). As atividades agropecuárias da região desempenham papel expressivo no cultivo de diversas culturas, como milho, soja, feijão e café, além da criação de gado para produção de carne e leite. A região também é popularmente conhecida pela forte extração de minério de ferro, além da presença de indústrias metalúrgicas e do gerenciamento de resíduos e serviços.

O setor minerário se concentra principalmente no médio e alto curso, onde encontram-se as mineralizações do Quadrilátero Ferrífero (COBRAPE, 2020).

Segundo a classificação de Köppen, esta Bacia encontra-se em dois subtipos climáticos: Cwa e Cwb (Alvares et al., 2013). O subtipo Cwa, predominante na porção central da bacia, corresponde ao clima característico de invernos secos e verões quentes, com temperaturas acima de 22°C. Já o subtipo Cwb, descrito como subtropical de altitude, se diferencia pelo verão ameno, com temperaturas médias inferiores a 22°C o ano todo (COBRAPE, 2020).

A geomorfologia, geologia e pedologia da área incluem a Depressão do São Francisco, Planalto Centro-Sul Mineiro, o Quadrilátero Ferrífero os Planaltos do Leste de Minas.

Depressão do São Francisco é predominante no Baixo Paraopeba, na porção norte da bacia,

encontram-se as rochas do Grupo Bambuí, representado pelo Subgrupo Paraopeba (formações Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré), juntamente com a Formação Três Marias. Além de coberturas detrito-lateríticas ferruginosas (IBGE, 2004; IDE-SISEMA, 2020; CPRM, 2006).

A porção central da bacia é caracterizada pela região do Planalto Centro-Sul Mineiro e pelo Quadrilátero Ferrífero, com grandes altitudes e amplitudes topográficas, é a área de maior interesse econômico da região devido as rochas mineralizadas ricas em ferro (Formações ferríferas tipo Lago Superior) (Dorr, 1969; COBRAPE, 2020; CPRM, 2006).

Os Planaltos do Leste de Minas compreendem o alto curso da bacia, região de maiores altitudes e declividades aparentes, onde está o embasamento cratônico do São Francisco, com as rochas do complexo granito-gnáissico-migmatítico de idades arqueanas a neoarqueanas (Baptista et al., 2010; CPRM, 2006; IDE-SISEMA, 2020).

Em relação a pedologia, os Cambissolos Háplicos e os Latossolos Vermelho-Amarelos são as classes predominantes no alto e no baixo curso da bacia, já no médio curso são observados os Cambissolos Háplicos e Argissolos Vermelho-Amarelos (EMBRAPA, 2006). Estes solos presentes na área de estudo apresentam baixa fertilidade e são susceptíveis à erosão. Isto promove o uso de fertilizantes químicos para adubação nas áreas voltadas para a cultura agrícola, que podem causar contaminações nos corpos hídricos da bacia. Além disso, na área de estudo são encontrados alguns solos ricos em misturas de elementos metálicos, devido às formações geológicas da região.

Qualidade das Águas Superficiais

Os corpos hídricos do Estado de Minas Gerais são monitorados pelo Instituto de Águas de Minas Gerais – IGAM, por meio do projeto “Águas de Minas” com monitoramentos trimestrais nas principais bacias hidrográficas do Estado, divididas em 36 UPGRHS, que são unidades físico-territoriais, dentro das bacias hidrográficas, onde cada região apresenta características regionais físicas, sociais, políticas e econômicas próprias (IGAM, 2021a).

A base de dados utilizada para este estudo foi retirada do Repositório institucional do IGAM, pelo portal online InfoHidro, que está disponível com acesso livre ao público pelo link: <http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br>. Então, foram coletados dados das “Séries Histó-

ricas de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais do Estado de Minas Gerais”, posteriormente organizados em planilhas. O intervalo de tempo foi definido de 2017 a 2022, e buscou-se abranger informações antes e após o rompimento da Barragem do Córrego do Feijão.

O IGAM divide a porção da Bacia Hidrográfica do Paraopeba afetada pelo rompimento da barragem em cinco trechos distintos (Figura 3), para melhor definição e acompanhamento das estações ali presentes (IGAM, 2020c): os primeiros 40 km após a confluência com o Ribeirão Ferro

Carvão até a montante da termelétrica de Igarapé (Trecho 01); entre 40 e 123 km após a confluência com o Ribeirão Ferro Carvão (Trecho 02); entre 190 e 279 km após a confluência com o ribeirão Ferro Carvão até a montante da UHE Retiro Baixo (Trecho 03); a 318 km após a confluência com o Ribeirão Ferro Carvão (Trecho 04).

Foram selecionadas 09 estações para análise (BP029, BP036, BP070, BP072, BP078, BP082, BP083, BP090 e BP093), distribuídas ao longo dos trechos estabelecidos, para uma amostragem representativa da área de estudo (Figura 3).

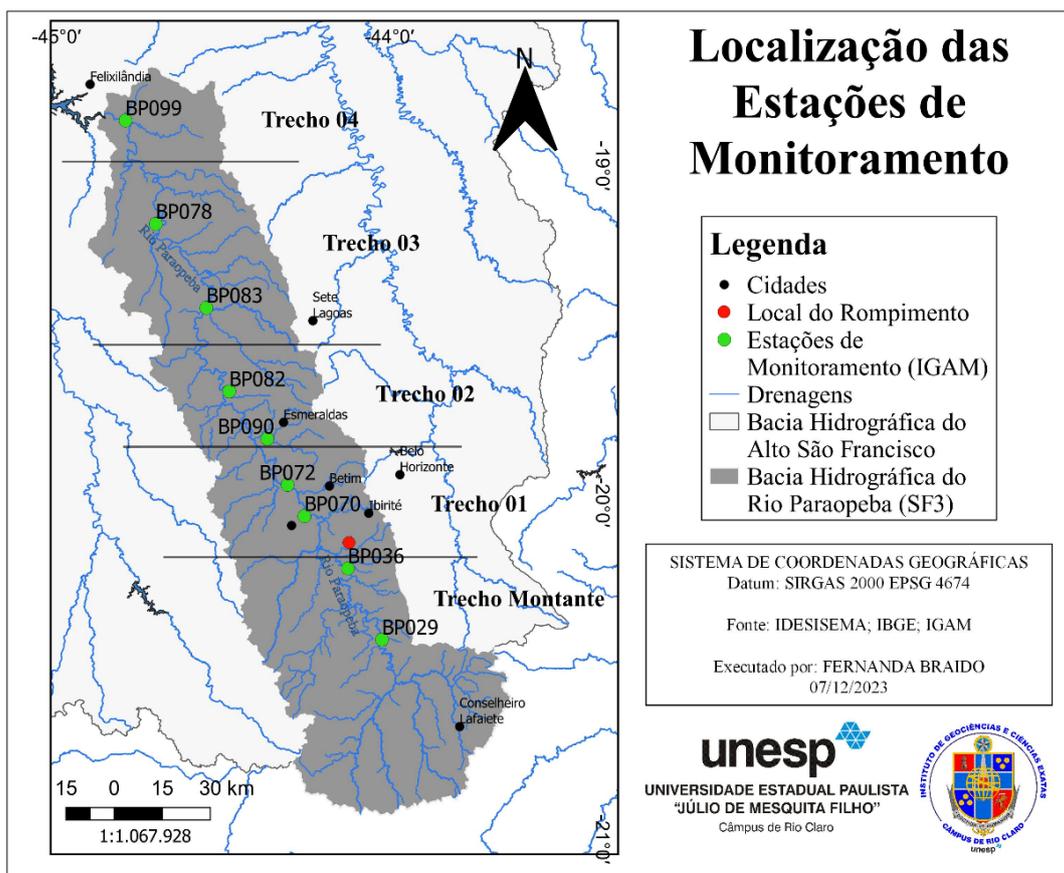


Figura 3 - Localização das estações de monitoramento selecionadas.

