



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**



Karollaine Tereza Souza e Silva

**Análise da Vulnerabilidade Física e Social das Comunidades a
Jusante da Barragem de Marzagão (Ouro Preto – MG):
Avaliação da Eficácia das Políticas Públicas de Proteção
contra Desastres**

Ouro Preto

2025

Karollaine Tereza Souza e Silva

Análise da Vulnerabilidade Física e Social das Comunidades a
Jusante da Barragem de Marzagão (Ouro Preto – MG):
Avaliação da Eficácia das Políticas Públicas de Proteção
contra Desastres

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Urbana na Universidade
Federal de Ouro Preto.

Áreas de concentração: Saneamento e
Recursos Hídricos, Planejamento e Gestão
Urbana e Geotecnia

Orientador: Prof^a. Dra. Aline A. Nunes

Coorientador: Dra. Camilla Adriane Paiva

Ouro Preto

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Karollaine Tereza Souza e.

Análise da vulnerabilidade física e social das comunidades a jusante da Barragem de Marzagão (Ouro Preto - MG) [manuscrito]: avaliação da eficácia das políticas públicas de proteção contra desastres. / Karollaine Tereza Souza e Silva. - 2025.

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

Orientadora: Profa. Dra. Aline de Araújo Nunes.

Coorientadora: Dra. Camilla Adriane Paiva.

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

1. Processamento de dados- Sistemas de informação geográfica. 2. Barragens de rejeitos. 3. Gestão de riscos. 4. Análise de Vulnerabilidade. I. Nunes, Aline de Araújo. II. Paiva, Camilla Adriane. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - CRB6/2322



FOLHA DE APROVAÇÃO

Karollaine Tereza Souza e Silva

Análise da vulnerabilidade física e social das comunidades a jusante da barragem de Marzagão (Ouro Preto – MG): avaliação da eficácia das políticas públicas de proteção contra desastres

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Urbanista

Aprovada em 22 de agosto de 2025

Membros da banca

Doutora - Aline de Araújo Nunes - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutora - Iraydes Tálita de Sena Nola (Universidade Federal de Ouro Preto)
Mestre - Laís de Carvalho Faria Lima Lopes (Universidade Federal de Ouro Preto)

Aline de Araújo Nunes, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/10/2025



Documento assinado eletronicamente por **Aline de Araujo Nunes, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/10/2025, às 14:37, 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 **0988941** e o código CRC **9B97C5F8**.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, quero agradecer a Deus, por estar comigo em cada passo dessa caminhada de cinco anos. Obrigada por me dar forças, sabedoria e esperança, mesmo nos momentos mais difíceis, e por me guiar para nunca desistir dos meus sonhos. Viver esses cinco anos na Engenharia Urbana foi uma experiência que transformou minha vida, pessoal e profissionalmente, e me proporcionou emoções intensas, desafios, aprendizados e momentos inesquecíveis.

Em seguida, quero agradecer à minha família, meu porto seguro, especialmente Cleuza, Maurílio, Andreia, Anderson, Priscila e Ravi. Vocês foram meu alicerce, minha base, meu apoio em cada momento de dúvida ou cansaço. Obrigada por nunca me deixarem desistir, por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava, e por me amarem de forma incondicional. Eu amo vocês profundamente e serei eternamente grata por ter cada um de vocês na minha vida.

Não poderia deixar de agradecer à minha orientadora, Dra. Aline Araújo. Aline, você foi muito mais que uma guia acadêmica, foi inspiração, motivação e força para eu continuar. Obrigada por acreditar nas minhas ideias, mesmo nas “loucuras” do meu IC, e por estar ao meu lado ao longo desses anos. Você sempre terá um lugar especial no meu coração. Agradeço também à Camilla Paiva, que dedicou sábados inteiros para me apoiar no trabalho final de curso e me coorientou com tanto carinho e dedicação. Obrigada, Paiva, por toda a paciência e por me mostrar que juntas conseguimos ir além.

Quero agradecer aos meus amigos de sempre e longos anos, Richardson, Samuel, Ryan, Karol e Gustavo. Obrigada por estarem comigo, por me fazerem rir, chorar, acreditar em mim e me lembrarem do meu valor. Vocês fizeram toda a diferença nessa trajetória, e eu amo cada um de vocês. Aos amigos de estágio, especialmente à Ana Favero, que desde a Defesa Civil esteve ao meu lado, obrigada por compartilhar comigo cada desafio, cada conquista e cada momento.

Ao meu namorado, meu companheiro de vida nos últimos três anos, obrigada por me apoiar, me incentivar e acreditar em mim em cada decisão. Você foi essencial para eu chegar até aqui, e eu te amo imensamente.

Quero também expressar minha profunda gratidão aos amigos que fiz durante essa jornada acadêmica, em especial àqueles da sala de estudos do NUGEO. Vocês se tornaram uma

parte essencial e inesquecível da minha trajetória na Engenharia Urbana. Cada momento compartilhado com vocês, desde as longas noites de estudos até as risadas inesperadas, conversas sinceras e histórias trocadas, foi precioso e ficará para sempre em minha memória. Aprendemos juntos, apoiamos uns aos outros nos momentos de dificuldade e celebramos cada conquista com alegria genuína, tornando a caminhada muito mais leve e significativa.

Jamais esquecerei as noites em que ficávamos até tarde revisando conteúdos, debatendo ideias, dividindo dúvidas e descobertas, mas também nos divertindo, brincando e fortalecendo laços “fofocas” que vão muito além da sala de aula. Começamos juntos, enfrentando desafios e inseguranças, e estamos nos formando juntos, compartilhando o orgulho de cada passo dado. Amo demais vocês, meu querido “Lá vamos nós dnv”! Obrigada por cada palavra de incentivo, por cada gesto de apoio, por cada momento de amizade verdadeira, e por terem feito desses anos uma experiência tão rica, divertida e inesquecível. Vocês são e sempre serão uma parte especial da minha vida, e levo cada um de vocês comigo em meu coração.

Por fim, agradeço à Escola de Minas, que foi meu lar acadêmico, meu espaço de aprendizado, crescimento e amizades inesquecíveis. Obrigada por esses cinco anos que levarei para sempre em meu coração.

RESUMO

A expansão urbana e a intensificação das atividades industriais no Brasil, especialmente a partir do século XX, têm levado à construção de barragens próximas a áreas povoadas, como forma de garantir abastecimento, controlar cheias e viabilizar processos produtivos. Contudo, essas estruturas representam potenciais fontes de risco socioambiental, sobretudo quando associadas ao armazenamento de rejeitos industriais. A Barragem de Marzagão, localizada em Ouro Preto (MG) e construída na década de 1970 para conter resíduos do processo Bayer, insere-se nesse contexto. O presente estudo tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade física e social das comunidades situadas a jusante dessa barragem em um cenário hipotético de rompimento, bem como analisar a inserção de diretrizes de gestão de riscos no Plano Diretor do município. A metodologia adotada combinou levantamento de dados físicos (altimetria, declividade, uso e ocupação do solo, hidrografia) e sociais (demografia, renda, escolaridade, condições habitacionais) com técnicas de geoprocessamento (SIG) e aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP), adaptado de Paiva (2024). Foram calculados os índices $SoVI_{Dam}$ (vulnerabilidade social) e $PhyVI_{Dam}$ (vulnerabilidade física), normalizados em escala contínua de 0 a 1 e classificados em quatro faixas de suscetibilidade. Os resultados indicaram que as áreas mais vulneráveis se concentram nas proximidades do Ribeirão do Funil, com sobreposição de vulnerabilidade física e social nas classes “alta” e “muito alta”. A vulnerabilidade física esteve associada à declividade acentuada, proximidade da calha e uso inadequado do solo, enquanto a vulnerabilidade social relacionou-se a condições socioeconômicas desfavoráveis e infraestrutura precária. A análise do Plano Diretor evidenciou lacunas na abordagem de riscos tecnológicos, reforçando a necessidade de políticas preventivas, sistemas de alerta, planos de evacuação e integração interinstitucional.

Palavras-chave: Vulnerabilidade socioambiental; Barragem de rejeitos; Geoprocessamento; Ouro Preto; Gestão de riscos.

ABSTRACT

Urban expansion and the intensification of industrial activities in Brazil, especially since the 20th century, have led to the construction of dams near populated areas as a means to ensure water supply, control floods, and enable productive processes. However, these structures represent potential sources of socio-environmental risk, particularly when associated with the storage of industrial waste. The Marzagão Dam, located in Ouro Preto (MG) and built in the 1970s to contain residues from the Bayer process, is part of this context. The present study aims to assess the physical and social vulnerability of downstream communities in a hypothetical dam break scenario, as well as to analyze the incorporation of risk management guidelines in the municipality's Master Plan. The methodology combined the collection of physical data (altimetry, slope, land use and cover, hydrography) and social data (demography, income, education, housing conditions) with geoprocessing techniques (GIS) and the application of the Analytic Hierarchy Process (AHP), adapted from Paiva (2024). The SoVIDam (social vulnerability) and PhyVIDam (physical vulnerability) indices were calculated, normalized on a continuous scale from 0 to 1, and classified into four susceptibility levels. Results indicated that the most vulnerable areas are concentrated near the Ribeirão do Funil, with overlapping physical and social vulnerabilities in the "high" and "very high" categories. Physical vulnerability was associated with steep slopes, proximity to the river channel, and inadequate land use, while social vulnerability was related to unfavorable socioeconomic conditions and precarious infrastructure. The analysis of the Master Plan revealed gaps in the approach to technological risks, reinforcing the need for preventive policies, warning systems, evacuation plans, and interinstitutional integration.

Keywords: Socio-environmental vulnerability; Tailings dam; Geoprocessing; Ouro Preto; Risk management

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Zoneamento do Município de Ouro Preto	23
Figura 2 : Mapa de uso e ocupação do solo da cidade de Ouro Preto/MG	27
Figura 3 - Deslizamento em Ouro Preto.....	28
Figura 4 - Movimento dos atingidos por barragens	31
Figura 5: Localização do município de Ouro Preto – Minas Gerais	56
Figura 6: Geologia da área de estudo	57
Figura 7: Percurso das principais drenagens	59
Figura 8: Bairros do município	60
Figura 9: Barragem do Marzagão.....	61
Figura 10: Indicadores utilizados $SoVI_{Dam}$ e $PhyVI_{Dam}$	64
Figura 11:: Mapa da mancha de inundação da Barragem do Marzagão	68
Figura 12:: Mapa de densidade demográfica Fonte: Autoral (2025)	70
Figura 13:: Mapa de número médio de pessoas por residência.....	72
Figura 14:: Mapa de residências atingidas	73
Figura 15:: Mapa de distribuição de pessoas com necessidades especiais.....	74
Figura 16:: Mapa de distribuição da população feminina	75
Figura 17:: Mapa de distribuição da população rural.....	77
Figura 18: Mapa de distribuição da população indígena.....	79
Figura 19:: Mapa de distribuição da taxa de analfabetismo	80
Figura 20:: Mapa da população em situação de pobreza.....	82
Figura 21:: Mapa das áreas de risco	83
Figura 22:: Residências Inadequadas	84

Figura 23: Mapa do índice de vulnerabilidade social ($SOVI_{Dam}$)	85
Figura 24: Mapa de distribuição do impacto longitudinal	87
Figura 25: Mapa de distribuição do impacto transversal	89
Figura 26: Mapa de Hand.....	91
Figura 27: Mapa de declividade	92
Figura 28: Mapa de distribuição do volume de rejeito.....	93
Figura 29: Mapa de Uso e Ocupação do solo.....	94
Figura 30:: Mapa do índice de vulnerabilidade física ($PhyVI_{Dam}$).....	95
Figura 31: Mapeamento de algumas áreas que seriam impactadas no eventual rompimento da Barragem do Marzagão	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Divisão das Zonas de Ouro Preto	24
Tabela 2: Pesos dos indicadores de vulnerabilidade social	52
Tabela 3- Pesos dos indicadores de vulnerabilidade físicos.....	55
Tabela 4 - Componentes encontrados na lama vermelha	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Legislações brasileiras	20
Quadro 2: Parâmetros sociais que compõe o índice de vulnerabilidade social	34
Quadro 3: Parâmetros físicos que compõe o índice de vulnerabilidade físico.....	39
Quadro 4: Peso sociais normalizados para o estado de Minas Gerais.....	70
Quadro 5: Danos e prejuízos normalizados para o índice físico.....	83
Quadro 6: Análise dos Planos Diretores	88
Quadro 7: Análise do Plano Diretor de Ouro Preto (MG)	94

LISTA DE SIGLAS

ACTECH: Alumina Chemical Technology

AHP: Análise Hierárquica de Processos

AIA: Avaliação de Impacto Ambiental

AMC: Análise Multicritério

ANA: Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico

APP: Área de Preservação Permanente

CENSO: Censo Demográfico – IBGE

CIAEA: Comissão de Investigação de Acidentes e Eventos Ambientais

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

EIA: Estudo de Impacto Ambiental

FEAM: Fundação Estadual do Meio Ambiente

HAND: Height Above Nearest Drainage

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IDE-SISEMA: Infraestrutura de Dados Espaciais do SISEMA

LI: Licença de Instalação

LO: Licença de Operação

MAB: Movimento dos Atingidos por Barragens

MDE: Modelo Digital de Elevação

PAE: Plano de Ação de Emergência

PAEMB: Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração

PNSB: Política Nacional de Segurança de Barragens

PNAB: Política Nacional de Direitos das Populações Atingidas por Barragens

RIMA: Relatório de Impacto Ambiental

SIG: Sistema de Informações Geográficas

SISEMA: Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

SINGREH: Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SISNAMA: Sistema Nacional de Meio Ambiente

ZA: Zona de Adensamento

ZAR: Zona de Adensamento Restrito

ZAS: Zona de Autossalvamento

ZDE: Zona de Desenvolvimento Social

ZPAM: Zona de Proteção Ambiental

ZPE: Zona de Proteção Especial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Objetivo	16
1.1.1	Objetivo geral.....	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	Justificativa.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Risco e vulnerabilidade de comunidades à jusante de barragens	18
2.2	Plano Diretor como instrumento de controle e desenvolvimento urbano	20
2.3	Uso e Ocupação do Solo em Áreas de Risco: Vulnerabilidade, Planejamento Urbano e Desafios Geotécnicos em Ouro Preto (MG)	21
2.4	Vulnerabilidade socioeconômica em áreas de risco	29
2.5	Deslocamento populacional induzido por barragens.....	30
2.6	Avaliação ambiental e hídrica em áreas de risco.....	32
2.6.1	Leis e normativas que se aplicam ao meio ambiente e aos recursos hídrico.....	32
2.6.2	Licenciamento ambiental para barragens no Brasil	37
2.6.3	Licenciamento ambiental em Minas Gerais	39
2.6.4	Avaliação do impacto ambiental em cenário de rompimento de barragem	40
2.6.5	Avaliação do impacto hídrico em cenário de rompimento de barragem.....	42
2.7	O uso do Sistema de Informações Geográficas e a Análise Multicritério.....	43
2.8	Aplicação integrada do Processo Hierárquico Analítico (AHP) em SIG para a elaboração de indicadores de vulnerabilidade física e social na gestão de riscos	45
2.8.1	Índice de vulnerabilidade social (SoVI _{Dam}).....	46

2.8.2	Índice de vulnerabilidade física (PhyVIDam).....	52
3	METODOLOGIA.....	56
3.1	Caracterização da área de estudo.....	56
3.1.1	Barragem do Marzagão	61
3.2	Análise da vulnerabilidade social e física na região a jusante da barragem do Marzagão.....	63
3.2.1	Obtenção dos dados físicos e sociais do município de Ouro Preto	64
3.2.2	Aplicação dos indicadores SoVI _{Dam} e PhyVI _{Dam} no município de Ouro Preto.....	66
3.3	Análise crítica e proposta de integração de gestão de riscos associados a barragens no Plano Diretor de Ouro Preto.....	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	SOVI _{Dam}	69
4.1.1	Densidade demográfica	69
4.1.2	Média de moradores por residência	71
4.1.3	População com necessidades especiais	74
4.1.4	População de mulheres.....	74
4.1.5	População rural.....	76
4.1.6	População indígena	78
4.1.7	População analfabeta.....	79
4.1.8	População em situação de pobreza.....	81
4.1.9	Residências inadequadas	82
4.1.10	Vulnerabilidade social.....	84
4.2	PhyVI _{Dam}	86

4.2.1	Impacto longitudinal	87
4.2.2	Impacto transversal e HAND	88
4.2.3	Declividade.....	91
4.2.4	Volume	92
4.2.5	Uso e ocupação do solo	93
4.2.6	Vulnerabilidade física	95
4.3	Integração da gestão de riscos de barragens ao plano diretor de ouro preto: análise crítica e propostas	98
4.3.1	Plano Diretor Mariana.....	98
4.3.2	Plano Diretor de Brumadinho	99
4.3.3	Revisão do Plano Diretor de Ouro Preto	103
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	116
	REFERÊNCIAS	118

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem intensificado a interação entre as cidades e os corpos d'água, resultando em uma maior demanda por recursos hídricos, incluindo abastecimento público, agricultura, atividades industriais e a construção e manutenção de barragens. Essas atividades, conforme Hafner (2007), geram impactos variáveis, contribuindo para a degradação da qualidade da água. Historicamente, os corpos d'água tem sido receptores de resíduos, predominantemente provenientes de fontes residenciais, e, em situações críticas, de rejeitos de barragens, seja por vazões controladas ou durante rompimentos. O colapso da barragem de rejeito de Fundão, em Mariana (MG), é um exemplo emblemático desse tipo de desastre, afetando a bacia do Rio Doce e comprometendo o acesso à água e a economia local (Neves; Heller, 2020).

Apesar dos riscos inerentes às barragens, essas estruturas permanecem fundamentais para a economia local, sobretudo em cidades históricas como Ouro Preto, onde a mineração e a indústria desempenham papel central na subsistência da população. Nessa conjuntura, a qualidade da água está diretamente condicionada às características naturais e ao padrão de uso e ocupação do solo nas áreas adjacentes (Sperling, 2005). Um exemplo emblemático é a Barragem de Marzagão, que recebeu destaque devido ao lançamento de rejeitos industriais pela empresa Alumina Chemical Technology (ACTECH), prática mantida até 2018, quando foi definitivamente interrompida. Embora cessada, essa atividade ainda suscita preocupações quanto a possíveis impactos sobre a saúde pública e a qualidade dos recursos hídricos da região, uma vez que a exposição prolongada a determinados rejeitos industriais pode estar associada a efeitos adversos, incluindo o desenvolvimento de doenças crônicas.

O crescimento urbano, que atinge cerca de 83% da população (Tucci, 2010; Salgado, 2014), eleva a vulnerabilidade das comunidades a jusante das barragens, especialmente em cenários críticos de rompimento, como o da Barragem de rejeito de Marzagão. Um desastre desse tipo afetaria potencialmente os recursos hídricos, o meio ambiente e a infraestrutura local, além de propagar doenças. Apesar da existência de planos diretores em algumas cidades, como Ouro Preto, a implementação de políticas públicas eficazes para a gestão de riscos ainda é insuficiente. A falta de estratégias claras de monitoramento e segurança nas áreas adjacentes às barragens deixa as populações vulneráveis a desastres, reforçando a necessidade de um

planejamento urbano mais integrado, que considere tanto o desenvolvimento econômico quanto a proteção das populações e a preservação dos recursos naturais.

No contexto de Ouro Preto, a Barragem de rejeito de Marzagão gera preocupações quanto à segurança da população e à preservação dos recursos hídricos. Para avaliar esses riscos de forma mais precisa, este estudo visa utilizar o Sistema de Informações Geográficas (SIG) e a Análise Hierárquica de Processos (AHP), ferramentas que permitem mapear e classificar as áreas de maior vulnerabilidade com base em critérios físicos e socioeconômicos. A metodologia proposta por Paiva (2024) foi aplicada para analisar a suscetibilidade das comunidades a jusante da referida barragem de rejeito, combinando diferentes variáveis e fornecendo uma base sólida para a gestão de riscos.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo analisar a vulnerabilidade física e social das comunidades situadas a jusante da Barragem de Marzagão, em Ouro Preto, visando avaliar a eficácia das políticas públicas municipais na proteção das populações vulneráveis frente a potenciais desastres decorrentes de rompimentos de barragens.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Mapear as áreas de maior vulnerabilidade social e física na região a jusante da Barragem de Marzagão, com base nos indicadores social, $SoVI_{Dam}$, e físico, $PhyVI_{Dam}$.
- Analisar a influência de fatores geográficos e socioeconômicos na suscetibilidade das comunidades a possíveis desastres decorrentes de um rompimento de barragem.
- Avaliar a adequação das políticas públicas e do Plano Diretor de Ouro Preto no que tange à ocupação de áreas de risco e à proteção das populações vulneráveis.

1.2 Justificativa

A escolha deste tema fundamenta-se na necessidade premente de avaliar os riscos socioambientais e estruturais associados à Barragem de rejeito de Marzagão, localizada no

município de Ouro Preto, com foco na segurança e na qualidade de vida das populações situadas a jusante. Tragédias recentes, como os rompimentos das barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), evidenciaram os impactos devastadores desses eventos, tanto em termos sociais, quanto ambientais e econômicos. Essas ocorrências reforçam a necessidade de um planejamento urbano preventivo e de mecanismos eficazes de gestão de risco.

A vulnerabilidade das comunidades expostas a esses riscos decorre, sobretudo, de fatores sociais, como o acesso limitado à informação, a falta de infraestrutura adequada e a dificuldade de implementação de planos de emergência eficientes, enquanto a suscetibilidade está relacionada às condições estruturais das barragens e às características do meio físico. Assim, este estudo visa compreender e mapear a vulnerabilidade física e social dessas populações, utilizando ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o método de Análise Hierárquica de Processo (AHP). Por meio dessas técnicas, é possível identificar áreas de maior risco e fornecer subsídios científicos para a formulação de estratégias de prevenção e mitigação de desastres.

Ademais, a gestão municipal desempenha um papel central na redução dos riscos associados às barragens, seja por meio da implementação de diretrizes urbanísticas mais seguras, da fiscalização rigorosa das estruturas ou da elaboração de planos de contingência eficazes. Nesse contexto, a revisão do Plano Diretor de Ouro Preto representa uma oportunidade estratégica para integrar medidas que fortaleçam a resiliência das comunidades vulneráveis e aprimorem a gestão territorial em áreas de risco.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A análise de um eventual rompimento de barragem envolve múltiplas dimensões, que vão desde a compreensão dos riscos enfrentados pelas comunidades a jusante até os aspectos relacionados à gestão territorial e à proteção socioambiental. Entre os temas que orientam esta revisão de literatura, destacam-se os impactos diretos sobre a população e sobre o uso e a ocupação do solo em áreas suscetíveis, o papel de instrumentos de planejamento urbano, como o Plano Diretor, na regulação dessas áreas, e a influência de fatores ligados à vulnerabilidade socioeconômica e ao deslocamento populacional. Além disso, serão abordadas metodologias e ferramentas de apoio à análise de riscos, com ênfase no uso do Sistema de Informações Geográficas (SIG) e do Processo Hierárquico Analítico (AHP), que possibilitam uma avaliação integrada e mais precisa das consequências potenciais de um rompimento.

2.1 Risco e vulnerabilidade de comunidades à jusante de barragens

As barragens representam estruturas fundamentais para o armazenamento de água, geração de energia, armazenamento de rejeitos provindos da mineração ou indústrias e controle de enchentes. Entretanto, as comunidades localizadas a jusante dessas estruturas estão expostas a riscos significativos, sobretudo em cenários de falhas técnicas ou de rompimento. O risco pode ser compreendido como a combinação entre a probabilidade de ocorrência de um evento adverso e a magnitude de suas consequências. Já a vulnerabilidade refere-se às fragilidades socioeconômicas, físicas e institucionais que aumentam o grau de impacto desses eventos sobre determinada população (Cartier *et al.*, 2009). A suscetibilidade, por sua vez, está relacionada às condições naturais e antrópicas que favorecem a ocorrência do processo adverso, como características geotécnicas, geomorfológicas e de uso e ocupação do solo, funcionando como um componente que condiciona a manifestação do perigo.

O rompimento de uma barragem de rejeito pode desencadear inundações abruptas, que impactam diretamente áreas habitadas, infraestrutura e ecossistemas locais. A Agência Nacional de Águas (ANA) destaca que a falta de manutenção adequada e monitoramento constante aumenta as chances de falhas estruturais, especialmente em barragens antigas ou subdimensionadas. Esses fatores elevam a vulnerabilidade de populações a jusante, que muitas

vezes desconhecem os planos de emergência e não possuem sistemas eficientes de alerta (Avelar, 2019).

Além dos aspectos técnicos, é fundamental considerar a vulnerabilidade socioeconômica das comunidades expostas. Segundo Avila (2015), a precariedade das moradias, a falta de infraestrutura básica e a limitada capacidade de resposta aumentam a severidade dos impactos em situações de desastre. Indivíduos pertencentes a classes sociais mais baixas e residentes em áreas suscetíveis apresentam maior vulnerabilidade, o que agrava os efeitos de eventos extremos e reduz a capacidade de recuperação e reconstrução pós-desastre (Costa, 2019).

