

ANÁLISE GEOQUÍMICA DE SEDIMENTOS FLUVIAIS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTO ANTÔNIO – MG

Geochemical analysis of fluvial sediments in the Santo Antônio River Basin, Minas Gerais, Brazil

Ana Paula Gouveia Jácome¹

Marcos Geraldo Barbosa Pimenta²

Hubert Mathias Peter Roeser³

Aníbal da Fonseca Santiago⁴

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio, situada em Minas Gerais, abrange 29 municípios e abriga cerca de 182 mil habitantes, o que representa 6% da população da porção mineira da Bacia do Rio Doce. Nas últimas décadas, o crescimento populacional e a intensificação das atividades de mineração têm gerado uma série de desafios ambientais, pressionando os ecossistemas locais. Este estudo teve como objetivo realizar um diagnóstico ambiental por meio de análises granulométricas, mineralógicas e geoquímicas dos sedimentos fluviais, a fim de compreender a influência das atividades antrópicas e das formações geológicas nos parâmetros ambientais. Durante uma campanha de campo, foram coletadas 16 amostras de sedimentos em diferentes pontos da bacia. Essas amostras foram submetidas a análise de Difração de Raios X (DRX) e Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Os dados foram comparados à Resolução CONAMA nº 454/2012 e realizou-se também uma análise estatística para identificar os valores de elementos anômalos. Os resultados indicaram que a maior parte dos elementos químicos presentes nos sedimentos tem origem geogênica. No entanto, foram identificadas contaminações por arsênio, cádmio e fósforo, especialmente nas

¹ Graduado em Engenharia Geológica na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Técnico em Edificações pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Mestre em Engenharia Ambiental da UFOP. Auxiliar de biblioteca na UFOP – e-mail: ana.pgj@aluno.ufop.edu.br

² Mestre em Geologia Econômica e Aplicada pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Graduado em Engenharia Geológica pela UFOP. Técnico em Mineração pelo Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG) – e-mail: marcospimenta1993@gmail.com

³ Doutor em Ciências Naturais pela Technische Universität Clausthal Zellerfeld (TU Clausthal). Especialista em Geoquímica Analítica pelo Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques (CRPG CRNS). Graduado em Mineralogia pela Johannes Gutenberg Universität Mainz (JGU). Professor da UFOP – e-mail: hubert-deamb@ufop.edu.br

⁴ Graduado em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Mestre em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Doutor em Engenharia Civil pela UFV. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da UFOP – e-mail: anibal@ufop.edu.br

confluências com o Rio Doce (P01 e P03) e em zonas urbanas (P07, P13, P14 e P16). Essas contaminações ressaltam a importância de um monitoramento mais rigoroso por parte das autoridades ambientais, a fim de mitigar os riscos aos ecossistemas aquáticos e à saúde pública.

Palavras-chave: Bacia do rio Santo Antônio; Sedimentos; Geoquímica ambiental.

ABSTRACT

The Santo Antônio River Basin, located in Minas Gerais, spans 29 municipalities and is home to approximately 182,000 residents, representing 6% of inhabitants in Minas Gerais portion of the Doce River Basin. In recent decades, population growth and intensified mining activities have posed significant environmental challenges, putting pressure on local ecosystems. This study aimed to conduct an environmental assessment through granulometric, mineralogical, and geochemical analyses of fluvial sediments to understand the influence of anthropogenic activities and geological formations on environmental parameters. During a field campaign, 16 sediment samples were collected from various points within the watershed. These samples underwent analysis using X-ray diffraction (XRD) and Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (ICP-OES). The results were compared to the standards established by CONAMA Resolution No. 454/2012, and statistical analysis was conducted to identify anomalous element values. The findings indicated that most chemical elements in the sediments are of geogenic origin. However, contaminants like arsenic, cadmium, and phosphorus were detected, particularly at confluences with the Doce River (P01 and P03) and in urban areas (P07, P13, P14, and P16). These contaminations underscore the need for stricter monitoring by environmental authorities to mitigate risks to aquatic ecosystems and public health.

Keywords: Santo Antônio River Basin; Sediments; Environmental Geochemistry.

Data de submissão: 13/09/2024

Data de aprovação: 23/12/2024

1 INTRODUÇÃO

Os sedimentos fluviais desempenham um papel crucial na caracterização geoquímica e ambiental de bacias hidrográficas. Como destacado por Förstner (2004), eles são representativos dos afloramentos rochosos a montante do ponto de amostragem, refletindo tanto a natureza das rochas erodidas quanto os processos geológicos da região. A análise de sedimentos oferece, portanto, uma visão detalhada da composição geoquímica de uma bacia. Além disso, a análise da fração fina dos sedimentos permite identificar a distribuição espacial de elementos tóxicos, tornando o mapeamento geoquímico uma técnica eficaz para avaliar os impactos ambientais (Spadoni, 2004).

A importância dos sedimentos fluviais também reside em sua capacidade de armazenar e liberar substâncias nocivas, como metais pesados e compostos orgânicos, que podem se acumular e representar riscos significativos à saúde humana e ambiental (Förstner, 1989). Essas substâncias podem ser reintroduzidas no ambiente, afetando a coluna d'água, a atmosfera e a biota, o que destaca o papel dinâmico dos sedimentos como reguladores de poluentes. Além de monitorar a qualidade ambiental atual, os sedimentos fornecem um registro histórico das mudanças ambientais, permitindo rastrear fontes de poluição e a evolução dos ecossistemas ao longo do tempo (Carvalho, 1994).

A análise granulométrica desempenha um papel crucial no estudo da geoquímica dos sedimentos de corrente, pois a granulometria e os locais de coleta são fatores determinantes para a obtenção de resultados significativos (Leão, 2019). A distribuição dos elementos nos sedimentos está diretamente relacionada ao tamanho das partículas, já que as concentrações de metais variam conforme a granulometria. Sedimentos com frações mais finas tendem a apresentar maior afinidade com os metais devido à sua maior área superficial, o que facilita a adsorção desses elementos (Herut; Sandler, 2006).

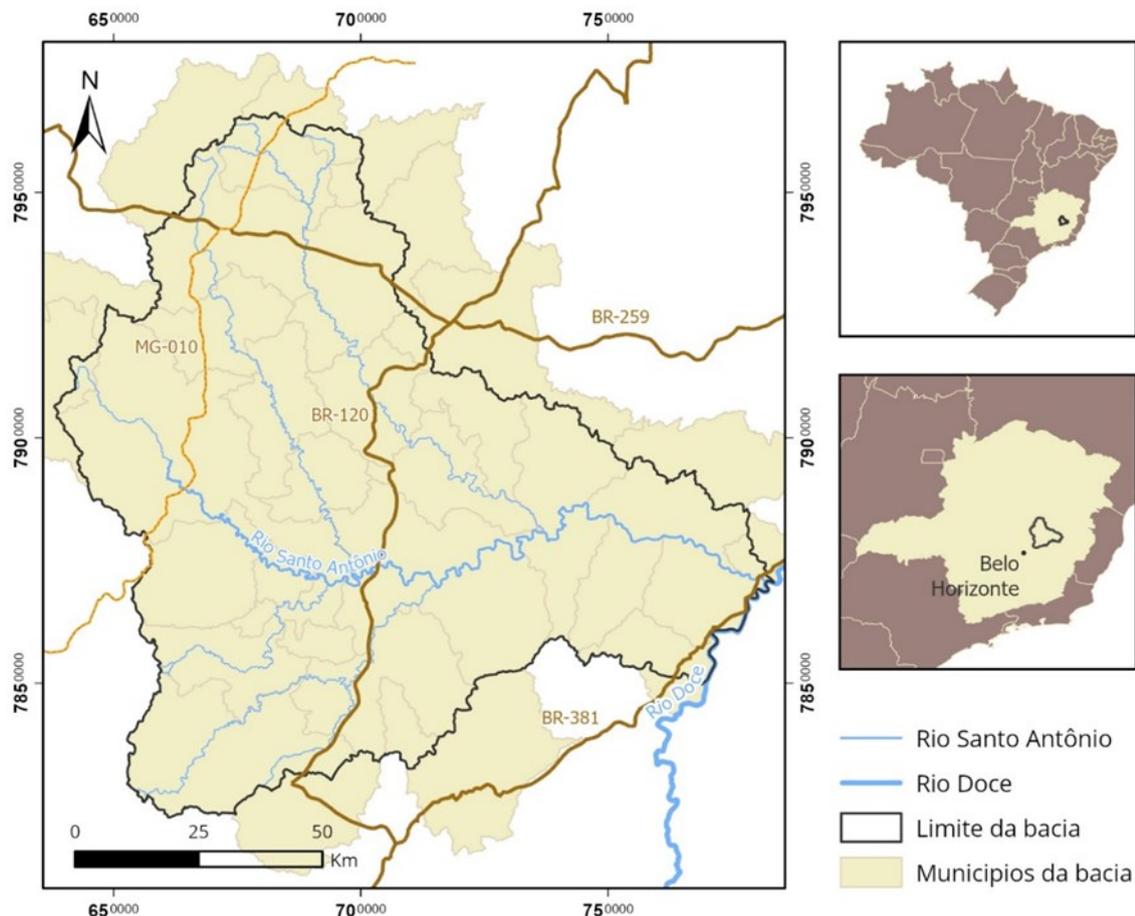
Em bacias hidrográficas que estão sob intensa pressão de atividades socioeconômicas, como mineração, agricultura e urbanização, o estudo dos sedimentos torna-se ainda mais essencial. Nessas condições, o levantamento geoquímico dos sedimentos emerge como uma ferramenta indispensável para a caracterização ambiental e para o desenvolvimento de estratégias de manejo e conservação dos recursos hídricos e dos ecossistemas.

A Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio, conforme Igam (2020), situada em Minas Gerais, abrange uma área de aproximadamente 10.429,46 km² e inclui total ou parcialmente 29 municípios, conforme Mapa 1, que juntos somam cerca de 182 mil habitantes (PARH Santo Antônio, 2010). Integrando a macrobacia do Rio Doce, representa cerca de 15% de sua extensão total e cerca de 6% da população residente na porção mineira da macrobacia. A região enfrenta desafios significativos provenientes de atividades socioeconômicas, incluindo mineração, pecuária, agricultura e o despejo de esgoto, tanto industrial quanto doméstico, o que impacta negativamente a qualidade da água e o meio ambiente local (PARH Santo Antônio, 2010).

Diante desse contexto, o estudo dos sedimentos de fundo na Bacia do Rio Santo Antônio é fundamental para avaliar e quantificar a contaminação resultante de atividades humanas e de anomalias geológicas. O objetivo deste trabalho é conduzir um diagnóstico ambiental detalhado através de análises granulométricas, mineralógicas e geoquímicas dos sedimentos, com a finalidade de comparar os resultados obtidos com os valores de referência

estabelecidos pela legislação vigente e pela literatura especializada. A escassez de estudos ambientais, especialmente os de natureza geoquímica, nesta bacia evidencia a importância desta pesquisa, que visa preencher essa lacuna, gerar dados relevantes para investigações futuras e contribuir efetivamente para o planejamento e a gestão ambiental da região.

Mapa 1 – Mapa de localização da bacia do Rio Santo Antônio



Fonte: Elaborado pela autora (2023) com base em dados do IBGE (2021) e CPRM / Codemig (2014)

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este estudo integra-se a uma série de investigações geoquímicas conduzidas por docentes e discentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PROAMB) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) na macrobacia do Rio Doce. Ao longo dos anos, diversos trabalhos acadêmicos – incluindo teses, dissertações e projetos de conclusão de curso – têm sido realizados com o intuito de diferenciar as contribuições geoquímicas provenientes de processos naturais advindas de atividades humanas (Parra *et al.*, 2007; Roeser *et al.*, 2011; Gontijo *et al.*, 2014; Nascimento, 2016; Fernandes, 2017; Reis, 2019). O presente estudo,

especificamente voltado para a bacia hidrográfica do rio Santo Antônio, sendo os primeiros levantamentos na região conduzidos por Gaspar (2021); Pimenta (2021) e Jácome (2023), marca um avanço nesse esforço.

A bacia do Rio Santo Antônio ainda carece de estudos aprofundados que estabeleçam um *background* geoquímico robusto. Essa carência representa um obstáculo para a correta interpretação dos dados geoquímicos locais, uma vez que, sem valores de referência adequados, torna-se difícil distinguir com precisão a influência de fontes naturais de contaminação daquelas de origem antropogênica. Diante dessa limitação, optou-se por utilizar a Resolução CONAMA nº 454/2012, conforme Tabela 1, como base de comparação para os resultados obtidos. No entanto, é importante destacar que essa legislação, embora amplamente adotada, apresenta certas deficiências, pois seus valores de referência são baseados em padrões internacionais que não refletem com exatidão as particularidades geológicas e ambientais dos rios brasileiros.

Tabela 1 – Valores de referência estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 454/2012 em mg/kg

(mg/kg)	As	Cd	Pb	Cu	Cr	Hg	Ni	Zn
Nível 1	5,9	0,6	35	35,7	37,3	0,17	18	123
Nível 2	17	3,5	91,3	197	90	0,49	35,9	315

Fonte: CONAMA (2012)

Os estudos realizados na bacia do Rio Santo Antônio até a presente data concentram-se, em sua maioria, em dois temas principais: a geologia local e a ictiofauna. No campo geológico, segundo Grossi-Sad *et al.* (1989, 1997), Guimarães (1992) e Fernandes *et al.* (1994), as pesquisas têm abordado a caracterização das litologias e estruturas associadas à gênese do Supergrupo Espinhaço, Grupo Macaúbas e Orógeno Araçuai proporcionando dados importantes sobre a composição química das rochas da área. Em relação à ictiofauna, os principais estudos foram conduzidos por Vieira (2006), que analisou a riqueza, distribuição e aspectos biológicos dos peixes na bacia, destacando a importância do Rio Santo Antônio, que abriga cerca de 90% das espécies presentes em toda a bacia do Rio Doce, tornando-o uma área prioritária para a conservação. Esses estudos têm contribuído para o conhecimento da biodiversidade e da geologia regional, embora outros aspectos ambientais da bacia permaneçam subexplorados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização da região

