



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Transporte fluvial de nutrientes e metais a montante do Reservatório de Retiro Baixo, após o rompimento da Barragem de rejeitos B1 no Rio Paraopeba (MG)¹

Diego de Souza Sardinha², Gunther Brucha³, Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes⁴, Jéssica Teixeira Silveira⁵,
Deivid Arimatea Saldanha de Melo⁶, Letícia Hirata Godoy⁷, Fernando Verassani Laureano⁸

¹Pesquisa financiada com recursos da Diretoria de restituição da Vale S/A, Processo CTE.PSQ.0057

²Professor Associado da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), lotado no Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Laboratório de Ecossistemas Aquáticos e Solos (LEAS) do Campus de Poços de Caldas (MG). E-mail: diego.sardinha@unifal-mg.edu.br (autor correspondente).

³Professor Associado da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL), lotado no Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Laboratório Microbiologia Ambiental do Campus de Poços de Caldas (MG). E-mail: gunther.brucha@unifal-mg.edu.br

⁴Professor Adjunto da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL) lotado no Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT), Campus Poços de Caldas (MG). E-mail: paulo.menezes@unifal-mg.edu.br

⁵Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCA-UNIFAL). E-mail: jessica.teixeira@sou.unifal-mg.edu.br

⁶Técnico do Instituto de Ciências da Natureza da Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL - ICN). E-mail: deivid.saldanha@unifal-mg.edu.br

⁷Grupo de pesquisa de Análise Integrada do Meio Físico. E-mail: leticiahirata@gmail.com

⁸Vale S/A. Diretoria de Reparação, Nova Lima (MG), Brasil. E-mail: fernando.laureano@vale.com

Artigo recebido em 30/04/2024 e aceito em 08/08/2024

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba localiza-se na região central do estado de Minas Gerais. O Reservatório de Retiro Baixo foi construído no baixo curso a aproximadamente 300 km da Barragem B1, onde os rejeitos da Mina Córrego do Feijão verteram após o rompimento de 25 de janeiro de 2019. Este trabalho avaliou o transporte fluvial em t/ano pelo método estocástico, para nutrientes e principalmente os metais Mn, Cu e Fe entre fevereiro de 2019 a agosto de 2022, tendo sido realizadas dez amostragens na ponte da Rodovia MG 420 antes do reservatório. Para turbidez, oxigênio dissolvido, manganês, cobre, ferro e fósforo total algumas amostras apresentam desconformidade com a legislação vigente. Estas características também influenciam no transporte fluvial de nutrientes $29,18 \times 10^3$ t de Na^+ , $8,97 \times 10^3$ t de K^+ , $7,88 \times 10^3$ t de SO_4^{2-} , $9,67 \times 10^3$ t de NO_3^- , $1,50 \times 10^3$ t de PO_4^{3-} e $0,49 \times 10^3$ t de P e metais, 77,44 t de Mn, $0,23 \times 10^3$ t de Cu e $1,37 \times 10^3$ t de Fe que são anualmente carregados e transportados ao reservatório pelo rio Paraopeba. A bacia apresenta um complexo quadro geológico e pedológico, uso da terra diversificado com grande urbanização, atividades industriais, agrícolas, pastagens efluentes, dentre outros que, juntamente com o rompimento da barragem B1 e altos índices pluviométricos que favorecem o aumento das vazões e deflúvios entre os meses de outubro e março, vem contribuindo para o transporte fluvial e a qualidade de suas águas.

Palavras-chave: balanço hídrico, sólidos totais suspensos, curva de diluição, fluxo instantâneo diário.

Nutrients and metals fluvial transport upstream the Retiro Baixo Reservoir, after B1 tailings Dam rupture in Paraopeba River (MG)

ABSTRACT

The Paraopeba River basin is located in the central region of the Minas Gerais state, Brazil. The Retiro Baixo Reservoir was built on the river lower course approximately 300 km downward the B1 Dam major tailings managing facility from Vales's Córrego do Feijão Mine that collapsed on 25 January 2019. This study assessed nutrients and especially Mn, Cu and Fe transport in t/year approaching the stochastic method between February 2019 and August 2022. Ten samples were taken under the MG 420 road bridge which cross the river few kilometers upstream the reservoir. Our data shows violations regard to current legislation for turbidity, dissolved oxygen, manganese, copper, iron and total phosphorus. These results also influence the fluvial transport of nutrients $29,18 \times 10^3$ t of Na^+ , $8,97 \times 10^3$ t of K^+ , $7,88 \times 10^3$ t of SO_4^{2-} , $9,67 \times 10^3$ t of NO_3^- , $1,50 \times 10^3$ t of PO_4^{3-} and $0,49 \times 10^3$ t of P and metals 77,44 t of Mn, $0,23 \times 10^3$ t of Cu and $1,37 \times 10^3$ t of Fe which are constantly carried into the reservoir. The watershed presents a complex geological and pedological framework and a diversified land use with major urbanization, industrial and agricultural activities, pastures and high rainfall rates that favor increased flows between October and March. These factors together with the B1 tailings dam, have contributed to river transport and water quality.

Keywords: water balance; total suspended solids; dilution curve; daily instantaneous flow.

Introdução

A exploração de recursos minerais é uma atividade humana capaz de gerar riqueza e desenvolvimento social, mas também é fonte de impactos e riscos ambientais que podem comprometer a qualidade ambiental (Armstrong et al., 2019; Cardoso et al., 2022; Filho et al., 2023; López-Ramírez & Cuevas-Cardona, 2022; Malov et al., 2022; Ramírez-Javier et al., 2023; Santana et al., 2020; Sardinha et al., 2022).

As consequências ambientais decorrentes do colapso de barragens de rejeitos encabeçam a lista de impactos negativos relacionados a essa atividade (Pacheco et al., 2022). Além disso, segundo Silva et al. (2024) as rupturas de barragens aumentam a quantidade de poluentes no sistema fluvial ao libertarem grandes volumes de rejeitos que são remobilizados e armazenados no ecossistema ao longo do tempo.

A bacia hidrográfica do rio Paraopeba localiza-se em uma região com grandes áreas de mineração, culturas agrícolas, pecuária, além de possuir grande influência de parte dos municípios da região metropolitana de Belo Horizonte, estado de Minas Gerais. A Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo é um empreendimento para geração de eletricidade, construído no baixo curso do rio Paraopeba, aproximadamente 300 km da Barragem B1 da Vale, onde os rejeitos da Mina Córrego do Feijão verteram após o rompimento, no dia 25 de janeiro de 2019.

O rompimento liberou um fluxo de lama de rejeitos rápido e turbulento que destruiu infraestruturas a jusante e espalhou um grande depósito de rejeitos ao longo da bacia hidrográfica do ribeirão Ferro Carvão e do rio Paraopeba (Kobayashi et al., 2023). De acordo com Laureano et al. (2022), o volume total de resíduos transbordados foi de cerca de 9,7 Mm³, sendo aproximadamente 8,1 Mm³ depositados no vale do ribeirão Ferro Carvão e 1,6 Mm³ no rio Paraopeba, resultando em um impacto direto na composição e dinâmica sedimentar do canal.

Segundo Pacheco et al. (2022) na bacia do rio Paraopeba, os processos naturais e as atividades humanas desenvolveram um impacto de longa data na qualidade das águas, caracterizado por uma grande percentagem de não-conformidades com os padrões legais. Além disso, segundo Silva et al. (2024), para além de uma elevada concentração de óxidos de Fe, os rejeitos eram também compostos por óxidos de Mn que, após a deposição e dispersão, foram medidos altos níveis em amostras de água do rio.

De acordo com Kobayashi et al. (2023), as repercussões do rompimento da barragem de Brumadinho foram imensas. A quantificação do alcance dos efeitos do acidente nos ecossistemas a jusante continua a ser uma questão importante e, com o rio São Francisco situado a jusante do rio Paraopeba, o qual constitui a principal fonte de água potável para milhões de pessoas, a extensão física da dispersão de rejeitos e os efeitos químicos sobre a água e a biota são de grande interesse.

O rompimento da Barragem B1 provocou alterações nos corpos hídricos do estado de Minas Gerais, notadamente no córrego Ferro-Carvão e no rio Paraopeba até o reservatório da UHE de Retiro Baixo (TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos, 2019). Com isso, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o transporte fluvial, principalmente Fe e Mn no rio Paraopeba a montante do reservatório de Retiro Baixo, que pode estar recebendo e amortecendo a pluma de rejeitos transportados por este rio, evitando com que chegue ao Reservatório de Três Marias, no rio São Francisco.

Área de estudo

A bacia do rio Paraopeba, com uma área de drenagem de 12.054 km², está localizada na região sudeste do Estado de Minas Gerais (Figura 1), sendo composta por 48 municípios onde habitam cerca de 1.320.000 habitantes com uma densidade populacional de aproximadamente 107 hab./km².

A nascente do rio Paraopeba está localizada no extremo sul da Serra do Espinhaço (Figura 1), município de Cristiano Ottoni, percorrendo uma distância aproximada de 510 km até sua foz na represa de Três Marias no rio São Francisco, entre os municípios de Felixlândia e Pompéu, sendo dividida em Alto Paraopeba, Médio Paraopeba e Baixo Paraopeba (Comitê da Bacia do Rio São Francisco [CBHSF], 2024).

De acordo com Laureano et al. (2022), a bacia apresenta um complexo quadro geológico: rochas máficas e ultramáficas pré-cambrianas do Supergrupo Rio das Velhas e rochas gnáissicas de composição tonalítica a granítica do embasamento cristalino; unidades metassedimentares paleoproterozóicas do Supergrupo Minas, quartzitos, filitos, dolomitos e itabiritos (formação ferrífera bandada quartzo-hematita) nos setores Alto e Médio Paraopeba; coberturas sedimentares neoproterozóicas no Baixo Paraopeba (Supergrupo São Francisco, Grupo Bambuí).

