

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE MEDICINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SAÚDE COLETIVA**

Paulo Arthur Cardoso Avelar

**Barragens de Rejeito de Mineração e Mortalidade por Câncer nos Municípios
de Minas Gerais**

Juiz de Fora

2025

Paulo Arthur Cardoso Avelar

**Barragens de rejeito de mineração e mortalidade por câncer nos municípios de
Minas Gerais**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Saúde Coletiva da
Universidade Federal de Juiz de Fora
como requisito parcial para obtenção do
título de mestre.

Orientador: Dr. Mário Círio Nogueira

Juiz de Fora
2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração
automática da Biblioteca Universitária da UFJF,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Avelar, Paulo Arthur Cardoso .

Barragens de Rejeito de Mineração e Mortalidade por Câncer nos
Municípios de Minas Gerais / Paulo Arthur Cardoso Avelar. -- 2025.
49 p.

Orientador: Mário Círio Nogueira
Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz
de Fora, Faculdade de Medicina. Programa de Pós-Graduação em
Saúde Coletiva, 2025.

1. Câncer.. 2. Análise de Dados.. 3. Exposição Ambiental.. I. Círio
Nogueira, Mário, orient. II. Título.

Barragens de Rejeito de Mineração e Mortalidade por Câncer nos Municípios de Minas Gerais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Saúde Coletiva da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saúde Coletiva. Área de concentração: Saúde Coletiva.

Aprovada em 25 de setembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Mário Círio Nogueira - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Sergio William Viana Peixoto

Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Maximiliano Ribeiro Guerra

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 16/09/2025.

 Documento assinado eletronicamente por **Mario Círio Nogueira, Professor(a)**, em 25/09/2025, às 16:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Maximiliano Ribeiro Guerra, Professor(a)**, em 25/09/2025, às 16:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

 Documento assinado eletronicamente por **Sérgio William Viana Peixoto, Usuário Externo**, em 25/09/2025, às 17:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2619586** e o código CRC **E24B05ED**.

RESUMO

Introdução: A mineração no estado de Minas Gerais exerce papel central na economia e história regional, sendo também relevante do ponto de vista social. Contudo, as barragens de rejeitos associadas à atividade mineradora configuram potenciais fontes de poluição ambiental de longo prazo, frequentemente contendo elementos com reconhecido potencial carcinogênico, como Arsênio, Berílio, Cádmio, Cromo, Chumbo e Níquel. **Objetivos:** Este estudo teve como objetivo investigar a associação entre a proximidade geográfica de barragens de rejeitos de mineração e as taxas de mortalidade por câncer nos municípios do estado de Minas Gerais (MG), no período de 2010 a 2019. **Materiais e Métodos:** Trata-se de um estudo ecológico baseado em dados secundários. As variáveis de desfecho foram a taxa de mortalidade por câncer, total e por algumas causas selecionadas, utilizando como referência a população padrão de Segi. A variável de exposição foi definida como a distância entre a sede municipal e a barragem de mineração mais próxima. As taxas calculadas foram a média do período. As análises incluíram o coeficiente de correlação espacial bivariada L de Lee, medidas de autocorrelação espacial global (índice de Moran) e autocorrelação espacial local (LISA). Mapas temáticos foram elaborados para representação da distribuição espacial das variáveis. Todas as análises estatísticas foram realizadas no ambiente R. **Resultados:** As taxas de mortalidade padronizadas por câncer apresentaram distribuição espacial heterogênea, sendo mais elevadas entre homens. Observou-se correlação negativa entre a distância das sedes municipais às barragens e as taxas de mortalidade por câncer, com maior intensidade no sexo feminino. No grupo masculino, a associação foi identificada apenas para a mortalidade por câncer em geral. A análise espacial evidenciou clusters alto-alto de mortalidade próximos a regiões mineradoras. **Discussão:** Embora a associação observada tenha baixa magnitude, os resultados são consistentes com padrões territoriais de risco e com a literatura sobre os efeitos crônicos da exposição a metais pesados. As diferenças por sexo e localização reforçam a necessidade de investigações com maior possibilidade de inferência causal, como estudos longitudinais e com dados individuais, além das variáveis contextuais, em análise multinível. **Conclusão:** O estudo sugere que a proximidade de barragens de mineração pode estar associada a maiores taxas de mortalidade por câncer em Minas Gerais. Apesar de não estabelecer relação causal, os achados justificam a adoção de estratégias de vigilância ambiental e de saúde, bem como o uso de indicadores sociais em análises futuras.

Palavras-chave: Câncer. Barragens. Exposição Ambiental. Análise de Dados. Dados Secundários.

ABSTRACT

Introduction: Mining plays a central role in the economy and history of Minas Gerais, Brazil, and is also socially relevant. However, mining tailings dams represent potential long-term sources of environmental pollution, often containing elements with recognized carcinogenic potential, such as arsenic, beryllium, cadmium, chromium, lead, and nickel. **Objective:** This study aimed to investigate the association between the geographical proximity of mining tailings dams and cancer mortality rates in municipalities of Minas Gerais (MG), Brazil, from 2010 to 2019. **Materials and Methods:** This was an ecological study based on secondary data. Outcome variables were total and cause-specific cancer mortality rates, standardized to the Segi world population. The exposure variable was defined as the distance between the municipal seat and the nearest mining dam. Rates were calculated as period averages. Analyses included Lee's bivariate spatial correlation coefficient (L), global spatial autocorrelation (Moran's I), and local spatial autocorrelation (LISA). Thematic maps were developed to illustrate the spatial distribution of variables. All analyses were performed in the R environment. **Results:** Age-standardized cancer mortality rates showed a heterogeneous spatial distribution, with higher rates among men. A negative correlation was observed between the distance from municipal seats to dams and cancer mortality rates, with stronger associations among women. In men, the association was identified only for overall cancer mortality. Spatial analysis revealed high–high clusters of cancer mortality near mining regions. **Discussion:** Although the observed association was of low magnitude, the findings are consistent with territorial risk patterns and with the literature on chronic effects of exposure to heavy metals. Differences by sex and location highlight the need for studies with greater causal inference potential, such as longitudinal and individual-level investigations, as well as contextual variables in multilevel analyses. **Conclusion:** The study suggests that proximity to mining dams may be associated with higher cancer mortality rates in Minas Gerais. While causality cannot be established, the findings support the implementation of environmental and health surveillance strategies, as well as the use of social indicators in future analyses.

Keywords: Cancer; Tailings dams; Environmental exposure; Data analysis; Secondary data.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Mapa das macrorregiões de saúde do estado de Minas Gerais, 2023.....	27
Figura 2	- Mapa com a localização das barragens de mineração estudadas, Minas Gerais, 2023.....	28
Figura 3	- Mapa da localização das sedes dos municípios de Minas Gerais, 2010.....	28
Figura 4	- Taxa de mortalidade padronizada feminina categorizada e o LisaMap do sexo feminino.....	31
Figura 5	- Taxa de mortalidade por cancer padronizada feminina categorizada e o LisaMap feminino.....	32
Figura 6	- LisaMap - Taxa de mortalidade padronizada feminina categorizada e o LisaMap feminino por canceres selecionadas.....	32
Figura 7	- LisaMap da taxa de mortalidade feminina por câncer, com sobreposição das barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais.....	33
Figura 8	- LisaMap da taxa de mortalidade feminina por canceres selecionados, com sobreposição das barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais.....	33
Figura 9	- Taxa de mortalidade padronizada masculina por câncer categorizada e o LisaMap masculino.....	34
Figura 10	- Taxa de mortalidade padronizada masculina categorizada por canceres selecionados e o LisaMap masculino.....	34
Figura 11	- LisaMap da taxa de mortalidade masculina por câncer, com sobreposição das barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais.....	35
Figura 12	- LisaMap da taxa de mortalidade masculina para cânceres selecionados com sobreposição das barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Distribuição estatística da taxa de mortalidade por câncer geral no Estado de Minas Gerais (2010-2019), por 100.000 habitantes.....	30
Tabela 2	- Distribuição estatística da taxa mortalidade padronizada por idade por cânceres específicos nos municípios do estado de minas gerais e a distância da sede do município e a barragem mais próxima em quilômetros (2010-2019), por 100.000 habitantes.....	30
Tabela 3	- Coeficiente de correlação espacial bivariada L de Lee entre as Taxas de Mortalidade por Câncer Padronizadas por Idade no sexo Masculino e Feminino com a distância entre o centroide da sede dos Municípios e a Barragem mais próxima.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ANM	- Agência Nacional de Mineração
As	- Arsenio
CA	- Câncer
Cd	- Cádmio
CEP	- Comitê de Ética e Pesquisa em Seres Humanos
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr	- Cromo
CRI	- Categoria de Risco
DATASUS	- Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde
DNPM	- Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA	- Dano Potencial Associado
IARC	- Agência Internacional para Pesquisa em Câncer
IBAMA	- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMBio	- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INCA	- Instituto Nacional do câncer
MG	- Minas Gerais
OMS	- Organização Mundial da Saúde
OPAS	- Organização Pan-americana de Saúde
Pb	- Chumbo
PEAB	- Política Estadual de Atingidos por Barragens
PGRBM	- Processo de Gestão de Riscos para Barragens de Mineração
PIB	- Produto Interno Bruto
PNSB	- Política Nacional de Segurança de Barragens
PSA	- Antígeno prostático específico
RAPP	- Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais

SE MAD	- Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SFA	- Subsecretaria de fiscalização ambiental
SIEMA	- Sistema Nacional de Emergencias Ambientais
SIM	- Sistema de Informações de Mortalidade
SISNAMA	- Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNISB	- Sistema Nacional de Informação sobre Segurança de Barragens
SUS	- Sistema Único de Saúde
TCFA	- Taxa de Controle e Fiscalização Ambiental
TGI	- Trato Gastrointestinal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Panorama de potencial exposição.....	14
2.2 Cânceres relacionados aos agentes selecionados.....	16
2.3 Classificação da carcinogenicidade das substâncias selecionadas 19 segundo a <i>International Agency for Research on Cancer (IARC)</i>	
2.4 Caracterização de Barragens de Mineração	20
2.5 Políticas públicas e as principais legislações relacionadas a atividade mineradora.....	21
3 OBJETIVOS	25
3.1 Objetivos gerais.....	25
3.2 Objetivos específicos.....	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
5 RESULTADOS	30
6 DISCUSSÃO	43
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE	48

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma das principais atividades econômicas do mundo e uma das maiores geradoras de volume de resíduos (GUENG et. al., 2022; LOREDO-PORTALES et. al., 2020; NASRAUOI, TRIFI, CHAREF, 2023), visto que, para extração do produto, toneladas de material são processados (BARCELOS et.al., 2020). Durante muito tempo os resíduos dessa atividade eram despejados diretamente no ambiente, e isso causa uma série de consequências para o entorno e sua população (PEDROSA-SOARES, VOLL, CUNHA, 2018; CACCIUTTOLO, CANO, CUSTODIO, 2021)

Hoje, na maior parte do mundo esses resíduos são acumulados em barragens de diversas naturezas na superfície, ou redepositados nas galerias de minas subterrâneas (CACCIUTTOLO, CANO, CUSTODIO, 2021). Enquanto os locais de extração e tratamento de minério usualmente já são contaminados pela atividade histórica (PINHEIRO, 2022), as barragens se apresentam como estruturas localizáveis e de potencial contaminação ambiental prolongada, devido a contaminação local permanecer mesmo após o encerramento das atividades (LOREDO-PORTALES et. al., 2020). Isso faz com que além do ponto de exposição prolongado propriamente dito, seja um bom proxy da atividade de mineração.

Existem diversos mecanismos que podem ser utilizados para diminuir a contaminação gerada, como a impermeabilização do solo e a presença de lâminas de água no topo do resíduo, porém com o encerramento da atividade a manutenção da barragem também tende a se deteriorar (CACCIUTTOLO, CANO, CUSTODIO, 2021).

