

AVALIAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS DO DESASTRE DE BRUMADINHO-MG PELA PROPOSIÇÃO DE VALORES DE REFERÊNCIA

Fernanda Bento Rosa Gomes¹

Pedro Barreiros Silva de Souza Fagundes²

*Samuel Rodrigues Castro³

Celso Bandeira de Melo Ribeiro⁴

RESUMO

Mananciais superficiais são caracterizados pela variabilidade em seus aspectos físico-químicos e dinâmica fortemente influenciada pela atividade antrópica. Nesse sentido, há o crescente interesse no estabelecimento de valores de referência (VR) de parâmetros de qualidade da água, como ferramenta de avaliação de alterações qualitativas decorrentes da interferência humana. O presente estudo propôs VR para parâmetros físico-químicos do rio Paraopeba, por meio de uma abordagem metodológica estatisticamente robusta, utilizando-se dados de monitoramento de 2008 a 2018. Objetivou-se avaliar a magnitude dos impactos causados pelo rompimento da Barragem B1, em 2019, a partir da análise comparativa entre os VR estabelecidos e dados pós-rompimento, bem como por análises gráficas, estatísticas e temporais, a 95% de confiança. Foram estimados os VR de 0,26 mg.L⁻¹ para ferro dissolvido, 0,17 mg.L⁻¹ para manganês total e 39,7 UNT para turbidez, indicando a ocorrência expressiva de ferro e manganês na geoquímica natural da região. Após o desastre, foram reportados elevados percentuais de dados acima dos VR propostos e dos valores máximos estabelecidos nas legislações (superiores a 74%). Evidenciaram-se a tendência temporal de decréscimo da turbidez e diferenças estatisticamente significativas nas concentrações de manganês total e turbidez na estação de monitoramento imediatamente à jusante do rompimento comparativamente às demais estações avaliadas, sinalizando a sedimentabilidade e deposição do rejeito na calha do rio.

Palavras-chave: Barragem de rejeitos. Mineração. Qualidade da água. Bacia do rio Paraopeba.

¹ Graduanda em Eng. Ambiental e Sanitária (UFJF) - fernanda.bento@engenharia.ufjf.br

² Graduando em Eng. Ambiental e Sanitária (UFJF) - pedro.fagundes@engenharia.ufjf.br

³ Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Rec. Hídricos (UFMG) // Professor Adjunto do Departamento Eng. Sanitária e Ambiental da UFJF - samuel.castro@ufjf.edu.br *Autor correspondente

⁴ Doutor em Rec. Hídricos (UFV) // Professor Associado do Departamento Eng. Sanitária e Ambiental da UFJF - celso.bandeira@ufjf.edu.br

ABSTRACT

Surface waters are described by physicochemical variability and dynamics strongly affected by anthropic activity. In this respect, the establishment of water quality reference values (RV) is a trend tool for assessing qualitative changes from human interference. RV for physicochemical parameters of Paraopeba river were proposed through a statistically robust methodological approach, based on monitoring data from 2008 to 2018. The magnitude of the impacts of BI tailings dam in January 2019 was assessed by comparing the proposed RV and post-disruption monitoring data, as well by graphical, statistic, and trend analysis, at 95% confidence level. RV of 0,26 mg.L⁻¹ for dissolved iron, 0,17 mg.L⁻¹ for total manganese, and 39,7 UNT for turbidity were estimated, suggesting an expressive natural occurrence of iron and manganese in water. After the disaster, high percentages of data above the VR and the maximum values set up in the legislations were presented (higher than 74%). A turbidity decrease trend and statistically significant differences in total manganese and turbidity concentrations at the monitoring station immediately downstream the rupture compared to the other evaluated stations were observed, indicating the tailing sedimentability and deposition in the river trough.

Keywords: Mining. Paraopeba basin. Tailings Dam. Water quality.

Submissão: 04/09/2019

Aprovação: 22/11/2019

1 INTRODUÇÃO

A extração de recursos naturais não renováveis da crosta terrestre configura a mineração como uma atividade altamente impactante e não sustentável. Contudo, é atividade de importância ímpar por fornecer matéria-prima para demais setores da economia, logo, essencial ao desenvolvimento (BRASIL, 2001).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016), o Brasil é o terceiro maior produtor de minério de ferro do mundo, onde os estados de Minas Gerais (MG) e Pará (PA), contribuem com a maior parcela dessa produção, 71% e 26%, respectivamente. Além disso, o estado de Minas Gerais destaca-se como principal estado minerador, pois é responsável por aproximadamente 53% da produção nacional de minerais metálicos e 29% de outros tipos de minério. A atividade mineradora ocorre em mais de 400 municípios mineiros, e 40 das 100 maiores minas brasileiras se encontram no estado. Portanto, a indústria extrativa de Minas Gerais

tem importância estratégica para o Brasil e para o próprio estado. As exportações de bens minerais possuem representação significativa para Minas Gerais, contribuindo para superávits comerciais alcançados no país nos últimos anos.

Apesar da geração de riqueza e crescimento econômico, a indústria extrativa mineral está entre as atividades antrópicas que mais causam impactos socioeconômicos e ambientais negativos (ARAÚJO *et al.*, 2014). Tais impactos estão relacionados com alteração do meio físico, provocando desmatamento, erosão, contaminação dos corpos hídricos, alteração da paisagem, e comprometimento da fauna e da flora (CARVALHO *et al.*, 2018; GONELLA *et al.*, 2015; ARAÚJO *et al.*, 2014; MECI; SANCHES, 2010).