A bacia é caracterizada por planaltos, depressões e áreas dissecadas resultantes

predominantemente da alternância de atuação de processos morfoclimáticos associados ao condicionamento geológico. As unidades geomorfológicas existentes são: Planalto Dissecado do Centro-Sul e Leste de Minas, Depressão São Franciscana, Planalto do São Francisco e Quadrilátero Ferrífero (Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos [Cobrape], 2020). O relevo é caracterizado pela

presença de montes arredondados com dois principais conjuntos de topografia acidentada e elevada, e de topografia plana ou levemente ondulada (CBHSF, 2024). De acordo com Cobrape (2020) Latossolos Vermelhos são encontrados em aproximadamente 31% da bacia, principalmente nas regiões de Depressão do Médio e Alto São Francisco, seguidos por 15% de Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolos e Argissolos.

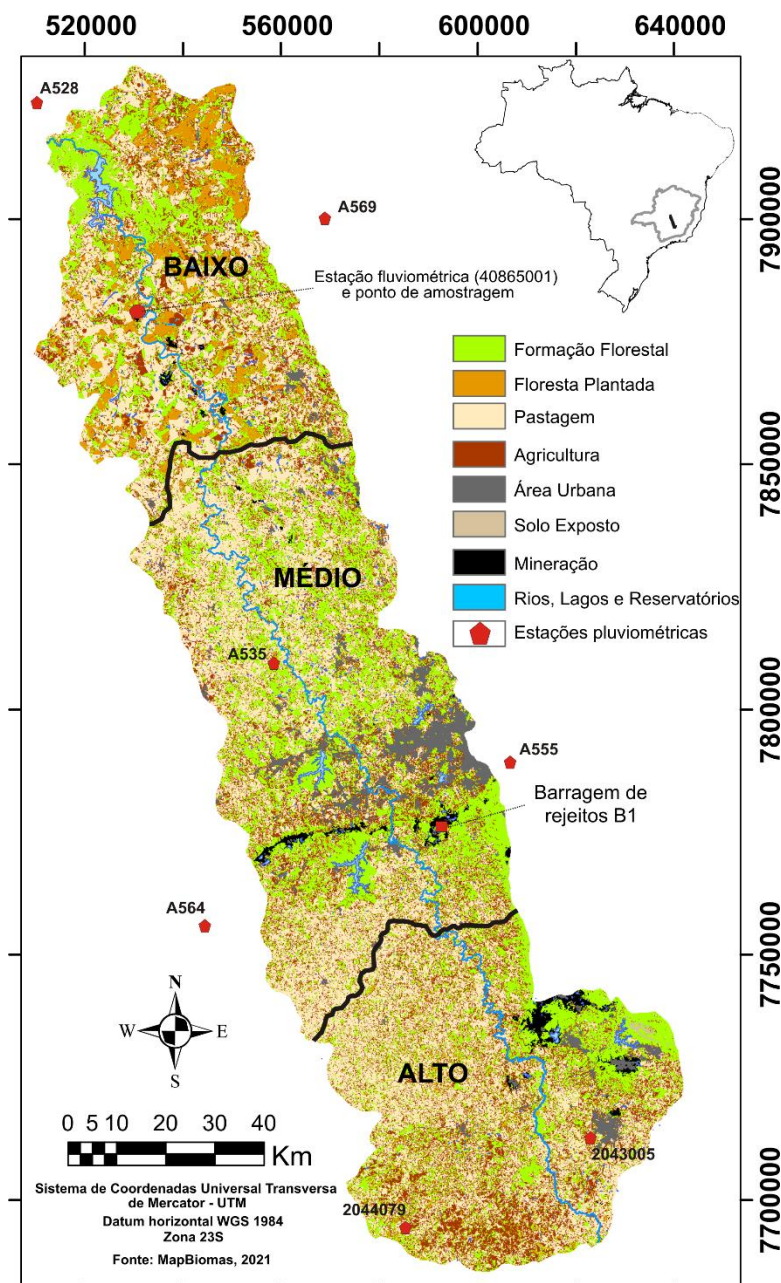


Figura 1. Localização, uso da terra, barragem de rejeitos B1, estações pluviométricas, fluviométrica e ponto de amostragem na bacia do rio Paraopeba. Fonte: elaborado pelos autores com base em (Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil [MapBiomas], 2021).

A precipitação geralmente aumenta de norte a sul, atingindo valores médios em torno de

1100 mm/ano no Baixo Paraopeba e 1300-1400 mm/ano no Alto Paraopeba (Pacheco et al., 2022).

Segundo os autores, a descarga média de longo prazo no canal do rio Paraopeba aumenta de 9,5 m³/s no Alto Paraopeba, para 61,14 a 82,7 m³/s no Médio Paraopeba e para 123,2 m³/s no Baixo Paraopeba, reflexos do aumento das áreas de drenagem, de 462, 4120 a 5690 e 8750 km² respectivamente.

O uso da terra na bacia é marcado por extensas áreas de exploração agrícola, pastagens, ocupação urbana, floresta plantada e mata nativa, áreas de solo exposto e mineração. O potencial industrial está ligado à proximidade com a Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), agrícola nas proximidades do alto e baixo curso e mineral na região ao quadrilátero ferrífero (alto curso) e Brumadinho (médio curso) do rio Paraopeba. O crescimento urbano, exploração mineral, industrial e pecuária nas regiões metropolitanas e cidades de médio e pequeno porte contribuem para o atual uso da terra (Figura 1).

As águas superficiais são classificadas como classe 2 pelo Conselho Estadual de Política Ambiental/Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (COPAM/CERH-MG, 2008) sendo os principais usos a geração de energia elétrica, abastecimento público e industrial, com destaque para mineração e irrigação (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais [CPRM], 2020). Além disso, o rio recebe efluentes de cerca de 70 grandes indústrias e mineradoras (Kobayashi et al., 2023), considerando como as principais atividades econômicas a mineração, siderurgia, indústria e agropecuária que influenciam ao uso terra na bacia (exploração agrícola, pastagens, ocupação urbana, cerrado e mata nativa, silvicultura e solo exposto), conforme Figura 1.

Material e métodos

Balanço hídrico

Em decorrência da grande extensão e com vistas a comparar as médias pluviométricas durante o período de estudo, utilizou-se o método de Thiessen (1911). O cálculo foi realizado pela média ponderada entre a precipitação de cada estação e o peso a ela atribuído, que é a área de influência da precipitação em cada estação, conforme Eq. (1).

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i \times P_i}{A} \quad (1)$$

Onde: P_m = precipitação média na bacia (mm); A_i = área de influência no i-ésimo pluviômetro (km²); P_i = precipitação no i-ésimo pluviômetro (mm); A_b = área total da bacia (km²).

Os dados de precipitação das séries históricas foram obtidos das estações pluviométricas em operação no Portal Hidroweb (Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos [SNIRH], 2023). Com isso, foi calculado a média das estações: Conselheiro Lafaiete – 2043005; Lagoa Dourada – 2044079; Ibirité – A555; Divinópolis – A564; Florestal – A535; Sete Lagoas – A569; e Três Marias – A528. As estações pertencem à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para as séries históricas, abrangendo os períodos de amostragem (2019, 2021 e 2022). Os dados de vazão foram obtidos no ponto de amostragem de qualidade da água, na estação fluviométrica UHE Três Marias Porto Mesquita (40865001) no rio Paraopeba, localizada na última ponte antes do Reservatório de Retiro Baixo, entre a cidade de Pompéu e o distrito de Angueretá (Figura 1).

O deflúvio foi calculado pela Equação (2), levando em conta a vazão medida nos dias de amostragem, os dias do mês e a área da bacia até o ponto de amostragem (10.200,20 km²).

$$Defl = \frac{Q \times dias}{A} \quad (2)$$

Onde: Defl. = deflúvio (mm); Q = vazão (m³/s); dias = segundos (s); A = área da bacia (m²).

O saldo do balanço hídrico foi calculado pela Equação (3) e pode assumir valores negativos ou positivos. Quando o saldo é positivo há armazenamento de água no sistema e, quando negativo déficit no sistema hidrológico.

$$Saldo = P - Defl \quad (3)$$

Onde: Saldo = saldo (mm); P = precipitação (mm); Defl. = deflúvio (mm).

Avaliação da qualidade da água

Para avaliar a qualidade da água na bacia do rio Paraopeba, foram amostradas águas fluviais entre 01 de fevereiro de 2019 a 23 de agosto de 2022, sendo 10 amostragens na última ponte antes do Reservatório de Retiro Baixo, entre os municípios de Pompéu e o distrito de Angueretá (Rodovia MG 420) onde também se localiza a estação fluviométrica UHE Três Marias Porto Mesquita (40865001) no rio Paraopeba (Figura 1). As amostras foram coletadas com Garrafa de Van Dorn e compostas em uma única alíquota (25% da

margem esquerda, centro e 25% da margem direita) ainda em campo.

As águas foram monitoradas *in situ* utilizando equipamento com eletrodos de leitura direta no próprio local de amostragem, medidor portátil U-50 Multiparameter Water Quality Checkers da Horiba (HORIBA, 2009) previamente calibrado para temperatura a (0°C), pH 4,00 (4,01 ± 0,01 a 25 ± 0,2°C) e 7,00 (7,01 ± 0,01 a 25 ± 0,2°C), condutividade elétrica com solução padrão de KCl (1,0 mmol/L) de condutividade elétrica conhecida, 147 µS/cm a 25°C, oxigênio dissolvido com solução de sulfito de sódio (Na₂SO₃) < 0,1 mg/L de O₂, turbidez com água deionizada (0 NTU) solução de turbidez (100 NTU) e sólidos totais dissolvidos com água deionizada (0,0 µS/cm) e solução de NaCl (100,0 µS/cm). Com isso, foram analisadas as seguintes variáveis: temperatura (sensor de platina de -10°C a 55°C ± 0,3°C); pH (método de eletrodo de vidro, de 0,0 a 14,0 ± 0,1 pH); condutividade elétrica (método do eletrodo 4AC, de 0,0 a 100,0 µS/cm ± 0,1 %); oxigênio dissolvido (método polarográfico, de 0,0 a 50,0 mg/L ± 0,2 mg/L); turbidez (fonte de luz LED, de 0,0 a 800,0 NTU ± 1,0 NTU) e sólidos totais dissolvidos (método de conversão de condutividade 0 g/L to 100 g/L ± 5 g/L).