Existem diferentes substâncias potencialmente tóxicas, algumas com potencial cancerígeno de acordo com a IARC e relevância para a atividade de mineração, tanto pela presença na crosta terrestre em geral, quanto nos minérios alvo de atividade econômica; também são relevantes na fundição e produção de ligas metálicas e frequentemente estão presentes em resíduos de mineração (IARC, 2012; IARC, 2006). As substâncias potencialmente poluidoras variam a depender do tipo de minério tratado, da região de onde vem esse minério (no caso de não ser extraído no local das barragens) e do processo utilizado para o tratamento desse material. As vias mais comuns de absorção são a via gastrointestinal, por inalação ou por contato (IARC, 2012; IARC 2006; CACCIUTTOLO, CANO, CUSTODIO, 2021).

O câncer (CA) é um grupo de doenças crônicas não transmissíveis (DCNT) que ocupam a segunda posição quanto a principal causa de morte no mundo, sendo que o CA de pulmão, da próstata, colorretal, do estômago e do fígado são os tipos mais comuns na população masculina, enquanto o CA de mama, colorretal, pulmonar, cervical e de tireoide são os mais comuns entre as mulheres. Considerado um problema de saúde pública devido ao seu impacto individual e coletivo, o CA continua crescendo a nível mundial (WHO, 2022). Neste contexto, multiplicam-se os esforços para desenvolver estratégias de controle, identificação precoce e redução da exposição da população a fatores de risco (WHITEMAN; WILSON, 2016).

Em Minas Gerais, a atividade de mineração é uma das maiores responsáveis pela geração de riqueza e PIB do estado que é um dos principais afetados pela atividade do país (MINAS GERAIS, 2023; IBRAM 2024). Portanto, compreender o impacto que a atividade pode causar na vida das pessoas e no meio ambiente se torna uma tarefa indispensável para o campo da saúde coletiva. Tais fatos motivaram a elaboração deste estudo exploratório utilizando a localização das barragens de mineração como exposição, a taxa de mortalidade padronizada por câncer total e por cânceres específicos como desfechos e os municípios do estado de Minas Gerais como unidades de análise.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Panorama das barragens de mineração

A atividade mineradora é uma das principais atividades econômicas no mundo e existem vários possíveis mecanismos de contaminação humana gerada pelos depósitos dos rejeitos relacionados a ela (MACKLIN *et. al.*, 2023). Se destacam a ingestão e inalação de metais contaminantes, que ocorrem pela erosão do vento e contaminação de solo e água (MACKLIN *et. al.*, 2023; NASRAUOI, TRIFI, CHAREF, 2023; CACCIUTTOLO, CANO, CUSTODIO, 2021; SAKAN *et. al.*, 2024; GENG *et. al.*, 2022; ZHAO *et. al.*, 2021). Isso apresenta impacto tanto a nível comercial, como na agricultura e pecuária, quanto local, contaminando plantas e animais nativos. Essa contaminação tem importante efeito bioacumulador na cadeia alimentar (PARENTE *et. al.*, 2021; RUIZ-

HUERTA *et. al.*, 2022; LOREDO-PORTALES *et. al.*, 2020, MACKLIN *et. al.*, 2023).

No Brasil, existem normativas que orientam a construção de aterros de resíduos. Porém, a atividade mineradora precede essas regras, existindo barragens criadas previamente a essas regulações, bem como outros tipos de contaminação local gerada pela atividade (JABER, PROFETA, 2018). Além disso, a própria composição geológica pode apresentar níveis diferentes de substâncias consideradas toxicas ou carcinogênicas (CACCIUTTOLO, CANO, CUSTODIO, 2023).

Considerando isso, há uma dificuldade em diferenciar se a concentração de poluentes é prévia ou não à atividade antropogênica, e se a fonte do problema está relacionada à mineração ou a outras atividades, como a industrial e a agrícola (TEIXEIRA *et al.*, 2020; CACCIUTTOLO; CANO; CUSTODIO, 2023; PARENTE *et al.*, 2021). Ainda assim, as barragens de mineração são reconhecidas internacionalmente como fontes de contaminação ambiental de longo prazo, devido ao seu potencial de continuar liberando poluentes mesmo após o encerramento das atividades mineradoras no local (SAKAN *et al.*, 2024; GENG *et al.*, 2022; LOREDO-PORTALES *et al.*, 2020; CACCIUTTOLO; CANO; CUSTODIO, 2023).

Essa característica, aliada ao fato de que as áreas propícias à mineração frequentemente já apresentam níveis de contaminação anteriores à construção das barragens (PEDROSA-SOARES; VOLL; CUNHA, 2018; CACCIUTTOLO; CANO; CUSTODIO, 2021), torna essas estruturas marcadores geográficos estratégicos para a identificação e o monitoramento da exposição a rejeitos acumulados no ambiente.

O Brasil apresenta uma legislação considerada avançada na questão ambiental e no impacto a população quando se trata de extração de minério e seus depósitos de resíduos (DANTAS, FONTGALLAND, 2021). Todavia, a Política Nacional de Segurança em Barragens apresenta limitações importantes. Apesar de ter apresentado inovações recentes, ainda existem números consideráveis de barragens sem cadastro completo ou que atendam a condições consideradas mínimas para funcionamento registradas nos órgãos competentes.

Embora esse cenário se apresente melhor no conjunto de barragens de rejeito de mineração quando comparado a outras atividades, o desafio ainda é grande (BRASIL, 2021).

Em Minas Gerais (MG), existem importantes depósitos geológicos em exploração, e essa atividade econômica é uma das principais fontes de geração de riqueza para o estado. A mineração se iniciou em MG entre os séculos XVI e XVII com a exploração de ferro e metais preciosos. Alguns locais, como o quadrilátero ferrífero, apresentam atividade mineradora de longa data e existem estudos indicando a alta concentração de poluentes como o Arsênio (TEIXEIRA *et. al.*, 2020; JABER, PROFETA, 2018).

Grandes avanços legislativos foram realizados em busca da sustentabilidade da atividade, em especial, devido a motivação política e social após os desastres de Brumadinho e Mariana, que acarretaram perda de vidas e grande impacto ambiental, social e econômico. Contudo, o próprio relatório de segurança pontua as fragilidades de implementação e fiscalização da atividade mineradora. Apesar disso, o Brasil apresenta progressivamente uma melhora do seu banco de dados referentes as barragens (BRASIL, 2021).

No ano de 2022 segundo o Relatório de Segurança de Barragens ocorreram alguns acidentes e incidentes relacionados, com extravasamento do conteúdo ou falha no transporte do rejeito mineral. Ao se comparar com o informe dos acidentes e incidentes de outros tipos de barragens, é perceptível que as barragens fiscalizadas pela Agência Nacional de Mineração (ANM) apresentam um melhor descriptivo do ocorrido e propostas de mitigação de dano, mesmo quando apresentam, no relatório, informações faltantes. No relatório sobre o galgamento da barragem de mineração em Nova Lima, ocorrido em janeiro de 2022, é possível perceber claramente que ele é muito mais abrangente do que o relatório referente ao acidente considerado o mais relevante do ano, relacionado aos impactos do rompimento da barragem em Ouro Fino (BRASIL, 2021).

2.2 Cânceres relacionados aos metais pesados selecionados

2.2.1 metais pesados selecionados com potencial cancerígeno:

Foram selecionados, dentre alguns elementos potencialmente tóxicos comumente presentes em resíduos de mineração identificados em diversos estudos (LOREDO-PORTALES et al., 2020; BARCELOS et al., 2020; BUCH, 2021), os metais que apresentam maior potencial carcinogênico: Arsênio (As), Berilio (Be), Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Chumbo (Pb) e Níquel (Ni) (INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER, 2020; INCA, 2024).

O Arsênio inorgânico e seus derivados apresentam facilidade de absorção, em ordem, pela via oral, inalatória e dérmica. Grandes partículas retidas na via aérea superior podem ser posteriormente absorvidas via trato gastrointestinal caso engolidas (IARC, 2012).

O Chumbo inorgânico, apresenta variação importante da absorção pela via oral a depender da idade do exposto, status nutricional e tamanho de partícula. Indivíduos mais jovens absorvem uma fração maior que adultos. Quando expostos pela via inalatória, todo Chumbo depositado profundamente no trato respiratório inferior, será eventualmente absorvido. Quanto a absorção dérmica, essa é desprezível. Quanto aos compostos orgânicos do Chumbo, esses são absorvidos mais facilmente pela via respiratória e dérmica que seus pares inorgânicos (IARC, 2006).

O Cádmio apresenta uma baixa absorção por via do trato gastrointestinal, porém é a via na qual a maior parte da população geral está exposta. O Cádmio tem como característica uma taxa de excreção muito lenta, com meia vida entre 7-16 anos. Populações com exposição ocupacional apresentam principal via de absorção como a inalatória (IARC, 2012).

O Cromo, na sua apresentação de Cromo VI (Cr 6+) apresenta variação importante na taxa de absorção e excreção, a depender da solubilidade e do tamanho da partícula, propriedade essa que independente da via de absorção. Quando as vias de absorção são comparadas, a via respiratória apresenta maior capacidade de absorção no geral (IARC, 2012).

O Níquel, liberado no ambiente durante processos de mineração, fundição e refino, apresenta absorção predominante pela via inalatória em áreas mineradoras, devido à inalação de poeiras contendo o metal. Compostos

solúveis de Níquel são absorvidos mais facilmente, enquanto compostos insolúveis tendem a se acumular nos pulmões. A absorção pela via gastrointestinal é baixa, mas pode ocorrer em casos de contaminação da água e alimentos oriundos de áreas afetadas por rejeitos de mineração. O Níquel absorvido pode se acumular no fígado, rins e ossos, aumentando o risco de câncer de pulmão e seios nasais (INCA, 2024; IARC, 1990).

O Berílio, presente em minerais e rochas, é liberado no ambiente principalmente através da mineração e processamento industrial. A via inalatória é a principal rota de absorção, com a inalação de poeiras finas sendo comum em regiões mineradoras. O Berílio inalado pode aumentar o risco de câncer de pulmão. A absorção gastrointestinal é mínima, mas pode ocorrer através da ingestão de água e alimentos contaminados por rejeitos de mineração (INCA, 2024; IARC, 1993).

De acordo com as monografias da IARC Vol. 87 e Vol. 100C, o Arsênio e seus derivados causam câncer de pulmão, bexiga e pele (principalmente carcinoma espinocelular), além de apresentarem associação positiva com câncer de rim, fígado e próstata. O Cádmio e seus compostos causam câncer de pulmão e apresentam associação positiva com câncer de rim e próstata. O Cromo VI causa câncer de pulmão e apresenta associação positiva com câncer nasal e de seios da face. O Chumbo inorgânico é classificado como provavelmente carcinogênico (Grupo 2A), sem associação direta com subtipos específicos de câncer (IARC, 2006; IARC, 2012).

O Níquel e seus compostos são classificados como carcinogênicos para humanos (Grupo 1), estando associados ao câncer de pulmão e de seios nasais (IARC, 1990; INCA, 2024). O Berílio também é classificado como carcinogênico para humanos (Grupo 1), com forte evidência de que a exposição ocupacional, especialmente pela via inalatória, está associada ao desenvolvimento de câncer de pulmão (IARC, 1993; INCA, 2024).

2.2.2 Neoplasias relacionadas:

Existe uma limitação inerente à Classificação Internacional de Doenças (CID) para diferenciar o carcinoma espinocelular (CEC) de outros tipos de câncer de pele, como o carcinoma basocelular, especialmente nos registros de câncer que utilizam a CID padrão em vez da Classificação Internacional de Doenças para Oncologia (CID-O), que oferece uma codificação mais específica para neoplasias (INCA, 2016).

O câncer de bexiga é o 10º câncer mais diagnosticado no mundo e é mais comum em homens do que em mulheres. No Brasil, apresenta taxas de incidência e mortalidade padronizadas de 5,4 por 100.000 e 1,8 por 100.000 habitantes, respectivamente (GLOBOCAN, 2020). Dentre os metais associados ao câncer de bexiga, destaca-se o Arsênio (As), que é reconhecido pela IARC como um agente carcinogênico para esse tipo de câncer. A exposição crônica ao arsênio, especialmente por meio da água contaminada ou resíduos de mineração, tem sido associada a um aumento significativo no risco de câncer de bexiga. Estima-se que, em áreas com alta exposição ao arsênio, o risco de desenvolver câncer de bexiga possa ser até 2 a 3 vezes maior do que em populações não expostas (IARC, 2012).

