



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL



André Mendonça Carvalho
João Paulo Wagner Monteiro do Amaral

**VULNERABILIDADE SOCIOAMBIENTAL DOS MUNICÍPIOS SUJEITOS À
MANCHA DE INUNDAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITOS EM MINAS GERAIS**

Ouro Preto
2026

André Mendonça Carvalho
João Paulo Wagner Monteiro do Amaral

A Vulnerabilidade Socioambiental dos Municípios Sujeitos à Mancha de Inundação de
Barragens de Rejeitos em Minas Gerais

Trabalho Final de Curso apresentado como parte
dos requisitos para obtenção do Grau de Engenheiro Ambiental na Universidade Federal de
Ouro Preto.

Data da aprovação: 04/05/2026

Área de concentração: Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Dr. Alberto de Freitas de Castro Fonseca – UFOP

Ouro Preto
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

A485v Amaral, Joao Paulo Wagner Monteiro do.

A vulnerabilidade socioambiental dos municípios sujeitos à mancha de inundação de barragens de rejeitos em Minas Gerais. [manuscrito] / Joao Paulo Wagner Monteiro do Amaral. André Mendonça Carvalho. - 2026.

49 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Alberto de Freitas de Castro Fonseca.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Demografia. 2. Índice de Vulnerabilidade Social. 3. Zoneamento de Áreas de Inundação. 4. Barragens de rejeitos. 5. Geologia - Processamento de dados. I. Carvalho, André Mendonça. II. Fonseca, Alberto de Freitas de Castro. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 504

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira E Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

André Mendonça Carvalho
João Paulo Wagner Monteiro do Amaral

Vulnerabilidade Socioambiental dos Municípios Sujeitos à Mancha de Inundação de Barragens de Rejeitos em Minas Gerais

Ouro Preto

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental

Aprovada em 04 de maio de 2026

Membros da banca

Prof. Dr. Alberto de Freitas Castro Fonseca - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago - Presidente da Banca - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Christiano Ottoni Carvalho – Universidade Federal de Ouro Preto
Profa. Dra. - Lúvia Cristina Pinto Dias – Universidade Federal de Ouro Preto

[Alberto de Freitas Castro Fonseca, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 13/05/2026



Documento assinado eletronicamente por **Alberto de Freitas Castro Fonseca**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/05/2026, às 14:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1108533** e o código CRC **4806A2F5**.

"Este trabalho é dedicado aos meu pais, pelo apoio constante e por todos os esforços que fizeram para que eu pudesse chegar aqui."

- André Mendonça.

"Aos meus pais, pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em meu potencial. Minha eterna gratidão."

- João Paulo Wagner.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos nossos pais pelo apoio incondicional, pelo carinho, pela compreensão e por todo o suporte oferecido ao longo de nossa trajetória acadêmica.

À Universidade Federal de Ouro Preto, pela oferta de um ensino público, gratuito e de qualidade, que foi fundamental para a nossa formação acadêmica, profissional e pessoal. À Fundação Gorceix, pelo apoio aos diversos projetos dos quais tivemos a oportunidade de participar, contribuindo de forma significativa para o nosso desenvolvimento ao longo dessa trajetória.

Agradecemos aos professores do Departamento de Engenharia Ambiental por todo o apoio, dedicação e pelos valiosos ensinamentos transmitidos ao longo de nossa trajetória acadêmica. A excelência de suas aulas, aliada aos métodos didáticos adotados, foi fundamental para a nossa formação profissional e pessoal. Em especial, expressamos nossa gratidão ao professor Alberto de Freitas Castro Fonseca, pelo apoio, pela disponibilidade e por ser um grande exemplo de profissionalismo, competência e compromisso com a área ambiental.

RESUMO

A segurança de barragens de mineração tornou-se um dos principais temas do debate socioambiental brasileiro após os rompimentos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Em Minas Gerais, a análise desses riscos exige considerar não apenas as manchas de inundação, mas também as condições sociais dos municípios potencialmente atingidos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo analisar a vulnerabilidade socioambiental dos municípios mineiros sujeitos a manchas de inundação associadas a barragens de mineração. A pesquisa adotou abordagem quantitativa e técnicas de geoprocessamento em Sistema de Informação Geográfica. A vulnerabilidade social foi representada pelo Índice de Vulnerabilidade Social (IVS), enquanto a exposição territorial foi mensurada pela proporção da área municipal interceptada por manchas de inundação. A partir do cruzamento dessas variáveis, elaborou-se uma síntese cartográfica bivariada da vulnerabilidade socioambiental. Os resultados indicaram que 128 municípios mineiros possuem áreas interceptadas por manchas de inundação. O IVS médio dos municípios expostos foi de 0,308, com predominância de baixa e média vulnerabilidade social, embora 19 municípios tenham apresentado alta ou muito alta vulnerabilidade. A síntese bivariada destacou municípios como Sem-Peixe, Barra Longa e Joanésia, onde a maior exposição territorial se sobrepõe a maiores fragilidades sociais. Conclui-se que a vulnerabilidade socioambiental associada às barragens de mineração em Minas Gerais resulta da interação entre ameaça tecnológica e desigualdades sociais. O estudo demonstra que a integração entre indicadores sociais e análise espacial pode contribuir para o planejamento territorial, a prevenção de desastres e o aprimoramento da política ambiental.

Palavras-chave: barragens de mineração; vulnerabilidade socioambiental; manchas de inundação; IVS; geoprocessamento; política ambiental; Minas Gerais.

ABSTRACT

The safety of mining dams has become one of the main topics in the Brazilian socio-environmental debate following the dam failures in Mariana (2015) and Brumadinho (2019). In Minas Gerais, the analysis of these risks requires considering not only flood inundation areas but also the social conditions of potentially affected municipalities. In this context, this study aimed to analyze the socio-environmental vulnerability of municipalities in Minas Gerais that are subject to flood inundation areas associated with mining dams. The research adopted a quantitative approach and geoprocessing techniques within a Geographic Information System (GIS). Social vulnerability was represented by the Social Vulnerability Index (SVI), while territorial exposure was measured by the proportion of municipal area intersected by flood inundation zones. From the intersection of these variables, a bivariate cartographic synthesis of socio-environmental vulnerability was developed. The results indicated that 128 municipalities in Minas Gerais have areas intersected by flood inundation zones. The average SVI of the exposed municipalities was 0.308, with a predominance of low and medium social vulnerability, although 19 municipalities presented high or very high vulnerability. The bivariate synthesis highlighted municipalities such as Sem-Peixe, Barra Longa, and Joanésia, where greater territorial exposure overlaps with higher social fragilities. It is concluded that the socio-environmental vulnerability associated with mining dams in Minas Gerais results from the interaction between technological hazards and social inequalities. The study demonstrates that the integration of social indicators and spatial analysis can contribute to territorial planning, disaster prevention, and the improvement of environmental policy.

Keywords: mining dams; socio-environmental vulnerability; flood inundation zones; SVI; geoprocessing; environmental policy; Minas Gerais.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Evolução espacial da atividade minerária em Minas Gerais nos anos de 1985, 2000, 2010 e 2024.	13
Figura 2 – Esquemas dos principais métodos construtivos para barragens de rejeito.	16
Figura 3 – Mapa de Categoria de Risco para 917 barragens de rejeito no Brasil (Setembro/2025).	17
Figura 4 – Fluxograma do procedimento metodológico	21
Figura 5 – Contextualização espacial das barragens de mineração e das manchas de inundação em Minas Gerais	28
Figura 6 – Vulnerabilidade social dos municípios potencialmente expostos, segundo o IVS, dados de 2025	29
Figura 7 – Exposição territorial dos municípios às manchas de inundação	32
Figura 8 – Síntese bivariada da vulnerabilidade socioambiental e exposição territorial a manchas de inundação dos municípios mineiros	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição de barragens de mineração no Brasil por Nível de Emergência (Setembro/2025).	18
Tabela 2 – Estatísticas descritivas do IVS e dos subíndices nos municípios potencialmente expostos	30
Tabela 3 – Distribuição dos municípios potencialmente expostos segundo as classes oficiais do IVS	30
Tabela 4 – Distribuição dos municípios expostos segundo as classes de exposição territorial	33
Tabela 5 – Municípios com maiores percentuais de área interceptada por manchas de inundação	34
Tabela 6 – Distribuição dos municípios expostos segundo as classes bivariadas de vulnerabilidade socioambiental	36
Tabela 7 – Municípios classificados em maior criticidade socioambiental	36
Tabela 8 – Comparação entre o universo de municípios expostos e o grupo de maior criticidade socioambiental	37
Tabela 9 – Leitura territorial dos principais perfis identificados na síntese bivariada	38
Tabela 10 – Potenciais implicações dos resultados para a alguns instrumentos de política ambiental	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP Processo Analítico Hierárquico.

ANM Agência Nacional de Mineração.

APA Área de Proteção Ambiental.

BDG Base de Dados Geográficos.

CRI Categoria de Risco.

DPA Dano Potencial Associado.

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IVS Índice de Vulnerabilidade Social.

KDE Estimativa de Densidade de Kernel.

MDE Modelo Digital de Elevação.

PAE Plano de Ação de Emergência.

PNSB Política Nacional de Segurança de Barragens.

RMBH Região Metropolitana de Belo Horizonte.

SGB Serviço Geológico do Brasil.

SIG Sistemas de Informação Geográfica.

SIGBM Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração.

ZAS Zona de Autossalvamento.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1	O Território da Mineração em Minas Gerais	12
3.1.1	Evolução Histórica e Dependência Econômica	12
3.1.2	O Conflito Território e a Extração	13
3.2	Barragens de Rejeitos e Riscos Tecnológicos	14
3.2.1	Plano de Ação de Emergência (PAE)	14
3.2.2	Dinâmica de Produção e Armazenamento de Rejeitos	15
3.2.3	Conceito de Risco Tecnológico e Desastre Sociotécnicos	16
3.3	Dimensões da Vulnerabilidade Social	18
3.3.1	Vulnerabilidade vs Perigo	18
3.3.2	O Índice de Vulnerabilidade Social (IVS)	19
3.4	Gestão de Riscos e Segurança Humana	19
4	METODOLOGIA	21
4.1	Área de estudo	21
4.2	Base de dados	22
4.2.1	Barragens de mineração e manchas de inundação	22
4.2.2	Base territorial municipal	22
4.2.3	Indicadores sociais	23
4.3	Tratamento e integração dos dados em ambiente SIG	23
4.4	Mensuração da vulnerabilidade social municipal	24
4.5	Mensuração da exposição municipal às manchas de inundação	24
4.6	Síntese da vulnerabilidade socioambiental	25
4.7	Geração e interpretação dos mapas	26
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1	Configuração territorial das barragens de mineração em Minas Gerais	27
5.2	Vulnerabilidade social dos municípios potencialmente expostos	29
5.2.1	Leitura dos subíndices do IVS	31
5.3	Exposição territorial municipal às manchas de inundação	32
5.4	Síntese bivariada da vulnerabilidade socioambiental	34

5.5	Implicações para a política ambiental e para a governança territorial do	
	risco	38
5.6	Síntese interpretativa dos resultados	40
6	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

O estado de Minas Gerais possui trajetória histórica, econômica e territorial profundamente marcada pela atividade minerária. Desde o período colonial, a mineração exerceu papel central na organização do espaço mineiro, influenciando a ocupação do território, a dinâmica econômica regional e a formação de conflitos associados ao uso e à apropriação dos recursos naturais (MILANEZ; MAGNO; PINTO, 2019). Os rompimentos de barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) reforçaram a urgência dessa discussão ao evidenciar a magnitude dos danos sociais, ambientais e territoriais associados a essas estruturas (ANM, 2025).

No entanto, essa vocação extrativista carrega consigo um complexo passivo socioambiental. Tal passivo materializa-se, de forma mais crítica, na presença de centenas de barragens de rejeitos que coexistem com centros urbanos e comunidades rurais (ZHOURI, 2018). Essa proximidade transforma o território em um espaço de risco tecnológico latente, cuja gravidade depende não apenas da presença física dessas estruturas, mas também das condições sociais dos espaços potencialmente atingidos (FREITAS; SILVA; MENEZES, 2019).

Os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana, no ano de 2015, e da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho, no ano de 2019, evidenciaram de forma dramática a magnitude dos impactos humanos, ambientais, econômicos e institucionais associados à falha dessas estruturas. Tais eventos consolidaram a percepção de que a segurança de barragens não pode ser tratada apenas como uma questão estritamente técnica, exigindo abordagens preventivas capazes de articular engenharia, governança e leitura territorial do risco (LEÃO; SANTIAGO, 2022a).

A análise do risco associado às barragens de mineração exige a articulação entre perigo, exposição e vulnerabilidade social. No presente estudo, o perigo está relacionado à presença das barragens e às suas manchas de inundação hipotéticas; a exposição refere-se à incidência territorial dessas manchas sobre os municípios; e a vulnerabilidade social diz respeito às condições socioeconômicas e de infraestrutura que influenciam a capacidade de prevenção, resposta e recuperação diante de um desastre (MENDES et al., 2012).

Embora a gestão emergencial de barragens envolva escalas locais, este trabalho adota o município como unidade territorial de análise, em razão da compatibilidade entre a malha municipal do IBGE, os dados do Atlas da Vulnerabilidade Social e as bases espaciais de barragens e manchas de inundação. Para representar a dimensão social, utiliza-se o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS), elaborado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), bem como seus subíndices temáticos. Dessa forma, o estudo busca analisar a vulnerabilidade socioambiental dos municípios mineiros potencialmente expostos às manchas de inundação associadas a barragens de mineração.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a vulnerabilidade socioambiental dos municípios potencialmente expostos às manchas de inundação de barragens de rejeito no estado de Minas Gerais.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar e espacializar as barragens de mineração e suas respectivas manchas de inundação no estado de Minas Gerais;
- Delimitar os municípios potencialmente expostos, a partir da interseção entre as manchas de inundação e a malha municipal do IBGE;
- Caracterizar a vulnerabilidade social dos municípios expostos com base no Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) e em seus subíndices temáticos;
- Mensurar a exposição territorial municipal por meio do percentual de área de cada município interceptada pelas manchas de inundação;
- Integrar as dimensões de vulnerabilidade social e exposição territorial em uma síntese cartográfica bivariada, com vistas à identificação de municípios prioritários para ações de prevenção, monitoramento e planejamento territorial;
- Discutir as implicações das vulnerabilidades identificadas para políticas públicas e práticas de gestão socioambiental das mineradoras.