Com exceção da estação BP090 que se encontra no Ribeirão Grande (à montante de sua foz no Rio Paraopeba), todas as estações selecionadas localizam-se às margens do Rio Paraopeba, que dá o nome a Bacia Hidrográfica de estudo.

Para cada estação, foram selecionadas as amostragens tidas como completas no monitoramento, compondo 2 (duas) amostragens por ano.

Os mapas foram elaborados a partir de bases de dados disponíveis online gratuitamente, renderizados no Software QGis versão 3.16 e no software de edição de imagens Inkscape. As tabelas e gráficos elaborados para interpretação dos dados e análises estatísticas de tendências foram produzidos com uso do

aplicativo Microsoft Excel.

Foi adotada uma nova nomenclatura para as estações de monitoramento, para facilitar a disposição e a interpretação dos dados e resultados obtidos neste trabalho. Foi estabelecida uma sequência a partir da disposição espacial das estações de monitoramento em relação à barragem (Figura 4), seguindo os trechos definidos pelo IGAM para a bacia hidrográfica.

Neste trabalho foram caracterizados os impactos do rompimento da barragem do município de Brumadinho na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (SF3), para isto foram selecionados apenas parâmetros inorgânicos (metais), são eles: Alumínio dissolvido, Arsênio total, Cádmi total,

Chumbo total, Cobre dissolvido, Cromo total, Ferro dissolvido, Fósforo total, Manganês total,

Mercúrio total, Níquel total, Nitrato, Nitrito, Selênio total, Sulfato total, Sulfeto e Zinco total.

Estação IGAM	Nomenclatura utilizada	Distância da Barragem	Trecho	Localidade
BP029	P01	48 Km	Montante	Município de Belo Vale (MG)
BP036	P02	10 Km		Município de Brumadinho (MG)
BP070	P03	42 Km	Trecho 01	Município de Betim (MG), próximo a cidade de São Joaquim de Bicas
BP072	P04	59 Km		Divisa entre os municípios de Betim e Juatuba (MG)
BP090	P05	99,3 Km	Trecho 02	Município de Esmeraldas (MG)
BP082	P06	123 Km		Município de Esmeraldas (MG)
BP083	P07	192 Km	Trecho 03	Município de Paraopeba (MG)
BP078	P08	251 Km		Município de Pompeu (MG)
BP099	P09	328 Km	Trecho 04	Município de Felixlândia (MG), próximo da barragem de Três Marias

Figura 4 - Nomenclatura estabelecida para o trabalho em relação a distância da estação com a barragem.

As análises estatísticas foram divididas em duas etapas para estudo: temporal e espacial, a análise temporal foi organizada a partir de uma estação de monitoramento fixa, em que foi observada a evolução das concentrações dos parâmetros inorgânicos ao longo dos anos.

Para a análise espacial, foram escolhidas datas fixas e as estações dispostas de acordo com a respectiva distância em relação ao local do rompimento da barragem, o que possibilitou a análise da dispersão dos poluentes ao longo da

bacia hidrográfica.

Para determinar a conformidade das concentrações dos parâmetros inorgânicos analisados, foi adotada a Resolução CONAMA n° 357/2005, 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” (CONAMA, 2005). Portanto, foram utilizados os valores máximos definidos nesta resolução para corpos de água doce Classe 2.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos para as amostras coletadas nos períodos de seca (3° trimestre) foram nitidamente inferiores em comparação com os resultados obtidos para as amostras coletadas nos períodos chuvosos (1° trimestre). As chuvas atuam como agitadores, que colocam os sedimentos de fundo em suspensão, e conseqüentemente, cria a tendência de maiores concentrações dos elementos nos períodos chuvosos.

Em todas as amostragens disponibilizadas pelo IGAM, não foram obtidos resultados acima do limite de quantificação laboratorial (LQ) para Cádmiom total, Cobre dissolvido, Cromo total e Mercúrio total em nenhum ponto de amostragem selecionado.

Em relação ao mercúrio, vale ressaltar que em alguns estudos (BRASIL, 2020; IGAM, 2020b; Polignano, 2020; Ramos et al., 2020) realizados após o desastre de 2019, em áreas à jusante da barragem, foram identificadas concentrações do metal acima dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

O relatório do IGAM de acompanhamento da qualidade das Águas do Rio Paraopeba após 2

anos do rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão aponta que “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” (IGAM, 2021b). Este relatório também relata 05 registros de valores acima dos limites de Classe 2 para Cádmiom, nos municípios de Brumadinho, Mario Campos e São Joaquim de Bicas.

Esta divergência em relação às concentrações de cádmio e mercúrio encontradas neste trabalho e em outros estudos, possivelmente ocorre devido às diferentes formas de amostragem. A série histórica (base de dados utilizada neste estudo) não coleta sedimentos de fundo, ou qualquer tipo de material sólido, já os monitoramentos especiais realizados pelo IGAM e outros órgãos ambientais após o rompimento da barragem amostram tanto água quanto sedimentos de fundo dos corpos hídricos.

O período e local de coleta das amostras de água também devem ser levados em consideração para caracterizar esta divergência, uma

vez que as principais anomalias de mercúrio foram identificadas logo nos primeiros dias após o rompimento (Ramos et al., 2020), sendo a última violação do parâmetro identificada em março de 2019, em São Joaquim de Bicas, pelo IGAM (2020b).

Análise Temporal

Para uma maior compreensão da evolução da qualidade das águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, a primeira interpretação dos dados foi baseada na evolução temporal dos parâmetros, para cada estação de monitoramento. Desta forma, foi possível observar padrões de comportamento de alguns compostos em cada trecho da bacia.

Nesta etapa foi possível identificar que, previamente ao rompimento da barragem B1, ocorrida no município de Brumadinho em 2019, os corpos hídricos da SF03 já apresentavam indícios de contaminações de alumínio, ferro, fósforo e manganês. Porém, as altas concentrações dos elementos metálicos nas águas superficiais foram drasticamente intensificadas pelo desastre de 2019, que aumentou a concentração destes elementos em até 60 vezes, com referência a Resolução CONAMA N^o 357/2005. Além destes

elementos, foram identificadas altas concentrações de arsênio, chumbo e zinco a jusante do local do rompimento.

Foi observada uma forte tendência de atenuação das concentrações dos elementos inorgânicos, ao longo de toda a bacia hidrográfica, a partir de 2021 e 2022. Isto demonstra que, embora os valores ainda estejam acima da norma ambiental, as ações corretivas implementadas na região e a atenuação natural apresentaram resultados positivos.

Montante

Os pontos P01 e P02 correspondem as estações à montante do local do rompimento da barragem, e foram utilizadas como controle. Nestas estações foram identificadas concentrações de alumínio, ferro, fósforo e manganês acima dos valores de referência para Classe 2 (CONAMA, 2005).

Na figura 5 é possível observar a distribuição temporal destes resultados nos pontos P01 e P02. Estas anomalias estão distribuídas temporariamente de forma homogênea, ou seja, não é possível relacionar a variação das concentrações com o evento em Brumadinho, uma vez que não houve aumentos significativos após a data do rompimento.