O câncer de próstata é o segundo câncer mais frequente e a quinta causa de morte por câncer em homens no mundo. No Brasil, apresenta taxas de incidência e mortalidade padronizadas de 76,3 em 100.000 e 13,5 em 100.000, respectivamente (GLOBOCAN, 2020). Apesar de ser uma afecção comum, relativamente pouco é sabido quanto a sua etiologia. Existe um movimento em diversos continentes quanto ao estímulo de seu rastreio através do uso do antígeno prostático específico (PSA); a detecção precoce associada a avanços no tratamento influenciou na taxa de mortalidade em países de alta renda (GLOBOCAN, 2020).

O câncer de pulmão é o segundo tipo de câncer mais diagnosticado no mundo e maior causa de morte por câncer em 2020, representando 1 a cada 10 diagnósticos e 1 a cada 5 mortes. É mais comum em homens e apresenta um prognóstico reservado quanto à sobrevivência em 5 anos. Aproximadamente 2/3 das mortes por câncer de pulmão são atribuíveis ao tabaco, com a variação internacional das taxas refletindo a maturidade dos países quanto às medidas de controle do tabaco (GLOBOCAN, 2020).

Existe um esforço conjunto internacional, capitaneado pela ONU, de combate ao tabaco, incentivando medidas individuais, coletivas e governamentais. Em alguns estudos recentes percebe-se uma equalização na proporção mulheres/homens diagnosticados com câncer de pulmão nas coortes mais jovens em alguns países como Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Nova Zelândia, Holanda e Dinamarca, com aumento da taxa de incidência feminina e queda acentuada na taxa masculina. Essa mudança não foi completamente explicada pela diferença entre sexos de comportamento quanto ao tabaco (GLOBOCAN, 2020).

Existem algumas propostas de rastreio com tomografia computadorizada de baixa dose para grupos de alto risco. Porém, existe uma dificuldade em demonstrar benefício do rastreio da população geral, o que impede a implementação do rastreio como medida global de combate ao câncer de pulmão (GLOBOCAN, 2020). No Brasil apresenta taxas de incidência e mortalidade padronizadas de 14,9 em 100.000 e 12,5 em 100.000, respectivamente (GLOBOCAN, 2020).

O câncer de fígado primário é o sexto tipo de câncer mais diagnosticado no mundo e terceira causa de morte por câncer em 2020; é mais comum em homens, e os principais fatores de risco estão relacionados a infecção crônica por hepatite B ou C e comidas contaminadas por aflatoxinas. Enquanto os fatores de risco não virais têm ganhado relevância no impacto ao câncer de fígado, a erradicação da hepatite viral permanece como principal medida global de prevenção primária. No Brasil apresenta taxas de incidência e mortalidade padronizadas de 4,5 em 100.000 e 4,3 em 100.000, respectivamente (GLOBOCAN, 2020).

O Câncer Renal no Brasil apresenta taxas de incidência e mortalidade padronizadas de 3,9 em 100.000 e 1,5 em 100.000, respectivamente (GLOBOCAN, 2020). O Câncer de nariz e seios da face no Brasil não tem seus dados especificados na *Cancer Today* da IARC ou na GLOBOCAN. Geralmente ele é estudado agrupado junto com outros canceres escamosos de face, uma vez que, não existe uma subdivisão clara no CID-10.

2.3 Classificação da carcinogenicidade das substâncias selecionadas segundo a International Agency for Research on Cancer (IARC)

A IARC tem, como um dos objetivos, identificar as causas de câncer em humanos, e através de um grupo internacional de especialistas procura publicar revisões críticas e avaliar a qualidade das evidências disponíveis sobre a capacidade de um agente alterar a incidência de câncer em humanos, bem como indicar onde esforços em pesquisa são necessários por meio de suas monografias.

Os três principais critérios de avaliação são: estudos de carcinogenicidade em humanos, em experimentos animais e lógica fisiopatológica. Nos dois primeiros tópicos se avalia se a evidência de carcinogenicidade é suficiente, limitada, inadequada ou se sugere não carcinogenicidade; o terceiro tópico avalia dados sobre lesões pré-neoplásicas, patologia tumoral, genética e efeitos relacionados, relações de atividade estrutural, metabolismo e toxicocinética, parâmetros físico-químicos e agentes biológicos análogos.

Após fazer um apanhado dessas informações e analisar o conjunto, o agente é agrupado em uma de 5 categorias. São elas, grupo 1 (carcinogênico), grupo 2A (provavelmente carcinogênico), grupo 2B (possivelmente carcinogênico), grupo 3 (não classificável) e grupo 4 (provavelmente não carcinogênico). Neste texto será explicada apenas a lógica por trás da seleção dos dois primeiros grupos, nos quais se enquadram os agentes do estudo.

O grupo 1 agrupa agentes que apresentaram estudos em humanos com evidência suficiente para carcinogenicidade. Excepcionalmente, podem ser incluídos nessa categoria, agentes em que a evidência é menos do que suficiente em humanos, porém suficiente em experimentos animais, com evidência forte de que o agente age através de um mecanismo relevante de carcinogenicidade em humanos (IARC, 2012). Esse grupo engloba os metais selecionados Arsênio, Berílio, Cromo, Cádmio e Níquel.

O grupo 2A agrupa agentes que apresentam evidência limitada quanto a carcinogenicidade em humanos e evidência suficiente em experimentos animais. Podem ser incluídos agentes com evidência inadequada em humanos, mas suficiente em estudos animais com forte evidência de mecanismo de ação

carcinogênico que também ocorre em humanos. Excepcionalmente, um agente pode entrar nessa categoria apenas com evidências limitadas em humanos, se, através da análise mecanicista, ele claramente pertença a uma classe de agentes com um ou mais de seus representantes categorizados como 1 ou 2A (IARC, 2012). Dentre os metais selecionados, o Chumbo está nesta categoria.

2.4 Caracterização de Barragens de Mineração

Duas caracterizações importantes utilizadas na avaliação de barragens são o Dano Potencial Associado (DPA) e Categoria de Risco (CRI). O DPA considera o dano que pode ocorrer pela infiltração, rompimento, mal funcionamento ou vazamento de uma barragem. Sua graduação vai depender do volume da barragem, potencial de perdas de vidas humanas, impactos sociais e ambientais. O DPA não leva em consideração a probabilidade de que esse dano ocorra e é dividido em três categorias: alto, médio e baixo.

O CRI já é classificado considerando aspectos que podem influenciar em acidentes e desastres, como atendimento ao plano de segurança de barragem, método construtivo, idade do empreendimento, características técnicas e estado de conservação.

Nas barragens de mineração a classificação do DPA, considerando a pontuação de cada categoria, enseja pela legislação, variação no detalhamento do cuidado em itens como: monitoramento automático, vídeo monitoramento, sistemas automáticos de sirene, periodicidade de revisão de segurança, aplicação do processo de gestão de riscos para barragens de mineração (PGRBM) (BRASIL, 2022).

2.5 Políticas públicas e as principais legislações relacionadas a atividade mineradora

Em 1981 foi criada a Política Nacional do Meio Ambiente por meio da lei nº 6.938, e dispõe sobre os fins, mecanismos de formulação e aplicação de ações que promovessem a preservação, a melhoria e a recuperação da qualidade ambiental considerando o desenvolvimento socioeconômico, os

interesses de segurança nacional e a proteção à vida humana. Além disso, instituiu o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), que é constituído de órgãos e entidades das três esferas de governo e as fundações instituídas pelo poder público que são responsáveis pela proteção ambiental nos termos da lei (BRASIL, 1981).

A Constituição Federal de 1988 (CF88) inclui como competência comum a União, Estados e Municípios proteger o meio ambiente e combater a poluição em qualquer de suas formas. De mesmo modo que afirma no art. 225 que todos têm direito ao meio ambiente saudável para qualidade de vida, cabendo ao Poder Público e aos cidadãos o dever de defender e preservá-lo em nome da presente e das futuras gerações (BRASIL, 1988).

Em 2000, foi criada a lei nº 10.165, que altera a Lei nº 6.938; ela instituiu a Taxa de Controle e Fiscalização Ambiental — TCFA, que é executada pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) para controle e fiscalização das atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos naturais. A lei estabelece, atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos ambientais, dentre elas a indústria de mineração.

Em 2011 foi editada a Lei Complementar nº 140, que estabeleceu as competências da União, Estado, Municípios e o Distrito Federal no que tange a questão ambiental no país, reforçando a cooperação entre as esferas de poder (BRASIL, 2011).

Com base nesta legislação, o SISNAMA se compõe com o Conselho de Governo como órgão superior no país, cabendo a ele assessorar na manutenção da política nacional e nas diretrizes governamentais que se relaciona ao meio ambiente e os recursos ambientais. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é um órgão deliberativo e consultivo que propõe as diretrizes e políticas de meio ambiente e recursos naturais; sendo responsável, ainda, por decidir sobre normas e regras compatíveis com a qualidade do meio ambiente (BRASIL, 2011).

O Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima é o órgão central das ações públicas relacionadas ao assunto. Cabe a ele, dentre outras funções, a

supervisão e controle das diretrizes de governo vigentes. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) são órgãos executores no âmbito público, ou seja, salvando suas competências, eles executam e fazem executar as normativas ambientais vigentes (BRASIL, 2011).

As barragens de mineração são atividades supervisionadas pelo IBAMA e, em 2010, receberam maior atenção por meio da criação da lei nº 12.334, que estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), para registro informatizado das condições de segurança de barragens em todo o país (BRASIL, 2010).

A legislação determinou que é responsabilidade do empreendedor a manutenção e segurança das barragens, ao passo que a fiscalização da segurança das barragens, passa a ser atribuída a quatro diferentes grupos divididos quanto a finalidade do tipo de barragem. Com isso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável pela fiscalização de Barragens para geração de energia; o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) por Barragens para contenção de rejeitos minerais; o IBAMA ou órgãos ambientais estaduais e municipais fiscalizam barragens para contenção de rejeitos industriais e; a Agência Nacional de Águas (ANA) ou órgãos gestores hídricos estaduais por barragens de usos múltiplos (BRASIL, 2010).

Em 2014, o IBAMA lançou a Instrução Normativa nº 15, que instituiu o Sistema Nacional de Emergências Ambientais (Siema), que informatiza a comunicação de acidentes ambientais possibilitando a visualização de mapas e análises estatísticas sobre os acidentes ambientais registrados pelo órgão (BRASIL, 2014).

No cenário atual, o IBAMA faz cumprir os dispostos na lei 10.165/2000, que trata do cadastro de barragens que é devido a todo empreendimento que possua barragem — seja de resíduos ou água, além do Relatório Anual de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Ambientais (RAPP), um documento obrigatório para o funcionamento destes locais; e o

Relatório Anual para Barragens, que é específico para atividades de barragens sujeitas a Taxa de Controle de Fiscalização Ambiental (TCFA).

No estado de MG, a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) foi criada em 1995 pela lei nº 11.903 (MINAS GERAIS, 1995). Em 2019, o decreto nº 47.787 dispõe sobre a vigente versão da normativa de organização da SEMAD e, segundo o documento, fica a cargo da Subsecretaria de Fiscalização Ambiental (SFA) a fiscalização ambiental no Estado, dentre outras funções, e entre as atribuições está incluída a gestão do Cadastro Técnico Estadual de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de recursos Ambientais e do Cadastro Estadual de Controle, Monitoramento e Fiscalização das Atividades de Pesquisa, Lavra, Exploração e Aproveitamento de recursos Minerários (MINAS GERAIS, 2019).

Em 2021, foi instituída a Política Estadual dos Atingidos por Barragens (PEAB) através da lei nº 23.795. Segundo a lei, define-se barragem construção destinada à acumulação ou disposição final ou temporária de água, resíduos ou rejeitos que apresentem: altura do maciço, medida do encontro do pé do talude de jusante com o nível do solo até a crista de coroamento do barramento, maior ou igual a 15m (quinze metros); capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³; reservatório que contenha resíduos perigosos; ou que estejam classificados na categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas (MINAS GERAIS, 2021).

Em 2019 foi publicada a resolução estadual nº 2.784, instituindo em MG a Política Estadual de Segurança de Barragens (MINAS GERAIS, 2019). Em 2023 o decreto nº 48.747 do Estado de Minas Gerais regulamentou a caução ambiental citado no art. 7º da Lei nº 23.291/2019; com isso, o licenciamento de atividade em barragens passa a ser licenciado a cada cinco anos, além de exigir a caução que deverá ser pago ao estado (MINAS GERAIS, 2023).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Investigar a associação entre a proximidade de barragens de rejeitos de mineração e a mortalidade por câncer em municípios de Minas Gerais (MG).