Amostras foram armazenadas em frascos de polipropileno, previamente lavado com água deionizada, ácido clorídrico (HCl 1N) e novamente com água deionizada por três lavagens, sendo deixados em temperatura ambiente com a boca para baixo sobre papel filtro absorvente. No momento da amostragem, os frascos foram rinsados com água do próprio local, sendo posteriormente acondicionados em caixa térmica contendo gelo.

No Laboratório de Ecossistemas Aquáticos e Solos (LEAS) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal-MG), campus Poços de Caldas, amostras de sólidos totais em suspensão foram realizadas em triplicata, segundo metodologia gravimétrica (American Public Health Association [APHA], 2012). Os teores dissolvidos de Na⁺ e K⁺ foram determinados por Fotômetro de Chama MOD. 910 MS (padrões Na⁺ e K⁺ de 20 ppm e 100 ppm) resolução de 1,0 ppm ± 0,1 ppm (ANALYSER, 2010). Os teores dissolvidos de manganês total Mn (método PAN, de 0 to 0,700 mg/L ± 0,013 mg/L), cobre Cu (método Bicinconinato, de 0,0 to 5,0 mg/L ± 0,02 mg/L), ferro total Fe (método FerroVer, de 0 a 3,0 mg/L ± 0,017 mg/L), fosfato PO₄³⁻ e fósforo total P (método do ácido ascórbico, de 0,02 a 2,5 ± 0,01 mg/L), sulfato SO₄²⁻ (método

sulfaver 4, de 0 a 70 mg/L ± 0,9 mg/L) e nitrato NO₃⁻ (método de redução de cádmio, de 0 a 30,0 ± 0,3 mg/L) foram quantificados por espectrofotômetro modelo DR 890 (Hach Company [HACH], 2013).

Análise de dados

Análises de correlação linear de Pearson (r) Equação (4) foram realizadas para identificar as relações entre as variáveis independentes (x) e dependentes (y) nas águas fluviais deste estudo.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2][\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2]}} \quad (4)$$

Onde: n = número de pares de observações (X e Y); X_i = observação i da variável X; Y_i = observação i da variável Y; $\bar{X}$ = média dos valores de X_i; $\bar{Y}$ = média dos valores de Y_i.

O modelo de diluição teórica da Equação (5), permite avaliar a dinâmica de espécies químicas em relação à vazão de um determinado corpo hídrico. Este modelo contribui para identificar possíveis fontes pontuais ou difusas no comportamento dos elementos químicos presentes nas águas fluviais da bacia (Reis & Sardinha, 2021; Sardinha et al., 2022).

$$C_i = \frac{C_{max} \times Q_{min}}{Q_t} \quad (5)$$

Onde: C_i = concentração da espécie química referente à curva de diluição (mg/L); C_{max} = concentração máxima observada na série (mg/L); Q_{min} = vazão mínima observada na série (m³/s); Q_t = vazão do dia de amostragem (m³/s).

Transporte fluvial

O transporte fluvial foi estimado em t/ano pelo método estocástico (Reis & Sardinha, 2021; Sardinha et al., 2022) tendo como variáveis a concentração média ponderada pela vazão (C_{MP}) e vazão média anual (Q_{média}), conforme as Equações (6) e (7).

$$C_{MP} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (6)$$

Onde: C_{MP} = concentração média ponderada do parâmetro nas águas fluviais (mg/L); C_i = concentração do parâmetro na i-ésima amostra (mg/L); Q_i = vazão do rio durante a coleta da i-ésima amostra (m³/s).

$$T_{fluvial} = 31,536 \times C_{MP} \times Q_{média} \quad (7)$$

Onde: $T_{fluvial}$ = transporte fluvial anual do parâmetro nas águas fluviais (t/ano); 31,536 = correção da massa e do tempo; C_{MP} = concentração média ponderada pela vazão do parâmetro nas águas fluviais (mg/L); Q = vazão média anual (m^3/s).

O transporte específico foi estimado a partir dos dados anuais do transporte fluvial e da área de drenagem do ponto de amostragem da bacia do rio Paraopeba (10.200,20 km^2), obtendo assim o resultado em $t/km^2/ano$.

Resultados e discussão

Balanço hídrico

A Figura 2 apresenta as variações pluviométricas do período de estudo, com base nas estações pluviométricas. As médias aritméticas mensais indicam que o ano de 2022 foi o de maior precipitação com um total acumulado de (1643,11 mm) e máxima de (520,80 mm) no mês de janeiro. Por outro lado, o ano de 2019 apresenta um total acumulado de (1281,50 mm) o mais baixo entre o período de estudo. Já os menores índices pluviométricos foram no mês de julho do ano de 2021 (0,29 mm). Os resultados indicam também que os períodos de baixa pluviosidade se concentram entre os meses de abril a setembro, sendo julho o mais crítico e as altas precipitações ocorreram entre outubro e março (Figura 2 e Tabela 1).

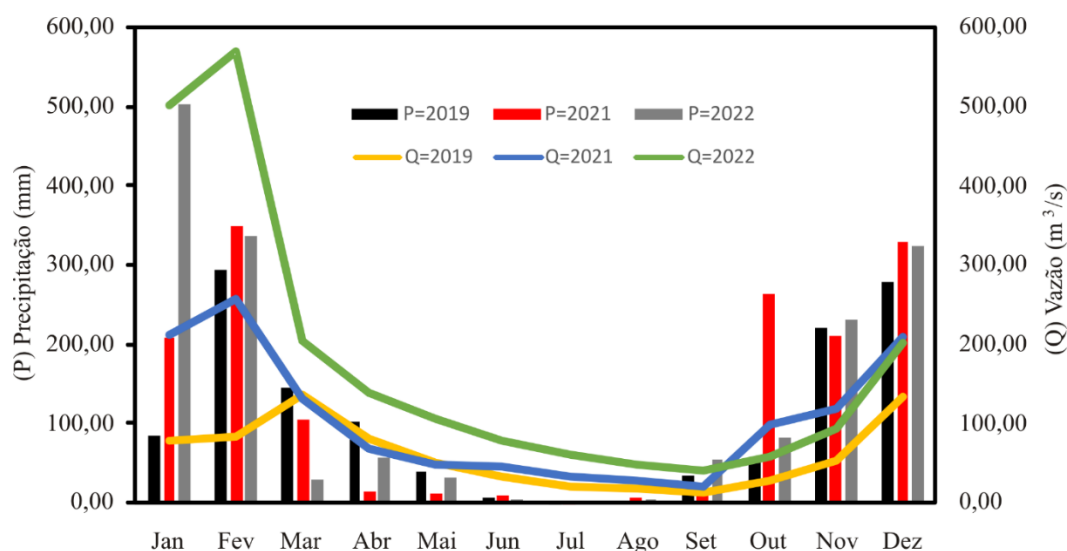


Figura 2. Pluviosidade média mensal (P) e vazão média mensal (Q) na estação fluviométrica (40865001) e ponto de amostragem de água no rio Paraopeba, durante os anos de 2019, 2021 e 2022.

Para o período de estudo, a precipitação anual segundo a média aritmética e o método de Thiessen foram de 1.281,50 mm e 1.298,98 mm para 2019, 1.557,47 mm e 1.538,16 mm para 2021 e 1.643,11 mm e 1.672,20 mm para 2022, respectivamente (Tabela 1). Ao se comparar as médias, percebe-se que as diferenças são pequenas, sendo o método de Thiessen o que apresentou valores maiores para os anos de 2019 e 2022. Os valores são os próximos aos encontrados por Pacheco et al. (2022) de 1.100 a 1.400 mm. Além disso, os períodos secos de abril a setembro e chuvosos de outubro e março possuem similaridade com os encontrados por Cobrape (2020), de 177 mm para seco e 1251 mm para o chuvoso.

A vazão mensal mínima correspondeu ao mês de setembro de 2019 (13,61 m^3/s), enquanto que a máxima foi em fevereiro de 2022 (570,92

m^3/s) com médias anuais de 61,29 m^3/s , 106,91 m^3/s e 176,19 m^3/s para os anos de 2019, 2021 e 2022 respectivamente (Figura 2 e Tabela 2). Os menores e maiores valores de vazão foram registrados nos meses secos e chuvosos indicando uma enorme influência sazonal deste parâmetro, variação de aproximadamente 123 m^3/s em 2019, 235 m^3/s em 2021 e 530 m^3/s em 2022.

Conforme o balanço hídrico da Tabela 2, em 2019 os meses de julho e agosto em que a precipitação média esteve abaixo de 5 mm verificase um saldo hídrico negativo de -4,77 mm e -0,38 mm, respectivamente, quando provavelmente o escoamento superficial do rio Paraopeba é alimentado pelo escoamento de base (escoamento subterrâneo), conforme também observado nos estudos de Reis & Sardinha (2021) e Sardinha et al. (2022).

Tabela 1. Precipitação média anual na bacia hidrográfica do rio Paraopeba (MG), pela média aritmética e método de Thiessen (2019, 2021 e 2022).