O Brasil, assim como outros países mineradores, enfrenta problema relacionado à disposição de rejeitos, demandando mecanismos de gestão e soluções tecnológicas pertinentes, visando disposição de baixo risco e recuperação (CARVALHO *et al.*, 2018). Em 2017, o total de resíduos inventariados no estado de Minas Gerais foi de 562.402.296,758 toneladas (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM, 2018b). Deste total, 51,55% são de rejeitos, 48,41% de estéril e 0,04% de resíduos de atividades não relacionadas diretamente a mineração (papel, plástico, bombonas, restos de pneus, entre outros). Segundo Inventário de Barragem do estado de Minas Gerais 2017 (FEAM, 2018a), das 698 estruturas cadastradas, 205 são classificadas em nível III, consideradas de alto potencial de dano ambiental.

O histórico de desastres ambientais ocorridos no estado de Minas Gerais evidencia necessidade de maior atenção quanto à gestão de tais equipamentos de destinação de resíduos, em destaque, o rompimento da barragem da mineração Samarco, em 2015, no município de Mariana, considerada a maior catástrofe ambiental ocorrida no país com consequente contaminação do Rio Doce.

Foco de recente atenção, o complexo minerário do Córrego do Feijão, localizado em Brumadinho - MG, encontra-se nas encostas do Quadrilátero Ferrífero, área relacionada à extração de minério de ferro, e parte do Vale do Rio Paraopeba (PORSANI; JESUS; STAGARI, 2019). Dentre as barragens do Córrego do Feijão, destaca-se a Barragem 1 (B1), que até 2015 recebia rejeitos, quando tornou-se inativa. Essa barragem foi construída em 1976, possuindo 86 m de altura e 720 m de comprimento da crista. Os rejeitos ocupavam área de 249.500 m² com volume disposto de 11,7 milhões de m³ (VALE, 2019).

Segundo dados do Cadastro de Barragens para elaboração do Relatório de Segurança de Barragens de 2017 (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA, 2017), B1 foi classificada com alto potencial poluidor e baixo risco de rompimento. Contudo, em 25 de janeiro de 2019 ocorreu o colapso da estrutura. Cerca de 11,7 milhões de m³ de rejeito percorreram 8,5 km até atingir o rio Paraopeba, estendendo-se por mais de 300 km ao longo desse, em direção ao rio São Francisco, causando impacto considerável ao ecossistema atingido (PORSANI; JESUS; STAGARI, 2019).

Segundo reportado por Borges Jr. *et al.* (2008), valores orientadores são utilizados por agências ambientais para tomada de decisão sobre áreas suspeitas de contaminação. Nesse sentido, a literatura apresenta estudos evidenciando o estabelecimento de listas orientadoras com valores de referência (VR), de alerta e de intervenção, como etapa preliminar às ações de monitoramento da qualidade, prevenção da poluição, diagnóstico de áreas suspeitas de contaminação e controle de áreas contaminadas em diferentes matrizes (LEMOS *et al.*, 2000; COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB, 2001; SCHNEIDER *et al.*, 2003; ROCHA *et al.*, 2013, SANTIAGO *et al.* 2016).

Diante do exposto, o presente estudo pautou-se no tratamento de dados secundários, e teve como objetivo caracterizar a qualidade das águas do rio Paraopeba em função do rompimento da Barragem B1, além de propor valores de referência (VR) para parâmetros físico-químicos (ferro dissolvido, manganês total e turbidez) que possam servir de base para evidenciar influências e alterações antrópicas, além de impactos da mineração.

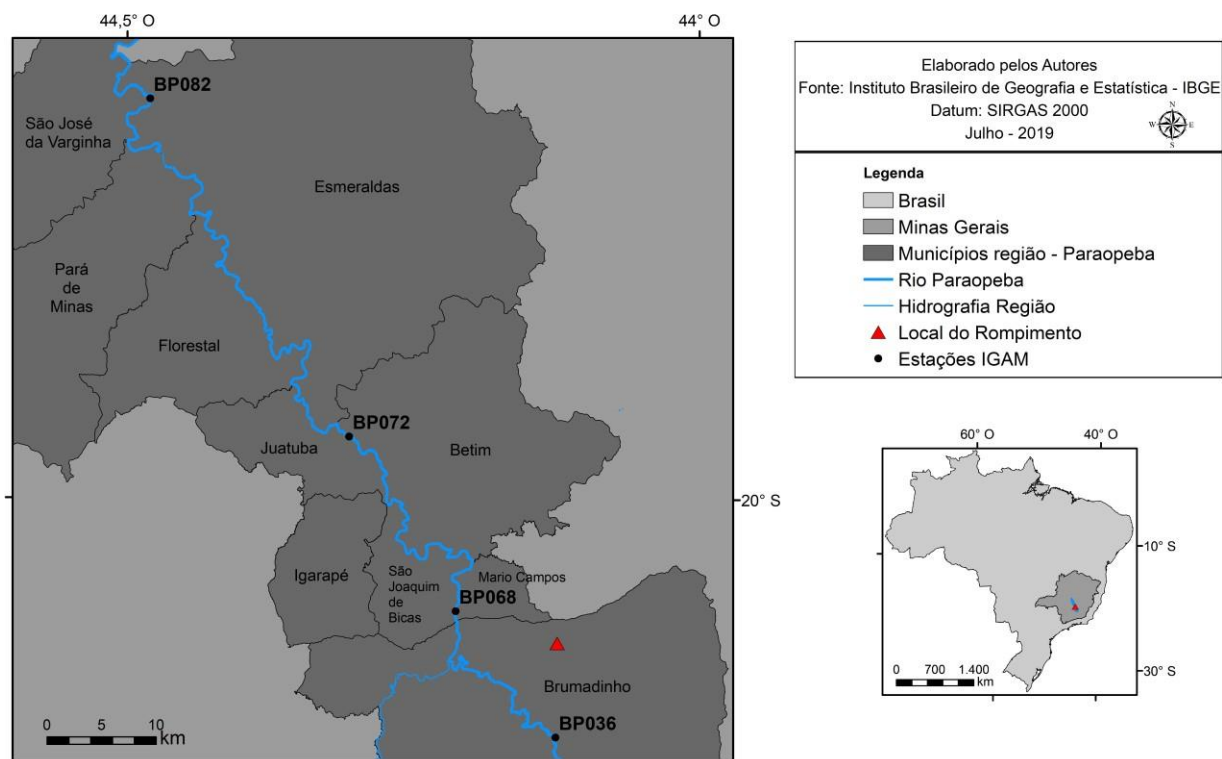
2 MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