A percepção de risco é outro fator relevante para a mitigação de impactos. Comunidades a jusante de barragens frequentemente possuem conhecimento técnico limitado sobre os riscos que enfrentam, o que dificulta a adoção de medidas preventivas. Segundo Oliveira (2021), a elaboração e divulgação de Planos de Ação de Emergência (PAE) são fundamentais para preparar a população e reduzir sua vulnerabilidade. Nesse contexto, a comunicação eficaz e a apresentação de mapas de inundação são essenciais: esses mapas devem delinear áreas suscetíveis à inundação e indicar o tempo estimado de propagação da onda até regiões identificadas como de risco, como as Zonas de Autossalvamento (ZAS).

Conforme o Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens (2014), as ZAS são áreas imediatamente a jusante da barragem nas quais não há tempo suficiente para intervenção adequada dos serviços e agentes de proteção civil em caso de acidente, como o rompimento da barragem. A extensão da Zona de Autossalvamento é definida pela maior das seguintes medidas: 10 km ou o percurso correspondente ao tempo de chegada da onda de inundação de trinta minutos.

Em síntese, a gestão dos riscos e da vulnerabilidade de comunidades a jusante de barragens requer um enfoque integrado, combinando monitoramento técnico, planejamento urbano e ações de educação preventiva. Políticas públicas eficazes e fiscalização contínua são essenciais para reduzir riscos, aumentar a resiliência das comunidades e proteger vidas, especialmente em contextos de elevada vulnerabilidade socioeconômica.

2.2 Plano Diretor como instrumento de controle e desenvolvimento urbano

O Plano Diretor é um dos principais instrumentos de planejamento urbano, sendo essencial para o controle do uso e da ocupação do solo nos municípios brasileiros. Regido pelo Estatuto da Cidade, estabelecido pela Lei Federal nº 10.257/2001, seu objetivo é organizar o crescimento das cidades de forma sustentável, assegurando que o desenvolvimento aconteça de maneira ordenada e compatível com as características territoriais, ambientais e socioeconômicas locais.

Embora o Plano Diretor seja frequentemente associado à gestão pública, ele não se configura como um documento político, mas sim como um processo social, que envolve a participação ativa da comunidade, da prefeitura e, em algumas localidades, também de instituições acadêmicas, para a criação das diretrizes, medidas e decisões territoriais (Machado *et al.*, 2022). De acordo com Juarez (2013), o caráter participativo é um dos pilares do Estatuto da Cidade, que visa democratizar as decisões sobre o futuro das cidades. A elaboração do plano é uma oportunidade para que os cidadãos influenciem diretamente o destino de seu município, trazendo à tona questões de interesse coletivo, como mobilidade urbana, infraestrutura, habitação e preservação ambiental.

De acordo com Rocha (2022), o município de Ouro Preto enfrenta uma série de desafios, principalmente de sua topografia acidentada e de seu vasto patrimônio histórico e cultural. O turismo, em conjunto com as atividades industriais e minerais, representa uma das principais fontes de economia local, atraindo visitantes de diferentes partes do mundo. Contudo, a expansão dessas atividades industriais e minerais, embora seja importante para o crescimento econômico do município, acarreta uma série de impactos, especialmente no que se refere ao uso do solo, à preservação ambiental e à proteção do patrimônio histórico, que são aspectos fundamentais para a identidade de Ouro Preto.

Atualmente, o município está regulamentado pela Lei Complementar nº 29, de dezembro de 2006, e o controle do uso do solo é uma das atribuições mais relevantes do Plano Diretor. O Plano Diretor de Ouro Preto tem o papel de orientar o crescimento e o ordenamento da cidade, estabelecendo diretrizes claras para o uso e ocupação do solo. Nesse contexto, o plano deve prever e definir áreas de expansão, possibilitando o crescimento urbano de forma ordenada, mas também definir um planejamento urbano com restrições rigorosas para novas construções, principalmente em zonas de valor histórico, ambiental e evitando que as pessoas construam em

áreas de riscos. O objetivo é evitar o crescimento desordenado e garantir que os novos empreendimentos não impactem os níveis do patrimônio cultural e as áreas ambientais da cidade.

2.3 Uso e Ocupação do Solo em Áreas de Risco: Vulnerabilidade, Planejamento Urbano e Desafios Geotécnicos em Ouro Preto (MG)

Para Soares (2020) o uso e a ocupação do solo são fatores cruciais no aumento da vulnerabilidade das comunidades, particularmente em áreas a jusante das barragens. A ocupação desordenada de regiões de risco, combinada ao uso inadequado do solo, tende a potencializar os impactos de desastres naturais, como inundações e deslizamentos.

Segundo o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (Brasil, 2013), os movimentos de massa figuram entre os eventos mais recorrentes em termos de danos e perdas de vidas. Esses desastres estão intimamente ligados à falta de um planejamento urbano adequado e à expansão descontrolada em áreas de risco, como as margens de rios e encostas. A ausência de regulação eficaz sobre o uso do solo resulta em uma maior exposição da população a esses fenômenos, exacerbando a vulnerabilidade das comunidades e destacando a urgência de políticas públicas que integrem planejamento urbano com práticas de gestão de risco e sustentabilidade.

O crescimento urbano desordenado frequentemente resulta na construção irregular e na ocupação de áreas inadequadas para habitação, como zonas de alagamento ou encostas instáveis. Essas regiões, além de serem naturalmente mais suscetíveis a inundações e deslizamentos, tornam-se ainda mais vulneráveis quando localizadas próximas a barragens, cujas estruturas podem apresentar falhas. De acordo com Menezes e Souza (2019), o uso inadequado do solo, como a impermeabilização excessiva e a remoção da vegetação, agrava os processos de escoamento superficial e erosão, fatores que podem comprometer tanto a integridade das barragens quanto a eficácia das ações de resposta a um possível rompimento.

Outro aspecto relevante é a falta de fiscalização e controle por parte do poder público em áreas próximas às barragens (Ferreira *et al.*, 2021). A ocupação irregular e a gestão inadequada do solo estão frequentemente associadas à ausência de políticas públicas eficazes para o controle do uso do solo, o que favorece a ocupação progressiva de áreas de risco, intensificando as condições de vulnerabilidade (Cofferri, 2014). Em diversos casos, o uso impróprio do solo

em Áreas de Proteção Permanente (APPs) e nas zonas de amortecimento das barragens pode aumentar a probabilidade de desastres, além de agravar suas consequências (Marajó, 2020).

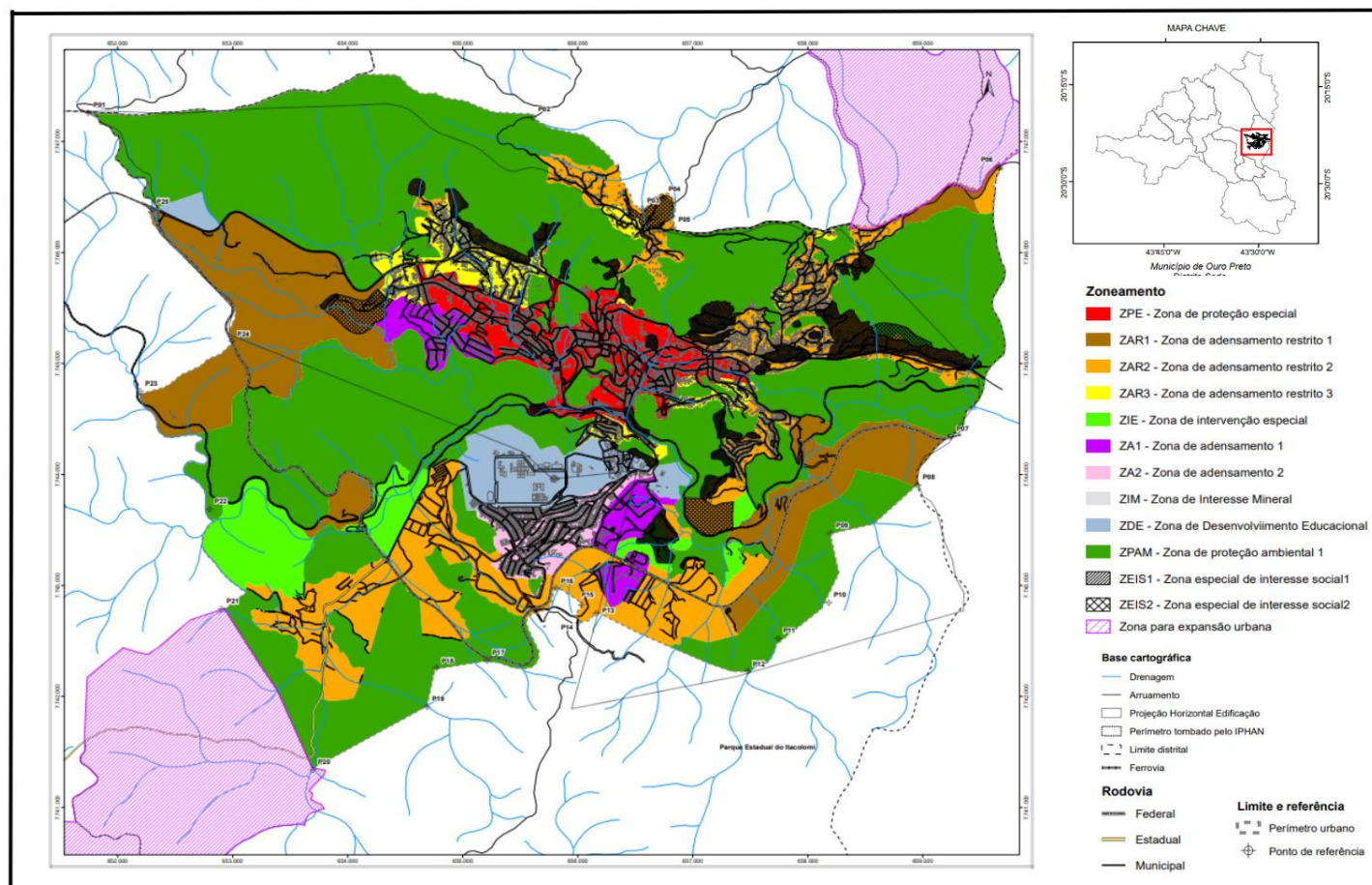
A ocupação desordenada também dificulta a implementação de medidas preventivas e de mitigação de riscos (Nipassa *et al.*, 2023). Em áreas onde o uso do solo é regulamentado e monitorado, a criação de zonas de exclusão e a construção de infraestruturas de drenagem e contenção podem reduzir consideravelmente os impactos de um possível rompimento de barragem. Por outro lado, em regiões sem esse controle, as populações ficam mais expostas, e os danos materiais e humanos em um cenário de rompimento tendem a ser maiores.

O uso inadequado do solo e a ocupação desordenada nas proximidades das barragens aumentam a suscetibilidade das áreas e, consequentemente, a vulnerabilidade das comunidades expostas. Para mitigar esses riscos, é essencial o desenvolvimento de políticas públicas que promovam o planejamento urbano sustentável e o controle da ocupação em áreas de risco, além da implementação de práticas de uso do solo que favoreçam a preservação ambiental e a segurança das populações locais (Cássio *et al.*, 2024).

O município de Ouro Preto, estudo de caso deste trabalho, é regulamentado pela Lei Complementar nº 93 de 2011, incorporada ao Plano Diretor, que estabelece as diretrizes e normas para o parcelamento, uso e ocupação do solo. Essas diretrizes estão em conformidade com a Lei Orgânica Municipal e seguem as disposições previstas no Plano Diretor de Ouro Preto. Criado em 1996, o Plano Diretor passou por diversas revisões e, conforme o art. 1º, §3º e Lei Federal nº 10.257/2001 (Estatuto da Cidade), no qual exige que o Plano Diretor tenha a sua revisão a cada cinco anos. Esse prazo é estabelecido para assegurar que o plano esteja sempre atualizado, alinhado com os instrumentos de ordenamento urbano e territorial, e em sintonia com as necessidades da população.

Conforme estabelecido no Plano Diretor do município, as áreas urbanas e rurais são subdivididas em zonas, definidas com base em uma série de condicionantes específicas. Dentre essas condicionantes, destacam-se os aspectos geoambientais, a capacidade de adensamento, a disponibilidade de infraestrutura, o potencial de uso do solo, e as demandas relacionadas à preservação e proteção do patrimônio cultural, ambiental e natural, conforme Figura 1.

Figura 1: Mapa de Zoneamento do Município de Ouro Preto



Fonte: Adaptado Prefeitura de Ouro Preto – MG (2010)

Analisando a Figura 1, pode-se observar que o município está dividido conforme mostra a Tabela 1:

Tabela 1: Divisão das Zonas de Ouro Preto

Característica	Localidade	* Dados (km ²)	% ocupada
ZA1	Ouro Preto - MG	0,709	2,36
ZA2	Ouro Preto - MG	0,599	1,99
ZAR1	Ouro Preto - MG	3,097	10,29
ZAR2	Ouro Preto - MG	5,175	17,20
ZAR3	Ouro Preto - MG	1,072	3,56
ZDE	Ouro Preto - MG	1,006	3,34
ZIE	Ouro Preto - MG	1,176	3,91
ZPAM	Ouro Preto - MG	15,554	51,69
ZPE	Ouro Preto - MG	1,703	5,66

Fonte: Adaptado Prefeitura Municipal de Ouro Preto (2010)

* Calculado na ferramenta de geoprocessamento (QGIS) a partir de dados Shapefile disponibilizados pela PMOP*

Onde, para a Prefeitura Municipal de Ouro Preto (2010):

ZA - Zona de Adensamento: Refere-se às áreas com condições projetadas para um maior adensamento urbano, com base em características topográficas, infraestrutura existente ou potencial, e condições ambientais adequadas. A Zona de Adensamento é subdividida em duas categorias:

1. **ZA-1:** Regiões parcialmente ocupadas, com características desenvolvidas ao adensamento, porém com algumas restrições devido a condições topográficas e limitações de articulação viária;
2. **ZA-2:** Regiões com condições desenvolvidas para o adensamento, sem as limitações do ZA-1.

ZAR - Zona de Adensamento Restrito: Compreende áreas onde a ocupação e o uso do solo são rigidamente controlados devido à deficiência ou inexistência de infraestrutura básica (como drenagem, abastecimento de água e esgotamento sanitário), ou devido a condições topográficas, hidrográficas e geológicas desfavoráveis. A ZAR também pode envolver a proteção do patrimônio cultural ou natural. A Zona de Adensamento Restrito é subdividida em três categorias:

1. **ZAR-1:** Áreas que, embora necessitem ser preservadas devido às suas características geoambientais e ao entorno, podem ser parceladas e/ou ocupadas, desde que observadas condições específicas e adequadas;
2. **ZAR-2:** Regiões com condições de relevância, risco geológico, desarticulação do sistema viário ou que favoreçam ocupações residenciais unifamiliares, exigindo restrições que restrinjam o adensamento demográfico;
3. **ZAR-3:** Áreas adjacentes às ZPE's (Zonas de Proteção Especial) ou às áreas com edificações de interesse cultural, que exigem cuidados especiais quanto ao uso do solo.

ZDE - Zona de Desenvolvimento Educacional: Destina-se à implantação de campi de instituições de ensino técnico e/ou superior, com características de ocupação específicas para atender às necessidades desse tipo de uso.

ZIE - Zona de Intervenção Especial: Refere-se a áreas degradadas por processos naturais ou antrópicos que excluem recuperação ambiental. O planejamento para essas áreas deve ser definido por um plano específico aprovado pelo Conselho Municipal de Desenvolvimento Ambiental.

ZPAM - Zona de Proteção Ambiental: Compreende áreas que devem ser preservadas ou recuperadas devido às suas características topográficas, geológicas, ambientais (como flora, fauna e recursos hídricos), ou pela necessidade de preservação do patrimônio arqueológico ou paisagístico.

ZPE - Zona de Proteção Especial: São áreas que contêm valores essenciais para a preservação do conjunto urbano, decorrentes da presença de traçados urbanísticos originais e de tipologias arquitetônicas e paisagísticas que configuram a identidade e a imagem do lugar.

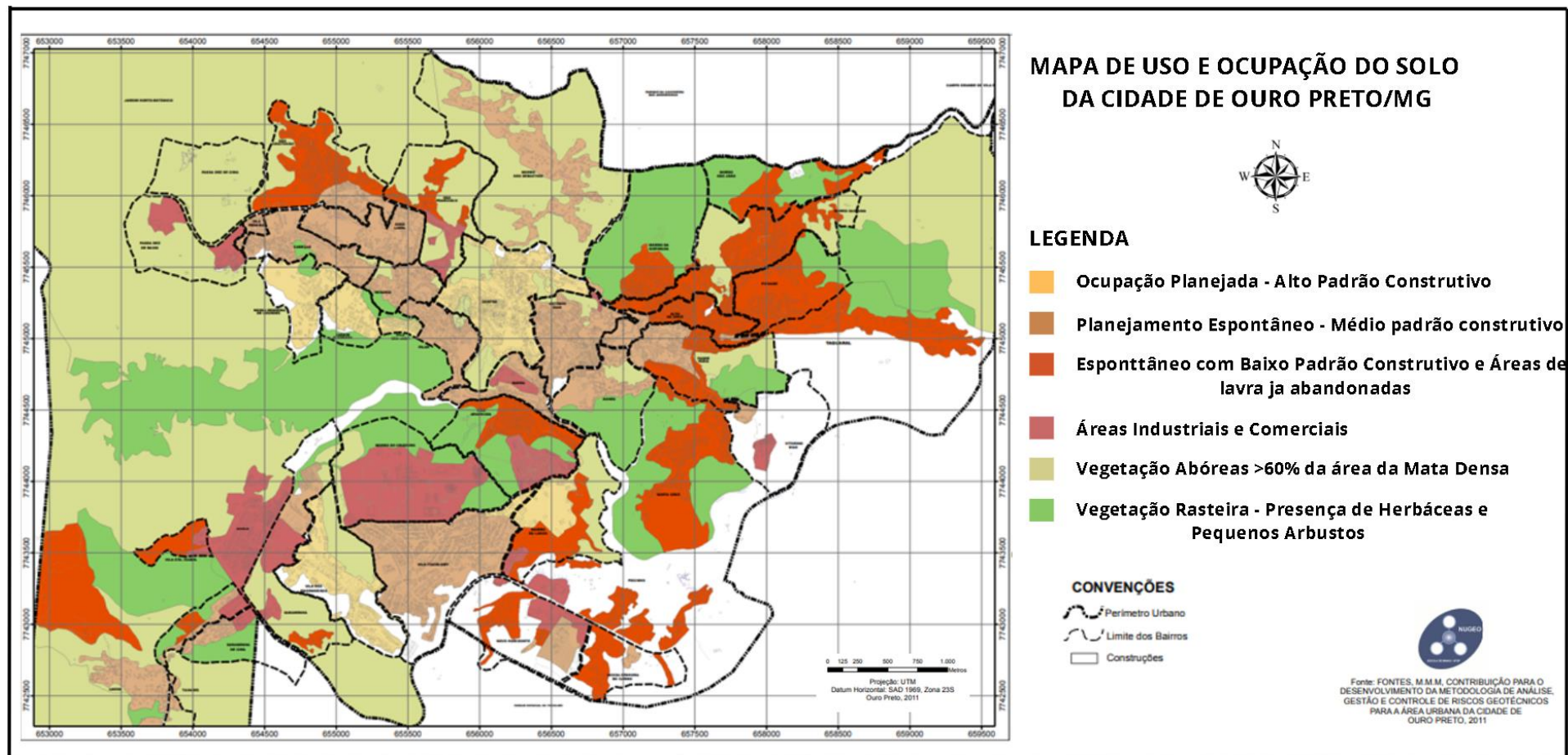
Apesar das diretrizes estabelecidas no Plano Diretor de Ouro Preto, que busca ordenar o uso do solo e garantir o desenvolvimento sustentável da cidade, o município enfrenta desafios históricos em relação à expansão urbana e à organização do espaço (Coelho, 2015). O crescimento acelerado, especialmente após a decadência da exploração do ouro e início das atividades industriais e minerais (Alves, 2021), gerou uma ocupação desordenada, com a formação de áreas urbanas irregulares, em grande parte sem infraestrutura adequada. Essa situação demonstra a necessidade urgente de um planejamento urbano eficaz, que leve em consideração tanto as características geotécnicas da cidade quanto os problemas socioeconômicos e ambientais, a fim de proporcionar um desenvolvimento mais equilibrado e seguro para a população.

O planejamento urbano é uma ferramenta essencial para o ordenamento do espaço, desempenhando um papel crucial na organização e no desenvolvimento das cidades (Fantin, 2024). Ele surgiu como resposta estratégica às transformações sociais, políticas e econômicas que surgiram ao longo do tempo, impulsionados pelas necessidades emergentes da sociedade. Esse processo visa não apenas a distribuição eficiente dos recursos disponíveis e a organização do espaço, mas também um ambiente urbano mais equilibrado, sustentável e inclusivo (Santos, 2024).

Após a decadência da exploração do ouro em Ouro Preto, o crescimento industrial no século XIX desempenhou um papel fundamental no aumento populacional da cidade. Muitas pessoas migraram para o município em busca de oportunidades de emprego nas novas atividades econômicas, estabelecendo-se em áreas com condições de moradia mais acessíveis. Esse fluxo migratório resultou em uma expansão urbana desordenada, uma vez que, na época, Ouro Preto não contava com um planejamento urbano adequado para lidar com as transformações socioeconômicas e demográficas pelas quais passavam (Pinheiro, 2003).

De acordo com dados do IBGE de 2022, o município de Ouro Preto contava com uma população de 74.821 habitantes, com uma densidade demográfica de 60,06 habitantes por metro quadrado. Conforme ilustrado na Figura 2, o crescimento urbano concentrou-se principalmente em regiões periféricas, como Alto da Cruz, Piedade e São Cristóvão. No entanto, observa-se também um grande número de edificações em áreas como Barra e Antônio Dias, evidenciando o impacto do adensamento populacional nessas localidades.

Figura 2 : Mapa de uso e ocupação do solo da cidade de Ouro Preto/MG



Fonte: Adaptado NUGEO (2011)

Apesar das iniciativas de melhoria de um planejamento urbano em Ouro Preto, o município enfrentou desafios geotécnicos significativos que limitam o potencial de grandes expansões urbanas, mesmo em áreas livres. Devido à sua topografia montanhosa e à presença de solos instáveis, a cidade sofre, especialmente durante o período de chuvas, com uma série de problemas geotécnicos recorrentes, como desmoronamento de taludes, Figura 3, desabamento de casas, erosões e o aparecimento de minas subterrâneas não mapeadas. Esses efeitos impactaram diretamente a segurança da população e dificultaram ainda mais o processo de ordenamento territorial.

Figura 3 - Deslizamento em Ouro Preto



Fonte: G1 Minas Gerais (2022)

Além das questões geotécnicas, há uma preocupação crescente com os moradores que vivem a jusante da Barragem de Marzagão. Esses moradores estão constantemente expostos ao risco de perder suas casas e suas vidas em caso de um eventual rompimento da barragem. A realocação dessas pessoas para áreas mais seguras exige um planejamento urbano robusto, capaz de identificar novas áreas adequadas para habitação e desenvolver infraestrutura de apoio.

Portanto, a combinação dos desafios geotécnicos com os riscos associados à Barragem de rejeito de Marzagão evidencia a necessidade de um planejamento urbano que considere tanto a sustentabilidade do crescimento urbano, quanto a segurança dos moradores. A complexidade dessas questões demanda políticas públicas específicas, capazes de mitigar os riscos e promover soluções que levem em conta as características geológicas, ambientais e sociais da cidade. Sem um planejamento urbano adequado e integrado, a população de Ouro Preto continuará vulnerável tanto aos perigos naturais quanto aos problemas de infraestrutura, que só tendem a se agravar com o tempo.

2.4 Vulnerabilidade socioeconômica em áreas de risco

A vulnerabilidade socioeconômica refere-se à propensão de indivíduos ou grupos a enfrentar adversidades resultantes de condições econômicas e sociais desfavoráveis. Esse conceito engloba aspectos como baixa renda, acesso restrito a serviços essenciais, educação inadequada, além de moradias precárias localizadas em áreas de risco, fatores que, em conjunto, aumentam a exposição ao risco e reduzem a capacidade de resposta em situações de crise.

Nessa perspectiva, para Bessa (2011), pessoas em situação de vulnerabilidade socioeconômica tendem a construir suas moradias em áreas de risco. Nesses locais, em caso de desastres, naturais ou não, elas são as mais impactadas. Para que haja intervenções nessas áreas, o Plano Diretor deve prever a distribuição adequada do uso e ocupação do solo, com especial atenção às populações de baixa renda.