3.2 Objetivos específicos

- Analisar a distribuição espacial da mortalidade por câncer nos municípios de Minas Gerais.
- Analisar a distribuição espacial das barragens de rejeitos de mineração.
- Analisar a correlação espacial entre a mortalidade por câncer e a localização das barragens de rejeito de mineração nos municípios de Minas Gerais.

6 MATERIAIS E METODOS

Trata-se de estudo observacional, de abordagem quantitativa, com delineamento ecológico com análise espacial, realizado com informações disponíveis no Sistema de Informação de Mortalidade (SIM) do Sistema Único de Saúde (SUS), no banco de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). As unidades geográficas de análise foram os municípios de Minas Gerais no período de 2010 a 2019. Para facilitar a visualização da localização geográfica foi utilizado um mapa com as macrorregiões de saúde do estado de Minas Gerais (Figura 1).

Foram selecionadas algumas localizações de câncer para uma análise mais específica, com base na presença de 4 metais pesados tipicamente relacionados com os resíduos da atividade de extração e tratamento de minério, considerando prevalência, gravidade de exposição e potencial cancerígeno: Cádmio (grupo 1 IARC), Cromo VI (grupo 1 IARC), Arsênio (grupo 1 IARC) e Chumbo (grupo 2A IARC). Os três primeiros estão relacionados a localizações específicas de câncer: pulmão, próstata, rim, nariz, seios da face, bexiga e fígado (IARC, 2012).

O Chumbo, devido a sua prevalência como contaminante e de ser demonstrado o risco de bioacumulação e potencial cancerígeno em estudos recentes com plantas e microrganismos próximos a barragens de mineração (GENG *et. al.*, 2022; SAKAN *et. al.*, 2024; LOREDO-PORTALES *et. al.*, 2020; RUIZ-HUERTA *et. al.*, 2024; IARC, 2006), motivou a análise também da mortalidade geral por câncer.

Foram utilizados dados do SIM, IBGE e SNISB quanto a mortalidade, população e localização das barragens, respectivamente. Foi utilizado o programa R para as análises estatísticas. Para reduzir a flutuação aleatória decorrente da análise de pequenas populações, com baixas frequências de eventos, como são muitos municípios de Minas Gerais, foram agregados os dados de mortalidade do período de 2010 a 2019.

No que diz respeito às informações sobre as barragens, foram utilizados dados do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens

(SNISB). Esse sistema, coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), é considerado a principal fonte de dados sobre a segurança de barragens no Brasil, consolidando informações fornecidas por diferentes órgãos fiscalizadores em âmbito federal, estadual e municipal (ANA, 2022).

No entanto, a cobertura do SNISB pode apresentar limitações, especialmente em relação à atualização e completude dos dados, uma vez que depende do envio regular de informações pelas entidades responsáveis. Barragens que não contêm resíduos perigosos não são reguladas pelo Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e, portanto, não se encontram no banco de dados utilizado (ANA, 2022). Para este estudo, foram incluídas apenas as barragens referentes a resíduos de mineração, ou seja, todas as barragens que abrigam resíduos provenientes da extração e tratamento de minérios, sendo excluídas aquelas destinadas a outros fins.

Embora o período de análise da mortalidade por câncer corresponda a 2010–2019, utilizou-se a base cartográfica mais recente disponível para as macrorregiões de saúde (2023) e para a localização das barragens de rejeitos. Essa decisão deve-se à maior completude e confiabilidade dos dados em anos recentes, considerando que essas estruturas tendem a permanecer estáveis no território e constituem fontes de contaminação ambiental de caráter prolongado.

Foi realizada a padronização por idade das taxas de mortalidade por câncer nos municípios de Minas Gerais, no período de 2010 a 2019, pelo método direto, utilizando a população padrão de Segi modificada por Doll et al. (1966). Os óbitos e as populações foram agregados em faixas etárias quinquenais e, em seguida, aplicou-se a função *age_adjust()* do pacote *brprop* no R para estimar as taxas padronizadas médias anuais. Como variável de exposição, considerou-se a distância, em quilômetros e em linha reta, entre a barragem de rejeitos mais próxima e o centróide da sede de cada município (Figuras 2 e 3).

Não houve empate nos valores de distância, sendo sempre possível identificar a barragem mais próxima de cada sede municipal. Para visualizar as diferenças na distribuição das taxas de mortalidade entre os municípios com e

sem barragens, foi utilizado o *boxplot* como representação gráfica, permitindo uma comparação clara das variações e possíveis outliers.

Os testes de Moran confirmaram a presença de padrões espaciais nas taxas de mortalidade por câncer em Minas Gerais. Os mapas LISA permitiram identificar agrupamentos locais de altas e baixas taxas — os chamados *hotspots* e *coldspots* — evidenciando áreas com comportamento espacial não aleatório, particularmente nas regiões Sul, Centro-Sul e Triângulo Mineiro.

Para a representação espacial das variáveis, foram elaborados mapas temáticos abrangendo todos os municípios do estado de Minas Gerais. As taxas de mortalidade padronizadas foram representadas por graduações de cor, sendo que, nos mapas com foco no sexo feminino, a intensidade da cor vermelha indicou a magnitude da taxa — com tons mais escuros representando valores mais elevados.

Nos mapas referentes ao sexo masculino, adotou-se a mesma lógica cromática, com graduação da cor azul, em que os tons mais intensos representaram valores mais altos de mortalidade. As fronteiras das macrorregiões de saúde foram sobrepostas aos mapas para fins de referência geográfica e contextualização regional.

FIGURA 1 – Mapa das macrorregiões de saúde do estado de Minas Gerais, 2023.

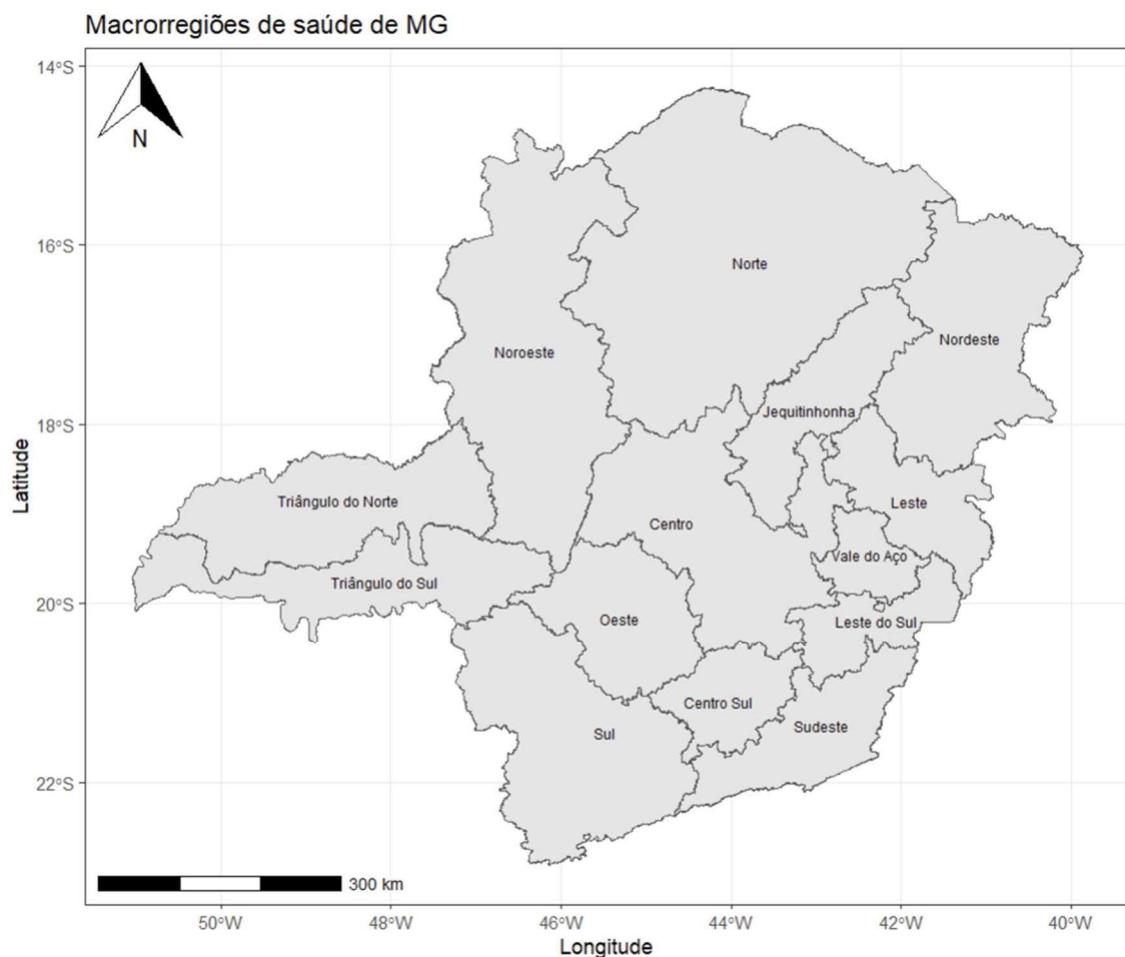


FIGURA 2 — Mapa com a localização das barragens de mineração estudadas, Minas Gerais, 2023.

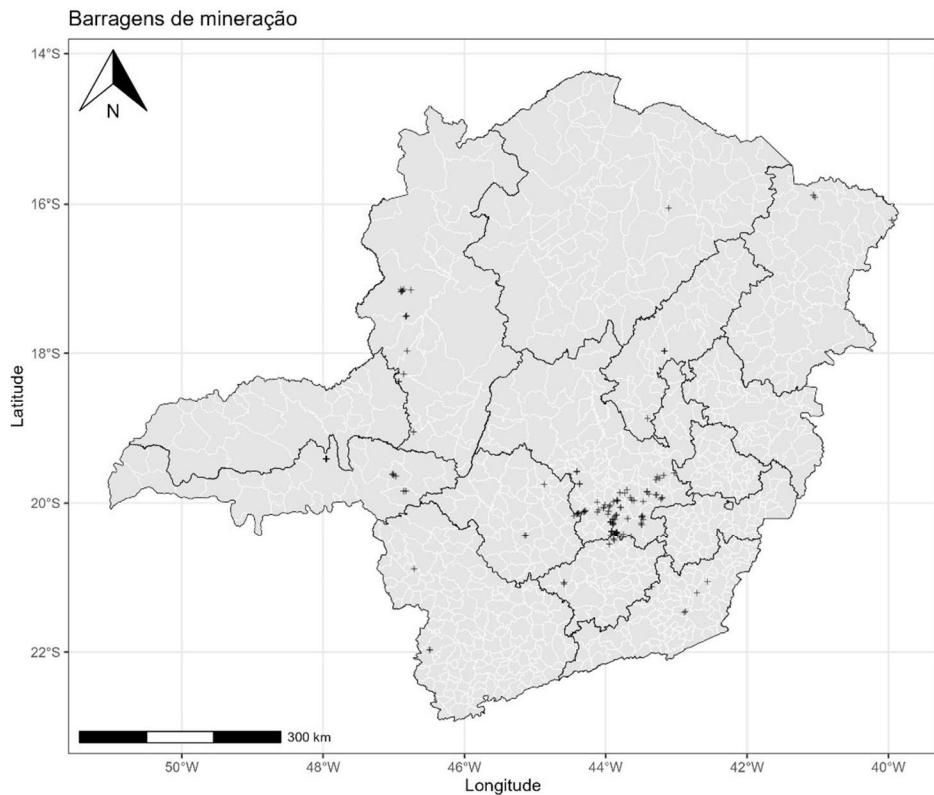
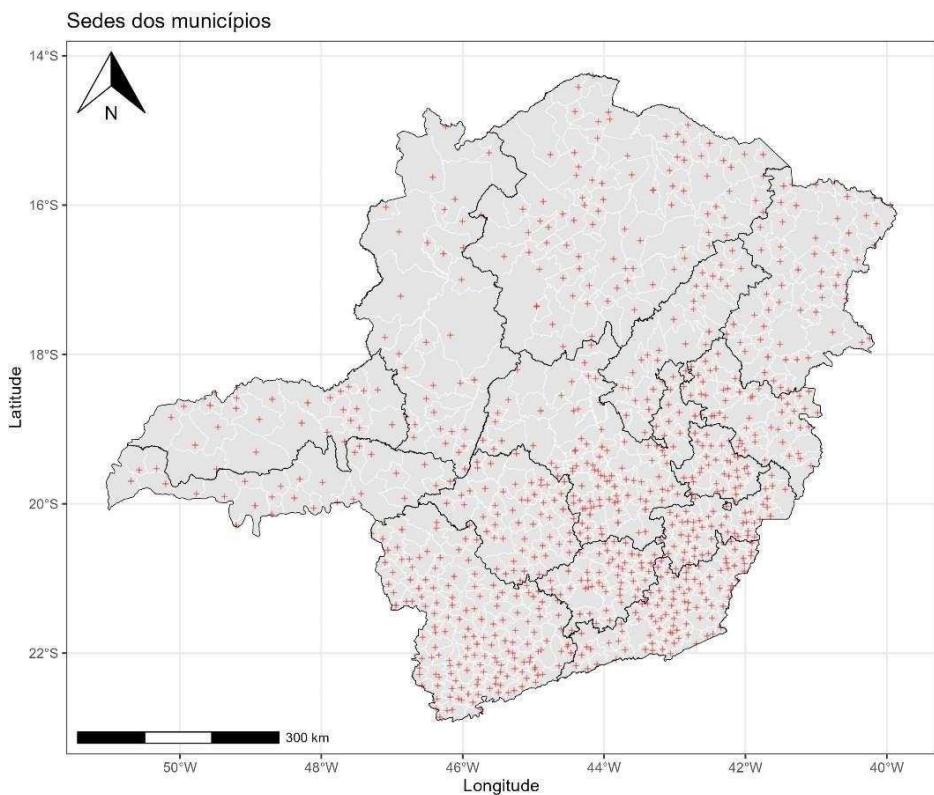