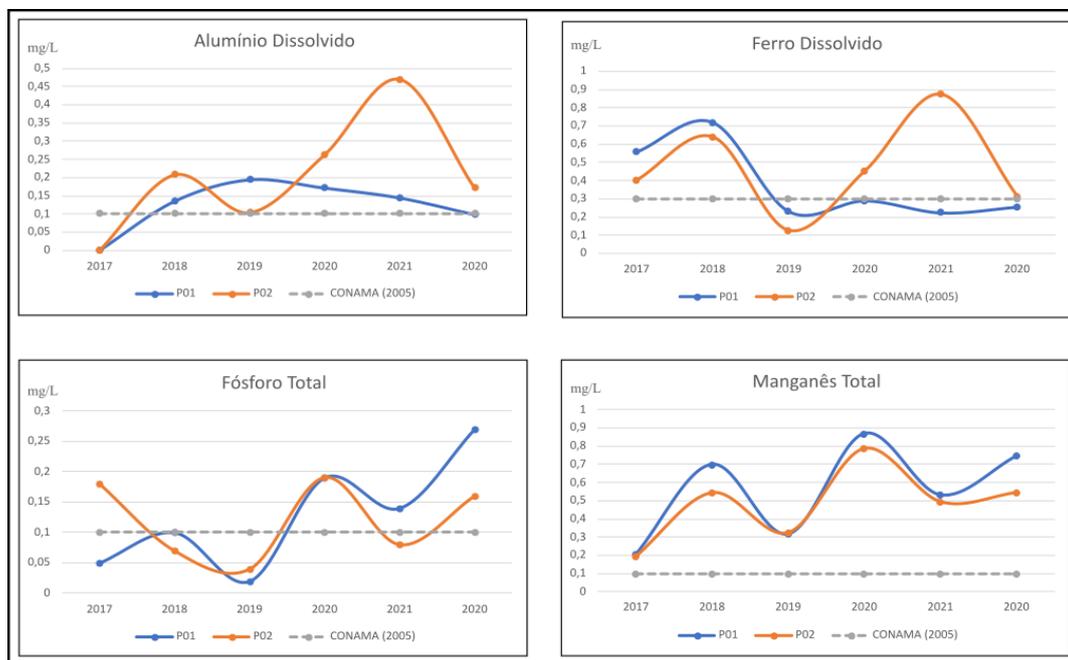


Figura 5 - Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P01 e P02.

Segundo Falqueto (2008) e Paganini (2008) as altas concentrações de fósforo nas águas superficiais ocorrem devido a lixiviação de fertilizantes agrícolas utilizados no entorno de um corpo hídrico ou devido lançamento de efluentes sanitários ou industriais.

A região da SF3 está inserida num contexto

geologicamente rico em elementos metálicos, e com a presença de latossolos ricos em alumínio e argilossolos ricos em ferro, com isso a área de estudo apresenta naturalmente altos teores destes elementos, tanto no solo quanto nos corpos hídricos, devido a sua lixiviação.

Portanto, as concentrações de ferro e alumínio

são provenientes do processo natural de erosão e lixiviação dos solos, devido as características geológicas e pedológicas locais.

Trecho 01

No Trecho 01 estão localizados os pontos de amostragem P03 e P04, os primeiros a serem diretamente afetados pelo rompimento da barragem.

Em ambas as estações foram identificadas concentrações de alumínio, chumbo, ferro, fósforo e manganês acima dos valores de referência, com comportamentos parecidos (Figura 6).

No ponto P04 também foi observada a concentração de arsênio acima do valor de referência.

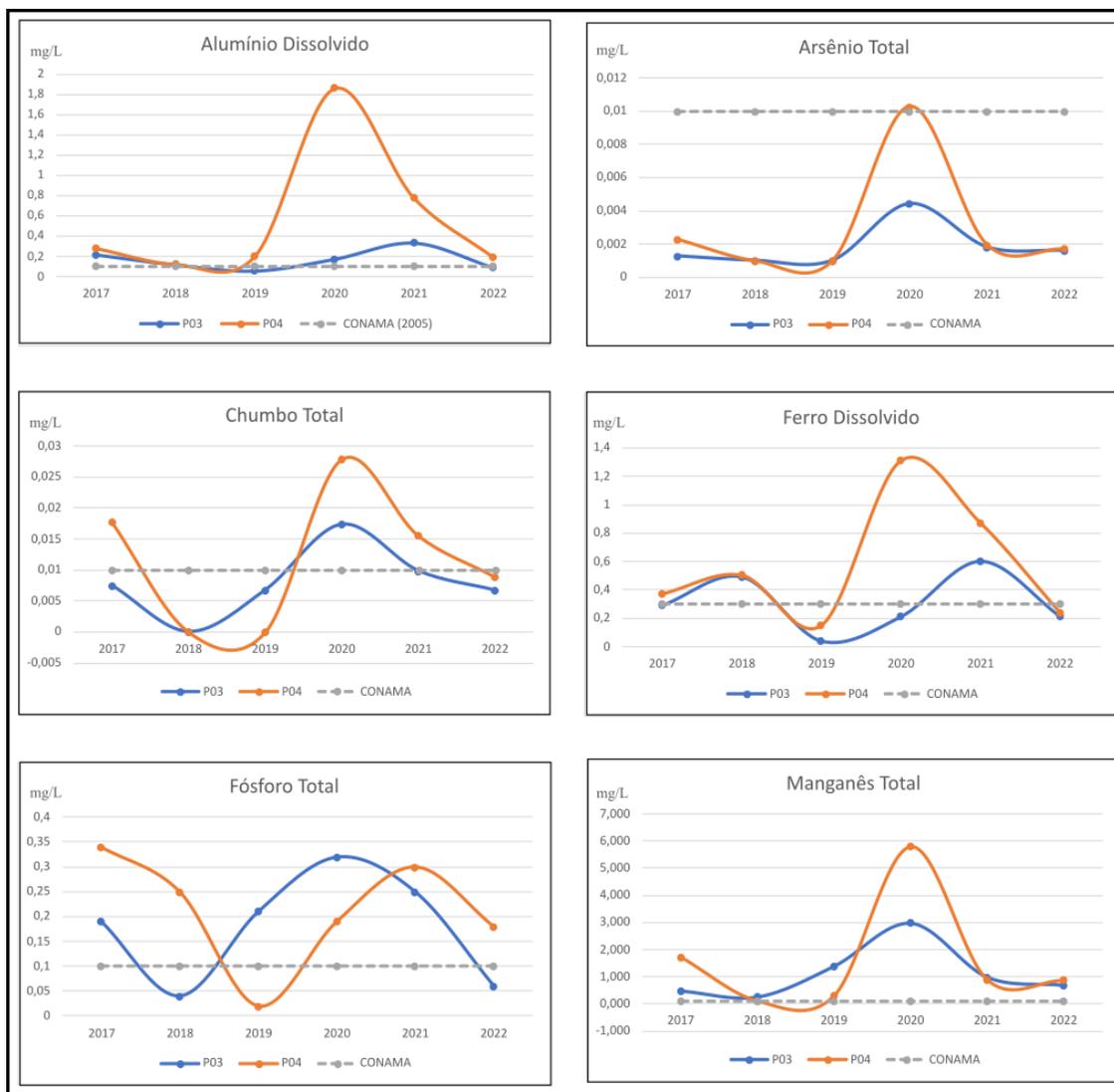


Figura 6 - Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P03 e P04

Ao observar os gráficos para alumínio, arsênio, chumbo, ferro e manganês percebe-se um comportamento semelhante entre os elementos, evidenciado pela ascensão abrupta nas concentrações a partir de 2019, atingindo seus valores máximos entre 2020 e 2021, seguida por uma posterior atenuação de seus valores.

Este comportamento evidencia que a área do Trecho 01, à jusante do local do rompimento da barragem B1, foi diretamente afetada pelo acidente, apresentando concentrações máximas de alumínio, arsênio, chumbo e ferro em 2020 e 2021, que estão relacionadas ao evento.