Nesse sentido, a Constituição Federal de 1988 propôs um modelo de proteção social estatal, visando reduzir as vulnerabilidades sociais. No entanto, as políticas públicas de saúde e assistência social, ao abordar a vulnerabilidade, afetam diretamente as populações que dependem desses auxílios para sobreviver. Elas também têm o papel de assegurar o acesso aos direitos sociais desses cidadãos. Segundo Santos (2023), é crucial compreender como essas políticas definem e tratam a vulnerabilidade social, de modo a promover mudanças reais no cotidiano das famílias mais vulneráveis.

A vulnerabilidade socioeconômica, portanto, está intrinsecamente ligada à exclusão social e à precariedade das condições de vida (Vieira, 2023), refletindo uma série de desafios que vão além da simples carência material. Além dos fatores estruturais, como renda e habitação, a falta de acesso a serviços públicos básicos e a fragilidade das redes de apoio comunitário agravam a

exposição dessas populações ao risco, comprometendo sua resiliência frente a adversidades. Estudos indicam que a concentração de renda e a exclusão social agravam as condições de vida de parcelas significativas da população, perpetuando ciclos de pobreza e marginalização (Boff, 2023). Nesse cenário, o papel do Estado torna-se central, uma vez que políticas públicas eficazes, como as previstas no Plano Diretor e na Constituição de 1988, podem atuar na mitigação dessas vulnerabilidades, promovendo não só a proteção social, mas também a inclusão e a dignidade das populações.

2.5 Deslocamento populacional induzido por barragens

O deslocamento da população a jusante de uma barragem, denominado áreas de risco, tem se tornado uma consequência crescente ao longo dos anos, uma vez que os riscos associados a essas grandes estruturas podem resultar em óbitos e degradação ambiental. Embora essas obras proporcionem benefícios significativos para a economia local e nacional, elas geram um impacto substancial sobre as comunidades situadas a jusante das barragens, frequentemente resultando em reassentamento forçado. Segundo a Comissão Mundial de Barragens (2000), "entre 40 e 80 milhões de pessoas foram fisicamente deslocadas por projetos envolvendo cerca de 45.000 grandes barragens", sendo que no Brasil esse número já ultrapassa um milhão de pessoas afetadas.

O Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB) Figura 4, desempenha um papel fundamental na organização e defesa dos direitos dessas populações. Fundado no final da década de 1970, o MAB busca garantir que as comunidades afetadas tenham voz ativa nos processos de decisão relacionados à construção de barragens e na luta por compensações justas. O deslocamento compulsório pode levar à fragmentação de laços comunitários e à perda de identidades culturais. Estudos indicam que as populações deslocadas enfrentam desafios significativos na reconstrução de suas vidas, incluindo dificuldades econômicas e sociais devido às suas vulnerabilidades socioeconômicas (Nascimento, 2024).

Figura 4 - Movimento dos atingidos por barragens



Fonte: MAB (2024)

Atualmente, o Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB) atua como o principal porta-voz das populações impactadas por barragens. Em 2024, sua principal reivindicação foi a implementação da Política Nacional de Direitos das Populações Atingidas por Barragens (PNAB), regulamentada pela Lei nº 14.755. O objetivo é assegurar que as comunidades afetadas, seja por desastres ou pelo deslocamento compulsório de suas moradias, tenham participação ativa nos processos de decisão relacionados à construção de novas barragens. Além disso, busca garantir o reassentamento digno e a efetivação de seus direitos.

O deslocamento compulsório pode levar à fragmentação de laços comunitários e à perda de identidades culturais. Estudos indicam que as populações deslocadas enfrentam desafios significativos na reconstrução de suas vidas, incluindo dificuldades econômicas e sociais (Roquetti, 2017). O rompimento de barragens, como o ocorrido em Mariana, Minas Gerais, em 2015, causou a dispersão de rejeitos de mineração, impactando ecossistemas e comunidades situadas a jusante da barragem, como Bento Rodrigues e Paracatu. Os habitantes dessas localidades foram forçados a alterar suas vidas e recomeçar em reassentamentos construídos pelas empresas responsáveis pelos danos causados pela tragédia (Pessoa, 2021).

O Movimento dos Atingidos por Barragens (MAB) tem desempenhado um papel fundamental na articulação e promoção de políticas públicas voltadas à proteção e ao bem-estar das comunidades a jusante impactadas por barragens. Suas ações englobam a realização de

campanhas de sensibilização, mobilizações sociais e a reivindicação de justiça para as populações atingidas. O deslocamento de comunidades a jusante de barragens configura um fenômeno complexo, que demanda estratégias integradas, abrangendo dimensões técnicas e sociais. Nesse contexto, a atuação de movimentos sociais como o MAB é imprescindível para assegurar a efetivação dos direitos das populações afetadas e para a implementação de soluções que promovam a sustentabilidade e a equidade social.

2.6 Avaliação ambiental e hídrica em áreas de risco

A Avaliação Ambiental e Hídrica em Áreas de Risco envolve a análise detalhada dos possíveis impactos que empreendimento (Silva, 2024), como a construção de barragens, podem causar ao meio ambiente e aos recursos hídricos, principalmente em cenários de ruptura. A legislação brasileira dispõe de várias normas e leis, como a Lei nº 9.433/1997 (Lei das Águas) e a Lei nº 12.334/2010 (Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB), que estabelecem diretrizes para o uso sustentável da água e para a segurança de barragens.

Essas normativas buscam garantir a prevenção de desastres, a mitigação de impactos ambientais e a proteção dos recursos hídricos. Para Ribeiro (2017) instrumentos como o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) são essenciais para identificar riscos potenciais, principalmente em cenários de rompimento de barragens. O processo de licenciamento ambiental também desempenha um papel crucial, ao exigir avaliações contínuas e monitoramento rigoroso da segurança das estruturas.

Em casos de rompimento, como os desastres de Mariana e Brumadinho, houve falhas no licenciamento e na avaliação de riscos, que subestimaram o potencial de danos, especialmente aos recursos hídricos (Laschefski, 2020). A correta aplicação da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) pode prevenir tais desastres, assegurando medidas preventivas e de mitigação adequadas para proteger o meio ambiente e as populações locais.

2.6.1 Leis e normativas que se aplicam ao meio ambiente e aos recursos hídricos

A proteção do meio ambiente e dos recursos hídricos é uma prioridade fundamental na orientação de empreendimentos que podem causar impactos significativos, como a construção de barragens. No Brasil, diversas leis e normativas visam garantir que essas obras sejam realizadas de forma sustentável e segura, minimizando os riscos tanto para o ecossistema quanto

para as populações locais. Além disso, essas regulamentações buscam garantir que, em casos de rompimentos de barragens, sejam adotadas medidas preventivas e corretivas para mitigar os danos. A Quadro 1 apresenta as principais leis e normativas aplicáveis à construção de barragens, assim como ao gerenciamento de seus impactos ambientais e hídricos. Na sequência, são apresentados os principais aspectos relacionados a essas normativas.

Quadro 1 - Legislações brasileiras

Lei/Normativa	Âmbito	Descrição Resumida	Aplicação (Construção/Rompimento)
Lei nº 9.433/1997 (Lei das Águas)	Nacional	Estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos, garantindo o uso sustentável.	Construção e Rompimento
Lei nº 12.334/2010 (Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB)	Nacional	Regula a segurança de barragens, com foco na prevenção de acidentes e minimização de impactos.	Construção e Rompimento
Resolução CONAMA nº 237/1997	Nacional	Definir procedimentos para o licenciamento ambiental de empreendimentos potencialmente poluidores.	Construção
Lei nº 6.938/1981 (Política Nacional do Meio Ambiente)	Nacional	Dispõe sobre a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental.	Construção
Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais)	Nacional	Estabelece avaliações penais e administrativas para condutas lesivas ao meio ambiente.	Rompimento
Resolução CNRH nº 144/2012	Nacional	Normatiza critérios de segurança para barragens, priorizando o monitoramento e fiscalização.	Construção
Decreto nº 10.946/2022	Nacional	Regula a fiscalização e controle de barragens para garantir a segurança hídrica e ambiental.	Construção e Rompimento
Lei Estadual nº 22.796/2017 (Minas Gerais)	Estadual (MG)	Dispõe sobre a Política Estadual de Segurança de Barragens, complementando a PNSB.	Construção e Rompimento
Resolução ANA nº 236/2017	Nacional	Estabelece diretrizes para a gestão integrada de recursos hídricos, focando em eventos críticos como inundações.	Rompimento

Fonte: Adaptado legislações (2025)

- **Lei nº 9.433/1997 (Lei das Águas):** A Lei das Águas institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Seus princípios são benéficos para a gestão sustentável da água, garantindo seu uso múltiplo e a preservação dos ecossistemas aquáticos. Ela apresenta conceitos como a cobrança pelo uso da água e a gestão participativa por meio dos comitês da bacia hidrográfica. No contexto de barragens, a lei exige a proteção dos corpos d'água afetados pela construção, garantindo o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental.
- **Lei nº 12.334/2010 (Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB):** A PNSB foi criada após diversos acidentes com barragens e busca regulamentar a segurança dessas estruturas em todo o Brasil. Ela determina que barragens para geração de energia, abastecimento público e contenção de rejeitos minerais devem ser submetidas a planos rigorosos de segurança e monitoramento contínuo. O objetivo principal é prevenir o rompimento das barragens e minimizar os impactos em caso de falha, tanto para o meio ambiente quanto para os impactos afetados. Essa lei ainda define como responsabilidades dos empreendedores e das autoridades reguladoras na fiscalização das barragens.
- **Resolução CONAMA nº 237/1997:** Esta resolução regulamenta o licenciamento ambiental para empreendimentos de grande porte que possam causar impactos significativos ambientais, como a construção de barragens. Ela especifica os procedimentos e etapas a serem seguidas, desde a apresentação do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), até a obtenção de licenças prévias, de instalação e de operação. Além disso, determina que os responsáveis pelo empreendimento adotem medidas de mitigação dos impactos, particularmente aqueles relacionados aos recursos hídricos e à biodiversidade local.

- **Lei nº 6.938/1981 (Política Nacional do Meio Ambiente):** Essa lei estabelece a Política Nacional do Meio Ambiente e cria o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA). Seu principal objetivo é preservar, melhorar e recuperar a qualidade ambiental, conciliando desenvolvimento econômico e proteção ambiental. Ela define a necessidade de avaliação dos impactos ambientais de qualquer atividade ambiental poluidora, como a construção de barragens, e exige a aplicação de medidas preventivas e compensatórias para minimizar os danos ambientais. A lei também define instrumentos importantes, como o licenciamento ambiental e a responsabilização por danos ambientais.
- **Lei nº 9.605/1998 (Lei de Crimes Ambientais):** A Lei de Crimes Ambientais estabelece sanções penais e administrativas para pessoas físicas e jurídicas que cometam infrações ambientais. Em casos de rompimento de barragens que causem manipulação ambiental, essa lei permite a responsabilização dos responsáveis, incluindo a aplicação de multas, prisão e outros prejuízos. Ela também incentiva a adoção de práticas preventivas que evitam danos ambientais e obrigam a reposição dos danos causados aos ecossistemas e à sociedade, o que inclui a restauração dos recursos hídricos afetados.
- **CNRH nº 144/2012:** A Resolução nº 144 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) estabelece os critérios de segurança para barragens, com foco na proteção dos recursos hídricos. Ela prevê a necessidade de monitoramento contínuo das barragens, com relatórios regulares sobre as condições estruturais e os riscos potenciais. O objetivo é garantir a segurança tanto das estruturas quanto dos corpos d'água a jusante, evitando impactos em caso de falhas. A resolução também destaca a importância dos planos de emergência e a integração das ações de fiscalização entre os órgãos competentes.
- **Decreto nº 10.946/2022:** Este decreto complementa a legislação de segurança de barragens, especificando regras para o monitoramento e a fiscalização das

estruturas, com ênfase na prevenção de acidentes e na proteção dos recursos hídricos. Ele atualiza normas relacionadas à responsabilidade dos empreendedores, às exigências para a implementação de planos de segurança e aos requisitos para auditorias independentes de barragens. Além disso, reforçamos a necessidade de medidas emergenciais e de comunicação rápida com as comunidades em caso de riscos de rompimento, com o objetivo de proteger o meio ambiente e a vida humana.

- **Lei Estadual nº 22.796/2017 (Minas Gerais):** Esta lei, aplicável ao estado de Minas Gerais, é complementar à Política Nacional de Segurança de Barragens e define diretrizes específicas para a segurança de barragens no estado. Ela prevê uma fiscalização mais rigorosa para barragens em áreas com maior densidade populacional e para aquelas que possam causar impactos significativos nos recursos hídricos estaduais. A lei também regula a classificação de barragens quanto ao seu risco e ao dano potencial associado, além de exigir a implementação de planos de emergência e de comunicação com as comunidades vizinhas.
- **ANA nº 236/2017:** A Resolução nº 236 da Agência Nacional de Águas (ANA) estabelece diretrizes para a gestão integrada dos recursos hídricos em situações críticas, como inundações e secas. No contexto de rompimento de barragens, a resolução foca na necessidade de uma resposta rápida às emergências, garantindo que medidas de contenção de impactos sejam aplicadas de forma eficiente. Ela também trata da importância da prevenção por meio do planejamento e da construção de infraestruturas resilientes, que protejam as bacias hidrográficas e os recursos hídricos de eventos extremos.

2.6.2 Licenciamento ambiental para barragens no Brasil

O licenciamento ambiental para barragens no Brasil é um processo complexo e rigoroso, destinado a garantir que a construção, operação e desativação dessas estruturas sejam realizadas de maneira sustentável e com o mínimo impacto ambiental. Esse processo é regulamentado

principalmente pela Lei nº 6.938/1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, e pela Resolução CONAMA nº 237/1997, que define os critérios para o licenciamento de empreendimentos ambientais poluidores. Para a construção de barragens, o empreendedor deve obter três tipos de licenças sequenciais: a Licença Prévia (LP), a Licença de Instalação (LI) e a Licença de Operação (LO), cada uma com requisitos específicos e análises ambientais previstas (Motta; Pêgo, 2013, p 25). O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) são documentos centrais nesse processo, avaliando os possíveis efeitos sobre os recursos hídricos, a fauna, a flora e as populações locais.

Além das normativas gerais, estados como Minas Gerais possuem legislações complementares, como a Lei Estadual nº 22.796/2017, que reforçam os critérios de segurança de barragens e o licenciamento ambiental no estado. Essas regulamentações são essenciais, pois garantem que a perspectiva do empreendimento seja avaliada com base em critérios técnicos específicos, contemplando aspectos socioambientais e buscando a mitigação de impactos adversos. O licenciamento ambiental atua como um instrumento preventivo, garantindo que barragens sejam construídas de forma a preservar os recursos naturais e reduzir os riscos de acidentes ambientais, como rompimentos (Costa *et al.*, 2015)

Apesar da importância do licenciamento ambiental para a segurança e sustentabilidade dos empreendimentos, falhas nesse processo têm sido observadas no Brasil, resultando em graves acidentes com barragens. Um dos exemplos mais notórios é o rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG), em 2015, onde falhas no licenciamento e na fiscalização foram desenvolvidas para o maior desastre ambiental do país. Segundo estudos, houve deficiências na avaliação de riscos e no acompanhamento pós-licenciamento, o que evidencia a necessidade de um controle mais rigoroso por parte dos órgãos ambientais e maior responsabilidade dos empreendedores (Freitas, 2019). O processo de licenciamento frequentemente pode ser comprometido por pressões econômicas, o que resulta na concessão de licenças sem uma análise abrangente dos impactos ambientais a longo prazo, particularmente no que tange à segurança hídrica e estrutural (Milanez *et al.*, 2020).

A falta de integração entre diferentes níveis governamentais e a ausência de um monitoramento contínuo também agravaram os riscos. Esse cenário aponta para a urgência de reformas no sistema de licenciamento ambiental, tornando-o mais eficiente e preventivo, de

modo a evitar desastres futuros. A criação de mecanismos de auditoria externa e a participação ativa das comunidades no processo de licenciamento são algumas das medidas sugeridas por especialistas para aumentar a transparência e a eficácia do processo (Ferreira, 2024).

2.6.3 Licenciamento ambiental em Minas Gerais

O licenciamento ambiental em Minas Gerais segue as diretrizes gerais determinadas pela Política Nacional de Meio Ambiente e pela Resolução CONAMA nº 237/1997, mas possui regulamentações específicas que visam fortalecer a gestão ambiental no estado. O Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA) é o órgão responsável pela condução do processo de licenciamento ambiental, que inclui uma análise de empreendimentos de grande impacto, como barragens. A Lei Estadual nº 21.972/2016 e o Decreto nº 47.383/2018 estabelecem critérios mais rígidos para atividades ambientais poluidoras, especialmente em áreas de relevância hídrica e ambiental (Minas Gerais, 2016). Além disso, as etapas do licenciamento incluem o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), que são obrigatórios para empreendimentos que possam causar geração significativa ao meio ambiente (Coelho, 2010).

Minas Gerais adota um modelo integrado de licenciamento, conhecido como Licenciamento Ambiental Trifásico, composto pela Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO). Esse modelo visa garantir que, ao longo de cada fase do empreendimento, sejam cumpridos os requisitos técnicos e ambientais, promovendo uma análise contínua dos impactos (Olegário *et al.*, 2024). No caso de barragens, a legislação estadual exige requisitos adicionais, como o monitoramento contínuo da estrutura e o cumprimento de planos de segurança e emergência, que podem evitar tragédias como os rompimentos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019).

Entretanto, o licenciamento ambiental em Minas Gerais também enfrenta dificuldades e desafios. Um dos problemas mais recorrentes é a pressão econômica para a aprovação rápida de grandes empreendimentos, o que pode resultar em avaliações ambientais incompletas ou superficiais. O caso de Brumadinho ilustra essas falhas, onde o processo de licenciamento foi criticado por não ter exigido uma avaliação detalhada dos riscos de rompimento (Camillo, 2021). A falta de uma fiscalização contínua e a carência de integração entre os órgãos estaduais e federais também foram apontadas como fatores que prejudicam a eficácia do licenciamento

no estado. Reforçar a fiscalização, promover maior transparência no processo e incluir as comunidades diretamente afetadas na tomada de decisões são medidas essenciais para melhorar o sistema de licenciamento ambiental no estado (Dias, 2024)

2.6.4 Avaliação do impacto ambiental em cenário de rompimento de barragem

A Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) é um instrumento fundamental na gestão de grandes empreendimentos, como a construção de barragens, principalmente devido aos riscos associados ao rompimento dessas estruturas. A AIA busca prever e mitigar os possíveis efeitos negativos de um empreendimento sobre o meio ambiente e as populações locais. Segundo Rocha (2024) no caso de barragens, além dos impactos rotineiros de sua operação, o rompimento configura um cenário catastrófico, com consequências devastadoras para a fauna, a flora, os recursos hídricos e as comunidades situadas a jusante.

No entanto, a experiência de desastres recentes no Brasil, expõe fragilidades no processo de avaliação de impacto ambiental. Em ambos os casos, os Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e seus respectivos Relatórios de Impacto Ambiental (RIMA) subestimaram ou não contemplaram o risco de rompimento, resultando em uma falha na identificação de cenários de crise. Segundo Nierwinski (2010), a ausência de uma análise detalhada de riscos específicos, como a liquefação do rejeito, demonstra uma lacuna significativa na execução dos AIA's, que muitas vezes priorizam as opções econômicas do empreendimento em detrimento da segurança ambiental e social.

Outro ponto crítico da AIA no contexto de rompimento de barragens é a análise dos impactos sobre os recursos hídricos. O rompimento de uma barragem libera grandes volumes de água e rejeitos, que contaminam rios e cursos d'água, afetando bacias hidrográficas inteiras (Silva, 2010). Segundo Fiorott (2017), em casos como o de Mariana, o Rio Doce foi contaminado ao longo de centenas de quilômetros, com danos ecológicos que levarão décadas para serem recuperados. Uma falha na análise de impacto em cenários de rompimento reflete na insuficiência de medidas preventivas ou de contenção que poderiam reduzir os danos aos recursos hídricos.

Além disso, a AIA deve considerar os impactos socioeconômicos de um rompimento, que tendem a ser massivos. O deslocamento de trânsito, a perda de moradias, a interrupção de atividades econômicas e os danos psicológicos causados pelos desastres são fatores muitas

vezes subestimados nas avaliações. Como destacado por Luiz (2019), a ausência de diálogo efetivo com as comunidades afetadas e a falta de envolvimento dessas populações no processo de licenciamento ambiental agravaram ainda mais os problemas da AIA.

Uma crítica recorrente é a superficialidade com a qual os riscos de rompimento são tratados nos EIA's, especialmente no que tange às barragens de rejeitos. Estudos demonstram que, muitas vezes, as avaliações são baseadas em metas otimistas, sem levar em conta as falhas geotécnicas e as características naturais que podem desencadear o colapso das estruturas (Kosteski, 2025). Isso ocorre tanto pela falta de dados detalhados sobre a pressão dos empreendedores, que visa minimizar os custos de medidas preventivas. Segundo Scmitt (2015), o problema também está na fiscalização incluída dos estudos ambientais, que muitas vezes passam por revisões superficiais pelos órgãos competentes.

A fiscalização e a implementação das medidas recomendadas nos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) constituem outro ponto crítico de vulnerabilidade. A ausência de monitoramento contínuo e de auditorias externas no período pós-licenciamento deixa muitas barragens suscetíveis a falhas estruturais, aumentando o risco de rompimentos graves e os impactos sobre as comunidades a jusante. Terrin (2019) argumenta que, mesmo quando as avaliações de impacto ambiental identificam corretamente os riscos, a implementação das soluções mitigadoras muitas vezes não ocorre, seja por falta de recursos ou pela negligência das empresas. Isso reforça a necessidade de uma fiscalização mais rigorosa e transparente por parte dos órgãos ambientais e de um maior envolvimento da sociedade civil nas etapas de monitoramento.

Por fim, uma avaliação de impacto ambiental deve ser mais integrada, levando em consideração as interações entre os diferentes aspectos ambientais, sociais e econômicos. O rompimento de uma barragem de rejeito não afeta apenas o local imediato da estrutura, mas provoca um efeito de destruição que se estende por grandes áreas. Portanto, a AIA deve adotar uma visão sistêmica, considerando as interações entre o solo, os corpos d'água, a biodiversidade e as atividades humanas. A falta dessa perspectiva integrada tem sido uma das maiores falhas nos estudos de impacto, resultando em uma subavaliação das consequências de possíveis rompimentos e na adoção de medidas preventivas insuficientes. A melhoria do AIA para

barragens, com a inclusão de cenários de rompimento mais realistas e rigorosos, é essencial para evitar que tragédias como as de Mariana e Brumadinho voltem a acontecer.

2.6.5 Avaliação do impacto hídrico em cenário de rompimento de barragem

A avaliação do impacto hídrico em cenários de rompimento de barragem é um processo de extrema relevância, dada a magnitude dos danos que tais eventos podem causar aos recursos naturais e às comunidades afetadas. A gestão adequada dos recursos hídricos, por meio de instrumentos como as outorgas, constitui uma das principais ferramentas de prevenção e mitigação de desastres ambientais. Segundo Carolo (2007), as outorgas são autorizações formais que permitem o uso dos recursos hídricos, condicionadas à análise técnica e ambiental, visando o uso sustentável e equilibrado da água. No entanto, quando falhas estruturais ocorrem, como no caso de rompimentos de barragens, as consequências para o meio ambiente são devastadoras, exigindo uma avaliação detalhada dos poluentes e dos danos às bacias hidrográficas afetadas.

A Lei nº 9.433/1997, conforme citado, estabelece diretrizes rigorosas para a utilização e gestão dos recursos hídricos, com a outorga sendo um dos mecanismos fundamentais para o controle desse uso. A relevância da outorga como ferramenta de regulação hídrica se intensifica em contextos de alto risco, como aqueles relacionados à atividade mineradora. A legislação estadual de Minas Gerais, por meio da Lei nº 13.199/1999, visa complementar as normativas federais, buscando garantir a preservação das bacias hidrográficas, essenciais para o abastecimento de água e a manutenção dos ecossistemas (Cunha, 2013). No entanto, a concessão de outorgas frequentemente não considera adequadamente o potencial de desastres e a suscetibilidade das áreas impactadas, falhando em prever e mitigar de forma eficaz o risco de rompimento.

Portanto, a avaliação dos impactos hídricos em cenários de rompimento de barragens deve ser mais integrada e preventiva, contemplando não apenas a análise dos danos após os eventos, mas também a adoção de mecanismos eficientes de controle e fiscalização. Com o avanço da tecnologia, é possível utilizar Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e análises multicritérios para prever os possíveis danos físicos e sociais em caso de rompimento de barragens, sejam elas de rejeitos minerários ou industriais. No entanto, ainda há deficiências

tanto nas legislações quanto na disponibilidade de dados públicos, dificultando o acesso à informação sobre potenciais impactos futuros.