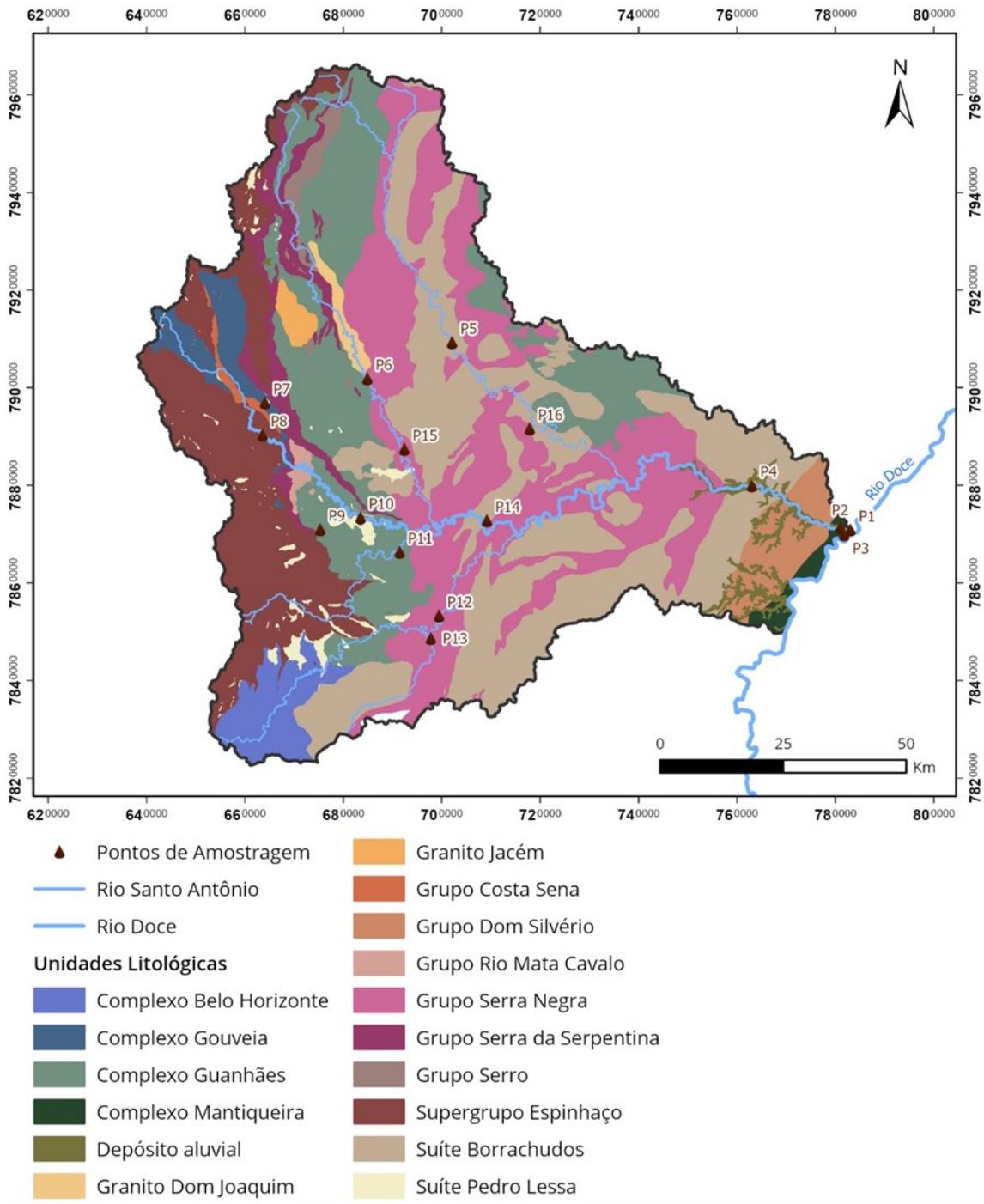
O Rio Santo Antônio, principal curso d'água da bacia, nasce na Serra do Espinhaço, no município de Conceição do Mato Dentro e percorre por volta de 280 km até desaguar no rio Doce, no município de Naque, no Vale do Aço. Seus principais afluentes são os rios Guanhães e do Peixe, desaguando pela margem esquerda, e rios do Tanque e Preto do Itambé, pela margem direita. Segundo a classificação de Köppen-Geiger de 1948, conforme Strahler (2005), o clima da região é do tipo Cwa, caracterizado por chuvas intensas no verão e seca no inverno (Vieira, 2006).

Na bacia do Rio Santo Antônio, predominam Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Neossolos Litólicos e Argissolos Vermelhos. Os latossolos, que ocupam 75,2% da bacia, são solos resultantes de intensa intemperização, associados a relevos planos e suavemente ondulados, e, apesar de sua baixa fertilidade e retenção de umidade, possuem alto potencial para uso agrícola. Esses solos são caracterizados por argilas de baixa atividade, com predominância de óxidos de ferro, alumínio e silício (Santos *et al.*, 2018). O Latossolo Vermelho, o predominante na região, é o mais rico em Al_2O_3 e apresenta menor teor de Fe_2O_3 , cuja coloração é atribuída à hematita, enquanto no Latossolo Amarelo prevalece a goethita (Vieira, 1988).

Ocorre áreas de vegetação nativa remanescente, especialmente na porção central da bacia, inserida no bioma Mata Atlântica, que cobre cerca de 98% da área total (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2019). A vegetação predominante é classificada como Floresta Estacional Semidecidual (IDE/SISEMA 2009). A bacia também abriga 12 Unidades de Conservação, sendo oito de uso sustentável, três de proteção integral e uma terra indígena (PARH Santo Antônio 2010).

As principais litologias presentes na bacia do Rio Santo Antônio são detalhadas no mapa 2 e resumidas na Tabela 2. Entre essas litologias, destacam-se com maior expressividade o Suíte Borrachudos, o Grupo Serra Negra, o Complexo Guanhães e o Grupo Diamantina.

Mapa 2 – Mapa de litologias na área da bacia do Rio Santo Antônio



Fonte: Elaborado pela autora (2023) com base em dados da CPRM / Codemig (2014)

Tabela 2 – Composição litológica da área da Bacia Hidrográfica do Rio Santo Antônio

UNIDADE ESTRATIGRÁFICA	LITOTIPOS	PERCENTUAL
Suíte Borrachudos	Quartzo monzonito, álcali-feldspato granito, ortognaisse granítico alcalino	27,1
Grupo Serra Negra	Formação ferrífera bandada predominante intercaladas em gnaisse bandado tipo TTG. Ocorrência eventual de quartzito puro, quartzito laminado argiloso e localmente ferruginoso, calcissilicática laminada e anfibolito e rochas metaultramáficas	22,5
Complexo Guanhões	Ortognaisse tonalítico granítico	18,0
Grupo Diamantina - Formação Sopa-Brumadinho	Metaconglomerado, quartzito, metapelito	13,9

Fonte: adaptado com base nos dados da CPRM/COMIG (2014)

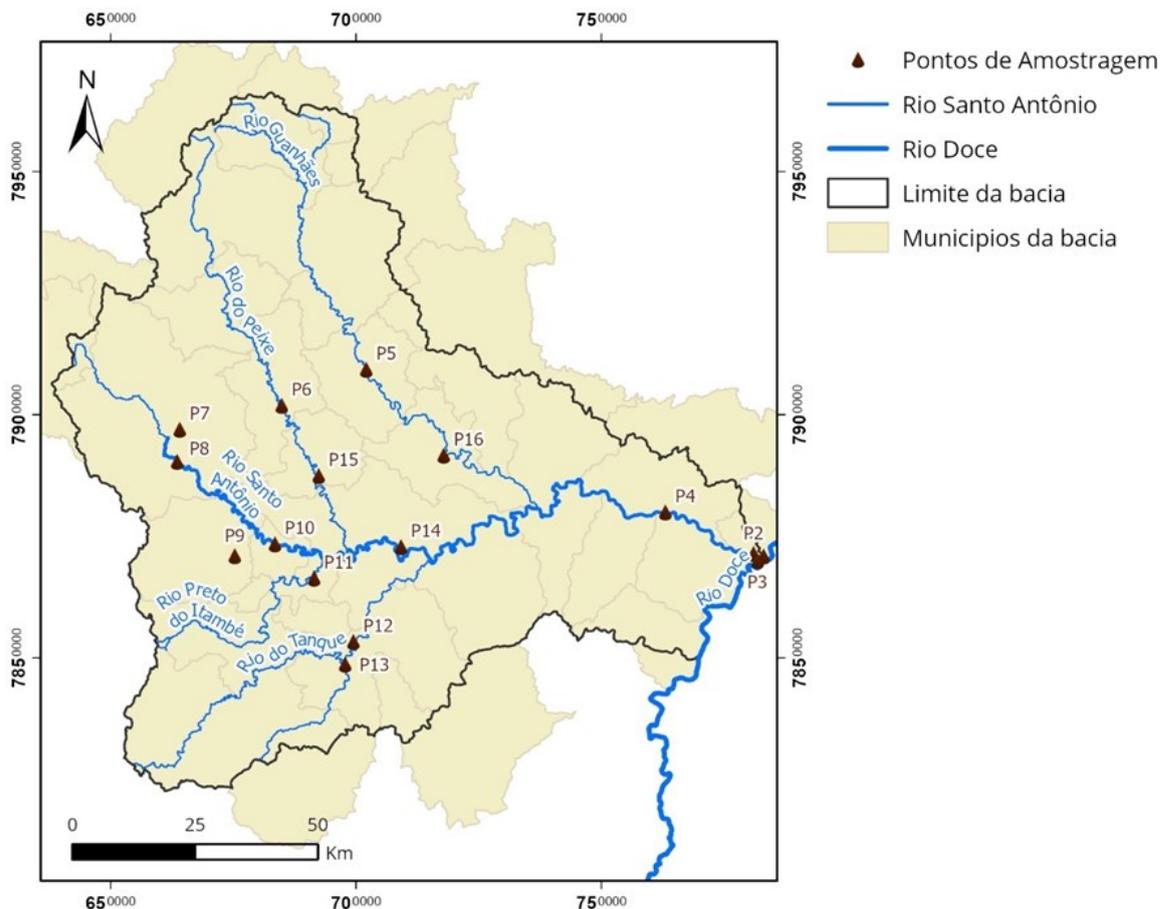
O uso e ocupação do solo na bacia do Rio Santo Antônio é marcado predominantemente pela agropecuária. Na porção sul da bacia, próxima ao Vale do Aço, observa-se uma forte presença de silvicultura, especialmente devido ao cultivo de eucalipto em áreas reflorestadas. Além disso, a área urbanizada é relativamente pequena em comparação com o tamanho total da bacia, o que pode ser considerado como um fator importante para o atual estado de conservação ambiental da região. O Plano de Recursos Hídricos (PARH) Santo Antônio (2010) reforça que a bacia do Rio Santo Antônio apresenta um dos melhores estados de conservação dentre as Unidades que compõem a bacia hidrográfica do Rio Doce.