O Projeto Águas de Minas, desenvolvido pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam), é responsável pelo monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas de Minas Gerais. Para o estudo, foram considerados dados obtidos pela análise de amostras coletadas nas estações de monitoramento do Igam ao longo do curso do rio Paraopeba, com a localização conforme apresentado no Mapa 1, tendo como referência local aproximado do

rompimento da Barragem B1: (i) BP036 – 10,0 km a montante; (ii) BP068 – 24,8 km a jusante; (iii) BP072 – 59,0 km a jusante; e (iv) BP082 – 123,1 km a jusante.

Mapa 1 – Área de estudo: Rompimento de B1 e estações de monitoramento da qualidade da água do Rio Paraopeba



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Valores de referência - VR

Para os procedimentos estatísticos adotados, considerou-se uma série histórica de dez anos (2008 – 2018), reportada pelo Igam (2019a) no Portal InfoHidro¹. Foram considerados parâmetros físico-químicos relacionados à geoquímica natural do solo da região, como ferro dissolvido (MELFI *et al.*, 2016), além daqueles que possam estar diretamente associados ao aporte de rejeitos da mineração na calha do rio Paraopeba, oriundos do rompimento da barragem, como manganês total e turbidez.

¹ Disponível em: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/noticias/349-eries-historicas-de-monitoramento-da-qualidade-das-aguas-superficiais-no-estado-de-minas-gerais>

Análise dos relatórios emitidos pelo Igam (2019b), reportando resultados analíticos para amostras coletadas em 26/01/2019 na estação BP068, dia seguinte ao rompimento da Barragem B1, subsidiaram a seleção dos parâmetros físico-químicos adotados no estudo. Verificou-se que resultados reportados para manganês total ($46,27 \text{ mg.L}^{-1}$) extrapolaram o limite estabelecido pela DN COPAM/CERH n° 01/2008 para corpos hídricos Classe 2 ($0,1 \text{ mg.L}^{-1}$), além do máximo reportado para a série histórica ($1,69 \text{ mg.L}^{-1}$) e último resultado pré-rompimento ($0,14 \text{ mg.L}^{-1}$). Em análise do parâmetro turbidez, verificou-se que o resultado reportado, igual a 34.500 UNT, também extrapolou, de forma considerável, o limite estabelecido pela normativa supracitada (100 UNT), além do valor médio reportado para a série histórica (86,4 UNT) e último resultado pré-rompimento (40,4 UNT).

De modo geral, o tratamento de dados se deu por testes disponíveis no pacote ProUCL 5.1 (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - USEPA, 2019), a 95% de confiança, considerando-se a independência dos dados (IDAHO, 2014), por meio das seguintes etapas: (i) Análise de consistência e preparação dos dados; e (ii) Estimativa dos valores de referência.

Análise de consistência e preparação dos dados

Como resultado de análises ambientais, verifica-se a recorrência de valores censurados, perdidos ou discrepantes (*outliers*) ou anômalos e que, dificilmente, seguem uma distribuição Normal ou Log-normal. Devido a tais características, métodos estatísticos robustos são os mais indicados (REIMANN *et al.*, 2008; SABINO *et al.*, 2014). Nesse sentido, testes de normalidade embasaram a escolha do ensaio estatístico não-paramétrico Kruskal-Wallis para comparações múltiplas, a 95% de confiança (LEMOS *et al.*, 2000). Utilizou-se o *software* estatístico STATISTICA 8.0 (STATSOFT, 2007) tanto na execução de testes de hipóteses quanto na representação descritiva e gráfica dos resultados.

Para a estimativa de magnitude de tendência temporal realizou-se o teste não-paramétrico de Theil-Sen (HELSEL; HIRSCH, 2002), em que a estimativa da inclinação da tendência (β) é obtida, e a identificação de *outliers* se deu pelo teste de Rosner, indicado a um

conjunto de dados com n amostral superior a 25, ambos os testes disponíveis no *software* ProUCL 5.1.

Estimativa do valor de referência

Várias medidas podem representar o conjunto dos valores de *background* e, portanto, possibilitar a proposição de valores de referência. A escolha de uma medida depende da possibilidade de calculá-la, da facilidade com que é calculada e de sua adequação ao processo em que for utilizada, ou seja, de sua capacidade de distinguir resultados falsos positivos com uma confiança estatística definida.