2.7 O uso do Sistema de Informações Geográficas e a Análise Multicritério

Segundo Deyse (2023) os sistemas de Informações Geográficas (SIG) combinados com a Análise Multicritérios (AMC) têm se destacado como ferramentas poderosas para a tomada de decisões em diversas áreas, incluindo o planejamento ambiental e a gestão de riscos. O SIG permite o processamento e a visualização de grandes volumes de dados espaciais, possibilitando análises detalhadas sobre o uso do solo, características topográficas e outras variáveis importantes (Ribeiro, 2016). Para Vettorazzi (2006) a AMC, por sua vez, facilita a ponderação de diferentes fatores, auxiliando na priorização e escolha de alternativas em cenários complexos.

Essa integração é especialmente útil em contextos de risco ambiental, onde múltiplas variáveis devem ser consideradas. Por exemplo, em uma análise de risco de inundações, o SIG pode fornecer informações detalhadas sobre a topografia, enquanto a AMC ajuda a balancear fatores como a densidade populacional, infraestruturas críticas e o histórico de eventos climáticos Mattedi (2024). Dessa forma, é possível identificar as áreas mais vulneráveis e priorizar ações de mitigação.

O uso de SIG e AMC é amplamente empregado no mapeamento de vulnerabilidade e risco a deslizamentos e inundações em áreas urbanas e costeira (Aires *et al.*, 2022). Essas ferramentas auxiliam na integração de dados socioeconômicos e ambientais, essenciais para a gestão de desastres naturais. No município de Ubatuba (SP), por exemplo, Oliveira (2016) utilizou o SIG para mapear a vulnerabilidade socioambiental, considerando fatores físicos e sociais que influenciam o risco de deslizamentos e enchentes no município.

Além disso, para Reis (2003) a AMC no ambiente SIG permite a criação de mapas de suscetibilidade, fundamentais para a gestão territorial. Tais mapas fornecem uma visão integrada dos riscos e das vulnerabilidades, combinando dados físicos e socioeconômicos. Isso possibilita uma abordagem holística, essencial para lidar com problemas como a ocupação

desordenada de áreas de risco e o planejamento de medidas de adaptação em face das mudanças climáticas

Em Brusque (SC), a combinação de SIG e análise multicritério, elaborado por Mattedi (2024), também foi utilizada para mapear áreas de maior vulnerabilidade a desastres, como deslizamentos. A metodologia aplicada baseou-se na criação de uma Matriz de Vulnerabilidade Socioambiental, que cruzou índices de suscetibilidade ambiental e vulnerabilidade social. Os resultados permitiram identificar as áreas mais suscetíveis a eventos climáticos extremos e auxiliaram no planejamento urbano.

Portanto, a combinação de SIG e AMC não só facilita o planejamento e a gestão de áreas vulneráveis (Sartori, 2010), mas também potencializa a capacidade de antecipação e resposta a desastres naturais e antrópicos. Essa tecnologia é essencial para um desenvolvimento sustentável e seguro, permitindo que gestores públicos e privados tomem decisões baseadas em dados precisos e atualizados. A análise multicritério aplicada ao SIG também facilita o acompanhamento contínuo e a atualização dos mapas de risco (Biedacha, 2024). Esse monitoramento é crucial para áreas em constante transformação, como regiões costeiras ou áreas urbanas densamente povoadas, onde a dinâmica populacional e as mudanças climáticas intensificam os riscos.

Os parâmetros utilizados em estudos de vulnerabilidade e risco podem variar conforme o foco da pesquisa. No caso de estudos de deslizamentos, por exemplo, a declividade do terreno é um dos principais fatores, pois exerce uma grande influência na probabilidade de ocorrência de tais eventos. Oliveira (2016), Aires et al. (2022) e Mello (2023) identificam áreas com alta inclinação como particularmente suscetíveis a desastres, especialmente em regiões com urbanização desordenada. Contudo, Aires et al. (2022) apresentam uma análise mais detalhada, incorporando dados meteorológicos, como precipitação e intensidade das chuvas, o que não é abordado com a mesma profundidade nos estudos de Oliveira (2016) e Mello (2023).

Outro fator comum entre os estudos é o uso do solo, que afeta diretamente a vulnerabilidade de áreas sujeitas a desastres. Em Ubatuba (Oliveira, 2016) e Brusque (Mello, 2023), o crescimento urbano descontrolado e a impermeabilização do solo aumentam a susceptibilidade a inundações e deslizamentos. Já no estudo da Barragem de Pau dos Ferros (Aires *et al.*, 2022), essa análise é ampliada ao considerar variáveis ambientais detalhadas, como condições

climáticas, para prever os impactos das chuvas intensas. Isso destaca a maior profundidade e abrangência da abordagem de Aires *et al.* (2022) em comparação com os demais.

A vulnerabilidade social também é abordada em todos os estudos, utilizando indicadores socioeconômicos como renda, educação e acesso a serviços básicos. Oliveira (2016) e Mello (2023) observam que populações de baixa renda geralmente vivem em áreas de risco elevado, como encostas ou margens de rios. Aires *et al.* (2022) corroboram essa análise, mas ampliam o foco ao utilizar uma Matriz de Vulnerabilidade Socioambiental, que integra de forma sistemática a vulnerabilidade socioeconômica com a susceptibilidade ambiental.

Todos os estudos também aplicam a Análise Multicritério (AMC) para combinar diversos parâmetros de risco. A abordagem de Aires *et al.* (2022) se destaca pela ênfase no ranqueamento e priorização dos fatores de risco, oferecendo uma base mais sólida para a implementação de medidas preventivas.

Em resumo, embora os estudos sobre Ubatuba, Brusque e o de Aires *et al.* (2022) utilizem parâmetros essenciais como declividade, uso do solo, vulnerabilidade social e histórico de desastres, suas abordagens diferem significativamente. A integração de dados climáticos e o uso mais detalhado da AMC no estudo de Aires *et al.* (2022) proporcionam uma análise mais completa e orientada para a tomada de decisões em comparação aos estudos realizados em Ubatuba e Brusque.

2.8 Aplicação integrada do Processo Hierárquico Analítico (AHP) em SIG para a elaboração de indicadores de vulnerabilidade física e social na gestão de riscos

A pesquisa de Paiva (2024) explora a aplicação do Processo Hierárquico Analítico (AHP) no Sistema de Informação Geográfica (SIG) para desenvolver indicadores de vulnerabilidade física e social, com foco na gestão de riscos de desastres em barragens. A integração do AHP com o SIG proporciona uma análise detalhada das áreas suscetíveis a impactos, considerando tanto fatores físicos quanto sociais. Esta abordagem é particularmente útil no licenciamento ambiental de barragens, pois aprimora a análise multicritério e facilita a visualização das comunidades afetadas e suas fragilidades.

O AHP é essencial para a avaliação da vulnerabilidade física, levando em conta fatores como proximidade a rios, uso do solo e declividade do terreno, que influenciam diretamente a

severidade dos impactos em caso de ruptura de barragem. Paiva (2024) permite a ponderação desses critérios de acordo com as especificidades de cada local, gerando uma visão precisa dos riscos associados à estrutura da barragem de rejeito.

No aspecto social, o AHP é utilizado para identificar a vulnerabilidade das comunidades à jusante de barragens, considerando indicadores como densidade populacional, nível de educação e acesso a serviços básicos. A integração desses indicadores em SIG permite a análise espacial e a identificação de áreas com maior vulnerabilidade social, fornecendo subsídios para intervenções que visem mitigar os impactos de possíveis desastres.

A combinação dos índices de vulnerabilidade física, relacionada às características do terreno, declividade e proximidade da barragem, e social resulta em uma ferramenta eficaz para a tomada de decisões, permitindo priorizar ações como o reassentamento de comunidades ou a implementação de sistemas de alerta antecipado (Furtado, 2019). A metodologia proposta por Paiva (2024) oferece um diagnóstico preventivo, contribuindo para aumentar a segurança das populações e dos ecossistemas circundantes.

Além disso, a aplicação do AHP no SIG permite análises retroativas de desastres, como o rompimento das barragens de Fundão e B1, demonstrando a eficácia dessa ferramenta para prever e mitigar desastres. Essa análise retroativa destaca a importância de integrar essas metodologias no planejamento e licenciamento, antes de um possível desastre.

2.8.1 Índice de vulnerabilidade social (SoVI_{Dam})

Paiva (2024) apresenta um modelo inovador para a análise da vulnerabilidade social de comunidades localizadas a jusante de barragens, denominado Índice de Vulnerabilidade Social a Desastres com Barragens (SoVI_{Dam}). Esse índice integra a ferramenta SafeCom, desenvolvida para apoiar a tomada de decisões na avaliação de riscos e na gestão da segurança dessas comunidades.

A construção do SoVI_{Dam} envolveu a seleção criteriosa de variáveis socioeconômicas e demográficas capazes de representar a suscetibilidade da população aos impactos de desastres. De acordo com Paiva (2024), a definição dessas variáveis foi guiada por dois princípios centrais: i) fundamentação em evidências científicas consolidadas na literatura nacional e internacional sobre vulnerabilidade a desastres hidrológicos e tecnológicos;

ii) capacidade dos indicadores de refletir, de forma objetiva e espacialmente representativa, as condições que influenciam a exposição, a suscetibilidade e a resiliência das comunidades situadas a jusante de barragens.

No caso do SoVI_{Dam}, os parâmetros selecionados incorporam dimensões sociodemográficas, econômicas e de acesso a serviços básicos, reconhecidamente associadas à maior dificuldade de resposta e recuperação diante de eventos catastróficos. Esses indicadores buscam traduzir desigualdades estruturais que potencializam os danos humanos e sociais, considerando grupos particularmente vulneráveis, como idosos, crianças, pessoas com deficiência, mulheres, populações rurais e indígenas. A justificativa para a escolha de cada parâmetro está apresentada no Quadro 2.

Para atribuição de pesos a esses indicadores, foi adotada a metodologia do Processo Hierárquico Analítico (AHP), amplamente utilizada em análises de decisão multicritério (Paiva, 2024). O método possibilita a ponderação adequada dos fatores, combinando julgamentos qualitativos e quantitativos. Os pesos atribuídos refletem a importância relativa de cada critério na determinação da vulnerabilidade social e foram definidos por meio de comparações pareadas, assegurando coerência interna no processo.

O procedimento metodológico para atribuição dos pesos seguiu as diretrizes do AHP, proposto por Saaty (1987), contemplando etapas sequenciais de comparação, verificação de consistência e consolidação dos resultados, conforme descrito a seguir.

1. **Seleção dos Indicadores:** Com base na revisão da literatura sobre vulnerabilidade social e desastres ambientais, foram priorizadas variáveis associadas à exposição e à capacidade de resposta das comunidades.
2. **Construção da Matriz de Julgamento:** Realizou-se a comparação entre os indicadores utilizando a escala de Saaty (1987) para atribuição de pesos relativos.
3. **Cálculo dos Pesos Normalizados:** Os valores derivados das comparações foram normalizados para garantir que a soma totalizasse 1.
4. **Verificação da Consistência:** A Razão de Consistência (RC) foi avaliada para garantir que os julgamentos subjetivos mantivessem coerência lógica.

Os resultados foram processados por meio de uma calculadora automatizada de AHP, o que garantiu a padronização e replicabilidade dos pesos atribuídos. A Tabela 2 apresenta a distribuição dos pesos atribuídos aos indicadores de vulnerabilidade social.

Quadro 2 – Parâmetros sociais que compõem o índice de vulnerabilidade social

Indicador	Simbologia	Descrição	Justificativa	Referência
Densidade demográfica	Dd	Densidade demográfica (habitantes/km ²)	Essa variável representa a quantidade de pessoas expostas, ou seja, quanto maior a densidade, maior deve ser a infraestrutura e trato dos órgãos gestores de emergência para treinar e preparar a população. Além disso, áreas com altas densidade populacionais (áreas urbanas) fazem com que a evacuação em caso de emergência seja mais complicada. Em eventual ruptura o pós-desastre, áreas com maiores densidades populacionais demandam maior infraestrutura para recuperação. Cutter <i>et al.</i> (2003) e Roncancio & Nardocci (2016) destacam este parâmetro como preditor significativo da gravidade dos impactos em desastres hidrológicos e tecnológicos.	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich (2016); Roncancio; Nardocci (2016)
Estrutura familiar	Mr	Número médio de pessoas por residência	Famílias com muitos dependentes tendem a ser mais susceptíveis a um desastre de barragens, podem ter dificuldades operacionais durante a evacuação, aumentando o poder de letalidade de algum ente da família. No contexto de barragens, uma ruptura noturna, teria um poder de letalidade maior em famílias com muitos moradores. Essa configuração aumenta a necessidade de apoio externo e reduz a agilidade de resposta, especialmente quando há restrições de transporte ou deslocamento. Estudos de Hummel <i>et al.</i> (2016) reforçam que domicílios com alta densidade de moradores estão mais vulneráveis tanto no momento do evento quanto na fase de recuperação.	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich (2016); Roncancio; Nardocci (2016)
População com necessidades especiais	Pe	Porcentagem da população com idade superior a 65 anos (idosos)/Porcentagem com idade inferior a 5 anos (Crianças)	Faixas etárias extremas tendem a apresentar problemas de locomoção durante a evacuação. Crianças e idosos podem depender de terceiros durante e posterior ao desastre. Além disso, observa-se que pessoas mais idosas tendem a apresentar maior resistência a aceitação, educação e preparação ao risco, devido a questões culturais e de forma de vida. São também um grupo de pessoas que apresentam baixa resiliência e maior dificuldade de recuperação pós-desastre.	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich (2016); Roncancio; Nardocci (2016)

Indicador	Simbologia	Descrição	Justificativa	Referência
Gênero	Pm	Porcentagem de mulheres	A vulnerabilidade de gênero em desastres decorre de fatores sociais, culturais e econômicos. Mulheres podem ter menor mobilidade em virtude de responsabilidades familiares e de cuidado, bem como sofrer maior exposição a riscos de violência e discriminação durante a fase de deslocamento e abrigo. Cutter et al. (2003) demonstram que, em sociedades com desigualdade de gênero acentuada, este fator é determinante para a intensificação dos impactos sociais.	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich (2016); Roncancio; Nardocci (2016)
População rural	Pr	Porcentagem população rural	Comunidades rurais tendem a estar mais afastadas de centros de atendimento emergencial, possuindo menor acesso a sistemas de alerta e infraestrutura viária precária, o que dificulta a evacuação. Em casos de rompimento de barragem, a dependência direta dos recursos naturais para subsistência amplifica as consequências econômicas e sociais do deslocamento.	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich (2016); Roncancio; Nardocci (2016)
Raça e etnia	Id	Porcentagem da população indígena	Povos indígenas são particularmente vulneráveis devido à dependência cultural e econômica do território, que concentra sua moradia, alimentação e identidade sociocultural. A perda do território não representa apenas um deslocamento físico, mas uma ruptura profunda nos modos de vida, na coesão social e na preservação de práticas culturais, como discutem Hofflinger et al. (2019).	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich (2016); Roncancio; Nardocci (2016)
Educação	Ed	Porcentagem de pessoas não alfabetizadas com idade igual ou superior a 15 anos	Povos indígenas são particularmente vulneráveis devido à dependência cultural e econômica do território, que concentra sua moradia, alimentação e identidade sociocultural. A perda do território não representa apenas um deslocamento físico, mas uma ruptura profunda nos modos de vida, na coesão social e na preservação de práticas culturais, como discutem Hofflinger et al. (2019).	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich (2016); Roncancio; Nardocci (2016)
Status socioeconômico	Pb	Porcentagem população de extrema pobreza/População pobre	A limitação de recursos financeiros compromete a capacidade de preparação e recuperação. Populações com baixa renda tendem a viver em habitações mais frágeis e em áreas de maior risco, e têm menor acesso a seguros ou reservas econômicas que facilitem a reconstrução. Cutter et al. (2003) apontam que a	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich

Indicador	Simbologia	Descrição	Justificativa	Referência
			pobreza atua de forma sinérgica com outros fatores de vulnerabilidade, agravando desproporcionalmente os impactos.	(2016); Roncancio; Nardocci (2016)
Qualidade do meio ambiente construído	Ri	Porcentagem da população residente em moradias inadequadas	Esse indicador representa pessoas que são vulneráveis devido as condições precárias de moradia e infraestrutura urbana. São normalmente área que não são o foco do poder público, podendo ser deixadas de lado no pós-desastres. Além disso esse indicador está associado com status socioeconômico e educação, influenciando, mesmo que indiretamente, na percepção e compreensão do risco.	Cutter; Buruff; Shirley (2003); Hummel; Cutter; Emrich (2016); Roncancio; Nardocci (2016)

Fonte: Adaptado Paiva (202

Tabela 2: Pesos dos indicadores de vulnerabilidade social

Indicador	Simbologia	Peso
Densidade demográfica	Dd	0,250
Média de pessoas por residência	Mr	0,244
População com necessidades especiais	Pe	0,135
População de mulheres	Pm	0,138
População rural	Pr	0,088
Indígenas	Id	0,058
Educação	Ed	0,033
Pobreza	Pb	0,032
Residências inadequadas	Ri	0,021
Razão de consistência (RC)		0,07

Fonte: Adaptado Paiva (2024)

Após o cálculo dos pesos, Paiva (2024) aplicou a modelagem matemática do $SoVI_{Dam}$, expressa pela seguinte equação:

$$SoVIDam = 0,250 * Dd + 0,244 * Mr + 0,135 * Pe + 0,138 * Pm + 0,088 * Pr + 0,058 * Id + 0,033 * Ed + 0,032 * Pb + 0,021 * Ri$$

Equação 1

A modelagem matemática proposta por Paiva (2024) permite calcular o índice de vulnerabilidade social para qualquer local a ser avaliado. Além disso, a abordagem garante que cada indicador seja ponderado de acordo com sua influência na vulnerabilidade social, possibilitando uma análise comparativa precisa entre diferentes comunidades e cenários de risco.

2.8.2 Índice de vulnerabilidade física (PhyVIDam)

Paiva (2024) apresenta um modelo detalhado para a avaliação da vulnerabilidade física de comunidades localizadas a jusante de barragens, denominado Índice de Vulnerabilidade Física a Desastres com Barragens (PhyVI_{Dam}). Esse índice compõe a ferramenta SafeCom, desenvolvida para apoiar a gestão de segurança e subsidiar a tomada de decisões com base em evidências científicas, possibilitando análises quantitativas e especializadas sobre os impactos potenciais decorrentes de rompimentos de barragens.

O desenvolvimento do $\text{PhyVI}_{\text{Dam}}$ seguiu uma metodologia estruturada, fundamentada na definição de indicadores físicos diretamente associados à severidade dos danos em casos de ruptura. Esses indicadores foram selecionados a partir de análises hidrodinâmicas e geográficas, assegurando que o índice representasse de forma precisa as condições do terreno, a intensidade da onda de inundação e as características de uso e ocupação do solo (Paiva, 2024).

Conforme apresentado no Quadro 3, a seleção priorizou variáveis geoespaciais e ambientais capazes de influenciar a magnitude e a distribuição espacial dos impactos físicos decorrentes da propagação da onda. Entre os parâmetros considerados destacam-se: declividade, uso e ocupação do solo, distância vertical em relação ao curso d'água e graus de impacto longitudinal e transversal, todos com relação direta à energia, velocidade e alcance da onda, como demonstrado em estudos de modelagem hidrodinâmica e gestão de risco de desastres.

A atribuição de pesos aos indicadores também foi realizada por meio do Processo Hierárquico Analítico (AHP), amplamente utilizado em modelagem multicritério. Esse método permitiu ponderar a influência relativa de cada fator, garantindo proporcionalidade e consistência na hierarquização dos critérios. O cálculo seguiu as mesmas etapas do SoVI_{Dam} .

Os resultados foram processados por meio de uma calculadora automatizada de AHP, o que assegurou a replicabilidade e padronização dos pesos atribuídos. O A Tabela 3 apresenta a distribuição dos pesos atribuídos aos indicadores de vulnerabilidade física.

Quadro 3 – Parâmetros físicos que compõe o índice de vulnerabilidade social

Indicador	Simbologia	Descrição	Justificativa	Referência
Grau de impacto longitudinal	Gil	Distância da barragem	Refere-se à proporção do trecho longitudinal da mancha de inundação que mantém contato direto com áreas habitadas. Esse indicador é importante porque determina a quantidade de comunidades impactadas ao longo do percurso da onda de inundação e influencia o tempo disponível para alertas e evacuação progressiva.	Ghahramani <i>et al.</i> (2020); Li <i>et al.</i> (2019) Rana <i>et al.</i> , (2021).
Distância vertical a drenagem mais próxima	HAND	HAND	Obtida a partir do modelo HAND, essa variável indica a elevação relativa ao curso d'água mais próximo. Regiões com menor altura relativa apresentam maior suscetibilidade à inundação, mesmo em eventos de menor magnitude, sendo priorizadas em estratégias de evacuação e proteção física.	Balica <i>et al.</i> (2009); Rana <i>et al.</i> , (2021).
Grau de impacto transversal	Git	Grau de entalhamento dos vales	Indicador desenvolvido nessa pesquisa. Permite aferir o grau de espalhamento lateral da onda de cheia devido a uma ruptura e dessa forma identificar o impacto transversal às pessoas.	Balica <i>et al.</i> (2009)
Declividade	Slp	Declividade em porcentagem	A inclinação do terreno influencia a velocidade de propagação da onda de inundação e a energia de impacto sobre as estruturas. Terrenos íngremes aceleram o fluxo, aumentando o potencial destrutivo, enquanto áreas planas tendem a manter a lâmina de água por mais tempo, prolongando os danos.	Ghahramani <i>et al.</i> (2020); Li <i>et al.</i> (2019) Rana <i>et al.</i> , (2021).
Volume de projeto licenciado	Vol	Volume total do reservatório/Não se aplica	Permite estimar a magnitude do impacto da onda de cheia devido a uma ruptura, e conseqüentemente, o dano esperado. Quanto maior o volume, maior tende a ser o espalhamento do rejeito e as conseqüências.	Ghahramani <i>et al.</i> (2020); Rana <i>et al.</i> , (2021).
Uso e ocupação do solo	Uso	Área urbana/ Atividades agropastoris/ Mineração/ Florestas/ Corpos d'água/ Outros/ Situação do setor censitário	Áreas urbanizadas, com alta impermeabilização, intensificam a profundidade e velocidade da inundação, além de elevarem o risco de destruição total das estruturas. Em contrapartida, áreas vegetadas podem oferecer resistência ao fluxo e reduzir parcialmente os impactos. Esse parâmetro é essencial para modelar a severidade física dos danos e subsidiar o planejamento do uso do solo em zonas de risco.	Balica <i>et al.</i> (2009); Behanzinet al.(2015)

Fonte: Adaptado Paiva (2024)

Tabela 3- Pesos dos indicadores de vulnerabilidade físicos

Indicador	Simbologia	Peso
Grau de Impacto Longitudinal	Gil	0,442
Height Above the Nearest Drainage	HAND	0,218
Grau de Impacto Transversal	Git	0,141
Declividade	Slp	0,104
Volume	Vol	0,06
Uso e Ocupação do Solo	Uso	0,035
Razão de Consistência (RC)		0,049

Fonte: Adaptado Paiva (2024)

Após o cálculo dos pesos, Paiva (2024) aplicou a modelagem matemática do $PhyVI_{Dam}$, expressa pela Equação 2:

$$PhyVI_{DAM} = 0,442 * Gil + 0,218 * HAND + 0,141 * Git + 0,104 * Slp + 0,06 * Vol + 0,035 * Uso$$

Equação 2

A aplicação do $PhyVI_{Dam}$ possibilita classificar as áreas analisadas em diferentes níveis de vulnerabilidade, permitindo comparações entre cenários e localidades distintas. A validação do índice foi realizada com base nos impactos físicos observados no rompimento da Barragem de rejeito de Fundão, evidenciando que os valores modelados pelo $PhyVI_{Dam}$ refletiram com precisão as áreas mais afetadas.