Interessante notar que o chumbo e o ferro já

apresentavam concentrações acima dos limites estabelecidos para o corpo hídrico antes de 2019, porém, após o evento de Brumadinho estas anomalias foram significativamente mais altas. Isto indica que o rompimento da barragem intensificou a situação destes compostos, que já caracterizavam uma situação de contaminação.

Ao analisar o comportamento das concentrações de fósforo ao longo dos anos é possível observar um certo “atraso” do P04 em relação ao P03, uma vez que ambos apresentam uma queda em sua concentração inicial, até atingir valores abaixo do LQ (em 2018 no P03 e em 2019 no P04), seguida por uma ascensão até atingir seus

maiores picos (em 2020 no P03 e em 2021 no P04), e posterior queda de suas concentrações novamente.

Pode-se dizer que as concentrações de fósforo observadas nestes pontos não são oriundas exclusivamente do rompimento da barragem, uma vez que já existiam anomalias anteriores a 2019.

Porém é notável o aumento significativo de fósforo após o ano de 2019, que atingiu um pico

de 0,32 mg/L no 1º Trimestre de 2020, no P03.

Trecho 02

O Trecho 02 compreende a região do município de Esmeraldas (MG), composto pelos pontos P05 e P06 do monitoramento. Neste trecho, os elementos que apresentaram concentrações acima dos valores de referência (CONAMA, 2005) foram: alumínio, chumbo, ferro, fósforo, manganês e zinco (Figura 7).

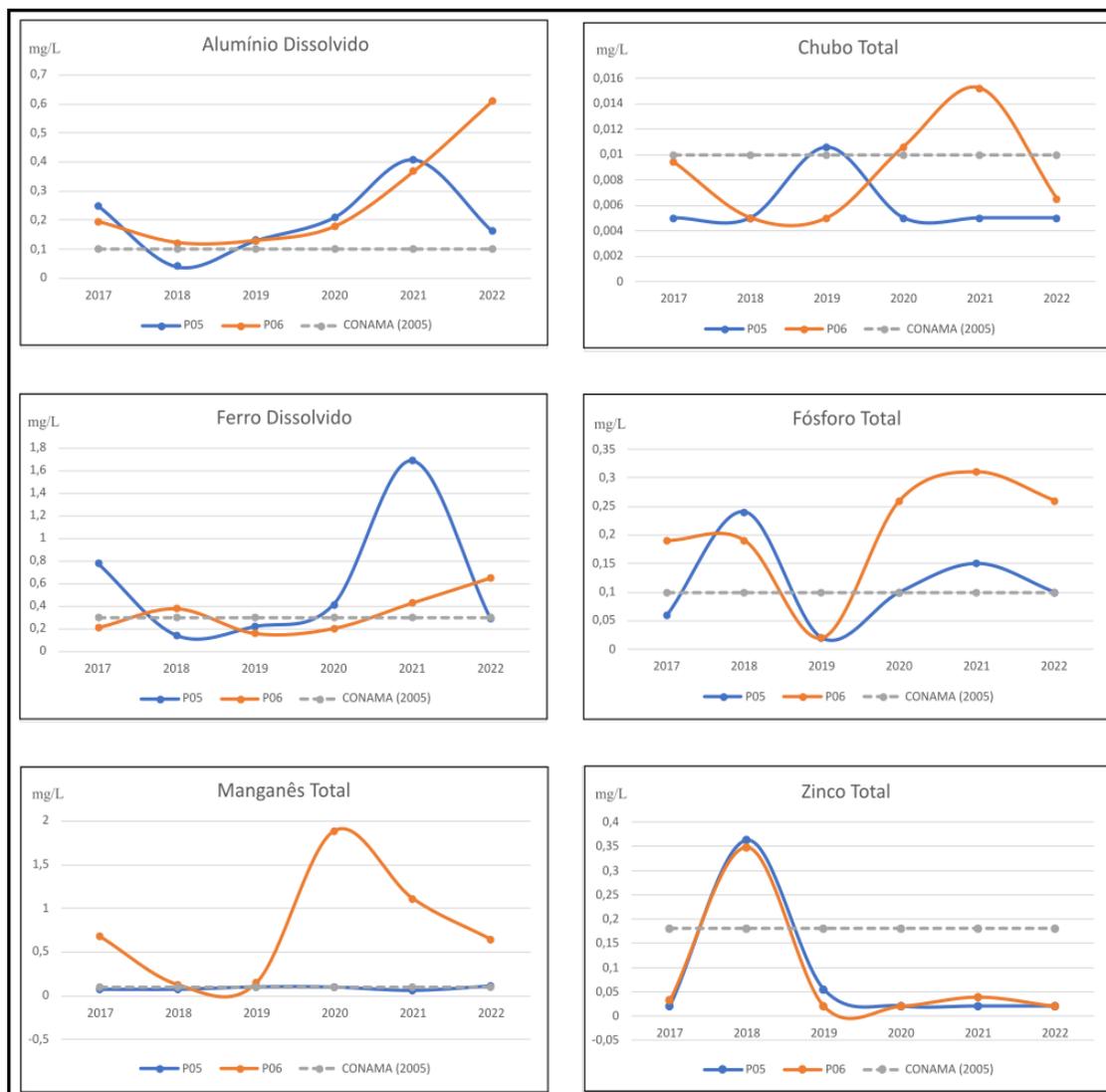


Figura 7 - Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P05 e P06

Diferentemente do trecho anterior, não foram obtidas concentrações acima dos valores de referência para o elemento arsênio, que apresentou apenas valores abaixo do LQ no P05, e concentrações traço no P06.

Devido a maior distância com o local do rompimento, as tendências observadas apresentam relações menos óbvias com o evento, em comparação com as amostragens do Trecho 01. A localização do P05 (Rio Grande) também influenciou diretamente nos resultados observados, pois as demais estações de monitoramento foram instala-

das às margens do Rio Paraopeba. Ainda assim, é possível observar uma correlação com o evento, principalmente para alumínio, ferro e manganês.

As concentrações de alumínio permaneceram acima do valor de referência a partir de 2019, com valores máximos extrapolando o valor de referência em 60 vezes, o que aponta uma importante questão de contaminação.

Nesse contexto, as concentrações de alumínio permanecerem tão altas mesmo depois de anos do evento, indica que as medidas corretivas nesta área não foram tão efetivas quanto em outras

regiões do Rio Paraopeba.

As concentrações de zinco também extrapolaram os valores de referência de forma bem sutil, neste caso apenas em 2018, portanto, a contaminação de zinco não possui relação com o evento de Brumadinho.

Ao observar os resultados para o elemento ferro, nota-se uma grande divergência entre os pontos de amostragem P05 e P06, e foi verificado que as maiores concentrações ocorreram a partir de 2020, porém as águas já estavam contaminadas por este elemento desde 2017 e 2018.

Os elementos fósforo e manganês apresentaram comportamentos semelhantes, com concentrações elevadas em 2017, porém com as maiores concentrações obtidas a partir de 2019, seguida de uma

atenuação.

Como observado em outras amostragens, este comportamento aponta a existência de fonte de contaminação previamente ao rompimento da barragem, que foi intensificada pelo evento de 2019, sendo mitigado ao longo do período estudado.

Trecho 03

O Trecho 03 localiza-se no município de Paraopeba (MG), caracterizado pelos pontos P07 e P08 da amostragem realizada. Neste trecho, os parâmetros alumínio, chumbo, ferro, fósforo, manganês, selênio e zinco apresentaram concentrações acima dos valores de referência (Figura 8). As anomalias de chumbo e selênio foram identificadas apenas no P08, de forma pontual.

