

RELATÓRIO TRIMESTRAL DOS DANOS CAUSADOS PELO ROMPIMENTO SOBRE FATORES BIÓTICOS E ABIÓTICOS DA REGIÃO 3

ABRIL

2021

Ficha Técnica

GERÊNCIA SOCIOAMBIENTAL

Irla de Paula Stopa Rodrigues

Gerente Socioambiental

Bióloga e Doutoranda em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (UFMG)

Adriana Assunção de Carvalho

Especialista Sênior Socioambiental

Bióloga e Mestre em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (UFMG)

Dayane Lopes Pinto

Especialista Pleno Socioambiental

Engenheira Florestal e Mestre em Ciência Florestal (UFV)

Lucas Grossi Bastos

Especialista Pleno Socioambiental

Geógrafo e Mestre em Geografia - Organização do Espaço (UFMG)

Ramon Neto Rodrigues

Especialista Pleno Socioambiental

Engenheiro Ambiental e Mestre em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (UFMG)

GERÊNCIA DE QUALIDADE DA ÁGUA E AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE

Lauro Magalhães Fráguas

Gerente - Qualidade da Água e Avaliação de Risco à Saúde

Engenheiro Ambiental. (UFV) e Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais (UFMG)

Matheus de Brito Correa

Especialista Pleno - Qualidade da Água e Avaliação de Risco à Saúde

Engenheiro Ambiental (UFV)

Paula Laranja Leal de Mattos Pereira

Assessora III - Qualidade da Água e Avaliação de Risco à Saúde

Engenheira Ambiental, Mestre em Engenharia Civil (UFV)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estações de monitoramento de qualidade da água do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) na Região 3.	15
Figura 2: Concentrações de alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês total na estação BP082.....	16
Figura 3: Concentrações de alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês total na estação BP083.....	16
Figura 4: Concentrações de alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês total na estação BP077.....	17
Figura 5: Concentrações de alumínio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total e arsênio total na estação BPE3.....	17
Figura 6: Valores percentuais de conformidade e não conformidade de amostras de água subterrânea em municípios da Região 3 (padrão microbiológico).	19
Figura 7: Valores percentuais de conformidade e não conformidade de amostras de água subterrânea em municípios da Região 3 (padrão organoléptico).	21
Figura 8: Valores percentuais de conformidade e não conformidade de amostras de água subterrânea em municípios da Região 3 (padrão organoléptico).	22
Figura 9: Quantidade de não conformidade de amostras de água subterrânea em municípios da Região 3 (padrão de substâncias químicas com risco à saúde).	23
Figura 10: Comparação das medianas de teor de Silte (%) com diferença significativa entre amostras de solo de PAF e PC e mediana maior entre os PAF nas Unidades de Paisagem da Região 3.	26
Figura 11: Número de pontos em que as amostras de solo apresentaram um ou mais elementos químicos que ultrapassaram os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA N° 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM n ° 166/2011.....	28
Figura 12: Distribuição dos pontos de coleta de solo e classificação nas Classes de Qualidade do Solo de acordo com a Resolução CONAMA 420/2009. Parte I - Setor norte da área de estudo.....	30
Figura 13: Distribuição dos pontos de coleta de solo e classificação nas Classes de Qualidade do Solo de acordo com a Resolução CONAMA 420/2009. Parte 2 - Setor central da área de estudo.....	31
Figura 14: Distribuição dos pontos de coleta de solo e classificação nas Classes de Qualidade do Solo de acordo com a Resolução CONAMA 420/2009. Parte 3 - Setor sul da área de estudo.....	32

Figura 15: Número de pontos amostrais da Região 3 no qual os teores de Cromo excederam os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA Nº 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM no 166/2011.....	33
Figura 16: Número de pontos amostrais da Região 3, no qual os teores de Níquel excederam os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA Nº 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM no 166/2011.....	36
Figura 17: Número de pontos amostrais da Região 3 no qual os teores de Bário excederam os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA Nº 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM no 166/2011.....	38
Figura 18: Número de pontos amostrais da Região 3 no qual os teores de Cobalto excederam os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA Nº 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM no 166/2011.....	40
Figura 19: Comparação das medianas de Ferro (mg/kg) e Manganês (mg/kg) que apresentaram, simultaneamente, diferença significativa entre amostras de solo de PAF e PC e mediana maior entre os PAF nas Unidades de Paisagem da Região 3.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Publicações científicas, e seus respectivos elementos analisados, utilizados para composição deste relatório trimestral.....	9
Tabela 2: Parâmetros amostrados durante atividade de campo após o rompimento da barragem.....	10
Tabela 3: Concentrações de elementos em amostras de água após o rompimento da barragem.....	11
Tabela 4: Concentrações de elementos em amostras de sedimento após o rompimento da barragem.....	12
Tabela 5: Parâmetros amostrados durante atividade de campo após o rompimento da barragem.....	13
Tabela 6: Número de amostras de água coletadas por municípios abrangidos na Região 3.....	18
Tabela 7: Valores máximos e médios de concentrações de substâncias químicas com risco à saúde, nos municípios pertencentes à Região 3.....	24
Tabela 8: Distribuição e número de pontos que excederam o Valor de Prevenção (VP) para o elemento Cromo na Região 3.....	34
Tabela 9: Distribuição e número de pontos que excederam o Valor de Prevenção (VP) para o elemento Níquel na Região 3.....	37
Tabela 10: Distribuição e número de pontos em que as amostras de solo excederam o Valor de Referência de Qualidade (VRQ) e Valor de Prevenção (VP) para o elemento Bário na Região 3.....	39
Tabela 11: Grupos de solo com possível incremento e alteração da condição natural nos PAF, definidos pela ocorrência simultânea de diferença estatisticamente significativa na concentração do metal entre os tipos de pontos e mediana da concentração do metal maior.....	44
Tabela 12: Concentração de elementos traço (mg/kg) em amostras de macrófitas do rio Paraopeba nas seções a montante da entrada de rejeitos (-34 a -12 km), a jusante do impacto (2,8-38 km), a jusante do rio Betim (58-247 km), reservatório Retiro Baixo (291-309 km)...	48
Tabela 13: Concentração de elementos traço (mg/kg) e incerteza expandida relativa (U) em amostras de peixes do rio Paraopeba a montante da entrada de rejeitos, a jusante do impacto (2,8-38 km), a jusante do rio Betim (58-247 km), reservatório Retiro Baixo.....	55

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. PERCURSO METODOLÓGICO	7
3. RESULTADOS	9
3.1 ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS.....	9
3.2 ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	18
3.3 SOLOS.....	25
3.4 QUALIDADE DO AR E POEIRA DOMICILIAR	46
3.5 ESPÉCIES VEGETAIS E PRODUTOS DERIVADOS	47
3.6 ANIMAIS DOMÉSTICOS E PRODUTOS DERIVADOS	50
3.7 ICTIOFAUNA	50
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1. INTRODUÇÃO

No campo científico, estudos que buscam compreender algum fenômeno ou situação desconhecida, e/ou realizar uma nova leitura, precisam, quase obrigatoriamente, apresentar uma primeira etapa exploratória. Pesquisas exploratórias são fundamentais para a definição exata do objeto de estudo e a obtenção de dados preliminares que ajudam a identificar lacunas de informações, propiciando um olhar crítico sobre o fenômeno e a proposição de hipóteses (CHOY, 2014). Além disso, são excelentes fontes de informação para fomentar proposições novas, visto que podem trazer um olhar mais amplo sobre o objeto de estudo, reduzindo gastos com informações já coletadas e maximizando o poder preditivo (BOSLAUGH, 2007).

Visando fazer essa leitura preliminar da situação dos fatores bióticos e abióticos da Região 3 após o rompimento da Barragem BI da Mina Córrego da Feijão, a Assessoria Técnica - ATIR3/NACAB produziu um diagnóstico completo sobre os danos aos fatores ambientais dessa região. Este diagnóstico apresenta os principais danos já identificados aos recursos naturais da região e possíveis cenários de danos com bases em contextos de rompimentos semelhantes. Porém, devido à dinâmica temporal de estudos ambientais, é importante continuar monitorando os novos dados produzidos por órgãos públicos e instituições de pesquisa, de modo a atualizar as informações preliminares levantadas.

Dessa forma, este relatório apresenta os novos dados levantados pela ATIR3 entre janeiro e março de 2021, incluindo dados primários e secundários, uma breve discussão sobre as novas evidências de danos ao meio ambiente e suas implicações na qualidade de vida das pessoas atingidas. Sendo assim, a concepção deste relatório permeia não somente a garantia da participação informada dos atingidos no processo, mas também a consolidação de uma futura matriz de danos e de medidas para a reparação integral para a Região 3.

2. PERCURSO METODOLÓGICO

Para construção do objetivo proposto, dividiu-se esse produto em três etapas. A primeira etapa foi composta pelo levantamento contínuo de dados secundários produzidos por outras instituições para diferentes fatores ambientais, considerando, entre outros fatores, a qualidade amostral adotada e a qualidade dos dados obtidos. Nesta etapa de monitoramento foram utilizados dados provenientes das instituições governamentais, instituições públicas e privadas, publicações científicas e documentos técnicos institucionais disponíveis, assim como feito no **Diagnóstico Emergencial: Integração de Pesquisas**

sobre Meio Físico e Biótico. Os procedimentos de coleta de dados serão os mesmos descritos para etapa emergencial, alterando apenas a temporalidade das informações.

Para levantamento dos dados secundários, foi realizada uma busca nos principais mecanismos de busca científica existentes e portais governamentais. Os mecanismos de busca são: (i) O Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES; (ii) DirectScience; (iii) Google Acadêmico; (iv) WebOfScience Como se trata de uma pesquisa bibliográfica sistemática, optou-se por elencar maior esforço na busca e leitura dos estudos científicos. De modo a delimitar o tema de pesquisa, foram elencadas as seguintes combinações de palavras chaves: “rio Paraopeba”, “Brumadinho”, “danos ambientais”, “barragem”. As palavras chaves foram buscadas tanto em português quanto em inglês.

Foram considerados os seguintes critérios de inclusão: (i) artigos publicados após 2019; (ii) artigos cuja metodologia se adequa ao exigido pela legislação vigente e com estrutura condizente ao objetivo proposto, com resultados e fontes de informações confiáveis; (iii) revista com alto valor de impacto e/ou com nível na Qualis Capes superior a B1. Além da busca por dados via mecanismos de buscas, foram refeitas as solicitações de dados e documentos à AECOM, Comitê Pró-Brumadinho, Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA) e ao Instituto Estadual de Florestas - IEF de modo a aumentar o escopo dos dados previamente já adquiridos.

Os dados primários consolidados no produto pontual focado na “Análise de Fatores Bióticos e Abióticos” também serão apresentados ao longo desse relatório. Como nesse período só foram entregues os dados referente às análises de solo nas áreas de extravasamento do rio Paraopeba, esses foram os únicos dados primários apresentados e discutidos. Todos os dados obtidos, seja por via primária (análises de fatores bióticos e abióticos previstos no Plano de Trabalho), seja por via secundária, obtidos por meio das etapas descritas anteriormente, foram integrados em um banco de dados único e alvos de análise aprofundada, incluindo a comparação com os limites máximos previstos na legislação.

Após a revisão final do documento, todas as informações deste documento serão compartilhadas com os atingidos, de maneira clara e objetiva, com auxílio da Gerência de Participação Social e Engajamento e da Assessoria de Comunicação. Todos os resultados obtidos ainda serão compartilhados com as demais gerências da ATI-R3 para auxiliar na identificação de danos sociais e econômicos ao longo da região, podendo ainda ajudar na identificação de atingidos(as) e na construção informada e coletiva de medidas de reparação integral dos danos na Região 3.

3. RESULTADOS

Para composição deste relatório trimestral foram utilizados dois estudos publicados ainda em 2020, três estudos publicados no primeiro trimestre de 2021 (Tabela 1), resultados divulgados pelo Boletins Informativos do Cidadão e os dados atualizados de qualidade da água, disponibilizados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) no ano de 2021 e os dados do boletim da Secretaria do Estado de Minas Gerais (SES) recortados para os poços da Região 3 (monitorados por esta instituição), entre o período de janeiro de 2019 e novembro de 2020 (SES, 2021). Além desses estudos técnicos, serão apresentados os resultados das coletas e análises de solos realizadas pela a Assessoria Técnica Independente da Região 3 nas margens do rio Paraopeba e pontos de controle (Tabela 1). Abaixo serão apresentados os principais achados desses trabalhos por componente ambiental, assim como foi feito no Diagnóstico Emergencial: Integração de Pesquisas sobre Meio Físico e Biótico, finalizado em dezembro de 2020.

Tabela 1: Publicações científicas, e seus respectivos elementos analisados, utilizados para composição deste relatório trimestral.

Nº	ESTUDO/PUBLICAÇÃO	ELEMENTOS ANALISADOS
1	Souza, Tatiana da Silva. Cytogenotoxicity of the water and sediment of the Paraopeba River immediately after the iron ore mining dam disaster (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). <i>Science of The Total Environment</i> , Março, de 2021, Vol. 775, 145193.	Foram analisados contaminantes em água e sedimentos, e seus efeitos tóxicos em cebolas.
2	Parente e outros autores. First year after the Brumadinho tailings' dam collapse: Spatial and seasonal variation of trace elements in sediments, fishes and macrophytes from the Paraopeba River, Brazil. <i>Environmental research</i> , Fevereiro de 2021, Vol. 193.	Foram analisados contaminantes em sedimentos, peixes e macrófitas no rio Paraopeba.
3	Teramoto e outros autores. Metal speciation of the Paraopeba river after the Brumadinho dam failure. <i>The Science of the Total Environment</i> , Fevereiro de 2021, Vol.757.	Foram analisados contaminantes na água e sedimentos, e os potenciais riscos de saúde humana.
4	Thompson e outros autores. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. <i>Science of the Total Environment</i> , v. 705, 2020.	Foram analisados contaminantes na água do rio Paraopeba.
5	Vergilio e outros autores. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). <i>Nature Research - Scientific Reports</i> , v. 10, 2020	Foram analisados contaminantes na água e sedimentos do rio Paraopeba e efeitos a comunidade aquática.

3.1 ÁGUA SUPERFICIAL E SEDIMENTOS

A ruptura da barragem B1 na mina do Córrego Feijão em Brumadinho (MG) promoveu a liberação de grande volume de rejeito de minério de ferro no córrego Feijão (tributário do rio Paraopeba), conseqüentemente, foram observados aspectos como: o aumento da

turbidez na água (valor aproximado a 3000 UNT na região próxima a Brumadinho), impactos no fornecimento de água para abastecimento que era captada no rio Paraopeba, bem como danos a fauna, flora, turismo (VERGILIO *et al.*, 2020). Os autores avaliaram as concentrações de diversos elementos presentes na água e sedimentos do rio Paraopeba, além dos possíveis efeitos biológicos em diferentes níveis tróficos ocasionados pela exposição a estas substâncias químicas. As amostras deste estudo foram coletadas em 30/01/2019, cinco dias após o rompimento, em sete locais de amostragem, dos quais um foi a montante do rompimento e os demais a jusante. De maneira geral, foi observado que o rejeito é composto por um material particulado fino (30,3% de areia e 69,7% de argila e silte) e os elementos químicos mais abundantes foram ferro (264,9 mg/g), alumínio (10,8 mg/g), manganês (4,78 mg/g) e titânio (0,43 mg/g). Também foram identificados elementos traço tóxicos, como urânio (1,457 mg/g), cádmio (0,03094 mg/g), chumbo (0,01464 mg/g), arsênio (0,00469 mg/g), estanho (0,5474 mg/g) e mercúrio (0,0001013 mg/g). Dos pontos de amostragem, apenas um está localizado na Região 3, especificamente no município de São José da Varginha, os resultados das coletas de água e sedimentos estão apresentados nas tabelas abaixo (Tabelas 2, 3 e 4).

Tabela 2: Parâmetros amostrados durante atividade de campo após o rompimento da barragem.

Município	São José da Varginha
Distância até a barragem (km)	111
Latitude	19°40'13"S
Longitude	44°28'51"W
Material particulado superficial (mg/L)	18,8
Carbono Orgânico Dissolvido (mg/L)	1,67
Nitrogênio Total dissolvido (mg/L)	1,43
Turbidez (UNT)	5,2
Condutividade elétrica (µs/cm)	229
pH	7,25
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	6,15
Sedimentos (%)	53 (areia)
	30 (silte)
	16 (argila)

Fonte: VERGILIO *et al.* (2020). Adaptado

Tabela 3: Concentrações de elementos em amostras de água após o rompimento da barragem.

Município	São José da Varginha
Distância até a barragem (km)	111
Latitude	19°40'13"S
Longitude	44°28'51"W
CONCENTRAÇÃO ELEMENTOS NA AMOSTRA DE ÁGUA	
Alumínio Total (mg/L)	0,69
Alumínio Dissolvido (mg/L)	0,08
Arsênio Total (mg/L)	<0,0062
Arsênio Dissolvido (mg/L)	<0,0062
Bário Total (mg/L)	0,022
Bário Dissolvido (mg/L)	0,012
Cálcio Total (mg/L)	6,71
Cálcio Dissolvido (mg/L)	4,46
Cádmio Total (mg/L)	<0,0001
Cádmio Dissolvido (mg/L)	<0,0001
Chumbo Total (mg/L)	<0,0019
Chumbo Dissolvido (mg/L)	<0,0019
Cobre Total (mg/L)	0,014
Cobre Dissolvido (mg/L)	0,001
Cromo Total (mg/L)	0,002
Cromo Dissolvido (mg/L)	0,001
Estanho Total (mg/L)	<0,0040
Estanho Dissolvido (mg/L)	<0,0040
Ferro Total (mg/L)	0,76
Ferro Dissolvido (mg/L)	0,07
Manganês Total (mg/L)	0,048
Manganês Dissolvido (mg/L)	0,002
Mercúrio Total (mg/L)	0,00000416
Mercúrio Dissolvido (mg/L)	0,0000019
Níquel Total (mg/L)	<0,0005
Níquel Dissolvido (mg/L)	<0,0005
Zinco Total (mg/L)	0,005
Zinco Dissolvido (mg/L)	0,003

Fonte: VERGILIO *et al.* (2020). Adaptado

Tabela 4: Concentrações de elementos em amostras de sedimento após o rompimento da barragem.

Município	São José da Varginha
Distância até a barragem (km)	111
Latitude	19°40'13"S
Longitude	44°28'51"W
Alumínio Total (mg/g)	9,9
Arsênio Total (mg/g)	<0,00090
Bário Total (mg/g)	0,138
Cálcio Total (mg/g)	0,246
Cádmio Total (mg/g)	0,00232
Chumbo Total (mg/g)	<0,0004
Cobre Total (mg/g)	0,00592
Cromo Total (mg/g)	0,010
Estanho Total (mg/g)	0,0007
Ferro Total (mg/g)	4,9
Manganês Total (mg/g)	0,24
Mercúrio Total (mg/g)	0,000014
Níquel Total (mg/g)	0,00958
Zinco Total (mg/g)	0,00616

Fonte: VERGILIO et al. (2020). Adaptado

De maneira similar, Thompson *et al.* (2020) também avaliaram os impactos na qualidade da água do Rio Paraopeba, decorrentes do rompimento da barragem B1 do Córrego Feijão, em Brumadinho (MG) e coletaram amostras de água em fevereiro e maio de 2019, em sete pontos de coleta, todos a jusante do rompimento. Dentre os pontos selecionados, apenas um está inserido no território da Região 3, localizado na cidade de São José da Varginha (a 115 km da barragem). Os resultados das amostras foram comparados com os dados de qualidade da água do rio Paraopeba, disponibilizados pelo IGAM referente aos anos de 2017 e 2018. De acordo com os resultados obtidos, os autores sugerem que houve uma migração dos minérios do rejeito ao longo do rio durante o período considerado.

A tabela abaixo (Tabela 5) mostra os resultados de alguns dos parâmetros avaliados para o município de São José da Varginha, em 2019.

Tabela 5: Parâmetros amostrados durante atividade de campo após o rompimento da barragem.