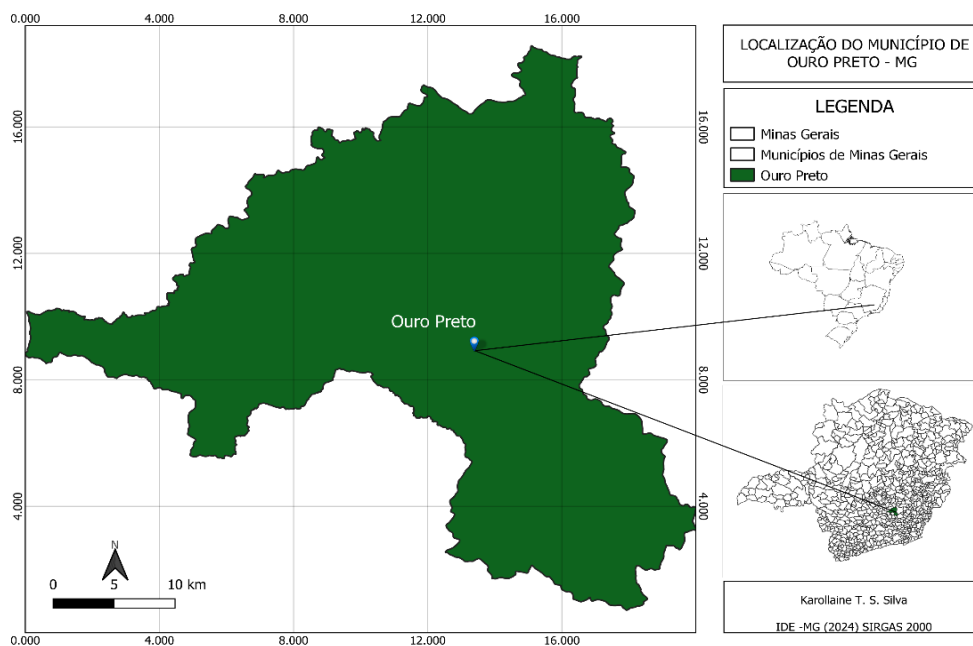
3 METODOLOGIA

O presente estudo adota uma abordagem metodológica estruturada em etapas sequenciais, voltadas à avaliação integrada da vulnerabilidade física e social associada a um cenário hipotético de rompimento da Barragem de rejeito do Marzagão, localizada em Ouro Preto (MG). A metodologia foi concebida para articular a caracterização físico-territorial e socioeconômica da área de influência direta, a aplicação de indicadores específicos, $SoVI_{Dam}$ e $PhyVI_{Dam}$, conforme propostos por Paiva (2024), e a análise espacial. Essa abordagem permite não apenas identificar e mapear áreas mais suscetíveis, mas também subsidiar a formulação de estratégias de mitigação, prevenção e resposta, contribuindo para a integração da gestão de riscos ao planejamento urbano

3.1 Caracterização da área de estudo

O município de Ouro Preto está situado no estado de Minas Gerais, na região Sudeste do Brasil, conforme ilustrado na Figura 5. De acordo com os dados mais recentes de 2022 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município possui uma área aproximada de 1.245 km² e uma população de 74.821 habitantes. Ouro Preto é composta por 13 distritos e 40 bairros catalogados, além de sua sede (IBGE, 2022).

Figura 5: Localização do município de Ouro Preto – Minas Gerais

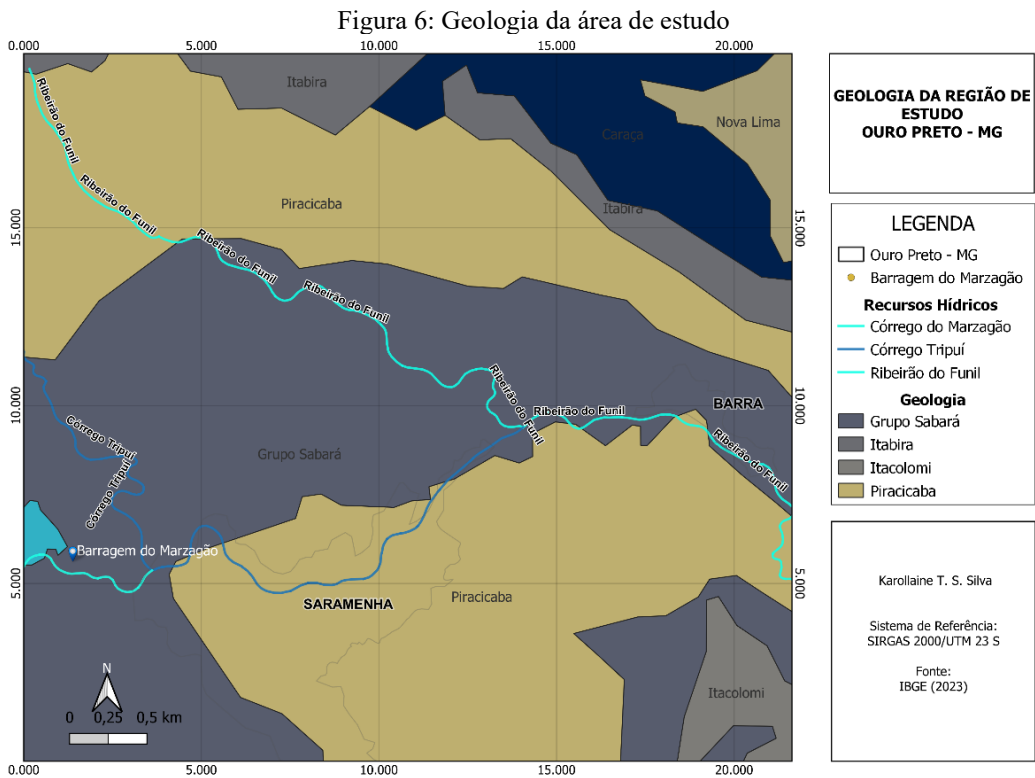


Fonte: Autoral (2025)

Fundado em 1711, Ouro Preto se desenvolveu ao longo do século XVIII, durante o período colonial, com a remoção de ouro na região, e sua história está intimamente ligada à exploração desse metal precioso (Onias, 2023). Além da mineração, a cidade atualmente se destaca também pela metalurgia, sendo estas atividades algumas das principais fontes de renda da região.

A região geológica de Ouro Preto faz parte do Supergrupo Rio Das Velhas (SGRV), uma série de cinturões de rochas metavulcânicas e metassedimentares, como komatiitos, basaltos, piroclásticos, além de formações ferríferas e carbonáticas (Machado *et al.*, 1992, citado em Alkmim, 2004). A geologia da área de estudo, ilustrada na Figura 6, é diversificada, com destaque para o grupo Sabará e o grupo Piracicaba. Estes grupos possuem grande relevância econômica devido à presença de minerais valiosos, especialmente no contexto da mineração no Quadrilátero Ferrífero (Rosière *et al.*, 2000).

Ademais, a região onde se encontra a Barragem de rejeito do Marzagão foi formada por uma falha geológica, que possibilitou a construção da infraestrutura da barragem de rejeito, em um processo de alteamento a jusante, na década de 1970.



Fonte: Autoral (2024)

Além disso, o município de Ouro Preto está estrategicamente localizado nas bacias de dois rios de grande importância nacional: o Rio São Francisco e o Rio Doce. Esses extensos sistemas de drenagem desempenham um papel crucial na preservação ambiental e no abastecimento de água para uma grande parte do Brasil.

A principal bacia hidrográfica que banha Ouro Preto é a do Rio das Velhas, uma das mais importantes de Minas Gerais (Mello, 2013). O Rio das Velhas tem uma contribuição fundamental para o complexo sistema hidrológico da região (Freitas, 2010), sendo essencial para o abastecimento de água tanto da cidade quanto de áreas circundantes. Além dessa bacia, Ouro Preto é afetada por diversas sub-bacias que alimentam os afluentes do Rio das Velhas, como o Córrego Tripuí, Lavras, Bação e Cachoeira, entre outros. Esses cursos d'água são relevantes para a complexidade e a diversidade do sistema hidrográfico local, oferecendo uma variedade de cenários e ecossistemas na região.

Para esta pesquisa, a área de estudo selecionada engloba o curso do Ribeirão do Funil, Figura 7, que atravessa os bairros de Saramenha, Bauxita e Barra, seguindo em direção ao município de Mariana, Minas Gerais. O trecho do rio escolhido destaca-se, com base na mancha de inundação da barragem do Marzagão, Figura 9, por ser a maior extensão da área exposta a riscos relacionados a um possível desastre urbano envolvendo as infraestruturas de barragens da cidade. Adicionalmente, essa região é caracterizada pela significativa presença de equipamentos urbanos, como comércios, praças, pontos de ônibus, espaços para eventos e residências, estando situada na região central do município, especificamente no bairro da Barra.

Figura 7: Percurso das principais drenagens

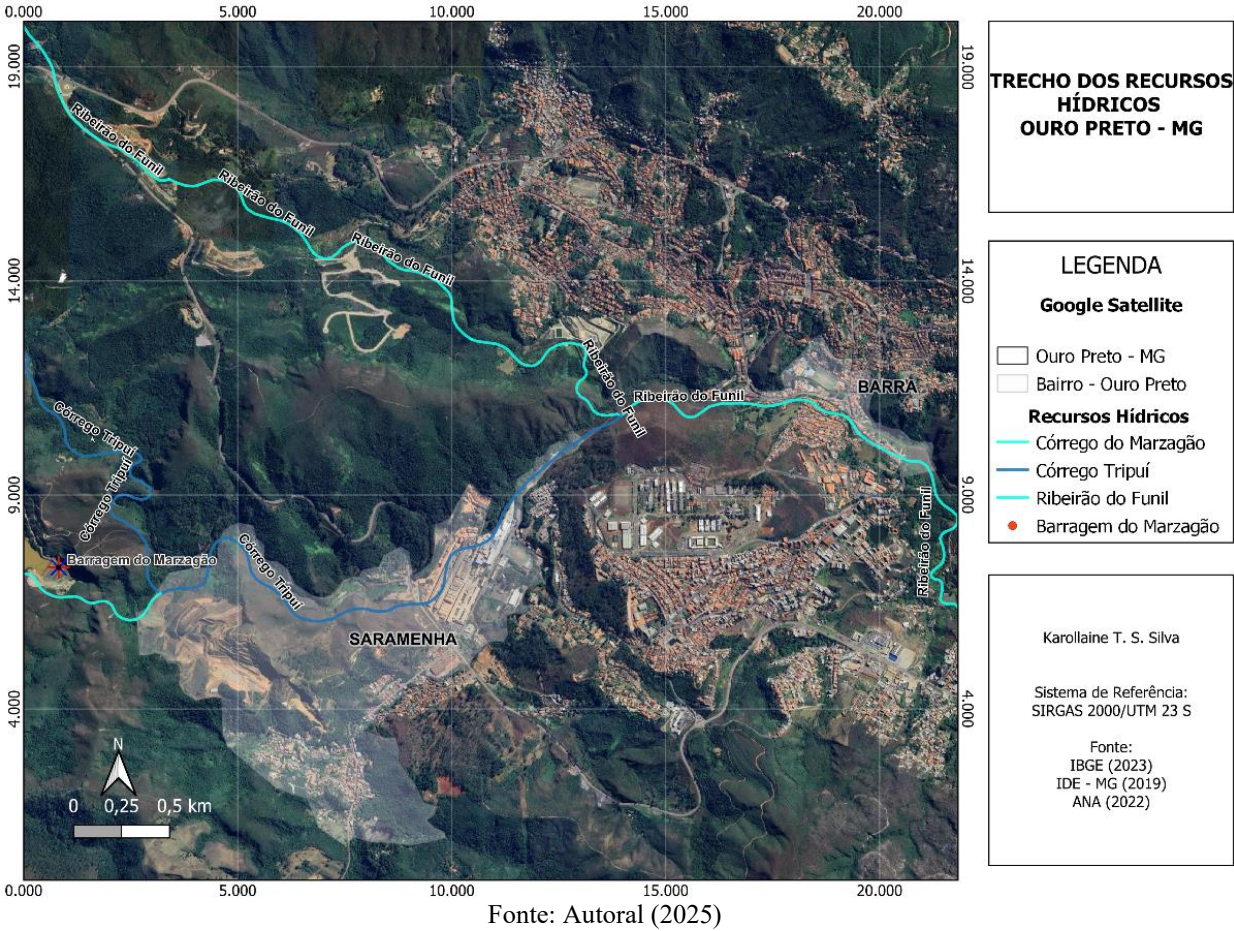
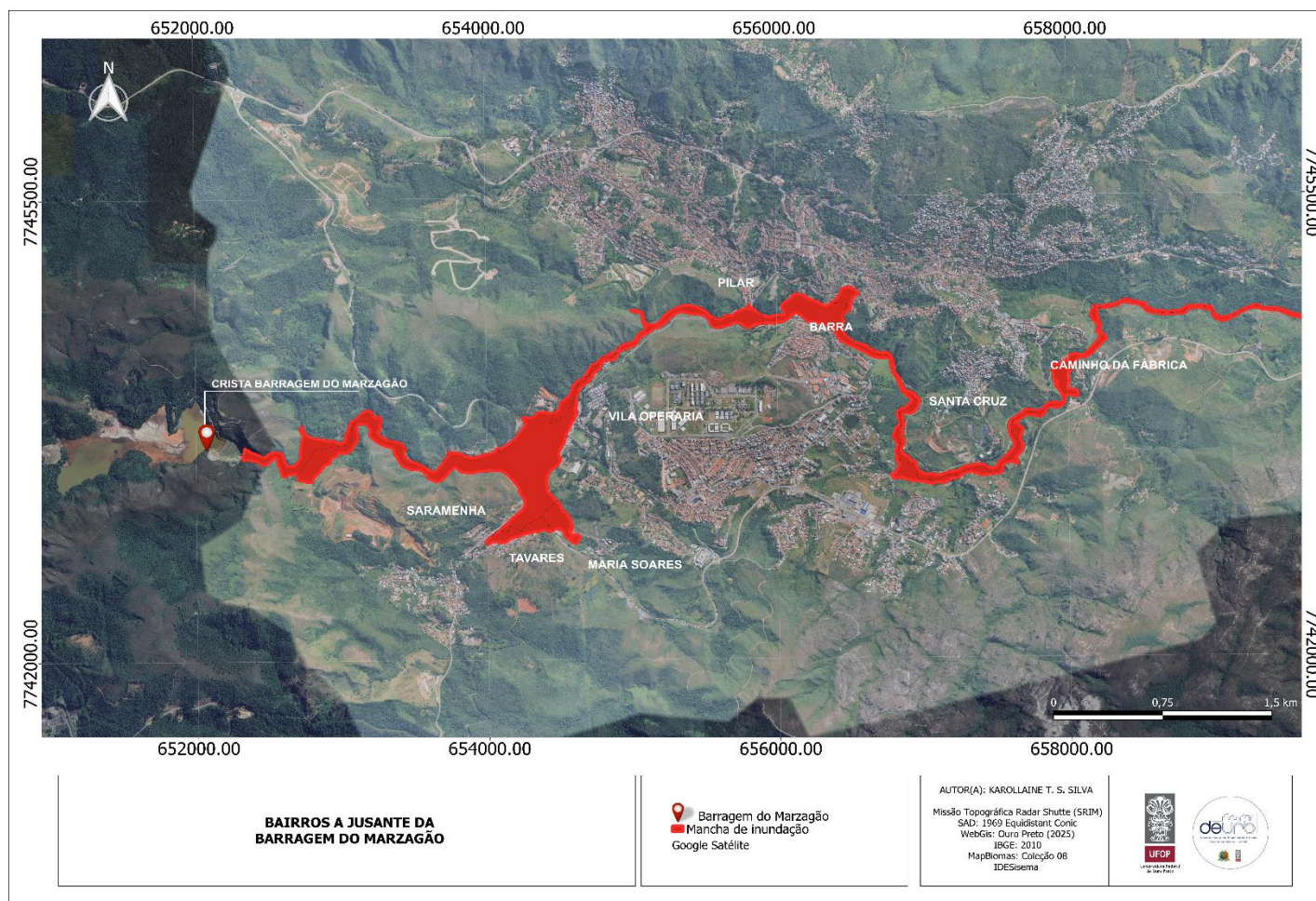


Figura 8: Mancha de inundação, com destaque à localização dos bairros do município



Fonte: Autoral (2025)

3.1.1 Barragem do Marzagão

A barragem de rejeito do Marzagão, conforme ilustrado na Figura 9, é atualmente propriedade da empresa ACTECH e está localizada no município de Ouro Preto, em Minas Gerais, a aproximadamente 85 km da capital do estado. A construção da infraestrutura da barragem de rejeito teve início em 1974, com o objetivo de receber os rejeitos gerados pelo processo Bayer, utilizado na produção de alumina, componente utilizado hoje em dia principalmente na montagem de celulares, notebook, peças automotivas, refratários, dentre outros materiais.

Figura 9: Barragem do Marzagão



Fonte: Jornal Voz Ativa (2019)

Essa barragem de rejeito foi implantada na interseção do Quadrilátero Ferrífero e do Grupo Sabará, regiões conhecidas por sua rica mineralogia e exploração mineral. A construção da barragem de rejeito foi realizada em cinco alteamentos (ACTECH, 2024).

- 1.983 alteado até a cota 1.182;
- 1.992 alteado até a cota 1.184;

- 1.994 alteado até a cota 1.186;
- 2.000 alteado até a cota 1.189;
- 2.007 alteado até a cota 1.191.

Atualmente, a crista da barragem de rejeito do Marzagão está situada na cota de 1.191 m, apresentando uma largura de 5 metros e um comprimento de 145 metros (ACTECH, 2024). É importante destacar que a barragem de rejeito parou de receber rejeitos em 2018 e, desde então, iniciou um processo de descaracterização, com a previsão de conclusão desse procedimento para o ano de 2025. A descaracterização é uma etapa crucial para garantir a segurança ambiental e a integridade das estruturas e maior segurança para a população do município.

A bauxita, um mineral de grande importância econômica, foi identificada em 1821 pelo geólogo francês Pierre Berthier. Composta principalmente por óxido de alumínio hidratado, a bauxita apresenta diversas composições, que variam de acordo com sua origem geológica e o ambiente em que se formou. Sua gênese geralmente está associada à formação de depósitos de rocha que contêm um ou hidróxidos de alumínio. Além disso, a bauxita pode incluir impurezas, como óxidos de ferro, sílica e titânio, que podem afetar suas propriedades e sua utilização industrial. A composição e a formação da bauxita são fundamentais para a indústria de alumínio, uma vez que este mineral é a principal fonte de remoção do metal (Almeida, 2017).

A exploração da bauxita normalmente ocorre a céu aberto, com camadas entre 4 e 6 metros de espessura (Röhrlich *et al.*, 2001). Atualmente o Brasil ocupa o 3º lugar de exploração desse material, ficando atrás somente da Hungria e o Sul da Europa. No ano de 1950 a Aluminium Limited do Canadá (ALCAN), atualmente ACTECH, tornou-se a primeira empresa multinacional do mercado brasileiro, com a produção de alumínio primário (Operário Verde, 2012).

O rejeito da Barragem do Marzagão é um subproduto do processo Bayer, a solubilização do hidróxido de alumínio, que consiste em dissolvê-lo em soda cáustica, separando-o dos outros sólidos presentes na bauxita, que ocorre dentro das instalações da própria empresa. Até o ano de 2018, o rejeito gerado era transportado por meio de canalizações com mais de 5 km de extensão até a barragem, onde era depositado para disposição final. Para a caracterização do material, foi utilizado o laboratório de Construção Civil da Universidade Federal de Ouro Preto.

Com base nos dados disponibilizados por Barros (2017) o material, tabela 3 encontrado na lama vermelha foi:

Tabela 4 - Componentes encontrados na lama vermelha

Nome científico	Fórmula	Porcentagem (%)
Hidróxido de sódio	Na ₂ O	5.02
óxido de alumínio	Al ₂ O ₃	31.25
Óxido de silício	SiO ₂	7.46
Óxido de ferro	Fe ₂ O ₃	48.18
Dióxido de titânio	TiO ₂	3.86
Óxido de cálcio	CaO	2.27
Trióxido de enxofre	SO ₃	0.42
Fosfato	P ₂ O ₅	0.81
Outros		0.7

Fonte: Adaptado Barros (2017)

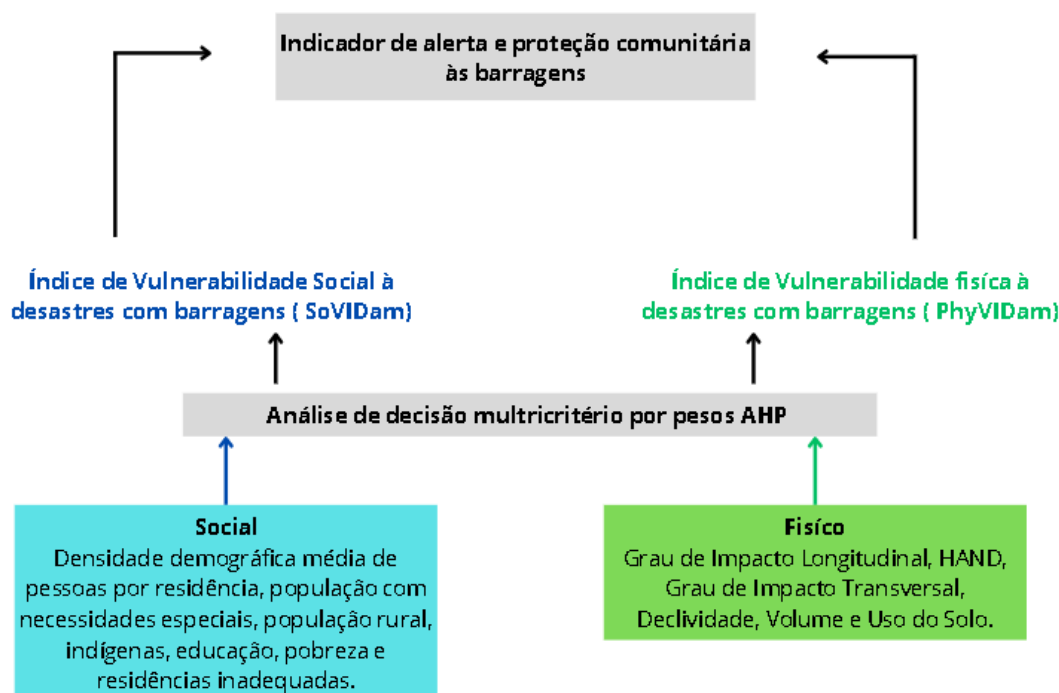
Observa-se que os principais componentes presentes no rejeito, de acordo com Barros (2017) são o óxido de ferro (Fe₂O₃) e o óxido de alumínio (Al₂O₃). Além disso, há uma significativa concentração de óxido de silício (SiO₂) e hidróxido de sódio (NaOH). Esses compostos, provenientes do processo Bayer, são típicos do resíduo gerado na produção de alumina a partir da bauxita. O óxido de ferro, em particular, é responsável pela coloração avermelhada característica do rejeito, enquanto o óxido de alumínio e o silício desempenham um papel importante na formação da lama. A presença de hidróxido de sódio, utilizado no processo de extração, contribui para a alcalinidade do material (Santos, 2020).

A composição química dos rejeitos da Barragem de Marzagão revela a presença de substâncias que podem representar riscos ambientais significativos, especialmente devido à alcalinidade elevada e à concentração de metais.

3.2 Análise da vulnerabilidade social e física na região a jusante da barragem do Marzagão

Considerando o objetivo deste estudo em realizar uma análise espacial da vulnerabilidade social e física associada ao rompimento hipotético da Barragem de Marzagão, localizada no município de Ouro Preto - MG, foi utilizada a metodologia desenvolvida por Paiva (2024). O fluxograma correspondente às etapas metodológicas que foram utilizadas é apresentado na Figura 10.

Figura 10: Indicadores utilizados SoVIDam e PhyVIDam



Fonte: Adaptado Paiva (2024)

3.2.1 Obtenção dos dados físicos e sociais do município de Ouro Preto

A primeira etapa do estudo consistiu na aquisição e organização de um conjunto abrangente de dados físicos e sociais, que serviram como entrada para o modelo de análise de vulnerabilidade adaptado da metodologia proposta por Paiva (2024).

No que se refere aos dados físicos, o Modelo Digital de Elevação (MDE) foi obtido a partir da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM), com resolução espacial de 30 metros, garantindo acurácia suficiente para a representação topográfica do município. Adotou-se o sistema de referência SAD_1969_Equidistant_Conic, adequado para manter a consistência métrica necessária às simulações hidrológicas. Esses dados foram processados e tratados em ambiente SIG (ArcGIS e QGIS), possibilitando a geração de variáveis essenciais, como declividade do terreno e entalhamento de vales, elementos fundamentais para avaliar a dinâmica do

escoamento superficial e a propagação de rejeitos em cenários hipotéticos de rompimento de barragem.

Além da altimetria, foram incorporadas informações de uso e ocupação do solo provenientes do MapBiomas (Coleção 8), que permitiram caracterizar detalhadamente as áreas urbanas, agrícolas, florestais e de preservação ambiental. Dados de hidrografia e limites municipais foram obtidos junto à Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE Sisema), assegurando precisão na delimitação da bacia hidrográfica e na análise das interações entre elementos físicos e socioambientais. As coordenadas geográficas da Barragem de Marzagão (20°23'57.9"S; 43°32'29.23"O) foram registradas via Google Earth (2025), servindo como ponto de referência para modelagem e simulação espacial. Complementarmente, utilizou-se o WebGIS da Prefeitura Municipal de Ouro Preto para integrar dados da Bacia Ottocodificada do Rio Doce e de outros recursos hídricos relevantes.

No âmbito dos dados sociais, foram utilizadas informações do Censo Demográfico do IBGE (2010), contemplando população total, densidade demográfica, composição etária, número de moradores por domicílio, população com necessidades especiais, distribuição por gênero, raça e etnia, níveis de escolaridade, renda, pobreza e condições habitacionais. Conforme a metodologia de Paiva (2024), cada um desses parâmetros recebeu pesos específicos definidos por meio do Processo de Análise Hierárquica (AHP), com cálculo da razão de consistência para garantir coerência nas comparações entre critérios. Os valores foram normalizados em escala contínua de 0 a 1, assegurando compatibilidade com demais indicadores e permitindo sua integração ao modelo multicritério.