3 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura deste estudo fundamenta-se na articulação entre mineração, risco tecnológico, vulnerabilidade social e análise territorial, buscando compreender como esses elementos se relacionam no contexto das barragens de mineração em Minas Gerais. Parte-se do entendimento de que os desastres associados a essas estruturas não podem ser interpretadas apenas sob uma perspectiva técnica ou geotécnica, uma vez que seus impactos se distribuem de forma desigual no território e afetam de maneira distinta os grupos sociais expostos. Nesse sentido, a discussão teórica aqui desenvolvida reúne contribuições sobre a formação histórica do território minerário mineiro, a produção de riscos e conflitos socioambientais, o conceito de vulnerabilidade social e a importância da integração entre dados espaciais e indicadores sociais para a identificação de áreas mais críticas e prioritárias para ações de prevenção e planejamento.

3.1 O Território da Mineração em Minas Gerais

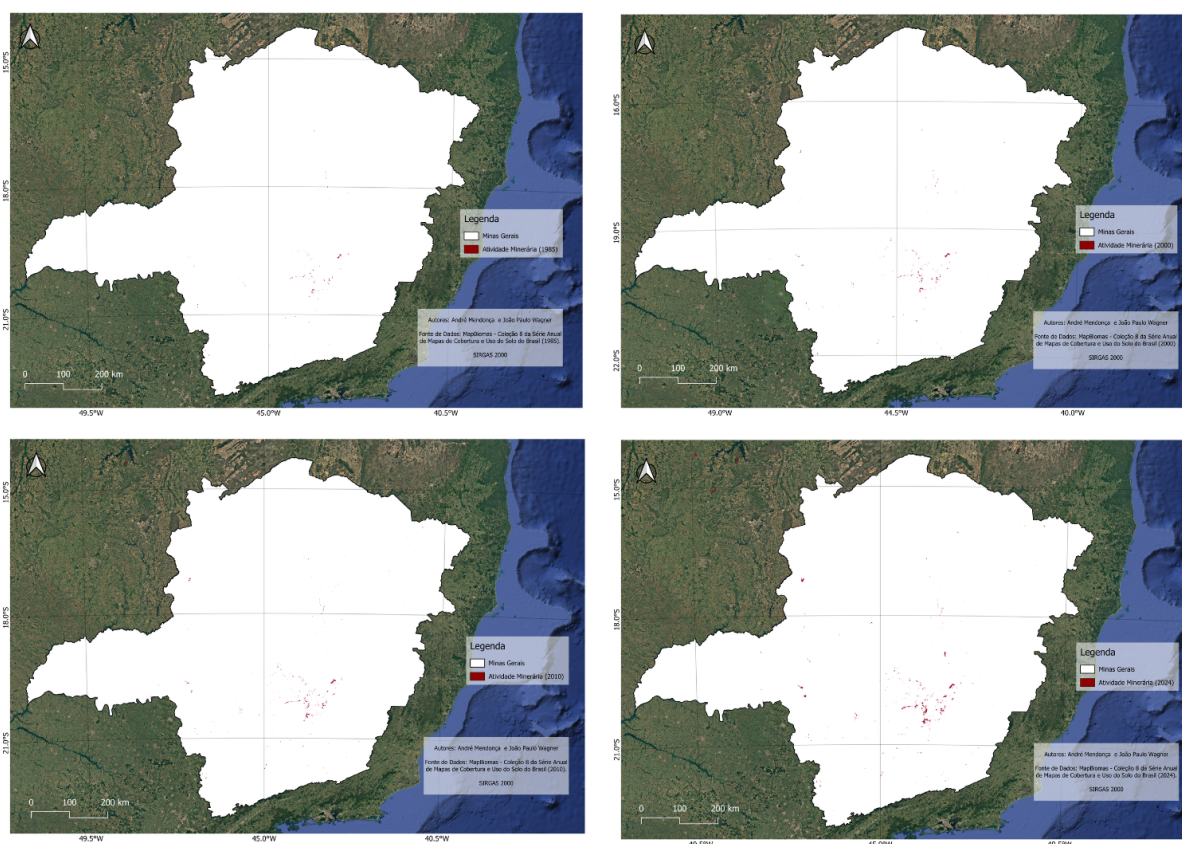
A configuração territorial do estado de Minas Gerais não pode ser dissociada da atividade extrativista. A mineração atua como um agente estruturante que, ao longo dos séculos, definiu não apenas a economia, mas a distribuição espacial das populações e a própria identidade cultural do estado.

3.1.1 Evolução Histórica e Dependência Econômica

O estado de Minas Gerais consolida-se como o principal polo minerário do Brasil, sustentando uma trajetória histórica que remonta ao século XVII (SOBREIRA; FONSECA, 2001). Atualmente, essa centralidade também se expressa no desempenho econômico do setor. Segundo dados da Agência Nacional de Mineração (ANM, 2025) e do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2026), o estado responde por aproximadamente 40% do faturamento mineral nacional, em um cenário no qual o setor alcançou R\$ 298,8 bilhões em 2025. Além disso, Minas Gerais destaca-se como o principal arrecadador da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), concentrando cerca de 45% do total recolhido no país.

A dimensão histórica da mineração em Minas Gerais não se expressa apenas em indicadores econômicos, mas também na expansão territorial progressiva da atividade ao longo das últimas décadas. A Figura 1 evidencia essa dinâmica ao apresentar a distribuição espacial das áreas mineradas no estado entre 1985 e 2024.

Figura 1 – Evolução espacial da atividade minerária em Minas Gerais nos anos de 1985, 2000, 2010 e 2024.



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados do MapBiomias - Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso do Solo no Brasil.

A análise multitemporal da Figura 1 evidencia a expressiva expansão territorial da atividade minerária em Minas Gerais ao longo das últimas décadas. Observa-se que, em um primeiro momento, essa atividade se concentrava em núcleos específicos do Quadrilátero Ferrífero e em regiões tradicionalmente associadas à extração mineral. Contudo, o avanço das áreas mineradas e a ampliação das estruturas vinculadas ao setor revelam um cenário de crescente complexidade na gestão do território mineiro (MapBiomias, 2026). À medida que as cavas se expandem e novas estruturas são implantadas, as zonas de influência direta da mineração passam a tangenciar, e em muitos casos a sobrepor, perímetros urbanos e comunidades rurais consolidadas (ZHOURI, 2022). Essa proximidade entre a infraestrutura produtiva e os tecidos sociais reforça a necessidade de monitoramento contínuo e planejamento territorial, uma vez que o risco associado à mineração deixa de se apresentar como evento isolado e passa a constituir elemento estrutural do desenvolvimento regional em Minas Gerais (MILANEZI, 2023).

3.1.2 O Conflito Território e a Extração

O avanço da fronteira minerária em Minas Gerais estabelece o que a literatura acadêmica define como “territórios de exceção”. O conflito surge quando a lógica da extração, que exige

vastas áreas para cavas, pilhas de estéril e barragens de rejeitos, colide com o direito ao território de populações tradicionais, comunidades rurais e centros urbanos em expansão.

Este embate não é apenas físico, mas de valores. De um lado, o território é visto pela indústria como um depósito de recursos a ser explorado para garantir o superávit comercial, de outro, o território é o lugar de vida, ancestralidade e reprodução social (ZHOURI, 2022). O caso da Serra do Gandarela exemplifica essa tensão, a proteção de um aquífero estratégico para o abastecimento de milhões de pessoas em Belo Horizonte versus o potencial bilionário de exploração mineral. Em 2026, esse conflito é agravado pela “minério-dependência” dos municípios, que se veem reféns da arrecadação da CFEM enquanto convivem com a insegurança permanente gerada pela proximidade das estruturas de rejeitos.

3.2 Barragens de Rejeitos e Riscos Tecnológicos

A indústria extrativa mineral, embora estratégica para o desenvolvimento econômico, possui um histórico de geração de externalidades negativas e riscos tecnológicos significativos (BORGES, 2018; ÁVILA et al., 2021). O panorama mundial de rompimentos de barragens de rejeitos evidencia uma frequência preocupante de acidentes, com consequências socioambientais devastadoras, o que impulsionou uma profunda revisão das práticas de engenharia e governança no setor (REIS; RIBEIRO; SILVA, 2020; LEÃO; SANTIAGO, 2022a). As barragens de rejeitos, especialmente as construídas pelo método de alteamento a montante, representam as estruturas de maior potencial de dano, cujo colapso libera um fluxo de lama e água capaz de destruir comunidades e ecossistemas a jusante.

3.2.1 Plano de Ação de Emergência (PAE)

O PAE é o instrumento fundamental de gestão de riscos, exigido pela Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Ele estabelece as ações a serem executadas pelo empreendedor em caso de emergência, visando minimizar danos à vida e ao meio ambiente. Em Minas Gerais, após o advento da Lei Estadual nº 23.291/2019 (Mar de Lama Nunca Mais), o rigor sobre esses planos aumentou, exigindo que as mineradoras não apenas mapeiem o risco, mas garantam a infraestrutura necessária para a resposta imediata.

A eficácia de um PAE é medida pela sua capacidade de comunicação em tempo real. Os principais elementos físicos que compõem o sistema de alerta na Zona de Autossalvamento (ZAS) são:

- Sistema de alerta sonoro: Conjunto de sirenes eletrônicas com redundância de energia e comunicação, capazes de emitir avisos sonoros e mensagens de voz em toda a mancha de inundação.

- Rotas de fuga e sinalização: Caminhos predefinidos que levam a população para fora da zona de perigo no menor tempo possível. Devem ser sinalizados conforme normas da Defesa Civil e manter-se livres de obstáculos.
- Pontos de encontro: Áreas seguras, localizadas fora da mancha de inundação e em terrenos elevados, para onde a comunidade deve convergir e aguardar instruções das autoridades.

O PAE classifica o estado da barragem em três níveis de prontidão, cada um acionando protocolos distintos de notificação:

- Nível 1 (prontidão): Quando detectada anomalia que não compromete a estabilidade imediata, mas requer monitoramento intenso.
- Nível 2 (alerta): Quando a anomalia indica potencial comprometimento da estabilidade. O poder público é notificado e as comunidades entram em estado de atenção.
- Nível 3 (emergência/ ruptura): Risco iminente ou ocorrência de ruptura. As sirenes são acionadas e a evacuação da ZAS é obrigatória.

A legislação brasileira exige a realização periódica de simulados de emergência. Tem o objetivo de testar o tempo de resposta, a audibilidade das sirenes e a viabilidade das rotas de fuga. Em 2026, a participação comunitária e o "sentimento de segurança" tornaram-se indicadores de desempenho para as mineradoras, uma vez que a desconfiança gerada por alarmes falsos ou falhas de comunicação compromete a eficácia de uma evacuação real (Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM); Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA); Princípios para o Investimento Responsável (PRI), 2020).

3.2.2 Dinâmica de Produção e Armazenamento de Rejeitos

A atividade minerária é, fundamentalmente, uma indústria de movimentação de massa e gestão de resíduos. O processo de beneficiamento mineral – que consiste na separação do mineral de interesse econômico da rocha estéril – gera um volume monumental de subprodutos conhecidos como rejeitos. No contexto de Minas Gerais, o esgotamento de jazidas de alto teor (hematitas) forçou a exploração de minérios de menor teor (itabiritos), o que exige processos de concentração mais intensos e resulta em uma geração de rejeitos proporcionalmente superior ao volume de produto final comercializado (Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), 2026).

Historicamente, o método de armazenamento mais comum foi o hidrogeológico, através de barragens. Nessas estruturas, o rejeito é transportado via polpa (mistura de água e sólidos) e depositado em reservatórios. A dinâmica de armazenamento variou conforme o método construtivo: o alteamento a montante (mais barato e instável), a linha de centro e a jusante (mais caro e seguro). Entretanto, após os colapsos de Fundão (2015) e Brumadinho (2019), a legislação

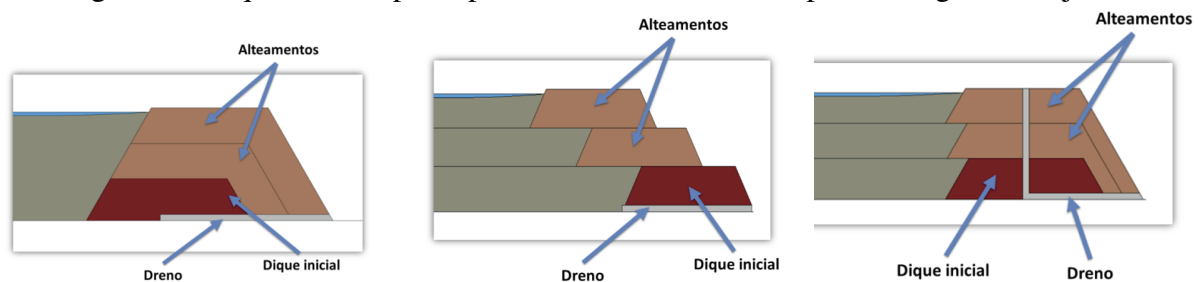
brasileira, através da Resolução ANM nº 95/2022 e da Lei Estadual "Mar de Lama Nunca Mais", proibiu o método de montante e exigiu a descaracterização dessas estruturas, forçando o setor a buscar alternativas como o empilhamento a seco (dry stacking) e a filtragem de rejeitos.