O Limite Superior de Confiança (LSC95) é um número que, com 95% de confiança, é superior à concentração média real da população (INDIANA DEPARTMENT OF ENVIRONMENT MANAGEMENT - IDEM, 2010). A escolha do LSC95 como VR tem grande utilidade quando se comparam valores de *background* de diferentes áreas, visto que esta é uma medida de tendência central e, portanto, para dados que seguem uma distribuição estatística definida, expressa o limite superior da faixa em que se encontra a média, que é quantidade mais provável do parâmetro de interesse em um aquífero (VIRGINIA, 2003). À título de análise, os VR calculados foram comparados ao percentil 75%, calculado para o banco de dados em análise e definido pela CETESB (2001) como valor guia no estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade (VRQ) de solos e águas subterrâneas; e limites estabelecidos para corpos hídricos Classe 2 na DN COPAM/CERH nº 01/2008 e da Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõem sobre a classificação dos corpos d'água e dão diretrizes ambientais para enquadramento, atualizada pela CONAMA nº 430/2011, com nova disposição acerca das condições e padrões de lançamento de efluentes.

2.3 Análise após rompimento da Barragem B1 – Brumadinho-MG

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam) em conjunto com a Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais (Copasa), Agência Nacional de Águas (ANA) e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) instituíram uma rede integrada de monitoramento de qualidade das águas e sedimentos com fins de garantir abrangência na

avaliação e transparência dos impactos gerados pelo rompimento da Barragem B1 no Rio Paraopeba. Nesse sentido, os resultados do monitoramento emergencial foram reportados em Informativos dos parâmetros de qualidade da água - Rio Paraopeba - após desastre na barragem B1- Brumadinho/MG² (IGAM, 2019b). Para o presente estudo foram considerados dados de 26/01/2019 a 27/05/2019, para os mesmos parâmetros físico-químicos analisados em amostras coletadas nas estações de monitoramento adotadas na etapa de estimativa de valores de referência. Os resultados da estatística descritiva para os dados referentes ao período supracitado foram adotados em análise comparativa aos VR estimados em etapa prévia.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente tópico são apresentados resultados obtidos em etapas de estimativa e proposição de VR para o rio Paraopeba, considerando os parâmetros ferro dissolvido, manganês total e turbidez. Ainda, resultados da caracterização do impacto no corpo hídrico resultante do rompimento da Barragem B1.

Valores de referência - VR

De posse dos dados de monitoramento das estações BP036, BP068, BP072 e BP082 referentes aos anos de 2008 a 2018, procedeu-se com a análise descritiva dos parâmetros ferro dissolvido, manganês total e turbidez (TABELA 1). Observou-se que a faixa de ocorrência de ferro variou de 0,05 a 0,68 mg.L⁻¹, com concentração média de 0,24 mg.L⁻¹ e maior percentual de dados (36%) entre 0,10 e 0,20 mg.L⁻¹. No caso do Mn, 57% das amostras estiveram entre 0,05 mg/L e 0,15 mg.L⁻¹, a faixa de detecção variou de 0,03 a 0,44 mg.L⁻¹, com valor médio de 0,20 mg.L⁻¹. Em 41% das amostras obtidas nas estações referidas, a turbidez foi inferior a 20 UNT, sendo que a faixa de ocorrência desse parâmetro foi de 3,7 UNT a 146,0 UNT e a concentração média se manteve em 35,42 UNT.

² Disponível em: <http://200.198.57.118:8080/handle/123456789/2934>

Tabela 1 – Estatística descritiva dos parâmetros de monitoramento nas estações BP036, BP068, BP072 e BP082

Parâmetro	N ₁	Outliers %	N ₂	Mín.	Máx.	Média	DP	Distribuição monomodal	Estabilidade temporal
Fe dissolvido (mg.L ⁻¹)	171	1,2	169	0,05	0,68	0,24	0,13	Sim	Sim*
Mn total (mg.L ⁻¹)	171	15,2	145	0,03	0,44	0,15	0,09	Sim	Sim**
Turbidez (UNT)	171	15,2	145	3,7	146,0	35,4	30,3	Sim	Sim*

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Nota: N₁: número total de dados; N₂: número de dados após a exclusão de *outliers*; **Mín.**: mínimo; **Máx.**: máximo; **DP**: desvio padrão. Teste de Theil-Sen * 95% de confiança; ** 99% de confiança.

No Quadrilátero Ferrífero, por se tratar de uma região rica em recursos minerais com extensas reservas de ferro e manganês (MELFI *et al.*, 2016), espera-se que espécies químicas (ferro e manganês) ocorram naturalmente nos cursos d'água, por processos erosivos e lixiviação. Porém, a atividade mineradora pode contribuir consideravelmente para o aporte desses metais nos mananciais (USEPA, 2018).

Para uma estimativa robusta do LSC95, é necessário que a aproximação do valor máximo atribuído pela média populacional seja feita através de um grupo de dados amostrais com características constantes e sem a interferência de perturbações pontuais (SINGH; MAICHLE; LEE, 2006). Para tanto, a verificação e expurgo de dados extremos (*outliers*) e as análises de estabilidade temporal e monomodalidade das distribuições de cada parâmetro são procedimentos indispensáveis e considerados no estudo. Com base no estimador de Theil-Sen, que busca identificar tendências temporais por meio da avaliação da declividade da mediana (ELY; DUBREUIL, 2017), constatou-se a inexistência de evidências estatísticas de tendências temporais na ocorrência dos parâmetros, indicando estabilidade para os parâmetros ferro dissolvido, manganês total e turbidez no corpo hídrico para o período de 2008 a 2018. Além disso, todas as distribuições apresentaram caráter monomodal na Tabela 1 e aderência à distribuição gama (TABELA 2).

A Tabela 2 contém os valores de referência dos parâmetros monitorados ao longo do trecho do Rio Paraopeba, a montante e a jusante da barragem B1. Os VR estimados pelo LSC95 e propostos foram: 0,26 mg.L⁻¹ para ferro dissolvido; 0,17 mg.L⁻¹ para manganês total e 39,7 UNT

para turbidez. Em todos os casos, o VR estimado se manteve próximo ao percentil 75%, indicativo de coerência do valor calculado.