Estações		Área (km ²)	(%) em relação ao total da área										Fator peso
2043005	Conselheiro Lafaiete	1320	12,94										0,129
2044079	Lagoa Dourada	2386	23,39										0,234
A555	Ibirité	626	6,14										0,061
A564	Divinópolis	2149	21,07										0,211
A535	Florestal	1243	12,19										0,122
A569	Sete Lagoas	1849	18,13										0,181
A528	Três Marias	627	6,15										0,061
Total		10200	100										1
Média aritmética	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
(mm)													
2019	86,49	275,64	145,4	107,86	49,03	10,26	0,83	4,11	38,26	56,03	231,14	276,46	1281,5
2021	216,63	359,83	104,43	16,71	10,09	10,16	0,29	8,46	18,43	248,74	229,43	334,29	1557,47
2022	520,8	324,51	28,2	49,06	34,71	2,29	1,14	2,06	46,77	86,57	233,24	313,76	1643,11
Média Thiessen	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
(mm)													
2019	87,22	297,1	147,36	104,59	43,41	10,11	1,04	4,58	36,98	61,66	226,2	278,72	1298,98
2021	208,68	341,13	109,5	15,33	13,58	10,24	0,4	7,79	20,24	271,5	208,72	331,04	1538,16
2022	512,27	336,78	29,75	59,35	31,07	3,11	1,45	3,27	55,95	81,19	233,82	324,20	1672,20

Apesar de um volume total maior de precipitação acumulada, os anos de 2021 e 2022 apresentam uma distribuição irregular e menos uniforme de precipitação durante o ano, quando comparados com o ano de 2019. Esta distribuição irregular culminou com saldos hídricos negativos em 2021 de -2,25 mm em abril, -1,60 mm em junho e -8,98 mm em julho. Já em 2022 foram verificados saldos negativos em março (-24,44 mm), junho (16,72 mm), julho (-14,9 3mm) e agosto (-9,84 mm) apesar dos maiores valores acumulados, entre os três anos estudados (Tabela 2 e Figura 2).

Durante os considerados períodos chuvosos de outubro a março, apesar do significativo aumento do volume da precipitação comparado com os meses dos períodos secos, de abril a setembro, o saldo hídrico de alguns meses, ainda esteve abaixo da média anual, provavelmente devido ao processo de recarga das águas subterrâneas que alimentaram as águas superficiais durante o período de estiagem, conforme também observado nos estudos de Reis & Sardinha (2021) e Sardinha et al., (2022).

O processo de recarga do lençol freático alcançou o pico no mês de setembro de 2019, em que o deflúvio e a vazão atingiram o menor nível anual, 3,46 mm e 13,61 m³/s, respectivamente. O aumento da precipitação na estação chuvosa, de outubro a março, influencia positivamente,

alcançando um saldo de 379,99 mm em janeiro de 2022, mês mais chuvoso durante o período de estudo (512,27 mm). Em fevereiro do mesmo ano, o deflúvio e a vazão alcançam seu nível máximo durante o período de estudo, com 135,40 mm e 570,42 m³/s, respectivamente, provavelmente pela precipitação acumulada dos meses anteriores (Tabela 2).

O balanço hídrico da bacia do rio Paraopeba apresentou déficits no período seco e superávit na estação chuvosa. A produção média de água no período das chuvas e durante o período de estudo foi de 1092,37 mm, o que representa cerca de 99,87 % do balanço hídrico da bacia, demonstrando que há predomínio do escoamento superficial na alimentação das águas fluviais, sendo um valor representativo para a recarga dos aquíferos regionais da bacia do rio Paraopeba.

Qualidade da água

Os resultados das análises físico e químicas das águas fluviais estão apresentados na Tabela 3 sendo as águas superficiais do rio Paraopeba classificadas como classe 2 (COPAM/CERH-MG, 2008). Os dados de vazão (Q), do dia e horário de amostragem de água, apresentam uma variação de aproximadamente 630 m³/s com maiores valores no dia 23/02/2022 (649,00 m³/s) e os menores no dia 06/08/2019 (19,70 m³/s). Estas variações, ocasionadas pela precipitação e deflúvio (Figura 2

e Tabelas 1 e 2), contribuem para a modificação da paisagem e do transporte sólidos totais suspensos

(STS) na calha do rio, conforme observados em campo na Figura 3 e na Tabela 3.

Tabela 2. Relação do balanço hídrico na bacia hidrográfica do rio Paraopeba (MG) durante o período de estudo.

Ano	Mês	Dias	Precipitação média (mm)	Vazão média (m ³ /s)	Deflúvio (m ³)	(mm)	Saldo (mm)	Vazão específica (l/s/km ²)
2019	Janeiro	31	87,22	78,07	209102688,00	20,50	66,72	0,023
	Fevereiro	28	297,10	82,69	200043648,00	19,61	277,49	0,070
	Março	31	147,36	136,39	365306976,00	35,81	111,54	0,039
	Abril	30	104,59	82,47	213750781,08	20,96	83,64	0,027
	Maio	31	43,41	51,47	137846984,62	13,51	29,90	0,011
	Junho	30	10,11	34,18	88582981,52	8,68	1,42	0,003
	Julho	31	1,04	22,11	59216878,91	5,81	-4,77	0,000
	Agosto	31	4,58	18,91	50656520,66	4,97	-0,38	0,001
	Setembro	30	36,98	13,61	35270413,43	3,46	33,52	0,009
	Outubro	31	61,66	27,94	74836311,86	7,34	54,33	0,016
	Novembro	30	226,20	53,82	139497876,00	13,68	212,52	0,057
	Dezembro	31	278,72	133,82	358424356,00	35,14	243,58	0,073
2021	Janeiro	31	208,68	212,91	570256798,39	55,91	152,78	0,055
	Fevereiro	28	341,13	257,05	621857233,73	60,97	280,16	0,081
	Março	31	109,50	132,90	355967368,50	34,90	74,60	0,029
	Abril	30	15,33	69,16	179269689,43	17,58	-2,25	0,004
	Maio	31	13,58	50,06	134085787,09	13,15	0,44	0,004
	Junho	30	10,24	46,60	120779593,85	11,84	-1,60	0,003
	Julho	31	0,40	35,72	95664636,00	9,38	-8,98	0,000
	Agosto	31	7,79	28,89	77386703,84	7,59	0,21	0,002
	Setembro	30	20,24	22,06	57182121,13	5,61	14,63	0,005
	Outubro	31	271,50	99,26	265848869,70	26,06	245,44	0,071
	Novembro	30	208,72	118,82	307978869,78	30,19	178,52	0,053
	Dezembro	31	331,04	209,45	560990360,31	55,00	276,04	0,087
2022	Janeiro	31	512,27	503,76	1349262946,64	132,28	379,99	0,135
	Fevereiro	28	336,78	570,92	1381158039,27	135,40	201,38	0,080
	Março	31	29,75	206,38	552758069,22	54,19	-24,44	0,008
	Abril	30	59,35	138,67	359435847,74	35,24	24,11	0,015
	Maio	31	31,07	106,81	286070692,38	28,05	3,02	0,008
	Junho	30	3,11	78,02	202230152,97	19,83	-16,72	0,001
	Julho	31	1,45	62,38	167080905,33	16,38	-14,93	0,000
	Agosto	31	3,27	49,92	133718164,72	13,11	-9,84	0,001
	Setembro	30	55,95	41,15	106659557,55	10,46	45,49	0,014
	Outubro	31	81,19	58,60	156947107,72	15,39	65,80	0,021
	Novembro	30	233,82	94,19	244139240,51	23,93	209,89	0,059
	Dezembro	31	324,20	203,55	545181575,83	53,45	270,75	0,085

Em relação à temperatura da água, o menor valor foi registrado na amostragem de 26/05/2022 (17,66°C) e o máximo em 01/02/2019 (30,22°C), com média anual de 22,83°C e uma variação de aproximadamente 12,56°C. Segundo CPRM (2020) a temperatura da água no rio Paraopeba variou entre 13,8°C a 30°C antes da ruptura da barragem de rejeitos, com dados entre 2002 a 2018 e, de 17,7°C a 32°C após a ruptura com dados de

26/01 a 31/03/2020. Já de acordo com Soares et al. (2022) as variações foram de 35,2°C a 14,4°C com média de 24,2°C em dados analisados, de 2008 a 2021, para toda a bacia do rio Paraopeba.

Com relação ao pH, as variações foram entre 5,88 mínima e máxima de 8,56 com média de 7,35. Os resultados indicam que as águas se encontram próximas da neutralidade, dentro da faixa de 6 a 9 recomendada pela (COPAM/CERH-

MG, 2008) e pela Resolução Conama n° 357, de 17 de março de 2005 para águas doces, exceto para a amostragem de 28/11/2019 (5,88). Os valores são

próximos a 5,1 e 8,4 antes da ruptura e 6,0 a 8,7 após a ruptura (CRPM, 2020) e 9,3 a 5,3 com média de 6,9 (Soares et al., 2022).

Tabela 3. Análises físico e químicas das águas fluviais do rio Paraopeba.

Data	Q (m ³ /s)	T °C	pH	Cond (μS/cm)	Turb (NTU)	STD (mg/L)	STS (mg/L)	OD
01/02/2019	46,00	30,22	7,09	213,33	5,90	138,67	15,08	8,30
29/04/2019	57,80	24,32	7,38	189,00	42,80	123,00	34,55	7,97
06/08/2019	19,70	21,15	7,68	258,33	5,93	168,00	0,00	8,99
28/11/2019	57,57	25,76	5,88	211,00	85,67	137,00	73,33	4,57
26/05/2021	46,10	20,97	7,07	199,33	11,43	129,33	14,44	7,05
26/08/2021	27,19	20,63	6,81	244,67	9,37	158,67	12,22	7,56
25/11/2021	96,46	25,42	7,58	98,33	59,77	64,00	80,00	6,84
23/02/2022	649,00	23,19	7,97	51,33	360,33	33,33	506,33	7,76
26/05/2022	93,24	17,66	8,56	76,67	32,47	49,67	4,22	4,35
22/08/2022	46,87	19,01	7,45	101,67	17,23	0,07	36,00	7,35
Média	113,99	22,83	7,35	164,37	63,09	100,17	77,62	7,08
DP	179,85	3,72	0,72	74,86	107,71	58,29	153,12	1,51

Q = vazão; T = temperatura; Cond = condutividade; Turb = turbidez; STD = sólidos totais dissolvidos; STS = sólidos totais suspensos; OD = oxigênio dissolvido; DP = desvio padrão.



Figura 3. Rio Paraopeba no ponto de amostragem sobre a ponte da Rodovia MG 420. (a) Foto de 06/08/2019. (b) Foto de 23/02/2022.