Ainda segundo Paiva (2024), foram incluídos parâmetros adicionais relacionados à dimensão física da vulnerabilidade territorial, como impacto longitudinal e transversal, HAND (Height Above Nearest Drainage), declividade, volume da barragem, uso e ocupação do solo e vulnerabilidade física. Para esses indicadores, o tratamento metodológico seguiu lógica semelhante, envolvendo atribuição de pesos no AHP, normalização e georreferenciamento, de forma a permitir análises integradas que relacionam a exposição da população aos elementos ambientais e estruturais do território.

A integração desses dados físicos e sociais possibilitou a construção de um diagnóstico espacialmente explícito da área de estudo, no qual foi possível correlacionar diferentes dimensões da vulnerabilidade com a dinâmica física do território. Essa abordagem permitiu, nas etapas posteriores, comparar padrões espaciais, hierarquizar setores mais suscetíveis e subsidiar estratégias de mitigação e planejamento territorial adaptadas à realidade local.

3.2.2 Aplicação dos indicadores SoVI_{Dam} e PhyVI_{Dam} no município de Ouro Preto

Considerando a mancha de inundação da Barragem de rejeito de Marzagão, disponibilizada no WebGIS do município de Ouro Preto/MG, foram aplicados os índices SoVI_{Dam} e PhyVI_{Dam}, desenvolvidos por Paiva (2024). A análise teve como área de referência a sede municipal, com foco na sub-bacia do Ribeirão do Carmo, principal curso d'água a jusante da barragem e potencialmente impactado em caso de ruptura. O uso desses índices possibilita uma avaliação mais detalhada dos impactos potenciais, contribuindo para o aprimoramento do planejamento de ações de mitigação de riscos e fornecendo subsídios para a formulação de estratégias de prevenção e resposta a emergências, de modo a fortalecer a segurança e a resiliência da comunidade local.

O índice SoVI_{Dam}, empregado na avaliação da vulnerabilidade social, foi obtido conforme a Equação 1, com resultados classificados em quatro faixas: muito alto ($> 0,286$), alto ($0,286-0,202$), moderado ($0,202-0,117$) e baixo ($< 0,117$). Essa classificação possibilitou identificar as populações mais expostas ao risco e com maior dificuldade de recuperação após eventos adversos, subsidiando a priorização de recursos e ações emergenciais.

De forma complementar, o índice PhyVI_{Dam}, voltado à mensuração da vulnerabilidade física, foi determinado conforme a Equação 2, com resultados distribuídos nas seguintes faixas: muito alto ($> 0,750$), alto ($0,525-0,750$), moderado ($0,475-0,525$) e baixo ($< 0,475$). A aplicação desse índice possibilitou estimar a severidade dos danos físicos e socioambientais em um cenário de rompimento da barragem de rejeito, fornecendo informações essenciais para a elaboração de estratégias de mitigação e de resposta a emergências.

A integração dos índices SoVI_{Dam} e PhyVI_{Dam} na análise permitiu mapear áreas de maior vulnerabilidade, abrangendo aspectos sociais, físicos e estruturais, e direcionar a definição de

medidas preventivas, como cadastro da população em risco, simulados de evacuação, sistemas de alerta precoce e ações de preservação do patrimônio cultural. Essa abordagem possibilitou também estimar a exposição e a severidade dos impactos em cenários simulados de ruptura, orientando a priorização de ações emergenciais e o planejamento de campanhas de conscientização e planos de evacuação, além de estruturar informações de forma a favorecer a comunicação interinstitucional e a coordenação das respostas.

3.3 Análise crítica e proposta de integração de gestão de riscos associados a barragens no Plano Diretor de Ouro Preto

Nesta etapa, foi realizada uma avaliação do Plano Diretor vigente do Município de Ouro Preto (Lei Complementar nº 29/2006) e da proposta de revisão em andamento, tomando como foco a gestão de riscos associados à Barragem de rejeito do Marzagão. A análise foi conduzida com base nos indicadores $SoVI_{Dam}$ e $PhyVI_{Dam}$ (Paiva, 2024), bem como nas diretrizes e instrumentos previstos na legislação municipal, estadual e federal sobre segurança de barragens.

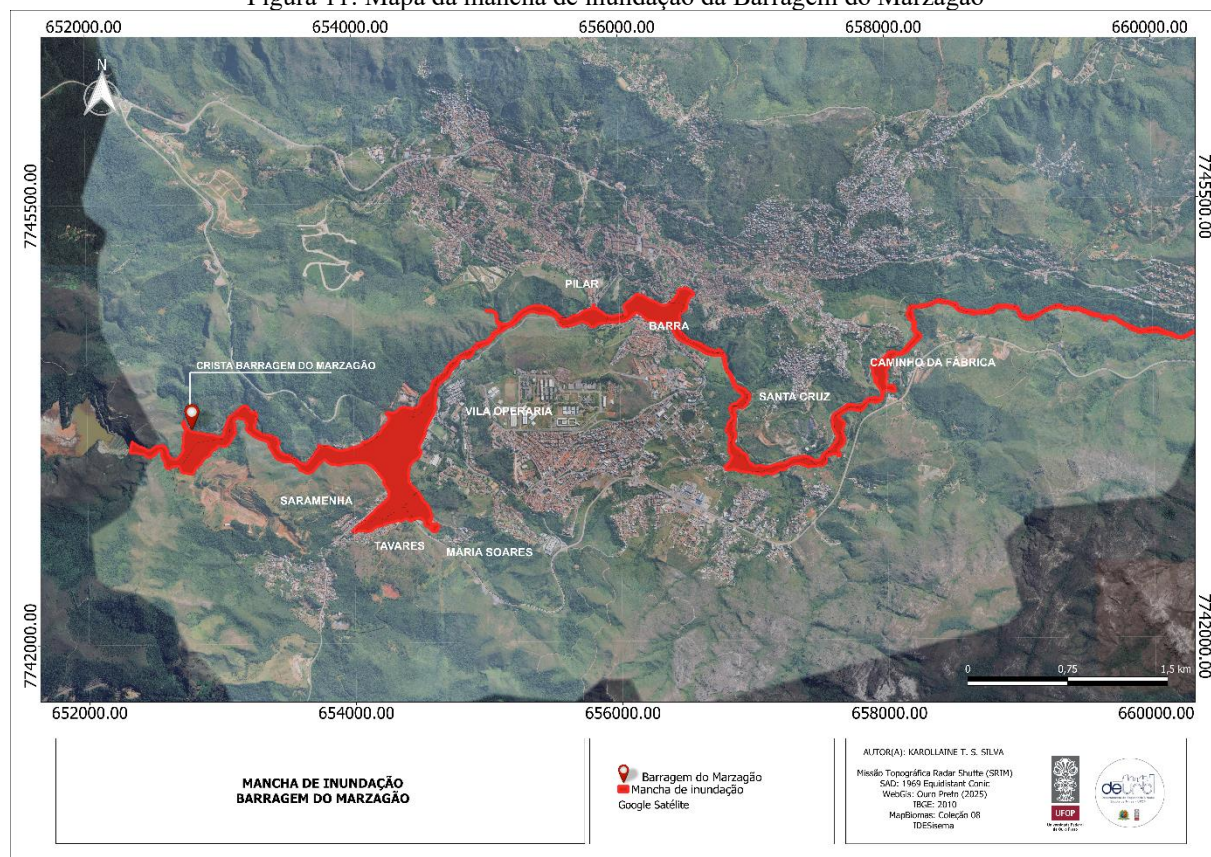
Para embasar a discussão, foram utilizados como referência os Planos Diretores de Mariana e Brumadinho, municípios que passaram por revisões significativas em seus instrumentos de planejamento após rompimentos de barragens. Essa comparação buscou identificar semelhanças, diferenças e lacunas na forma como cada município incorporou diretrizes de gestão de risco ao ordenamento territorial.

O objetivo desta análise é verificar o grau de integração entre o planejamento urbano e as estratégias de prevenção, mitigação e resposta a desastres tecnológicos, apontando diretrizes que possam ser incorporadas na revisão do Plano Diretor de Ouro Preto de forma a reduzir vulnerabilidades e aumentar a resiliência das comunidades potencialmente afetadas

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da aplicação dos índices de vulnerabilidade social ($SoVI_{Dam}$) e física ($PhyVI_{Dam}$) na área a jusante da Barragem de rejeito de Marzagão, localizada no município de Ouro Preto, MG, foram obtidos a partir da integração de dados socioeconômicos, geotécnicos e ambientais em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). A análise seguiu a metodologia adaptada de Paiva (2024), utilizando parâmetros previamente validados na literatura, e foi recortada com base na mancha de inundação apresentada na Figura 11, conforme disponibilizado no WebGis de Ouro Preto.

Figura 11: Mapa da mancha de inundação da Barragem do Marzagão



Fonte: Autoral (2025)

A apresentação dos resultados inicia-se pela distribuição espacial dos indicadores individuais que compõem cada índice, permitindo a compreensão do comportamento isolado das variáveis e de suas influências sobre a vulnerabilidade local. Em seguida, é feita a síntese dos índices compostos, evidenciando as áreas de maior suscetibilidade a impactos decorrentes de um eventual rompimento da barragem, sob as perspectivas física e social.

A discussão busca correlacionar as vulnerabilidades identificadas com as características territoriais e socioeconômicas da região, bem como confrontar os achados com as diretrizes do Plano Diretor de Ouro Preto. Assim, além de caracterizar as áreas mais críticas, pretende-se fornecer subsídios técnicos para ações preventivas e estratégias de mitigação voltadas à proteção das comunidades expostas.

4.1 SOVI_{Dam}

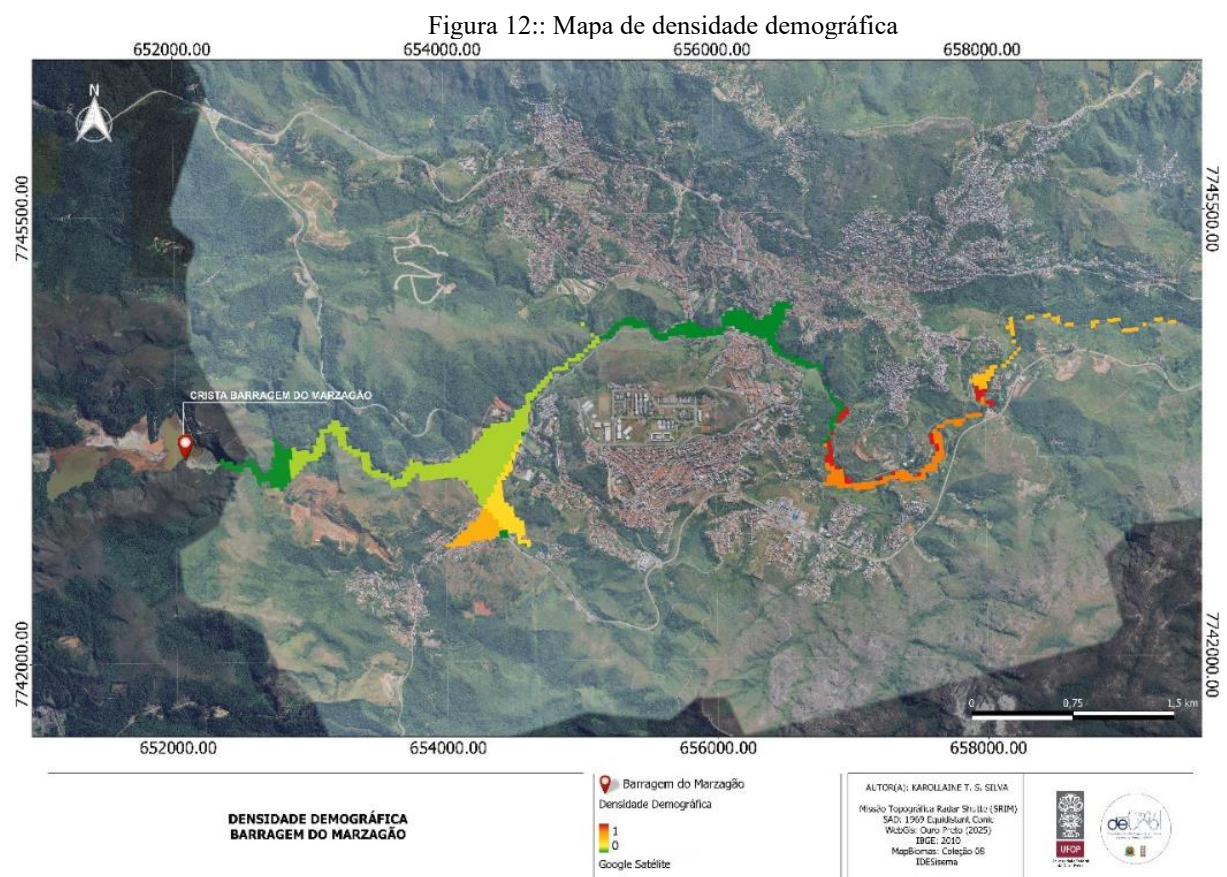
A avaliação do impacto das variáveis socioeconômicas e demográficas permitiu compreender como fatores como densidade populacional, condições habitacionais e características populacionais influenciam o desenvolvimento socioeconômico, a distribuição de recursos e a qualidade de vida, além de revelar desigualdades e padrões de crescimento. No contexto de um possível rompimento da Barragem de rejeito do Marzagão, esses indicadores mostraram-se fundamentais para identificar as áreas e populações mais vulneráveis, subsidiando o planejamento de ações de emergência e mitigação.

4.1.1 Densidade demográfica

A densidade demográfica é um dos fatores mais críticos em cenários de rompimento de barragem de rejeito. Regiões com alta densidade populacional próximas à barragem de rejeito são mais suscetíveis a consequências catastróficas, pois mais pessoas serão diretamente impactadas pelo fluxo dos rejeitos. Para o município de Ouro Preto a densidade demográfica encontra-se na Figura 12, na qual é apresentada a distribuição da população por unidade territorial, utilizando uma escala de cores para indicar a variação na concentração de habitantes. O indicador de densidade demográfica variou de 0 a 1, com média de 0,50 e desvio padrão de 0,456. As áreas representadas em verde correspondem às regiões de baixa densidade populacional, geralmente associadas a zonas rurais ou locais com limitações topográficas que dificultam a ocupação urbana. Essas áreas possuem menor adensamento habitacional, baixa oferta de serviços urbanos e infraestrutura limitada, refletindo um padrão disperso de ocupação do solo.

Ao analisar a Figura 12, observa-se claramente a distribuição de todas as classes de vulnerabilidade ao longo do curso hídrico a jusante da Barragem de rejeito do Marzagão. Nos

trechos iniciais, próximos à barragem de rejeito, predominam valores baixos de vulnerabilidade, representados por tonalidades mais suaves. Isso pode ser explicado pela característica rural da região, com uma baixa densidade populacional e poucas construções, o que reduz o risco imediato. À medida que o curso hídrico se aproxima das áreas mais urbanizadas, observa-se uma transição gradual para cores mais intensas, como o amarelo, laranja e o vermelho. Essas cores indicam níveis crescentes de vulnerabilidade, com maior concentração nas áreas centrais do município de Ouro Preto (MG).



Fonte: Autorial (2025)

Essa mudança nas cores ao longo do curso d'água reflete uma série de fatores importantes, como o aumento da densidade populacional, a maior concentração de infraestrutura urbana e a presença de atividades econômicas mais intensas nas áreas centrais. Nesses locais, além de uma população maior, existe uma variedade de estabelecimentos comerciais, serviços públicos e patrimônios culturais que também estariam expostos a eventuais desastres. A combinação

desses fatores torna as regiões centrais particularmente suscetíveis aos impactos de um possível rompimento da barragem.

Além disso, é importante destacar que essas áreas urbanas não apenas enfrentam um maior risco de exposição, mas também tendem a ter maior dificuldade na recuperação pós-desastre (Costa, 2024). Isso é especialmente crítico em comunidades com condições socioeconômicas mais frágeis, onde a infraestrutura pode ser insuficiente para suportar uma emergência de grande magnitude. Para Gabrielly (2017) o aumento da vulnerabilidade observado na figura sublinha a necessidade de atenção prioritária a essas regiões em termos de planejamento preventivo e estratégias de mitigação.

4.1.2 Média de moradores por residência

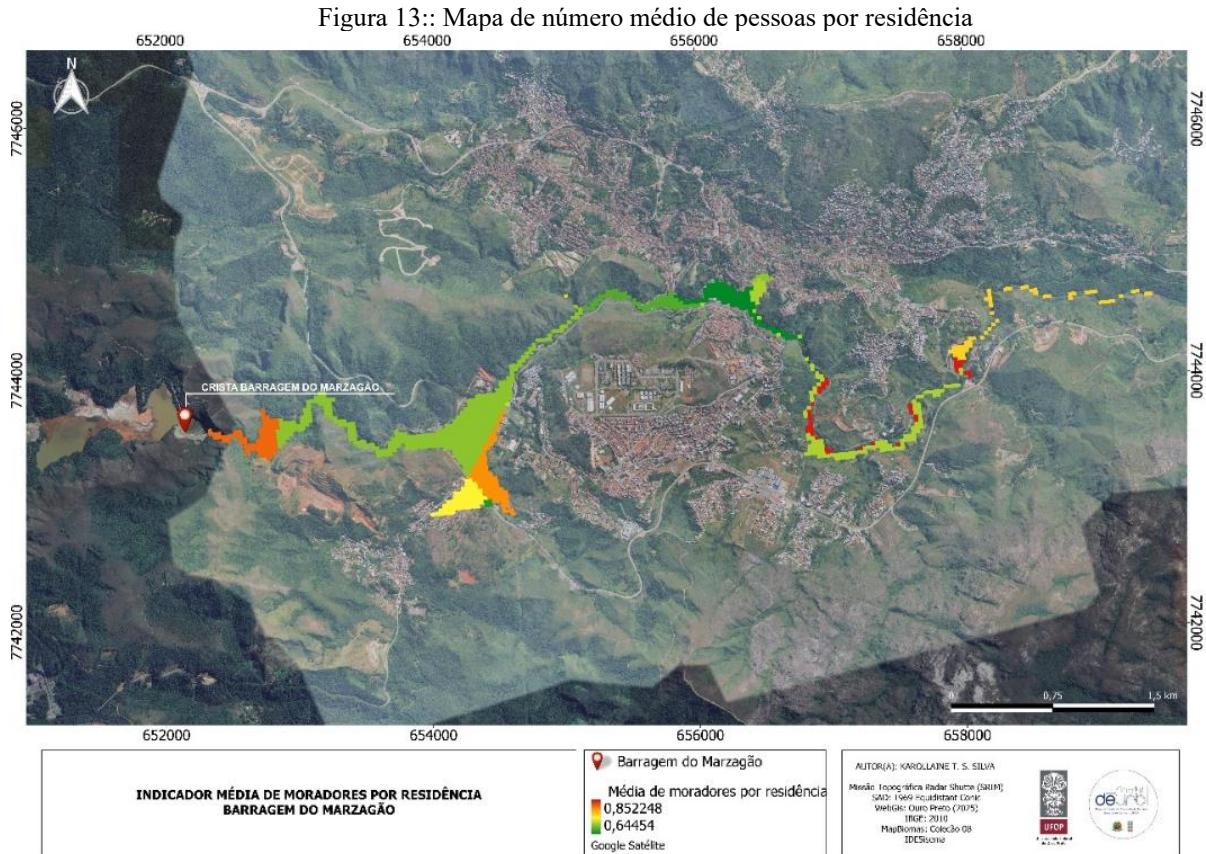
A média de moradores por residência é um indicador que reflete o número médio de pessoas por unidade domiciliar, estando diretamente relacionada à estrutura familiar, ao uso do espaço urbano e às condições habitacionais. O mapa apresentado na Figura 13, referente a Ouro Preto, ilustra a distribuição desse indicador e fornece uma visão detalhada sobre os padrões de ocupação domiciliar no município. Os valores variaram de 0,645 a 0,852, com média de 0,748 e desvio padrão de 0,089.

Embora o gradiente de cores do mapa utilize o verde para representar os menores valores da escala, é importante ressaltar que, no contexto analisado, mesmo essas faixas mais baixas correspondem a médias relativamente elevadas de ocupantes por residência. Isso se deve à localização dessas áreas em regiões próximas à mancha de inundação da Barragem do Marzagão, onde há alta densidade de moradias. Nessas zonas, observou-se uma concentração de valores entre 0,714 e 0,852, especialmente na região da Barra, caracterizada por um adensamento populacional significativo.

Segundo a classificação proposta por Paiva (2024), essa densidade elevada é particularmente preocupante em caso de rompimento da barragem, pois implica maior número de pessoas potencialmente expostas e maiores desafios logísticos para evacuação. Nessas áreas, o impacto sobre a população tende a ser mais severo, aumentando a probabilidade de perdas humanas, conforme apontado também por Brito (2021).

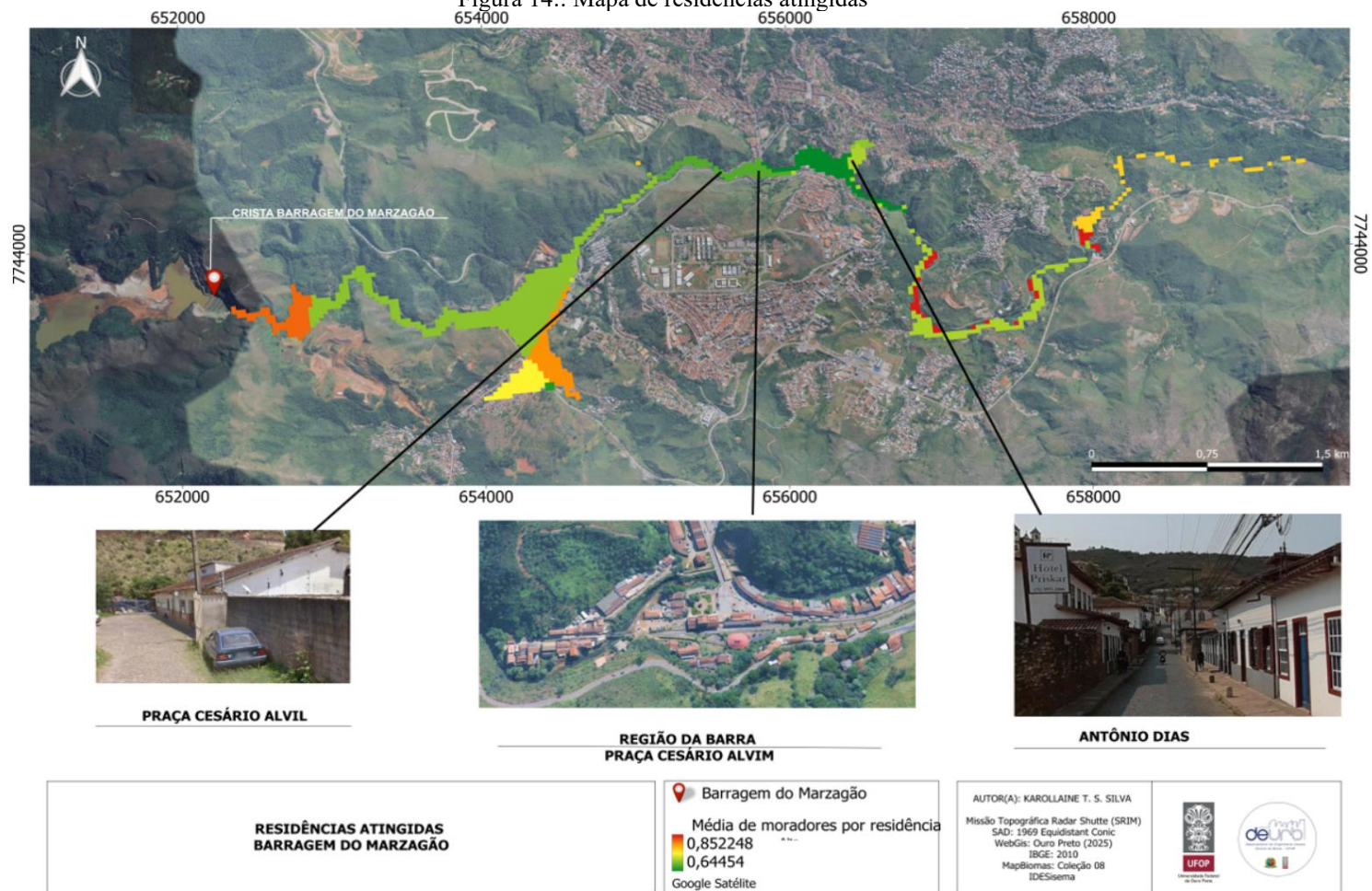
Em locais com alta média de pessoas por residência, cada unidade abriga um número maior de indivíduos, exigindo abrigos emergenciais dimensionados para famílias numerosas e estratégias específicas para deslocamento e realocação temporária (Souza, 2011). A Figura 14 evidencia que, mesmo nas áreas representadas por cores associadas a valores “menores”, a realidade observada demonstra adensamento habitacional expressivo. Isso reforça que a simbologia cartográfica não deve ser interpretada de forma isolada, sendo necessária a análise combinada com observações diretas e conhecimento do território.