Aproximadamente 63% da população da bacia vive em áreas urbanas. A economia da região é diversificada, com as principais atividades econômicas sendo agricultura, pecuária, indústria e mineração, conforme descrito no PARH Santo Antônio de 2010, o setor de serviços é o mais proeminente, representando 44% do Produto Interno Bruto (PIB), seguido pelo setor industrial, que contribui com 38%. No entanto, o sistema de tratamento de esgoto na bacia é bastante deficiente, com cerca de apenas 59,3% do esgoto produzido sendo coletado, conforme apontado no mesmo relatório.

3.2 Trabalho de campo e amostragem

As amostras de sedimento de fundo foram coletadas através de uma campanha que ocorreu entre os dias 23 e 25 de setembro de 2019. Período que corresponde ao período de estiagem na região. Foram coletadas 16 amostras sendo, seis em pontos do rio principal, oito em pontos dos seus principais afluentes e duas em pontos do Rio Doce (MAPA 3).

Mapa 3 – Pontos de amostragem na bacia do Rio Santo Antônio



Fonte: Elaborado pela autora (2023) com base nos dados do IBGE (2021) e IDE-SISEMA/MG (2022)

Para cada ponto amostral coletou-se aproximadamente dois quilos da camada superficial dos sedimentos acumulados no fundo do rio, segundo orientações do guia da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB (Brandão *et al.* 2011). Após a coleta, as amostras de sedimentos foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e encaminhadas para posterior secagem.

3.3 Preparação e análise granulométrica dos sedimentos

Após a secagem ao sol, as amostras foram homogeneizadas manualmente, quarteadas e finalmente separou-se dois quartis de cada amostra para peneiramento e análise granulométrica utilizando um conjunto de peneiras de diferentes malhas. Foram classificados conforme escala de Wentworth (1922) os resultados (TABELA 3).

Tabela 3 – Diâmetro de peneiras utilizadas na análise granulométrica

ABNT / Mesh	Ø (mm)	Granulometria
5	4	Seixo
10	2	Grânulo
18	1	Areia Muito Grossa
35	0,5	Areia Grossa
60	0,25	Areia Média
120	0,125	Areia Fina
230	0,0625	Areia Muito Fina
Fundo	Fundo	Silte / Argila

Fonte: Elaborado pela autora com base na classificação de Wentworth (1922)

3.4 Caracterização geoquímica e mineralógica

Após a análise granulométrica foi separada a fração mais fina das amostras (silte/argila) que foram levadas a uma estufa aquecida a 100°C durante duas horas para a completa evaporação da água restante. Proposta por Pueyo *et al.* (2001), cada amostra foi então submetida ao método de digestão parcial. A mensuração da concentração de metais foi feita via Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), da marca Agilente 725. A composição mineralógica foi determinada por difração de raios X utilizando difratômetro Empyrean PANalytical, com radiação CuK α .

3.5 Tratamento dos dados

Para análise dos resultados provenientes da Difração de Raio X utilizou-se software High Score X'Pert Plus.

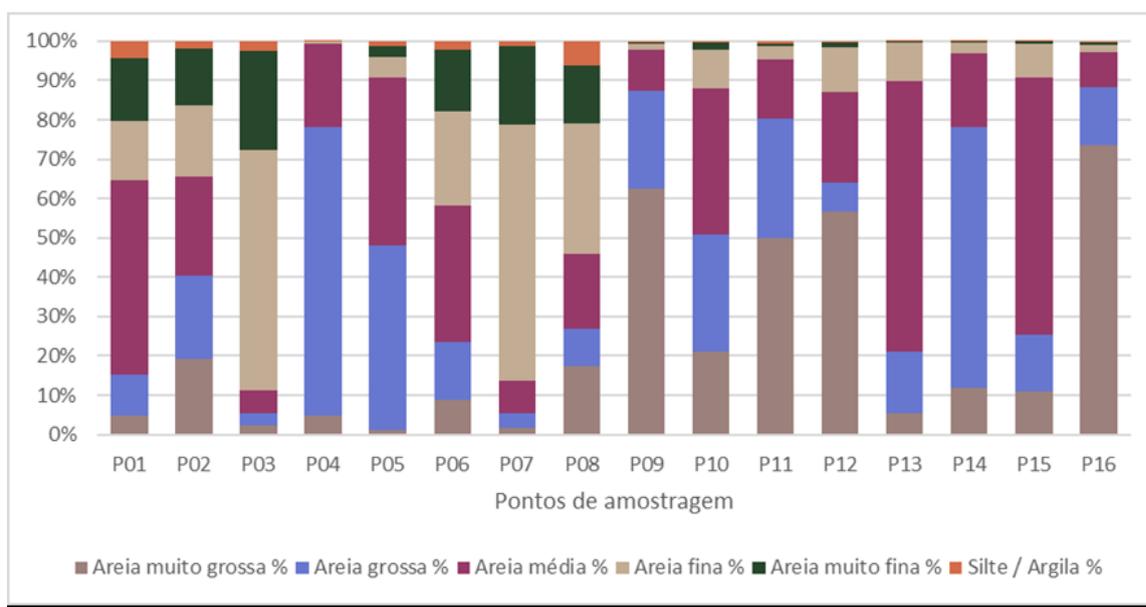
Para descobrir possíveis anomalias nos pontos estudados ao longo da bacia aplicou-se tratamento estatístico através de boxplots. Foram utilizados dados logtransformados a fim de se atenuar os efeitos de possíveis anomalias.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Distribuição granulométrica

Representada no Gráfico 1, está a distribuição granulométrica das amostras coletadas em 16 pontos da bacia do Rio Santo Antônio.

Gráfico 1– Distribuição granulométrica dos sedimentos da bacia do Rio Santo Antônio



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Observa-se que as frações mais grossas predominam na maioria dos pontos amostrados, com destaque para uma maior ocorrência de sedimentos mais finos nos pontos P01, P02, P03, P06, P07 e P08. No entanto, as frações de areia fina e silte/argila não prevalecem em nenhuma das amostras.

A predominância de sedimentos grossos indica uma baixa capacidade de absorção de metais potencialmente tóxicos, uma vez que esses metais tendem a se concentrar nas frações mais finas. Além disso, a presença de sedimentos grossos indica que as drenagens da bacia estão sujeitas a fluxos de alta velocidade. Em condições de fluxo turbulento, partículas de granulometria reduzida, como silte e argila, tendem a permanecer em suspensão em vez de se depositarem no leito do rio (Fontes, 2010).

4.2 Análise mineralógica

Listada na Tabela 4, se encontra a composição mineralógica encontrada em cada um dos pontos amostrados ao longo da bacia do Rio Santo Antônio. Foram identificados 11 diferentes minerais nas amostras coletadas: quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, hematita, sanidina, microclina, anfibólio, albita, anortoclásio e goethita.