Os valores de condutividade elétrica tiveram uma média de 164,37 $\mu\text{S/cm}$, 258,33 $\mu\text{S/cm}$ em 06/08/2019 e 51,33 $\mu\text{S/cm}$ em 23/02/2022. Os valores médios são próximos aos de Soares et al. (2022) de 132,6 $\mu\text{S/cm}$ encontrados para o rio Paraopeba. Segundo Reis & Sardinha (2021) o intemperismo das rochas pode elevar a condutividade, no entanto, atividades antrópicas também podem contribuir para o aumento da condutividade, conforme variações entre 15 $\mu\text{S/cm}$ e 570 $\mu\text{S/cm}$ antes da ruptura e, 29 $\mu\text{S/cm}$ a 270 $\mu\text{S/cm}$ após a ruptura (CPRM, 2020).

Quanto à turbidez, houve grande variação, apresentando valor mínimo de 5,90 NTU em 01/02/2019 e máximo de 360,33 NTU no período de vazão (Q) máxima em 23/02/2022, acima do limite de 100 NTU estabelecidos pela (COPAM/CERH-MG, 2008) e pela (Resolução

Conama 357, 2005) para rios de classe 2. A média anual foi de 63,09 NTU abaixo dos valores encontrados por Soares et al. (2022) de 232,40 NTU e CPRM (2020) com máximos antes e depois da ruptura de 1.100 NTU e 22.000 NTU.

Conforme observado para turbidez, os valores de sólidos totais em suspensão (STS) aumentam com a vazão (Q) ao contrário de sólidos totais dissolvidos (STD) como em 06/08/2019 (168,00 mg/L) onde o saldo dos meses de julho (-4,77 mm) e agosto (-0,38 mm) são negativos (Tabela 2) e provavelmente a vazão do rio Paraopeba recebe contribuição do escoamento de base. Por outro lado, o aumento do saldo nos meses de dezembro de 2021 (276,04 mm), janeiro (379,99 mm) e fevereiro (201,38 mm) de 2022 contribuíram para o aumento das concentrações de sólidos totais em suspensão (STS) de 506,33 mg/L

em 23/02/2022 (Tabelas 2 e 3). Estas variações também foram observadas no trabalho de Soares et al. (2022) para STD e STS com mínimos de 12,0 mg/L e 1,0 e máximos de 1.178,0 mg/L a 13.688,0 mg/L, respectivamente.

Os resultados de oxigênio dissolvido demonstraram variações de 4,35 mg/L a 8,99 mg/L, média de 7,08 mg/L. A concentração mínima exigida pela (COPAM/CERH-MG, 2008) e pela (Resolução Conama 357, 2005) para rios de classe 2 é de 5,0 mg/L, sendo as amostragens de 28/11/2019 (4,57 mg/L) e 26/05/2022 (4,35 mg/L) abaixo deste limite. Essas variações também foram verificadas pelos trabalhos da CPRM (2020) com valores entre 3,6 mg/L e 10,2 mg/L antes da ruptura e 5,0 a 9,6 mg/L após a ruptura, além do trabalho de Soares et al. (2022) com dados analisados de 2008 a 2021 (mínimo de 0,2 mg/L, máximo de 10,9 mg/L e média de 6,8 mg/L).

Para sódio e potássio (Tabela 4), as concentrações nos trabalhos da CPRM (2020) e Soares et al. (2022) foram em média de 2,23 mg/L e 16,40 mg/L para Na^+ e 0,90 mg/L e 3,0 mg/L para K^+ . As concentrações, neste trabalho, variaram entre máximo e mínimo de 27,00 mg/L e 1,10 mg/L para Na^+ e 6,60 mg/L e 1,60 mg/L para K^+ (Tabela 4). As menores concentrações de K^+ foram registradas em 23/02/2022 dia de maior vazão (Tabela 3).

Com relação a Mn, Cu e Fe as variações foram entre 0,0 mg/L, 0,0 mg/L e 0,05 mg/L mínima e máxima de 0,06 mg/L, 0,22 mg/L e 0,82 mg/L com média de 0,02 mg/L, 0,07 mg/L e 0,40 mg/L, respectivamente. O limite estabelecido pela (COPAM/CERH-MG, 2008) e pela (Resolução Conama 357, 2005) para rios de classe 2 é de 0,10 mg/L para Mn, 0,009 mg/L para Cu e de 0,3 mg/L para Fe. Para manganês nenhuma amostra está acima dos padrões permitidos pela legislação vigente, no entanto, para cobre e ferro oito (8) e

cinco (5) resultados estão acima dos valores de referência.

Segundo CPRM (2020) os cátions Mn (média = 0,031 mg/L), Cu (média = 0,004 mg/L) e Fe (média = 0,312 mg/L) tiveram violações aos valores das legislações estaduais e federais para rios de Classe 2, sendo três de manganês (máximo = 0,155 mg/L, três para cobre (máximo = 0,016 mg/L) e sete para ferro (máximo = 0,672 mg/L. No trabalho de Soares et al. (2022) os autores encontraram valores médios de 0,54 mg/L, 0,004 mg/L e 3,54 mg/L para Mn, Cu e Fe, respectivamente.

Com relação aos nutrientes SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} e P limite estabelecido pela (COPAM/CERH-MG, 2008) e pela (Resolução Conama 357, 2005) para rios de classe 2 é de 250 mg/L para SO_4^{2-} mg/L, 10,0 mg/L para NO_3^- e de 0,1 mg/L para P. Não existe limite estabelecido para PO_4^{3-} . Os resultados obtidos para nitrato (NO_3^-) e sulfato (SO_4^{2-}) sugerem que as águas do rio Paraopeba atendem a meta para o enquadramento Classe 2, porém, em termos de fósforo total (P), a maioria dos resultados apresenta valores maiores que a meta para a Classe 2 (máximo = 0,49 mg/L, mínimo = 0,07 e média = 0,19). No trabalho de Soares et al. (2022) foram encontrados valores máximos acima do permitido para NO_3^- (23,20 mg/L), SO_4^{2-} (364 mg/L) e P (5,94 mg/L).

Segundo Soares et al. (2022) a qualidade da água da bacia hidrográfica do rio Paraopeba é influenciada pelo lançamento de esgotos domésticos, efluentes industriais, atividades de mineração, áreas de agricultura e pastagens. Segundo os autores, apesar do rompimento da barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão ter alterado a qualidade das águas do rio Paraopeba, a maior variação nos parâmetros foi medida na região mais próxima ao local do rompimento (até 42 km) com diminuição gradativa ao longo do percurso do rio.

Tabela 4. Análises químicas das águas fluviais do rio Paraopeba.

Data	Na^+	K^+	Mn	Cu	Fe	SO_4^{2-}	NO_3^-	PO_4^{3-}	P
	(mg/L)								
01/02/2019	14,00	4,00	0,02	0,11	0,41	2,00	5,50	0,29	0,09
29/04/2019	13,00	3,00	0,03	0,08	0,64	4,00	2,50	0,72	0,23
06/08/2019	27,00	4,00	0,01	0,03	0,10	4,00	2,90	0,57	0,19
28/11/2019	12,20	3,10	0,06	0,22	0,82	10,00	2,00	0,38	0,12
26/05/2021	12,90	2,40	0,02	0,02	0,22	3,00	0,80	0,58	0,19
26/08/2021	18,60	3,10	0,02	0,00	0,05	6,00	1,40	0,33	0,11
25/11/2021	11,00	2,90	0,02	0,08	0,68	4,00	1,45	0,32	0,10
23/02/2022	5,70	1,60	0,02	0,06	0,30	1,00	2,80	0,22	0,07
26/05/2022	1,10	6,60	0,02	0,04	0,55	2,00	2,90	1,50	0,49
22/08/2022	14,10	2,20	0,00	0,01	0,19	0,00	4,20	0,84	0,27
Média	12,96	3,29	0,02	0,07	0,40	3,60	2,64	0,58	0,19
D.P.	6,90	1,38	0,02	0,06	0,27	2,84	1,40	0,38	0,12

DP = desvio padrão.

Os parâmetros de qualidade da água analisados no ponto de amostragem (Figura 1), localizado antes do Reservatório de Retiro Baixo e a aproximadamente 300 km do rompimento da Barragem B1, demonstram que para os parâmetros turbidez, oxigênio dissolvido, manganês, cobre, ferro e fósforo total em algumas amostras apresentam desconformidade com a legislação vigente. No entanto, todo o uso da terra da bacia do rio Paraopeba pode ter contribuído para esta

situação, sendo difícil afirmar qual a fonte pontual e/ou difusa relacionada.

Análise de dados

Os valores obtidos para o coeficiente de correlação de Pearson (r) da Tabela 5 apresentam valores positivos e/ou negativos. Isto significa que as variáveis possuem uma relação direta e/ou indireta.

Tabela 5. Análise de correlação de Pearson (r) ($P \leq 0,05$).

	Q	T°C	pH	Cond	Turb	STD	STS	OD	Na ⁺	K ⁺	Mn	Cu	Fe	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	P
Q	1,00	0,04	0,35	-0,62	0,98	-0,47	0,99	0,08	-0,47	-0,38	-0,02	0,01	-0,03	-0,33	0,02	-0,27	-0,27
T°C		1,00	-0,45	0,25	0,10	0,34	0,11	0,23	0,08	-0,20	0,43	0,68	0,45	0,26	0,31	-0,66	-0,68
pH			1,00	-0,62	0,21	-0,54	0,22	0,09	-0,38	0,39	-0,64	-0,57	-0,18	-0,75	0,20	0,55	0,56
Cond				1,00	-0,57	0,94	-0,57	0,34	0,80	0,04	0,23	0,11	-0,24	0,56	-0,10	-0,31	-0,30
Turb					1,00	-0,42	0,99	0,00	-0,45	-0,43	0,15	0,16	0,09	-0,16	-0,04	-0,33	-0,33
STD						1,00	-0,44	0,26	0,64	0,13	0,37	0,20	-0,11	0,63	-0,22	-0,35	-0,34
STS							1,00	0,10	-0,40	-0,50	0,05	0,09	0,00	-0,24	-0,01	-0,39	-0,39
OD								1,00	0,65	-0,43	-0,55	-0,42	-0,60	-0,37	0,27	-0,48	-0,47
Na ⁺									1,00	-0,21	-0,20	-0,17	-0,50	0,26	0,00	-0,39	-0,37
K ⁺										1,00	0,02	0,01	0,20	0,02	0,21	0,70	0,70
Mn											1,00	0,86	0,72	0,83	-0,31	-0,22	-0,22
Cu												1,00	0,80	0,63	0,09	-0,29	-0,30
Fe													1,00	0,41	-0,07	0,09	0,07
SO ₄ ²⁻														1,00	-0,49	-0,30	-0,30
NO ₃ ⁻															1,00	0,10	0,09
PO ₄ ³⁻																1,00	1,00
P																	1,00

Os testes estatísticos indicaram que há correlação entre vazão (Q) e turbidez ($r = 0,98$), vazão (Q) e sólidos totais suspensos ($r = 0,99$) e entre turbidez e sólidos totais suspensos ($r = 0,99$), demonstrando que a precipitação, vazão e deflúvio (Tabela 2) influenciam a erosão laminar e o transporte de sedimentos advindos da ocupação diversa e do conjunto das atividades econômicas ao longo da bacia.