A região em foco tem relevância estratégica por concentrar parte expressiva da mancha de impacto e estar posicionada diretamente no trajeto do rejeito proveniente do entalhamento, o que intensifica os riscos e a magnitude dos impactos em um eventual rompimento da Barragem do Marzagão.



Fonte: Autoral (2025)

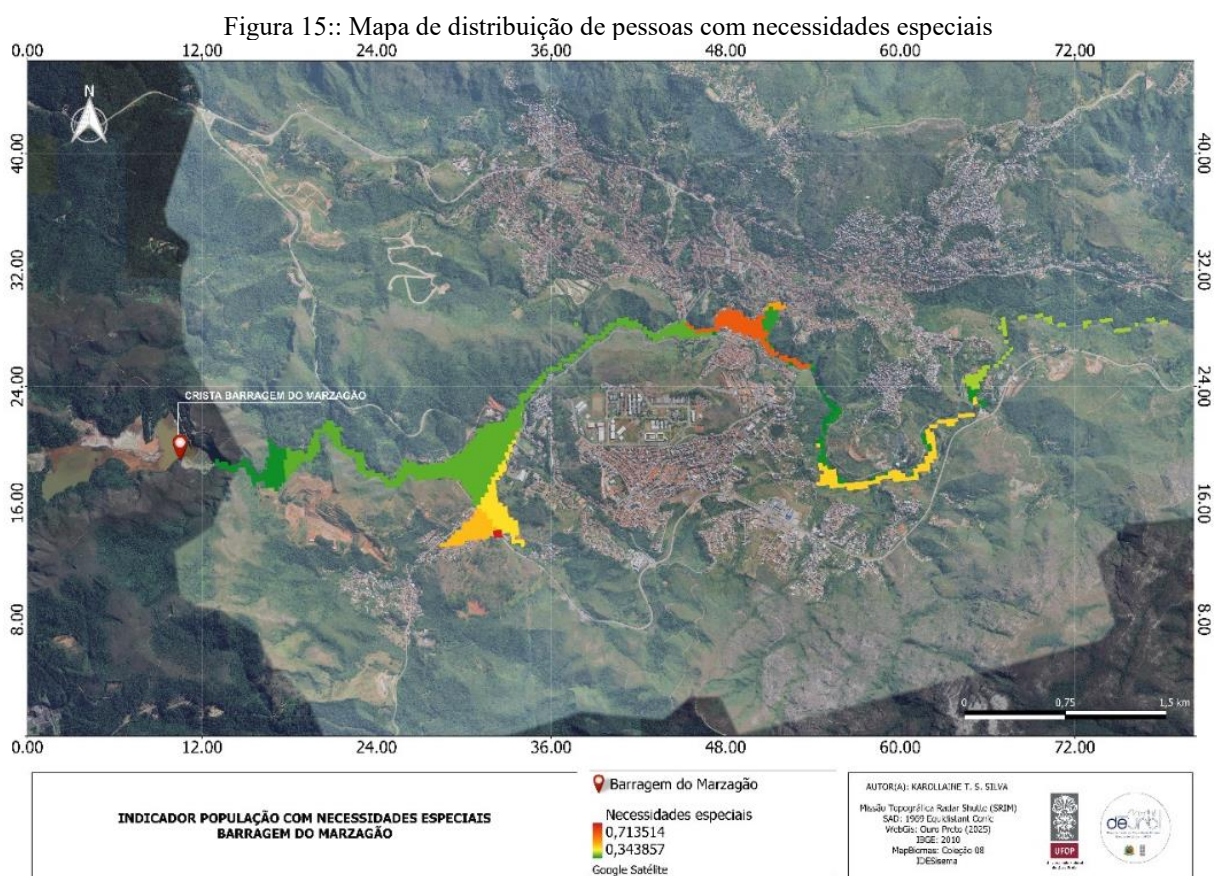
Figura 14:: Mapa de residências atingidas



Fonte: Autoral (2025)

4.1.3 População com necessidades especiais

Este grupo é particularmente vulnerável em situações de desastre, como o rompimento de uma barragem de rejeito. A escala do mapa de pessoas com necessidades especiais, Figura 15, variou de 0,344 a 0,714, com a média de 0,525 e o desvio padrão de 0,158. Em caso de ruptura da Barragem do Marzagão, o mapa de distribuição de pessoas com necessidades especiais oferece um panorama crucial para o planejamento de evacuação e operações de resgate (Paaz, 2018).

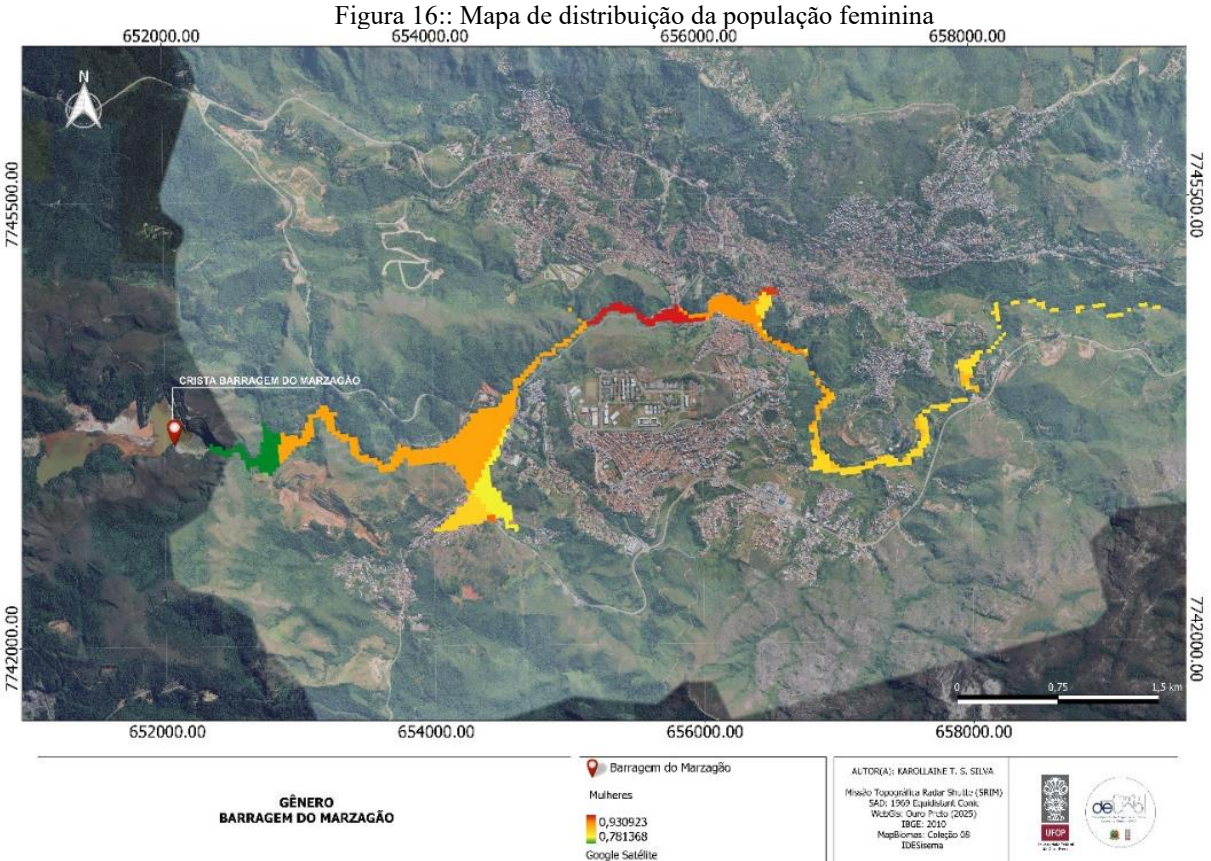


Fonte: Autoral (2025)

4.1.4 População de mulheres

A análise da população feminina é especialmente relevante no contexto de desastres, pois as mulheres, em muitas situações, enfrentam maiores vulnerabilidades devido às desigualdades estruturais (Rosa, 2023). O mapa de distribuição da população feminina, Figura 16, apresentou variação nos valores entre 0,781 e 0,930, com média de 0,856 e desvio padrão de 0,068. Observa-se que as tonalidades mais intensas predominam na maior parte onde o percurso da

lama do eventual rompimento da Barragem do Marzagão passa, sinalizando que mais de 80% da população dessas áreas é composta por mulheres. Isso sugere uma concentração feminina mais elevada em áreas periféricas e rurais do município.



A concentração elevada de mulheres em determinadas regiões também pode estar ligada a processos migratórios, com homens se deslocando em busca de trabalho em outros locais. Essa análise permite uma leitura mais detalhada das necessidades específicas de cada região, possibilitando que os gestores públicos implementem políticas direcionadas e eficazes.

A presença de uma alta população feminina em áreas de risco pode demandar medidas de segurança específicas, tais como abrigos seguros, proteção contra violência de gênero, programa de participação comunitária (Tomaz, 2024). Em contextos de desastre, mulheres podem enfrentar maiores riscos de violência e vulnerabilidade social.

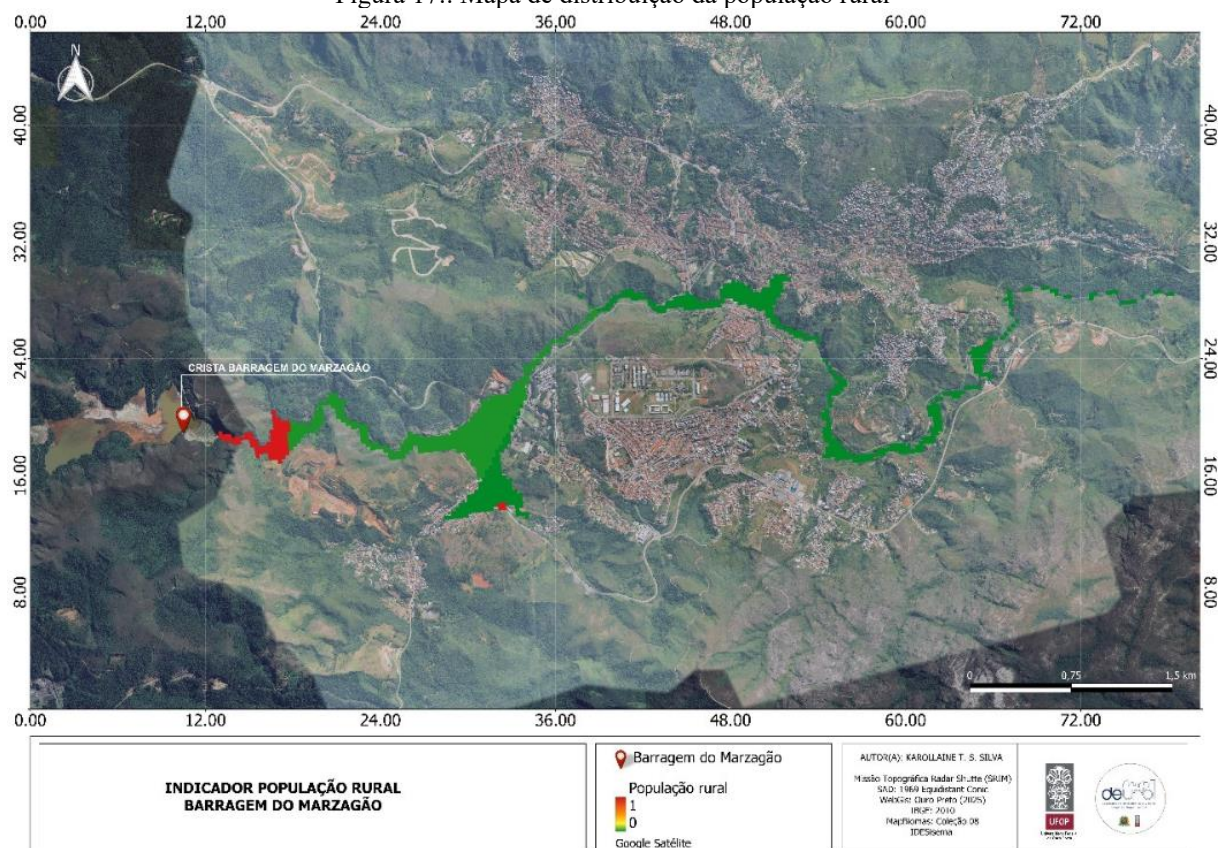
O indicador da população feminina em áreas de risco evidencia um aspecto relevante, uma vez que desigualdades estruturais tornam as mulheres mais suscetíveis em contextos de desastre. Contudo, sua utilização isolada apresenta limitações, pois não considera diferenças de

faixa etária, condições socioeconômicas ou papéis sociais, que influenciam de forma distinta a vulnerabilidade. A simples predominância de mulheres não implica necessariamente maior risco, já que a vulnerabilidade resulta da interação entre exposição, sensibilidade e capacidade de resposta. Além disso, há risco de supergeneralização e de reforço de estereótipos, ao retratar as mulheres apenas como grupo vulnerável, sem reconhecer seu protagonismo na organização comunitária. Portanto, recomenda-se que, em trabalhos futuros, o indicador seja integrado a variáveis como renda, escolaridade, chefia de família e acesso a serviços, de modo a oferecer uma leitura mais robusta e multidimensional das vulnerabilidades.

4.1.5 População rural

A população rural possui particularidades que envolvem o acesso a serviços básicos, condições de trabalho e infraestrutura (Dantas, 2020). O mapa que trata da densidade populacional rural, Figura 17, variou de 0 a 1, com média de 0,50 e desvio padrão de 0,430. As áreas em verde, que correspondem à classe de densidade baixa, predominam amplamente no mapa, isso sugere que a população rural do município é relativamente reduzida, sendo concentrada apenas em algumas regiões específicas da área de estudo. Essa distribuição pode estar associada a fatores como a topografia montanhosa e a urbanização predominante em Ouro Preto, o que limita a expansão das áreas rurais e concentra a maior parte da população em regiões urbanas e periurbanas. Assim, as áreas com maior densidade rural se destacam como exceções no contexto geral do município.

Figura 17:: Mapa de distribuição da população rural



Fonte: Autoral (2025)

As áreas em vermelho seriam as mais atingidas pela onda de inundação, o que resultaria em perdas, destruição de moradias e interrupção de vias de acesso. A população rural geralmente está mais dispersa e em áreas de difícil acesso, o que pode atrasar as operações de socorro e resgate. No entanto, em casos de rompimento de barragem de rejeito, essas regiões podem ser particularmente vulneráveis, principalmente se localizadas em áreas próximas aos cursos d'água afetados (Rosa, 2015). A infraestrutura rural, como estradas e pontes, também pode ser severamente impactada, dificultando o acesso de equipes de emergência.

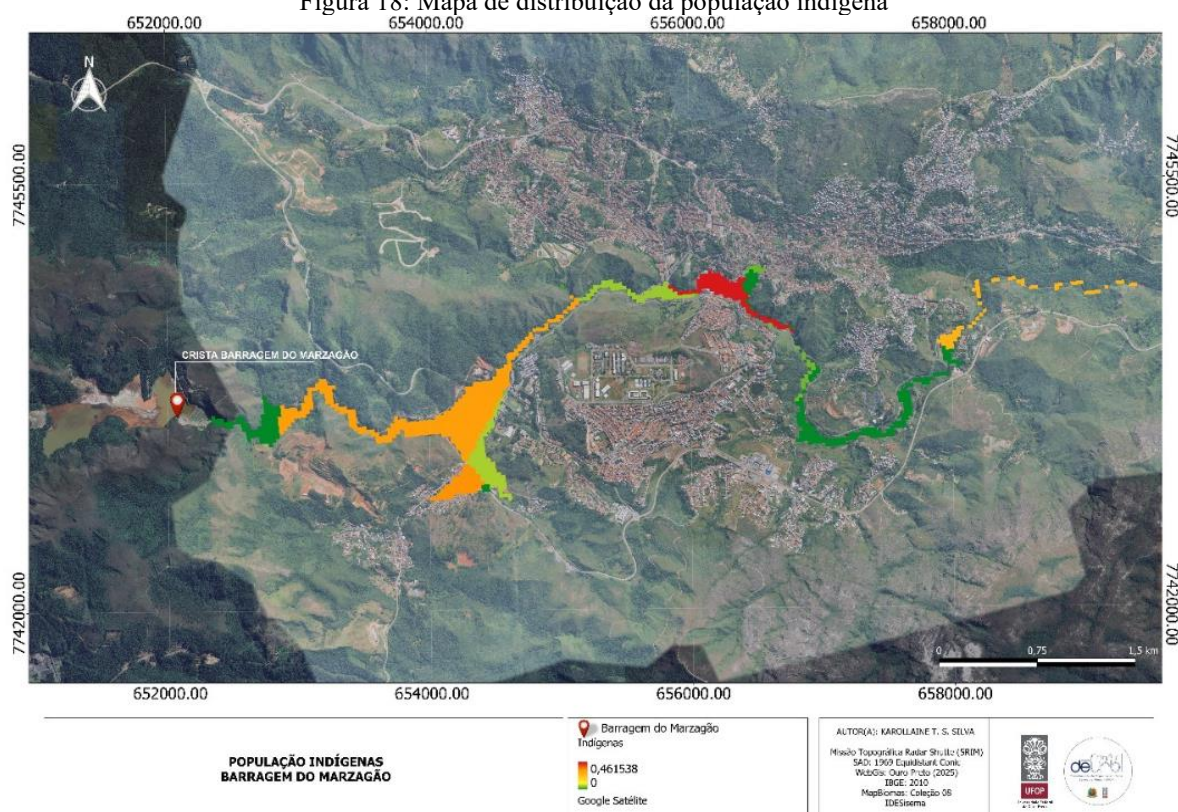
O indicador de densidade populacional rural permite compreender a dispersão e a baixa representatividade desse grupo no município, mas sua análise isolada apresenta limitações. A simples quantificação espacial não contempla aspectos fundamentais da vulnerabilidade rural, como renda, dependência da agricultura, acesso a serviços básicos e condições de infraestrutura. Além disso, a dispersão populacional, embora reduza o número de pessoas diretamente expostas, pode aumentar a dificuldade de resposta em situações de desastre, devido ao

isolamento e à precariedade viária. A topografia montanhosa e a predominância urbana em Ouro Preto explicam parte dessa configuração, mas não traduzem integralmente os riscos enfrentados pela população rural. Assim, para maior robustez, o indicador deveria ser articulado a variáveis socioeconômicas e de acesso a serviços, fornecendo uma visão mais ampla da vulnerabilidade desse grupo.

4.1.6 População indígena

As populações indígenas apresentam vulnerabilidades específicas decorrentes de sua relação singular com o território, de seus modos de vida e de sua organização social. Em situações de desastre, há risco de destruição de terras sagradas e de recursos naturais essenciais à subsistência, bem como de desestruturação de suas comunidades (Dutra, 2018). O mapa da população indígena, Figura 18, é dividido por diferentes áreas geográficas. Observa-se uma variação de 0 a 0.461, com média de 0,231 e desvio padrão de 0,211, devido aos baixos valores de variações, sugere-se uma menor diversidade étnico-racial, possivelmente devido a fatores históricos e padrões de ocupação. Em contrapartida, a região destacada em vermelho, indicam maior concentração de um único grupo racial, o que pode estar relacionado a processos de segregação socioespacial ou à formação de comunidades tradicionais.

Figura 18: Mapa de distribuição da população indígena



Fonte: Autoral (2025)

As comunidades indígenas são especialmente vulneráveis a desastres ambientais, pois muitas vezes dependem dos recursos naturais diretamente afetados pelo rompimento da barragem (Coelho, 2015). Além dos danos materiais e das perdas de vidas, o rompimento de uma barragem de rejeito pode ter impactos culturais significativos, destruindo territórios tradicionais e fontes de subsistência. Essas comunidades precisam ser tratadas com cuidado, considerando suas particularidades culturais e sociais, com ações de mitigação que respeitem seus direitos e territórios.

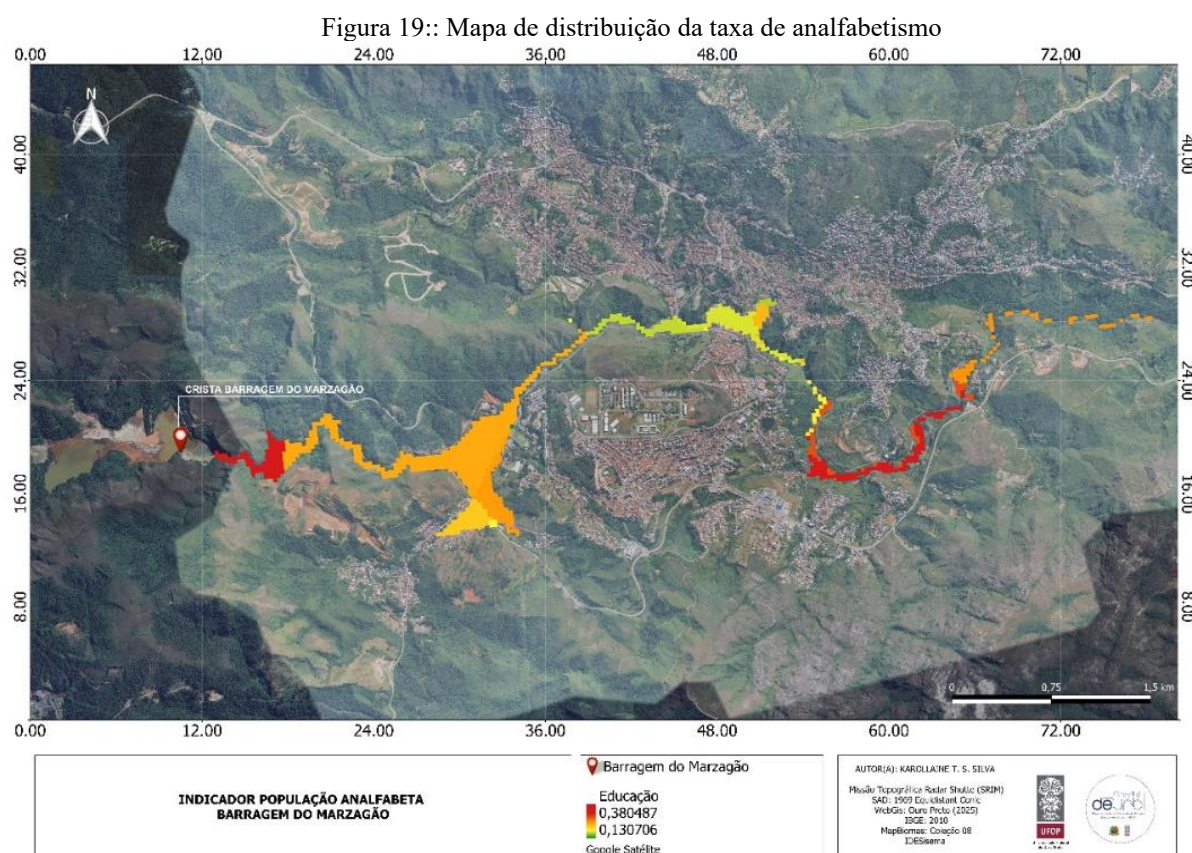
4.1.7 População analfabeta

De acordo com Magnago (2024), a população analfabeta enfrenta desafios adicionais em situações de prevenção, evacuação e recuperação, pois a ausência de habilidades básicas de leitura e escrita dificulta o acesso e a compreensão de informações críticas. No mapa da taxa de analfabetismo, Figura 19, os valores variaram de 0,131 a 0,380, em uma escala de 0 a 1, com média 0,256 e desvio-padrão 0,107. Nesse contexto, esses valores são considerados baixos

quando comparados ao limite superior da escala, indicando que, no conjunto da área analisada, a proporção de pessoas não alfabetizadas é relativamente reduzida.

As áreas em faixa verde, predominantes em regiões urbanas mais estruturadas, concentram as menores taxas de analfabetismo, associadas à maior oferta de escolas, melhor acesso a recursos educacionais e maior consolidação da escolarização básica. As áreas amarelas apresentam valores intermediários, enquanto as áreas vermelhas reúnem as maiores taxas, localizadas principalmente em zonas rurais ou bairros periféricos, onde há limitações de infraestrutura escolar e menor disponibilidade de programas de alfabetização.

Ainda que o indicador revele um cenário relativamente positivo, as zonas com taxas mais elevadas exigem atenção, pois podem apresentar barreiras significativas à comunicação e à mobilização em casos de emergência. Para esses contextos, recomenda-se o uso de estratégias de comunicação acessíveis, como materiais visuais, alertas sonoros e ações presenciais, integradas a políticas públicas que fortaleçam o acesso à educação e programas de alfabetização para jovens e adultos.