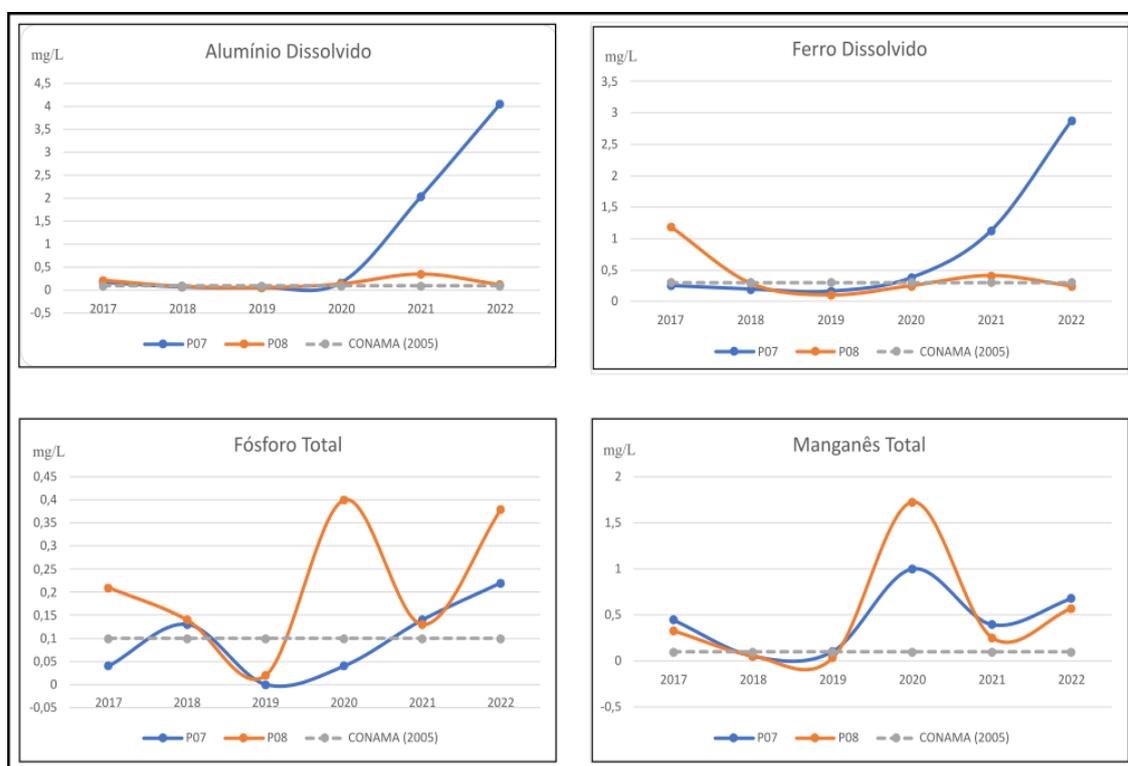


Figura 8 - Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P07 e P08.

O comportamento do alumínio e ferro são nitidamente semelhantes e ambos apresentam diferenças em relação aos pontos de monitoramento. No P07 os dois elementos permaneceram com concentrações constantes, muito próximas ao VR (0,1 mg/L e 0,3 mg/L, respectivamente), porém a partir de 2020 houve uma ascensão de ambos os parâmetros, que atingiram seus valores máximos em 2022. No P08 as concentrações também foram constantes, próximas aos respectivos VRs, e foram observadas oscilações em 2017 (ferro) e em 2021 (alumínio e ferro).

Os parâmetros fósforo e manganês também apresentam comportamento semelhante entre si (igualmente observado nos trechos anteriores): ambos apresentam concentrações elevadas em 2017 e 2018, porém com tendência de queda. A partir de 2019 estas concentrações crescem de forma acelerada, e atingem seus valores máximos em 2020. Em 2021, a concentração destes elementos cai novamente, e em 2022 voltam a ascender.

Em 2017, o selênio esteve acima do VR (0,014 mg/L) no P08, e no restante das amostragens realizadas não foram identificadas concentrações

deste elemento acima do LQ. Segundo Plant et al. (2005) altas concentrações de Selênio em corpos hídricos estão relacionadas a ambientes ácidos (em alguns casos afetados pela presença de drenagem ácida de mina), em que o elemento é lixiviado com maior facilidade para ambientes aquáticos.

O caso do elemento zinco é semelhante ao observado no trecho 02 para este elemento, que apresentou uma anomalia em suas concentrações de forma pontual, no 3º Trimestre de 2018. Posteriormente, em 2018 não foram encontradas concentrações acima do LQ. Portanto a anomalia de zinco observada nos trechos 02 e 03 não possuem relação com o evento de Brumadinho.

Trecho 04

O Trecho 04 é composto apenas por um ponto de amostragem (P09), localizado próximo a barragem Três Marias.

Por se tratar do trecho de maior distância em relação ao local da antiga barragem B1, esperava-se encontrar uma situação mais atenuada dos contaminantes.

Porém as concentrações de alumínio, ferro e manganês apresentaram concentrações acima dos valores de referência com comportamentos similares aos observados em outros trechos (Figura 9), ou seja, os valores máximos observados a partir de 2019 tiveram origem com o rompimento da barragem, a 328 km de distância.

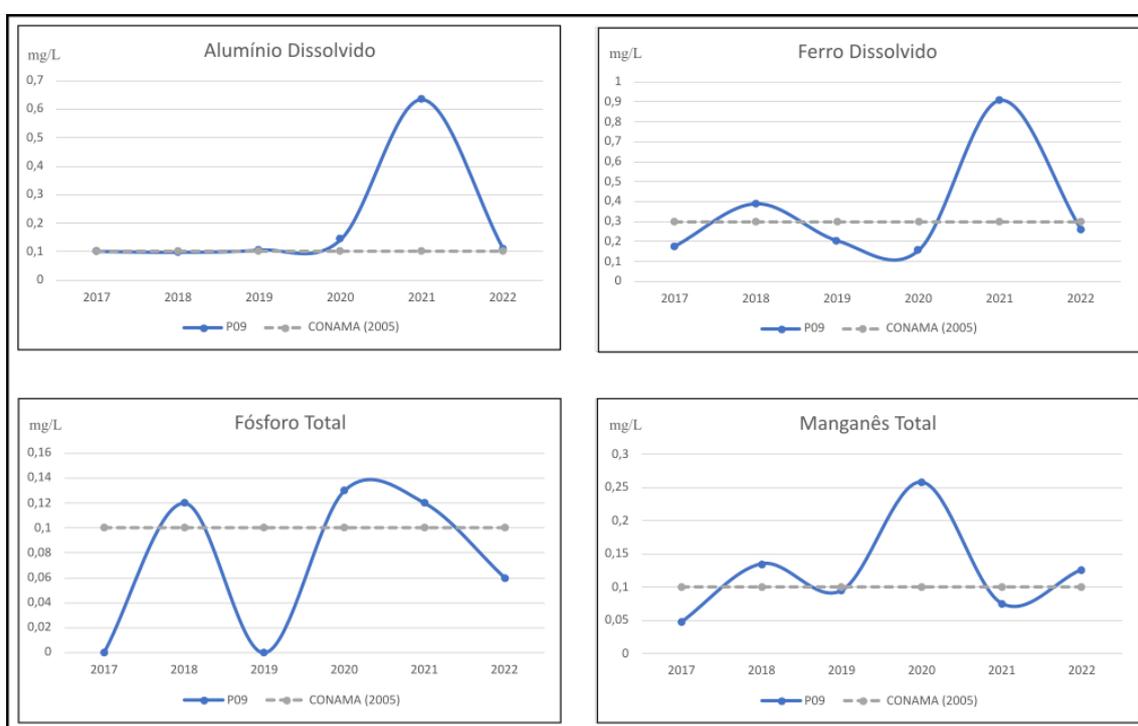


Figura 9 - Gráfico de tendência temporal dos principais compostos inorgânicos nos pontos P05 e P06

As concentrações de alumínio mantiveram-se constantemente próximas ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA N° 57/2005, em torno de 0,10 mg/L, e a partir de 2020 houve um aumento significativo, atingindo 0,63 mg/L em 2021.