Correlações entre sólidos totais dissolvidos e sódio ($r = 0,64$), potássio e fósforo ($r = 0,70$) podem ter, como causa provável, o aporte por poeiras de solos derivados de minerais silicatados como augita sódica e albita, além de fertilizantes agrícolas contendo fósforo e potássio.

Além disso, correlações entre manganês e cobre ($r = 0,86$), manganês e ferro ($r = 0,72$), cobre e ferro ($r = 0,80$) e manganês e sulfato ($r = 0,83$) foram observadas. Importante destacar que essas correlações não estão relacionadas com o aumento da vazão, o que podem indicar, muito provavelmente, erosão laminar dos Latossolos,

Cambissolos e Argissolos e/ou uso da terra na bacia do rio Paraopeba.

A partir da comparação entre os modelos de regressão potencial e de diluição teórica, foi realizada a análise de proveniência dos principais elementos químicos dissolvidos analisados neste estudo, distinguindo os de origem pontual (efluentes domésticos, industriais, rompimento da barragem B1, etc.) daqueles de origem difusa (alteração de rochas e solos, resíduos agrícolas, aportes atmosféricos, etc.) conforme a Figura 4. Para os elementos manganês (Mn), cobre (Cu) e sulfato (SO₄²⁻) não foi possível realizar a regressão potencial e a diluição teórica, pois, foram detectadas amostras com concentrações iguais a zero (0,0 mg/L).

No diagrama de vazão e concentração da Figura 4 para o elemento **sódio (Na⁺)**, a aproximação das curvas de regressão potencial e de diluição teórica, indicam uma possível fonte pontual de elevada concentração que se dilui ao se misturar com as águas do rio Paraopeba, seguindo

a vazão e deflúvio do rio (Tabela 2) ao longo do período de amostragem.

Para os demais elementos químicos dissolvidos (STD, K^+ , Fe, NO_3^- e SO_4^{2-}), analisados pela relação da concentração em relação a vazão com as curvas de diluição (Figura 4), os resultados apontam possíveis aportes difusos, identificados no

diagrama pelo distanciamento entre as curvas de regressão potencial e de diluição teórica. Provavelmente estes elementos são lixiviados em toda a extensão da bacia, na qual o processo de diluição é pouco significativo, mesmo considerando os altos valores de vazão e deflúvio da Tabela 2.

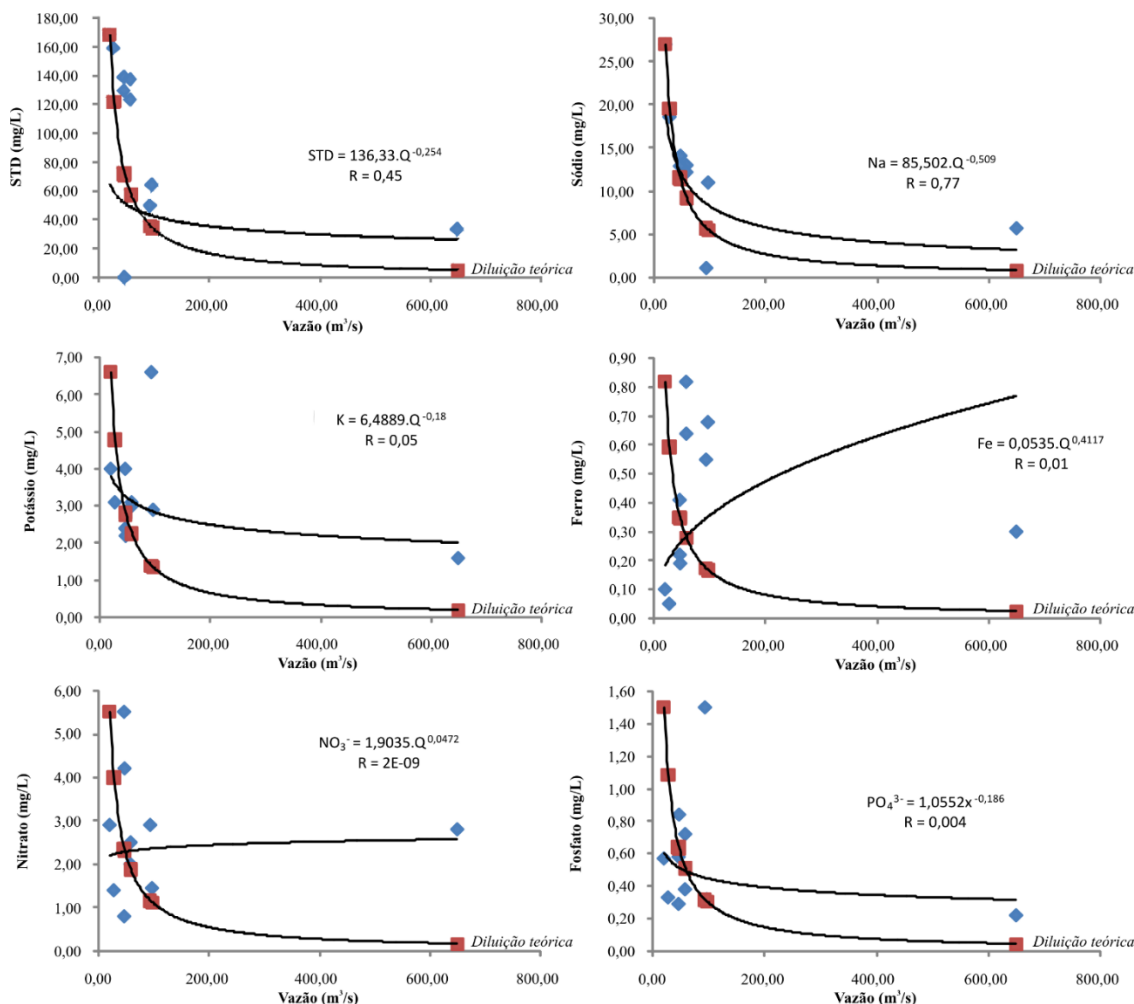


Figura 4. Relação da concentração de elementos químicos dissolvidos em relação a vazão com as curvas de diluição no ponto de amostragem da bacia hidrográfica do rio Paraopeba.

Transporte fluvial

O fluxo instantâneo diário pode ser avaliado a partir da concentração de sólidos totais (STD + STS) e da vazão no dia de amostragem na bacia do rio Paraopeba, a montante do reservatório de Retiro Baixo. Este parâmetro é uma função de deflúvio (Tabela 2) com a maioria da carga de sólidos totais sendo transportados durante os meses mais chuvosos (Tabela 1) de saldos positivos e vazão mais elevada (Figura 5).

Segundo Justino & Sardinha (2019), Libânio & Sardinha (2020) e Sardinha et al. (2022) a concentração de sólidos nos ecossistemas aquáticos pode estar relacionada à litologia,

geomorfologia, precipitação, pedologia, uso da terra, interferências antrópicas e fortes chuvas. Soma-se a isso o rompimento da barragem B1 em Brumadinho que liberou um volume aproximado de resíduos de cerca de 1,6 Mm³ no rio Paraopeba, resultando em um impacto direto na composição e dinâmica sedimentar do canal, conforme estudos de Laureano et al. (2022). Conforme Soares et al. (2022) a maior variação nos parâmetros foi medida na região mais próxima ao local do rompimento (até 42 km) com diminuição gradativa ao longo do percurso do rio. Os dados observados neste estudo são muito importantes ao se considerar a avaliação de impactos, tendo em vista que o ponto de

amostragem está localizado a aproximadamente 300 km a jusante.

Utilizando a média ponderada da concentração de sólidos totais (STD + STS = 362,93 mg/L), a vazão média neste mesmo local de amostragem (113,99 m³/s) e a área da bacia até o ponto de amostragem (10.200,20 km²), é possível

calcular a média da quantidade de sólidos totais (ST) removidos anualmente, o que corresponde a 127,91 t/km²/ano, com 20,84 t/km²/ano de sólidos totais dissolvidos (STD) e 107,07 t/km²/ano de sólidos totais suspensos (STS), conforme a Tabela 6.

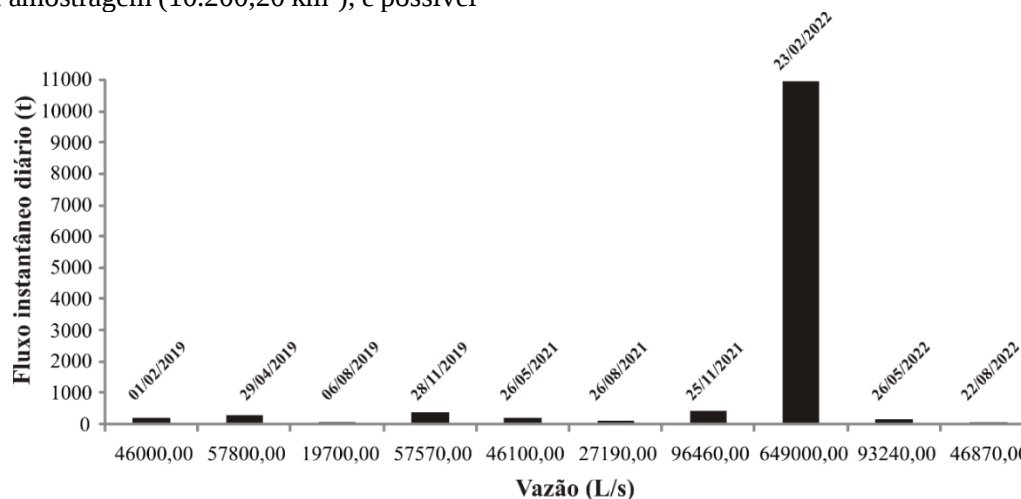


Figura 5. Fluxo instantâneo diário pela vazão nas águas superficiais da bacia do rio Paraopeba.