Tabela 4 – Composição mineralógica dos sedimentos da bacia do Rio Santo Antônio

Ponto de Amostragem	Análise Mineralógica
P01	quartzo, caulinita, gibbsita e hematita
P02	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, hematita e sanidina
P03	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, hematita e sanidina
P04	quartzo, caulinita, gibbsita, microclina, anortoclásio e anfibólio
P05	quartzo, caulinita, gibbsita e microclina
P06	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita e goethita
P07	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita e hematita
P08	quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita
P09	quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita
P10	quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita
P11	quartzo, caulinita, gibbsita e sanidina
P12	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, hematita, anortoclásio e albita
P13	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita, microclina e anfibólio
P14	quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita
P15	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita e microclina
P16	quartzo, caulinita, gibbsita, muscovita e albita

Fonte: Elaborado pela autora (2023)

O quartzo (SiO_2), a caulinita ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$) e a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) estão presentes em todas as amostras. O quartzo é um mineral altamente resistente a alterações, o que explica sua ampla ocorrência na crosta terrestre. Já a caulinita e a gibbsita são neoformações provenientes do intemperismo químico de outros minerais ricos em alumínio, principalmente

feldspatos. Essa ocorrência é consistente com a composição das litologias predominantes na bacia, que inclui os granitos do Complexo Gouveia, os granitos e ortogneisses da Suíte Borrachudos, além dos filitos do Supergrupo Espinhaço, todas elas caracterizadas por uma alta concentração de alumínio.

A análise também revelou a ocorrência de feldspatos tais como: microclina ($K(AlSi_3O_8)$), sanidina ($(K,Na)(Al,Si)_4O_8$) e anortoclásio ($(Na,K)AlSi_3O_8$) além de plagioclásio como a albita ($NaAlSi_3O_8$). Essa diversidade mineral é consistente com a predominância de rochas graníticas e gnáissicas na região.

A muscovita ($KAl_2[Si_3AlO_{10}](OH,F)_2$) foi identificada na maioria das amostras. Este mineral é altamente resistente ao intemperismo e ao metamorfismo, sendo encontrado principalmente em rochas ácidas, como granitos e pegmatitos, além de xistos. A hematita (Fe_2O_3) é um óxido de ferro muito comum, ocorrendo principalmente em rochas ígneas félsicas e formações ferríferas bandadas (BIFs) como as do Grupo Serra Negra.

Anfibólio ($W_{0-1}X_2Y_5Z_8O_{22}(OH,F)_2$) e goethita ($FeO(OH)$) foram detectados em apenas um ponto de amostragem. O anfibólio é um grupo mineral comum em rochas ígneas e metamórficas podendo estar associado a plagioclásios, feldspato potássico, quartzo, biotita ou muscovita, como acontece no ponto 4. A goethita é um produto do intemperismo dos minerais ferruginosos como a siderita ($FeCO_3$), magnetita (Fe_3O_4) e pirita (FeS_2). Foi detectada no ponto 06, sendo bastante pertinente, uma vez que se localiza próximo a uma área de mineração.

4.3 Caracterização geoquímica

Estão disponíveis nas Tabela 5 e Tabela 6, os resultados das análises realizadas por ICP-OES. Em cada tabela, a última célula apresenta o limite de quantificação (LQ), que é definido como a menor concentração mensurável com precisão pelo equipamento utilizado.

Os diagramas 1 e 2 mostram, respectivamente, a distribuição dos elementos maiores e menores na região estudada através de diagramas boxplots. Para comparar os resultados da análise geoquímica realizada por ICP-OES com os valores estipulados pela Resolução CONAMA nº 454/2012, foram elaborados os gráficos apresentados no Diagrama 3. Para complementar, no diagrama 4, estão apresentadas as correlações entre as concentrações de alguns elementos.

Tabela 5 – Resultados das análises ICP-EOS - elementos maiores

Amostra	Al mg/kg	Ca mg/kg	Fe mg/kg	K mg/kg	Mg mg/kg	Na mg/kg	P mg/kg	Ti mg/kg
P01	11135,8	1017,9	103327,4	662,11	733,87	92,19	525,64	609,04
P02	23319,83	948,44	47502,52	1381,25	1064,46	73,4	519,51	1192,39
P03	12030,17	768,31	105063,1	652,9	736,51	102,38	497,92	660,06
P04	6669,25	1143,18	12887,73	1193,77	763,65	285,75	111,28	772,63
P05	20566,11	1646,53	43681,02	1243,83	963,88	105	550,46	1269,66
P06	21654,93	881,11	44928,67	1344,7	1296,76	94,82	620,02	422,89
P07	13984,41	834,38	34744,87	598,54	529,04	112,4	2639,86	197,85
P08	15302,35	2105,32	26015,42	589,89	552,26	58,12	397,54	225,2
P09	14411,55	1108,04	28268,3	713,69	961,3	64	371,54	294,38
P10	16274,23	1573,96	40552,02	997,81	921,31	65,11	418,07	636,15
P11	15085,51	1895,32	22687,26	949,63	1111,78	53,53	347,47	485,38
P12	8923,36	1883,48	42797,23	930,56	991	130,69	467,93	600,94
P13	11789,45	1220,69	21848,35	2620,41	2082,61	175,25	319,24	759,55
P14	12071,1	945,46	14291,86	1051,24	562,19	103,75	174,08	364,11
P15	22168,38	1079,04	78603,83	1424,54	951,92	103,27	681,91	950,17
P16	23962,42	873,38	46442,38	1395,48	1345,34	82,25	637,09	411,92
LQ	24,5	4,28	7,24	12,24	3,04	3,49	6,93	10,75

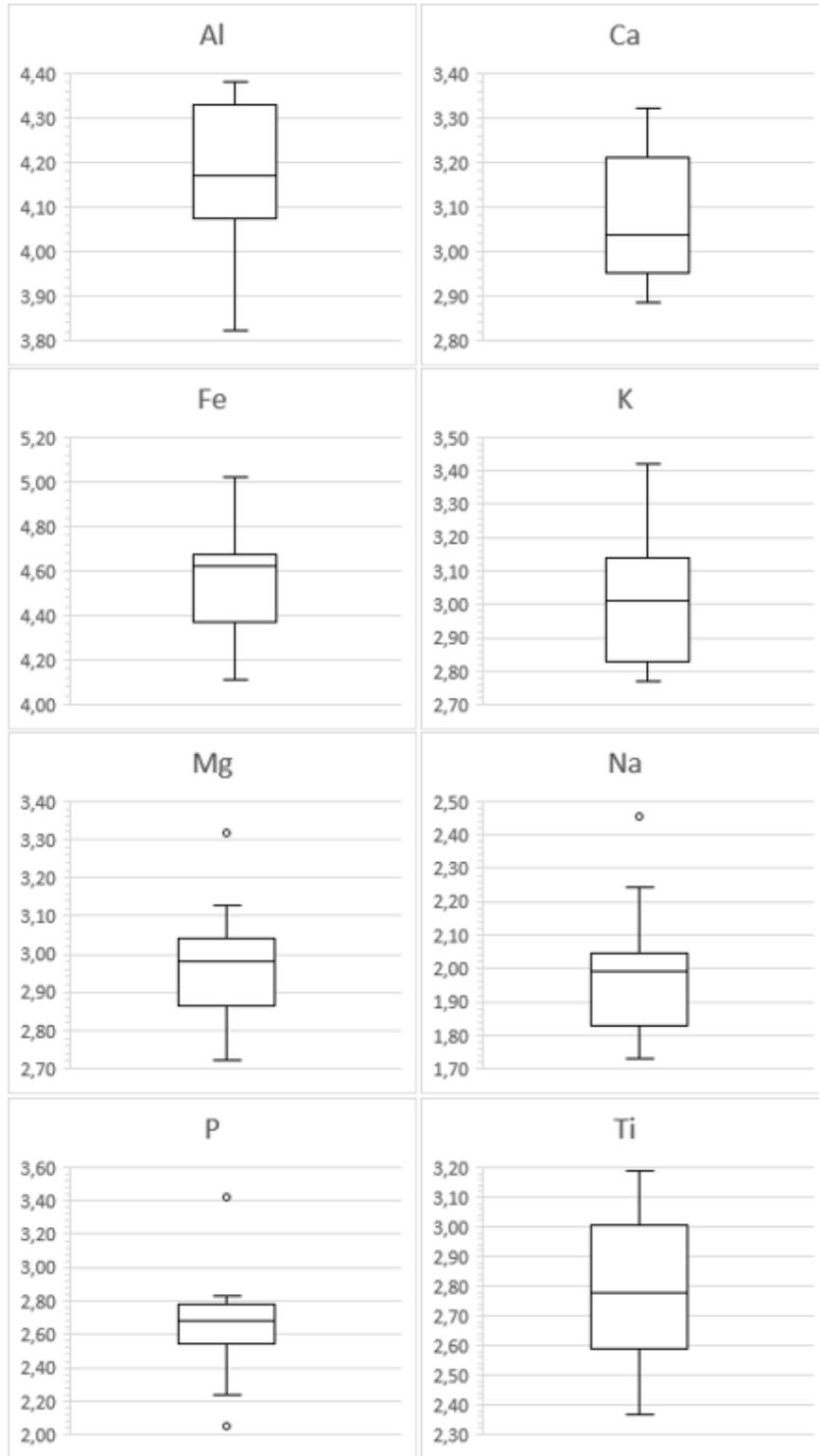
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Tabela 6 – Resultados das análises ICP-EOS - elementos traços