FIGURA 3 – Mapa da localização das sedes dos municípios de Minas Gerais, 2010.



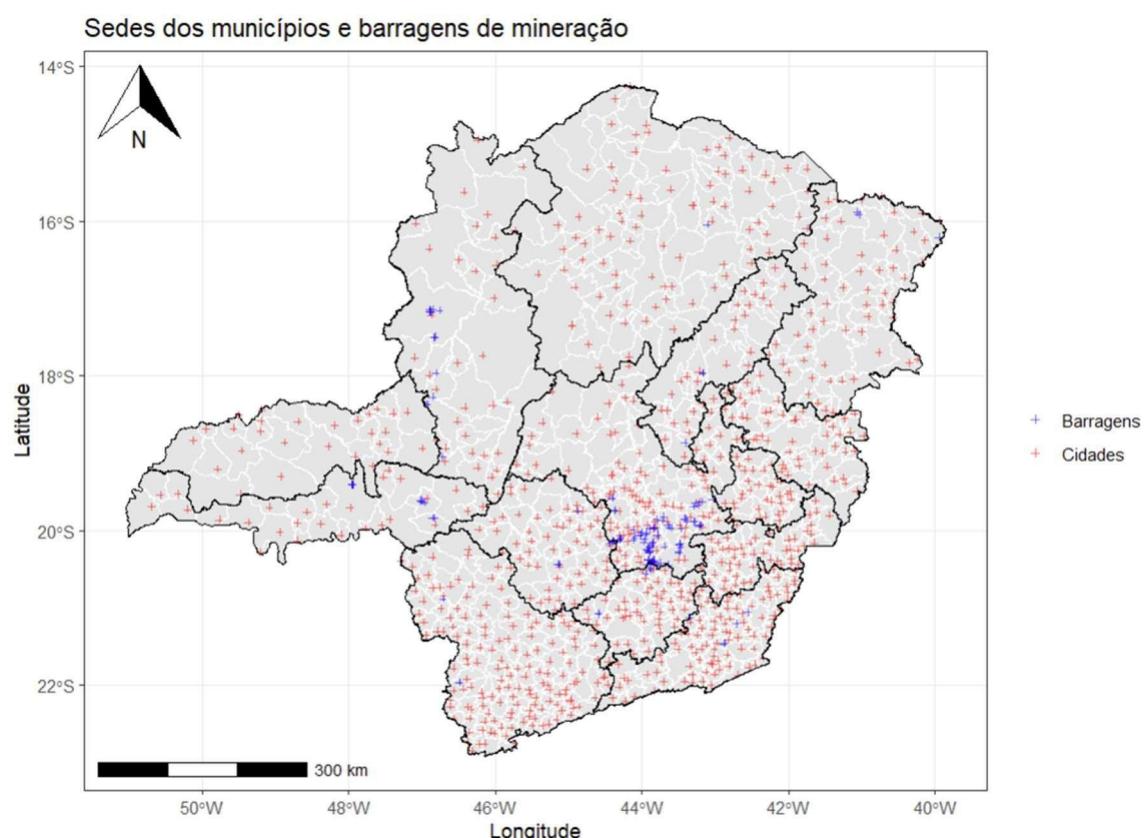
Para a análise foi utilizado o programa RStudio, que é um software de desenvolvimento integrado para R — uma linguagem de programação voltada

para gráficos, mapas e cálculos estatísticos. Esta pesquisa utilizou dados secundários de domínio público provenientes do Sistema de Informação sobre Mortalidade (SIM/DATASUS), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB/ANA), razão pela qual não necessita ser submetida à avaliação de um Comitê de Ética em Pesquisa (CEP), conforme Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde.

7 RESULTADOS

Percebe-se uma concentração de barragens nas macrorregiões de saúde Centro, Triângulo do Sul e Noroeste, sendo a macrorregião Centro a com maior densidade de barragens e concentrado em especial próximo à fronteira com a macrorregião Centro Sul. As macrorregiões Sudeste, Oeste, Sul e Jequitinhonha apresentam de forma mais esparsa; Norte e Nordeste apresentam poucas ocorrências e as demais Macrorregiões não apresentam barragens de mineração pelo banco de dados disponível.

Figura 4 – Sedes dos Municípios e Barragens de Mineração



O mapa permite observar que há uma concentração maior de barragens na região central-sudeste do estado, com destaque para áreas conhecidas por intensa atividade minerária. É possível, ainda, reconhecer a proximidade entre populações urbanas e empreendimentos de mineração, sugerindo regiões potencialmente mais expostas a riscos ambientais ou sanitários associados às barragens (Figura 4).

A taxa de mortalidade padronizada por câncer apresentou diferenças marcantes entre os sexos, sendo consistentemente mais elevada entre os homens. Tanto na análise da mortalidade geral quanto nas localizações específicas, a taxa média masculina superou de forma considerável a feminina, conforme evidenciado nas Tabelas 1 e 2. Além disso, observou-se que a distância entre as sedes municipais e as barragens de rejeitos variou entre 2 e 288 km, com média de 76,84 km, o que demonstra ampla heterogeneidade na exposição geográfica entre os municípios avaliados.

TABELA 1 – Mortalidade por Câncer Geral no Estado de Minas Gerais (2010-2019), por 100.000 habitantes

VARIÁVEL	Min	Q1	Q2	Q3	Max	Média	DP
Taxa Feminina	11,67	49,13	59,64	68,08	137,36	58,68	15,13
Taxa Masculina	9,23	72,49	85,10	96,35	153,38	84,45	19,51
Distância	1,90	36,70	66,40	107,30	288,00	76,84	52,72

Min: Mínimo. Q1: primeiro quartil. Q2: mediana. Q3: terceiro quartil. Max: Máximo. DP: Desvio Padrão

TABELA 2 – Mortalidade por Cânceres Específicos¹ no Estado de Minas Gerais (2010-2019), por 100.000 habitantes

VARIÁVEL	Min	Q1	Q2	Q3	Max	Média	DP
Taxa Feminina	0	5,58	8,88	11,8	29,87	9,11	4,98
Taxa Masculina	0	18,94	25,20	31,27	56,05	25,31	9,02
Distância	1,90	36,70	66,40	107,3	288,00	76,84	52,72

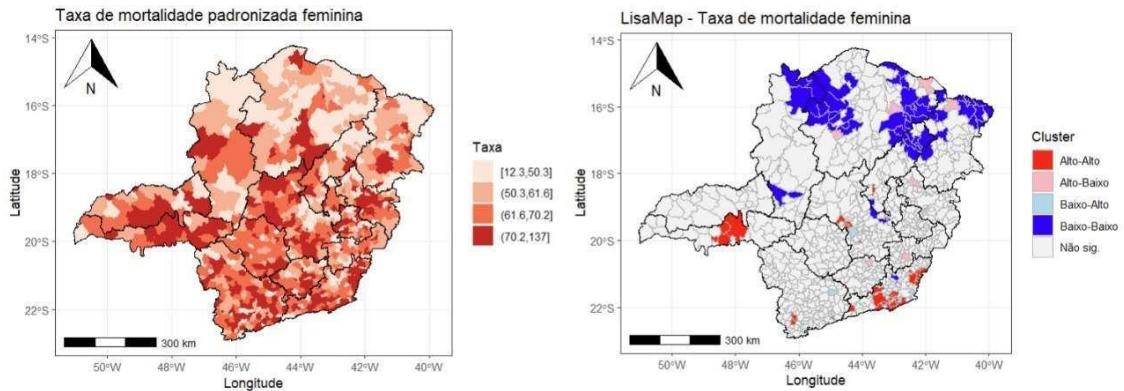
Min: Mínimo. Q1: primeiro quartil. Q2: mediana. Q3: terceiro quartil. Max: Máximo. DP: Desvio Padrão

Observa-se uma distribuição heterogênea das taxas de mortalidade total por câncer feminino entre as macrorregiões de saúde, com predomínio de valores mais baixos nas regiões Norte e Nordeste. Em contrapartida, destacam-se áreas com taxas mais elevadas nas regiões Sul, Sudeste, Centro, Triângulo do Sul, Triângulo do Norte e Centro-Sul do estado, configurando um padrão de concentração em determinadas porções do território.

A presença de municípios com taxas elevadas contíguos a municípios com taxas mais baixas sugere, em alguns casos, transições abruptas e descontinuidade espacial, indicando a existência de fatores locais específicos que merecem investigação adicional (Figura 5).

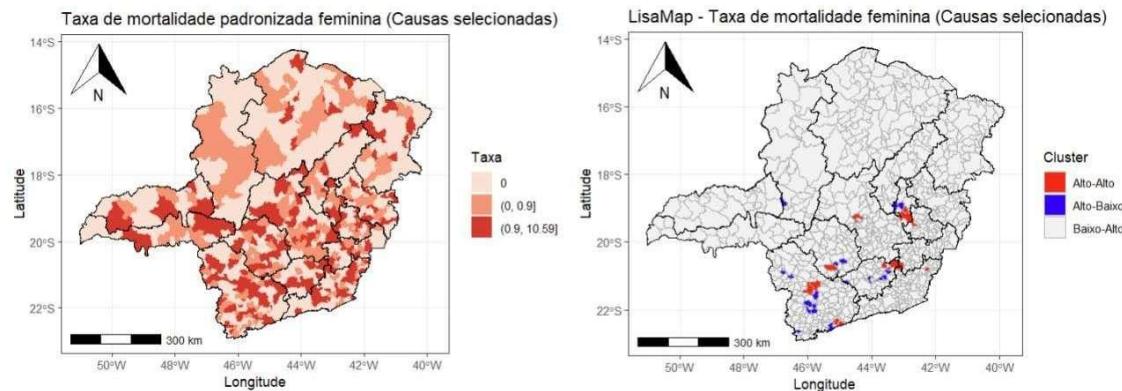
¹ Pulmão, próstata, rim, nariz, seios da face, bexiga e fígado.

Figura 5 - Taxa de mortalidade por cancer padronizada feminina categorizada e o LisaMap feminino



Na figura 6, onde fala sobre a mortalidade feminina por cânceres selecionados por exposição a metais pesados, percebe-se também a região Norte e Noroeste com menores taxas padronizadas, e nota-se a formação de clusters alto-alto em áreas próximas às regiões Sul, Oeste, Centro-Sul e parte da macrorregião Central de Minas Gerais, em especial entre Vale do Aço e Jequitinhonha, mostrando agrupamentos espaciais de municípios com altas taxas vizinhas entre si.