Neste trecho houve uma única amostragem, no 3º Trimestre de 2018 que identificou uma anomalia de zinco (0,37 mg/L).

Os elementos ferro, fósforo e manganês apresentaram concentrações acima dos valores de referência em 2018, em 2019 todos apresentaram queda em seus valores, e a partir de 2020 atingiram suas concentrações máximas.

Análise Espacial

A análise espacial teve como objetivo caracte-

terizar a evolução dos contaminantes ao longo dos trechos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, para compreender a dispersão destes elementos ao longo de um corpo hídrico. O monitoramento foi dividido em três etapas (pré-rompimento, ano do rompimento e pós-rompimento), para possibilitar a compreensão dos impactos causados pelo desastre de 2019.

Pré rompimento

Devido ao uso e ocupação do entorno das águas do Rio Paraopeba, já existia na região importantes focos de contaminação, principalmente por alumínio, ferro, fósforo, manganês e pontualmente por chumbo. As concentrações de arsênio e zinco não ultrapassaram os valores de referência, neste período, em nenhum ponto da

bacia.

No ano de 2017 foram identificados 1,18 mg/L de ferro e 1,72 mg/L de manganês nas águas do Rio Paraopeba. A presença destes elementos nas águas superficiais está naturalmente associada à geologia da região, uma vez que o Quadrilátero Ferrífero compreende rochas ricas em minerais metálicos, que são naturalmente lixiviados para as águas superficiais.

Porém os valores obtidos no monitoramento ultrapassam o que poderia ser considerada como uma simples presença natural e passam a caracterizar uma situação de contaminação, possivelmente por efluentes industriais líquidos, esgoto sanitário urbano ou uso de defensivos agrícolas.

Ano de 2019

As amostragens realizadas no ano de 2019 podem trazer informações distorcidas, pois algumas delas foram realizadas semanas ou dias antes do rompimento da barragem, ou alguns meses depois. Portanto, este período do monitoramento não apresentou resultados claros e objetivos.

Pós rompimento

Nos anos de 2020, 2021 e 2022 foi possível

observar as tendências dos principais elementos contaminantes presentes na área de estudo. Os gráficos gerados apontam importantes informações de como as contaminações se distribuíram ao longo da bacia, e como ocorreu sua dispersão ao longo do curso do Rio Paraopeba após o desastre em Brumadinho.

Na figura 10(a) estão dispostas as concentrações de arsênio ao longo da SF3 em 2020, 2021 e 2022. Foi identificada apenas um evento em que as concentrações deste elemento extrapolaram (de forma muito sutil) os valores de referência, que ocorreu no P04 em 2020. O restante das amostragens permaneceu abaixo do VR, ou abaixo do limite de quantificação laboratorial.

Na figura 10(b) estão dispostas as concentrações de chumbo na Bacia. Da mesma forma que o arsênio, apenas em 2020 foram obtidas concentrações acima do valor de referência, sendo os pontos P04 e P08 os principais picos deste contaminante. No ano de 2021 não foram encontrados valores acima do LQ, e em 2022, foram encontradas apenas concentrações traço deste elemento.

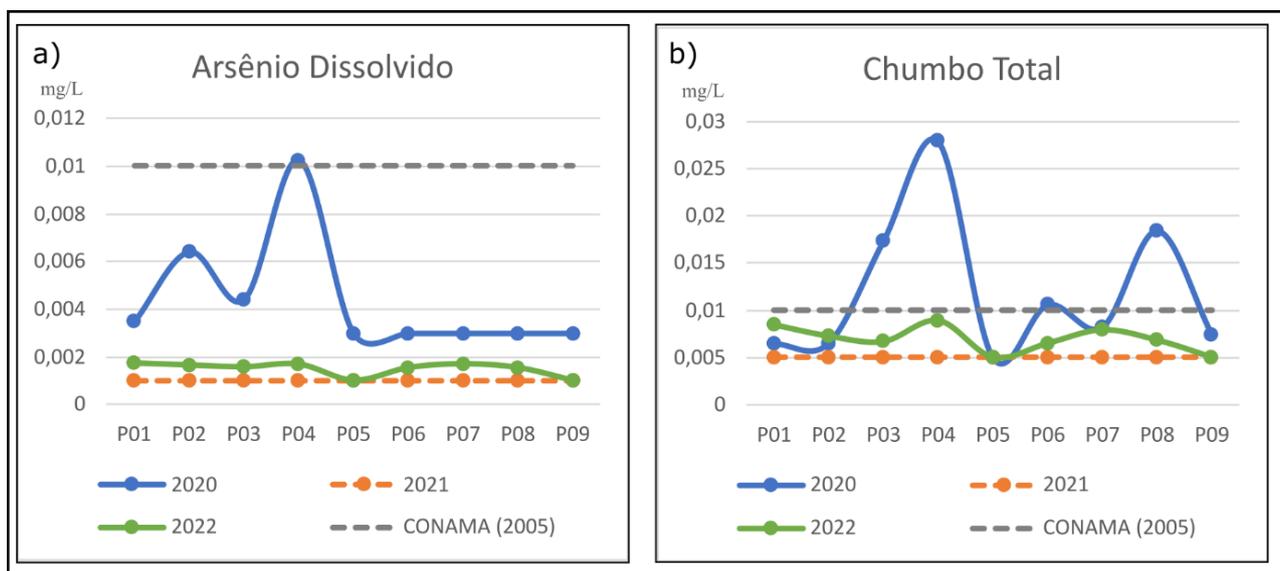


Figura 10 - Evolução das concentrações de a) Arsênio Dissolvido; b) Chumbo Total ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.

Os elementos alumínio, ferro, fósforo e manganês apresentaram comportamentos semelhantes (Figura 11).

No ano de 2020 as maiores concentrações destes elementos estavam localizadas principalmente no Trecho 01 (P03 e P04), com altíssimos teores, extrapolando os valores de referência em 10 vezes (no caso do alumínio) até 60 vezes (no caso do manganês). Em 2021 houve uma

atenuação da contaminação de todos estes elementos, que apresentaram concentrações relativamente próximas aos valores de referência, e os trechos 03 e 04, em sua maioria, não ultrapassaram tais valores.

Já em 2022 observa-se um grande foco de contaminação de todos estes elementos, no trecho 03 (P07), que extrapola o valor de referência em até 50 vezes.