Tabela 2 – Estimativa dos valores de referência dos parâmetros

Parâmetro	Distribuição	VR	Perc. 75% calculado	VM
Fe dissolvido (mg.L ⁻¹)	95% <i>Approximate gamma</i>	0,26	0,30	0,30
Mn total (mg.L ⁻¹)	95% <i>Approximate gamma</i>	0,17	0,20	0,10
Turbidez (UNT)	95% <i>Approximate gamma</i>	39,7	46,5	100,0

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Nota: **VR**: valor de referência adotado a partir do Limite Superior de Confiança (LSC); **95% *Approximate gamma***: método de estimativa do LSC 95% com base na aderência da distribuição dos dados à distribuição gama, evidenciada por testes de aderência, com 95% de confiança. **Perc.:** percentil. **VM**: valor máximo reportado pela Resolução CONAMA n° 357/2005 e DN COPAM/CERH n° 01/2008 para mananciais superficiais de classe 2.

Diante do percentual de quantificação dos dados Tabela 1 e da proximidade dos VR com os valores máximos estabelecidos na Resolução CONAMA n° 357/2005 e na DN COPAM/CERH n° 01/2008 para os parâmetros ferro e manganês, evidencia-se a ocorrência natural e abundante de tais elementos no curso d'água, sendo que, no caso do manganês, a concentração estimada como VR chega a superar os limites estabelecidos nas legislações.

Costa, A. *et al.* (2003) reportaram valores de *background* para ferro e manganês que superaram valores estipulados pelas legislações em estudos de caracterização de sedimentos da sub-bacia do Rio Gualaxo do Norte, no município de Mariana-MG. Andrade *et al.* (2012) destacaram elevados teores de ferro e manganês no Quadrilátero Ferrífero como reflexo da geologia local, assim como Costa, S. *et al.* (2014) e Carvalho Filho *et al.* (2011), que também revelaram ocorrência de manganês em concentrações consideráveis nos solos da região.

Análise após rompimento da Barragem B1 – Brumadinho-MG

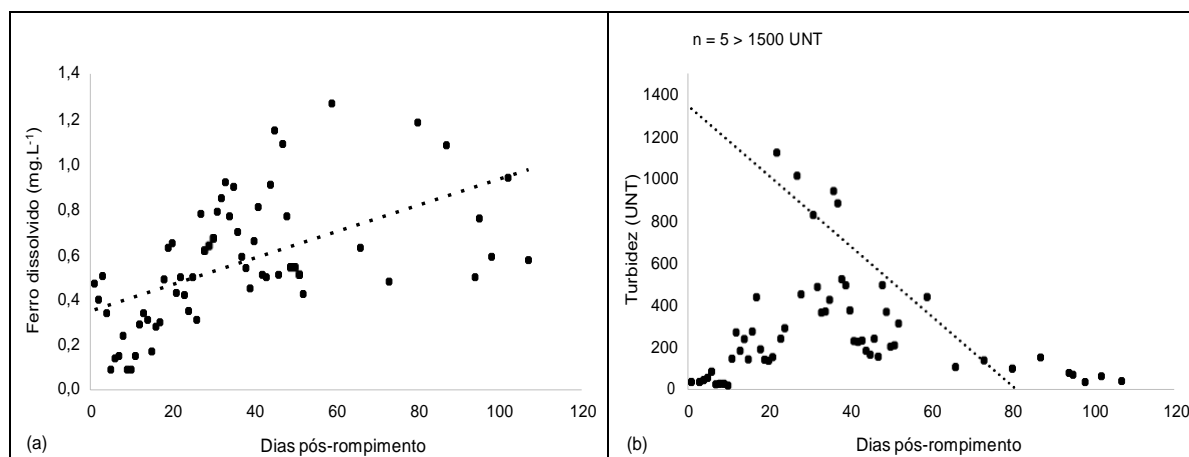
Em análise dos dados obtidos como resultados de análises em amostras coletadas após o rompimento verificou-se que, para o parâmetro ferro, analisado em fração dissolvida, não

foram evidenciadas diferenças significativas entre os resultados medianos reportados para as diferentes estações de monitoramento pós-desastre, a 95% de confiança. Tal fato foi também observado quando comparadas as estações à jusante e montante (Kruskal Wallis – *p-value* > 0,05). Porém, em análise conjunta, com mediana reportada para dados de estações à jusante do rompimento, BP068, BP072 e BP082; considerando o período de 120 dias após o rompimento de B1, verificou-se tendência crescente, conforme resultado ratificado pelo teste de Theil-Sen a 95% de confiança (FIGURA 1a). Tal fato deve-se, possivelmente, ao incremento gradativo da fração solúvel de ferro com o aporte de rejeitos. Para o parâmetro manganês total o referido teste apresentou evidências insuficientes de tendência.

Segundo o Informativo nº 1 do IGAM (2019b), dados históricos de monitoramento no rio Paraopeba (1997 – 2018) apontam para valores médios de turbidez de 84,25 UNT, a 20 km a jusante do desastre. A medição realizada pela COPASA no dia seguinte ao rompimento de B1, 26/01/19, a 19 km a jusante do acidente, resultou em uma turbidez igual a 63.700 UNT. Uma avaliação no dia 28/01/19 verificou-se um decréscimo considerável no valor, com turbidez igual a 7.200 UNT.