Figura 6 - LisaMap - Taxa de mortalidade padronizada feminina categorizada e o LisaMap feminino por canceres selecionadas.



A figura 7 e 8 respectivamente inserem a localização das barragens nos LisaMaps de mortalidade por câncer geral e por canceres selecionados femininos.

Na figura 7 percebe-se na região Norte e Nordeste existe uma sobreposição de cluster alto-baixo com a localização de barragens. Na região Triângulo do Sul e Sudeste existe superposição entre clusters alto-alto e a

proximidade da localização de barragens. Na região Centro, onde a maioria das barragens se localiza, observa-se a presença de cluster baixo-alto ao lado de um cluster alto-alto com pelo menos uma barragem contida em cada.

Na figura 8 os clusters alto-alto predominam no entorno da área com maior densidade de barragens - sem que essas estejam efetivamente contidas nos clusters. Na região Sul e na região Centro - entre o Vale do Aço e Jequitinhonha - há clusters alto-alto.

Figura 7 - LisaMap da taxa de mortalidade feminina por câncer, com sobreposição das barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais.

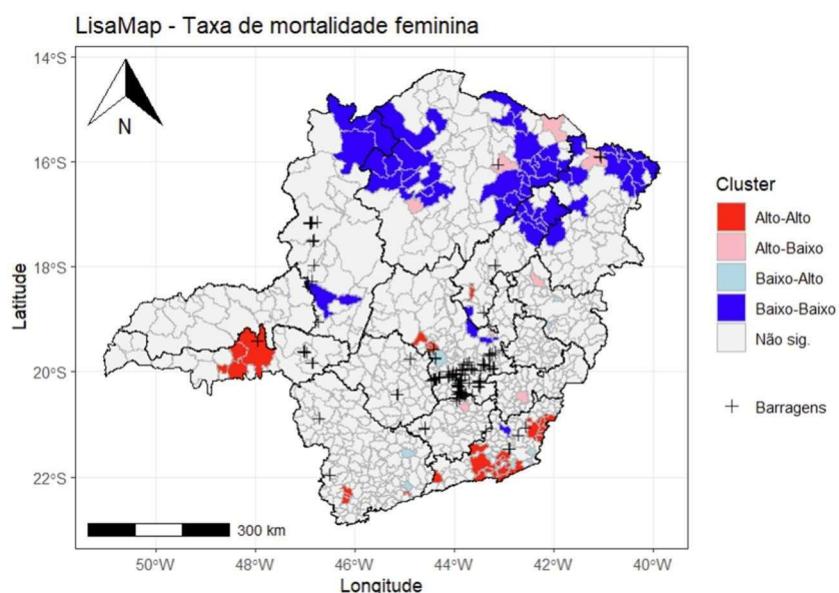
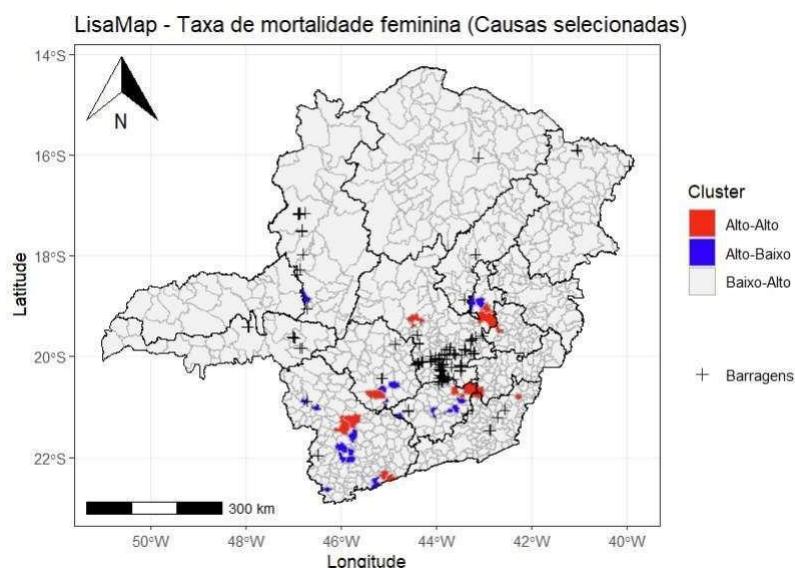
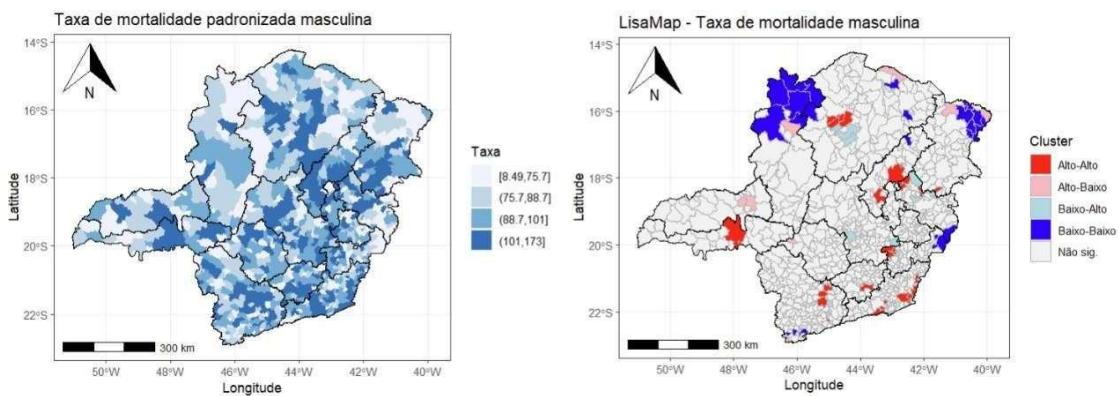


Figura 8 - LisaMap da taxa de mortalidade feminina por canceres selecionados, com sobreposição das barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais



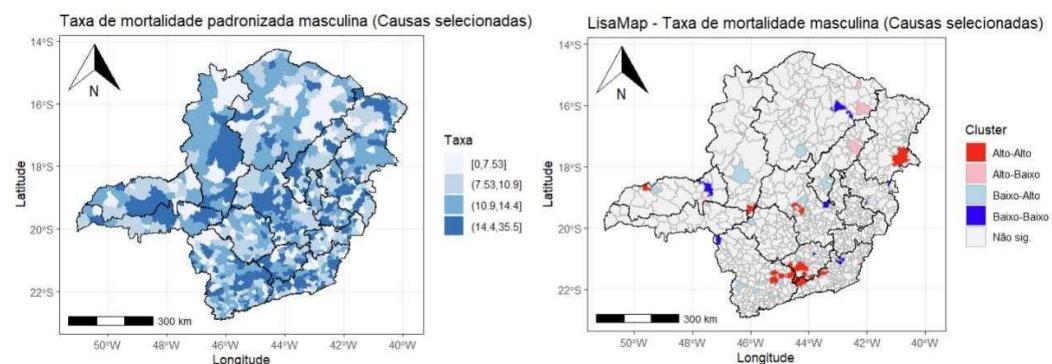
É possível comparar a distribuição categorizada da taxa de mortalidade padronizada por câncer total em homens com a identificação de agrupamentos espaciais significativos por meio do LisaMap. Em áreas com taxas elevadas no mapa coroplético (à esquerda) correspondem, em grande parte, a clusters alto-alto detectados na análise local de autocorrelação espacial (à direita), com destaque para regiões do Sul, Centro-Sul e parte da macrorregião Central do estado.

Figura 9 - Taxa de mortalidade padronizada masculina por câncer categorizada e o LisaMap masculino



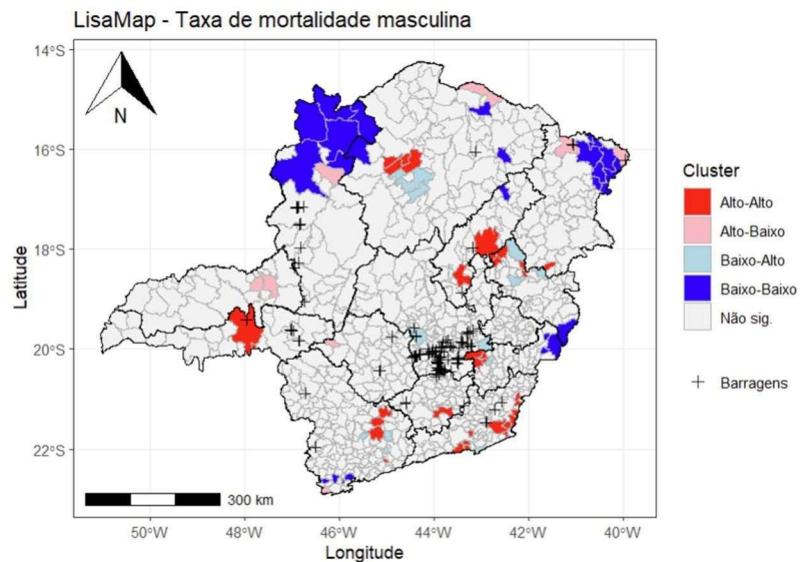
Na figura 10, onde se apresenta a taxa de mortalidade padronizada masculina e o LisaMap de cânceres selecionados por causas relacionadas a metais pesados apenas a região norte apresenta consistentemente taxas de mortalidade mais baixas. Já os agrupamentos de clusters alto-alto predominam nas divisas entre regiões Sul, Centro Sul e Sudeste, além da região Nordeste, Centro, Noroeste e Triângulo do Norte. Os clusters baixo-baixo são de pequena extensão e os clusters baixo-alto e alto-baixo são mais frequentes.

Figura 10 - Taxa de mortalidade padronizada masculina categorizada por cânceres selecionados e o LisaMap masculino



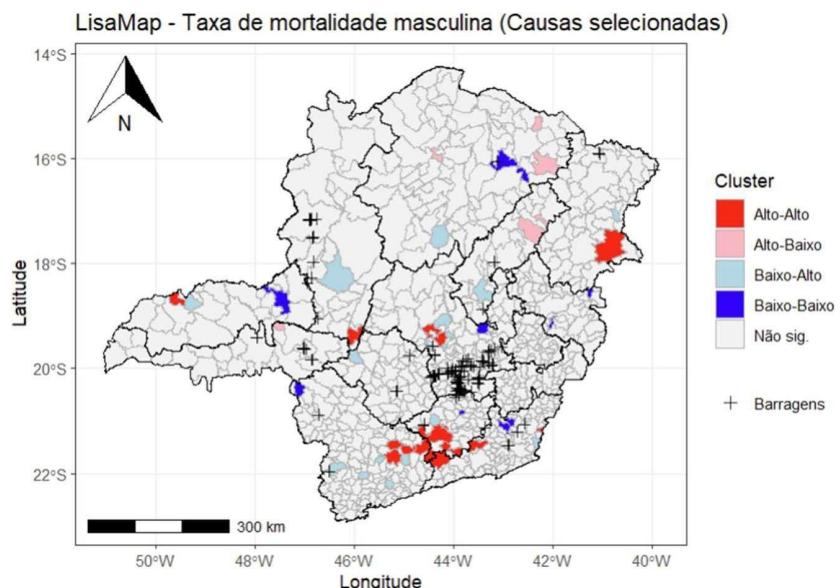
Na imagem 11 percebe-se a coincidência entre clusters alto-baixo na região Nordeste e a localização de barragens e entre clusters alto-alto e barragens nas regiões Triângulo do Sul, Sudeste e Jequitinhonha.

Figura 11 - LisaMap da taxa de mortalidade masculina por câncer, com sobreposição das barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais.



Na figura 12 referente aos cânceres selecionados percebe-se a sobreposição entre um cluster baixo-baixo na região Norte e uma concentração de clusters alto-alto nas divisas entre Centro Sul, Sudeste e Sudeste. (Figura 12).

Figura 12 — LisaMap da taxa de mortalidade masculina para cânceres selecionados com sobreposição das barragens de rejeitos de mineração em Minas Gerais.