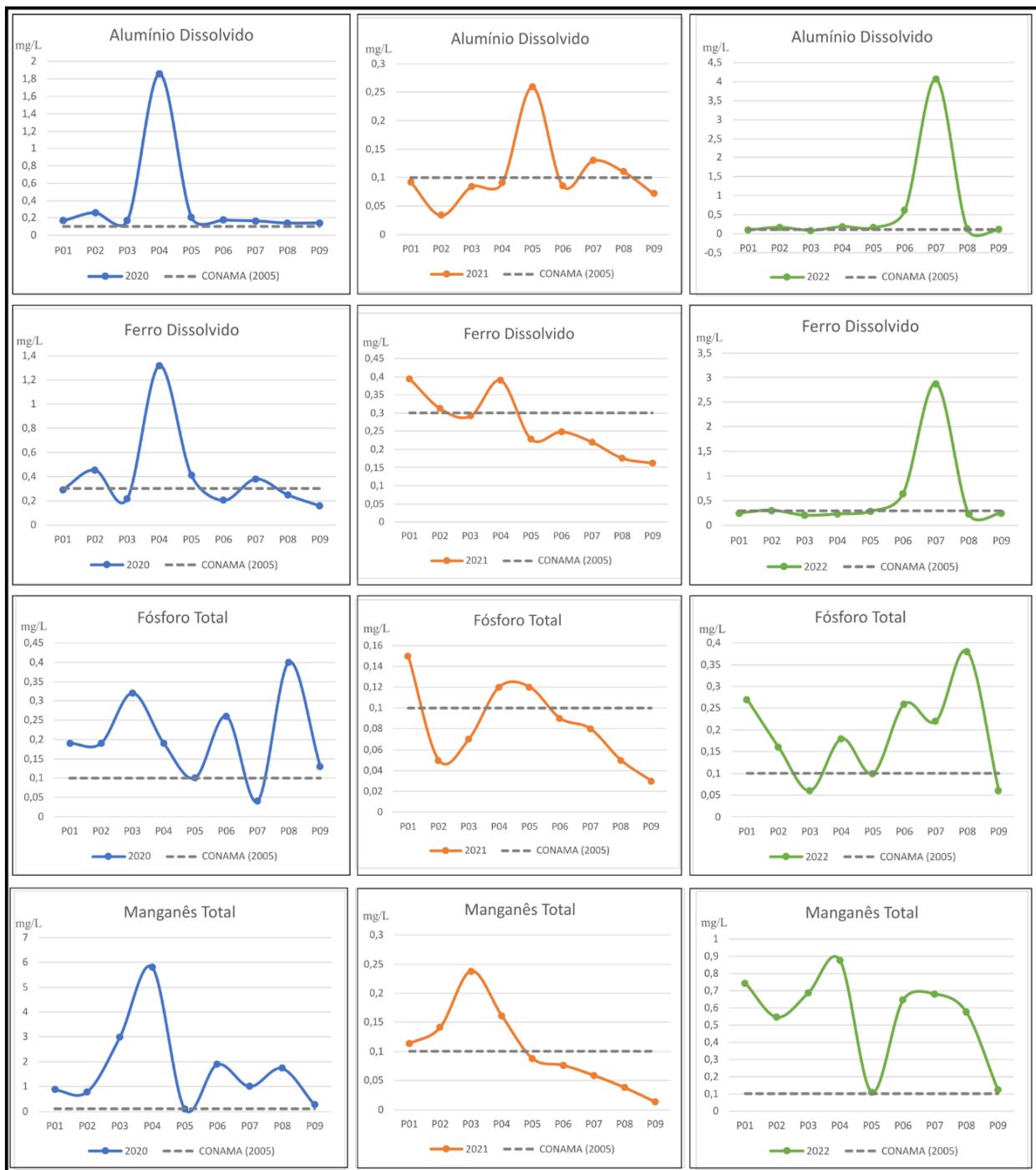


Figura 11 - Evolução das concentrações de arsênio dissolvido, alumínio dissolvido, ferro dissolvido, fósforo total e manganês total ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.

Em 2020, o pico da contaminação de alumínio estava no P04 (Trecho 01), em 2021 avançou para o P05 (Trecho 02) de forma bem atenuada, em 2022 as concentrações de alumínio atingiram a maior concentração observada durante todo o período de monitoramento no Trecho 03.

No ano de 2020, a maior concentração de ferro ocorreu no P04 (Trecho 01), nos pontos P02 (montante), P05 (Trecho 02) e P07 (Trecho 03). Em 2021, todos os pontos de monitoramento relataram altos teores de ferro, em especial o P01 (Montante) e P04 (Trecho 02). Já em 2022 a

contaminação por ferro ficou acumulada apenas no P07 (Trecho 03), com maior concentração obtida para este elemento durante o monitoramento.

O fósforo apresentou maiores concentrações em 2020 nos pontos: P03 (Trecho 01), P06 (Trecho 02) e P08 (Trecho 03), em 2021 apenas três estações ultrapassaram os valores de referência, sendo elas o P01 (Montante), P04 (Trecho 01) e P05 (Trecho 02). Pode-se observar que, em 2021 as estações no baixo curso da bacia (Trechos 03 e 04) apresentaram forte tendência

de queda das concentrações de poluentes, conforme a proximidade com a foz.

No ano de 2022, as concentrações de fósforo voltam a predominar ao longo de toda a bacia, sendo seus principais picos de contaminação localizados nos pontos P01 (Montante), P04 (Trecho 01), P06 (Trecho 02) e P08 (Trecho 03).

A primeira informação que se destaca em relação ao manganês é o ponto de monitoramento P05, que apresentou baixas concentrações em todos os anos de amostragem, uma vez que esta estação está às margens do Ribeirão Grande, diferente das outras estações que se encontram no

Rio Paraopeba.

Os maiores picos de manganês, em 2020, ocorreram no P04 (Trecho 01), P06 (Trecho 02) e P08 (Trecho 03). Em 2021, apenas as estações P01 a P04 apresentaram concentrações acima do valor de referência, já em 2022, a maior concentração obtida foi no P04 (Trecho 01) e nos pontos P06 a P08 (Trecho 02 e 03).

Durante o intervalo de 2020 até 2022 foram identificadas apenas duas concentrações traço (abaixo dos valores de referência) de zinco, ambas em 2020: no P02 (Montante) e no P04 (Trecho 01).

CONCLUSÕES

Devido às formações geológicas e as características pedológicas da área da bacia, predominantemente mineralizada e rica em elementos metálicos, as altas concentrações de alumínio e ferro observadas antes da data do rompimento são oriundas, em parte, de características naturais do meio. As águas do Rio Paraopeba recebem elementos metálicos a partir da lixiviação do solo e das rochas, o que enriquece as águas superficiais e subterrâneas com estes elementos. Porém foram observadas concentrações acima dos valores de referência para estes elementos, portanto as atividades antrópicas realizadas no entorno, antes do rompimento da barragem, já causavam anomalias nos corpos hídricos da bacia.

O monitoramento em 2019 traz dados um tanto quanto confusos e contraditórios, uma vez que o monitoramento padrão do IGAM ocorreu na semana do rompimento da barragem em Brumadinho. Portanto, algumas anomalias foram identificadas apenas no 3º Trimestre de 2019, e em sua maioria, foram observadas nos gráficos gerados somente no ano de 2020. Para obter uma análise concreta e verídica deste período, é necessário utilizar os dados do monitoramento especial realizado pelo IGAM, que monitorou diariamente águas superficiais e sedimentos de fundo, após o rompimento.

Ao observar o comportamento do elemento zinco, foi identificada uma anomalia no 3º Trimestre de 2018, em todos os pontos de amostragem. Não foi possível encontrar uma justificativa para tal fato, sendo necessário um estudo detalhado a respeito do uso da terra na região, e eventos que ocorreram próximos deste período, que explicasse esta anomalia.

Foram identificados pontos com concentrações

elevadas de fósforo espalhados ao longo da SF3, o que indica uma grande dispersão deste elemento nas águas. Altos teores de fósforo normalmente estão associados ao uso e ocupação no entorno dos corpos hídricos, como o lançamento de efluentes industriais, esgoto sanitário ou uso de fertilizantes agrícolas.

No Trecho 01 do monitoramento (P03 e P04), os resultados obtidos apontam uma divergência significativa dos resultados obtidos nos pontos de amostragem, onde o P04 apresentou concentrações maiores em relação ao P03. Esta divergência pode estar relacionada a fatores externos, como a presença de alguma fonte poluidora próxima entre os pontos.