Município	São José da Varginha
Distância até a barragem (km)	115
Latitude	19°40'13.40"S
Longitude	44°28'49.51"W
Material particulado superficial (mg/L)	18,80 ± 2,62 (Fevereiro) 20,26 ± 0,49 (Maio)
Carbono Orgânico Dissolvido (mg/L)	1,66 ± 0,11 (Fevereiro) 3,79 ± 0,10 (Maio)
Nitrogênio Total dissolvido (mg/L)	1,42 ± 0,04 (Fevereiro) 1,39 ± 0,02 (Maio)
Turbidez (UNT)	5,16 (Fevereiro) 7,83 (Maio)
pH	7,25 (Fevereiro) 7,41 (Maio)
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	6,15 (Fevereiro) 5,37 (Maio)
Alumínio (mg/L)	0,0778 (Fevereiro) 0,2573 (Maio)
Ferro (mg/L)	0,0744 (Fevereiro) 0,4372 (Maio)
Cádmio (mg/L)	<0,0001 (Fevereiro) 0,0005 (Maio)
Cobre (mg/L)	0,01 (Fevereiro) 0,0023 (Maio)
Mercúrio (mg/L)	0,0000041 (Fevereiro) 0,0000041 (Maio)

Fonte: THOMPSON *et al.* (2020). Adaptado

Teramoto *et al.* (2021) avaliaram a especiação de elementos químicos na água do rio Paraopeba a partir de ferramentas matemáticas, além da dessorção de metais dos sedimentos. Apesar dos autores não destacarem os municípios ou coordenadas geográficas em que foram coletadas as amostras, é possível observar que foram dez pontos amostrados,

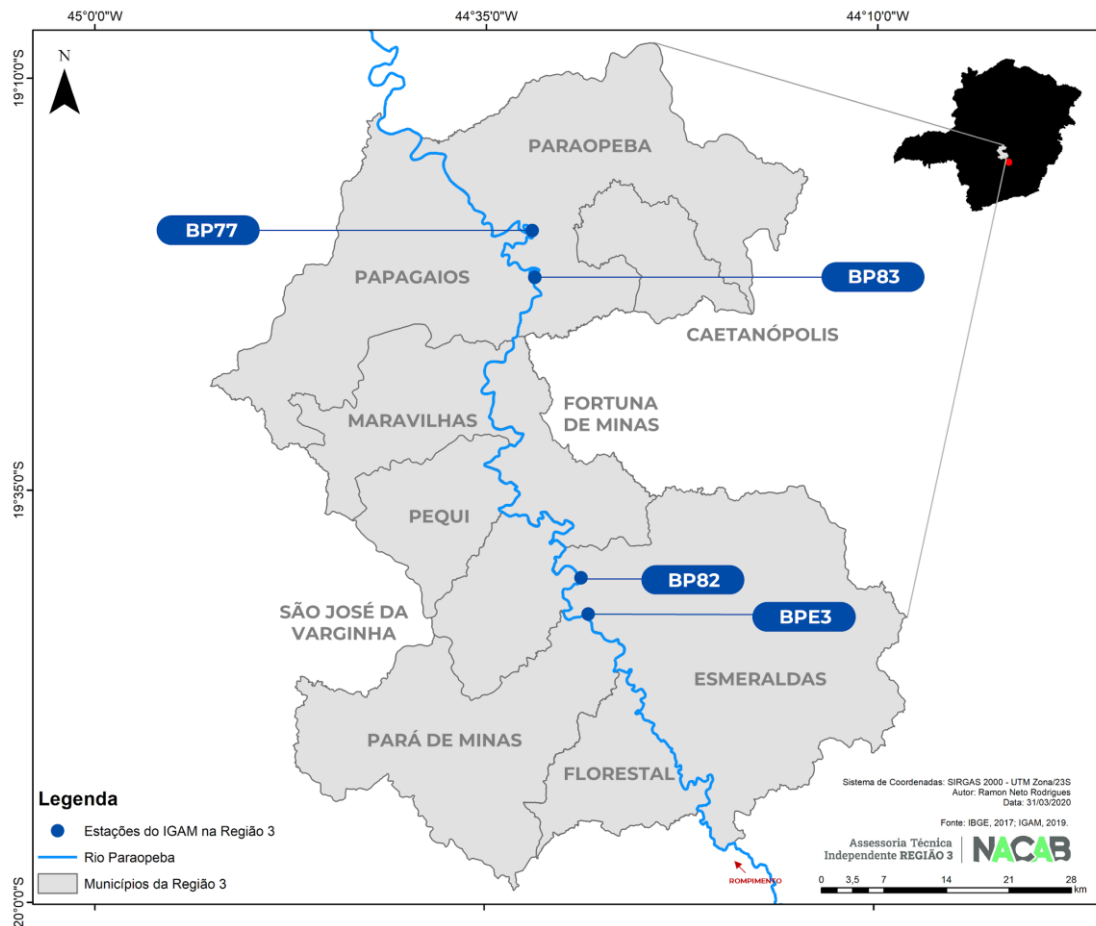
dos quais dois estão a montante do rompimento e os demais se estendem ao longo do rio Paraopeba. As amostras de água e sedimento foram coletadas em outubro de 2019 e março de 2020. Os resultados obtidos indicaram que as concentrações total e dissolvida dos metais aumentaram no período de chuvas. Além disso, os autores concluíram que a especiação de metais é intrínseca à alteração das estações e condições hidrológicas, mas estes elementos não são estáveis em suas formas dissolvidas. Os experimentos de dessorção nos sedimentos mostraram que arsênio, cobre e manganês podem ser liberados de sedimentos suspensos, especialmente o último citado. De acordo com estes autores, a caracterização geoquímica apresentada no Atlas Geoquímico da bacia do Rio São Francisco indica que o rio Paraopeba já apresentava valores de ferro, arsênio, cobre, níquel e cromo que excediam as regulamentações ambientais brasileiras antes mesmo do rompimento. De qualquer maneira, os riscos associados com a exposição prolongada aos rejeitos de minério de ferro decorrentes do rompimento da barragem B1 no Córrego Feijão são ainda desconhecidos.

Parente *et al.* (2021) avaliaram a contaminação de macrófitas, peixes e sedimentos no rio Paraopeba a partir da investigação dos seguintes elementos traço: arsênio, alumínio, cádmio, cobalto, cromo, cobre, ferro, mercúrio, manganês, níquel, chumbo e zinco, tanto em período de estiagem (agosto de 2019) quanto chuvoso (dezembro de 2019) e a montante e jusante do rompimento da barragem B1 do Córrego Feijão, em Brumadinho (MG). Foram coletadas 28 amostras de sedimento (16 em agosto e 12 em dezembro) ao longo de cinco seções do Rio Paraopeba (selecionadas pelos autores). Dentre estas amostras, apenas quatro foram coletadas em municípios pertencentes à Região 3 (Papagaios e Pará de Minas). Os valores em mg.kg^{-1} e as respectivas incertezas relativas apresentadas neste estudo, mostram os valores medianos, mínimos e máximos para as cinco seções do rio. A partir dos resultados apresentados, os autores observaram que, com exceção do cádmio e mercúrio, todos os demais elementos considerados na pesquisa apresentaram concentrações medianas mais baixas a jusante do rompimento. Resultados como este sugerem que mais estudos devem ser realizados na área e em maior frequência de coleta de amostras, visto que o rompimento da barragem causou muitos danos em diferentes níveis de compreensão e conhecimento científico, podendo ainda apresentar resultados desconhecidos para a pesquisa científica.

Em relação aos dados atualizados de qualidade da água do rio Paraopeba disponibilizados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), foi realizado um recorte das estações monitoradas que pertencem ao território da Região 3. Assim, os dados de monitoramento de parâmetros que podem estar relacionadas ao rompimento da barragem e que foram identificados nas estações BP082 (entre os municípios de São José da Varginha e Esmeraldas), BP083 (entre os municípios de Papagaios e Paraopeba), BP077 (entre os

municípios de Papagaios e Paraopeba) e BPE3 (Esmeraldas) estão apresentados neste documento (Figura 1).

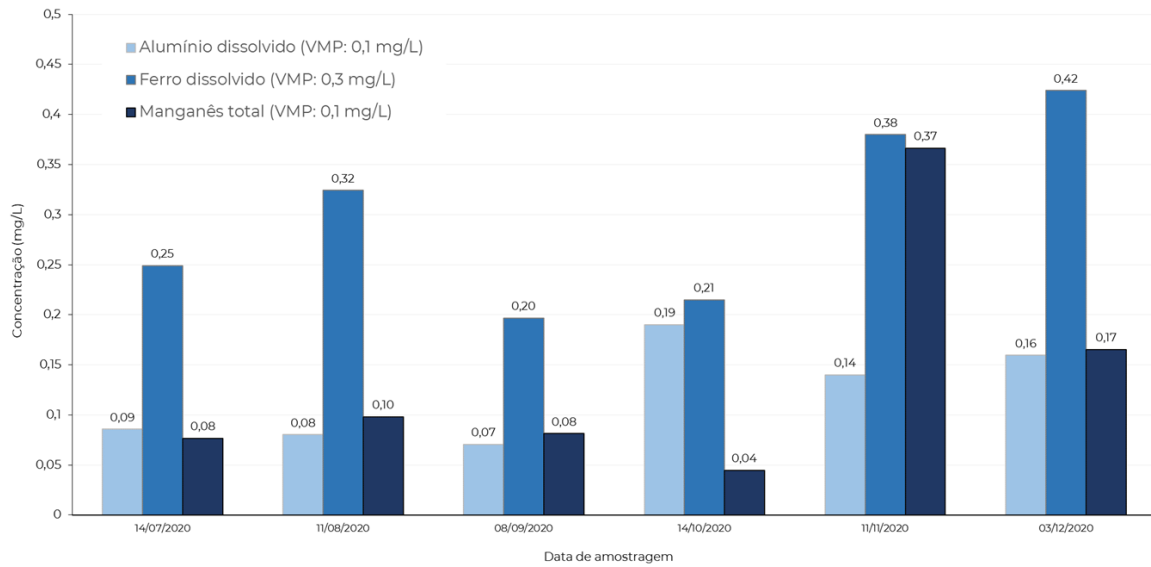
Figura 1: Estações de monitoramento de qualidade da água do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) na Região 3.



No **Diagnóstico Emergencial: Integração de Pesquisas sobre Meio Físico e Biótico** (finalizado em dezembro de 2020), os dados acessados correspondiam até o início de junho de 2020, para as três primeiras estações citadas e início de maio de 2020 para a estação BPE3. Deste modo, as figuras abaixo mostram as concentrações dos metais monitorados, em períodos subsequentes aos discutidos naquele diagnóstico (terceiro e quarto trimestre de 2020). Cabe dizer que dentre os dados apresentados pelo IGAM, não houve violação dos parâmetros chumbo total, cobre dissolvido, cromo total, níquel total e zinco total, de acordo com os Valores Máximos Permitidos (VMPs) para Classe 2 (BRASIL, 2005). Porém, concentrações de alumínio e ferro dissolvido, bem como manganês total estavam acima de seus respectivos VMPs nas estações analisadas, com exceção de manganês total na estação BP077. Apenas a estação BPE3 apresentou concentração de

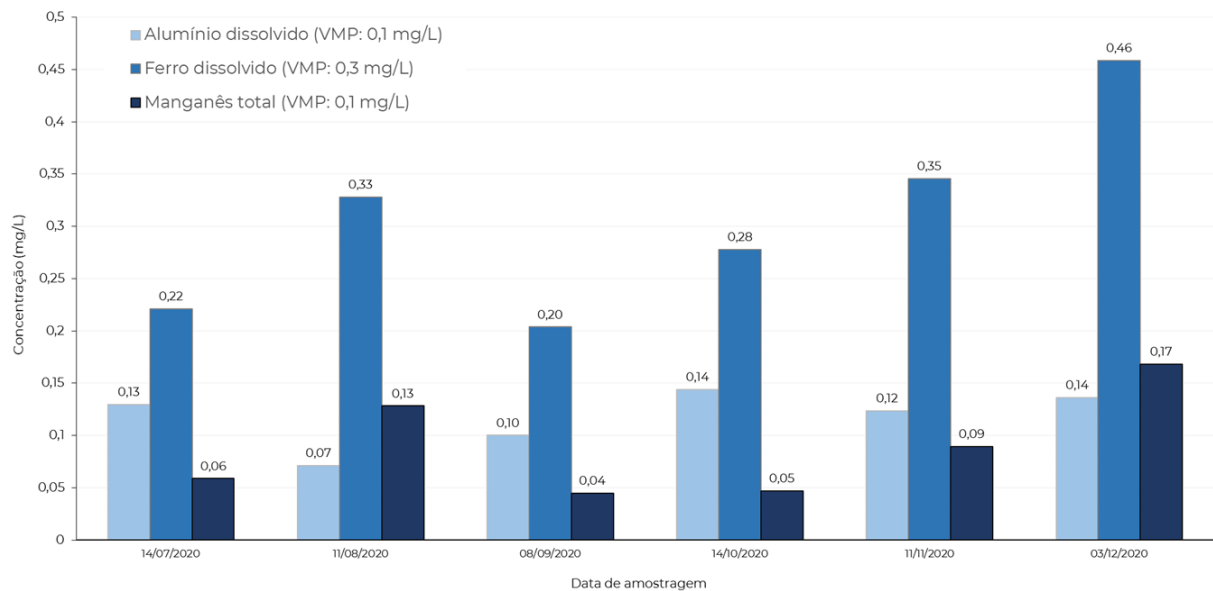
arsênio total acima de seu VMP (0,010 mg/L) em setembro e turbidez (100 UNT) em dezembro. As Figuras 2, 3, 4 e 5 mostram os resultados do monitoramento do IGAM para as estações BP082, BP083, BP077 e BPE3, respectivamente, realizados no terceiro e quarto trimestre de 2020.

Figura 2: Concentrações de alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês total na estação BP082.



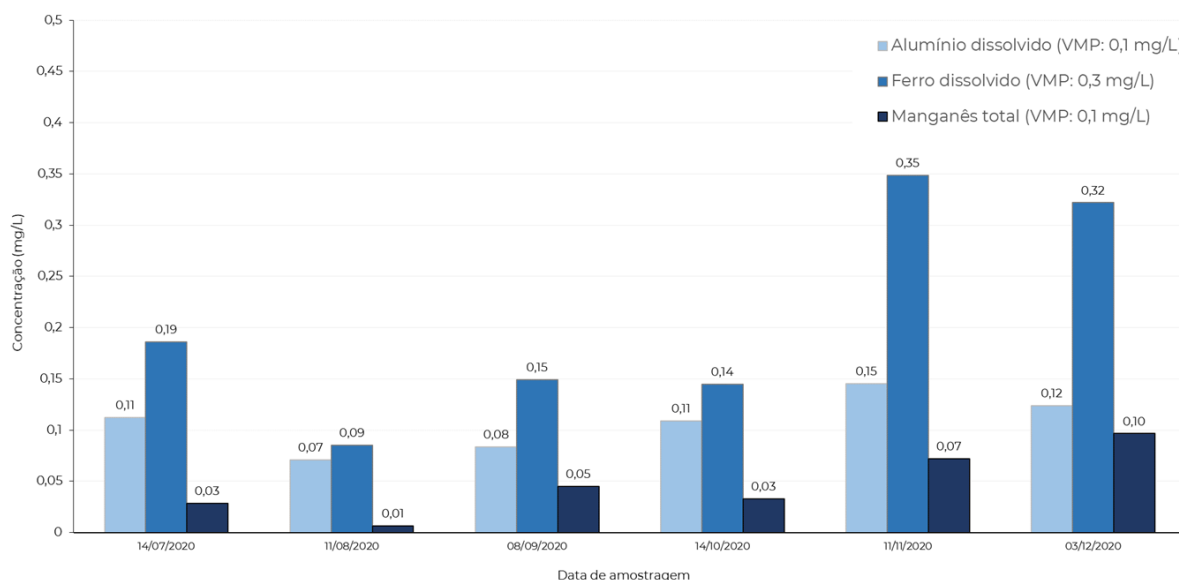
Fonte: IGAM, 2021.

Figura 3: Concentrações de alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês total na estação BP083.



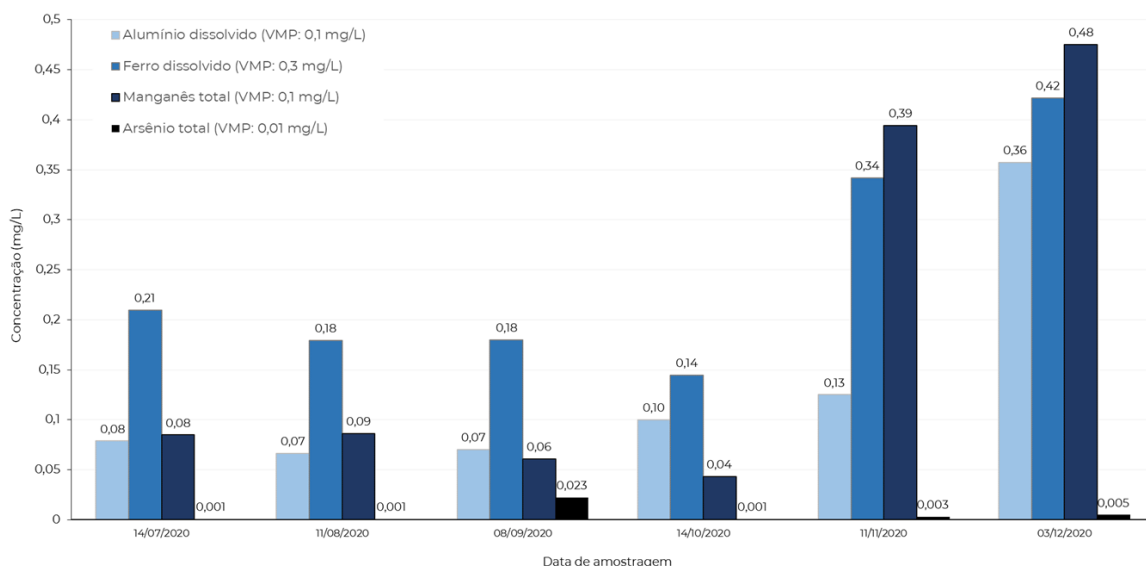
Fonte: IGAM, 2021

Figura 4: Concentrações de alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês total na estação BP077.



Fonte: IGAM, 2021

Figura 5: Concentrações de alumínio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total e arsênio total na estação BPE3.



Fonte: IGAM, 2021.

Ainda sobre os dados do IGAM, no ano de 2021 os Boletins Informativos do Cidadão publicados em março de 2021 (edições 20 e 21) apresentam resultados de monitoramento da qualidade da água do rio Paraopeba referentes a janeiro e fevereiro deste ano, respectivamente. Na edição 20 é informado que alumínio dissolvido esteve acima de seu

VMP nas estações BP082, BP083 e BPE3; por sua vez, o chumbo total esteve acima de seu respectivo VMP apenas nas estações BP082 e BPE3; manganês total e ferro dissolvido também apresentaram concentrações acima dos limites legais nas estações BP082, BP083, BP077 e BPE3. com exceção de ferro dissolvido na estação BPE3. A edição 21 mostra que o alumínio dissolvido e manganês total estiveram acima de seus respectivos VMPs em todas as estações monitoradas, referentes à Região 3; por sua vez, chumbo total só não esteve acima de seu respectivo VMP na estação BPE3, enquanto o ferro dissolvido só não superou seu VMP na estação BP082 (FEAM, 2021).

3.2 ÁGUA SUBTERRÂNEA

Em janeiro de 2021 a Secretaria da Saúde do Estado de Minas Gerais (SES) publicou um boletim informativo contendo resultados de análises de água das formas de abastecimento utilizadas para consumo humano que estão localizadas até 100 metros do leito do rio Paraopeba nos municípios atingidos pelo desastre. De acordo com este boletim, não ocorreram coletas de amostras de água de poços e cisternas em três municípios pertencentes à Região 3 (Maravilhas, Pequi e Fortuna de Minas), visto que não foram identificadas formas de abastecimento de água que atendam o critério sinalizado acima. A Tabela 6 mostra o número de coletas realizadas em cada município da Região 3 bem como a respectiva quantidade de pontos amostrados, entre o período de janeiro de 2019 e novembro de 2020.

Tabela 6: Número de amostras de água coletadas por municípios abrangidos na Região 3.