A matriz de correlação espacial bivariada de Lee (L de Lee) foi utilizada para avaliar a associação entre a proximidade das barragens de rejeitos de mineração e as taxas de mortalidade padronizadas por câncer, estratificadas por sexo e tipo de câncer. Os resultados indicaram correlação espacial negativa entre a distância às barragens e as taxas de mortalidade geral por câncer em ambos os sexos, sendo mais pronunciada no sexo feminino. Para os cânceres específicos, a associação foi observada apenas entre as mulheres, enquanto no grupo masculino não se identificou associação.

Esses achados sugerem um padrão de associação espacial inversa, em que municípios mais próximos das barragens tendem a apresentar maiores taxas de mortalidade por câncer, especialmente entre a população feminina.

TABELA 3 – Correlação espacial bivariada L de Lee entre as Taxas de Mortalidade por Câncer Padronizadas por Idade no sexo Masculino e Feminino com a distância entre o centroide da sede dos Municípios e a Barragem mais próxima.

	Geral		Específicos	
	Distância	P-valor	Distância	P-valor
TAXA MASCULINA	-0,076	P=0,002	- 0,028	P=0,076
TAXA FEMININA	- 0,129	P=0,002	- 0,082	P=0,002

8 DISCUSSÃO

Os resultados desta pesquisa indicam uma associação negativa entre a distância das barragens de rejeitos de mineração e as taxas de mortalidade por câncer, particularmente entre as mulheres. Ainda que os coeficientes tenham apresentado baixa magnitude, a presença dessa associação — observada de forma geral no sexo feminino e apenas para a mortalidade geral por câncer entre homens — reforça a hipótese de um possível impacto ambiental da atividade mineradora sobre a saúde da população (LOREDO-PORTALES et al., 2020; GENG et al., 2022; SAKAN et al., 2024).

Essa proximidade espacial sugere que áreas com maior exposição ambiental podem coincidir com padrões elevados de mortalidade feminino, ainda que essa relação demande confirmação com controle de variáveis intervenientes. A análise espacial por meio dos mapas LISA permitiu identificar agrupamentos geográficos significativos (clusters alto-alto) próximos a áreas mineradoras, sobretudo nas regiões Central, Sul e Sudeste de Minas Gerais.

A análise espacial por meio dos mapas LISA permitiu identificar agrupamentos geográficos significativos (clusters alto-alto) próximos a áreas mineradoras, sobretudo nas regiões Central, Sul e Sudeste de Minas Gerais. Tais agrupamentos indicam que municípios vizinhos compartilham padrões semelhantes de mortalidade, sugerindo um processo territorializado de adoecimento (BRASIL, 2022; ANA, 2022). A sobreposição dessas regiões com a localização das barragens de rejeitos reforça a hipótese de coincidência espacial entre áreas de maior exposição e piores desfechos em saúde.

A discussão sobre a necessidade de estratégias de vigilância e estudos individuais é solidamente apoiada pelo estudo realizado na região de Mojana, Colômbia, que fornece um modelo prático de investigação sobre a exposição a metais pesados oriundos da mineração. Enquanto o presente estudo aborda o potencial carcinogênico de elementos como arsênio, cádmio e chumbo liberados pelas barragens de rejeitos, a pesquisa colombiana — focada na mineração artesanal de ouro — investigou a exposição ao mercúrio (Hg), um metal pesado tóxico. De acordo com DÍAZ et al. (2020), o estudo transversal incluiu 428 mulheres e meninas, revelando que 62,8% apresentavam valores de mercúrio acima do limite máximo em pelo menos uma matriz biológica (sangue, urina ou cabelo). Fatores como a frequência de consumo de peixe contaminado e a fonte

de água potável foram significativamente associados a níveis elevados de mercúrio, evidenciando que a exposição não ocupacional está fortemente ligada à poluição ambiental.

O foco da investigação em mulheres e gestantes, que apresentaram níveis mais altos de mercúrio no sangue, corrobora a maior magnitude da associação observada entre mulheres no presente estudo. Assim, a experiência de Mojana reforça a importância de avançar para delineamentos individuais e estratégias de biomonitoramento que permitam identificar rotas específicas de exposição e vulnerabilidades populacionais (DÍAZ et al., 2020).

Embora a análise ecológica não permita estabelecer uma relação causal direta, o padrão espacial identificado é compatível com a ação cumulativa de metais pesados reconhecidamente carcinogênicos. A literatura científica destaca a carcinogenicidade de substâncias como Arsênio, Cádmio, Cromo VI, Berílio e Níquel, todos classificados no Grupo 1 da IARC (IARC, 1990; IARC, 2012; INCA, 2024). O chumbo, ainda que sem associação a um subtipo específico de câncer, é considerado provavelmente carcinogênico (Grupo 2A) (IARC, 2006). A distribuição territorial desses agentes — associados à mineração — pode, portanto, contribuir para a heterogeneidade espacial das taxas de mortalidade observadas.

A principal limitação metodológica da presente dissertação, inerente ao delineamento ecológico, é a impossibilidade de estabelecer relação causal, o que exige investigações futuras com dados individuais e variáveis contextuais para maior inferência causal. Neste sentido, os resultados iniciais dos projetos “Saúde Brumadinho” e “Projeto Bruminha” servem como um exemplo direto das ações de vigilância e monitoramento de longo prazo necessárias. Esses projetos consistem em duas coortes prospectivas de base populacional conduzidas no município de Brumadinho, em Minas Gerais, após o rompimento da barragem de rejeitos da Mina do Córrego do Feijão (PEIXOTO; FRÓES-ASMUS; FREITAS et al., 2022).

Por meio da coleta de material biológico (sangue e urina), os estudos avaliam detalhadamente a exposição aos resíduos de metais na população. O Projeto Saúde Brumadinho segmenta a amostra por domínios de exposição (áreas expostas à lama, região com mineração e população não exposta), atendendo à necessidade de incluir análise multinível com variáveis contextuais. A avaliação da exposição a metais na população de Brumadinho, somada aos achados da dissertação sobre a coincidência espacial de clusters alto-alto de mortalidade por câncer próximos a regiões mineradoras em Minas Gerais, reforça a urgência de

ações integradas entre saúde, meio ambiente e planejamento territorial e demonstra a necessidade de adequação do sistema público de saúde para as condições ambientais específicas do território (PEIXOTO; FRÓES-ASMUS; FREITAS et al., 2022).

A diferença de associação observada entre os sexos — mais forte no grupo feminino — pode refletir diferenças ocupacionais, fisiológicas e comportamentais, além de padrões distintos de exposição ambiental (WHITEMAN; WILSON, 2016). A análise estratificada evidenciou variações na magnitude e no padrão da associação, sugerindo que determinados subgrupos populacionais podem ser mais vulneráveis aos efeitos da exposição.

É importante destacar que, embora as associações observadas tenham sido estatisticamente significativas, sua magnitude foi baixa, indicando associação de baixa magnitude entre a proximidade das barragens e as taxas de mortalidade por câncer. Essa limitação, contudo, não invalida sua relevância epidemiológica. A consistência dos padrões espaciais observados justifica a continuidade da investigação com métodos mais sensíveis, como modelos espaciais hierárquicos ou análises de coorte retrospectiva.

Adicionalmente, o fato de a associação ser fraca não reduz seu potencial impacto em saúde pública, pois a exposição às barragens pode não ser o único fator causal, mas sim um componente de um conjunto mais amplo de determinantes socioambientais. Dada a abrangência territorial da atividade mineradora e o número elevado de pessoas potencialmente expostas, reforça-se a necessidade de ações de monitoramento ambiental e vigilância epidemiológica contínua, especialmente em regiões com concentração de barragens e padrões elevados de mortalidade.

De forma complementar, a análise exploratória gerou informações úteis para o planejamento de políticas públicas, permitindo a identificação de áreas prioritárias para vigilância epidemiológica e territorial. Os padrões identificados também oferecem subsídios para futuras pesquisas, especialmente no campo da saúde ambiental.

O tema abordado nesta pesquisa é igualmente relevante para o campo da Saúde Coletiva, ao articular determinantes ambientais, sociais e territoriais na compreensão dos processos de adoecimento (BREILH, 2006; BUSS; PELLEGRINI FILHO, 2007). A investigação dos possíveis efeitos da mineração sobre a saúde das populações expressa o compromisso central da Saúde

Coletiva com a análise das determinações sociais e ambientais da saúde e com a produção de evidências voltadas ao fortalecimento da vigilância e das políticas públicas intersetoriais (PORTO; FINAMORE, 2012; PORTO; SCHÜTZ, 2020; TEIXEIRA; PAIM; VILASBOAS, 1999).

Como destacam Porto e Finamore (2012), o reconhecimento das desigualdades ambientais e dos riscos distribuídos de forma desigual no território é fundamental para a justiça ambiental e para a promoção da equidade em saúde. Nessa perspectiva, a interface entre mineração, contaminação ambiental e mortalidade por câncer deve ser compreendida não apenas como um problema técnico de exposição, mas como um processo social e político de vulnerabilização de territórios e populações, o que reforça a pertinência do tema dentro da agenda contemporânea da Saúde Coletiva brasileira (PORTO; SCHÜTZ, 2020; FREITAS; SILVA; MENEZES, 2019).

Nesse contexto, marcado por desastres ambientais recentes em Minas Gerais, como os de Mariana e Brumadinho, cresce a preocupação com os efeitos da mineração sobre a saúde e o ambiente. Como analisam Freitas, Silva e Menezes (2019), esses eventos ilustram de forma concreta como riscos ambientais e tecnológicos se convertem em agravos coletivos, evidenciando a vulnerabilidade dos territórios e a insuficiência das práticas de vigilância. A literatura nacional e internacional tem apontado para os riscos da exposição prolongada a resíduos tóxicos e para a ausência de fiscalização adequada das estruturas de contenção (BRASIL, 2021; JABER; PROFETA, 2018; BROOKS et al., 2019).

Diante disso, os achados desta pesquisa reforçam a urgência de ações integradas entre saúde, meio ambiente e planejamento territorial, com foco na proteção das populações expostas e no fortalecimento da vigilância em saúde ambiental e territorial como eixo estruturante da Saúde Coletiva.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os achados desta pesquisa apontam para uma associação negativa entre a proximidade de barragens de rejeitos de mineração e as taxas de mortalidade por câncer em municípios de Minas Gerais, com maior expressão entre a população masculina. Embora a magnitude dessa associação tenha sido modesta, sua consistência em alguns desfechos e a manutenção do padrão espacial em regiões mineradoras conferem relevância epidemiológica aos resultados, sobretudo diante do número expressivo de pessoas potencialmente expostas.

A análise espacial revelou padrões territoriais de risco, com destaque para a ocorrência de clusters alto-alto de mortalidade por câncer em áreas próximas a barragens, reforçando a importância de ações preventivas e vigilância ambiental permanente. Esses padrões, ainda que não sejam suficientes para estabelecer causalidade direta, justificam a adoção do princípio da precaução em saúde pública, especialmente em territórios historicamente marcados pela exploração mineral. Sugere-se que investigações futuras sejam estruturadas como estudos longitudinais, com utilização de dados individuais e contextuais, de modo a possibilitar inferências causais.

As limitações relacionadas à completude e à qualidade dos dados secundários utilizados — tanto sobre mortalidade quanto sobre as barragens — devem ser consideradas com cautela, sem comprometer a validade dos achados. Ao contrário, tais limitações reforçam a necessidade de aprimorar a integração e a transparência das bases de dados ambientais e de saúde, especialmente em contextos de risco socioambiental elevado.

Em síntese, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre os efeitos da exposição a rejeitos de mineração na saúde coletiva e evidencia a urgência de medidas voltadas à prevenção, mitigação e monitoramento contínuo desses impactos. As evidências produzidas oferecem subsídios técnicos para o aprimoramento das políticas públicas intersetoriais nos campos da saúde, meio ambiente e planejamento territorial.

REFERÊNCIAS

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). *Toxicological profile for nickel*. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2005.

AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASE REGISTRY (ATSDR). *Toxicological profile for beryllium*. Atlanta: U.S. Department of Health and Human Services, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Relatório de segurança de barragens 2022*. Brasília: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/seguranca-de-barragens/relatorio-anual>. Acesso em: 2 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). *Resolução ANM nº 95, de 07 de fevereiro de 2022 com alterações da Resolução ANM nº 130/2023: Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração*. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Relatório de segurança de barragens 2021*. Brasília: ANA, 2022. 68 p. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2021/rsb-2021.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). *Instrução Normativa 15, de 06 de outubro de 2014: institui o Sistema Nacional de Emergências Ambientais (SIEMA)*. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=07/10/2014&jornal=1&pagina=75&totalArquivos=124>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BARCELOS, D. A. et al. Gold mining tailing: environmental availability of metals and human health risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, [S.I.], v. 397, p. 122721, out. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122721>.