Na estação de monitoramento do IGAM BP068, no dia 26/01/19, o valor de turbidez foi igual a 34.500 UNT, valor máximo reportado para tal parâmetro no banco de dados considerado no presente estudo. A medição de 28/01/19 para a mesma estação, o valor apurado foi de 3.826 UNT. A tendência de decréscimo significativo da turbidez com o tempo, para estações à jusante do rompimento (BP068, BP072 e BP082), foi evidenciada pelo teste de estabilidade temporal de Theil-Sen, conforme apresentado na Figura 1(b), resultado relacionado à possível deposição e/ou sedimentação dos sólidos suspensos, oriundo dos rejeitos, no fundo da calha do rio Paraopeba. Ferro, manganês e metais pesados porventura oriundos de atividades de extração apresentam riscos consideráveis de contaminação porque não se degradam e permanecem solubilizados nas águas ou precipitados como sedimentos de fundo (MINAS GERAIS, 2016).

Figura 1 – Análise de estabilidade temporal



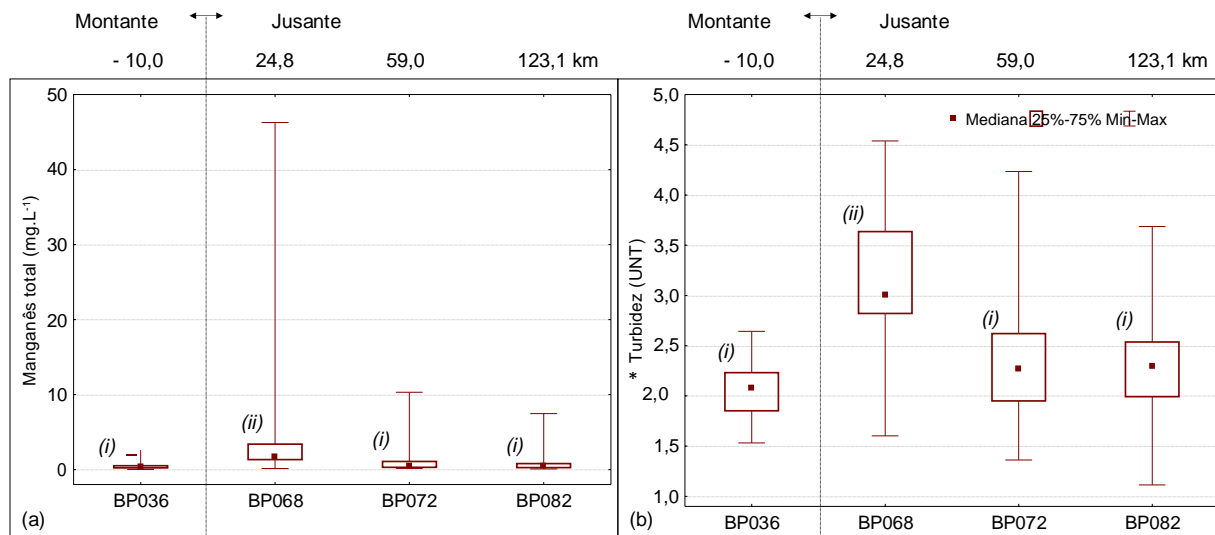
Legenda: (a) Ferro dissolvido
(b) Turbidez

Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Nota: Para turbidez, cinco resultados com valores superiores a 1500 UNT foram omitidos para favorecer a visualização gráfica.

Diferenças significativas foram evidenciadas em análises reportadas nas diferentes estações para os parâmetros manganês total e turbidez (Kruskal Wallis – *p-value* < 0,05), parâmetros que têm resultados diretamente relacionados com o teor da fração de sólidos em suspensão. Nesse sentido, verificou-se, para ambos os parâmetros, que a estação de monitoramento imediatamente à jusante do rompimento (BP068), localizada a 24,8 km do mesmo, reportou valores de tendência central significativamente superiores às demais estações. Fato também observado para valores máximos reportados, obtidos em análises de amostras coletadas no dia seguinte ao rompimento, 26/01/2019. Tal resultado encontra-se na Figura 2, em que o parâmetro turbidez é apresentado em escala logarítmica para favorecer a visualização do comportamento.

Figura 2 – Dados reportados nas diferentes estações de monitoramento

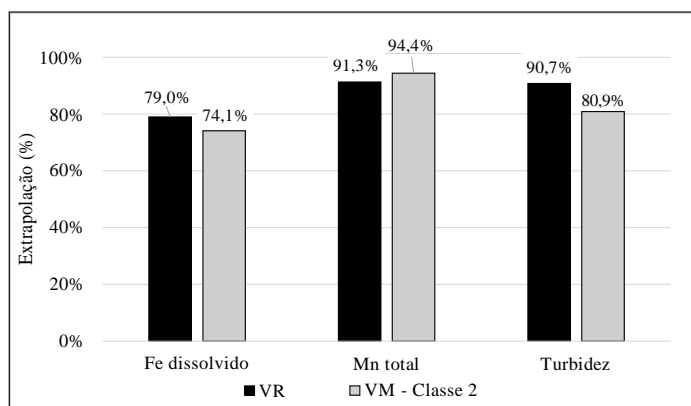


As análises evidenciam a rápida sedimentação do rejeito, corroborando em queda considerável nos teores de manganês total e turbidez reportados para amostras coletadas nas estações BP072 e BP082, localizadas a distâncias superiores a 50 km do rompimento da Barragem B1. Os valores reportados para tais estações de monitoramento, localizadas à jusante do rompimento, apresentam-se próximos aos reportados para amostras coletadas à montante (BP036), sem evidências significativas de diferenças entre os valores de tendência central obtidos, a 95% de confiança. Ainda assim, segundo laudo técnico da ANA (2015), reportado para estudo referente ao desastre de Mariana-MG, em 2015, a qualidade da água do rio segue sujeita a variações abruptas, podendo ocorrer picos de turbidez, queda de oxigênio dissolvido, aumento nas concentrações metais e prejuízos gerais por períodos “indeterminados e imprevisíveis”.