MUNICÍPIO	NÚMERO DE PONTOS MONITORADOS	NÚMERO DE COLETAS REALIZADAS
Esmeraldas	13	383
Florestal	7	206
Papagaios	5	221
Pará de Minas	4	104
Paraopeba	18	217
São José da Varginha	16	403
TOTAL	63	1534

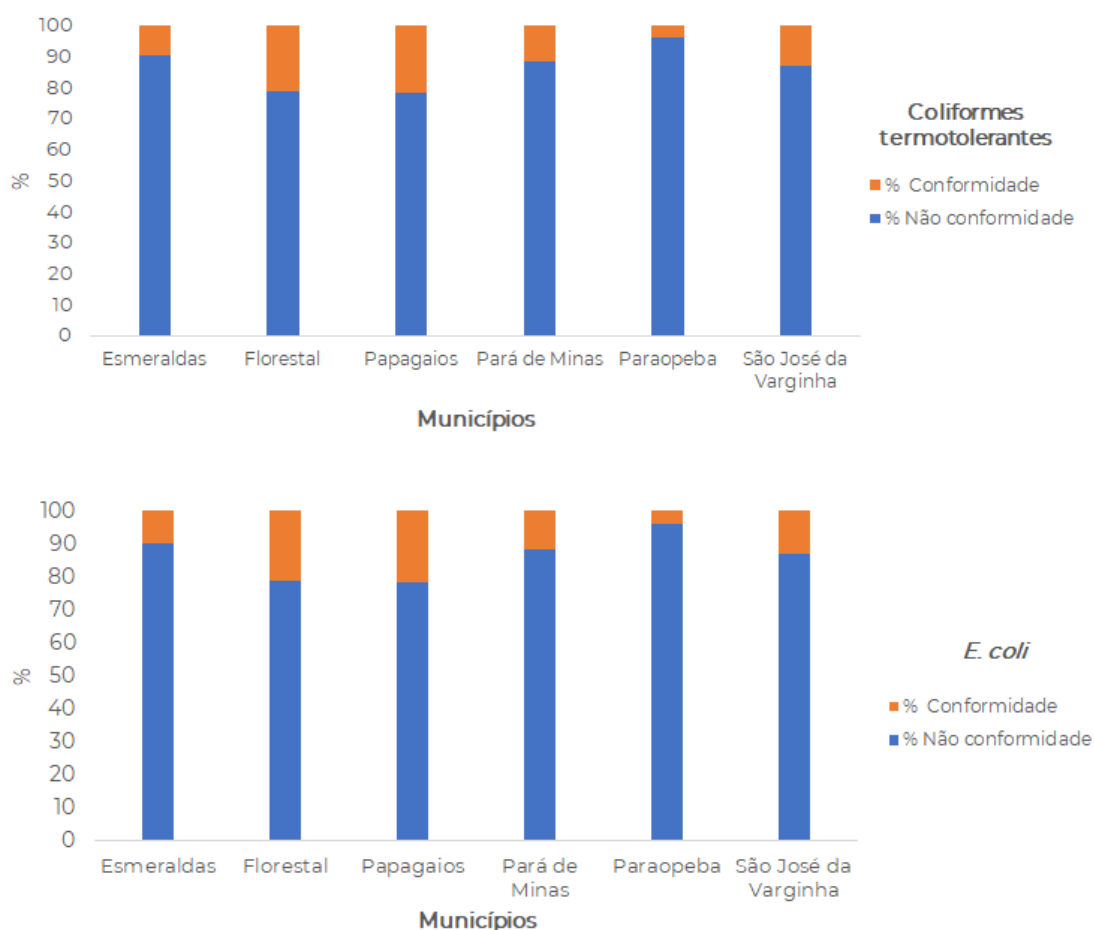
Fonte: SES, 2021

Ressalta-se que até março de 2019, as amostras foram coletadas semanalmente e posteriormente, a cada 15 dias. Neste boletim ainda foi informado que foram incluídos e excluídos pontos ao longo do período de monitoramento, visto que alguns desses foram

identificados posteriormente, enquanto outros foram inviabilizados por intercorrências da coleta (datas pontuais ou permanentes), como por exemplo: recusas de moradores para receber os técnicos da saúde no momento da coleta, poços que secaram devido ao período de estiagem e falhas no funcionamento da bomba dos poços.

Para a apresentação dos resultados neste boletim e para a Região 3, os parâmetros monitorados foram divididos em três grupos e de acordo com o padrão de potabilidade vigente: coliformes totais e *E.coli* (padrão microbiológico); alumínio, ferro, manganês, zinco, cor aparente e turbidez (padrão organoléptico); antimônio, arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, níquel e selênio (substâncias químicas que representam risco à saúde). A Figura 6 mostra os percentuais de conformidade obtidos nas amostras de água subterrânea coletadas, para cada um dos municípios pertencentes à Região 3, de acordo com o padrão microbiológico.

Figura 6: Valores percentuais de conformidade e não conformidade de amostras de água subterrânea em municípios da Região 3 (padrão microbiológico).



Fonte: SES, 2021

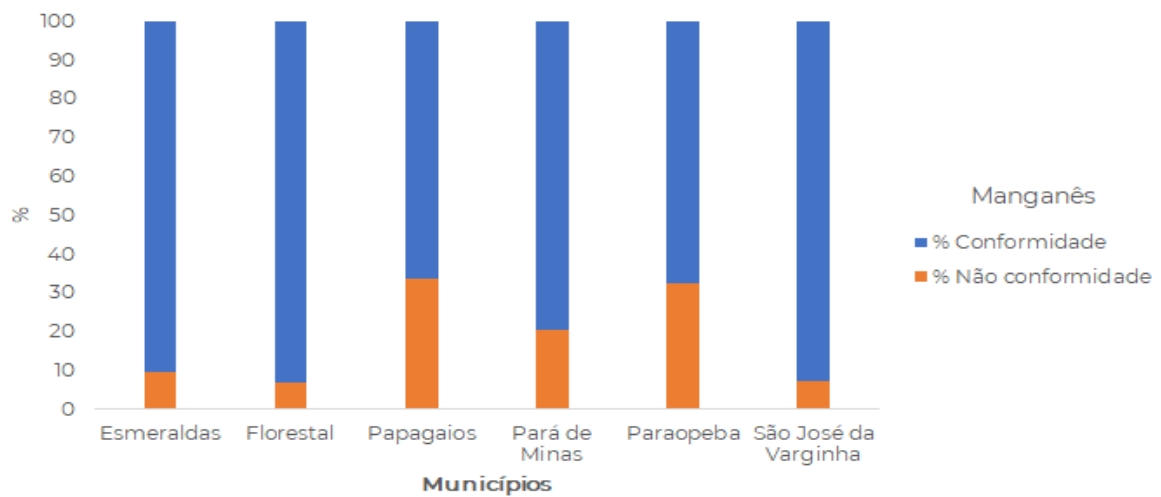
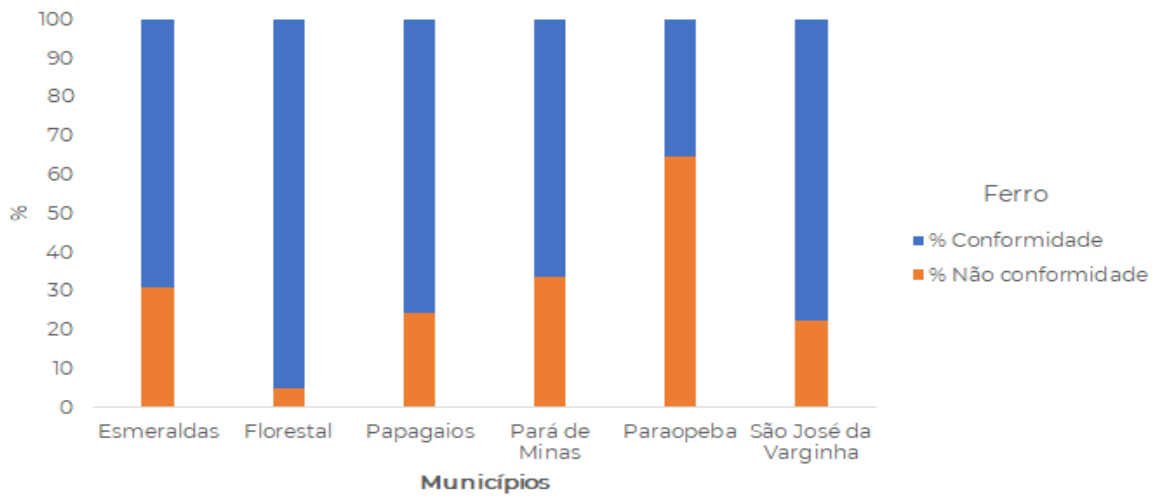
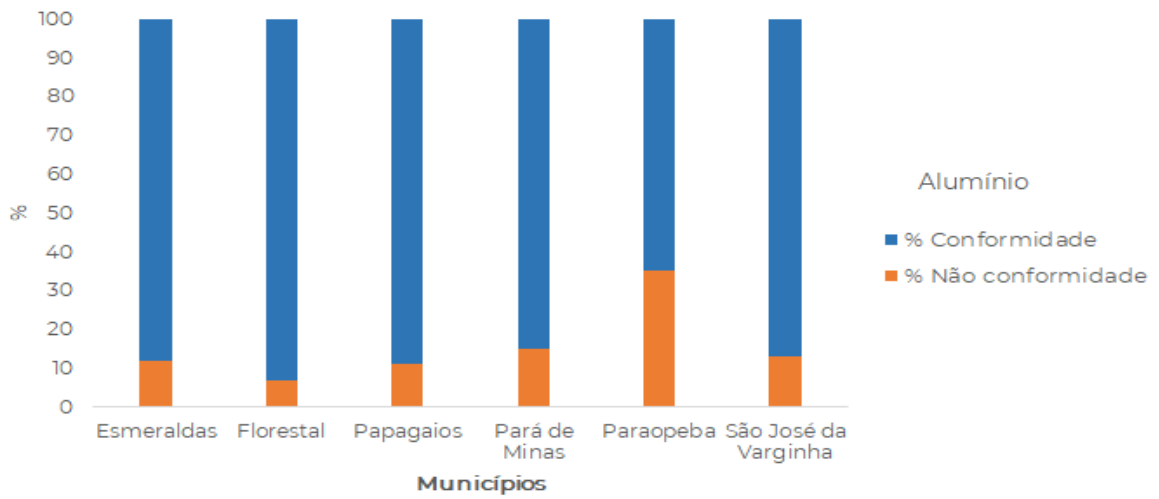
Coliforme totais e *E. coli* (em análise mais rigorosa, apenas *E. coli*) são organismos indicadores que sinalizam o potencial de contaminação da água. De acordo com estes resultados, valores médios de percentuais de não conformidades para estes municípios foram iguais a 86,5% e 43,23%, para coliformes totais e *E. coli*, respectivamente. Grande parte das amostras apresentaram resultados insatisfatórios para *E.coli*, sendo necessárias orientações de desinfecção da água previamente ao consumo. As Figuras 7 e 8 mostram os resultados de conformidade e não conformidade para o padrão organoléptico.

Observa-se que alumínio, ferro e manganês apresentaram percentuais médios de não conformidade respectivamente iguais a 15,61%, 30,18% e 18,32%. Cabe pontuar que apesar de usualmente serem considerados parâmetros organolépticos, do ponto de vista de risco à saúde, a Organização Mundial da Saúde (2010) indica que a concentração de alumínio em água não ultrapasse 0,9 mg/L e a Portaria de Consolidação Nº 5 indica que as concentrações de ferro e manganês não devem exceder 2,4 e 0,4 mg/L, respectivamente (BRASIL, 2017).

Observa-se que turbidez, cor aparente, e zinco apresentaram percentuais médios de não conformidade respectivamente iguais a 37,48%, 20,75% e 0%. A turbidez é um parâmetro relacionado à presença de partículas em suspensão na água e, para fins de consumo, deve ser inferior a 5 UT (como padrão organoléptico). A cor aparente é um parâmetro relacionado ao teor de matéria orgânica e/ou mineral (ferro e manganês) na água. Para fins de consumo deve ser inferior a 15 uC.

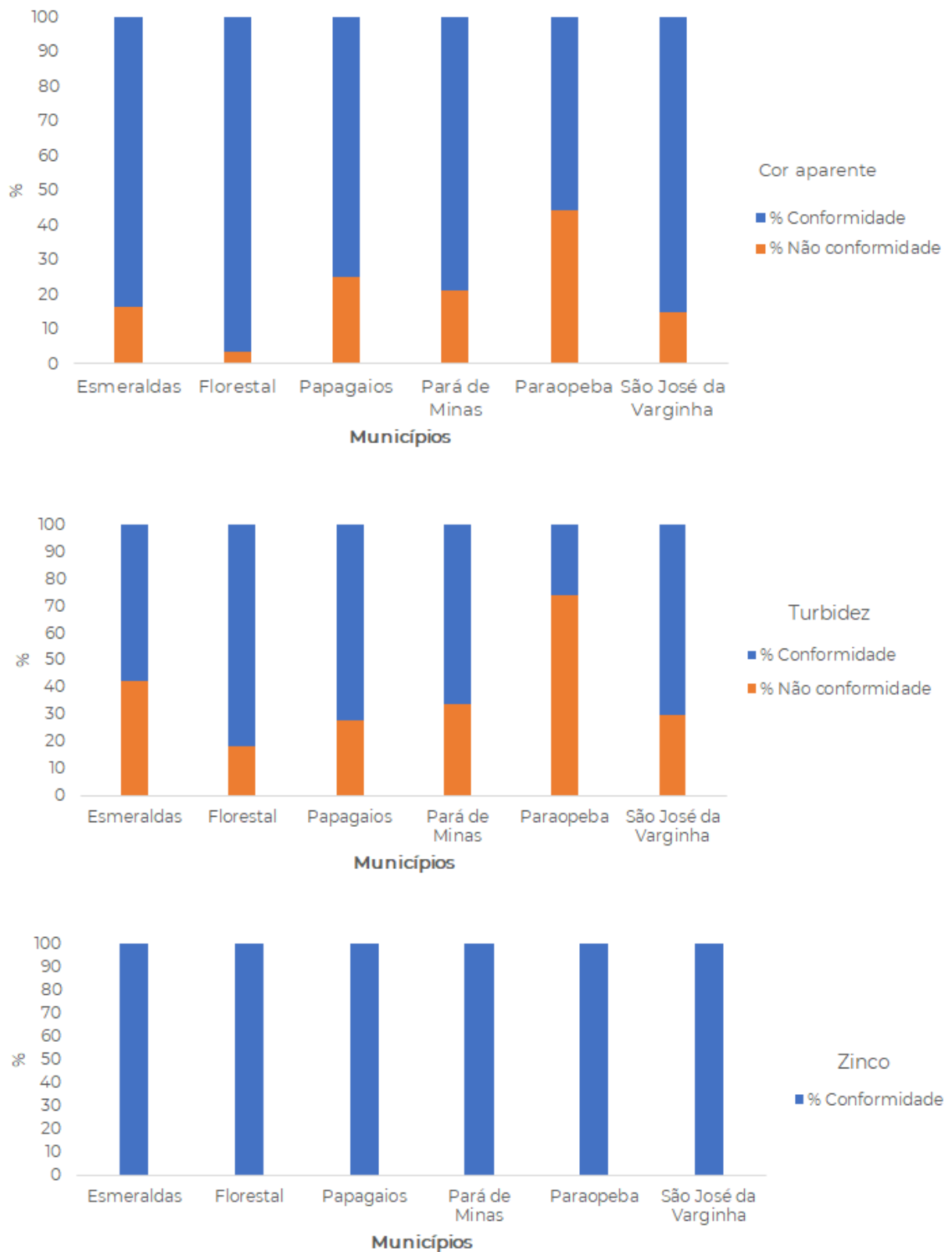
A Figura 9 mostra a quantidade de amostras de água subterrânea que tiveram seus valores quantificados acima dos valores máximos permitidos (VMP), segundo o padrão de potabilidade vigente para substâncias com risco à saúde humana - não conformidades (BRASIL, 2017)

Figura 7: Valores percentuais de conformidade e não conformidade de amostras de água subterrânea em municípios da Região 3 (padrão organoléptico).



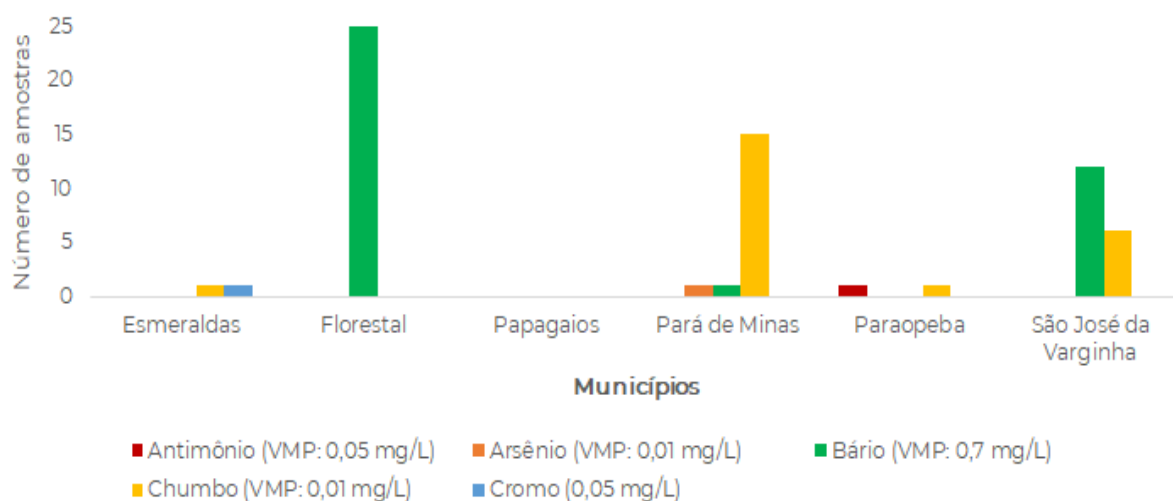
Fonte: SES, 2021

Figura 8: Valores percentuais de conformidade e não conformidade de amostras de água subterrânea em municípios da Região 3 (padrão organoléptico).



Fonte: SES, 2021

Figura 9: Quantidade de não conformidade de amostras de água subterrânea em municípios da Região 3 (padrão de substâncias químicas com risco à saúde).



Dentre as amostras coletadas nos municípios da Região 3, 64 apresentaram valores superiores aos seus respectivos valores máximos permitidos, sendo que a maioria destes resultados foi observado em Florestal e o elemento químico mais frequentemente detectado foi o Bário. Observa-se também que Papagaios foi o único município que não apresentou amostras de água em desconformidade com o padrão de substâncias químicas com risco à saúde, dentre os poços monitorados pela SES.

A Tabela 7 mostra os valores máximos e médios das concentrações das substâncias químicas com risco à saúde nas amostras coletadas entre janeiro de 2019 e novembro de 2020. Em vermelho estão destacados os valores máximos medidos e que violaram seus respectivos limites toleráveis, considerando o padrão de potabilidade vigente.

Diante do exposto, a SES considera que ainda não é possível avaliar conclusivamente os impactos que o rompimento da barragem e a consequente liberação dos rejeitos provocaram na potabilidade da água dos mananciais subterrâneos ao longo do rio Paraopeba. Os resultados apresentados no boletim de 2021 e as incertezas associadas à mobilidade de substâncias que representam risco à saúde corroboram para a manutenção da recomendação do IGAM de suspensão da água do rio Paraopeba entre o município de Brumadinho e o limite da Usina Hidrelétrica Retiro Baixo em Pompéu (SES, 2021).

Tabela 7: Valores máximos e médios de concentrações de substâncias químicas com risco à saúde, nos municípios pertencentes à Região 3.

Município	Antimônio (VMP: 0,005 mg/L)		Arsênio (VMP: 0,01 mg/L)		Bário (VMP: 0,7 mg/L)		Cádmio (VMP: 0,005 mg/L)		Chumbo (VMP: 0,01 mg/L)	
	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média
Esmeraldas	0,003	0,000	0,002	0,000	0,67	0,067	0,002	0,000	0,05	0,000
Florestal	0,001	0,000	0,001	0,000	2,06	0,272	0	0,000	0	0,000
Papagaios	0,002	0,000	0,004	0,001	0,3	0,078	0	0,000	0	0,000
Pará de Minas	0,002	0,000	0,014	0,001	1,05	0,086	0,002	0,000	0,1	0,004
Paraopeba	0,006	0,000	0,006	0,000	0,16	0,045	0	0,000	0,02	0,000
São José da Varginha	0,003	0,000	0,006	0,000	0,93	0,118	0,003	0,000	0,04	0,000

Município	Cobre (VMP: 2 mg/L)		Cromo (VMP: 0,05 mg/L)		Mercúrio (VMP: 0,001 mg/L)		Níquel (VMP: 0,07 mg/L)		Selênio (VMP: 0,01 mg/L)	
	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média	Máxima	Média
Esmeraldas	0,979	0,005	0,09	0,000	0	0,000	0,05	0,000	0	0,000
Florestal	0,045	0,004	0	0,000	0	0,000	0	0,000	0,002	0,000
Papagaios	0,047	0,001	0	0,000	0	0,000	0	0,000	0,001	0,000
Pará de Minas	0,475	0,015	0,02	0,000	0	0,000	0,05	0,001	0,002	0,000
Paraopeba	0,02	0,001	0,01	0,000	0	0,000	0	0,000	0	0,000
São José da Varginha	0,301	0,004	0,1	0,001	0,0002	0,000	0,02	0,000	0	0,000

Fonte: SES, 2021. Adaptado.

3.3 SOLOS

Não houve atualizações em relação a dados secundários de monitoramento ambiental dos solos e também não foram publicados artigos que buscaram compreender melhor a situação da qualidade do solo nos municípios da Região 3.

Dados primários de diagnóstico da condição atual do solo da Região 3 foram gerados com a conclusão do estudo intitulado “*Solos da Região 3: Caracterização física e química*”, promovido pelo NACAB e finalizado no mês de março pela empresa contratada. Visto que o rompimento da barragem B-I da Mina do Córrego do Feijão expôs os territórios que margeiam o rio Paraopeba, a jusante do rompimento, a impactos ambientais de diferentes magnitudes, tornou-se imprescindível avaliar os possíveis danos ao solo da Região 3, bem como os riscos a que a população atingida pode estar submetida. Sendo assim, este estudo promoveu a avaliação de parâmetros químicos e físico que proporcionaram o diagnóstico da condição do solo, em escala local, e geraram subsídios para uma avaliação do cenário de contaminação.