Amostra	As mg/kg	Ba mg/kg	Cd mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
P01	12,86	90,63	<LQ	9,69	92,82	14,56	1193,67	20,1	20,73	91,82
P02	<LQ	111,09	<LQ	12,58	43,04	53,93	742,37	9,28	40,3	63,52
P03	34,69	89,75	<LQ	12,29	94,53	18,46	1048,66	21,77	14,63	64,16
P04	<LQ	58,09	<LQ	7,5	19,09	52,31	388,11	6,39	8,84	32,79
P05	<LQ	130,08	<LQ	14,35	65,85	51,03	912,94	13,77	35,26	68,77
P06	<LQ	117,75	<LQ	12,24	86,95	30,51	472,63	15,49	13,42	43,56
P07	<LQ	73,67	<LQ	4,14	55,29	21,84	240,6	8,99	19,01	47,31
P08	<LQ	52,57	<LQ	5,81	37,49	14,87	232,68	7,13	7,83	24,53
P09	<LQ	101,6	<LQ	9,31	61,94	12,7	1546,18	12,6	17,87	19,76
P10	<LQ	59,86	<LQ	7,71	67,88	23,72	396,48	9,97	15,39	38,75
P11	<LQ	80,35	0,72	11,11	26,64	16,4	855,96	7,13	14,68	23,88
P12	<LQ	74,71	<LQ	7,91	29,45	16,63	834,8	7,31	16,93	34,36
P13	<LQ	66,28	11,05	13,97	29,85	12,57	267,09	11,78	28,5	39
P14	<LQ	52,8	11,42	9,29	24,3	7,24	480,26	8,23	20,08	20,22
P15	<LQ	159,23	<LQ	20,9	39,05	14,15	1162,67	8,58	49,87	61,45
P16	<LQ	121,84	11,29	13,09	91,54	19,95	481,22	17,06	16,47	43,01
LQ	7,58	0,545	0,49	1,56	1,08	1,23	5,55	3,02	7,08	0,31

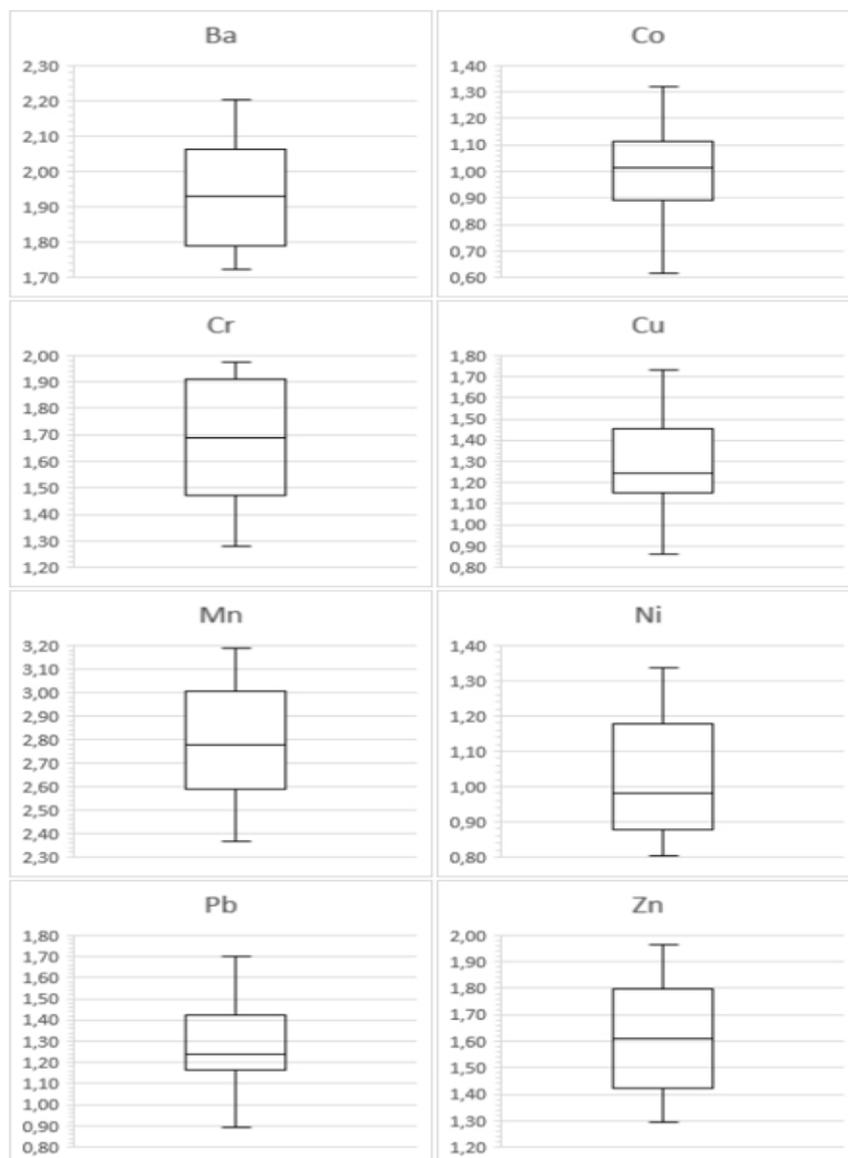
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Diagrama 1 – Diagramas referente as análises químicas dos elementos metálicos maiores Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, P e Ti presentes nos sedimentos da bacia do Rio Santo Antônio



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Diagrama 2 – Diagramas referente as análises químicas dos elementos metálicos traços Ba, Co, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, V e Zn presentes nos sedimentos da bacia do Rio Santo Antônio



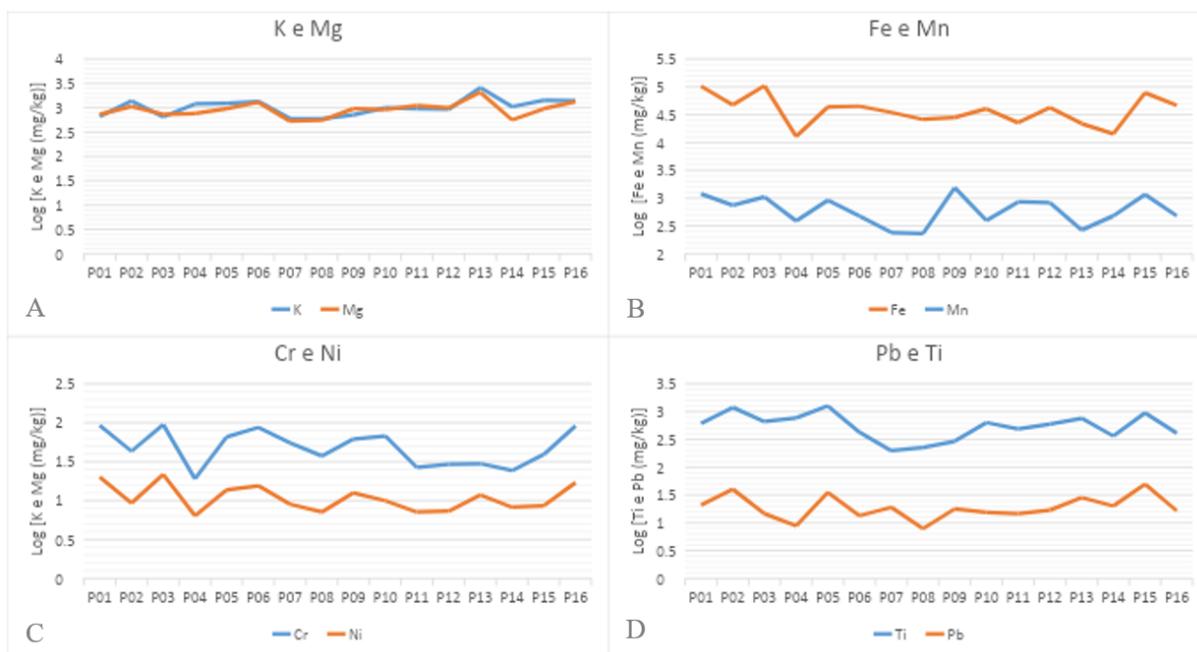
Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Diagrama 3 – Diagramas das concentrações de As, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni e Zn ao longo da bacia do Rio Santo Antônio e comparativo com a Resolução CONAMA nº 454/2012