Tomando os VR calculados e VM estabelecidos nas normativas que estabelecem padrões para corpos hídricos classe 2 para os diferentes parâmetros, verificou-se o percentual de dados que extrapolaram os limites para amostras coletadas em estações localizadas à jusante do

rompimento da Barragem B1 (GRÁFICO 1). De modo geral, verificou-se elevado percentual de extrapolação, mesmo para amostras coletadas em estações com localização mais distante do rompimento, fato que pode evidenciar, para ferro e manganês, a ocorrência natural de tais elementos na geoquímica da região e uma contribuição considerável do aporte de rejeitos oriundos do desastre. Para o parâmetro manganês total, mais de 91% das amostras coletadas nas estações à jusante do rompimento de B1 extrapolaram o VR proposto, igual a 0,17 mg.L⁻¹.

Gráfico 1 – Extrapolação ao VR e VM: ferro dissolvido, manganês total e turbidez



Fonte: Elaborado pelos autores (2019)

Para os parâmetros ferro dissolvido e turbidez, os VR calculados apresentaram-se mais sensíveis à detecção de impactos ao corpo hídrico, quando comparados aos padrões estabelecidos pelas legislações vigentes. Nesse sentido, para o parâmetro ferro, verificou-se cerca de 5% a mais de amostras fora do limite estabelecido pelo VR (0,26 mg.L⁻¹) quando comparado ao enquadramento ao VM (0,30 mg.L⁻¹). Para turbidez a diferença foi ainda maior, cerca de 10% a mais de amostras não se enquadraram ao limite estabelecido pelo VR (39,7 UNT) quando comparadas ao enquadramento ao padrão de VM (100,0 UNT). Águas superficiais são mais susceptíveis às intervenções antrópicas, ainda assim, os VR estimados para tais parâmetros, foram inferiores ao VM estabelecidos nas legislações vigentes, nacional e estadual, demonstrando sensibilidade ao impacto avaliado.

4 CONCLUSÃO

Como resultado de planos de monitoramento, o estabelecimento de valores de referência e padrões de qualidade torna-se estratégico na identificação de impactos e perturbações ao estado de equilíbrio e estabilidade ambiental. Assim, a proposição de VR para o rio Paraopeba, utilizando-se de metodologia com credibilidade estatística e série temporal robusta, possibilitou o cálculo de limites próximos aos percentis 75%, medida adotada em metodologia referência para estimativa de valores de qualidade. Como traçadores do impacto causado pelo rompimento de B1, considerou-se os parâmetros ferro dissolvido, manganês total e turbidez, com VR estimados em $0,26 \text{ mg.L}^{-1}$, $0,17 \text{ mg.L}^{-1}$ e $39,7 \text{ UNT}$, respectivamente. Análise de amostras coletadas após o desastre apresentaram resultados que extrapolaram os VR propostos, indicativo de que a metodologia adotada demonstrou-se sensível ao impacto avaliado. Por fim, acredita-se que o presente estudo abre perspectivas para novas análises, considerando: (i) um número maior de dados, coletados em outras estações de monitoramento, também localizadas no curso do rio Paraopeba; (ii) maior número de parâmetros físico-químicos indicadores de qualidade; (iii) outros estimadores e limites para estabelecimento de valores de referência; (iv) além da adoção de métodos de tratamento de dados censurados. Verifica-se, ainda, a possibilidade de avaliar a influência da sazonalidade e do uso e ocupação do solo em torno do curso hídrico objeto do estudo. Nesse sentido, tal abordagem pode nortear uma avaliação crítica dos VR propostos e incrementar sistemas de monitoramento, bem como caracterizar impactos e desastres decorrentes de atividades antrópicas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L. N.; LEITE, M. G. P.; BACELLAR, L. A. P. Composição mineralógica e geoquímica dos solos do Parque Estadual do Itacolomi - Ouro Preto/MG. **Quaternary and Environmental Geosciences**, Curitiba, v. 3, n. 1-2, p. 1-8, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Cadastro relatório de segurança de barragens 2017**. 2018. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2017>. Acesso em: 5 jul. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Relatório técnico: análise preliminar sobre a qualidade da água e seus reflexos sobre os usos da água**. 2015.

ARAUJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. *In*: ARAUJO, E. R.; OLIVIERI, R. D.; FERNANDES, F. R. C. **Recursos minerais e sociedade: impactos humanos, socioambientais, econômicos**. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral, 2014. p. 1-14.

BORGES Jr., M. *et al.* Valores de referência local e avaliação da contaminação por zinco em solos adjacentes a áreas mineradas no município de Vazante-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. esp., p. 2883-2893, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Manual de normas e procedimentos para licenciamento ambiental no setor de extração mineral**. Brasília: MMA, 2001.

CARVALHO, P. S. L. *et al.* Sustentabilidade socioambiental da mineração. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 47, p. 333-390, 2018.

CARVALHO FILHO *et al.* Óxidos de manganês em solos do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 793-804, 2011.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2001. 247 p.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais). **Deliberação normativa nº 62, de 17 de dezembro de 2002.** Dispõe sobre critérios de classificação de contenção de rejeitos, de resíduos e reservatórios de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5008>. Acesso em: 15 jul. 2019.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL (Minas Gerais); CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS (Minas Gerais). **Deliberação normativa conjunta COPAM/CERH nº 1, de 5 de maio de 2008.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=8151>. Acesso em: 15 jul. 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.** Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 15 jul. 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.** Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 15 jul. 2019.