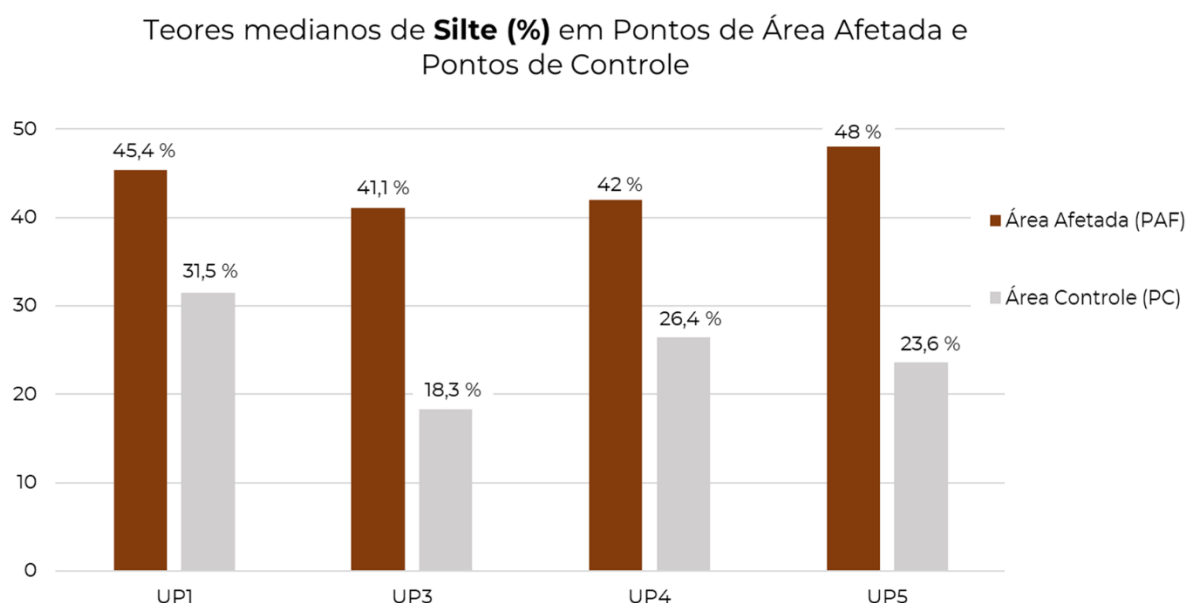
O estudo foi realizado nos dez municípios que compõem a Região 3, sendo eles: Esmeraldas, Florestal, Pará de Minas, Fortuna de Minas, São José da Varginha, Pequi, Maravilhas, Papagaios, Paraopeba e Caetanópolis, no estado de Minas Gerais.

A área de estudo foi segmentada em unidades mais homogêneas em termos de atributos ambientais. Estas áreas denominadas **Unidades de Paisagem (UP)** foram geradas pela sobreposição dos mapas de solos, geologia e geomorfologia, obtidos a partir de dados secundários. Foram identificadas seis Unidades de Paisagem na Região 3.

A amostragem de solos foi dividida em **Pontos de Área Afetada - PAF** (total de 129 pontos) e **Pontos de Controle - PC** (total de 40 pontos). Os PAF estão localizados às margens do rio Paraopeba, em áreas que tiveram contato com o rejeito ou com a água do rio durante as enchentes. Os PCs foram adotados, portanto, como cenário de referência, representativos de solos inseridos em um contexto ambiental constituído pela mesma geologia e tipos de solo, sem contato presumido, direto ou indireto, com o rejeito ou água do rio Paraopeba, e localizados às margens de cursos d'água contribuintes do rio Paraopeba. Foram coletadas amostras de solo e realizadas análises, em duplicatas, de parâmetros físicos, com a análise granulométrica e químicos com a análise da Capacidade de Troca Catiônica (CTC), pH em água, Carbono Orgânico Total (COT) e Metais e Metalóides, no qual foram quantificados os teores de Alumínio (Al), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmiio (Cd), Chumbo (Pb), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Silício (Si), Vanádio (V) e Zinco (Zn).

Para os parâmetros físicos, a análise granulométrica evidenciou que, de forma geral, os solos da Região 3 apresentaram grande variação granulométrica, previsível para solos de várzea formados sob influência fluvial. Foram detectados, no entanto, altos teores de silte. Esta fração foi predominante nos solos de área afetada (PAF), apontando para possibilidade de incremento quando comparado aos pontos controle (PC) (Figura 10). Houve diferença estatística significativa entre os tipos de pontos na maioria das Unidades de Paisagem (UPs), sendo que as medianas foram maiores nos PAF, na maior parte dos casos, exceto para UP2 e UP6. A classificação dos solos da Região 3 em grupamentos texturais, demonstrou que predominam solos com textura média tanto entre solos afetados quanto não afetados.

Figura 10: Comparação das medianas de teor de Silte (%) com diferença significativa entre amostras de solo de PAF e PC e mediana maior entre os PAF nas Unidades de Paisagem da Região 3.



O incremento de silte no solo das áreas afetadas apresenta forte indício de relação com o contato com o rejeito, uma vez que este é rico em partículas da fração silte/argila, como apontado na caracterização do rejeito contida no Laudo de Perícia Criminal Federal nº 3565/2019 - NUCRIM/SETEC/SR/PF/SP. Outras causas como variações naturais, atreladas ao regime hídrico diferenciado às margens do rio Paraopeba e maior distância da área-fonte dos sedimentos, em um contexto de solos com alto teor de silte, também podem estar relacionados aos altos valores encontrados.

Altos teores de silte e argila provocam o entupimento dos poros do solo devido ao arranjo das partículas. Com o selamento superficial, a água não consegue infiltrar com facilidade, aumentando o escoamento superficial e as taxas de erosão hídrica. Este processo

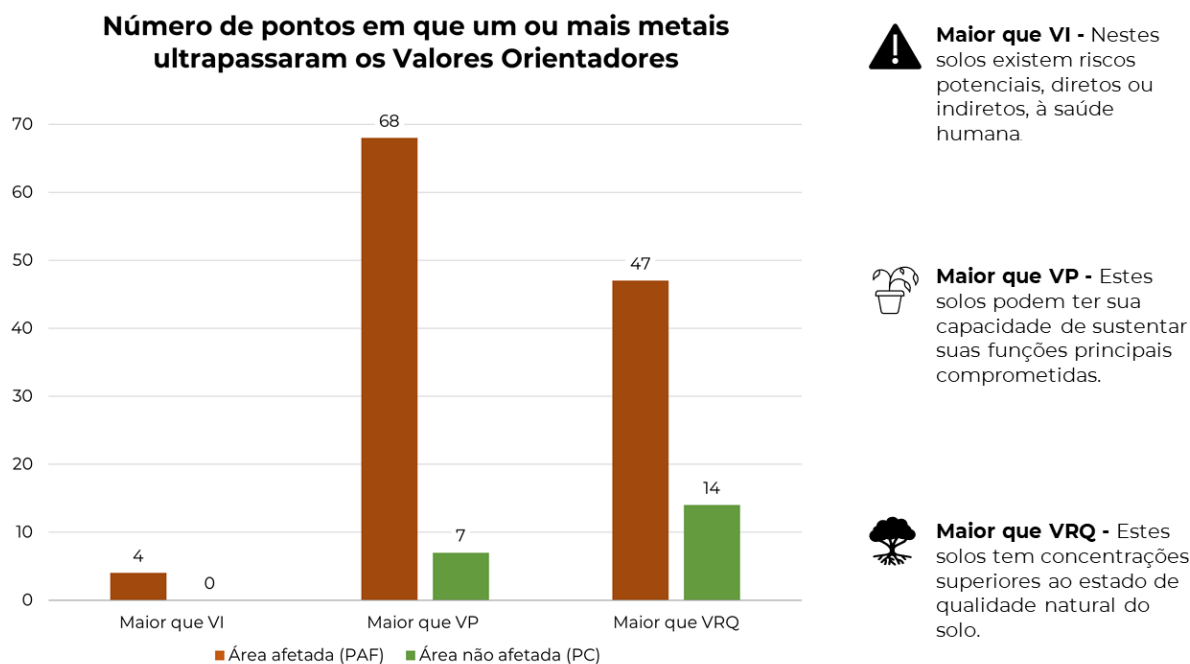
gera o carreamento da camada superficial do solo, que contém mais matéria orgânica e maior reserva de nutrientes, provocando o empobrecimento do solo e prejuízos ao crescimento das plantas. A recomposição natural da vegetação também é prejudicada, uma vez que é formada uma crosta dura à penetração de raízes e ao estabelecimento da vegetação. Um fator preocupante é que os metais tendem a apresentar maior associação com materiais de granulometrias mais finas como o silte e argila. Este fato associado ao aumento da erosão hídrica e à maior suscetibilidade à erosão eólica, contribuem para o carreamento deste material para outros compartimentos ambientais, gerando fontes secundárias de contaminação.

Para os **parâmetros químicos** não foi observada variabilidade tão expressiva quanto a encontrada entre os parâmetros físicos. Para **Capacidade de Troca Catiônica - CTC**, foi identificada diferença estatisticamente significativa entre PAF e PC na UP2 e UP6 e para Carbono Orgânico na UP4, UP5 e UP6, sendo que somente na UP4 e UP5 a mediana entre os PAF foi maior que a mediana entre os PC. Nos casos em que foi observada diferença significativa na CTC e conteúdo de **Carbono Orgânico**, não se observou um padrão coerente de aumento ou diminuição dos parâmetros entre os pontos afetados e pontos de referência. Conclui-se, portanto, que não é possível afirmar que os solos afetados apresentam CTC ou Carbono Orgânico alterados por exposição a material proveniente do rompimento, em comparação aos solos dos pontos controle. Ainda assim, a CTC e o conteúdo de Carbono Orgânico encontrados nos solos analisados podem influenciar na complexação, quelatação, adsorção, e disponibilização dos metais e metalóides analisados para outros compartimentos no ambiente.

Para o **pH em água**, a mediana entre os pontos afetados foi maior que entre os pontos de controle em todas as UP, no entanto, foi demonstrado diferença estatisticamente significativa de valor entre os PAF e PC em metade delas, nas UP3, UP4 e UP5. O incremento de pH observado entre os solos afetados pode se relacionar à exposição ao material proveniente do rompimento, uma vez que são reportados altos valores de pH para materiais dessa natureza. Entretanto, também pode ser considerada a possibilidade de os maiores valores de pH entre os solos afetados refletirem um comportamento natural dos solos, uma vez que é comum que solos de planície aluvial, apresentem valores de pH relativamente altos.

A análise dos resultados revelou que uma série de amostras excederam os Valores Orientadores para um ou mais metais (Figura 11).

Figura 11: Número de pontos em que as amostras de solo apresentaram um ou mais elementos químicos que ultrapassaram os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA N° 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM n° 166/2011.



Um total de quatro pontos apresentaram concentração superior ao VI Agrícola e/ou Industrial para um ou mais elementos químicos analisados, todos localizados na área afetada. Conforme o disposto na Resolução CONAMA N° 420/2009, o solo desses locais oferece riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana. O total de 75 pontos apresentaram concentração superior ao VP e igual ou inferior ao VI para um ou mais elementos químicos analisados. Destes, 68 se localizam na área afetada, e 7 se localizam em área não afetada.

O total de 61 pontos apresentaram concentração superior ao VRQ-MG e igual ou inferior ao VP para um ou mais elementos químicos analisados. Destes, 47 se localizam na área afetada, e 14 se localizam em área não afetada. Conforme o disposto na Resolução CONAMA no 420/2009, estes solos apresentam concentração destes elementos superior ao estabelecido como a qualidade natural do solo para o estado de Minas Gerais.

Diferente dos demais, 29 pontos foram apresentaram concentração inferior ao VRQ, sendo que 19 estão localizados em áreas não afetadas e 10 em áreas afetadas.

A partir da concentração de metais detectada e seguindo o que recomenda Resolução CONAMA 420/2009 os solos foram classificados, de acordo com a concentração de substâncias químicas em diferentes classes, podendo estar na faixa da Classe 1 que apresenta concentrações de substâncias químicas menores ou iguais ao VRQ, Classe 2 apresenta pelo menos uma substância química maior que o VRQ e menor ou igual ao VP,

Classe 3 são solos que apresentam pelo menos uma substância química maior que o VP e menor ou igual ao VI e a Classe 4 são solos que possuem concentrações de, pelo menos, uma substância química maior que o VI. Estas classes foram atribuídas de acordo com os elementos quantificados e seus respectivos Valores Orientadores.

A partir da classificação do solo, foi possível identificar os procedimentos de prevenção e controle da qualidade do solo que precisam ser adotados em cada ponto amostrado, de acordo com o que prevê com a Resolução CONAMA 420/2009. São eles para cada classe de solo:

- Solos de Classe 1 - Por apresentarem concentração de todos os metais analisados abaixo do Valor de Referência de Qualidade para o Estado de Minas Gerais, não existem ações requeridas para estes solos.
- Solos de Classe 2 - As ações requeridas para estes solos incluem verificação da possibilidade de ocorrência natural da substância ou da existência de fontes de poluição, com indicativo de ações preventivas de controle, quando couber, não cabendo necessariamente investigação.
- Solos de Classe 3 - As ações requeridas para estes solos incluem identificação da fonte potencial de contaminação, avaliação da ocorrência natural da substância, controle das fontes de contaminação e monitoramento da qualidade do solo e da água subterrânea.
- Solos de Classe 4 - São necessários estudos complementares com a finalidade de esclarecer a origem destas altas concentrações, o que é determinante para a classificação destes pontos como áreas contaminadas, e para a definição das ações requeridas de acordo com as diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas. São necessários também estudos que dimensionem a extensão das áreas apresentando solos com concentração de metais acima do VI.

A classificação dos solos amostrados na Região 3 de acordo com a concentração de metais e metaloides pode ser visualizada nas Figuras 12, 13 e 14.

Figura 13: Distribuição dos pontos de coleta de solo e classificação nas Classes de Qualidade do Solo de acordo com a Resolução CONAMA 420/2009. Parte 2 - Setor central da área de estudo.

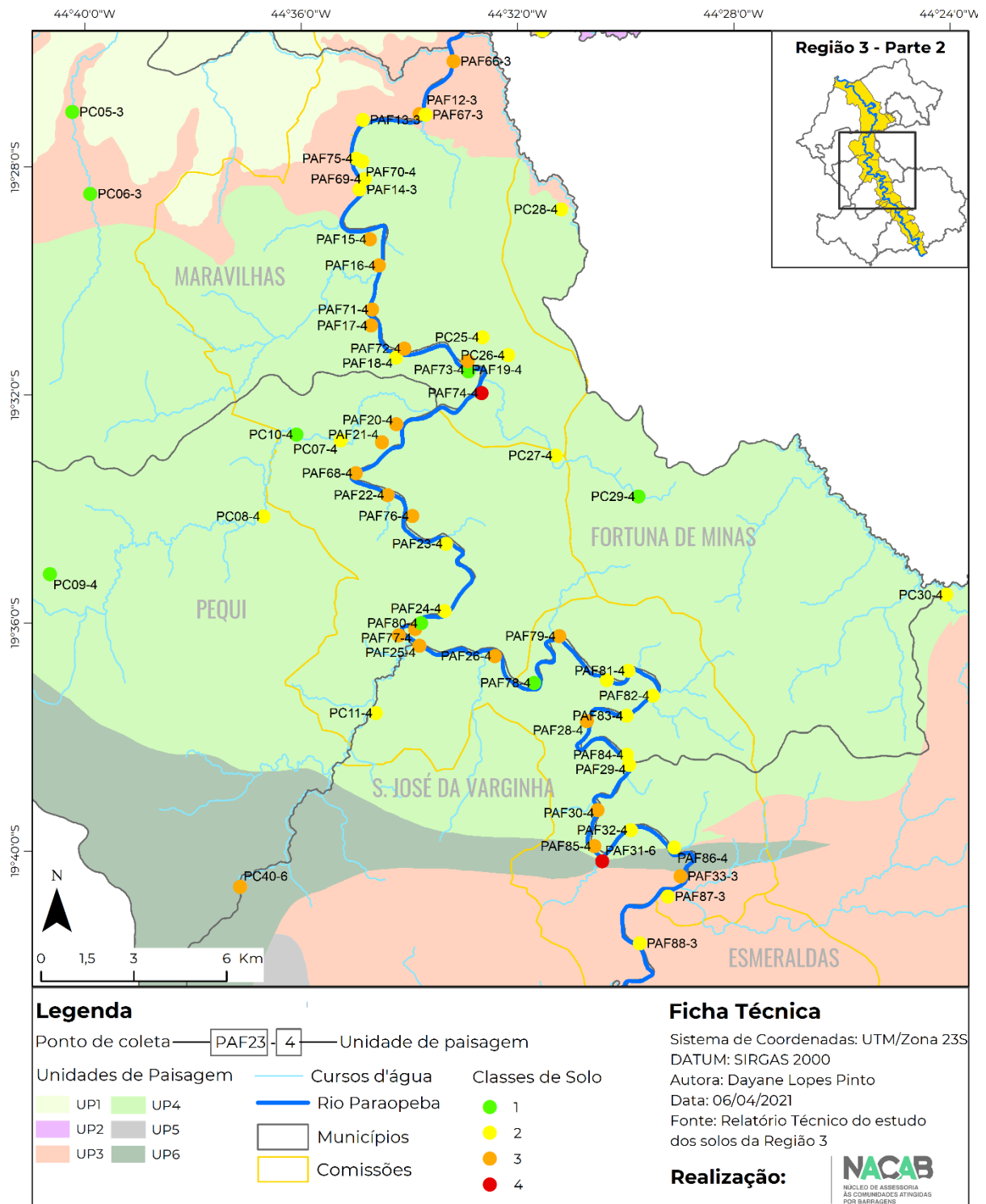
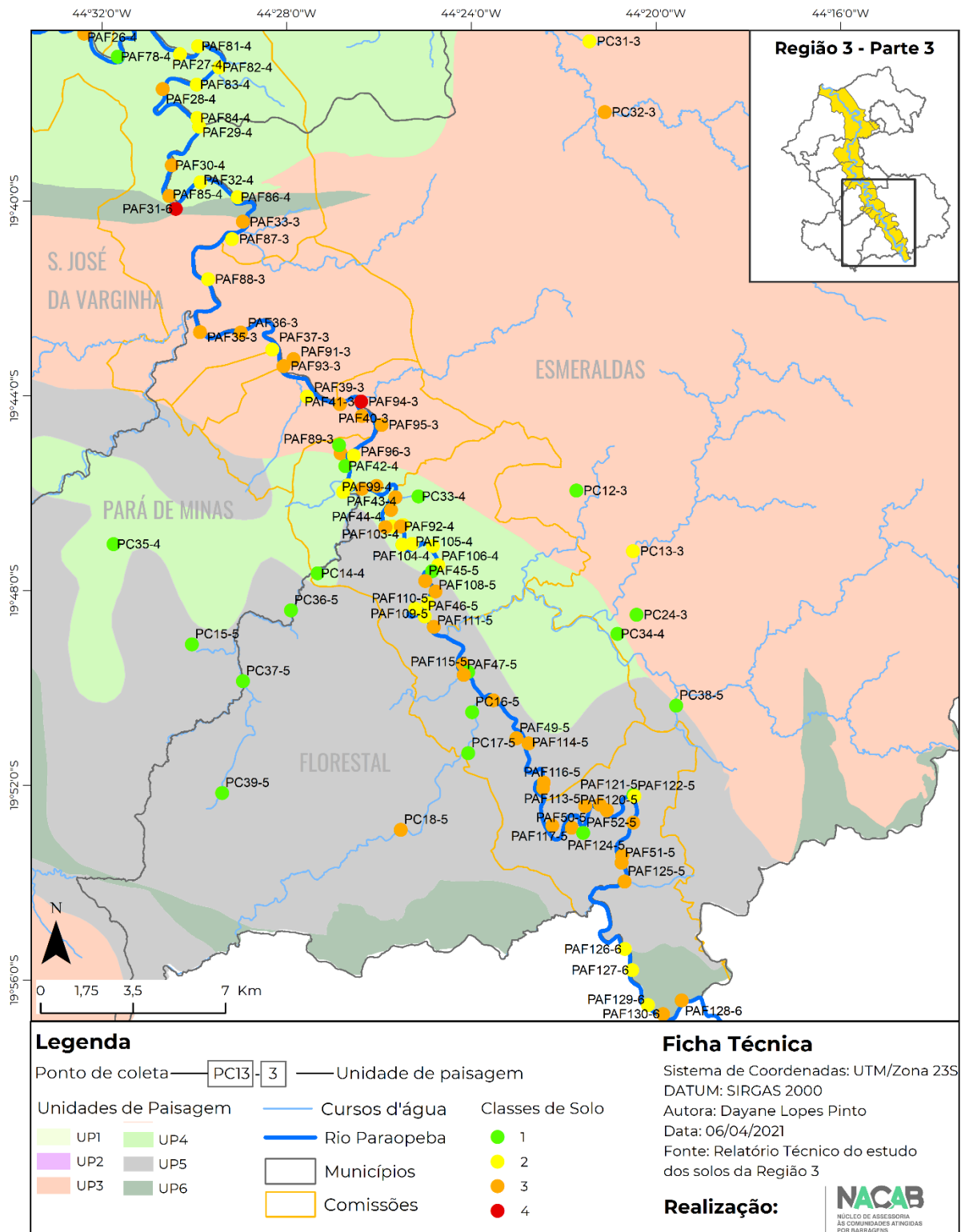


Figura 14: Distribuição dos pontos de coleta de solo e classificação nas Classes de Qualidade do Solo de acordo com a Resolução CONAMA 420/2009. Parte 3 - Setor sul da área de estudo.