Apesar da transição tecnológica para métodos mais secos em 2026, Minas Gerais ainda lida com um passivo ambiental e estrutural crítico. A existência de centenas de barragens construídas sob paradigmas antigos exige uma manutenção perpétua e monitoramento em tempo real. A dinâmica de armazenamento, portanto, deixou de ser apenas uma questão de engenharia civil para se tornar um problema de segurança pública, uma vez que o armazenamento de grandes volumes de rejeitos saturados em áreas de relevo acidentado, como o Quadrilátero Ferrífero, mantém comunidades inteiras sob a zona de autossalvamento (ZAS) dessas estruturas (PIMENTA, 2024).

3.2.3 Conceito de Risco Tecnológico e Desastre Sociotécnicos

Os rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (2015), e da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (2019), representam um ponto de inflexão na história da mineração brasileira e global (ÁVILA et al., 2021; BORGES, 2018). Ambos os desastres ocorreram em barragens que utilizavam o método de alteamento a montante, uma tecnologia de baixo custo, porém de maior risco intrínseco, especialmente em condições de alta saturação (ÁVILA et al., 2021; LEÃO; SANTIAGO, 2022b).

Figura 2 – Esquemas dos principais métodos construtivos para barragens de rejeito.



(a) Alteamento a Jusante.

(b) Alteamento a Montante.

(c) Alteamento Linha de Centro.

Fonte: (CARDOZO, 2024).

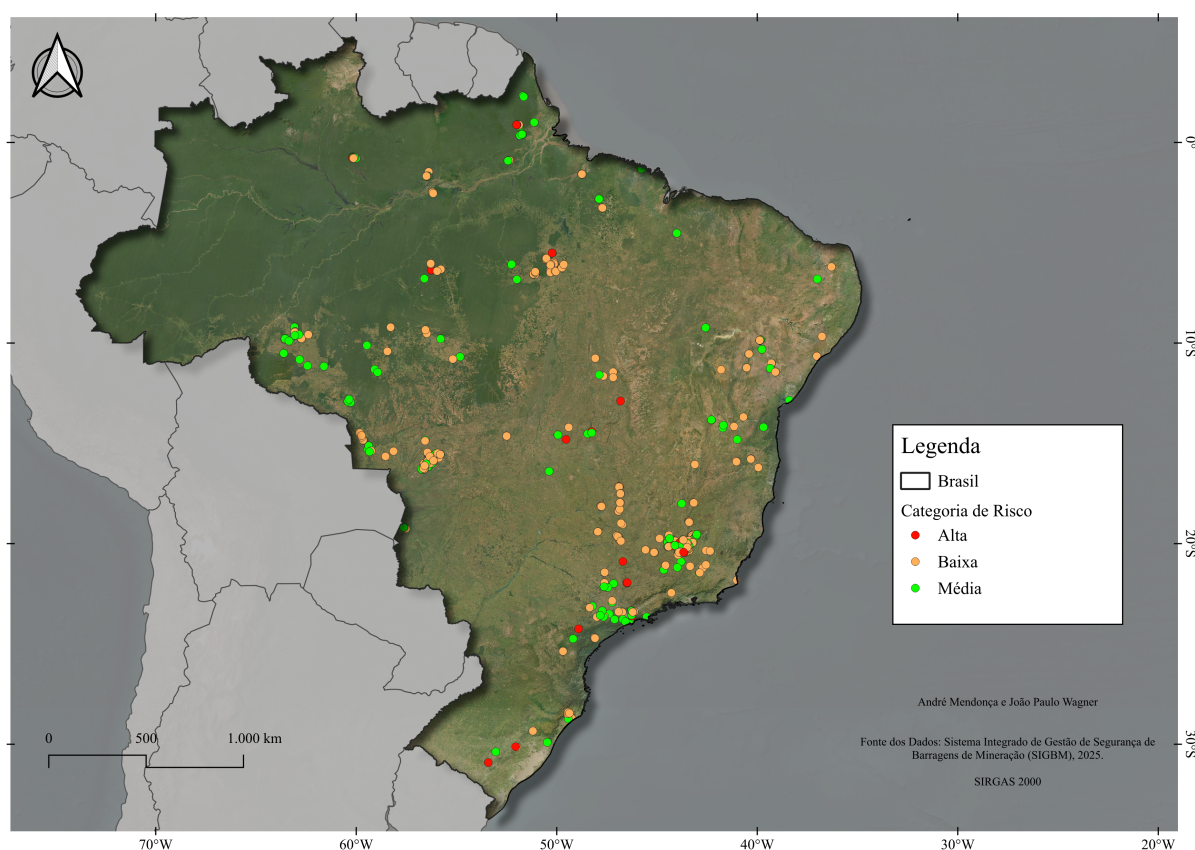
O desastre de Mariana liberou cerca de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos na bacia do Rio Doce, causando 19 mortes e um impacto ambiental que se estendeu por 650 km até o Oceano Atlântico, afetando dezenas de municípios em Minas Gerais e no Espírito Santo (BORGES, 2018). Já o colapso em Brumadinho, de liquefação estática, foi ainda mais trágico em perdas humanas, resultando em 270 fatalidades, com o fluxo de rejeitos que atingiu a comunidade local e o rio Paraopeba em questão de minutos (ÁVILA et al., 2021).

Esses eventos expuseram falhas sistêmicas na governança corporativa das empresas responsáveis e na fiscalização do Estado, além de catalisarem uma completa reestruturação do arcabouço legal e técnico da segurança de barragens no país (BORGES, 2018; ROCHA et

al., 2023). As “lições não aprendidas” entre um desastre e outro evidenciaram a necessidade de uma abordagem mais rigorosa e preventiva, que considerasse de forma mais assertiva a vulnerabilidade das comunidades situadas a jusante (ÁVILA et al., 2021).

Contudo, a ameaça representada por essas estruturas permanece como uma realidade presente. Conforme dados levantados na plataforma da Agência Nacional de Mineração (ANM), em setembro de 2025, o Brasil possuía um total de 917 barragens de mineração registradas. Desse universo, evidencia-se que 88 estruturas se encontravam em algum nível de alerta, sendo uma dessas classificada no Nível 3, o mais elevado na escala de emergência, enquanto a grande maioria, correspondente a 829 barragens, permanecia sem alteração em seu estado de segurança (ANM, 2025). A Figura 3 e a Tabela 1 detalham essa distribuição nacional.

Figura 3 – Mapa de Categoria de Risco para 917 barragens de rejeito no Brasil (Setembro/2025).



Fonte: Elaborado Pelos Autores.

Com um foco específico no estado de Minas Gerais, o painel da Agência Nacional de Mineração (ANM) demonstra que o território mineiro concentra 328 dessas estruturas, representando aproximadamente 36% do total nacional. A situação de alerta no estado é crítica, visto que das 88 barragens em algum nível de emergência no país, 31 estão em Minas Gerais. Estas se distribuem entre os níveis de Alerta (8), Nível 1 (17), Nível 2 (5) e, notavelmente, a única barragem classificada no Nível 3 – o mais elevado na escala de emergência – em todo o Brasil também está localizada no estado (ANM, 2025).

Tabela 1 – Distribuição de barragens de mineração no Brasil por Nível de Emergência (Setembro/2025).

Classificação	Nº de Barragens
Sem Emergência	829
Alerta	16
Nível 1	64
Nível 2	7
Nível 3	1
Total	917

Fonte: (ANM, 2025).

3.3 Dimensões da Vulnerabilidade Social

A análise da segurança de barragens em Minas Gerais não pode se restringir apenas aos aspectos geotécnicos e de engenharia; ela exige, fundamentalmente, a compreensão das dimensões da vulnerabilidade social. Conforme aponta a literatura crítica, a evolução do conceito de insegurança para o de vulnerabilidade social representa o reconhecimento de que o elemento social é um componente ativo e determinante nos cenários de desastre. Não se trata apenas da ocorrência de um evento externo, mas da "predisposição que um dado grupo tem para ser afetado, em termos físicos, econômicos, políticos ou sociais" (MENDES et al., 2012).

Neste contexto, a vulnerabilidade em territórios minerados é uma construção social ancorada em realidades geográficas multiescalares. Ela revela desigualdades profundas no acesso a recursos e na qualidade de vida das populações que residem à jusante das estruturas de rejeitos. Uma proteção civil eficaz e justa deve fundar-se no conhecimento profundo dessas vulnerabilidades sociais, permitindo que as comunidades desenvolvam capacidades de autoproteção que transcendam a mera resposta passiva a alarmes sonoros (ARAGÃO, 2012).

3.3.1 Vulnerabilidade vs Perigo

Para uma análise rigorosa do risco, é imperativo distinguir os conceitos de Perigo (Hazard) e Vulnerabilidade. Nas versões mais quantitativas da análise de risco, a perigosidade é frequentemente tratada como uma variável de cálculo externa — no caso deste estudo, a probabilidade e a magnitude da ruptura de uma barragem de mineração. No entanto, a ciência da vulnerabilidade, propõe que a vulnerabilidade seja entendida como o "potencial para a perda", examinando os padrões geográficos que diferenciam os lugares quanto à sua sensibilidade e capacidade de resposta (CUTTER, 2012).

Enquanto o Perigo refere-se à ameaça física (a mancha de inundação e a força da lama), a Vulnerabilidade refere-se às condições internas do sistema social atingido. Conforme o modelo BBC (BIRKMANN et al., 2012), a vulnerabilidade é composta por três fatores centrais:

- Exposição: A presença física de pessoas e bens em áreas suscetíveis (a mancha).
- Suscetibilidade: As condições sociais e econômicas que tornam certos grupos mais propensos a sofrer danos (ex: idosos, pessoas com mobilidade reduzida ou falta de acesso a veículos).
- Capacidade de Enfrentamento (Coping Capacity): A habilidade da comunidade e das instituições locais de gerir o evento e recuperar-se dele.

Portanto, identificar que uma mancha de inundação sobrepõe um perímetro urbano é identificar o perigo, mas compreender se essa população possui rotas de fuga acessíveis e confiança nas instituições de alerta é medir a sua vulnerabilidade. Como alerta a crítica sociológica, focar apenas na "resiliência" da comunidade pode, por vezes, mascarar uma transferência indevida de responsabilidades das mineradoras e do Estado para os cidadãos (MENDES et al., 2012).

3.3.2 O Índice de Vulnerabilidade Social (IVS)

Para além da identificação da pobreza monetária, o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) surge como uma ferramenta analítica fundamental para mapear a exclusão e a fragilidade dos ativos sociais no território brasileiro. Construído a partir do Atlas do Desenvolvimento Humano (ADH), o IVS é um índice sintético que busca evidenciar falhas na oferta de bens e serviços públicos, as quais, segundo a Constituição Federal de 1988, deveriam ser garantidas pelo Estado em todas as suas instâncias (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2024).

O IVS é estruturado em 16 indicadores distribuídos em três dimensões principais, cujas privações determinam o bem-estar e a capacidade de resposta das populações:

- Infraestrutura Urbana: Avalia o acesso a serviços básicos como saneamento, coleta de lixo e tempo de deslocamento casa-trabalho.
- Capital Humano: Observa indicadores de saúde e educação, fundamentais para a capacidade de autoproteção e compreensão de riscos.
- Renda e Trabalho: Analisa a vulnerabilidade econômica e a inserção produtiva dos indivíduos.

3.4 Gestão de Riscos e Segurança Humana

A gestão de riscos no contexto minerário contemporâneo transcende a mera aplicação de protocolos técnicos, inserindo-se no campo da Segurança Humana. Este conceito propõe um deslocamento do foco da segurança centrada no Estado para uma abordagem centrada nas pessoas, garantindo o direito à liberdade do medo e das necessidades (Organização das Nações Unidas (ONU), 2024). No caso das barragens de rejeitos em Minas Gerais, a segurança

humana é ameaçada pela condição de incerteza permanente vivida pelas populações em áreas de autossalvamento, o que exige que a gestão de riscos seja tratada como uma política pública de preservação da vida e não apenas como um custo operacional das mineradoras (MILANEZ, 2023).

A efetividade dessa gestão fundamenta-se nos pilares da Redução de Riscos de Desastres (RRD), conforme preconizado pelo Marco de Sendai. De acordo com esse paradigma, a gestão deve atuar em quatro fases: prevenção, mitigação, preparação e resposta (Sendai Framework, 2015). Contudo, em territórios com altos Índices de Vulnerabilidade Social (IVS), a fase de preparação torna-se crítica, pois a falta de recursos básicos impede que a comunidade exerça sua autonomia em situações de emergência. Portanto, a gestão de riscos deve integrar a análise geotécnica da barragem com a análise socioeconômica do território, reconhecendo que a segurança de uma estrutura é inseparável da resiliência da comunidade sob sua influência (MENDES et al., 2012).

Por fim, a transição para um modelo de gestão de riscos pautado na segurança humana exige o fortalecimento da Governança de Risco, que pressupõe transparência e participação ativa dos cidadãos na construção dos referenciais de segurança. Com o endurecimento das legislações pós-desastres, como a Lei "Mar de Lama Nunca Mais", a gestão de riscos assume uma dimensão ética e jurídica: o erro na identificação de uma mancha de inundação ou a negligência na comunicação de um perigo não são apenas falhas técnicas, mas violações de direitos fundamentais (Minas Gerais (Estado), 2019). Assim, o mapeamento de vulnerabilidades proposto serve como um instrumento de justiça territorial, permitindo que o poder público priorize ações onde a vida humana está sob maior grau de exposição e fragilidade estrutural (CUTTER, 2012).