Os resultados das médias ponderadas pela vazão (Tabela 6), indicam que sólidos totais em suspensão são as maiores concentrações analisadas (303,80 mg/L), seguida por sólidos totais dissolvidos (59,13 mg/L), sódio (8,12 mg/L),

nitrito (2,69 mg/L), potássio (2,50 mg/L), sulfato (2,19 mg/L), fosfato (0,42 mg/L), ferro (0,38 mg/L), fósforo total (0,14 mg/L), cobre (0,07 mg/L) e manganês (0,02 mg/L).

Tabela 6. Média ponderada (C_{MP}), transporte fluvial ($T_{fluvial}$) e específico ($T_{específico}$) do rio Paraopeba.

	Na ⁺	K ⁺	Mn	Cu	Fe	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	P	STD	STS
C _{MP}	(mg/L)										
	8,12	2,50	0,02	0,07	0,38	2,19	2,69	0,42	0,14	59,13	303,80
T _{fluvial}	(t/ano)										
	29183,00	8975,86	77,41	235,63	1378,16	7885,45	9678,50	1503,16	490,33	212553,84	1092142,09
T _{específico}	(t/km ² /ano)										
	2,86	0,88	0,01	0,02	0,14	0,77	0,95	0,15	0,05	20,84	107,07

Os resultados da Tabela 6 e da Figura 6 apresentam os valores de transporte fluvial para os principais nutrientes e metais analisados neste estudo e que são anualmente carregados e transportados ao Reservatório da Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo pelo rio Paraopeba. O transporte fluvial de nutrientes é de aproximadamente 29,18x10³ t de Na⁺, 8,97x10³ t de K⁺, 7,88x10³ t de SO₄²⁻, 9,67x10³ t de NO₃⁻, 1,50x10³ t de PO₄³⁻ e 0,49x10³ t de P (Figura 6a). Já o transporte dos metais é de 77,44 t de manganês, 0,23 x10³ t de cobre e de 1,37 x10³ t de ferro (Figura 6b).

Conforme estudos de Libânio & Sardinha (2020), Reis & Sardinha (2021), Sardinha et al.

(2022), Laureano et al. (2022) e Soares et al. (2022) o uso da terra na bacia pode ser um dos principais fatores que influenciam no transporte de sedimentos, e consequentemente no assoreamento, que é um dos principais problemas que afetam os reservatórios implicando na diminuição do volume de água utilizável, e reduzindo a quantidade de energia gerada.

Os valores dos principais nutrientes Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ e P, devem ser considerados como fatores desencadeadores do processo de eutrofização, provocando o crescimento dos organismos aquáticos autotróficos, podendo provocar dificuldade na navegação de barcos e consumo de grande quantidade de oxigênio. Já os

principais metais (Mn, Cu e Fe) podem ser transportados pelas águas, concentrando-se nos

sedimentos de fundo tornando-se possíveis fontes de poluição.

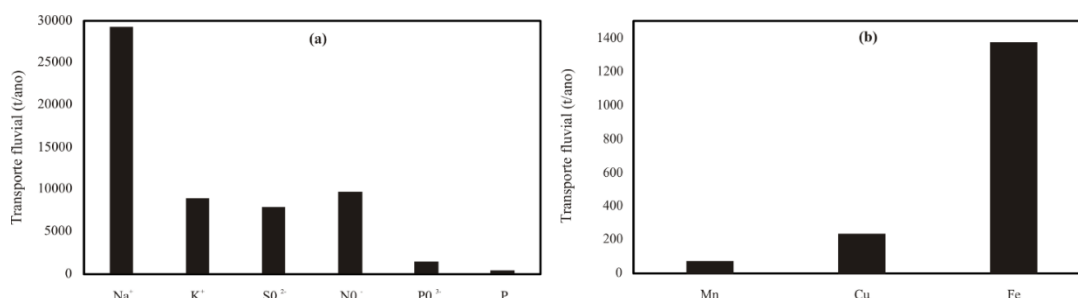


Figura 6. Transporte fluvial para os principais nutrientes (a) e metais (b) analisados no rio Paraopeba.

A Tabela 7 também apresenta os dados relativos a transporte específico dos principais elementos analisados neste estudo e em bacias de outras regiões com diferentes usos da terra. São poucos os estudos relacionados a transporte específico (t/km²/ano) em bacias de drenagem, principalmente sobre a influência de mineração ou a montante de reservatórios.

A bacia do rio Paraopeba apresenta os maiores valores para STS (107,07 t/km²/ano) em comparação com as outras bacias da Tabela 7. No entanto, os valores são próximos aos encontrados por Durães et al. (2016) utilizando um ponto amostral no rio Paraopeba que abrange uma área de

8658,8 km², erosão hídrica média de 270 t/km²/ano e transporte de sedimentos com variação de 104 a 259 t/km²/ano.

Em relação à Na⁺ (6,15 t/km²/ano) e STD (60,97 t/km²/ano) a bacia do rio Sorocaba possui os maiores valores de transporte específico (Tabela 7). Segundo Fernandes et al. (2020) a bacia drena áreas formadas por rochas metamórficas pertencentes ao Grupo São Roque e Complexo Embu (com rochas graníticas associadas), rochas sedimentares pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná (Paleozoico-Mesozoico), além de áreas mineração, agrícolas e urbanas que podem afetar a sua qualidade.

Tabela 7. Transporte específico do rio Paraopeba e demais bacias hidrográficas de outras regiões do Brasil.

Bacia	Área (km ²)	Na ⁺	K ⁺	Mn	Cu	Fe	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	P	STD	STS
(t/km ² /ano)												
Este estudo	10.200,20	2,86	0,88	0,01	0,02	0,14	0,77	0,95	0,15	0,05	20,84	107,07
^a Sorocaba	3.492,00	6,15	1,34	--	--	--	2,97	1,54	0,06	0,02	60,97	45,59
^b Alto Pardo	1.627,05	--	--	--	--	--	3,46	1,84	0,30	0,09	14,77	25,75
^c Muzambo	1.322,00	--	--	--	--	--	0,14	0,64	0,05	0,02	11,12	12,90
^d Amoras	18,00	3,50	1,70	--	--	--	0,60	0,70	0,10	0,03	39,30	7,00
^e Chapadão	16,30	--	--	--	--	--	1,87	0,59	0,56	0,18	3,76	2,49
^f Ariranha	6,30	3,33	1,60	--	--	0,99	0,44	0,38	0,22	0,07	25,30	--

^aFernandes et al. (2020); ^bReis & Sardinha (2021); ^cLibânio & Sardinha (2020); ^dConceição et al. (2024); ^eSardinha et al. (2022); ^fMello et al. (2022).

Quanto a SO₄²⁻ (3,46 t/km²/ano) e NO₃⁻ (1,84 t/km²/ano) a bacia do Alto Rio Pardo, que segundo Reis & Sardinha (2021) drena monzonitos, ortognaisses, granitos, sienitos e fonólitos, rochas que não possuem minerais com esses elementos em sua composição, atribuem os valores de transporte específico aos aportes atmosféricos, resíduos agrícolas, esgotos domésticos ou efluentes industriais.

Em relação a K⁺ (1,70 t/km²/ano), PO₄²⁻ e P (0,56 t/km²/ano e 0,18 t/km²/ano) e Fe (0,99 t/km²/ano) os maiores valores de transporte específico foram encontrados nas bacias dos Córregos Amoras, Chapadão e Ariranha, ambos

localizados na Caldeira Vulcânica de Poços de Caldas. Nesta região, segundo Mello et al. (2022) K⁺ pode ser resultado da hidrólise do ortoclásio, sanidina e nefelina, por outro lado, o excesso de Fe pode estar associado a emissões atmosféricas da cadeia produtiva do alumínio, a qual libera para atmosfera quantidades significativas de material particulado (MP) e compostos fluoretados. E segundo Sardinha et al. (2022) as concentrações de PO₄²⁻ e P podem estar relacionadas ao aporte por poeiras de solos agrícolas e fertilizantes fosfatados.

As águas superficiais da bacia do rio Paraopeba são utilizadas principalmente para geração de energia elétrica, abastecimento público

e industrial, com destaque para mineração e irrigação. A bacia também recebe efluentes de atividades relacionadas a mineração, siderurgia, indústria e agropecuária que influenciam ao uso terra (exploração agrícola, pastagens, ocupação urbana, cerrado e mata nativa, silvicultura e solo exposto). Neste sentido, todas as características de uso e cobertura da terra, além do uso dos recursos hídricos, podem influenciar nas variações dos parâmetros analisados neste estudo.

Conclusões

O balanço hídrico da bacia do rio Paraopeba apresentou déficits no período seco e superávit na estação chuvosa. A produção média de água no período das chuvas e durante o período de estudo foi de 1092,37 mm, o que representa cerca de 99,87 % do balanço hídrico da bacia, demonstrando que há predomínio do escoamento superficial na alimentação das águas fluviais, sendo um valor representativo do ponto de vista da recarga de aquíferos regionais.