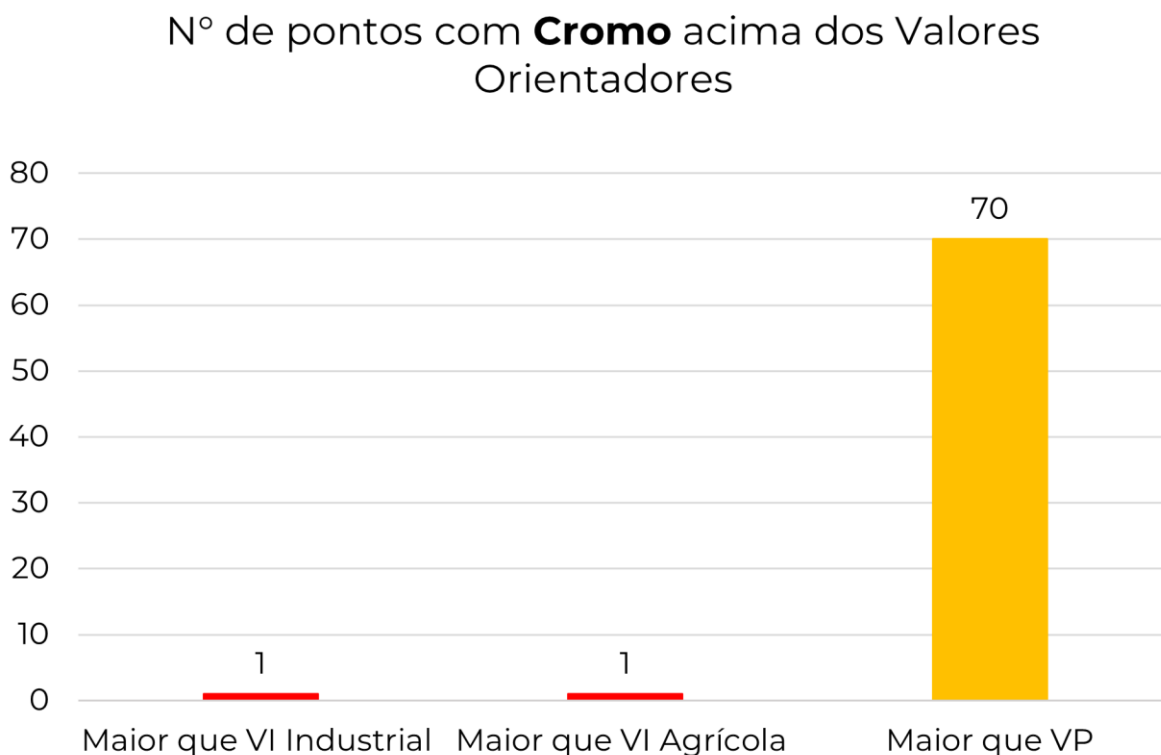


Entre os metais e metaloides que ultrapassaram os Valores Orientadores, os que excederam o VI foram também os que apresentaram maior número de amostras excedendo o VP. A seguir são listados os elementos que demandam maior atenção em função dos teores detectados. Foram eles:

1. Cromo

O Cromo foi o metal com maior número de pontos excedendo o VI (150 mg/kg), sendo dois pontos (1,2% do total), ambos em área afetada e localizados nos municípios de Papagaios (PAF01 – UP1) e Fortuna de Minas (PAF31 – UP6) (Figura 15). Foi também o elemento com maior número de pontos excedendo o VP (75 mg/kg), com 70 pontos (41,4% do total), sendo eles 65 PAF e 05 PC. A distribuição destes pontos nos municípios e comissões pode ser visualizada na Tabela 8.

Figura 15: Número de pontos amostrais da Região 3 no qual os teores de Cromo excederam os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA N° 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM no 166/2011.



VI = Valor de Investigação, VP = Valor de Prevenção.

Tabela 8: Distribuição e número de pontos que excederam o Valor de Prevenção (VP) para o elemento Cromo na Região 3.

MUNICÍPIO	COMISSÕES	Nº DE PONTOS COM CROMO ACIMA DO VP	TOTAL
Esmeraldas	Cachoeirinha	1	20
	Padre João, Vinhático e Bambus	7	
	Riacho	2	
	Taquaras	5	
	São José	1	
	Vista Alegre	4	
Papagaios	Papagaios	8	9
	Fora da Comissao	1	
Fortuna de Minas	Beira Córrego e Retiro dos Moreiras	4	8
	Córrego da Areia	3	
	Três Barras	1	
Florestal	Valentim, Ribeirão do Ouro e Marinheiros	7	8
	Fora da Comissao	1	
Paraopeba	Zona Rural	5	6
	Fora da Comissao	1	
São J. da Varginha	São José da Varginha	5	5
Pará de Minas	Chacreamento Paraopeba	2	5
	Chacreamento Vargem Grande	2	
	Muquém	1	
Pequi	Pequi	4	5
	Fora da Comissao	1	
Maravilhas	Maravilhas	4	4
TOTAL	-	70	70

O estudo de caracterização geoquímica da Bacia do rio São Francisco, no qual está inclusa a Bacia do rio Paraopeba, foi realizado antes do rompimento e detectou teores de **Cromo** excedendo os Valores Orientadores (VI e VP) em amostras de solo e sedimento da Bacia do rio Paraopeba. Este estudo não diagnostica se os teores são provenientes de fontes antrópicas ou geogênicas, já que se trata de uma região com importantes jazimentos de ferro e outros minerais. Vale ressaltar que o Atlas geoquímico não analisa apenas solos de várzea como o presente estudo, estando em um contexto ambiental diferente, não podendo serem feitas comparações diretas. Admite-se, no entanto, que estes influenciam os solos de várzea com suas partículas carregadas pela erosão. Em outro estudo, de Furlan et al. (2020), realizado após o rompimento, foi verificada a presença de Cromo acima do VI e VP em

amostras de solo aluvial não afetado e acima do VP em áreas afetadas pelo rejeito na bacia do rio Paraopeba.

Levando em consideração estes estudos e a caracterização do rejeito da barragem pela Perícia Criminal Federal, no qual não foram detectados teores acima dos Valores Orientadores para Cromo, **pressupõe-se que os altos teores de fundo geoquímico da região e os registrados nos sedimentos fluviais exerçam influência nos atributos dos solos analisados, e as situações em que esses valores excedem o VI possam estar sendo geradas por fontes de contaminação de origem antrópica, com baixa probabilidade de relação com o teor do rejeito do rompimento.**

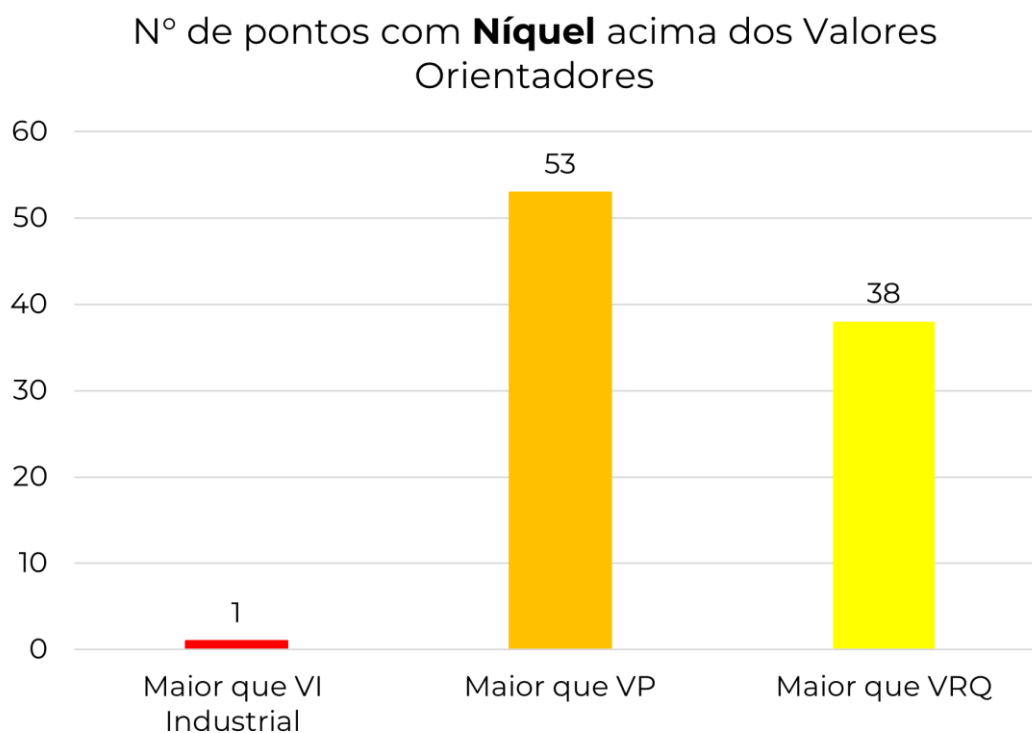
O Cromo é um elemento relativamente estável, apresenta baixa mobilidade no solo e nas plantas e restrita permeabilidade nas membranas celulares. A sua presença no solo, acima das concentrações aceitáveis, interfere negativamente no crescimento das plantas que o absorve e o compartimentaliza, especialmente nas raízes, podendo levar a planta a morte. O Cromo na sua forma trivalente (Cr^{3+}) participa do metabolismo humano, porém a principal forma que ele se encontra na natureza é na sua forma hexavalente (Cr^{6+}), que é muito reativa e tóxica, podendo causar danos ao DNA, aos pulmões, ao fígado, entre outros órgãos e atividades metabólicas essenciais à saúde humana e animal.

2. Níquel

O Níquel foi o segundo elemento com maior número de amostras excedendo VI e VP (Figura 16). Foi detectado um ponto acima do VI Industrial (130 mg/kg) também no PAF31 (UP6) em Fortuna de Minas. Outros 53 pontos (31,4% do total) excederam o VP (30 mg/kg), sendo 51 PAF e 2 PC, e 38 pontos (21,9% do total) superaram o VRQ (21,5 mg/kg), sendo 36 PAF e 2 PC. A distribuição destes pontos nos municípios e comissões pode ser visualizada na Tabela 9.

O estudo de caracterização geoquímica, mencionado anteriormente, também registrou teores que excederam os Valores Orientadores de Níquel em amostras de solos e sedimentos da Bacia do rio Paraopeba, antes do rompimento. As mais altas concentrações de Níquel tanto nos sedimentos quanto nos solos, acima inclusive do VI Industrial, foram verificadas à montante da área de estudo, na porção sul da bacia. Similar ao elemento Cromo, o Níquel também foi registrado acima do VI e VP em uma amostra de solo não afetado e afetado respectivamente, no estudo de Furlan et al. (2020). Em relação à composição do rejeito, foram detectados teores de Níquel acima do VP em 9 das 24 amostras analisadas pela Perícia Criminal Federal.

Figura 16: Número de pontos amostrais da Região 3, no qual os teores de Níquel excederam os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA N° 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM no 166/2011.



VI = Valor de Investigação, VP = Valor de Prevenção, VRQ = Valor de Referência de Qualidade.

Para os resultados obtidos, e considerando os estudos consultados, é possível tecer discussão similar ao do elemento Cr, em relação à possível contribuição de sedimentos com altas concentrações deste metal, provenientes de setores a montante da bacia na constituição do material de origem dos solos, com reflexos na concentração destes metais nos solos estudados. Não sendo descartada a hipótese do incremento deste elemento nas áreas afetadas, quando comparadas às não afetadas, ter sido provocado pelo contato com o rejeito e sedimento depositados sob o solo.

O Níquel é um dos metais pesados mais comuns nos solos. Ele, em baixas quantidades, age como micronutriente essencial nas plantas, em excesso, se torna tóxico. O Níquel, assim como os demais metais pesados, é biocumulativo nos organismos. Portanto, as principais vias de exposição animal e humana, são pela ingestão de água e alimentos contaminados. Já existem comprovações científicas de que o excesso de Níquel no organismo humano e animal pode causar, dermatites, má formação de fetos, anencefalia e variados tipos de câncer.

Tabela 9: Distribuição e número de pontos que excederam o Valor de Prevenção (VP) para o elemento Níquel na Região 3.

MUNICÍPIO	COMISSÕES	Nº DE PONTOS COM NÍQUEL ACIMA DO VP	TOTAL
Esmeraldas	Cachoeirinha	1	15
	Padre João, Vinhático e Bambus	5	
	Riacho	3	
	Taquaras	2	
	São José	1	
	Vista Alegre	3	
Papagaios	Papagaios	4	4
Fortuna de Minas	Beira Córrego e Retiro dos Moreiras	4	7
	Córrego da Areia	2	
	Três Barras	1	
Florestal	Valentim, Ribeirão do Ouro e Marinheiros	7	7
Paraopeba	Zona Rural	3	4
	Fora da Comissão	1	
São J. da Varginha	São José da Varginha	5	5
Pará de Minas	Chacreamento Paraopeba	2	4
	Chacreamento Vargem Grande	1	
	Muquém	1	
Pequi	Pequi	3	4
	Fora da Comissão	1	
Maravilhas	Maravilhas	3	3
TOTAL	-	53	53

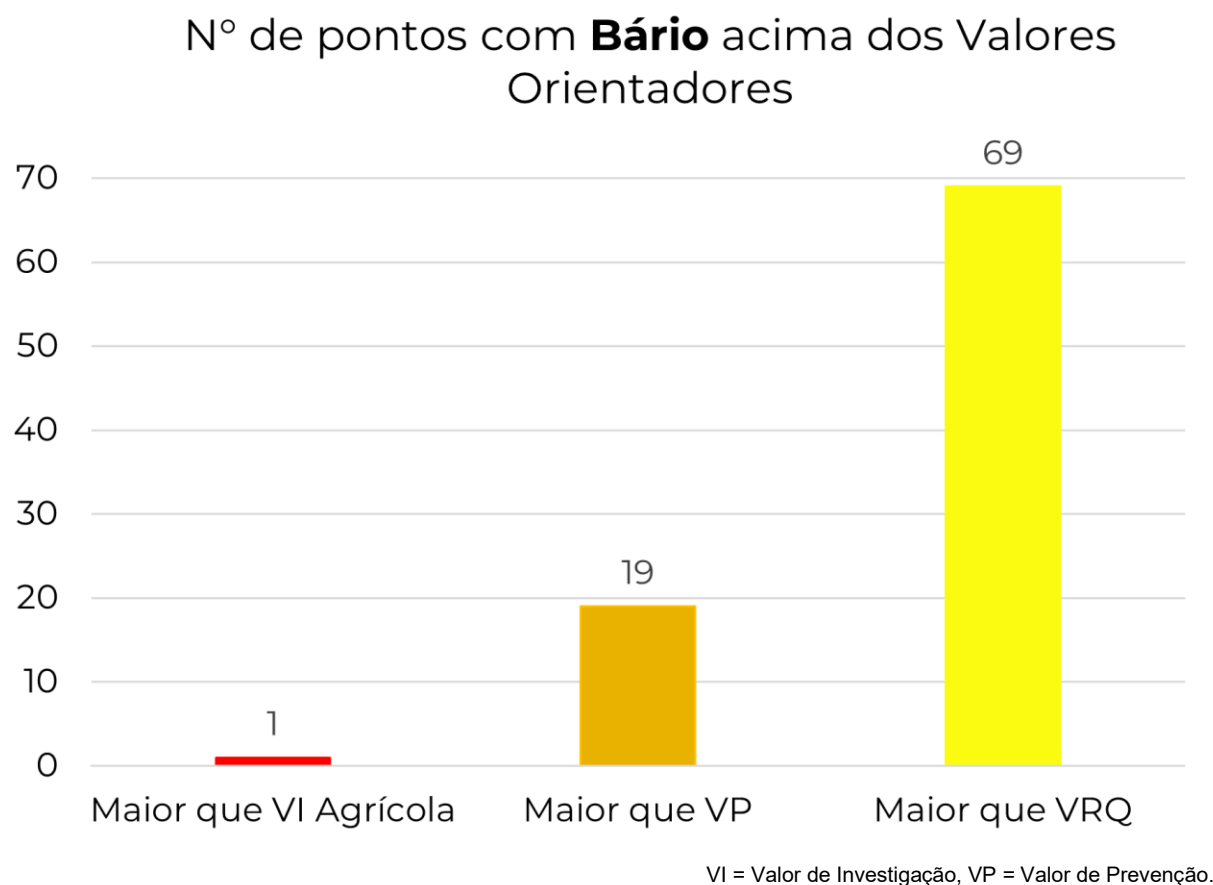
3. Bário

O Bário ocupou o terceiro lugar entre os metais com maior número de pontos que excederam VI e VP. Foi detectado um ponto (0,6% do total) acima do VI Agrícola (300 mg/kg), o PAF74 localizado em Fortuna de Minas, na comissão de Beira Córrego e Retiro dos Moreiras. Além deste, amostras de solo de 19 pontos (11,2%) superaram o VP (150 mg/kg), sendo que 16 são PAF e 3 PC. O Bário superou ainda o VRQ-MG (93 mg/kg) em 69 amostras (40,8% do total), sendo 60 de PAF e 9 de PC (Figura 17). A distribuição destes pontos pode ser visualizada na Tabela 10.

Em relação ao Bário, não foram reportadas altas concentrações nos solos ou nos sedimentos da bacia do Rio Paraopeba nos dados do atlas geoquímico antes do rompimento. Furlan et al. (2020) não quantificou este elemento e na caracterização do rejeito o Bário apresentou valores acima do VP em 3 de 24 amostras. A alta concentração de Ba no solo, superando o VI em um ponto, não pode ser explicada por altas concentrações nos solos em escala regional, ou por influência de sedimentos no material de origem deste solo como o

Cromo e Níquel. Nesse caso, é possível inferir que a causa da alta concentração se deva a algum fator local e pontual, de origem antrópica e/ou geogênica.

Figura 17: Número de pontos amostrais da Região 3 no qual os teores de Bário excederam os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA N° 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM no 166/2011.



O Bário existe em rochas naturais no ambiente, porém ele não é um elemento essencial ao metabolismo de plantas, animais e humanos. As plantas absorvem o Bário e o compartimentaliza nas suas células, mas não existem comprovações de que elas o utilizem para alguma atividade metabólica, pelo contrário, existem estudos que comprovam que em determinadas concentrações o Bário influencia negativamente na fotossíntese e no desenvolvimento de plantas, como as gramíneas.

Na natureza o Bário existe em formas solúveis e não solúveis em água. Representantes de ambas as formas podem ser tóxicas para humanos, uma vez que as formas não solúveis em água podem ser solubilizadas pelas enzimas estomacais. Um dos efeitos do Bário no organismo humano ou animal é a diminuição dos níveis de Potássio no

sangue, o que causa uma patologia chamada Hipocalemia. As complicações dessa patologia podem ocasionar vômitos, diarreias, cólicas abdominais, taquicardia ventricular, hipertensão ou hipotensão arterial, fraqueza muscular e paralisia. A principal via de exposição a contaminação por Bário é por ingestão de água e alimentos contaminados.

Tabela 10: Distribuição e número de pontos em que as amostras de solo excederam o Valor de Referência de Qualidade (VRQ) e Valor de Prevenção (VP) para o elemento Bário na Região 3.