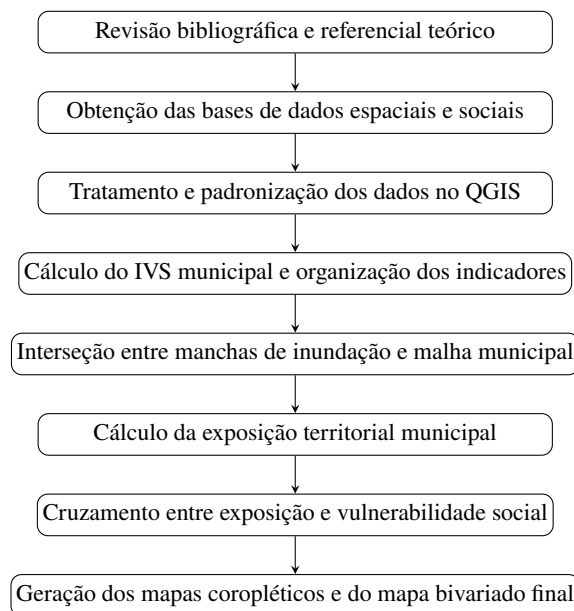
4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para analisar a vulnerabilidade socioambiental de municípios mineiros sujeitos à inundação decorrente do eventual rompimento de barragens de mineração. A pesquisa possui natureza aplicada, abordagem quantitativa e caráter exploratório-descritivo, com base em técnicas de geoprocessamento, análise espacial e integração de dados territoriais, sociais e ambientais em ambiente SIG.

A análise foi estruturada a partir de três componentes complementares: perigo, exposição e vulnerabilidade social. Neste trabalho, o perigo corresponde à presença de barragens de mineração e de suas manchas de inundação hipotéticas; a exposição refere-se ao grau de interceptação do território municipal por essas manchas; e a vulnerabilidade social diz respeito às condições socioeconômicas e de infraestrutura que influenciam a capacidade de prevenção, resposta e recuperação das populações potencialmente afetadas.

Adotou-se o município como unidade espacial de análise, por permitir compatibilizar a malha territorial do IBGE com os dados do Atlas da Vulnerabilidade Social e com as camadas vetoriais de barragens e manchas de inundação. O fluxograma da Figura 4 apresenta, de forma sintética, a sequência metodológica da pesquisa.

Figura 4 – Fluxograma do procedimento metodológico



Fonte: elaborado pelos autores.

4.1 Área de estudo

A área de estudo corresponde ao estado de Minas Gerais, unidade da federação que concentra parte expressiva das barragens de mineração cadastradas no país e que apresenta histórico recente de desastres de grandes proporções associados ao rompimento dessas estruturas,

como os eventos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Além da relevância econômica da atividade minerária no estado, destaca-se a coexistência entre estruturas de contenção de rejeitos, áreas urbanizadas, comunidades rurais, patrimônio ambiental e redes hidrográficas estratégicas, o que confere elevada complexidade ao problema analisado.

Embora a discussão dos resultados possa conferir maior destaque a regiões de maior concentração minerária, como o Quadrilátero Ferrífero, o recorte metodológico adotado neste estudo é estadual. Desse modo, o universo analítico compreende todos os municípios de Minas Gerais, sendo considerados diretamente expostos aqueles cujos limites territoriais interceptam ao menos uma mancha de inundação de barragem de mineração.

4.2 Base de dados

A construção da base de dados geográfica (**Base de Dados Geográficos (BDG)**) foi realizada a partir da integração de fontes oficiais e públicas, com vistas à transparência, reprodutibilidade e consistência analítica.

4.2.1 Barragens de mineração e manchas de inundação

Os dados referentes às barragens de mineração e às respectivas manchas de inundação hipotéticas foram obtidos a partir das bases públicas da Agência Nacional de Mineração (**ANM**), especialmente do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (**Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (SIGBM)**) e de seus serviços geoespaciais associados. Foram considerados os atributos relativos à localização das estruturas, ao método construtivo, à classificação de risco, ao dano potencial associado (**Dano Potencial Associado (DPA)**) e às manchas de inundação oriundas dos estudos de ruptura hipotética apresentados nos Planos de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (**Plano de Ação de Emergência de Barragens de Mineração (PAEBM)**).

As manchas de inundação constituem a principal referência espacial do componente de exposição, por representarem a projeção territorial da onda de inundação em cenário de ruptura. Assim, elas foram utilizadas como camada-base para o cruzamento com a malha municipal mineira e para a identificação dos municípios territorialmente expostos.

4.2.2 Base territorial municipal

A base cartográfica dos municípios foi obtida a partir da malha municipal digital do **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**, adotada como referência territorial do estudo. A escolha da malha municipal justifica-se por sua compatibilidade com a escala dos indicadores do Atlas da Vulnerabilidade Social e por sua adequação à análise comparativa em escala estadual.

4.2.3 Indicadores sociais

A dimensão social foi operacionalizada com base nos dados do Atlas da Vulnerabilidade Social, elaborado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Foram utilizados o Índice de Vulnerabilidade Social (**Índice de Vulnerabilidade Social (IVS)**) municipal e seus três subíndices temáticos: Infraestrutura Urbana, Capital Humano e Renda e Trabalho. Esses indicadores foram selecionados por já constituírem uma medida sintética consolidada da vulnerabilidade social, com metodologia padronizada e ampla utilização em estudos territoriais no Brasil.

De forma complementar, variáveis municipais derivadas da mesma base podem ser mobilizadas para leitura analítica e discussão dos resultados, a exemplo da população total, de indicadores demográficos e de aspectos associados à infraestrutura domiciliar. Todavia, tais variáveis não foram novamente agregadas ao **IVS**, de modo a evitar dupla contagem de dimensões já contempladas pelo índice sintético.

4.3 Tratamento e integração dos dados em ambiente SIG

O tratamento e a integração das bases foram realizados no *software* QGIS, em ambiente **Sistemas de Informação Geográfica (SIG)**. Inicialmente, todas as camadas originais passaram por rigorosos procedimentos de conferência, higienização de dados, correção topológica e padronização dos campos de atributos, visando garantir a integridade das operações espaciais subsequentes.

No que tange aos dados tabulares do **IVS**, realizou-se a adequação da tipologia dos campos na tabela de atributos, convertendo variáveis textuais em numéricas de precisão dupla (decimais reais). Esse passo envolveu a substituição padronizada de vírgulas por pontos como separadores decimais, garantindo a operabilidade matemática no *software*. Ademais, para viabilizar a união de tabelas (*Join*) entre os dados do **IVS** e a malha vetorial do **IBGE**, padronizou-se o código identificador municipal. Empregaram-se funções de manipulação de *strings* para assegurar que ambas as bases adotassem o padrão de 6 dígitos, aplicando o preenchimento de zeros à esquerda ou a supressão do último dígito verificador quando necessário, assegurando a correspondência exata entre os registros.

No ambiente espacial, as camadas vetoriais de municípios e de manchas de inundação foram submetidas a algoritmos de correção de geometrias. Essa etapa é fundamental para eliminar vértices inválidos, autointerseções e polígonos corrompidos que inviabilizariam os cálculos de área e as interseções. As camadas do **IBGE**, originalmente disponibilizadas no sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000, foram reprojatadas para um sistema de coordenadas planas projetadas em metros. Essa transformação métrica foi indispensável para garantir precisão e consistência aos cálculos de área territorial e das extensões atingidas.

Para quantificar a área exposta, aplicou-se um encadeamento específico de operações

espaciais. Primeiramente, as manchas de inundação hipotéticas foram dissolvidas (operação *Dissolve*) em uma feição multipoligonal única. Esse tratamento foi adotado para fundir polígonos sobrepostos oriundos de diferentes barragens, prevenindo a dupla contagem espacial em áreas onde há interseção de múltiplos cenários de ruptura. Na sequência, procedeu-se à operação de interseção espacial (*Intersection*) entre essa mancha unificada e a malha municipal. Por fim, o resultado foi novamente dissolvido, adotando-se o código do município como campo de agrupamento. Esse fluxo garantiu a geração de uma camada final consolidada, na qual cada município afetado possui um único registro geométrico contendo a soma total de suas áreas de exposição.

4.4 Mensuração da vulnerabilidade social municipal

A vulnerabilidade social foi representada pelo **IVS** municipal, indicador sintético que varia de 0 a 1, em que valores mais elevados indicam maior vulnerabilidade social. Diferentemente de abordagens que demandam a construção de um índice próprio a partir de diversas variáveis censitárias, optou-se neste trabalho por utilizar diretamente o **IVS** oficial do Atlas da Vulnerabilidade Social, em razão de três aspectos principais: (i) padronização metodológica; (ii) comparabilidade territorial; e (iii) maior robustez analítica para a escala municipal.

Além do **IVS** global, os subíndices de Infraestrutura Urbana, Capital Humano e Renda e Trabalho foram empregados na interpretação dos resultados, possibilitando identificar quais dimensões da vulnerabilidade social mais contribuem para a condição observada em cada município.

Para fins cartográficos, o **IVS** foi classificado segundo as faixas oficiais do Atlas da Vulnerabilidade Social, a saber: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta vulnerabilidade social. A adoção dessas classes, em vez de classificações estatísticas arbitrárias, contribui para a padronização interpretativa dos resultados e fortalece a comparabilidade com outros estudos e relatórios institucionais.

4.5 Mensuração da exposição municipal às manchas de inundação

A exposição territorial municipal foi estimada a partir da proporção da área do município interceptada por manchas de inundação. Esse procedimento permitiu representar, em escala municipal, o grau de comprometimento territorial potencial associado a cenários de ruptura de barragens.

A mensuração demandou o cálculo das áreas geométricas em quilômetros quadrados (km²) diretamente na calculadora de campos do **SIG**, originando a medida de exposição representada pela Equação **4.1**:

$$E_i = \frac{A_i^{\text{int}}}{A_i^{\text{mun}}} \times 100 \quad (4.1)$$

em que:

- E_i corresponde ao percentual de exposição territorial do município i ;
- A_i^{int} corresponde à área total de interseção entre as manchas de inundação e o município i ;
- A_i^{mun} corresponde à área total do município i .

A referida equação foi aplicada de forma iterativa no banco de dados. Para os municípios que não retornaram feições geométricas na operação de interseção — isto é, cujos territórios estão inteiramente fora das zonas de alagamento projetadas —, os valores nulos gerados no sistema foram tratados por meio de lógicas condicionais (funções *CASE WHEN*). A esses casos foi atribuído o valor exato de 0% de exposição territorial.

Para a representação cartográfica deste indicador, adotou-se uma técnica de simbologia baseada em regras. Os municípios com 0% de exposição foram isolados visualmente e representados em tons de cinza claro (cor neutra). Essa separação foi crucial para que o grande volume de municípios não expostos não distorcesse a distribuição visual dos dados. Já os municípios com exposição superior a zero foram classificados mediante procedimento estatístico de Quebras Naturais (Jenks). A escolha do método de Jenks justifica-se por sua capacidade de minimizar a variância interna das classes e maximizar a diferença entre elas, o que se mostra ideal para variáveis contínuas com distribuição assimétrica e forte concentração de valores baixos, evidenciando as áreas mais críticas do estado.

4.6 Síntese da vulnerabilidade socioambiental

A síntese da vulnerabilidade socioambiental foi realizada por meio do cruzamento entre a vulnerabilidade social municipal e a exposição territorial às manchas de inundação. Optou-se por uma abordagem de síntese cartográfica baseada em matriz bivariada, técnica altamente compatível com a visualização de dados agregados por polígono administrativo, permitindo a correlação visual de duas variáveis independentes.

A construção do mapa bivariado exigiu a reclassificação prévia do **IVS** e da exposição percentual. O **IVS** foi agrupado em três classes ordinais (Baixo, Médio e Alto), respeitando as faixas oficiais do Ipea. A exposição territorial também foi consolidada em três níveis, adotando-se os limiares das quebras de Jenks geradas na etapa de mensuração.

A partir dessas duas variáveis reclassificadas, criou-se um identificador textual único no banco de dados espacial para cada município, por meio da concatenação algorítmica de suas classes (gerando códigos que variam de "1_1" a "3_3", além do código "0" para áreas

sem exposição). Esse identificador balizou a aplicação de uma paleta de cores bidimensional composta por nove matrizes cromáticas hexadecimais. O cruzamento originou uma matriz de prioridade socioambiental, em que os municípios enquadrados simultaneamente na classe mais alta de vulnerabilidade social e na classe mais alta de exposição (código 3_3) foram destacados com as tonalidades mais escuras, sendo considerados prioritários para ações de prevenção, monitoramento e planejamento territorial.

Essa estratégia metodológica apresenta dupla vantagem. A primeira é a transparência analítica, pois evita ponderações matemáticas arbitrárias na fusão de variáveis de naturezas distintas. A segunda é a clareza comunicativa cartográfica, uma vez que torna imediata a identificação das regiões onde a ameaça tecnológica incide sobre os contextos sociais mais frágeis e desprovidos de capacidade de resposta.

4.7 Geração e interpretação dos mapas

A representação cartográfica dos resultados foi estruturada em quatro produtos principais:

1. **Mapa de localização e contexto:** representação das barragens de mineração, das manchas de inundação e dos municípios mineiros;
2. **Mapa coroplético do IVS:** representação da distribuição espacial da vulnerabilidade social municipal em Minas Gerais;
3. **Mapa coroplético da exposição:** representação do percentual de área municipal interceptada por manchas de inundação;
4. **Mapa bivariado de vulnerabilidade socioambiental:** síntese cartográfica do cruzamento entre IVS e exposição.

O mapa coroplético do IVS constitui a base interpretativa da dimensão social, ao passo que o mapa de exposição permite visualizar a distribuição territorial do impacto potencial das manchas de inundação. O mapa bivariado, por sua vez, representa o principal produto analítico do trabalho, por sintetizar os municípios onde a ameaça tecnológica incide sobre contextos sociais mais frágeis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da análise da vulnerabilidade socioambiental dos municípios mineiros sujeitos a manchas de inundação associadas a barragens de mineração. A discussão foi organizada em quatro eixos complementares: (i) a configuração territorial das barragens e das manchas de inundação no estado; (ii) a vulnerabilidade social dos municípios potencialmente expostos; (iii) a intensidade da exposição territorial municipal; e (iv) a síntese bivariada da vulnerabilidade socioambiental. Ao final, são discutidas as implicações dos resultados para a política ambiental, o planejamento territorial e a governança da segurança de barragens em Minas Gerais.