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Diagrama 4 – Diagramas de correlações das concentrações de K e Mg, Fe e Mn, Cr e Ni, e Pb e Ti



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Através dos diagramas boxplots, foram identificadas anomalias positivas nas análises de três elementos maiores: Mg no ponto P13, Na no ponto P04 e P nos pontos P04 e P07. A única anomalia negativa foi observada para fósforo (P) no ponto P04. Nenhum dos elementos traço apresentou anomalias. Os valores anômalos de Mg e Na provavelmente têm origem geogênica, enquanto a anomalia de P no P07 pode ter causas antrópicas.

A alta concentração de Na no ponto P04 pode estar associada à presença do mineral anortoclásio ($(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$), enquanto a maior concentração de Mg no ponto P13 pode estar ligada às rochas metaltramáficas e às formações ferríferas do Grupo Serra Negra.

Observa-se também um padrão de ocorrência similar entre potássio (K) e magnésio (Mg) na região, sugerindo uma possível relação mineralógica e litológica entre esses elementos. No diagrama 4A, nota-se uma correlação positiva entre K e Mg nas amostras coletadas. Os maiores teores desses elementos foram registrados nos pontos P02 (Rio Santo Antônio), P06 (Rio do Peixe), P13 (Rio Jirau) e P15 (Rio do Peixe). A análise mineralógica desses pontos revela a presença recorrente de quartzo, caulinita, gibbsita e muscovita, uma associação típica de granitos e gnaisses intemperizados. Isso reforça a hipótese de que K e Mg têm uma origem geogênica, possivelmente provenientes dos granitos e gnaisses da Suíte Borrachudos, do Complexo Ganhães e do Grupo Serra Negra, litologias predominantes na região.

Altos teores de manganês (Mn) foram associados a localidades com maior concentração de ferro (Fe), como nos pontos P01 (Rio Doce), P03 (Rio Doce) e P15 (Rio do Peixe), conforme mostrado no diagrama 4B. A alta concentração de ferro nos pontos P01 e P03 pode ser resultado do acúmulo de sedimentos provenientes do rompimento da Barragem do Fundão em 2015. No ponto P15, localizado no Grupo Serra Negra, a presença de formações ferríferas bandadas pode justificar o elevado teor de ferro.

A correlação positiva entre os elementos cromo (Cr) e níquel (Ni) (DIAGRAMA 4-C) reforça a origem natural desses elementos. O alto teor de ambos no P16 pode ser relacionado as formações ferríferas do grupo Serra Negra. Considerando que o Rio do Peixe percorre o grupo Serra da Serpentina, é possível que a maior concentração no P06 esteja associada aos seus filitos. Quanto aos P01 e P03, alta concentração se deve a confluência do Rio Santo Antônio com o Rio Doce.

A correlação positiva entre os elementos chumbo (Pb) e titânio (Ti) (DIAGRAMA 4-D) também reforça a origem geogênicas desses elementos. Em P02, P05, P13 e P15 ocorrem as maiores concentrações de Pb e Ti sugerindo uma influência dos granitos e gnaisses da Suíte Borrachudos.

A presença de fósforo (P) em pontos próximos a áreas urbanas sugere uma influência antrópica. A concentração do elemento aumenta nas proximidades da confluência com o Rio Doce, devido à proximidade da zona urbana de Naque. No ponto P07, localizado em Conceição do Mato Dentro, onde foi registrada a maior concentração, observou-se despejo de esgoto nas proximidades. Esses fatores podem explicar a anomalia, uma vez que a presença de fósforo é frequentemente vinculada ao descarte de detergentes e matéria fecal em efluentes domésticos (CETESB, 2016).

Altas concentrações de arsênio (As) e cromo (Cr) foram observadas nos pontos P01 e P03, inclusive, ultrapassando os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 454/2012. Essas concentrações podem estar associadas à confluência do Rio Santo Antônio com o Rio Doce. O arsênio é um elemento comum em rochas que hospedam depósitos auríferos sulfetados do Quadrilátero Ferrífero, conforme Costa (2007), e possivelmente o elemento estava nos sedimentos que foram depositados há muito tempo, mas que foram mobilizados pela lama resultante do rompimento da barragem, sendo, assim, reintegrado ao meio ambiente.

Altas concentrações de cádmio (Cd) foram detectadas nos pontos P13, P14 e P16, superando os limites estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). As litologias da área de estudo não contém altas concentrações de cádmio em sua composição, sugerindo a ação antrópica como fonte do elemento nos sedimentos. Além disso, a coleta de

todas as amostras em zonas urbanas reforça essa hipótese. As principais fontes antropogênicas de Cd incluem as atividades de mineração, resíduos industriais, cimento e fertilizantes fosfatados (CETESB, 2022).

5 CONCLUSÃO

A análise geoquímica dos sedimentos da bacia do Rio Santo Antônio, complementada por estatísticas boxplot e comparação com os padrões da Resolução CONAMA nº 454/2012, revelou concentrações baixas de metais potencialmente tóxicos à biota. As elevadas concentrações de certos elementos foram predominantemente atribuídas à influência geogênica, enquanto a influência antrópica foi observada em menor escala, relacionada principalmente ao despejo de esgotos industriais e domésticos não tratados, além de atividades de mineração.

Os resultados das análises granulométricas indicaram a predominância de sedimentos mais grosseiros, o que sugere uma maior energia aplicada no sistema e, conseqüentemente, uma baixa adsorção de metais potencialmente perigosos. Apesar disso, foram identificadas concentrações anômalas de arsênio (As), cádmio (Cd) e fósforo (P) em pontos específicos da bacia, cuja origem está ligada à ação antrópica.

O rompimento da barragem de rejeitos de Fundão, em Mariana, facilitou a movimentação do As até a foz da bacia do Rio Santo Antônio, representando uma preocupação importante, especialmente em virtude das atividades pesqueiras ao longo do Rio Doce. O Cd, conhecido por causar diversos problemas de saúde, foi identificado em áreas urbanas como Santa Maria de Itabira, Dolores de Guanhães e Ferros. Além disso, o fósforo foi encontrado em locais próximos a áreas urbanas, especialmente onde observou-se descarte de esgoto nas proximidades.

A influência antropogênica, resultante da atividade industrial e do esgoto doméstico, é passível de mitigação, desde que haja a coleta e o tratamento adequados dos efluentes e resíduos gerados. Em síntese, a manutenção das boas condições da bacia do Rio Santo Antônio é vital para a recuperação das águas do Rio Doce e a preservação da Mata Atlântica na região. Portanto, é fundamental que os órgãos públicos ambientais intensifiquem a fiscalização nas áreas onde foram detectadas contaminações.

REFERÊNCIAS

BRANDÃO, C. J. *et al.* **Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos.** Brasília, DF: ANA; CETESB, 2011. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/Guia-nacional-de-coleta-e-preservacao-de-amostras-2012.pdf>. Acesso em: 23 out. 2024

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia.** Rio de Janeiro: CPRM; Eletrobrás, 1994.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **L5.128: norma técnica sobre determinação de fósforo em águas.** São Paulo: Cetesb, 2024. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/09/L5.128_Determinacao-de-fosforo-em-aguas.pdf. Acesso em: 23 out. 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Cádmio e seus compostos.** 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Cadmio.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2023.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade.** 2016. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2018/03/Apendice-E-Significado-Ambiental-e-Sanitario-das-Variaveis-de-Qualidade-2016.pdf>. Acesso em: 23 out. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 454 de 01 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 216, 08 nov. 2012. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=680>. Acesso em: 10 mar. 2023.