MUNICÍPIO	COMISSÕES	Nº DE PONTOS COM BÁRIO ACIMA DO VP	TOTAL
Esmeraldas	Riacho	1	3
	Taquaras	1	
	São José	1	
Papagaios	Papagaios	3	3
Fortuna de Minas	Beira Córrego e Retiro dos	1	3
	Moreiras	1	
	Córrego da Areia	1	
	Três Barras	1	
Florestal	Valentim, Ribeirão do Ouro e Marinheiros	1	1
Paraopeba	Zona Rural	3	4
	Fora da Comissao	1	
São J. da Varginha	São José da Varginha	2	2
Pará de Minas	Chacreamento Paraopeba	1	1
Maravilhas	Maravilhas	2	2
TOTAL	-	19	19

De forma geral, não foi observado vínculo espacial entre os pontos com valor acima do Valor de Investigação - VI, uma vez que estes distam mais de 50km entre si. Além disso, as amostras coletadas nos pontos mais próximos a eles não apresentaram valores tão altos e acima do VI. Tal padrão espacial nos leva a inferir que estas áreas com indícios de contaminação dificilmente têm relação com a deposição do sedimento e rejeito após as inundações, uma vez que são casos isolados e com valores discrepantes dos demais. Sendo assim, as causas relacionadas e mais prováveis podem estar relacionadas ao uso antrópico atual e pretérito do solo, que vem gerando uma fonte local de contaminação. Outras causas como anomalias geoquímicas nestes locais também podem ser levadas em consideração, porém mesmo considerando valores naturalmente altos em função das condições

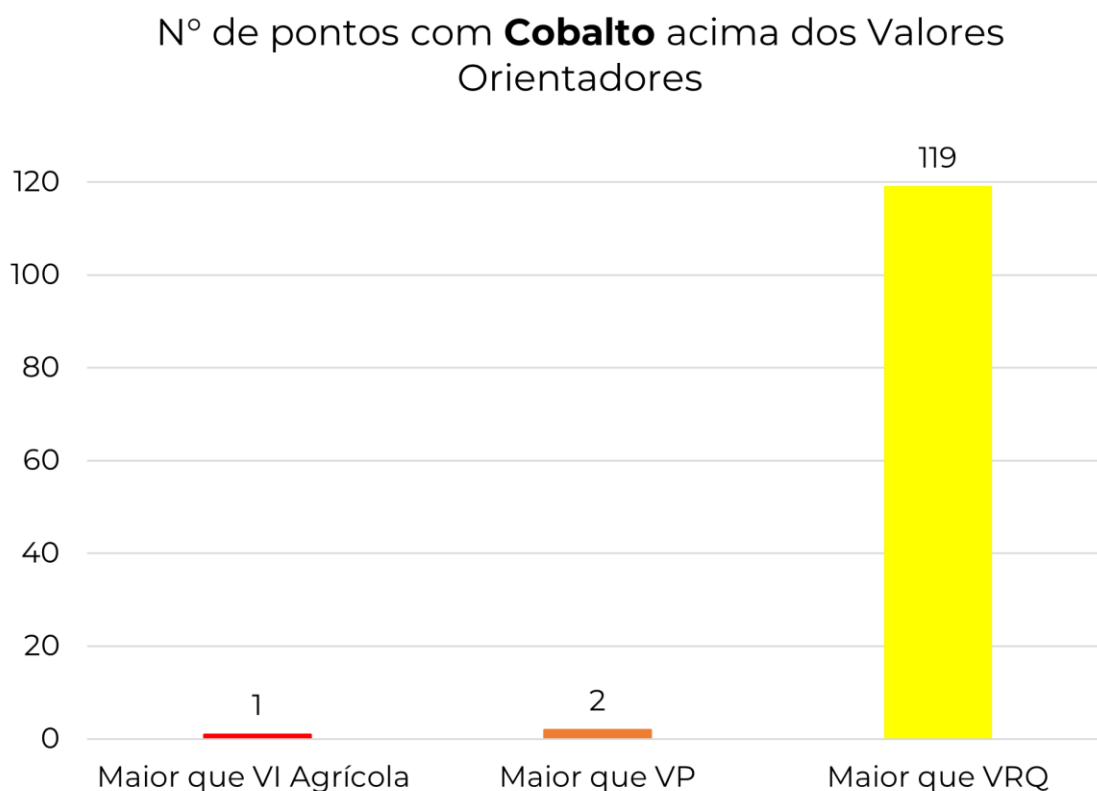
geoquímicas, os pontos que excederam o VI apresentam valores muito mais altos que os pontos não afetados na mesma Unidade de Paisagem.

Todos as localidades que apresentaram concentrações acima do VI devem ser investigadas e efetivados os procedimentos previstos na Resolução CONAMA 420/2009 para solos de Classe 4.

4. Cobalto

O Cobalto também foi verificado acima do VI Agrícola (35 mg/kg) em um ponto, no PAF94 em Esmeraldas, na comissão de Riacho. Outros dois pontos (1,2% do total) excederam o VP (25 mg/kg), são eles o PAF31 (UP6) na comissão de São José da Varginha e o PAF78 (UP4) em Fortuna de Minas na comissão de Três Barras. Além destes, 119 pontos (68,6% do total) excederam o VRQ (6 mg/kg), sendo 111 PAF e 8 PC (Figura 18).

Figura 18: Número de pontos amostrais da Região 3 no qual os teores de Cobalto excederam os Valores Orientadores previstos na Resolução CONAMA N° 420/2009 e Deliberação Normativa COPAM no 166/2011.



VI = Valor de Investigação, VP = Valor de Prevenção, VRQ = Valor de Referência de Qualidade.

Embora a área de estudo não coincida com concentrações especialmente altas de Co pelo mapa geoquímico ora citado, os autores reportam altas concentrações do metal nas cabeceiras do Rio Paraopeba, especialmente nos sedimentos. Furlan et al. (2020) não quantificou este elemento e na caracterização do rejeito da Perícia Criminal Federal o Cobalto apresentou valores acima do VP em 2 de 24 amostras e acima do VRQ nas 24 amostras. Tendo em vista que o material de origem de grande parte dos solos estudados é constituído por sedimentos fluviais, provenientes de áreas à montante na bacia e depositados nas planícies aluviais onde se localizam os solos coletados, é possível considerar a hipótese de haver relação entre as altas concentrações de Cobalto nos sedimentos fluviais das cabeceiras da bacia, com as concentrações superando o VRQ-MG em um número expressivo de amostras de solo estudados.

O Cobalto é um micronutriente essencial para as plantas leguminosas, pois participa da fixação de nitrogênio que é realizada por essas plantas. Ele também é essencial aos humanos, pois compõe a estrutura da vitamina B12. Sendo assim, tanto a deficiência, quanto o excesso desse composto no organismo animal e humano podem levar a morte. Na crosta terrestre o Cobalto é um elemento relativamente raro, mas é usado em vários procedimentos industriais, especialmente na moagem do minério para produção de ligas metálicas. As vias de exposição com chances toxicológica a esse composto podem compreender o contato com solo, a respiração do ar e a ingestão de água e alimentos contaminados.

De forma geral, não foi observado vínculo espacial entre os pontos com valor acima do Valor de Investigação - VI, uma vez que estes distam mais de 50km entre si. Além disso, as amostras coletadas nos pontos mais próximos a eles não apresentaram valores tão altos e acima do VI. Tal padrão espacial nos leva a inferir que estas áreas com indícios de contaminação dificilmente têm relação com a deposição do sedimento e rejeito após as inundações, uma vez que são casos isolados e com valores discrepantes dos demais. Sendo assim, as causas relacionadas e mais prováveis podem estar relacionadas ao uso antrópico atual e pretérito do solo, que vem gerando uma fonte local de contaminação. Outras causas como anomalias geoquímicas nestes locais também podem ser levadas em consideração, porém mesmo considerando valores naturalmente altos em função das condições geoquímicas, os pontos que excederam o VI apresentam valores muito mais altos que os pontos não afetados na mesma Unidade de Paisagem.

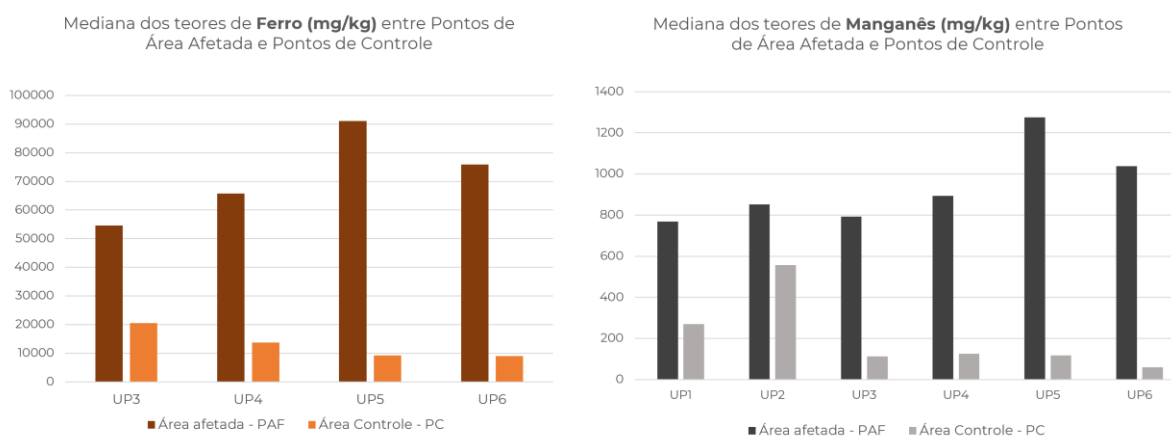
Todos as localidades que apresentaram concentrações acima do VI devem ser investigadas e efetivados os procedimentos previstos na Resolução CONAMA 420/2009 para solos de Classe 4.

Além do Cromo, Níquel, Bário e Cobalto, outros metais também excederam o VRQ e VP, porém em menor número de pontos, como é o caso do elemento Arsênio que foi verificado acima do VP (15 mg/kg) em 5 pontos (3% do total), e acima do VRQ (8 mg/kg) em

39 pontos (17,75% do total), sendo todos PAF. O Cobre também foi registrado acima do VP (60 mg/kg) em 2 pontos (1,2%) e acima do VRQ (49 mg/kg) em 6 pontos (3,6% do total). Por fim, o Zinco com 60 pontos (35,5% do total) acima do VRQ e o Vanádio com 2 pontos acima do VRQ (129 mg/kg).

O Ferro (Fe) e o Manganês (Mn) foram os metais com as maiores concentrações registradas entre todos os elementos analisados. Este resultado era previsível, uma vez que estes metais estão presentes, de forma natural, em maiores quantidades que os demais metais pesados nos solos. O Manganês apresentou diferença significativa na concentração entre os PAF e PC, conjugado a mediana maior entre os pontos afetados em todas as UP. Para o elemento Fe, esta situação ocorreu em 4 das 6 UP. Sendo verificado, portanto, indicativos de incremento significativo destes elementos nas áreas afetadas quando comparadas às não afetadas (Figura 19). O Ferro e o Manganês não possuem valores de referência definidos pelo CONAMA para possíveis análises de contaminação, não sendo possível tecer discussões relativas aos limites legais para estes elementos.

Figura 19: Comparação das medianas de Ferro (mg/kg) e Manganês (mg/kg) que apresentaram, simultaneamente, diferença significativa entre amostras de solo de PAF e PC e mediana maior entre os PAF nas Unidades de Paisagem da Região 3.



Tanto o **Ferro** quanto o **Manganês** fazem parte da constituição básica do rejeito, conforme Laudo Pericial Criminal, sendo os metais que também apresentam os valores mais altos entre os demais. Mais da metade das amostras de solo (68,4%) analisadas na Região 3 apresentaram teores de Ferro superiores à concentração máxima detectada na composição do rejeito. O Manganês, no entanto, apresentou 95,27% dos teores detectados com valor inferior ao valor mínimo registrado para o elemento no rejeito (2910 mg/kg). Os valores máximos observados para ambos os metais, neste estudo, são mais altos que os valores

máximos reportados por Furlan et al. (2020) para solos coletados a menos de 10 km do local do rompimento, e menos de 30 dias após o desastre.

Estes resultados dão indícios de que os solos da Região possuem o fundo (background) natural geoquímico rico em Ferro e Manganês. Principalmente pelo fato de terem sido detectados cerca de 8 pontos com teores de Ferro superiores ao teor máximo e 3 solos com concentração de Manganês mais alta que o máximo reportado em pontos de área impactada em Brumadinho, muito próximo ao local do rompimento, no estudo de Furlan et al. (2020). Em tese, essa área altamente impactada pelo rejeito deveria apresentar valores de Ferro muito superiores aos da Região 3.

Mesmo levando em consideração os teores naturais altos para o Ferro e Manganês, os resultados apontam diferenças significativas entre áreas afetadas e não afetadas com medianas expressivamente maiores nas áreas afetadas. O incremento nos teores destes elementos nas áreas afetadas pode estar associado ao contato com rejeito, uma vez que as altas concentrações de Mn e Fe são consistentemente distribuídas na área de estudo, embora os valores máximos em diversas UP sejam valores discrepantes isolados. Outro fator que pode explicar os valores encontrados, se relaciona ao comportamento natural dos metais no solo. Tanto o Fe quanto o Mn têm sua mobilidade no ambiente controlado pelas condições redox do solo. Em condições redutoras, estes metais apresentam elevada mobilidade, ao passo em que em condições oxidantes têm sua mobilidade reduzida. Este padrão de mobilidade pode condicionar uma migração de Fe e Mn nas bacias hidrográficas, resultando em altas concentrações nos solos das planícies aluviais, especialmente dos cursos d'água principais, como é o caso do Rio Paraopeba. Os resultados não possibilitam estabelecer a causa do incremento.

O Ferro e o Manganês em baixas concentrações são micronutrientes essenciais às plantas, animais e humanos. Porém, em altas concentrações o Manganês pode causar neurotoxicidade e associação com doenças como Parkinson e Alzheimer. E o Ferro pode causar hemocromatose (doença genética e hereditária que causa lesões em tecidos e consequentes complicações hepáticas e miocárdicas). O Ferro apesar de abundante naturalmente ele é pouco biodisponível nos solos. Em condições de pH baixo, tanto o ferro, quanto o Manganês podem ser liberados em altas quantidades na forma absorvível pelas plantas o que pode causar fitotoxicidade. Tanto a deficiência desses metais, quanto o excesso destes, podem ocasionar problemas a saúde. A principal via de exposição é a ingestão de água e alimentos contaminados.

Foram identificadas e listadas situações que podem indicar incremento ou alteração na condição natural dos teores de metais dos solos da área afetada. Para isso foram comparadas as medianas dos tipos de pontos para cada um dos 15 metais nas 6 UP. A ocorrência simultânea dos critérios de diferença significativa entre os pontos, e mediana maior

entre os PAF indicou incremento na concentração do metal entre os solos afetados, em comparação aos solos de referência de cada Unidade de Paisagem (UP). Os elementos com indicativo de incremento estão apresentados na Tabela 11, agrupados por UP.

Tabela 11: Grupos de solo com possível incremento e alteração da condição natural nos PAF, definidos pela ocorrência simultânea de diferença estatisticamente significativa na concentração do metal entre os tipos de pontos e mediana da concentração do metal maior

ELEMENTO	UP1	UP2	UP3	UP4	UP5	UP6
Arsênio (As)	+				+	
Bário (Ba)	+			+	+	+
Chumbo (Pb)					+	+
Cobalto (Co)	+		+	+	+	
Cobre (Cu)			+	+	+	
Cromo (Cr)	+		+	+	+	
Ferro (Fe)			+	+	+	+
Manganês (Mn)	+	+	+	+	+	+
Níquel (Ni)	+		+	+	+	
Silício (Si)	+	+				
Vanádio (V)			+	+	+	
Zinco (Zn)	+			+	+	

UP1 - 8 elementos (53,3%) cumprem ambos os critérios podendo ser considerada a possibilidade de incremento na área afetada para: Arsênio, Bário, Cobalto, Cromo, Manganês, Níquel, Silício e Zinco.

UP2 - 2 elementos (13,3%) cumprem ambos os critérios, podendo ser considerada a possibilidade de incremento na área afetada para: Manganês e Silício. A UP2 é o grupo de pontos com menor número de elementos nesta situação entre as UP.

UP3 - 7 elementos (46,7%) cumprem ambos os critérios, podendo ser considerada a possibilidade de incremento na área afetada para: Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Manganês, Níquel e Vanádio.

UP4 - 9 elementos (60,0%) cumprem ambos os critérios, podendo ser considerada a possibilidade de incremento na área afetada para: Bário, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Manganês, Níquel, Vanádio e Zinco.

UP5 - 11 elementos (73,3%) cumprem ambos os critérios, podendo ser considerada a possibilidade de incremento na área afetada: Arsênio, Bário, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Manganês, Níquel, Vanádio e Zinco. A UP5 é o grupo de pontos com maior número de elementos nesta situação.

UP6 - 4 elementos (26,7%) cumprem ambos os critérios, podendo ser considerada a possibilidade de incremento na área afetada para: Bário, Chumbo, Ferro e Manganês.

Os resultados deste estudo possibilitaram verificar que o incremento nos teores de Silte, com altas concentrações nos solos de área afetada, da maioria das Unidades de Paisagem, é preocupante à medida que pode contribuir para o encrostamento e selamento superficial do solo. A formação de uma crosta pode gerar prejuízos à infiltração da água, condicionando maiores taxas de erosão hídrica e carreamento dos nutrientes do solo, prejuízos ao crescimento da vegetação e à recomposição de espécies nativas bem como o aumento na dificuldade de manejo agrícola dessas áreas. Outro fator preocupante é a capacidade que este material possui de ser transportado a longas distâncias, atuando como uma fonte secundária de contaminação.

Os metais que mais excederam os Valores Orientadores nas amostras de solo, em sua maioria das áreas afetadas, em ordem decrescente foram: Cromo, Níquel, Bário, Cobalto, Arsênio, Cobre, Zinco e Vanádio. Os solos com concentrações de metais acima do Valor de Investigação em quatro pontos amostrais oferecem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana. Torna-se necessária a notificação desta condição aos proprietários rurais e a promoção de ações para gerenciamento de áreas contaminadas. Alguns procedimentos para este gerenciamento são primordiais de serem efetuados como o diagnóstico, com a investigação detalhada das fontes de contaminação e a avaliação de risco a fim de subsidiar a etapa de intervenção, com a execução de ações de controle para a eliminação do perigo ou redução, a níveis toleráveis, dos riscos identificados. Para as áreas com concentrações de elementos acima do Valor de Prevenção, são necessárias medidas de investigação e controle das fontes de contaminação e monitoramento da qualidade do solo e da água subterrânea. Por fim, para as áreas com concentrações acima do Valor de Referência da Qualidade são necessárias ações preventivas, caso haja fontes de poluição. Além dos procedimentos previstos pelo CONAMA, a promoção do estudo de Riscos à Saúde mostra-

se ainda mais necessária, já que é possível identificar concentrações de metais que oferecem sérios riscos à população local.

Foram identificadas e listadas situações que podem indicar incremento nas concentrações de metais dos solos de área afetada de cada Unidade de Paisagem. A metodologia adotada, no entanto, não permite estabelecer a origem e as causas do incremento dos elementos, sendo possível fazer poucas inferências devido ao número escasso de estudos que analisam metais e metaloides nos solos aluviais da bacia do Rio Paraopeba, antes do rompimento. O estabelecimento das causas e a eventual relação denexo causal com o rompimento da Barragem I da Mina Córrego do Feijão deve ser avaliada caso a caso, e por isso é recomendado que sejam realizados estudos que se aprofundem nessa investigação e esclareçam a origem do comportamento observado.

Este estudo consistiu no primeiro diagnóstico ambiental dos solos da Região 3 após o rompimento, bem como o estudo com o maior número de amostras de solo de áreas afetadas pelo rompimento analisadas no contexto da bacia do rio Paraopeba. Servindo, portanto, como um importante material para responder aos questionamentos dos atingidos(a) sobre a condição atual do solo e direcionar as ações necessárias de serem realizadas em função das concentrações de metais verificadas. Além disso, estes dados servirão para subsidiar os demais estudos de investigação dos impactos ambientais e danos à saúde provocados pelo rompimento da barragem, que já estão sendo realizados, e os que atuarão no monitoramento a longo prazo.

3.4 QUALIDADE DO AR E POEIRA DOMICILIAR

Não houve atualizações em relação a dados da rede de monitoramento automático de qualidade do ar do Estado de Minas Gerais disponibilizados pela Gerência de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões (GESAR) da Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais - FEAM. Também não foram publicados artigos que buscam compreender melhor a situação da qualidade do ar e poeira domiciliar nos municípios da Região 3.

A título de atualização, no parecer técnico da Gerência Socioambiental do NACAB, presente no "*Relatório de Campo: Caracterização das zonas atingidas pelas enchentes do rio Paraopeba e danos às propriedades da Comissão de Taquaras, Esmeraldas, MG*", foi solicitado a ampliação da rede de monitoramento de qualidade do ar para as áreas atingidas pelas enchentes do rio Paraopeba na Região 3, porém sem respostas dos órgãos responsáveis.

3.5 ESPÉCIES VEGETAIS E PRODUTOS DERIVADOS

No **Diagnóstico Emergencial: Integração de Pesquisas sobre Meio Físico e Biótico**, a partir da análise de trabalhos científicos produzidos até novembro de 2020, observou-se que, a partir de estudos em contextos semelhantes, o contato das espécies vegetais com o rejeito ou solo impactado não acarretou a contaminação dos tecidos vegetais em todos os casos analisados, uma vez que espécies diferentes possuem capacidades distintas de absorção de contaminantes. No entanto, pode-se constatar que, independentemente do estudo e espécie avaliada, todos os estudos experimentais relataram uma queda da fertilidade do solo, o que afetou o desenvolvimento das espécies e sua produtividade global.