Embora a dimensão ambiental não tenha sido operacionalizada por um índice ecológico específico, ela está incorporada à análise por meio das manchas de inundação e da exposição territorial municipal ao risco associado às barragens de mineração. A interpretação dos resultados parte do pressuposto de que a presença de uma barragem ou de sua respectiva mancha de inundação não é, por si só, suficiente para determinar a gravidade territorial do risco. A criticidade decorre da interação entre a ameaça tecnológica e as condições sociais dos territórios potencialmente atingidos. Assim, os mapas e tabelas a seguir foram lidos de forma integrada, buscando identificar não apenas onde estão as estruturas e as áreas potencialmente afetadas, mas sobretudo onde a exposição territorial incide sobre municípios com maiores fragilidades sociais.

5.1 Configuração territorial das barragens de mineração em Minas Gerais

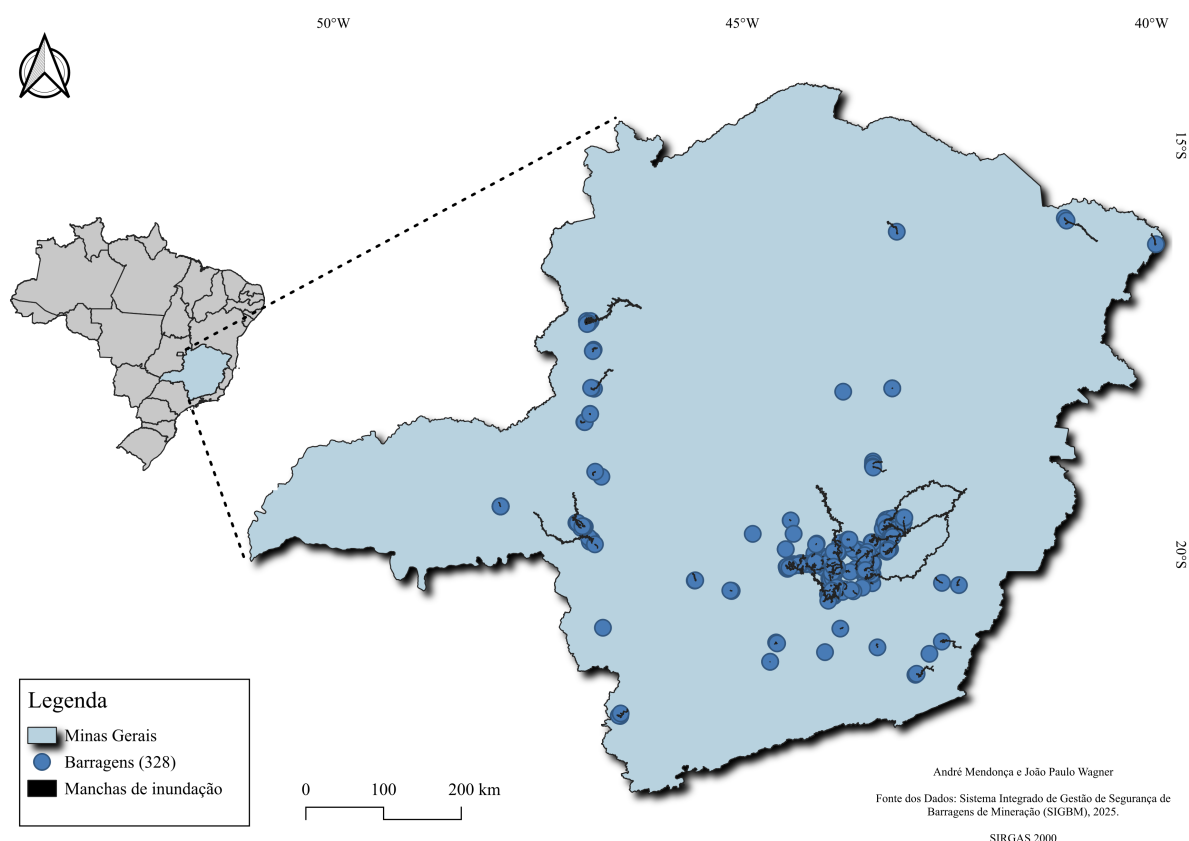
Inicialmente cumpre salientar a centralidade de Minas Gerais no problema analisado. O mapa de contexto espacial mostra a ampla distribuição das barragens de mineração no território estadual e, ao mesmo tempo, sua concentração em determinados compartimentos regionais, especialmente no Quadrilátero Ferrífero e em porções do leste mineiro. Embora haja registros dispersos em outras regiões do estado, a organização espacial das estruturas não é homogênea, revelando a existência de áreas de maior densidade minerária e de maior sobreposição entre atividade extrativa, ocupação humana e redes hidrográficas.

O mapa evidencia que a maior concentração de barragens ocorre no centro-sudeste do estado, em especial no entorno metropolitano de Belo Horizonte e no Quadrilátero Ferrífero, área historicamente marcada pela mineração de ferro e pela coexistência entre estruturas de rejeitos, áreas urbanas, patrimônio ambiental e corredores logísticos. Esse padrão espacial não é trivial. Ele indica que o risco tecnológico associado às barragens se materializa justamente em regiões onde a pressão territorial é mais intensa e onde os conflitos entre uso do solo, conservação ambiental e segurança populacional tendem a ser mais agudos.

Ao mesmo tempo, o mapa mostra que a presença de barragens também avança sobre outras porções do território mineiro, incluindo áreas do leste e do nordeste do estado. Isso significa que a problemática da segurança de barragens em Minas Gerais não pode ser lida apenas

como uma questão localizada do Quadrilátero Ferrífero, ainda que essa região concentre os casos mais emblemáticos e parte importante dos empreendimentos. O risco se territorializa de maneira seletiva, mas com abrangência suficiente para atingir municípios de perfis socioeconômicos bastante distintos.

Figura 5 – Contextualização espacial das barragens de mineração e das manchas de inundação em Minas Gerais



Fonte: elaborado pelos autores com base em dados do SIGBM (2025).

A partir da operação de interseção entre as manchas de inundação e a malha municipal, foram identificados 128 municípios potencialmente expostos. Esse resultado é relevante por duas razões. Em primeiro lugar, demonstra que as manchas de inundação associadas a barragens de mineração ultrapassam o limite de alguns poucos municípios tradicionalmente lembrados no debate público e alcançam um conjunto mais amplo de territórios. Em segundo lugar, mostra que a leitura do risco em escala municipal é capaz de revelar a disseminação espacial do problema e de subsidiar uma agenda de prevenção que não se limite aos casos já consolidados na memória social dos desastres de Mariana e Brumadinho.

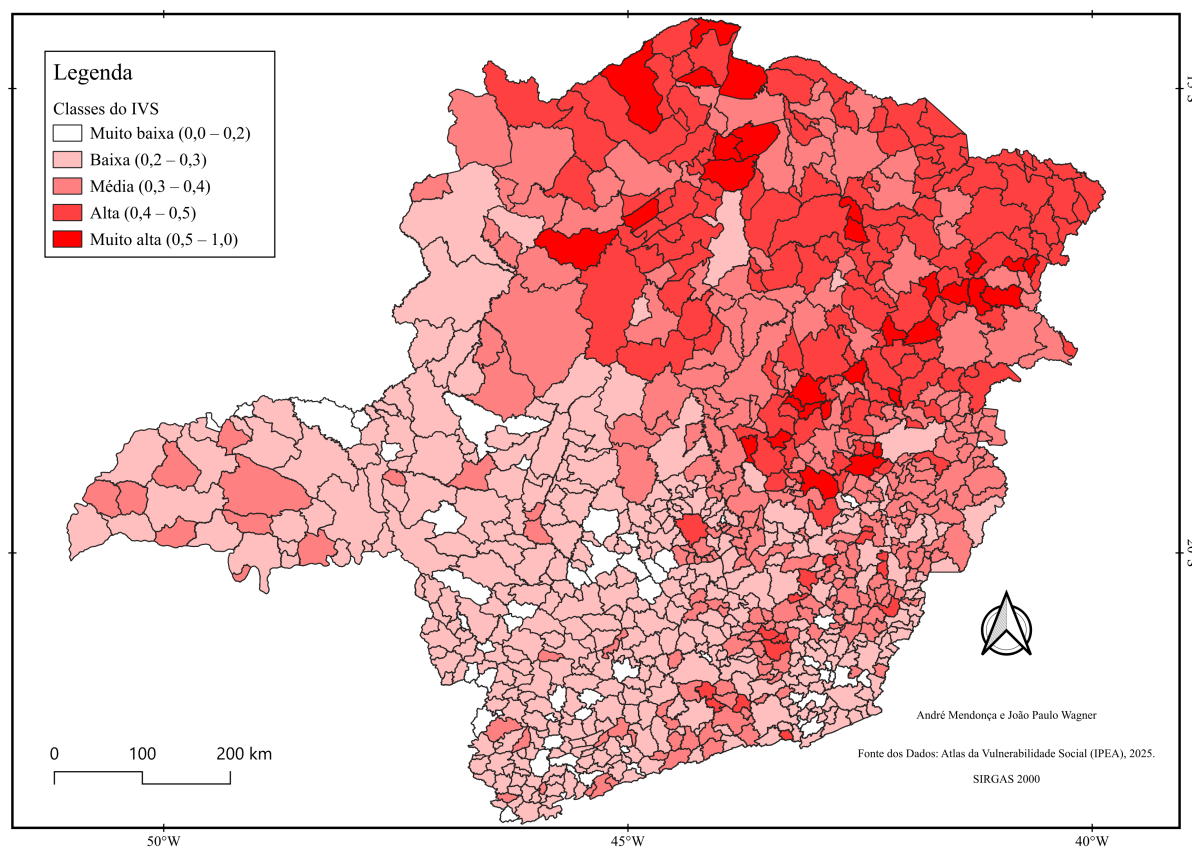
Em termos territoriais, a exposição municipal não acompanha de forma linear a simples contagem de barragens. Municípios com forte concentração de estruturas podem, em alguns casos, apresentar percentuais moderados de área interceptada, ao passo que municípios com menor número de barragens podem registrar exposição territorial relativamente elevada em razão da geometria das manchas, do posicionamento das estruturas no relevo e da própria configuração

do limite municipal. Esse resultado já antecipa uma conclusão importante do trabalho: a criticidade territorial não pode ser inferida apenas pela quantidade de barragens, exigindo análise espacial mais refinada.

5.2 Vulnerabilidade social dos municípios potencialmente expostos

A análise da vulnerabilidade social dos municípios potencialmente expostos constitui a primeira dimensão substantiva do diagnóstico. Para esse fim, foi utilizado o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) e seus três subíndices — Infraestrutura Urbana, Capital Humano e Renda e Trabalho — considerando apenas os 128 municípios cuja área territorial foi interceptada por manchas de inundação.

Figura 6 – Vulnerabilidade social dos municípios potencialmente expostos, segundo o IVS, dados de 2025



Fonte: elaborado pelos autores com base no Atlas da Vulnerabilidade Social (IPEA) () e na malha municipal do IBGE ().

Os resultados mostram que a vulnerabilidade social desses municípios apresenta distribuição heterogênea. O valor médio do IVS foi de 0,308, com mediana de 0,299, mínimo de 0,182 e máximo de 0,571. Esse conjunto de valores indica que, em média, o universo analisado situa-se no limiar entre as classes de baixa e média vulnerabilidade social, embora com casos extremos significativamente mais altos. A proximidade entre média e mediana sugere relativa concentração dos municípios em valores intermediários, mas a amplitude observada demonstra

que o conjunto dos expostos inclui desde municípios com melhores indicadores sociais até territórios com fragilidades bastante acentuadas.

Tabela 2 – Estatísticas descritivas do IVS e dos subíndices nos municípios potencialmente expostos

Indicador	Mínimo	Máximo	Média	Mediana
IVS	0,182	0,571	0,308	0,299
Infraestrutura Urbana	0,008	0,743	0,222	0,200
Capital Humano	0,202	0,537	0,354	0,347
Renda e Trabalho	0,171	0,683	0,349	0,335

Fonte: elaborado pelos autores com base no Atlas da Vulnerabilidade Social (IPEA).

A distribuição por classes reforça essa leitura. Entre os 128 municípios expostos, 6 (4,7%) enquadram-se em vulnerabilidade muito baixa, 59 (46,1%) em baixa, 44 (34,4%) em média, 16 (12,5%) em alta e 3 (2,3%) em muito alta vulnerabilidade social. Em conjunto, os municípios em alta ou muito alta vulnerabilidade somam 19 casos, correspondendo a 14,8% do universo exposto.

Tabela 3 – Distribuição dos municípios potencialmente expostos segundo as classes oficiais do IVS

Classe do IVS	Número de municípios	Percentual
Muito baixa (0,000–0,200)	6	4,7%
Baixa (0,201–0,300)	59	46,1%
Média (0,301–0,400)	44	34,4%
Alta (0,401–0,500)	16	12,5%
Muito alta (0,501–1,000)	3	2,3%
Total	128	100,0%

Fonte: elaborado pelos autores com base no Atlas da Vulnerabilidade Social (IPEA).

Esse resultado é expressivo porque evidencia que a exposição a manchas de inundação não recai apenas sobre municípios com melhor estrutura socioeconômica. Ainda que a maior parte dos casos se concentre nas classes baixa e média, existe um contingente relevante de municípios em situação de alta fragilidade social. Em termos práticos, isso significa que uma parcela não desprezível dos territórios potencialmente atingidos por barragens de mineração se encontra em condições menos favoráveis para antecipar, responder e recuperar-se de um desastre.