COSTA, A. T. *et al.* Surface water quality and sediment geochemistry in the Gualaxo do Norte basin, eastern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Environmental Geology**, Berlin, v. 45, n. 2, p. 226–235, 2003.

COSTA, S. A. D. *et al.* Pedogênese e classificação de latossolos desenvolvidos de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 359-371, 2014.

ELY, D. F.; DUBREUIL, V. Análise das tendências espaço-temporais das precipitações anuais para o estado do Paraná - Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 21, p. 553-569, 2017.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Inventário de barragens do Estado de Minas Gerais**: ano 2017. Belo Horizonte: FEAM, 2018a.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (Minas Gerais). **Inventário de resíduos sólidos da mineração**: ano base 2017. Belo Horizonte: FEAM, 2018b.

GONELLA, J. S. L. *et al.* Diagnóstico dos impactos ambientais no setor de mineração. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ADMINISTRAÇÃO, 2015, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa, 2015. p. 1-12. Disponível em: <http://www.admpg.com.br/2015/selecionados.php?ordem01=area&ordem02=titulo>. Acesso em: 20 jul. 2019.

HELSEL, D.R.; HIRSCH, R.M. Statistical methods in water resources. *In*: UNITED STATES. Geological Survey. **Techniques of water-resources investigations**. Washington: U.S.: Government Printing Office, 2002. Book 4. Chapter A3. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/twri/twri4a3/>. Acesso em: 9 jul. 2019.

IDAHO. Department of Environmental Quality - DEQ. Water Quality Division. **Statistical guidance for determining background ground water quality and degradation**. Boise: DEQ, 2014. 103 p.

INDIANA. Department of Environment Management - IDEM. **The southwest Indianapolis air toxics study 95% upper confidence limits**. Fact sheet, mar, 2010. Disponível em: https://www.in.gov/idem/files/Factsheet_95_Upper_Confidence_Limits.pdf. Acesso em: 21 jul. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. Brasília: IBRAM, 2016.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Séries históricas de monitoramento da qualidade das águas superficiais no estado de Minas Gerais**. 2019a. Disponível em: <http://portalInfoHidro.igam.mg.gov.br/noticias/349-eries-historicas-de->

monitoramento-da-qualidade-das-aguas-superficiais-no-estado-de-minas-gerais. Acesso em: 26 jul. 2019.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Informativo dos parâmetros de qualidade da água - Rio Paraopeba - após desastre na barragem B1- Brumadinho/MG.** 2019b. Disponível em: <http://200.198.57.118:8080/handle/123456789/2934>. Acesso em: 26 jul. 2019.

LEMOS, M. M. G. *et al.* Metodologia adotada para o estabelecimento dos valores de referência de qualidade para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo. *In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER*, 1, Fortaleza. **Anais** [...]. 2000.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. **Estudos Avançados**, São Paulo, SP, v. 24, n. 68, p. 209–220, 2010.

MELFI, A. J. *et al.* **Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios.** Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. 417 p.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Regional, Política Urbana e Gestão Metropolitana (Coord.). **Relatório: avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem do Fundão em Mariana-MG.** Grupo da Força-Tarefa. Belo Horizonte, 2016. Disponível em: http://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/770/relatorio_final_ft_03_02_2016_15h5min.pdf. Acesso em: 15 jul. 2019.

PORSANI, J. L.; JESUS, F. A. N.; STANGARI, M. C. GPR survey on an iron mining area after the collapse of the tailings dam I at the Córrego do Feijão Mine in Brumadinho-MG, Brazil. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 7, p. 860, 2019.

REIMANN, C. *et al.* **Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R.** 1 ed. Chichester: Ed. John Wiley & Sons, 2008. 362 p.

ROCHA, O. G. F. *et al.* **Manual de procedimentos analíticos para a determinação de VRQ de elementos-traço em solos do Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2013.

SABINO, C. V. S.; LAGE, L. V.; ALMEIDA, K. C. B. Uso de métodos estatísticos robustos na análise ambiental. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v.19, n. esp., p. 87-94, 2014.

SANTIAGO, T. O. M. *et al.* A eficácia do estabelecimento de padrões de qualidade ambiental. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 5, n. 2, p.85-111, 2016.

SCHNEIDER, P. *et al.* Physico-chemical assessment of the reference status in German surface waters: a contribution to the establishment of the EC Water Framework Directive 2000/60/EG in Germany. **Acta Hydrochimica Hydrobiologica**, Honoken, NJ, v. 31, n. 1, p. 49–63, 2003.

SINGH, A.; MAICHLE, R.; LEE, S. E. **On the computation of a 95% upper confidence limit of the unknown population mean based upon data sets with below detection limit observations.** Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2006. (EPA/600/R-06/022).

STATSOFT. **Statistica (data analysis software system)**. versão 8.0. 2007.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency - USEPA. **ProUCL Software**. 2019. Disponível em: <https://www.epa.gov/land-research/proucl-software>. Acesso em: 26 jul. 2019.

UNITED STATES. Environmental Protection Agency - USEPA. **2018 edition of the drinking water standards and health advisories**. Washington, DC: USEPA, 2018. (EPA 822-F-18-00).

VALE. **Vale atualiza informações sobre o rompimento da barragem de Brumadinho**. 2019. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Vale-atualiza-informacoes-sobre-o-rompimento-da-barragem-de-Brumadinho.aspx> . Acesso em: 10 jul. 2019.

VIRGINIA. Department of Environmental Quality - DEQ. **Data analysis guidelines for solid waste facilities**. Richmond, VA: DEQ, 2003.