COSTA, A. T. **Registro histórico de contaminação por metais pesados, associadas à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do Ribeirão do Carmo, QF: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais.** 2007. 137 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM); COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO DE MINAS GERAIS (CODEMIG). **Mapeamento geológico.** 2014. Disponível em: <http://www.portalgeologia.com.br/index.php/mapa/#downloads-tab>. Acesso em: 10 mar. 2023.

FERNANDES, K. N. **Qualidade das águas nos Rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo - Afluentes do Alto Rio Doce (Watu): metais, metaloides e Índice de Qualidade das Águas antes e após o rompimento da barragem de rejeitos Fundão da Samarco/VALE/BHP Billiton, em Mariana, MG.** 2017. 223 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/3edc10b5-1da7-40bf-bdd4-52d8d564e654>. Acesso em: 23 out. 2024.

FERNANDES, M. L. S. *et al.* Granitos borrachudos: um exemplo de granitogênese anorogênica na porção central do Estado de Minas Gerais. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 2, n. 2, p. 23-29, 1994. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11529>. Acesso em: 23 out. 2024

FONTES, Aracy Losano. **Geomorfologia fluvial e hidrografia**. São Cristóvão: UFS, CESAD, 2010.

FORSTNER, U.; AHLF, W.; CALMANO, W. Studies on the transfer of heavy metals between sedimentary phases with a multichamber device: combined effects of salinity and redox variation. **Marine Chemistry**, Amsterdam, v. 28, n. 1-3, p. 145-158, dec. 1989. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(89\)90192-8](https://doi.org/10.1016/0304-4203(89)90192-8). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0304420389901928?via%3Dihub>. Acesso em: 23 out. 2024

FORSTNER, U. *et al.* Historical contaminated sediments and soils at the river basin scale. Examples from the Elbe River catchment area. **Journal Soils & Sediments**, Heidelberg, v. 4, p. 247-260, dec. 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02991121>. Acesso em: 23 out. 2024

GASPAR, J. de V. T. **Contribuição para a caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio – MG**. 2021. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/2a791e7f-c3d3-464f-8103-d726bce2a499>. Acesso em: 23 out. 2024

GONTIJO, E. S. J. *et al.* Geochemical study of waters in the eastern of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. In: CONFERÊNCIA, 23., 2014, Heidelberg. *Anais [...]*. Heidelberg: Instituto de Geociências da Universidade de Heidelberg, 2014. 1 CD-ROM.

GROSSI-SAD, J. H. *et al.* **Projeto Espinhaço**. Belo Horizonte: COMIG, 1997. 1 CD-ROM.

GROSSI-SAD, J. H.; MAGALHÃES, J. M. M.; CARELOS, P. M. **Geologia do Distrito de Guanhães, Minas Gerais**. Belo Horizonte: Docegeo-Geosol, 1989.

GUIMARÃES, M. L. V. **Petrogênese das rochas precambrianas da região de Itabira-Morro do Pilar, borda SE da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais**. 1992. 138 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

HERUT, B.; SANDLER, A. Normalization methods for pollutants in marine sediments: review and recommendations for the Mediterranean. **Israel Oceanographic & Limnological Research**, Haifa, v. 18, p. 1-23, apr. 2006. Disponível em: https://sednet.org/download/0604_herut_and_sandler_report.pdf. Acesso em: 23 out. 2024

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Áreas urbanizadas**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/cobertura-e-uso-da-terra/15789-areas-urbanizadas.html?=&t=destaques>. Acesso em: 10 mar. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/>. Acesso em: 03 mar. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Limite dos biomas**. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 10 mar. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malha municipal**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 05 mar. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Monitoramento da cobertura e uso da terra**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15831-cobertura-e-uso-da-terra-do-brasil.html?=&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 10 mar. 2023.

INSTITUTO PRISTINO. **Atlas digital geoambiental. Municípios de Minas Gerais**. Disponível em: <https://institutopristino.org.br/atlas/municipios-de-minas-gerais/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Bacia do rio Santo Antônio**. 2020. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-do3>. Acesso em: 10 mar. 2023.

JÁCOME, A. P. G. **Contribuição para a caracterização ambiental da bacia hidrográfica do rio Santo Antônio – MG**. 2023. 100 f. (Graduação em Engenharia Geológica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. Disponível em: <https://monografias.ufop.br/handle/35400000/5347>. Acesso em: 23 out. 2024

LEÃO, L. P. **Mapeamento geoquímico de sedimentos fluviais: diferentes métodos e suas aplicações ambientais**. 2019. 185 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/550e1055-0ba2-465e-b2d2-a7f818dbd5cb>. Acesso em: 10 mar. 2023

NASCIMENTO, L. P. do. **Análise ambiental da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, Quadrilátero Ferrífero**. 2016. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/a7392e6d-6e1b-40d9-9d26-4427b2726f90>. Acesso em: 23 out. 2024

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). **Plano de ação de recursos hídricos da Unidade de Planejamento e Gestão DO3 - PARH Santo Antônio: Relatório Final**. Belo Horizonte: Igam, 2010. Disponível em: https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2014/10/PARH_Santo_Antonio.pdf. Acesso em: 10 mar. 2023

PARRA, R. R. *et al.* Influência antrópica na geoquímica de água e sedimentos do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 36-49, 2007. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/312d7c7a-892a-4c7a-aba0-6aa708233299>. Acesso em: 23 out. 2024

PIMENTA, M. G. B. **Análise químico ambiental da bacia do rio Santo Antônio-MG por meio da avaliação de amostras de água e sedimentos**. 2021. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/43463/4/Versao_final_sto_antonio_mgbp.pdf. Acesso em: 23 out. 2024

PUEYO, M. *et al.* The certification of the extractable contents (mass fractions) of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in freshwater sediment following sequential extraction procedure. **Journal of Environment Monitoring**, Cambridge, v. 3, n. 2, p. 243-250, 2001. Disponível em: <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/02c41803-8f6d-41f2-a73d-c47225ff8c6e>. Acesso em: 10 mar. 2023

REIS, D. A. dos. **Contaminação química e microbiológica em águas e sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, sub bacia do rio Doce, submetida a fatores de pressão antrópicos e ao rompimento da barragem de Fundão**. 2019. 223 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/items/acad7220-eaca-4631-8371-73020e91cbd6>. Acesso em: 10 mar. 2023

ROESER, H. M. P. *et al.* The influence of regional lithology on the composition of waters and sediments in the upper Rio Doce basin. In: CONFERÊNCIA, 22., 2011, Heidelberg. **Anais [...]**. Heidelberg: LAK, 2011.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 2018.

SISTEMA ESTUDUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (Minas Gerais). Infraestrutura de Dados Espaciais - IDE-Sisema. **Principais trechos hidrográficos das circunscrições hidrográficas de Minas Gerais**. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/ebb215b7-10a5-481b-8cb2-823b4cf3d5e4>. Acesso em: 05 mar. 2023.

SPADONI, M.; CAVARRETTA, G.; PATERA, A. Cartographic techniques for mapping the geochemical data of stream sediments: the sample catchment basin approach. **Environmental Geology**, Dordrecht, v. 45, n. 5, p. 593-599, 2004.

STRAHLER, A. H.; STRAHLER, A. N. **Physical geography: science and systems of the human environment**. New York: Wiley, 2005.

VIEIRA, F. **A ictiofauna do Rio Santo Antônio, bacia do Rio Doce, MG: proposta de conservação**. 2006. 101 f. Tese (Doutorado Ecologia, Conservação e Manejo de Vida Silvestre) – Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

VIEIRA, L. S. **Manual de ciência do solo: uma ênfase aos solos tropicais**. São Paulo: Ed. Ceres, 1988.

WENTWORTH, C. K. A scale of grade and class terms for clastic sediments. **The Journal of Geology**, New York, v. 30, n. 5, p. 377-392, jul./ago. 1922. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/30063207?seq=1>. Acesso em: 10 mar. 2023

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi viabilizado pelo apoio da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PROAMB), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Pró-reitoria de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação (PROPI). Agradecemos também ao Laboratório de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto pela análise por ICP.