Do ponto de vista espacial, o mapa do IVS indica que os municípios mais vulneráveis tendem a se distribuir fora do núcleo minerário mais clássico do estado, com maior incidência em porções do leste, nordeste e norte de Minas Gerais, além de casos pontuais na região central. Esse padrão é importante porque mostra que a vulnerabilidade social não coincide automaticamente com a geografia da mineração. Assim, o simples fato de um município estar situado em região fortemente mineradora não o torna necessariamente o mais vulnerável do ponto de vista social;

do mesmo modo, municípios socialmente mais frágeis podem se tornar críticos mesmo quando não estão entre os principais polos minerários do estado.

Entre os municípios expostos com maiores valores de IVS destacam-se, por exemplo, Açucena (0,571), Alvorada de Minas (0,543), Ferros (0,542), Barra Longa (0,476) e Riacho dos Machados (0,465). Esses casos são particularmente relevantes porque indicam que o risco socioambiental em Minas Gerais não se limita aos municípios de maior densidade econômica ou maior visibilidade política; ao contrário, ele alcança também municípios menores, com maior fragilidade estrutural e menor capacidade institucional de reação.

5.2.1 Leitura dos subíndices do IVS

A decomposição do IVS em seus subíndices permite qualificar a interpretação dos resultados e compreender quais dimensões pesam mais na vulnerabilidade social dos municípios expostos. O primeiro aspecto que chama atenção é a diferença entre os valores médios dos subíndices. Enquanto Infraestrutura Urbana apresentou média de 0,222, os subíndices de Capital Humano e Renda e Trabalho registraram médias mais elevadas, respectivamente 0,354 e 0,349.

Esse padrão sugere que, no conjunto dos municípios expostos, a vulnerabilidade social está menos relacionada à precariedade extrema da infraestrutura urbana e mais associada a fragilidades ligadas à formação educacional, às trajetórias de inserção social e às condições de renda e trabalho. Em outras palavras, a capacidade de enfrentamento do risco parece ser mais fortemente condicionada por fatores sociais estruturais do que apenas por déficits físico-urbanos.

Essa leitura é metodologicamente importante porque evita uma interpretação restrita da vulnerabilidade como simples carência de saneamento ou de serviços urbanos. Os resultados indicam que os municípios potencialmente expostos apresentam, em média, fragilidades mais expressivas nas dimensões ligadas à reprodução social, à escolaridade, à dependência econômica e à inserção no mercado de trabalho. Isso amplia o alcance do diagnóstico: a vulnerabilidade associada às barragens não pode ser tratada apenas como problema de engenharia e infraestrutura, mas como expressão de desigualdades sociais mais profundas.

Nos municípios mais críticos, essa tendência se acentua. Os casos de Barra Longa, Joanésia e Sem-Peixe, por exemplo, evidenciam que o componente de Renda e Trabalho exerce papel decisivo na elevação da vulnerabilidade. Em Barra Longa, o subíndice de Renda e Trabalho atinge 0,683, valor bastante elevado; em Joanésia, 0,550; e em Sem-Peixe, 0,462. Isso significa que, mesmo quando a infraestrutura urbana não é a pior dimensão, a fragilidade econômica e laboral pode elevar substancialmente o risco social do território.

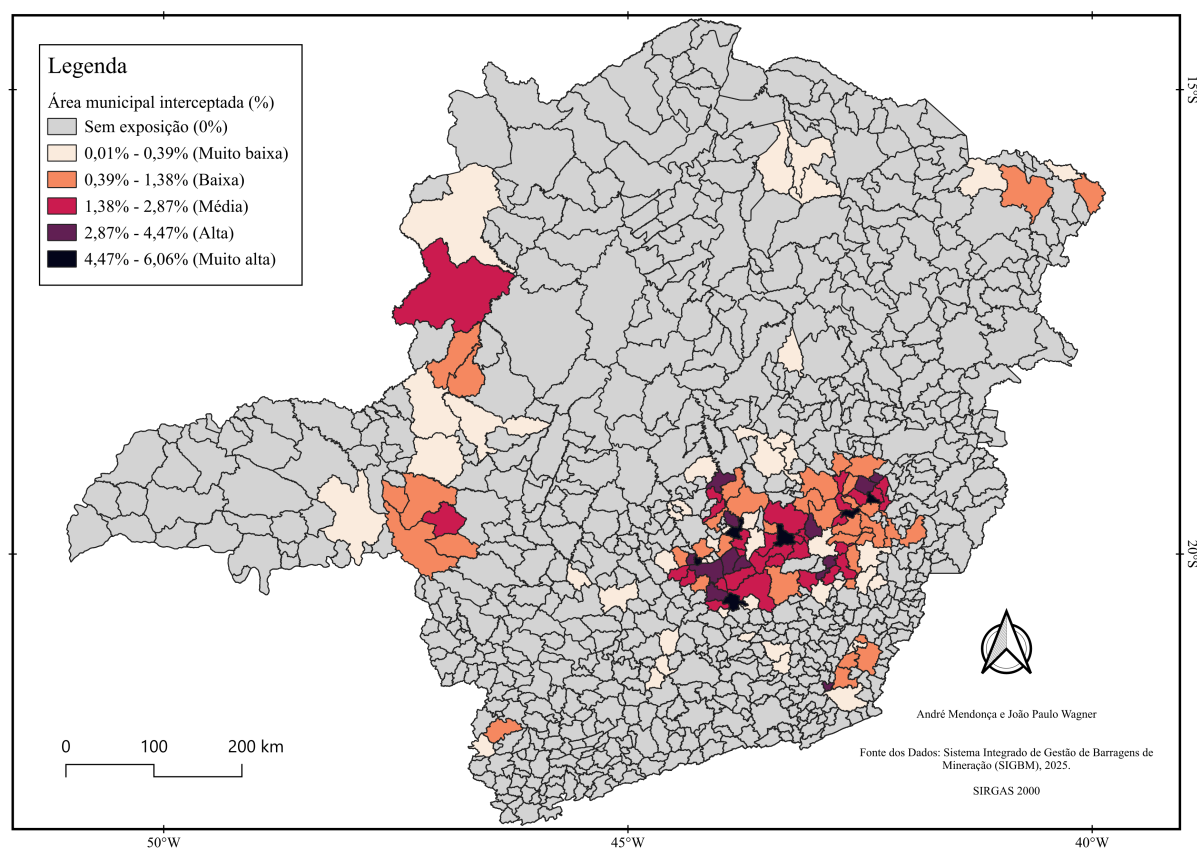
Esse achado fortalece a hipótese de que o impacto potencial de um rompimento não depende apenas do traçado da mancha de inundação, mas da capacidade efetiva de proteção, resposta e recomposição das populações atingidas. Municípios com baixa diversificação econômica, menor renda média e maior vulnerabilidade laboral tendem a sofrer impactos mais

duradouros e mais difíceis de reparar. Para a política pública, isso implica reconhecer que a gestão do risco de barragens deve dialogar não apenas com defesa civil e licenciamento, mas também com políticas sociais, de trabalho e de fortalecimento institucional municipal.

5.3 Exposição territorial municipal às manchas de inundação

A segunda dimensão do diagnóstico refere-se à exposição territorial, medida pela proporção da área municipal interceptada pelas manchas de inundação. Ao contrário do IVS, que expressa condições sociais preexistentes, a exposição territorial representa a intensidade espacial com que a ameaça tecnológica incide sobre o território municipal.

Figura 7 – Exposição territorial dos municípios às manchas de inundação



Fonte: elaborado pelos autores com base nas manchas de inundação do SIGBM e na malha municipal do IBGE.

Os resultados revelam distribuição bastante assimétrica da exposição. O percentual médio de área municipal interceptada foi de 1,385%, enquanto a mediana foi de 0,793%. A diferença entre média e mediana indica concentração de municípios em níveis relativamente baixos de exposição e existência de um grupo menor de casos com percentuais mais elevados, puxando a média para cima. O valor máximo observado foi de 6,055%, em Santa Luzia, ao passo que o mínimo foi de 0,0002%.

Essa leitura é importante por dois motivos. Primeiro, ela mostra que a maior parte dos municípios expostos tem apenas uma fração relativamente pequena de seu território interceptada

por manchas de inundação, o que é compatível com a geometria linear e localizada de muitos vales a jusante. Segundo, ela demonstra que percentuais aparentemente modestos em escala municipal não devem ser confundidos com baixa gravidade local, já que a área atingida pode coincidir com núcleos urbanos, áreas produtivas, infraestruturas viárias ou comunidades específicas.

Tabela 4 – Distribuição dos municípios expostos segundo as classes de exposição territorial

Classe de exposição territorial	Número de municípios	Percentual
Muito baixa (0,01%–0,39%)	44	34,4%
Baixa (0,40%–1,38%)	36	28,1%
Média (1,39%–2,87%)	29	22,7%
Alta (2,88%–4,47%)	12	9,4%
Muito alta (4,48%–6,06%)	7	5,5%
Total	128	100,0%

Fonte: elaborado pelos autores com base nas operações de interseção espacial entre manchas de inundação e malha municipal.

A distribuição por classes reforça a assimetria do fenômeno. Dos 128 municípios expostos, 44 (34,4%) enquadram-se em exposição muito baixa, 36 (28,1%) em baixa, 29 (22,7%) em média, 12 (9,4%) em alta e 7 (5,5%) em muito alta exposição. Em conjunto, isso significa que aproximadamente 62,5% dos municípios expostos apresentam até 1,38% de sua área interceptada, enquanto apenas 14,9% concentram-se nas classes alta e muito alta.

Esse resultado é particularmente revelador porque mostra que o risco espacial das barragens, quando observado em escala municipal, apresenta distribuição concentrada. A grande maioria dos municípios possui exposição reduzida ou moderada, mas existe um subconjunto relativamente pequeno de territórios onde a mancha interfere de maneira muito mais intensa. É justamente nesse subconjunto que a análise integrada com o IVS se torna mais decisiva.

Os dez municípios com maiores percentuais de área interceptada mostram um padrão territorial bastante significativo. Há forte presença de municípios da Região Metropolitana de Belo Horizonte e do Quadrilátero Ferrífero, como Santa Luzia, São Joaquim de Bicas, Nova Lima, Brumadinho e São Gonçalo do Rio Abaixo, mas também aparecem municípios do eixo leste-industrial, como Timóteo, Ipaba e Nova Era. Isso revela que a alta exposição territorial não é exclusividade do núcleo minerário clássico, projetando-se também sobre áreas ligadas a corredores industriais e vales fortemente articulados à dinâmica do rio Doce.

Outro aspecto importante é que alguns dos municípios mais expostos não se destacam necessariamente pelos maiores valores de IVS. Congonhas, Timóteo, Nova Lima, Lagoa Santa e Brumadinho, por exemplo, apresentam exposição muito elevada, mas não figuram entre os municípios socialmente mais vulneráveis do conjunto analisado. Isso confirma que a exposição territorial, isoladamente, não esgota a leitura do risco socioambiental. Há casos em que a intensidade espacial do perigo é alta, mas a capacidade social e institucional do município

Tabela 5 – Municípios com maiores percentuais de área interceptada por manchas de inundação

Município	Área interceptada (%)	IVS	Classe bivariada de Vulnerabilidade Social e Exposição Territorial
Santa Luzia	6,06	0,333	2_3
São Joaquim de Bicas	5,97	0,371	2_3
Congonhas	5,37	0,258	1_3
Timóteo	5,28	0,204	1_3
Ipaba	4,89	0,315	2_3
São Gonçalo do Rio Abaixo	4,66	0,283	1_3
Nova Era	4,47	0,292	1_3
Nova Lima	4,16	0,235	1_3
Lagoa Santa	4,11	0,242	1_3
Brumadinho	4,02	0,224	1_3

Fonte: elaborado pelos autores com base nas operações de interseção espacial.

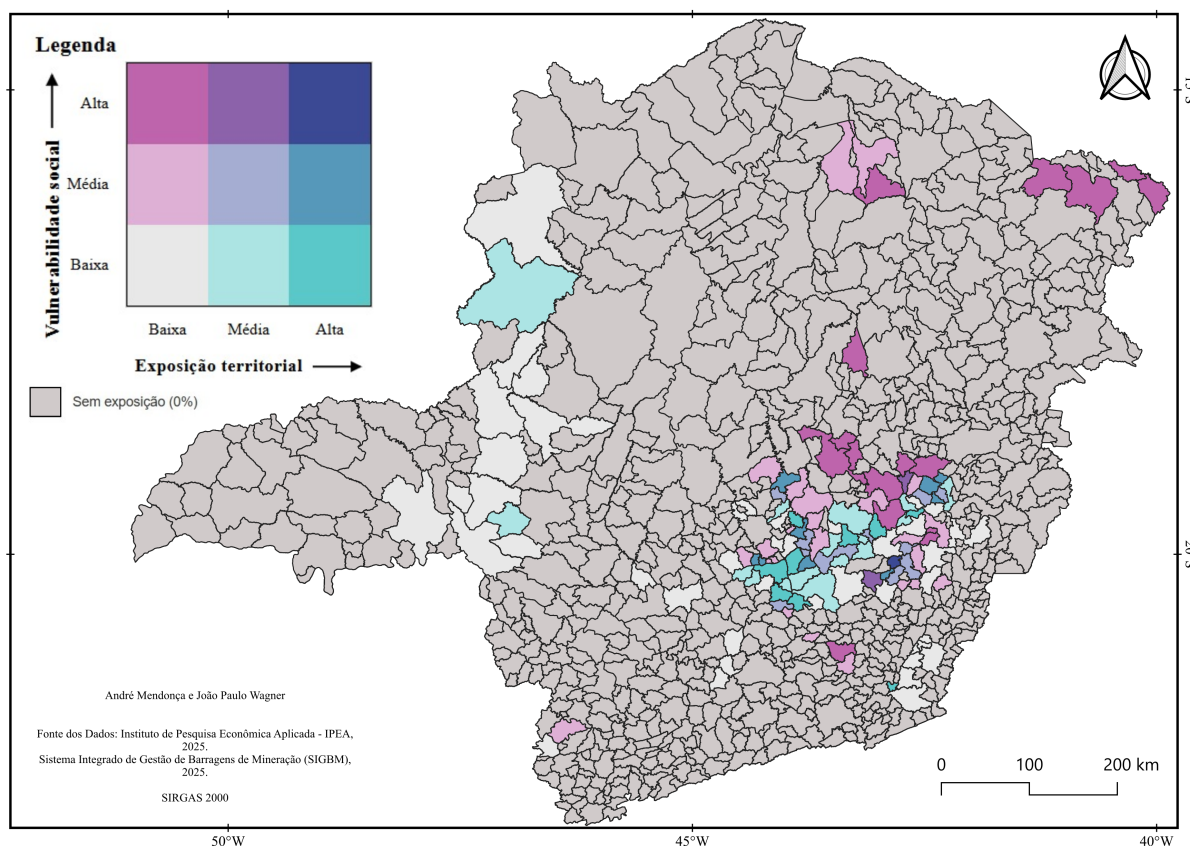
é relativamente mais favorável; e há casos inversos, em que a exposição é menor, mas a vulnerabilidade social é muito mais severa.