Assim, dadas as similaridades entre os rompimentos nas bacias dos rios Doce e Paraopeba, nas zonas afetadas pelos sedimentos contaminados carregados pelas sucessivas cheias do rio Paraopeba também poderão ser detectados problemas relativos ao desenvolvimento e produtividade das plantas, prejudicando a renda das pessoas que utilizavam essas áreas para plantio. Do mesmo modo, o uso contínuo da água do rio Paraopeba para irrigação poderá potencializar os impactos sobre os produtos vegetais. Além disso, os estudos analisados até o final de 2020 indicaram que o manejo do solo poderá alterar a biodisponibilidade dos metais pesados no solo e a exposição crônica das plantações, o que, por sua vez, potencializaria a contaminação dos tecidos, gerando a biomagnificação desses componentes ao longo da cadeia alimentar, sendo necessário mensurar esses efeitos a longo prazo.

No final de 2020, Parente e colaboradores publicaram um novo estudo científico no qual buscaram compreender avaliar a contaminação por elementos-traço (As, Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn)¹ em sedimentos, peixes e macrófitas ao longo do rio Paraopeba, a montante e a jusante do local da ruptura da barragem, durante as estações seca e chuvosa.

No que se refere às macrófitas, que são aquelas plantas aquáticas que vivem em áreas de brejo e áreas submersas, os autores fizeram 20 coletas, oito na estação seca e 12 na estação chuvosa. Em cada ponto de coleta, foram coletadas entre 5 e 10 espécimes de duas espécies de plantas. Três desses pontos de coleta estavam situados na Região 3.

Os autores constataram que, dentre todos os elementos, alumínio, ferro e manganês foram os metais que apresentaram maiores concentrações em todas as temporadas de coleta (Tabela 12). As maiores concentrações de alumínio e ferro ocorreram no Reservatório Retiro Baixo, na estação de seca, enquanto o manganês foi encontrado em maior concentração

¹ As - arsênio; Al - alumínio; Cd - cádmio; Co - cobalto; Cr - cromo; Cu - cobre; Fe - ferro; Hg - mercúrio; Mn - manganês; Ni - níquel; Pb - chumbo; Zn - zinco.

próximo ao local do rompimento. Eles ainda observaram um aumento nas concentrações medianas de ferro e manganês nos tecidos das plantas aquáticas, se compararmos as amostras coletadas a jusante e montante do rompimento. Por fim, os autores observaram um aumento na bioacumulação/bioconcentração de alguns elementos tóxicos a jusante do local da ruptura da barragem. Os resultados ainda indicam a relação entre o aumento das concentrações desses elementos tóxicos na água e na biota.

Tabela 12: Concentração de elementos traço (mg/kg) em amostras de macrófitas do rio Paraopeba nas seções a montante da entrada de rejeitos (-34 a -12 km), a jusante do impacto (2,8-38 km), a jusante do rio Betim (58-247 km), reservatório Retiro Baixo (291-309 km).

Elementos	ESTAÇÃO SECA				ESTAÇÃO CHUVOSA			
	A montante do impacto (N=2)	A jusante do impacto (N=3)	A jusante do rio Betim (N=2)	Reservatório Retiro Baixo (N=1)	A montante do impacto (N=4)	A jusante do impacto (N=3)	A jusante do rio Betim (N=4)	Reservatório Retiro Baixo (N=4)
Alumínio (29.3%)	1429 972 - 1886	1308 640 - 4573	2223 2007 - 2440	3728 3728 - 3728	1611 351 - 7106	1275 85.5 - 1303	2703 1885 - 3600	416 416 - 416
Arsênio (17.4%)	0.69 0.64 - 0.73	1.12 0.89 - 1.21	0.49 0.44 - 0.53	0.58 0.58 - 0.58	0.37 0.24 - 0.94	0.68 0.26 - 0.99	0.35 0.20 - 1.10	0.17 0.17 - 0.17
Cádmio (24.8%)	0.32 0.25 - 0.39	0.31 0.17 - 0.38	0.14 <0.23 - 0.28	<0.23 <0.23 - <0.23	<0.23 <0.23 - <0.23	<0.23 <0.23 - <0.23	<0.23 <0.23 - <0.23	<0.23 <0.23 - <0.23
Cobalto (24.9%)	1.01 1.00 - 1.02	1.17 0.73 - 2.01	3.41 1.70 - 5.12	3.59 3.59 - 3.59	2.02 1.40 - 3.64	3.60 2.94 - 3.64	2.93 2.52 - 7.62	2.94 2.94 - 2.94
Cromo (29.0%)	2.00 1.00 - 3.00	6.00 2.00 - 6.00	2.50 2.00 - 3.00	7.00 7.00 - 7.00	4.89 3.35 - 7.41	4.85 3.76 - 4.90	6.42 4.84 - 22.9	2.80 2.80 - 2.80
Cobre (23.1%)	13.5 11.0 - 16.0	12.0 11.0 - 12.0	13.0 10.0 - 16.0	17.0 17.0 - 17.0	9.20 8.21 - 9.90	10.7 9.65 - 14.1	13.1 11.2 - 24.8	5.29 5.29 - 5.29
Ferro (24.9%)	1509 1172 - 1847	2026 1994 - 2466	2627 1893 - 3362	3940 3940 - 3940	1652 613 - 1795	1924 1045 - 2405	1560 1283 - 2614	413 413 - 413
Mercúrio (29.6%)	0.03 0.03 - 0.04	0.06 0.03 - 0.09	0.03 0.01 - 0.04	0.06 0.06 - 0.06	0.10 0.10 - 0.11	0.09 0.09 - 0.13	0.12 0.10 - 0.14	0.09 0.09 - 0.09
Manganês (26.2%)	413 271 - 556	500 369 - 607	570 458 - 682	653 653 - 653	463 117 - 474	837 449 - 1401	453 415 - 605	447 447 - 447
Níquel (11.5%)	9.00 6.00 - 12.0	4.00 3.00 - 5.00	4.50 4.00 - 5.00	5.00 5.00 - 5.00	5.46 3.12 - 6.81	16.0 3.33 - 17.2	7.97 6.02 - 9.60	5.05 5.05 - 5.05
Chumbo (11.4%)	<3.10 <3.10 - <3.10	<3.10 <3.10 - <3.10	<3.10 <3.10 - <3.10	<3.10 <3.10 - <3.10	2.03 1.50 - 2.34	5.08 1.28 - 5.80	2.28 1.39 - 3.62	2.35 2.35 - 2.35
Zinco (12.7%)	53.0 36.0 - 70.0	23.0 23.0 - 26.0	35.5 15.0 - 56.0	43.0 43.0 - 43.0	23.6 21.9 - 29.0	27.3 22.3 - 43.0	38.2 26.6 - 40.6	20.2 20.2 - 20.2

Obs. Os valores são medianas (linha superior) e mínimo - máximo (linha inferior). Cd e Co não são representados porque todas as amostras estavam abaixo do Limites de Detecção do Método.

Além do estudo desenvolvido por Parente e colaboradores (2021), em março de 2021, Souza e colaboradores publicaram um estudo com objetivo de compreender os efeitos genotóxicos da água e sedimentos do rio Paraopeba em cebolas (*Allium Cepa*). A cebola é utilizada neste como espécie metodológica padrão por ser comumente utilizada nesses casos, deste modo servindo como um indicador de potenciais efeitos tóxicos da água e sedimentos. Entre os efeitos adversos foram considerados os potenciais anormalidades celulares, que prejudicam o seu desenvolvimento e a produtividade.

Foram coletadas amostras de água e sedimento em seis pontos do rio Paraopeba, um ponto a montante do ponto de rompimento e cinco pontos a jusante. A região 3 está contemplada com um ponto, localizado em São José da Varginha (S4). Este ponto de coleta está localizado a 111 km do local do rompimento. Esses pontos foram os mesmos utilizados por Vergílio et al. (2020). Além das características físico-químicas da água e sedimento, todas as amostras foram analisadas quanto à concentração de metais.

No que se refere aos efeitos tóxicos nas células de cebolas (*Allium Cepa*), o estudo demonstrou que a água e o sedimento do rio Paraopeba possuem potencial citogenotóxico, o que significa que podem afetar as células e causar mutações em espécies vegetais. Segundo os autores, isso acontece pois o rompimento da barragem aumentou imediatamente a turbidez da água e os níveis de material particulado em suspensão na água, juntamente com a entrada de grandes quantidades de Fe, Al, Mn, Ti, terras raras e metais tóxicos que influenciaram a incidência das anormalidades genotóxicas, principalmente em S2 (Brumadinho) e S3 (Juatuba). As células da cebola foram mais afetadas pela água do que pelo sedimento quando consideramos as amostras mais próximas ao rompimento (S2 e S3). Porém se consideramos as amostras mais distantes, o sedimento foi o componente ambiental que mais afetou as células da cebola.

Como as amostras foram coletadas apenas 5 dias após o rompimento, os pontos em Angueretá e Retiro Baixo (S4 e S5) foram considerados como livres da contaminação do rompimento, e portanto, graus de toxicidade são indícios de poluição pretéritas ao rompimento, que já haviam sido identificadas por outros autores (Thompson et al., 2020).

De toda forma, observou-se uma correlação positiva entre a concentração de metais na água e sedimento com a diminuição das divisões celulares, o que também pode ser considerado um efeito adverso. Também observou-se, mesmo com a diminuição da divisão celular, que existe uma correlação direta entre as anormalidades celulares e os elementos tóxicos (principalmente metais) na água do rio Paraopeba. Esses resultados são similares ao encontrado dentro do contexto do rompimento da Barragem de Fundão, na Bacia do Rio Doce (Segura et al., 2016; Quadra et al., 2019).

Esses resultados refletem as características semelhantes dos dois rejeitos que lançaram para as bacias não apenas Ferro, Alumínio e Manganês (elementos predominantes do minério), mas também metais como Arsênio, Cádmio, Cromo, Mercúrio e Chumbo (Segura et al., 2016; Vergílio et al., 2020,2021) que têm um potencial citogenotóxico e carcinogênico considerável (Callegaro et al., 2018). Ao avaliar os efeitos genotóxicos a longo prazo na bacia do rio Doce, Vergílio e colaboradores (2021), observaram que houve persistência desses fenômenos mesmo após seis meses do rompimento, o que sugere a remobilização de elementos tóxicos do sedimento do leito do rio para a coluna d'água. Esse resultado sugere um possível cenário de dano futuros no rio Paraopeba.

Os autores ainda concluíram que as concentrações de alguns metais tóxicos como Arsênio, Cádmio, Cobre, Cromo, Mercúrio, Chumbo e Níquel ultrapassaram o Nível de Efeitos Limiar (TEL) ou mesmo o Nível de Efeito Provável (PEL) para Cd (Vergilio et al, 2020) ao longo do curso de Rio Paraopeba, sugerindo o efeito adverso a todas as comunidades biológicas. Também foi observado o enriquecimento para vários elementos incluindo Ag, Cd, Cu, Fe, Hg, La, Li, Mn, P, Pb, Y e Zn que indica o efeito da lama nas concentrações de metal em comparação com os valores de fundo especialmente nos locais mais próximos da barragem.

Por fim, indicam a necessidade urgente de monitoramento a longo prazo da água e sedimento do rio Paraopeba, bem como seus potenciais efeitos tóxicos. Dados complementares a este artigo podem ser encontrados online em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145193>.

3.6 ANIMAIS DOMÉSTICOS E PRODUTOS DERIVADOS

Não foram encontrados novos estudos relacionados aos níveis de contaminação e ou mortalidade de animais domésticos dentro da Região 3. Apesar das assessorias técnicas terem construído um novo ofício justificando a necessidade dos dados ao Instituto Mineiro de Agropecuária - IMA e pedindo novamente as informações, até o presente momento, esses dados não foram disponibilizados pelo Comitê Pró-Brumadinho para as Assessorias Técnicas Independentes - ATIs.

3.7 ICTIOFAUNA

No documento **Diagnóstico Emergencial: Integração de Pesquisas sobre Meio Físico e Biótico**, a partir da análise de trabalhos científicos, constatou-se que a bioacumulação de metais no tecido muscular e órgãos internos de peixes expostos à água e sedimentos do rio Paraopeba, já anteriores ao rompimento da barragem I da Mina do Córrego do Feijão, pode resultar no processo de magnificação trófica, sugerindo eventuais riscos de contaminação humana através do consumo de peixe contaminado. Além disso, a presença de contaminantes na água pode aumentar as enfermidades em todas as fases de vida dos peixes, o que poderá acarretar mudanças comportamentais, redução de crescimento, redução da taxa reprodutiva e até mesmo mortalidade de indivíduos. Sendo assim, a contaminação do rio Paraopeba tem potencial de provocar a rejeição pelos consumidores de pescados e reduzir o valor econômico dos peixes ou a perda de interesse por essa fonte alimentar.

Constatou-se, em 2019, que a mortalidade acentuada de peixes no rio Paraopeba teve correlação direta com o rompimento, principalmente na fase aguda do evento, visto que a necropsia apontou a anoxia dos espécimes, devido aos prejuízos à função respiratória associada a lesões nas brânquias causadas pelo aumento de sólidos suspensos na água e a fadiga/estresse em função do rompimento. No período em questão, essa mortalidade pode ter reduzido a oferta de peixes para as atividades pesqueiras em pontos da calha do rio Paraopeba, resultando em prejuízos financeiros para as pessoas que tinham como principal fonte de renda a pesca. Além disso, a perda da capacidade de recomposição do estoque de peixes, devido às interferências nos processos reprodutivos, tende a impactar a oferta do pescado a médio e longo prazos.

No estudo publicado por Parente e colaboradores (2020), dada a complexa composição dos rejeitos de minério de ferro, a avaliação da contaminação de elementos-traço na biota aquática tem como objetivo compreender e prever impactos crônicos para o ecossistema e a saúde humana.

A área desse estudo foi dividida em cinco seções: **1)** Seção a montante, localizada acima do local do rompimento da barragem (-34,3 a -3,22 km; 6 pontos de amostragem) e no curso superior do rio Paraopeba. Esta seção já é impactada pela fragmentação de habitat, agricultura, mineração e atividades industriais, não apresentando saneamento urbano adequado; **2)** Seção a jusante (2,8 - 45 km do local do rompimento da barragem; 6 pontos de amostragem), a área mais afetada até a confluência com o rio Betim e uma barragem de uma usina termelétrica. Esta seção inclui a região metropolitana de Belo Horizonte, que concentra atividades com alto potencial poluidor, incluindo indústrias e grandes minas com mais de 50 barragens de rejeitos; **3)** Seção a jusante do rio Betim (58,0 - 246,7 km; 4 pontos de amostragem), que inclui atividades rurais, principalmente pastagens, e extração mineral (ex.: areia, cascalho e pedras ornamentais); **4)** Reservatório Retiro Baixo (291,1 - 309,9 km; 3 pontos de amostragem), usado principalmente para a geração de energia hidrelétrica e cobrindo 35 km do rio Paraopeba (25 km²); **5)** Reservatório de Três Marias (429,4 - 436,5 km; 2 pontos de amostragem), também usado para a geração de energia hidrelétrica e formado por rios importantes, entre eles o rio São Francisco. A amostragem de sedimentos superficiais, peixes e macrófitas foi realizada nas estações seca (agosto/2019) e chuvosa (dezembro/2019).

As amostras de peixes (total n=321; estação seca, n=158; estação chuvosa, n=163) foram coletadas usando diferentes métodos: pesca, rede de emalhar e redes manuais de arrasto. Em cada ponto de amostragem, 5 a 10 amostras foram coletadas dos seguintes grupos funcionais: detritívoros/iliófagos, onívoros e carnívoros/piscívoros. A amostragem de espécies de peixes foi baseada nos seguintes critérios: i) cobertura dos diferentes níveis tróficos selecionados; ii) preferência para espécies não migratórias, a fim de monitorar a

contaminação local e; iii) relevância para o consumo humano. Os espécimes coletados foram identificados, pesados (g), medidos (cm) e os músculos dorso-laterais foram extraídos.

Um fator de impacto de controle (CI) foi usado para padronizar a variação entre as concentrações de amostras a montante e jusante do local do rompimento da barragem. A equação proposta (Eq. 1) foi: $C_{\text{jusante}} / (C_{\text{jusante}} + C_{\text{montante}})$. Onde, C_{jusante} = concentração média de cada elemento nas amostras a jusante; e C_{montante} = concentração média de cada elemento nas amostras a montante. O fator de CI varia de 0 a 1 (alta diminuição e aumento da concentração do elemento na área impactada, respectivamente), com 0,5 indicando nenhuma mudança.

Uma alta variação de resultados agregados foi registrada ao longo do rio, marcadamente na estação seca. A menor variação na estação chuvosa está possivelmente associada ao efeito de diluição resultante do aumento sazonal do volume de água no rio Paraopeba.

Em comparação com a seção a montante, concentrações medianas mais altas de Fe, Mn e Zn foram registradas no músculo das amostras de peixes da seção com a entrada de rejeitos (2,8-38 km), em ambas as estações (Tabela 13). Ferro e manganês são predominantes nos rejeitos (Vergilio et al., 2020) e suas concentrações aumentadas em amostras de peixes provavelmente estão relacionadas ao desastre. O níquel também registrou aumento na concentração na seção mais impactada (a jusante) em comparação com a seção a montante, com o valor máximo encontrado no presente estudo na estação seca 5,69 (U^2 : $\pm 1,84$) mg/kg e significativamente maior concentração mediana na estação chuvosa (Tabela 13). Por outro lado, as amostras a montante tinham concentrações mais elevadas ($p < 0,05$) de Hg (estação seca) e Cr, Cu, Hg e Pb em ambas as estações, indicando outras fontes de contaminação local.

No primeiro ponto a jusante do rio Betim e da barragem de uma usina termelétrica, houve redução expressiva das concentrações da maioria dos elementos, em ambas as estações. Além disso, na estação seca, houve um forte aumento nas concentrações no ponto a 185 km do rompimento, possivelmente influenciado pela lixiviação associada a locais próximos de mineração a céu aberto. Uma tendência de aumento das concentrações medianas para a maioria dos elementos foi observada no Reservatório Retiro Baixo nas estações seca e chuvosa, o que possivelmente está relacionado à mudança para um ambiente lântico. Esta grande mudança permite a sedimentação de partículas menores e resulta em uma maior superfície de contato para a adsorção dos íons metálicos, que podem aumentar a exposição da biota a maiores concentrações de elementos-traço. No Reservatório

² Incerteza expandida relativa: quantidade que define um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos à grandeza que se pretende medir.

de Três Marias, as concentrações medianas da maioria dos elementos (Al, As, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni e Zn) foi maior na estação chuvosa em comparação com a estação seca (Tabela 13).

A toxicidade e a mobilidade do arsênio (As) estão relacionadas a sua forma química, com as formas inorgânicas [ex.: arsenito - As (III) e arsenato As (V)] representando as mais tóxicas e cancerígenas. Por outro lado, as principais formas de arsênio em peixes são arsenicais orgânicos (ex.: arsenobetaina e arsenocolina), que são muito menos tóxicos (ATSDR, 2007). De acordo com o conhecimento dos autores, não há estudos que avaliam a concentração de arsênio em peixes do rio Paraopeba. Para este elemento químico, na estação seca, as concentrações foram estatisticamente mais altas na seção a jusante do local da ruptura da barragem de rejeitos ($0,42 \pm 0,53$ mg/kg) e no Reservatório Retiro Baixo ($0,75 \pm 0,53$ mg/kg), em comparação com as mesmas seções na estação chuvosa. A concentração de arsênio excedeu o limite estabelecido pela legislação brasileira - 1,0 mg/kg - (RDC 42/2013)³ em 3% das amostras de peixes.

Em relação ao cádmio (Cd), a ingestão alimentar é uma importante via de exposição humana que pode causar danos agudos e crônicos (ex.: nefrotoxicidade⁴ e imunotoxicidade⁵), além de ser cancerígeno (ATSDR, 2012). Todas as amostras deste estudo de peixes tinham concentração de cádmio abaixo do limite de detecção (0,02 mg/kg), mas estudos anteriores ao rompimento relataram concentrações médias de cádmio variando de $0,07 \pm 0,06$ mg/kg a $0,26 \pm 0,11$ mg/kg (Arantes et al., 2016; Savassi et al., 2016), ou seja, acima do limite da legislação brasileira para consumo de peixe - 0,05 mg/kg - (RDC 42/2013).

A toxicidade do cromo (Cr) está relacionada a sua especiação química e a mais tóxica forma (hexavalente) é reduzida no estômago a sua forma trivalente, que tem baixa absorção (0,5–2,0%) no trato gastrointestinal de humanos (ATSDR, 2012). No presente estudo, as maiores concentrações médias de cromo ($p < 0,05$) foram registradas no Reservatório Retiro Baixo durante as estações seca e chuvosa ($1,80 \pm 1,31$ e $1,26 \pm 0,54$ mg/kg, respectivamente), enquanto a concentração de linha de base de cromo mais alta ($2,93 \pm 0,86$ mg/kg) foi registrada próximo à confluência com o rio Betim.