Os parâmetros de qualidade da água analisados no ponto de amostragem, demonstram que para turbidez, oxigênio dissolvido, manganês, cobre, ferro e fósforo total algumas amostras apresentam desconformidade com a legislação vigente. Estas características também influenciam no transporte fluvial de nutrientes e metais $29,18 \times 10^3$ t de sódio (Na^+), $8,97 \times 10^3$ t de potássio (K^+), $7,88 \times 10^3$ t de sulfato (SO_4^{2-}), $9,67 \times 10^3$ t de nitrato (NO_3^-), $1,50 \times 10^3$ t de fosfato (PO_4^{3-}), $0,49 \times 10^3$ t de fósforo total (P), 77,44 t de manganês total (Mn), $0,23 \times 10^3$ t de cobre total (Cu) e de $1,37 \times 10^3$ t de ferro total (Fe) que são anualmente carregados e transportados ao Reservatório da Usina Hidrelétrica de Retiro Baixo pelo rio Paraopeba.

A bacia do rio Paraopeba apresenta um complexo quadro geológico com rochas máficas, ultramáficas, gnáissicas, graníticas, quartzitos, filitos, dolomitos, itabiritos e coberturas sedimentares que refletem nos principais tipos de Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Cambissolos e Argissolos. Soma-se a isso, os altos índices pluviométricos com vazões e deflúvios entre os meses de outubro e março além da diversidade de uso da terra (urbanização, atividades industriais, agrícolas, pastagens efluentes, dentre outros) que, juntamente com as atividades de mineração podem contribuir para a qualidade das águas fluviais e para o transporte fluvial. Por fim, os dados observados neste estudo são muito importantes ao se considerar a avaliação de impactos, tendo em vista que o ponto de

amostragem está localizado a aproximadamente 300 km a jusante do rompimento da barragem B1.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Diretoria de restituição da Vale S/A, Processo CTE.PSQ.0057 pelo financiamento do projeto e a Pró Reitoria de Pesquisa e Pós Graduação (PRPPG) da Universidade Federal de Alfenas (Unifal) em especial a Prof^a. Vanessa Bergamin Boralli Marques pelo apoio logístico. Os autores também agradecem os revisores anônimos da Revista Brasileira de Geografia Física (RBGF) pelas críticas construtivas.

Referências

- Analyser. (2010). Analyser Comércio e Indústria Ltda. Manual de Instruções 910MS. Fotômetro de Chama Digital Microprocessado..
- APHA. (2012). American Public Health Association. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22^{ed.}, Washington, American Public Health Association Pub.
- Armstrong, M., Petter, R. & Petter, C. (2019) Why have so many tailings dams failed in recent years?. *Resources Policy*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412>
- Cardoso, A.B., Mainardi Fan, F., Franzen, M., Simão, G. & Troian, G.C. (2022). Surface water resources of Santa Catarina state's southern region – geochemical background of the coal mining territory. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 27, n. 41. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220084>
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (2024). CBHSF - CBH do Rio Paraopeba (SF3) – Minas Gerais. <http://cbhsaofrancisco.org.br/2017/comites-de-afluentes/cbh-do-rio-paraopeba-minas-gerais>.
- Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. (2020). Cobrape. Plano Diretor da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba / Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos.
- Conceição, F.T.D., Mello, R.C.A.D., Fernandes, A.M. & Sardinha, D.D.S. (2024). Chemical and Physical Denudation Rates in the Poços de Caldas Alkaline Massif, Minas Gerais State, Brazil. *Minerals* 14, 700. <https://doi.org/10.3390/min14070700>

- Conselho Estadual de Política Ambiental/Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais de 05 de maio de 2008. (2008, 5 de maio). Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG No. 1. Diário Oficial Minas Gerais
- Serviço Geológico do Brasil (2020). Monitoramento especial da bacia do Rio Paraopeba Relatório 05: monitoramento hidrológico, sedimentométrico e geoquímico.
- Durães, M.F., Mello, C.G. & Beskow, S. (2016). Sediment yield in Paraopeba River Basin – MG, Brazil. *International Journal of River Basin Management*, 1-14. <http://dx.doi.org/10.1080/15715124.2016.1159571>
- Fernandes, A.M., Conceição, F.T. & Mortatti, J. (2020). Hydrochemistry applied to assess the chemical weathering and soil removal rates in the Sorocaba River basin, São Paulo State. *Brazilian Journal of Geology*, 50(1): e20190030. <http://doi.org/10.1590/2317-4889202020190030>
- Filho, C.R.M., do Valle Junior, R.F., de Melo Silva, M.M.A.P., Mendes, R.G., de Souza Rolim, G., Pissarra, T.C.T., de Melo, M.C., Valera, C.A., Pacheco, F.A.L. & Fernandes, L.F.S. (2023). The Accuracy of Land Use and Cover Mapping across Time in Environmental Disaster Zones: The Case of the B1 Tailings Dam Rupture in Brumadinho, Brazil. *Sustainability*, 15, 6949. <https://doi.org/10.3390/su15086949>
- Hach. (2013). DR/890 Colorimeter Procedures Manual. Hach Company, Loveland, Colorado, EUA.
- Horiba. (2009). Multi Water Quality Checker U-50 Series Instruction Manual. Kyoto 601-8510 Japan.
- Justino, F.A. & Sardinha, D.S. (2019). Análise geoambiental aplicada à bacia hidrográfica do Ribeirão de Poços, Poços de Caldas (MG). *Estudos Geográficos*, 17(1), 68-90.
- Kobayashi, H., Garnier, J., Mulholland, D.S., Quantin, C., Haurine, F., Tonha, M., Joko, C., Olivetti, D., Freydier, R., Seyler, P., Martinez, J.M. & Roig, H.L. (2023). Exploring a new approach for assessing the fate and behavior of the tailings released by the Brumadinho dam collapse (Minas Gerais, Brazil). *Journal of Hazardous Materials*, 448, 130828. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130828>
- Laureano, F.V., Kwitko-Ribeiro, R., Guimarães, L. & Leão, L.P. (2022). Mineralogical Fingerprint of Iron Ore Tailings in Paraopeba River Bedload Sediments after the B1 Dam Failure in Brumadinho, MG (Brazil). *Minerals*, 12, 716. <https://doi.org/10.3390/min12060716>
- Libânio, C.R. & Sardinha, D.S. 2020. Transporte anual de sedimentos e nutrientes do Rio Muzambo, tributário do Reservatório de Furnas (MG). *RMRH - Revista Mineira de Recursos Hídricos*, 1, 1-20. <https://doi.org/10.59824/rmrh.v1i1.184>
- López-Ramírez, C. & Cuevas-Cardona, C. (2022). Los Desechos Mineros y el Río de Pachuca Mining Waste and the Pachuca River. *HALAC – Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña*. v. 12, n. 3 193-213. <https://doi.org/10.32991/2237-2717.2022v12i3.p193-213>
- Malov, A.I., Sidkina, E.S., Mironenko, M.V., Tyshov, A.S. & Cherkasova, E.V. (2022). Modeling Changes in the Composition of River Water with Discharged Wastewater: A Case Study in NW Russia. *Water*, v. 14, n. 165. <https://doi.org/10.3390/w14020165>
- Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. (2021) <https://mapbiomas.org/en>. Acesso em 10/03/2023.
- Mello, R.C.A., Conceição, F.T., Fernandes, A.M. & Sardinha, D.S. (2022). *Revista Brasileira de Geomorfologia*. v. 23, n.3. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i3.2133>
- Pacheco, F.A.L., Valle Junior, R.F., Melo Silva, M.M.A.P., Pissarra, T.C.T., Melo, M.C., Valera, C.A. & Fernandes, L.S.F. (2022). Prognosis of metal concentrations in sediments and water of Paraopeba River following the collapse of B1 tailings dam in Brumadinho (Minas Gerais, Brazil), *Science of The Total Environment*, v. 809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151157>
- Ramírez-Javier, J.C., Ramírez-Guzmán, A.H., Hernández-Flores, G., Hernández Hernández, M.A., Talavera-Mendoza, O., Salgado Souto, S.A. & Cortés-Silva, A. (2023). Heavy Metal Dispersion in a Hydrological Sub-Basin as Consequence of Mining Activity in Taxco, Guerrero (Southern Mexico). *Water*, 15, 1950. <https://doi.org/10.3390/w15101950>
- Reis, R.I. & Sardinha, D.S. (2021). Transporte fluvial de sedimentos e nutrientes a montante do Reservatório da Hidrelétrica Caconde, bacia do Alto Rio Pardo (MG). *Revista Brasileira de Geografia Física* v.14, n.05, 2646-2663. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p2646-2663>

- Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005. (2005, 17 de março). 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.
https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcdaltrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf
- Santana, C.S., Olivares, D.M.M., Silva, V.H.C., Luzardo, F.H.M., Velasco, F.G. & De Jesus, R.M. (2020). Assessment of water resources pollution associated with mining activity in a semi-arid region. *Journal of Environmental Management*, v. 273. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111148>
- Sardinha, D.S., Silva, L.B., Ferreira, A.M. & Menezes, P.H.B.J. (2022). Deposição atmosférica e transporte específico de sedimentos suspensos em bacias hidrográficas sob influência de mineração no Planalto de Poços de Caldas (MG). *Revista Brasileira de Geografia Física* v.15 n. 04 1826-1845. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.4.p1843-1862>
- Silva, L.S.C., Picanço, J.L., Pereira, C.C., Silva, D. & Almeida, T.N. (2024). Dispersion of tailings in the Paraopeba River system after Brumadinho dam failure: Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 83, 128. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11428-1>
- Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos. (2023). Portal HidroWeb. <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>.
- Soares, A.L.C., Oliveira, S.C. & Gomes, L.N.L. (2022). Influência das atividades antrópicas e do rompimento da Barragem I, da mina Córrego do Feijão, na qualidade da água da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba. *Revista Mineira de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, v.3, e022004. <https://doi.org/10.59824/rmrh.v3i.225>
- TEC3 Geotecnia e Recursos Hídricos (2019). Estudo conceitual mina Córrego do Feijão plano de contingência relatório técnico: T19022-002-RE. Rev. 8.
- Thiessen, A.H. (1911). Precipitation Averages for Large Areas. *Monthly Weather Review*, 39, 1082-1089. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1911\)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1911)39<1082b:PAFLA>2.0.CO;2)