O impacto do rompimento da barragem B1 na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba é indiscutivelmente um aspecto ambiental importante de se observar cautelosamente. A presença de metais pesados em concentrações acima do ideal foi observada ao longo de toda a bacia, principalmente a partir de 2019 (pós desastre), em até 60 vezes os valores de referência adotados para corpos d'água Classe 2 (CONAMA, 2005).

Pode-se dizer que a SF3 já estava em desconformidade com os padrões de qualidade de água superficial, em relação aos parâmetros Alumínio dissolvido, Ferro dissolvido, Fósforo total e Manganês total. O rompimento da barragem B1 no município de Brumadinho em 2019 intensificou estas anomalias pré-existentes na região, além de inserir metais pesados nas águas, como arsênio, chumbo e zinco.

A maioria dos elementos analisados apresentou tendência de queda nas estações de monitoramento do alto curso da bacia. Este comportamento indica uma migração dos contaminantes

para as regiões do baixo curso, próximo à represa de Três Marias. Conforme os elementos são dissipados ao longo de uma grande área, as atividades para contenção destes elementos e a implantação de medidas corretivas ficam cada vez mais complexas e caras. Portanto, quanto mais

o tempo passa, mais os contaminantes vão se dispersar ao longo dos corpos hídricos, por uma área cada vez maior, e mais complexos ficarão os planos de recuperação ambiental dos impactos causados pelo rompimento da barragem, em Brumadinho.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Tradução. Disp. em: <http://www.ingentaconnect.com/content/schweiz/mz/2013/00000022/00000006/art00008?token=004f1a11bab2a729bc7e41225f40382d2c2b4652767446624550576b34272c5f7b3d6d3f4e4b34a>.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios: Paraopeba**. Brasília (DF), 2023. Disp. em: [https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/paraopeba#:~:text=O%20conjunto%20de%20reservat%C3%B3rios%20Rio,de%20Belo%20Horizonte%20\(RMBH\).?](https://www.ana.gov.br/sar/outros-sistemas-hidricos/paraopeba#:~:text=O%20conjunto%20de%20reservat%C3%B3rios%20Rio,de%20Belo%20Horizonte%20(RMBH).?). Acesso em: 19 jun. 2023.
- ARSEA - MG - AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Relatório de Fiscalização: Sistema Integrado de Abastecimento de Água da RMBH**. Belo Horizonte, 2013. Disp. em: http://arsae.mg.gov.br/images/documentos/rf_tec_op_saa_sis_tema_bacia_paraopeba.pdf. Acesso em: 19 jun. 2023.
- BAPTISTA, M.C.; SILVA, S.F.; DANTAS, M. **Aspectos gerais do meio físico. Geodiversidade do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, p. 15-34, 2010. Disp. em: https://www.researchgate.net/publication/309351371_Aspectos_gerais_do_meio_fisico_do_Estado_de_Minhas_Gerais. Acesso em 22 jun. 2023.
- BRASIL - Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **“Um ano do desastre da Vale**. Organização e resposta do Ministério da Saúde”. Boletim Epidemiológico, Ministério da Saúde, v. 51, n. esp., p. 1-35, jan 2020 Disp. em: <http://www.saude.gov.br/boletins-epidemiologicos>. Acesso em 20 de outubro de 2023.
- COBRAPE – COMPANHIA BRASILEIRA DE PROJETOS E EMPREENDIMENTOS. **Plano de ação e diretrizes e critérios para aplicação dos instrumentos de gestão dos recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba**. 2020.
- CONAMA. BRASIL, Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005. **Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional**.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geodiversidade do Brasil. escala 1: 2.500. 000**. 2006
- DORR, J.V.N. **Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil**. US Government Printing Office, 1969.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- FALQUETO, M.A. **Avaliação do índice de qualidade da água (IQA) e dos elementos químicos nas águas e nos sedimentos do rio Corumbataí, SP**. 2008. Piracicaba. 117 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.
- FREITAS, C.M.; BARCELLOS, C.; HELLER, L.; LUZ, Z.M. P. **Desastres em barragens de mineração: lições do passado para reduzir riscos atuais e futuros**. Epidemiol. Serv. Saúde, Brasília, v. 28, mar. 2019. Disp. em http://scielo.iec.gov.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-49742019000100029Ing=pt&nrm=iso. Acesso em: 12 jun. 2023.
- IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Nota Técnica n° 5/2019/Nubio-MG/Ditec-MG/Supes-MG**. [S.l.], p. 3, 2019.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de Biomas do Brasil, primeira aproximação. 2004**. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 03 jun. 2023
- IDE-SISEMA - INFRAESTRUTURA DE DADOS ESPACIAIS DO SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Ottotrechos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco. Belo Horizonte: ANA/IGAM**, 2020. Dado em formato vetorial (shapefile). Disp. em: <https://ide-sisema.meioambiente.mg.gov.br/>. Acesso em: 05 jun. 2023.
- IGAM - 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 1 ano do rompimento da Barragem da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA–Brumadinho/MG**. Belo Horizonte: IGAM, 2020a. Disp. em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3847>. Acesso em 30 mai. 2023.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Avaliação da qualidade das águas superficiais de Minas Gerais em 2020: resumo executivo anual**. Belo Horizonte: Igam, 2021a. Disp. em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4001>. Acesso em 06 jun. 2023.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Caderno Especial de 2021. 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: Igam, 2021b. Disp. em: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3849>. Acesso em 04 de outubro de 2023.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Informativo trimestral dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do rio Paraopeba, após o desastre na barragem b1 no Complexo da mina córrego feijão da mineradora Vale/Sa de brumadinho-Minas Gerais**. Belo Horizonte: Igam, n. 59, maio., 2020b. 314 p. Disp.: <http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3854>. Acesso em 23 de outubro de 2023.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Monitoramento Hidrometeorológico da Bacia do Rio São Francisco em Minas Gerais e Distrito Federal: Relatório de avaliação dos resultados de 2010 e 2011**. Belo Horizonte: Igam, 2011. 168 p. Disp.: <http://10.47.16.18:8080/jspui/handle/123456789/955>. Acesso em 07 de dezembro de 2023
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba: RF01: Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba - SF3. Belo Horizonte: Igam, 2020c**. Disp.: <https://www.pdrhparaopeba.com/>. Acesso em: 06 de junho de 2023.

- MAPBIOMAS. **Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomias)**. 2020. Disp.: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- PAGANINI, W.S. **A identidade de um rio de contrastes: o Tietê e seus múltiplos usos**. 2ed. São Paulo: ABES, AESABESP, 2008. 171p.
- PLANT, J.A. KINNIBURGH, D.G., SMEDLEY, P.L.; FORDYCE, F.M.; KLINCK, B.A. Arsenic and selenium. **Environmental geochemistry**, v. 9, p. 17-66, 2005.
- POLIGNANO, M.V. & LEMOS, R.S. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba. **Ciência e Cultura**, v. 72, n. 2, p. 37-43, 2020.
- RAMOS, A.M. SILVA, L.S.; LIMA, T.G.; MARQUES, G.L.; GONTIJO, H.M. Monitoring the water quality of the Paraopeba river and surroundings after the breakage of the waste dam in Brumadinho, Minas Gerais, Brazil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020.
- SILVA, M, A.; FREITAS, C.M.; XAVIER, D.R.; ROMÃO, A.R. Sobreposição de riscos e impactos no desastre da Vale em Brumadinho. **Ciência e Cultura**, v. 72, n. 2, p. 21-28, 2020.

Submetido em 1º de fevereiro de 2024

Aceito para publicação em 22 de maio de 2024