Entre as várias formas de mercúrio (Hg) no meio ambiente, o metilmercúrio pode causar danos ao sistema nervoso e aos rins e é a principal forma em peixes, representando

³ RDC 42/2013 - Limites máximos de contaminantes: Arsênio Total - 1mg/kg; Cádmio Total - 0,05 mg/kg; Chumbo Total - 0,3 mg/kg; Mercúrio Total: 0,5 mg/kg (peixes, exceto predadores) e 1,00 mg/kg (peixes predadores).

⁴ Nefrotoxicidade: esse termo é empregado para caracterizar qualquer efeito deletério sobre a função renal causado por um agente químico específico. Embora algumas substâncias endógenas (produzidas no próprio organismo) possam produzir efeitos nefrotóxicos, o amplo predomínio nas nefrotoxicidades se deve aos xenobióticos. Xenobiótico é toda substância química, oriunda da indústria ou da natureza, que não é encontrada no organismo humano.

⁵ Imunotoxicidade: resposta imunitária inapropriada induzida, direta ou indiretamente, por xenobióticos ou agentes físicos.

mais de 90% do mercúrio total (ATSDR, 1999). Na estação seca, o mercúrio registrou maiores concentrações a montante do local do rompimento em comparação com a primeira seção a jusante (Tabela 13, tendência que já foi observada em amostras de água do rio Paraopeba poucos dias após o rompimento da barragem (Vergilio et al., 2020). Entre todas as seções da área de estudo, as médias de mercúrio foram estatisticamente mais altas no Reservatório Retiro Baixo (estação seca: $0,15 \pm 0,09$ mg/kg) e em ambas as estações no Reservatório de Três Marias (estação seca: $0,21 \pm 0,09$ mg/kg; estação chuvosa: $0,14 \pm 0,06$ mg/kg). Diferenças significativas nas concentrações de mercúrio por grupos funcionais foram registradas, com médias mais altas ocorrendo em espécies carnívoras/piscívoras ($0,13 \pm 0,09$ mg/kg), seguido por onívoros ($0,06 \pm 0,04$ mg/kg) e detritívoros/iliófagos ($0,04 \pm 0,03$ mg/kg). As maiores concentrações em espécies de carnívoros/piscívoros indicam transferência trófica e biomagnificação, o que foi amplamente relatado em estudos anteriores (Azevedo-Silva et al., 2016; Bisi et al., 2012). Estudos conduzido no rio Paraopeba antes do rompimento reportaram médias de mercúrio em peixes piscívoros entre $0,41 \pm 0,18$ mg/kg a jusante da foz do Rio Betim (Arantes et al., 2016) e $0,36 \pm 0,20$ mg/kg a jusante da barragem de Retiro Baixo (Savassi et al., 2016). Concentrações de mercúrio relatadas antes e depois do rompimento não ultrapassaram os limites de segurança estabelecidos pela legislação brasileira para peixes não carnívoros (0,5 mg/kg) e peixes carnívoros (1,0 mg/kg) (RDC 42/2013).

Entre todos os elementos avaliados, o chumbo (Pb) é o contaminante mais crítico com 41% das amostras excedendo 0,3 mg/kg (RDC 42/2013). Um padrão sazonal foi observado, com concentrações de chumbo estatisticamente maiores na estação chuvosa nas seções impactadas a montante e a jusante e no Reservatório de Retiro Baixo, em comparação com as mesmas seções na estação seca (Tabela 13). Estudos anteriores também relataram contaminação por chumbo em peixes do rio Paraopeba, com médias variando de 0,51 a 3,31 mg/kg (Arantes et al., 2016; Savassi et al., 2016). Portanto, o consumo de pescado na região de estudo representa um problema de saúde pública, uma vez que o chumbo pode estar associado a um aumento nos casos de anemia, podendo também causar problemas neurológicos, deficiências cognitivas e transtornos comportamentais, especialmente em crianças (Hou et al., 2013; Shah et al., 2010).

Tabela 13: Concentração de elementos traço (mg/kg) e incerteza expandida relativa (U) em amostras de peixes do rio Paraopeba a montante da entrada de rejeitos, a jusante do impacto (2,8-38 km), a jusante do rio Betim (58-247 km), reservatório Retiro Baixo.

Elementos	ESTAÇÃO SECA					ESTAÇÃO CHUVOSA				
	A montante do impacto (N=35)	A jusante do impacto (N=34)	A jusante do rio Betim (N=54)	Reservatório Retiro Baixo (N=25)	Reservatório Três Marias (N=10)	A montante do impacto (N=32)	A jusante do impacto (N=40)	A jusante do rio Betim (N=48)	Reservatório Retiro Baixo (N=28)	Reservatório Três Marias (N=15)
Alumínio (28.1%)	16.9 1.79–55.1	7.28 1.09–55.2	4.61 0.37–173	5.14 2.80–7.78	0.69 0.28–1.34	0.54 <0.37–11.1	0.78 0–3.67	<0.37 <0.37–3.61	4.13 1.48–6.27	3.03 2.27–4.41
Arsênio (16.9%)	0.19 0.05–0.96	0.24 0.05–2.52	0.23 0.07–0.96	0.68 0.15–2.09	0.13 0.10–0.27	0.18 0.04–0.36	0.16 0.04–0.41	0.17 0.07–0.54	0.22 0.07–0.65	0.22 0.11–0.45
Cromo (20.1%)	0.41 0.07–0.88	0.08 <0.02–0.35	0.26 <0.02–1.53	1.77 0.02–4.92	0.06 0.03–0.09	0.55 0.19–1.20	0.09 0.02–0.41	0.19 0.05–3.12	1.28 0.33–2.58	0.47 0.14–0.80
Cobre (23.0%)	0.33 0.12–0.69	0.16 0.03–0.29	0.21 0.03–1.22	0.16 0.02–1.05	0.11 0.05–0.19	0.62 0.27–2.87	0.39 0.14–2.90	0.30 0.11–3.12	1.06 0.33–1.75	0.71 0.30–0.96
Ferro (26.5%)	8.88 2.28–28.2	26.7 3.62–87.8	9.97 1.58–50.0	29.2 6.12–90.7	5.43 3.23–15.7	11.8 3.05–31.0	17.9 4.38–45.0	7.72 2.08–28.4	9.18 4.01–59.1	10.3 4.05–20.
Mercúrio (20.5%)	0.06 0.01–0.53	0.03 0.01–0.11	0.06 0.01–0.14	0.13 0.02–0.38	0.19 0.11–0.35	0.04 0.01–0.16	0.05 0.01–0.30	0.03 0.01–0.14	0.03 0.01–0.28	0.15 0.05–0.28
Manganês (24.0%)	0.77 0.13–3.65	1.13 0.35–6.45	0.98 0.23–4.41	3.60 1.32–10.0	0.30 0.19–0.59	0.52 0.13–1.08	0.59 0.21–1.23	0.37 0.04–0.88	0.39 0.10–2.37	0.83 0.27–1.25
Níquel (31.4%)	0.30 0.03–0.91	<0.16 <0.16–5.69	<0.16 <0.16–1.44	0.15 0.03–0.86	<0.16 <0.16 - <0.16	0.27 <0.16–1.06	0.62 <0.16–1.41	0.59 <0.16–1.58	0.64 <0.16–1.42	0.44 <0.16–0.95
Chumbo (21.1%)	<0.17 <0.17–0.64	<0.17 <0.17 - <0.17	0.54 <0.17–4.86	<0.17 <0.17–0.22	<0.17 <0.17 - <0.17	1.41 0.30–3.15	0.17 <0.17–3.67	0.52 <0.17–2.83	0.24 <0.17–2.33	<0.17 <0.17 - <0.17
Zinco (21.1%)	3.60 2.00–8.28	4.20 2.89–9.26	4.00 1.85–12.6	7.85 3.15–29.5	3.66 2.66–6.96	2.92 1.83–7.89	3.34 1.65–6.60	3.01 1.59–7.76	3.73 2.22–6.81	3.75 3.06–7.32

Os valores são medianos (linha superior) e mínimo - máximo (linha inferior). Cd e Co não são representados porque todas as amostras estavam abaixo do Limites de Detecção do Método.

O fator de impacto de controle (CI), aplicado para comparar as concentrações de elementos-traço em amostras de sedimentos, peixes e macrófitas, evidenciou uma tendência de maior bioacumulação no primeiro trecho impactado do rio Paraopeba. Para as amostras de peixes, foram observadas maiores concentrações a jusante ($p < 0,05$) para Fe, Mn, Ni e Zn na estação seca ou chuvosa, além do aumento das concentrações de As (estação seca) e Hg (estação chuvosa).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No que concerne à água superficial e sedimentos, pode-se observar que, com base nos dados secundários de amostras coletadas em 2019, as concentrações são similares às aquelas já reportadas no Diagnóstico Emergencial de dezembro de 2020. Por sua vez, os dados do IGAM apresentados no primeiro trimestre de 2021 mostram que valores de ferro, alumínio, manganês e chumbo continuam a ser detectados acima de seus respectivos valores máximos permitidos, mesmo após dois anos do rompimento da barragem. É importante destacar que as chuvas podem promover a remobilização dos sedimentos do fundo do rio. Quanto à água subterrânea, o monitoramento realizado pela Secretaria Estadual de Saúde, entre janeiro de 2019 e novembro de 2020, revelou alterações na concentração de vários elementos, tais como como antimônio, arsênio, bário, chumbo e cromo para a Região 3, o que indica que fontes de captação subterrânea da Região 3 não estão seguras para consumo, sendo indicado que medidas sejam tomadas para o fornecimento de água de fonte segura. A partir dos resultados apresentados neste documento, torna-se evidente a necessidade da continuidade de estudos realizados a partir do acesso a bases mais robustas de dados secundários ou a obtenção de dados primários, de modo a melhor elucidar a dinâmica espacial e temporal da contaminação das águas superficiais e subterrâneas na Região 3 ao longo do tempo.

Em relação aos solos não foram publicados artigos que avaliaram alterações na qualidade do solo nos municípios da Região 3, em detrimento do rompimento. O estudo da condição atual do solo promovido pelo NACAB, no entanto, possibilitou identificar que o incremento nos teores de Silte, com altas concentrações nos solos de área afetada, da maioria das Unidades de Paisagem da Região 3, é preocupante à medida que pode contribuir para o encrustamento e selamento superficial do solo. A formação de uma crosta pode gerar prejuízos à infiltração da água, condicionando maiores taxas de erosão hídrica e carreamento dos nutrientes do solo, prejuízos ao crescimento da vegetação e à recomposição de espécies nativas bem como o aumento na dificuldade de manejo agrícola dessas áreas. Outro fator preocupante é a capacidade que este material possui de ser transportado a longas distâncias, atuando como uma fonte secundária de contaminação.

Sobre os metais que mais excederam os Valores Orientadores nas amostras de solo, em sua maioria das áreas afetadas, em ordem decrescente foram: Cromo, Níquel, Bário, Cobalto, Arsênio, Cobre, Zinco e Vanádio.

Os solos com concentrações de metais acima do Valor de Investigação em quatro pontos amostrais oferecem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana. Torna-se necessária a notificação desta condição aos proprietários rurais e a promoção de ações para gerenciamento de áreas contaminadas. Alguns procedimentos para este gerenciamento são primordiais de serem efetuados como o diagnóstico, com a investigação detalhada das fontes de contaminação e a avaliação de risco a fim de subsidiar a etapa de intervenção, com a execução de ações de controle para a eliminação do perigo ou redução, a níveis toleráveis, dos riscos identificados. Para as áreas com concentrações de elementos acima do Valor de Prevenção, são necessárias medidas de investigação e controle das fontes de contaminação e monitoramento da qualidade do solo e da água subterrânea. Por fim, para as áreas com concentrações acima do Valor de Referência de Qualidade são necessárias ações preventivas, caso haja fontes de poluição. Além dos procedimentos previstos pelo CONAMA, a promoção do estudo de Riscos à Saúde mostra-se ainda mais necessária, já que é possível identificar concentrações de metais que oferecem sérios riscos à população local. Foram identificadas e listadas situações que podem indicar incremento nas concentrações de metais dos solos de área afetada de cada Unidade de Paisagem.

A metodologia adotada no estudo, no entanto, não permite estabelecer a origem e as causas do incremento dos elementos, sendo possível fazer poucas inferências devido ao número escasso de estudos que analisam metais e metaloides nos solos aluviais da bacia do Rio Paraopeba, antes do rompimento. O estabelecimento das causas e a eventual relação denexo causal com o rompimento da Barragem I da Mina Córrego do Feijão deve ser avaliada caso a caso, e por isso é recomendado que sejam realizados estudos que se aprofundem nessa investigação e esclareçam a origem do comportamento observado.

Neste semestre não houveram novos estudos relacionados a qualidade do ar e contaminação de animais domésticos. Novamente a Assessoria Técnica Independente enviou ofícios ao Instituto Mineiro de Agropecuária - IMA, pedindo os dados referente ao estudo realizado por eles em parceria com a Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, em 2019. Até a data dessa finalização desse documento não nos foram enviados nenhum dos dados solicitados.

Em relação aos produtos vegetais, dois novos estudos foram publicados no primeiro semestre de 2021. O primeiro, com o objetivo de compreender os impactos do rompimento sobre as plantas aquáticas, observou que as maiores concentrações de alumínio e ferro ocorreram no Reservatório Retiro Baixo, na estação de seca, enquanto o manganês foi encontrado em maior concentração próximo ao local do rompimento. Eles ainda observaram

um aumento na bioacumulação/bioconcentração de alguns elementos tóxicos a jusante do local da ruptura da barragem. Esses resultados indicam a relação entre o aumento das concentrações desses elementos tóxicos na água e na biota. O segundo, avaliou os efeitos tóxicos nas células de cebolas. Esses autores observaram que tanto a água quanto o sedimento do rio Paraopeba possuem potencial citogenotóxico, o que significa que podem afetar as células e causar mutações em espécies vegetais. Segundo os autores, a entrada de grandes quantidades de Fe, Al, Mn, e metais tóxicos que influenciaram a incidência das anormalidades genotóxicas, principalmente em Brumadinho e Juatuba. Esses resultados são similares ao encontrado dentro do contexto do rompimento da Barragem de Fundão, na Bacia do Rio Doce. Por fim, esses autores indicaram a necessidade urgente de monitoramento a longo prazo da água e sedimento do rio Paraopeba, bem como seus potenciais efeitos tóxicos.

Embora a ausência de uma linha de base robusta para a área de estudo desafie o reconhecimento dos impactos crônicos do rompimento da barragem B1, seus efeitos na concentração de elementos-traço são claramente evidenciados nas comparações entre as seções a montante e a jusante do local de entrada dos rejeitos, nas estações seca e chuvosa. Na seção a jusante do impacto, foi constatada uma bioacumulação significativamente maior de Fe, Mn, Ni e Zn em peixes, indicando aumento da biodisponibilidade de elementos-traço nessa seção do rio. Por outro lado, nos trechos mais distantes do rio Paraopeba e nos dois grandes reservatórios de barragens hidrelétricas, os efeitos do desastre não são claros. Nessas seções, as concentrações atuais de elementos tóxicos em amostras de peixes estão no mesmo intervalo relatado por outros estudos realizados antes do rompimento da barragem.

A contaminação de chumbo acima do limite de segurança para o consumo de pescado já representava uma questão de saúde pública antes do rompimento e continua a ser motivo de preocupação. Esses resultados demonstram a necessidade de monitoramento contínuo para compreensão dos impactos crônicos do rompimento da barragem B1 sobre a biota aquática do rio Paraopeba.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATSDR, 2012. AGENCY for TOXIC SUBSTANCES and DISEASE REGISTRY. Toxicological Profile for Cadmium. U.S. Department of Health and Human Services, p. 487p.

ATSDR, 2012. AGENCY for TOXIC SUBSTANCES and DISEASE REGISTRY. Toxicological Profile for Chromium. U.S. Department of Health and Human Services, p. 592p.

ATSDR, 2007. AGENCY for TOXIC SUBSTANCES and DISEASE REGISTRY. Toxicological Profile for Arsenic. U.S. Department of Health and Human Services, p. 559p.

ATSDR, 1999. AGENCY for TOXIC SUBSTANCES and DISEASE REGISTRY. Toxicological Profile for Mercury. U.S. Department of Health and Human Services, p. 676p.

ARANTES, F. P. et al. N. Bioaccumulation of mercury, cadmium, zinc, chromium, and lead in muscle, liver, and spleen tissues of a large commercially valuable catfish species from Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*. 88, p. 1-11, 2016.

AZEVEDO-SILVA, C. E. et al. Mercury biomagnification and the trophic structure of the ichthyofauna from a remote lake in the Brazilian Amazon. *Environ. Res.* 151, 286–296, 2016.

BISI, T. L. et al. Trophic relationships and mercury biomagnification in Brazilian tropical coastal food webs. *Ecol. Indicat.* 18, 291–302, 2012.

BOSLAUGH, S. *Secondary data sources for public health: a practical guide*. 1st ed. Cambridge University Press, 2007.

CHOY, L. T. The Strengths and Weaknesses of Research Methodology: Comparison and Complimentary between Qualitative and Quantitative Approaches. *Journal Of Humanities And Social Science*, v. 19, n. 4 (3), p. 99 – 104, 2014.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA nº420**, de 28 de dezembro de 2009. Disponível em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (COPAM). **Deliberação Normativa COPAM nº 166**, de 29 de junho de 2011. Disponível em <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>>

FAO/WHO. Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization. Codex Alimentarius Commission. General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed - CXS 193-1995, 2019.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Boletim informativo do cidadão sobre a qualidade da água no rio Paraopeba**. Resumo da qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba, após o desastre na barragem 1 no complexo da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA, município de Brumadinho - Minas Gerais.

Disponível em <[Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM - BOLETIM INFORMATIVO DO CIDADÃO SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA NO RIO PARAPEBA](#)> Acesso em: 22 mar. 2021.

FURLAN, J. P. R.; et al. **Occurrence and abundance of clinically relevant antimicrobial resistance genes in environmental samples after the Brumadinho dam disaster, Brazil.** *Science of the Total Environment*, 726, 2020.

HOU, S. et al. A clinical study of the effects of lead poisoning on the intelligence and neurobehavioral abilities of children. *Theor. Biol. Med. Model.* 10, 1–9, 2013.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. Acessar Dados e Boletins de Qualidade das Águas em Minas Gerais. Disponível em <[Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM](#)> Acesso em 30 mar. 2021

PARENTE, C. E. T. et al. First year after the Brumadinho tailings' dam collapse: Spatial and seasonal variation of trace elements in sediments, fishes and macrophytes from the Paraopeba River, Brazil. *Environmental Research.* 193, 2020.

RDC 42/2013. Resolução do Ministério da Saúde (Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA) - RDC Nº 42, DE 29 DE AGOSTO DE 2013. Dispõe sobre o Regulamento Técnico MERCOSUL sobre Limites Máximos de Contaminantes Inorgânicos em Alimentos.

SHAH, F., et al. Environmental exposure of lead and iron deficit anemia in children age ranged 1-5years: a cross sectional study. *Sci. Total Environ.* 408, 5325–5330, 2010.

SAVASSI, L. A. et al. Heavy metals and histopathological alterations in *Salminus franciscanus* (Lima & Britski, 2007) (Pisces: Characiformes) in the Paraopeba River, Minas Gerais, Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology.* 96, p. 478–483, 2016.

SECRETARIA DE ESTADO DE SAÚDE DE MINAS GERAIS - SES. Boletim Informativo: Qualidade da água para consumo humano em soluções alternativas de abastecimento em municípios atingidos pelo desastre da Vale S.A. em Brumadinho, Minas Gerais (2019 – 2020). Belo Horizonte, 45p. 2021.

TERAMOTO, E. H.; GEMEINERB, H.; ZANATTAB, M. B. T.; MENEGÁRIO, A. A.; CHANGC, H. K. Metal speciation of the Paraopeba river after the Brumadinho dam failure. ***Science of the Total Environment***, v. 757, 2021.

THOMPSON, F.; OLIVEIRA, B. C.; CORDEIRO, M. C.; MASI, B. P.; RANGEL, T. P.; PAZ, P.; FREITAS, T.; LOPES, G.; SILVA, B. S.; CABRAL, A. S.; SOARES, M.; LACERDA, D.; VERGILIO, C. S.; FERREIRA, M. L.; LIMA, C.; THOMPSON, C.; REZENDE, C. E. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. ***Science of the Total Environment***, v. 705, 2020.

VERGILIO, C. S. et al. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). *Scientific Reports.* 10: 5936, 2020.

VIGLIO, E. P.; CUNHA, F. G. **Atlas geoquímico da bacia do Rio São Francisco: Minas Gerais.** Belo Horizonte: CPRM, 2018.