Portanto, os resultados desta seção reforçam uma conclusão central: a métrica de exposição territorial é indispensável para identificar onde a ameaça tecnológica se projeta com maior intensidade espacial, mas ela precisa ser necessariamente combinada com a leitura da vulnerabilidade social para produzir diagnóstico territorial mais robusto.

5.4 Síntese bivariada da vulnerabilidade socioambiental

A síntese bivariada constitui o núcleo analítico deste trabalho, pois integra as duas dimensões centrais do problema: vulnerabilidade social e exposição territorial. Para isso, o IVS foi reclassificado em três níveis analíticos e a exposição territorial também foi agrupada em três classes, permitindo a construção de um mapa bivariado com nove combinações possíveis, além da categoria de municípios sem exposição.

Figura 8 – Síntese bivariada da vulnerabilidade socioambiental e exposição territorial a manchas de inundação dos municípios mineiros



Fonte: elaborado pelos autores com base no cruzamento entre IVS e exposição territorial municipal.

A leitura do mapa bivariado revela que a vulnerabilidade socioambiental não é resultado automático da simples presença de barragens, mas da sobreposição entre fragilidade social e intensidade espacial da ameaça. Em outras palavras, os municípios mais críticos não são necessariamente aqueles com maior número de barragens ou maior centralidade na economia mineral, mas aqueles em que a exposição territorial às manchas se combina a condições sociais menos favoráveis.

A distribuição das classes bivariadas mostra que a maior parte dos municípios expostos se concentra nas combinações de menor criticidade relativa. A classe 1_1 (baixa vulnerabilidade social e baixa exposição) reúne 40 municípios (31,25%), seguida da classe 2_1 (média vulnerabilidade social e baixa exposição), com 24 municípios (18,75%). Ainda assim, o mapa também evidencia um conjunto mais restrito de situações críticas e prioritárias, concentradas principalmente nas classes 2_3, 3_2 e 3_3.

Tabela 6 – Distribuição dos municípios expostos segundo as classes bivariadas de vulnerabilidade socioambiental

Classe bivariada	Interpretação	Nº de municípios	Percentual
1_1	Baixa vulnerabilidade social + baixa exposição	40	31,25%
1_2	Baixa vulnerabilidade social + média exposição	16	12,50%
1_3	Baixa vulnerabilidade social + alta exposição	9	7,03%
2_1	Média vulnerabilidade social + baixa exposição	24	18,75%
2_2	Média vulnerabilidade social + média exposição	11	8,59%
2_3	Média vulnerabilidade social + alta exposição	9	7,03%
3_1	Alta vulnerabilidade social + baixa exposição	16	12,50%
3_2	Alta vulnerabilidade social + média exposição	2	1,56%
3_3	Alta vulnerabilidade social + alta exposição	1	0,78%
Total		128	100,0%

Fonte: elaborado pelos autores com base na classificação bivariada.

Esse resultado merece atenção. Embora apenas um município tenha sido classificado simultaneamente na categoria máxima de vulnerabilidade social e de exposição territorial (3_3), existe um conjunto mais amplo de municípios em classes imediatamente inferiores, mas ainda assim altamente relevantes do ponto de vista da gestão territorial do risco. A classe 3_2 reúne casos em que a vulnerabilidade social já é alta e a exposição é média; a classe 2_3, por sua vez, reúne municípios em que a exposição é alta, embora a vulnerabilidade social seja média. Esses grupos, somados, formam o núcleo prioritário do diagnóstico.

Tabela 7 – Municípios classificados em maior criticidade socioambiental

Município	IVS	Área interceptada (%)	Classe bivariada
Sem-Peixe	0,426	3,35	3_3
Barra Longa	0,476	1,70	3_2
Joanésia	0,432	2,00	3_2
Rio Acima	0,341	3,52	2_3
Santa Luzia	0,333	6,06	2_3
São Joaquim de Bicas	0,371	5,97	2_3
Igarapé	0,361	3,78	2_3
Rio Doce	0,317	3,20	2_3
Jequitibá	0,344	3,80	2_3
Belo Oriente	0,322	3,62	2_3
Naque	0,339	3,42	2_3
Ipaba	0,315	4,89	2_3

Fonte: elaborado pelos autores com base na síntese bivariada.

O caso de Sem-Peixe é particularmente emblemático. Trata-se do único município enquadrado em 3_3, combinando IVS de 0,426 com 3,35% de área municipal interceptada. Isso significa que o município reúne, simultaneamente, fragilidade social elevada e alta exposição territorial, configurando a situação mais crítica do conjunto analisado. Esse resultado é

especialmente relevante porque Sem-Peixe não figura entre os municípios mineiros mais lembrados no debate público sobre barragens, o que demonstra a potência analítica do método adotado: o cruzamento entre indicadores sociais e dados espaciais é capaz de revelar criticidades territoriais invisibilizadas quando se considera apenas a notoriedade dos casos.

Na classe 3_2, Barra Longa e Joanésia também merecem destaque. Barra Longa apresenta IVS de 0,476, com subíndice de Renda e Trabalho particularmente elevado (0,683), o que indica forte fragilidade social mesmo com exposição territorial moderada. Joanésia, por sua vez, combina IVS de 0,432 com 2,00% de área interceptada, expressando situação em que a vulnerabilidade social já é suficientemente alta para tornar o risco socioambiental muito relevante mesmo sem que a exposição esteja na classe máxima.

O grupo 2_3 reúne municípios em que a exposição é alta e a vulnerabilidade social é intermediária, mas não desprezível. Aqui se destacam Santa Luzia, São Joaquim de Bicas, Igarapé e Rio Acima, no eixo metropolitano-central; e Belo Oriente, Naque, Ipaba e Rio Doce, no leste do estado. Esse padrão indica duas manchas territoriais de atenção: uma associada à Região Metropolitana de Belo Horizonte e ao Quadrilátero Ferrífero, e outra vinculada ao vale do rio Doce e ao leste mineiro. A recorrência dessas duas áreas sugere que a vulnerabilidade socioambiental mais intensa se organiza em corredores territoriais fortemente conectados à mineração, à infraestrutura regional e aos vales hidrográficos.

Ao comparar o grupo crítico com o conjunto total de municípios expostos, observa-se incremento expressivo em todas as dimensões analisadas. Os 12 municípios de maior criticidade apresentam IVS médio de 0,365, acima da média geral de 0,308; exposição média de 3,776%, muito superior à média geral de 1,385%; e, sobretudo, maiores valores médios nos subíndices de Capital Humano e Renda e Trabalho. Essa diferença ajuda a demonstrar que o mapa bivariado não apenas reorganiza cartograficamente os dados, mas efetivamente isola um grupo de municípios em patamar muito mais crítico que o universo exposto como um todo.

Tabela 8 – Comparação entre o universo de municípios expostos e o grupo de maior criticidade socioambiental

Indicador	Municípios expostos (128)	Grupo crítico (12)
IVS médio	0,308	0,365
Infraestrutura Urbana média	0,222	0,287
Capital Humano médio	0,354	0,391
Renda e Trabalho média	0,349	0,416
Exposição territorial média (%)	1,385	3,776

Fonte: elaborado pelos autores com base na análise do IVS e da exposição territorial.

Esses resultados permitem formular uma interpretação central do trabalho: a vulnerabilidade socioambiental em Minas Gerais se organiza em três grandes perfis territoriais. O primeiro reúne municípios com alta exposição, mas menor vulnerabilidade social, como Congonhas, Timóteo, Nova Lima, Lagoa Santa e Brumadinho. O segundo reúne municípios com alta

vulnerabilidade social, mas baixa exposição relativa, como Açucena, Ferros, Alvorada de Minas, Riacho dos Machados e Pedra Azul. O terceiro reúne os municípios em que as duas dimensões se reforçam mutuamente, como Sem-Peixe, Barra Longa, Joanésia, Santa Luzia e São Joaquim de Bicas. É nesse terceiro grupo que a prioridade de ação deve ser mais intensa.

Tabela 9 – Leitura territorial dos principais perfis identificados na síntese bivariada

Perfil territorial	Exemplos de municípios	Leitura analítica	Prioridade de ação
Alta exposição e menor vulnerabilidade social	Congonhas, Timóteo, Nova Lima, Lagoa Santa, Brumadinho	A ameaça territorial é mais intensa, mas a base social e institucional tende a ser relativamente mais robusta	Fortalecer monitoramento, uso do solo e resposta de emergência
Alta vulnerabilidade social e menor exposição relativa	Açucena, Ferros, Alvorada de Minas, Riacho dos Machados, Pedra Azul	A fragilidade social é mais elevada, ainda que a área interceptada seja proporcionalmente menor	Reforçar prevenção social, comunicação do risco e capacidade institucional
Alta vulnerabilidade socioambiental	Sem-Peixe, Barra Longa, Joanésia, Santa Luzia, São Joaquim de Bicas, Igarapé, Ipaba	Exposição territorial e fragilidade social se combinam, ampliando a criticidade do território	Prioridade máxima para prevenção, planejamento e política ambiental

Fonte: elaborado pelos autores a partir da síntese bivariada.

A principal força da síntese bivariada, portanto, está em deslocar o debate do inventário de estruturas para a identificação de territórios prioritários. Em vez de perguntar apenas onde estão as barragens, passa-se a perguntar quais municípios reúnem as condições mais críticas para sofrer os efeitos de um eventual rompimento. Essa mudança de enfoque é decisiva para o planejamento territorial e para a formulação de políticas públicas mais sensíveis às desigualdades espaciais.

5.5 Implicações para a política ambiental e para a governança territorial do risco

Os resultados obtidos não se esgotam na descrição espacial da vulnerabilidade. Eles têm implicações diretas para a política ambiental e para a governança da segurança de barragens em Minas Gerais. A primeira delas é a necessidade de reconhecer que o risco de barragens não pode continuar sendo tratado predominantemente como um problema de estabilidade estrutural. Embora a segurança física das barragens seja elemento central, o diagnóstico aqui produzido mostra que a magnitude potencial dos impactos depende também da qualidade social dos territórios que se encontram a jusante.

Isso significa que a política ambiental precisa incorporar, de maneira mais explícita, critérios territoriais de vulnerabilidade socioambiental. O licenciamento, os estudos de impacto, os planos de emergência e as estratégias de monitoramento devem dialogar com a distribuição espacial do IVS e com os padrões de exposição territorial identificados. Em termos práticos, isso implica reconhecer que dois empreendimentos com características técnicas semelhantes podem

produzir riscos socioambientais muito diferentes, a depender do perfil municipal sobre o qual suas manchas de inundação incidem.

A segunda implicação diz respeito à escala municipal. O trabalho mostra que essa escala, apesar de limitada, pode ser útil para a formulação de prioridades territoriais, pois permite articular os instrumentos de gestão ambiental e de defesa civil com a estrutura administrativa e política efetivamente responsável por parte da resposta local. Ao identificar 128 municípios expostos e distinguir, dentro desse universo, os casos de maior criticidade, o estudo oferece base concreta para estratégias de regionalização da prevenção e da preparação. Todavia, seria importante dar granularidade às análises, de modo a capturar variações espaciais na escala, por exemplo, dos setores censitários do IBGE, revelando áreas urbanas e rurais mais vulneráveis.

A terceira implicação refere-se ao ordenamento territorial. Municípios inseridos nas classes mais críticas da síntese bivariada deveriam ser priorizados em políticas de controle do uso do solo, revisão de planos diretores, delimitação de áreas restritivas à expansão urbana e articulação entre defesa civil, meio ambiente e planejamento. Em diversos casos, especialmente na Região Metropolitana de Belo Horizonte e no leste mineiro, a combinação entre expansão urbana, infraestrutura regional e presença de manchas de inundação torna o ordenamento territorial um elemento indispensável da prevenção.

A quarta implicação relaciona-se à justiça socioambiental. O fato de municípios como Sem-Peixe, Barra Longa e Joanésia aparecerem em posição de destaque na síntese bivariada mostra que os territórios mais críticos nem sempre são os mais visíveis no debate público. Isso sugere que a gestão do risco de barragens tende a reproduzir assimetrias territoriais quando se concentra apenas em grandes polos minerários ou em casos de forte repercussão mediática. A leitura socioambiental do risco, ao contrário, permite evidenciar municípios menos centrais economicamente, mas com maior fragilidade estrutural.

A quinta implicação é a necessidade de priorização diferenciada. Os resultados mostram que não basta adotar medidas homogêneas para todo o conjunto de municípios expostos. O grupo classificado em 3_3, 3_2 e 2_3 pode demandar ações mais intensas, rápidas e territorialmente orientadas, enquanto os municípios em classes de menor criticidade exigem estratégias preventivas proporcionais ao seu perfil de risco. Em outras palavras, o diagnóstico bivariado permite hierarquizar o território e, com isso, racionalizar a alocação de recursos públicos e privados.

Tabela 10 – Potenciais implicações dos resultados para a alguns instrumentos de política ambiental.