BRAGA, L. L. B. C. et al. Temporal trends and spatial clusters of gastric cancer mortality in Brazil. *Revista Panamericana de Salud Pública*, [S.I.], v. 46, e101, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26633/rpdp.2022.101>.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011. Fixa normas para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas relativas à proteção do meio ambiente. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm. Acesso em: 28 abr. 2024.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1980-1987/lei-6938-31-agosto-1981-366135-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 28 abr. 2024.

BREILH, Jaime. Epidemiologia crítica: ciência emancipadora e interculturalidade. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2006.

BROOKS, S. J.; ESCUDERO-OÑATE, C.; LILLICRAP, A. D. An ecotoxicological assessment of mine tailings from three Norwegian mines. *Chemosphere*, [S.I.], v. 233, p. 818–827, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.003>.

BUCH, A. C. et al. Ecological risk assessment of trace metals in soils affected by mine tailings. *Journal of Hazardous Materials*, [S.I.], v. 403, p. 123852, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123852>.

BUSS, Paulo Marchiori; PELLEGRINI FILHO, Alberto. A saúde e seus determinantes sociais. *Physis: Revista de Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 77–93, 2007. DOI: 10.1590/S0103-73312007000100006

CACCIUTTOLO, C.; CANO, D.; CUSTODIO, M. Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru. *Toxics*, [S.I.], v. 11, n. 5, p. 462, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics11050462>.

DANTAS, N. S.; FONTGALLAND, I. L. Análise das leis ambientais brasileiras e sua interface com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). *Research, Society and Development*, [S.I.], v. 10, n. 4, p. e14248, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i4.14248>.

DÍAZ, S. M.; PALMA, R. M.; MUÑOZ, M. N.; BECERRA-ARIAS, C.; FERNÁNDEZ NIÑO, J. A. Factors associated with high mercury levels in women and girls from the Mojana region, Colombia, 2013–2015. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 6, p. 1827, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17061827.

DOLL, R.; PAYNE, P.; WATERHOUSE, J. *Cancer incidence in five continents: a technical report*. Berlin: Springer-Verlag (for UICC), 1966.

DUARTE, E. B. et al. Trace metals in Rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil. *Chemosphere*, [S.I.], v. 262, p. 127879, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127879>.

FREITAS, Carlos Machado de; SILVA, Marcelo Antonio de Souza; MENEZES, Felipe C. Desastres em barragens de rejeitos e saúde coletiva: reflexões a partir dos casos de Mariana e Brumadinho, Minas Gerais, Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, n. 5, e00052519, 2019.

FREITAS, C. M. et al. Projeto Saúde Brumadinho: avaliação dos impactos do rompimento da barragem de rejeitos de mineração de ferro sobre a saúde da população. *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 37, n. 12, p. e00304221, 2021. DOI: 10.1590/0102-311X00304221.

FERNANDES, J. A. et al. Projeto Bruminha: coorte de base populacional para o monitoramento da saúde mental e exposição ambiental em crianças e adolescentes após o desastre de Brumadinho, Minas Gerais, Brasil. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 27, n. 11, p. 4359–4372, 2022. DOI: 10.1590/1413-812320222711.10452022.

GENG, Y. et al. Insights into the spatiotemporal differences in tailings seepage pollution by assessing the diversity and metabolic functions of the soil microbial community. *Environmental Pollution*, [S.I.], v. 306, p. 119408, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119408>.

GHOSH, S. et al. Pollution and health risk assessment of mine tailings contaminated soils in India from toxic elements with statistical approaches. *Chemosphere*, [S.I.], v. 324, p. 138267, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138267>.

GLOBOCAN. *Global Cancer Observatory: Cancer Today*. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2020. Disponível em: <https://gco.iarc.fr/today>. Acesso em: 23 jun. 2025.

IARC. *Arsenic, metals, fibres and dusts*. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2012. (IARC Monographs, v. 100C). Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304375/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

IARC. *Inorganic and organic lead compounds*. Lyon: International Agency for Research on Cancer, 2006. (IARC Monographs, v. 87). Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK321297/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Síntese de indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira*. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). *Exportações minerais por ano e estado de origem*. 2024. Disponível em: <https://metabase-ibrام.dadosfera.ai/public/dashboard/c3c4e0b4-aaa9-419e-b634-ac762125a144>. Acesso em: 15 mai. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA (INCA). *Informativo detecção precoce: câncer de pele não melanoma*. Rio de Janeiro: INCA, 2016. Disponível em: <https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files/media/document/informativo-deteccao-precoce-3-2016.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2025.

JABER, A.; PROFETA, A. L. *Recursos minerais de Minas Gerais online: meio ambiente e mineração*. Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), 2018. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/meio-ambiente-e-mineracao/>. Acesso em: 15 mai. 2024.

LOREDO-PORTALES, R. et al. Mobility and accessibility of Zn, Pb, and As in abandoned mine tailings of northwestern Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, [S.I.], v. 27, n. 21, p. 26605–26620, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-12930-1>.

<https://doi.org/10.1007/s11356-020-09051-1>.

MACKLIN, M. G. et al. Impacts of metal mining on river systems: a global assessment. *Science*, [S.I.], v. 381, n. 6664, p. 1345–1350, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.adg6704>.

MANHÃES, B. M. R. et al. Temporal trends of trace elements bioaccumulation by a vulnerable cetacean (*Pontoporia blainvillii*) before and after one of the largest mining disasters worldwide. *Science of the Total Environment*, [S.I.], v. 804, p. 150196, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150196>.

MINAS GERAIS. Decreto nº 47.787, de 13 de dezembro de 2019. Dispõe sobre a organização da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=50263>. Acesso em: 29 abr. 2024.

MINAS GERAIS. Decreto nº 48.747, de 29 de dezembro de 2023. Dispõe sobre a política estadual de segurança de barragens. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/DEC/48747/2023/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). *Contas regionais de Minas Gerais: ano de referência 2021*. Belo Horizonte: FJP, 2023. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/135DsxsLOUsq_TDIDweLKIP3e0q-rvU_f/view. Acesso em: 15 mai. 2024.

MINAS GERAIS. Lei nº 11.903, de 06 de setembro de 1995. Cria a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=2303>. Acesso em: 29 abr. 2024.

MINAS GERAIS. Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019. Dispõe sobre a política estadual de segurança de barragens. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/legislacao-mineira/texto/LEI/23291/2019/>. Acesso em: 29 abr. 2024.

MINAS GERAIS. Lei nº 23.795, de 7 de janeiro de 2021. Institui a Política Estadual dos Atingidos por Barragens (PEAB). Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=407986>. Acesso em: 29 abr. 2024.

NASRAOUI, R.; TRIFI, M.; CHAREF, A. Hydrodynamic release of Pb, Zn, and Cd from impermeable tailings: case study of Jbel Ressas mine waste (North Tunisia). *Environmental Monitoring and Assessment*, [S.I.], v. 195, n. 3, p. 4–14, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10967-7>.

OLIVEIRA, L. L. F. et al. Efeitos tóxicos à saúde humana e ao ambiente causados pelo derramamento de rejeitos de minério da barragem de Fundão. *Journal of Health & Biological Sciences*, [S.I.], v. 9, n. 1, p. 1–17, 2021. DOI: <https://doi.org/10.12662/2317-3076jhbs.v9i1.3535.p1-17.2021>.

PARENTE, C. E. T. et al. First year after the Brumadinho tailings' dam collapse: spatial and seasonal variation of trace elements in sediments, fishes and macrophytes from the Paraopeba River, Brazil. *Environmental Research*, [S.I.], v. 193, p. 110526, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110526>.

PEDROSA-SOARES, A. C.; VOLL, E.; CUNHA, E. C. *Recursos minerais de Minas Gerais online: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica e meio ambiente e mineração de Minas Gerais*. Belo

Horizonte: CODEMGE, 2018. Disponível em: <http://www.codemge.com.br>. Acesso em: 13 mai. 2024.

PEIXOTO, Sérgio Viana; FRÓES-ASMUS, Carmen Ildes Rodrigues; FREITAS, Carlos Machado de; et al. Projeto Saúde Brumadinho: avaliação dos impactos do rompimento da barragem de rejeitos de mineração de ferro sobre a saúde da população. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, v. 25, supl. 2, e220001, 2022. DOI: 10.1590/1980-549720220001.supl.2

PORTO, Marcelo Firpo de Souza; FINAMORE, Rômulo. Riscos, ambiente e justiça ambiental: perspectivas da saúde coletiva. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1493–1501, 2012. DOI: 10.1590/S1413-81232012000600014

PORTO, Marcelo Firpo de Souza; SCHÜTZ, Gabriela Erler. Vigilância em saúde ambiental e os desastres de Brumadinho e Mariana: desafios e perspectivas. *Ciência & Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 9, p. 3567–3574, 2020. DOI: 10.1590/1413-81232020259.23072020

POTRATZ, G. L. et al. Using lead isotopes and potentially toxic elements to trace pollutant sources in the northern region of Guanabara Bay, southeastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, [S.I.], v. 144, p. 216–223, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.04.057>.

QUEIROZ, H. M. et al. Manganese: the overlooked contaminant in the world's largest mine tailings dam collapse. *Environment International*, [S.I.], v. 146, p. 106284, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106284>.

RUIZ-HUERTA, E. A. et al. Bioaccumulation of heavy metals and As in maize (*Zea mays* L.) grown close to mine tailings strongly impacts plant development. *Ecotoxicology*, [S.I.], v. 31, n. 3, p. 447–467, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10646-022-02522-w>.

SAKAN, S. et al. Potentially toxic elements in sediments near mines: a comprehensive approach for the assessment of pollution status and associated risk for the surface water environment. *Environmental Science and Pollution Research*, [S.I.], v. 31, n. 11, p. 16613–16628, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32178-4>.

SANTOS, A. S. E. et al. Exposição a metais em uma população infantil após rompimento de barragem de rejeitos da mineração: Projeto Bruminha. *Revista Brasileira de Epidemiologia*, [S.I.], v. 26, e230017, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1980-549720230017>.

SILVA, A. P. V. da et al. Potentially toxic elements in iron mine tailings: effects of reducing soil pH on available concentrations of toxic elements. *Environmental Research*, [S.I.], v. 215, p. 114321, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114321>.

STUMBEA, D.; CHICOS, M. M.; NICA, V. Effects of waste deposit geometry on the mineralogical and geochemical composition of mine tailings. *Journal of Hazardous Materials*, [S.I.], v. 368, p. 496–505, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.071>.

TEIXEIRA, Carmen Fontes; PAIM, Jairnilson Silva; VILASBOAS, Ana Luiza Queiroz. SUS, modelos assistenciais e vigilância da saúde. *Informe Epidemiológico do SUS*, Brasília, v. 8, n. 2, p. 7–28, 1999.

TEIXEIRA, M. C. et al. Arsenic contamination assessment in Brazil — past,

present and future concerns: a historical and critical review. *Science of the Total Environment*, [S.I.], v. 730, p. 138217, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138217>.

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto. Relatório de resultados do Projeto Saúde Brumadinho: biomonitoramento de metais em populações expostas ao desastre da Vale S.A. Ouro Preto: UFOP, 2023. Disponível em: <https://www.ufop.br>

WANG, M. et al. Spatial patterns in prostate cancer-specific mortality in Pennsylvania using Pennsylvania Cancer Registry data, 2004–2014. *BMC Cancer*, [S.I.], v. 20, n. 1, p. 4–14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12885-020-06902-5>.

WHITEMAN, D. C.; WILSON, L. F. The fractions of cancer attributable to modifiable factors: a global review. *Cancer Epidemiology*, [S.I.], v. 44, p. 203–221, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.canep.2016.06.018>.

ZHAO, G. et al. Pollution assessment of potentially toxic elements (PTEs) in soils around the Yanzhuang Gold Mine tailings pond, Pinggu County, Beijing, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, [S.I.], v. 18, n. 14, p. 7240, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18147240>.