Eixo de política	Problema evidenciado pelos resultados	Desdobramento recomendado
Licenciamento ambiental	O risco varia conforme a combinação entre exposição e fragilidade social do município	Incorporar diagnóstico socioambiental municipal como critério substantivo de decisão
Planejamento territorial	As manchas incidem sobre municípios com perfis sociais muito distintos	Integrar mapas de inundação e vulnerabilidade aos planos diretores e ao uso do solo
Defesa civil e emergência	Municípios críticos combinam maior exposição com menor capacidade social de resposta	Priorizar simulações, comunicação do risco e rotas de fuga nos municípios 3_3, 3_2 e 2_3
Fiscalização e monitoramento	A criticidade territorial não coincide automaticamente com o número de barragens	Direcionar fiscalização não apenas para estruturas, mas também para territórios prioritários
Justiça socioambiental	Municípios menores e menos visíveis podem apresentar alta vulnerabilidade socioambiental	Ampliar a atenção pública a territórios periféricos e socialmente mais frágeis

Fonte: elaborado pelos autores com base nos resultados da pesquisa.

Do ponto de vista da segurança de barragens, os achados também dialogam com o debate sobre a permanência de estruturas construídas pelo método de alteamento a montante e com a lentidão de parte dos processos de descaracterização. Embora este capítulo não tenha como foco principal o inventário dessas estruturas, os resultados territoriais aqui apresentados reforçam a necessidade de acelerar medidas preventivas justamente nos municípios em que a criticidade socioambiental é maior. Onde a mancha de inundação incide sobre território socialmente mais vulnerável, o tempo da prevenção não pode ser o mesmo da mera adequação burocrática.

Em síntese, os resultados surgem que a vulnerabilidade socioambiental associada às barragens de mineração em Minas Gerais não é apenas uma questão de localização das estruturas, mas de articulação entre geografia do perigo e desigualdade territorial. O mapa bivariado produzido neste trabalho, ao revelar os municípios em que essa sobreposição se torna mais crítica, fornece base empírica para uma política ambiental mais territorializada, preventiva e socialmente sensível.

5.6 Síntese interpretativa dos resultados

Considerados em conjunto, os resultados permitem destacar cinco conclusões centrais.

Primeiro, Minas Gerais apresenta uma geografia da mineração fortemente concentrada, mas com alcance territorial amplo o suficiente para afetar um conjunto expressivo de municípios por meio das manchas de inundação. Segundo, a vulnerabilidade social dos municípios expostos

é heterogênea, com predomínio de casos em baixa e média vulnerabilidade, mas com presença importante de municípios em alta e muito alta vulnerabilidade. Terceiro, a exposição territorial municipal é assimétrica, concentrando-se em poucos casos de maior intensidade. Quarto, a síntese bivariada mostra que a criticidade socioambiental não coincide automaticamente com a notoriedade dos municípios minerários mais conhecidos, revelando novos territórios prioritários. Quinto, os resultados indicam que a política ambiental e a governança da segurança de barragens precisam se deslocar de uma lógica predominantemente estrutural para uma lógica efetivamente territorial.

A contribuição central deste capítulo, portanto, está em demonstrar que o cruzamento entre dados sociais e dados espaciais permite avançar de forma substantiva no diagnóstico dos territórios sujeitos a manchas de inundação de barragens de mineração. Mais do que um exercício cartográfico, o resultado constitui uma ferramenta de leitura territorial do risco, capaz de subsidiar a formulação de prioridades, orientar políticas preventivas e fortalecer a discussão sobre justiça socioambiental em Minas Gerais.

6 CONCLUSÃO

Esta pesquisa analisou a vulnerabilidade socioambiental dos municípios mineiros sujeitos a manchas de inundação associadas a barragens de mineração, a partir da integração entre vulnerabilidade social municipal e exposição territorial. O principal objetivo foi construir um diagnóstico territorial capaz de mostrar que os efeitos potenciais de um eventual rompimento não dependem apenas da presença física das barragens, mas também das condições sociais dos territórios sobre os quais incidem suas manchas de inundação.

A adoção do município como unidade de análise mostrou-se adequada ao problema proposto. Essa escala permitiu compatibilizar a malha municipal do IBGE, os dados do Atlas da Vulnerabilidade Social e as camadas vetoriais de barragens e manchas de inundação, além de possibilitar uma leitura comparativa em escala estadual. Ao mesmo tempo, o uso do IVS e de seus subíndices, articulado à proporção da área municipal interceptada pelas manchas, permitiu construir uma leitura integrada do risco, superando análises centradas exclusivamente na estabilidade das estruturas ou na simples delimitação das áreas potencialmente atingidas. Todavia, recomenda-se que estudos futuros avancem para análises na escala dos setores censitários do IBGE de modo a captar com mais granularidade a população que está, de fato, mais vulneráveis a eventuais rompimentos de barragem. Também seria importante levar em consideração o risco de rompimento de cada estrutura, gerando índices mais refinados

Apesar das limitações, os resultados mostraram que 128 municípios mineiros possuem território interceptado por manchas de inundação de barragens de mineração. No conjunto analisado, a vulnerabilidade social apresentou distribuição heterogênea, com IVS médio de 0,308 e predominância das classes de baixa e média vulnerabilidade, embora 19 municípios tenham sido classificados em alta ou muito alta vulnerabilidade social. Os subíndices indicaram maior peso relativo das dimensões de Capital Humano e Renda e Trabalho, mostrando que as fragilidades mais relevantes do conjunto estudado estão associadas menos à infraestrutura urbana em sentido estrito e mais às condições estruturais de inserção social e econômica.

Quanto à exposição territorial, os resultados revelaram forte assimetria. A média de área municipal interceptada foi de 1,385%, mas alguns municípios apresentaram valores muito superiores, como Santa Luzia, São Joaquim de Bicas, Congonhas, Timóteo e Ipaba. Esse achado mostrou que a intensidade espacial da ameaça não acompanha automaticamente o número de barragens existentes em cada município, sendo influenciada também pela geometria das manchas, pela configuração dos vales e pela própria delimitação do território municipal.

A principal contribuição do trabalho, contudo, está na síntese bivariada entre vulnerabilidade social e exposição territorial. O cruzamento dessas duas dimensões mostrou que a criticidade socioambiental não se explica apenas pela notoriedade de certos municípios minerários nem pela elevada exposição isolada. O diagnóstico revelou que os casos mais críticos são aqueles em que a exposição territorial se sobrepõe a contextos sociais mais frágeis. Nesse sentido, destacaram-se

municípios como Sem-Peixe, Barra Longa, Joanésia, Rio Acima, Santa Luzia, São Joaquim de Bicas, Igarapé, Rio Doce, Jequitibá, Belo Oriente, Naque e Ipaba. Esses resultados são relevantes porque evidenciam que a geografia da vulnerabilidade socioambiental é mais complexa do que a simples localização das barragens e pode revelar territórios menos visíveis no debate público, mas bastante relevantes em termos de risco.

A pesquisa permite concluir que a vulnerabilidade socioambiental associada às barragens de mineração em Minas Gerais deve ser entendida como expressão territorial da interação entre ameaça tecnológica e desigualdade social. O componente social do problema está representado pelas condições municipais de infraestrutura, capital humano, renda e trabalho; o componente ambiental-territorial, por sua vez, está presente na exposição às manchas de inundação decorrentes de um potencial rompimento. Assim, o trabalho não trata apenas de vulnerabilidade social nem apenas de risco ambiental isolado, mas da articulação entre essas duas dimensões.

Do ponto de vista da política ambiental, os resultados indicam a necessidade de incorporar diagnósticos territoriais de vulnerabilidade socioambiental aos instrumentos de licenciamento, monitoramento, ordenamento territorial e planejamento preventivo. A simples identificação das estruturas ou de suas manchas de inundação não é suficiente para orientar prioridades. Municípios classificados nas categorias mais críticas da síntese bivariada demandam atenção diferenciada, tanto na preparação para emergências quanto na formulação de políticas públicas voltadas à prevenção e à redução das desigualdades territoriais que ampliam os efeitos de um eventual desastre.

Algumas limitações devem ser reconhecidas. A escala municipal tende a suavizar desigualdades intraurbanas e intramunicipais, e a medida de exposição utilizada representa a proporção da área interceptada, não a população efetivamente atingida. Além disso, o IVS baseia-se em dados de 2010, enquanto as bases de barragens e manchas de inundação são mais recentes. Ainda assim, a metodologia adotada mostrou-se consistente para fins comparativos em escala estadual e permitiu identificar padrões territoriais relevantes que dificilmente seriam percebidos por análises setoriais ou exclusivamente técnicas.

Por fim, considera-se que o trabalho oferece uma contribuição importante ao deslocar a análise das barragens de mineração de uma leitura centrada apenas nas estruturas para uma leitura centrada nos territórios sujeitos às suas consequências. Ao integrar indicadores sociais e análise espacial, a pesquisa produziu um diagnóstico aplicável à discussão sobre prevenção de desastres, governança territorial do risco e aprimoramento da política ambiental em Minas Gerais.

REFERÊNCIAS

- ANM. *Painel de Situação das Barragens de Mineração*. 2025. <<https://geo.anm.gov.br/portal/apps/dashboards/4a9d32d667b14b5ba23f66b3ecc88a65>>. Acesso em: 21 set. 2025.
- ARAGÃO, A. A nova protecção civil: da eficácia à justiça através do conhecimento das vulnerabilidades sociais. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, Coimbra, n. 97, p. 113–130, jun. 2012.
- ÁVILA, J. P. de et al. Segurança de barragens de rejeitos no brasil: Avaliação dos acidentes recentes. *Geotecnia*, v. 152, p. 435–464, 2021. ISSN 2184-8394.
- BIRKMANN, J. et al. Vulnerabilidade a perigos de inundação costeira: análise do risco de tsunamis em cádis. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, Coimbra, n. 97, p. 159–181, jun. 2012.
- BORGES, S. O desastre da barragem de rejeitos em mariana, minas gerais: aspectos socioambientais e de gestão na exploração de recursos minerais. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, scieloco, v. 27, p. 301–312, 12 2018. ISSN 0121-215X. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-215X2018000200301&nrm=iso>.
- CARDOZO, F. A. C. Comparação de métodos construtivos para barragens de rejeito: Análise dos alteamentos à montante e à jusante. In: *Geotecnologias: análises, técnicas e aplicações em pesquisa*. [S.l.]: Editora Científica, 2024. v. 2, p. 45–59. ISBN 978-65-5360-704-0.
- Conselho Internacional de Mineração e Metais (ICMM); Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA); Princípios para o Investimento Responsável (PRI). *Padrão Global da Indústria para a Gestão de Rejeitos*. Londres: ICMM, 2020. Disponível em: [link oficial]. Acesso em: 15 mar. 2026.
- CUTTER, S. L. A ciência da vulnerabilidade: modelos, métodos e indicadores. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, Coimbra, n. 97, p. 59–69, jun. 2012.
- FREITAS, C. M. d.; SILVA, M. A. d.; MENEZES, N. M. d. A. Da samarco em mariana à vale em brumadinho: desastres em barragens de mineração e saúde coletiva. *Cadernos de Saúde Pública*, Rio de Janeiro, v. 35, n. 5, 2019.
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). *Informações sobre a economia mineral brasileira 2025/2026*. Brasília, DF: IBRAM, 2026.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). *Relatório institucional: Índice de Vulnerabilidade Social (IVS)*. Brasília: Ipea, 2024.
- LEÃO, S. R.; SANTIAGO, A. M. d. S. Cenário das barragens de rejeito: conhecer para evitar novas catástrofes. *Ambiente & Sociedade*, v. 25, 2022.
- LEÃO, S. R.; SANTIAGO, A. M. dos S. Cenário das barragens de rejeito: conhecer para evitar novas catástrofes. *Ambiente & Sociedade*, v. 25, 2022. ISSN 1809-4422.
- MapBiomas. *Plataforma de cobertura e uso da terra no Brasil*. 2026. <<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/cobertura>>. Acesso em: 15 mar. 2026.
- MENDES, J. M. et al. Risco, vulnerabilidade social e estratégias de prevenção: uma reflexão abrangente. *Revista Crítica de Ciências Sociais*, Coimbra, n. 97, p. 3–18, jun. 2012.

MILANEZ, B. *A economia política da mineração no Brasil: extração, riscos e território*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2023.

MILANEZ, B.; MAGNO, L.; PINTO, R. G. Da política fraca à política privada: o papel do setor mineral nas mudanças da política ambiental em minas gerais, brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 35, n. 5, p. e00051219, 2019.

Minas Gerais (Estado). *Lei n. 23.291, de 25 de fevereiro de 2019*. 2019. Institui a Política Estadual de Segurança de Barragens e dá outras providências.

Organização das Nações Unidas (ONU). *Human Security Handbook: An integrated approach for the realization of the Sustainable Development Goals*. New York: UN, 2024.

PIMENTA, R. J. *Geotecnia e Sociedade: o desafio da descaracterização de barragens em Minas Gerais*. Belo Horizonte: Editora FEAM, 2024.

REIS, G. de A.; RIBEIRO, A. J. A.; SILVA, C. A. U. da. Diagnóstico de vulnerabilidade socioambiental em áreas urbanas utilizando inteligência geográfica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 2, p. 767–781, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/241398>>.

ROCHA, O. J. et al. O avanço dos estudos de ruptura hipotética das barragens de mineração no brasil. In: *XXXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens*. Foz do Iguaçu, PR: [s.n.], 2023.

Sendai Framework. *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. Geneva: UNISDR, 2015.

SOBREIRA, F. G.; FONSECA, M. A. Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em ouro preto, brasil. *Revista Geotecnia*, n. 92, p. 5–27, 2001.

ZHOURI, A. (Ed.). *Mineração, violências e resistências: um olhar sobre o leste de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Letra e Voz; Fafich/UFMG, 2018.

ZHOURI, A. (Ed.). *Mineração, violências e resistências: um olhar sobre o leste de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Letra e Voz; Fafich/UFMG, 2022.