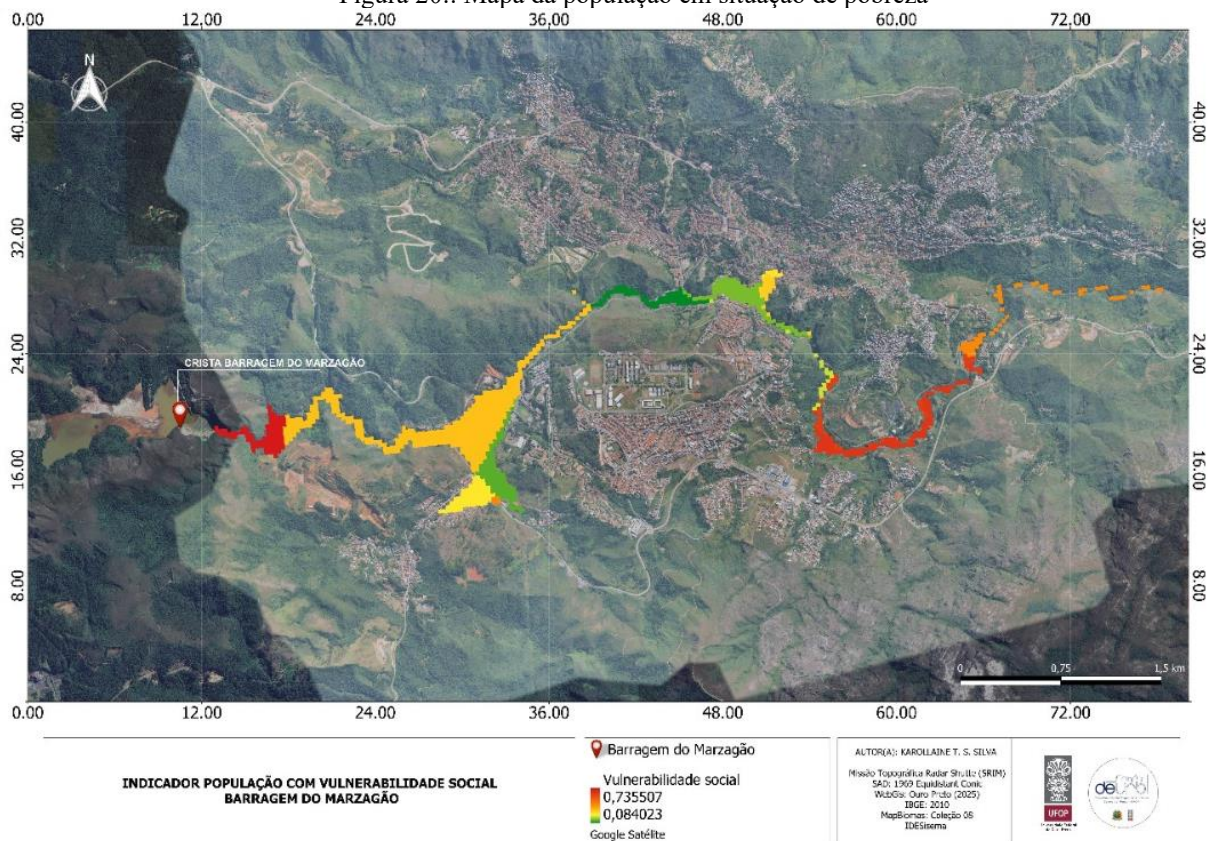
Fonte: Autoral (2025)

4.1.8 População em situação de pobreza

A população em situação de pobreza enfrenta carências materiais e sociais que dificultam o acesso a direitos fundamentais, como alimentação, moradia, educação e saúde (Carvalho, 2012). Para Ferreira (2005) a pobreza é um fator multidimensional, que envolve não apenas a falta de recursos financeiros, mas também a exclusão de processos de desenvolvimento e cidadania. O mapa que apresenta a distribuição da vulnerabilidade social, Figura 20, destaca diferentes graus de precariedade socioeconômica ao longo do município, variando de 0,084 a 0,735, com média de 0,409 e desvio de 0,280. As áreas em verde indicam regiões com menor índice de vulnerabilidade, enquanto as áreas de tons mais intensos representam níveis progressivamente mais elevados de vulnerabilidade social. Nota-se que as regiões periféricas, especialmente aquelas em vermelho, apresentam índices elevados, sugerindo condições socioeconômicas mais adversas, possivelmente relacionadas à baixa renda, menor acesso à educação e infraestrutura urbana precária.

A distribuição espacial da vulnerabilidade social indica uma correlação com a localização geográfica e a infraestrutura disponível. Áreas centrais apresentam menor vulnerabilidade devido à maior oferta de serviços públicos, melhores condições de moradia e acesso facilitado ao mercado de trabalho. Já as áreas periféricas tendem a concentrar populações de menor renda, onde a carência de serviços básicos pode intensificar as dificuldades socioeconômicas, perpetuando ciclos de pobreza.

Figura 20:: Mapa da população em situação de pobreza



Fonte: Autoral (2025)

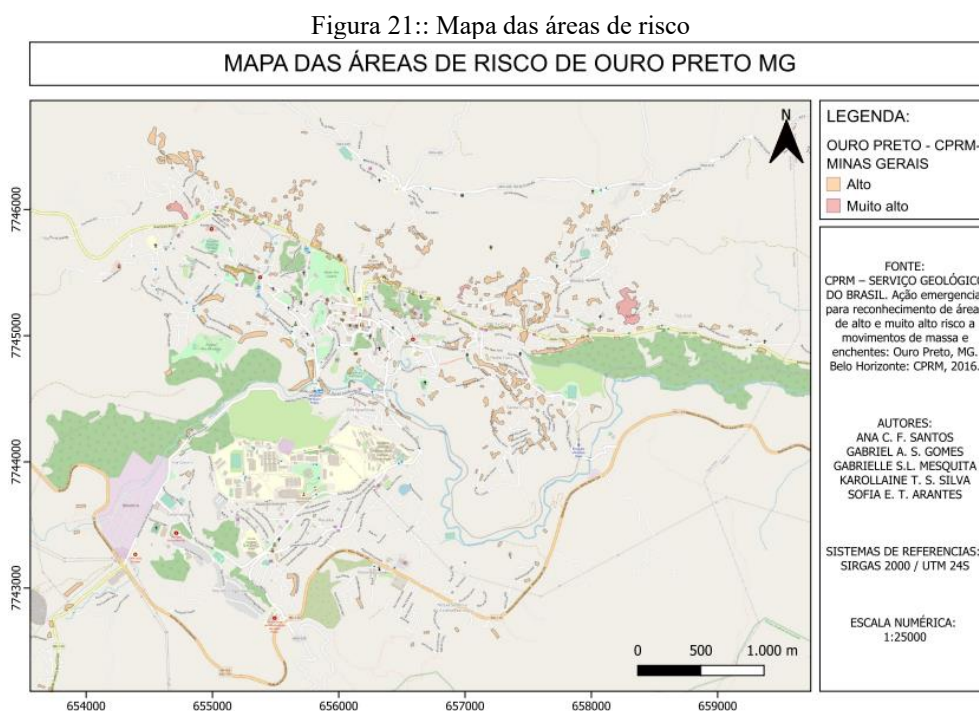
De acordo com Borges (2024) o alto índice de vulnerabilidade em determinadas regiões exige intervenções específicas, como investimentos em educação, saúde e qualificação profissional. A baixa infraestrutura urbana e a dificuldade de acesso a oportunidades econômicas são fatores que agravam esse cenário, tornando necessário o desenvolvimento de políticas voltadas à redução das desigualdades (Medeiros, 2025). Áreas com maior concentração de pobreza são frequentemente mais vulneráveis a desastres, pois a infraestrutura é geralmente inadequada e a capacidade de recuperação é limitada. Em cenários de rompimento de barragem de rejeito, essas regiões podem enfrentar desafios adicionais devido à falta de recursos para evacuação e realocação.

4.1.9 Residências inadequadas

O município de Ouro Preto apresenta um relevo acidentado, marcado por encostas íngremes e vales estreitos, o que historicamente influenciou o padrão de ocupação urbana. Como resultado, muitas moradias foram construídas em áreas geologicamente instáveis, sem

planejamento urbano adequado ou infraestrutura essencial. Essas construções, em grande parte irregulares e precárias, situam-se frequentemente em encostas, margens de cursos d'água ou regiões suscetíveis à instabilidade do solo. Essa ocupação desordenada aumenta consideravelmente a vulnerabilidade socioambiental da população residente, especialmente em contextos de eventos extremos, como o rompimento de barragens.

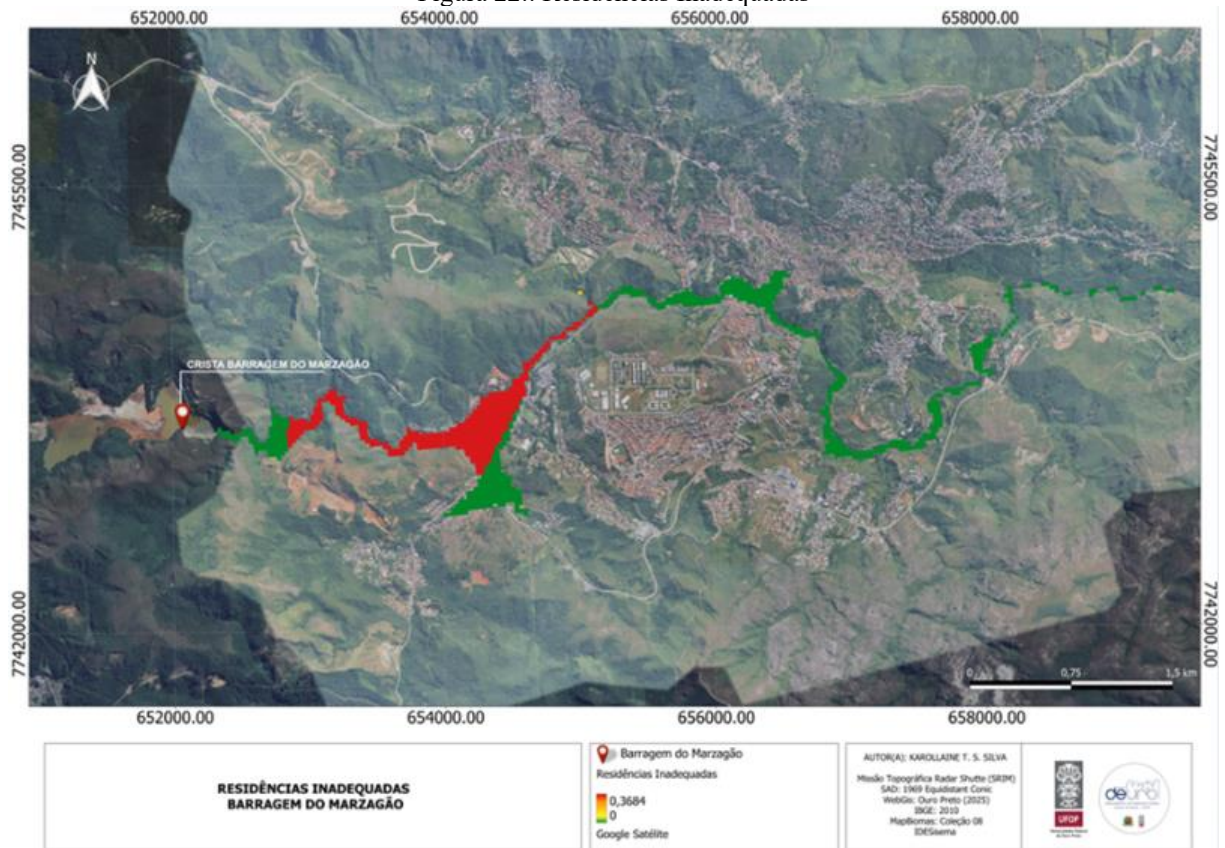
A Defesa Civil de Ouro Preto, no ano de 2023, disponibilizou o Mapa de áreas de risco do município, Figura 21, que identifica zonas classificadas como de alto e muito alto risco, sobretudo devido à possibilidade de escorregamentos e outros movimentos de massa. Essas áreas coincidem, em muitos casos, com regiões de ocupação densa e infraestrutura limitada, ampliando o potencial de impactos em caso de desastre.



Fonte: Defesa Civil (2023)

O mapa apresentado na Figura 22, exibe valores variando entre 0 e 0,2684, com média de 0,1824 e desvio padrão de 0,168. Observa-se uma predominância da coloração verde ao longo da mancha de inundação projetada para um eventual rompimento da Barragem do Marzagão, indicando uma menor concentração de residências inadequadas na maior parte da área afetada. No entanto, destaca-se uma região pontual em vermelho, próxima à crista da barragem, que corresponde à localização da empresa Alumina Chemical Technology (ACTECH), atual responsável pela estrutura.

Figura 22:: Residências Inadequadas



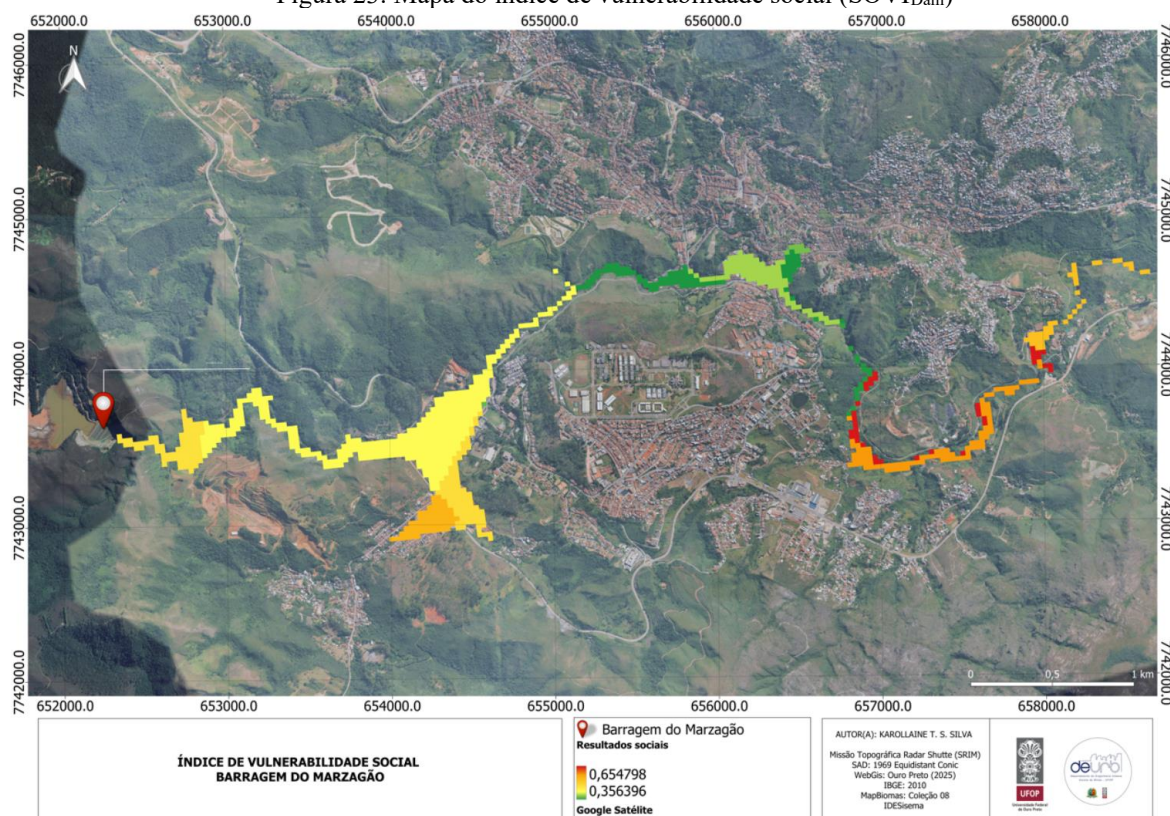
Fonte: Defesa Civil (2023)

Embora o mapa tenha como foco a identificação de residências inadequadas, a presença da empresa nessa coloração ocorre devido à metodologia de classificação espacial utilizada, que considera apenas a densidade construtiva e o padrão de ocupação, sem diferenciar o tipo de edificação (residencial ou industrial). Assim, a alta concentração de edificações dentro do complexo da ACTECH, mesmo sendo de uso não residencial, foi interpretada pelo modelo como uma área de alta intensidade construtiva inadequada no contexto do risco de rompimento. Isso reforça a necessidade de revisões qualitativas na análise, considerando a função e a ocupação real de cada área, especialmente em zonas industriais diretamente expostas a desastres potenciais.

4.1.10 Vulnerabilidade social

Utilizando-se a metodologia de Paiva (2024) foi possível obter o índice de vulnerabilidade social, apresentado na Figura 23.

Figura 23: Mapa do índice de vulnerabilidade social (SOVI_{Dam})



Fonte: Autoral (2025)

A análise do mapa apresentado na Figura 23 revela que o Índice de Vulnerabilidade Social (IVS) varia entre 0,356 e 0,654, com média de 0,501 e desvio-padrão de 0,131, conforme a classificação normalizada proposta por Paiva (2024) para impactos sociais. Esses valores enquadram a totalidade da área de estudo nas categorias de vulnerabilidade alta e muito alta, evidenciando que, em um cenário de ruptura da Barragem do Marzagão, essas localidades seriam severamente impactadas, tanto em sua infraestrutura quanto na preservação da vida humana.

A elevada densidade populacional nessas regiões potencializa o risco, ampliando a probabilidade de vítimas fatais e dificultando as ações de resgate, evacuação e atendimento emergencial. A concentração populacional compromete ainda a mobilização de recursos e a atuação eficiente das equipes de resposta rápida, tornando a gestão de emergências significativamente mais complexa.

O Quadro 4 apresenta os pesos normalizados e as respectivas recomendações para mitigação, considerando o cenário de vulnerabilidade social da área a jusante da barragem, com base em Paiva (2024):

Quadro 4 – Pesos sociais normalizados do estado de Minas Gerais

PRINCIPAIS DANOS E PREJUÍZOS SOCIAIS			
Faixas normalizadas para Minas Gerais			
Principais vulnerabilidades e danos sociais (Marzagão)	Recomendações para a redução da vulnerabilidade, proteção e resiliência das comunidades a jusante de barragens	Faixa de valor normalizado do estado SOVLDam	Recomendação de classificação
População em áreas rurais com necessidades especiais; comunidade com vulnerabilidade socioeconômica onde uma eventual ruptura, com base no estudo de Paiva (2024) demonstram dificuldades de recuperação e adaptação nos novos locais de residências, além da perda de identidade e história; Nível de escolaridade baixa.	Elaboração de Plano de Emergência voltado para eventuais rompimentos de barragem	>0,286	Muito Alto
	Realizar cadastro populacional das comunidades inseridas a jusante da barragem	0,286 - 0,202	Alto
	Realizar a disponibilidade da mancha de inundação da Barragem do Marzagão		
	Intensificar recomendações na medida em que o 4.1 SOVIDam for mais elevado	0,202 e 0,117	Moderado
	Instalar elementos de autoproteção para o município, como sinalização de emergência, rota de fuga, sirenes e pontos de locais seguros	<0,117	Baixo

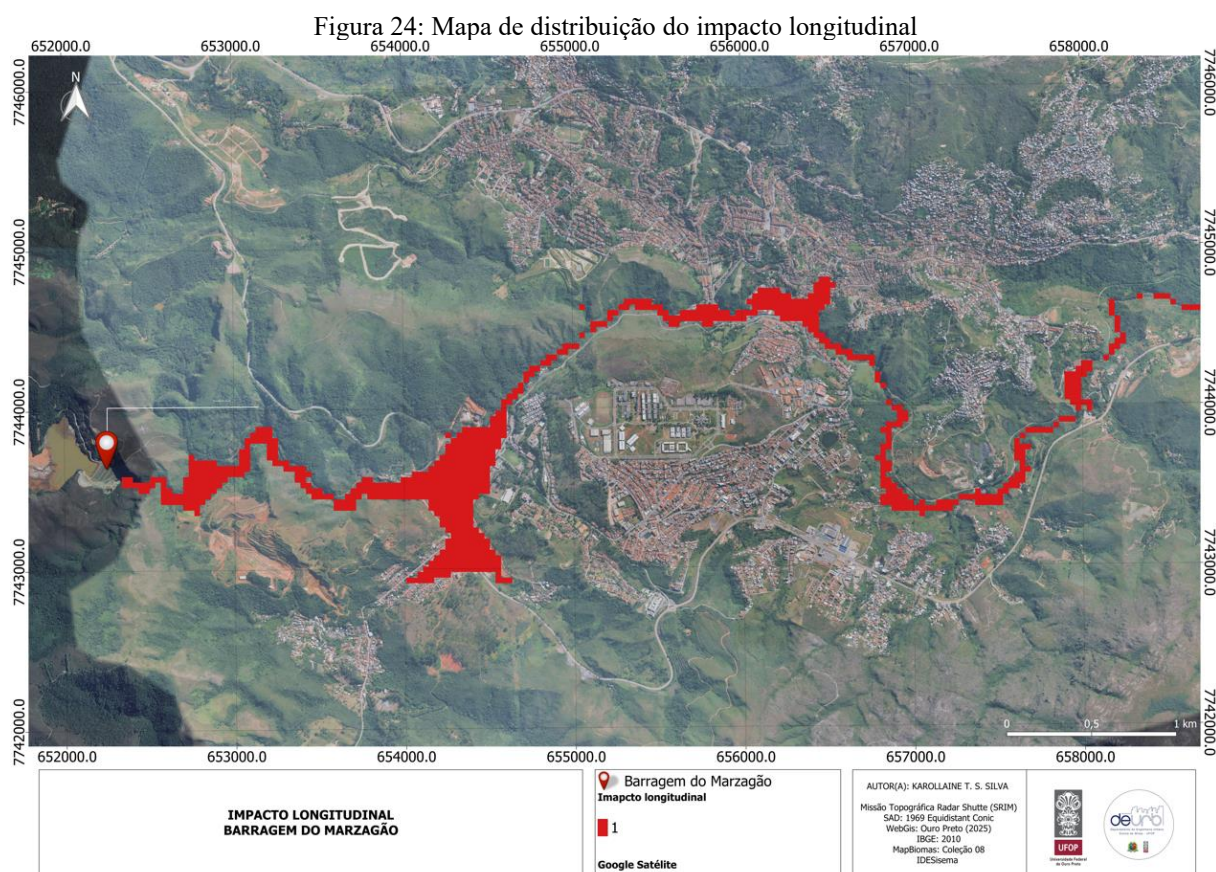
Fonte: Paiva (2024)

4.2 PhyVIDam

O PhyVIDam é uma abordagem na qual é utilizada a modelagem geoespacial para avaliar e mitigar impactos causados por rompimentos de barragem nas comunidades a jusante. Fundamentado em Paiva (2024) o método utiliza indicadores de declividade, impactos longitudinal e transversal, volume e o uso e ocupação do solo para compreender o comportamento dos rejeitos no ambiente e como um cenário de eventual rompimento de uma barragem de rejeito afeta os recursos hídricos e as comunidades a jusante da barragem.

4.2.1 Impacto longitudinal

O grau de impacto longitudinal refere-se à extensão da propagação dos rejeitos ao longo dos cursos d'água, medindo a influência da lama ao longo do percurso principal do vale atingido (Paiva, 2024). Na Figura 24, observa-se que a mancha de impacto, disponibilizada no WebGis Ouro Preto (MG) em 2025, no que se refere à propagação dos rejeitos, segue o padrão de outros rompimentos de barragens de rejeito, como as de Brumadinho e Mariana, atingindo uma extensa área em um curto período de tempo. A severidade dos danos pode ser observada na delimitação da mancha vermelha, que indica a possível trajetória dos rejeitos caso ocorra o colapso da estrutura da Barragem do Marzagão.



Fonte: Autoral (2025)

O impacto longitudinal, conforme as métricas de análise, é classificado como alto, uma vez que a área afetada pode se estender por até 10 km a partir da barragem (Silva, 2024). A análise do mapa revelou um valor de 1, indicando alto impacto, uma vez que a área afetada ultrapassa essa distância. Esse fenômeno é resultado da velocidade da onda de rejeitos, do volume de material deslocado e das características geográficas do terreno, que facilitam a rápida

propagação ao longo dos afluentes. O mapa da Figura 24 indica que a zona de impacto engloba regiões urbanizadas, o que eleva o risco de destruição de infraestruturas e de perda de vidas humanas.

O padrão de dispersão indica que determinadas áreas tendem a ser mais suscetíveis ao espalhamento da lama (Bastos, 2012), em função de características topográficas que favorecem a propagação dos rejeitos para além dos cursos d'água. Essa condição está associada à baixa declividade e à reduzida resistência lateral do terreno, que oferecem menor barreira física ao fluxo, facilitando sua expansão horizontal, embora a maior concentração dos rejeitos permaneça restrita às calhas fluviais. Ressalta-se ainda que, de modo geral, o impacto sobre as comunidades diminui à medida que aumenta a distância em relação à barragem (Guimarães, 2018).

Em caso de rompimento da Barragem de rejeito do Marzagão, os impactos se estenderiam de forma significativa ao longo do curso dos corpos hídricos, devido ao fluxo dos rejeitos. Esses rejeitos carregariam sedimentos, metais pesados e outros poluentes, alcançando áreas cada vez mais distantes, o que representa um risco ambiental expressivo (Rosa, 2015).

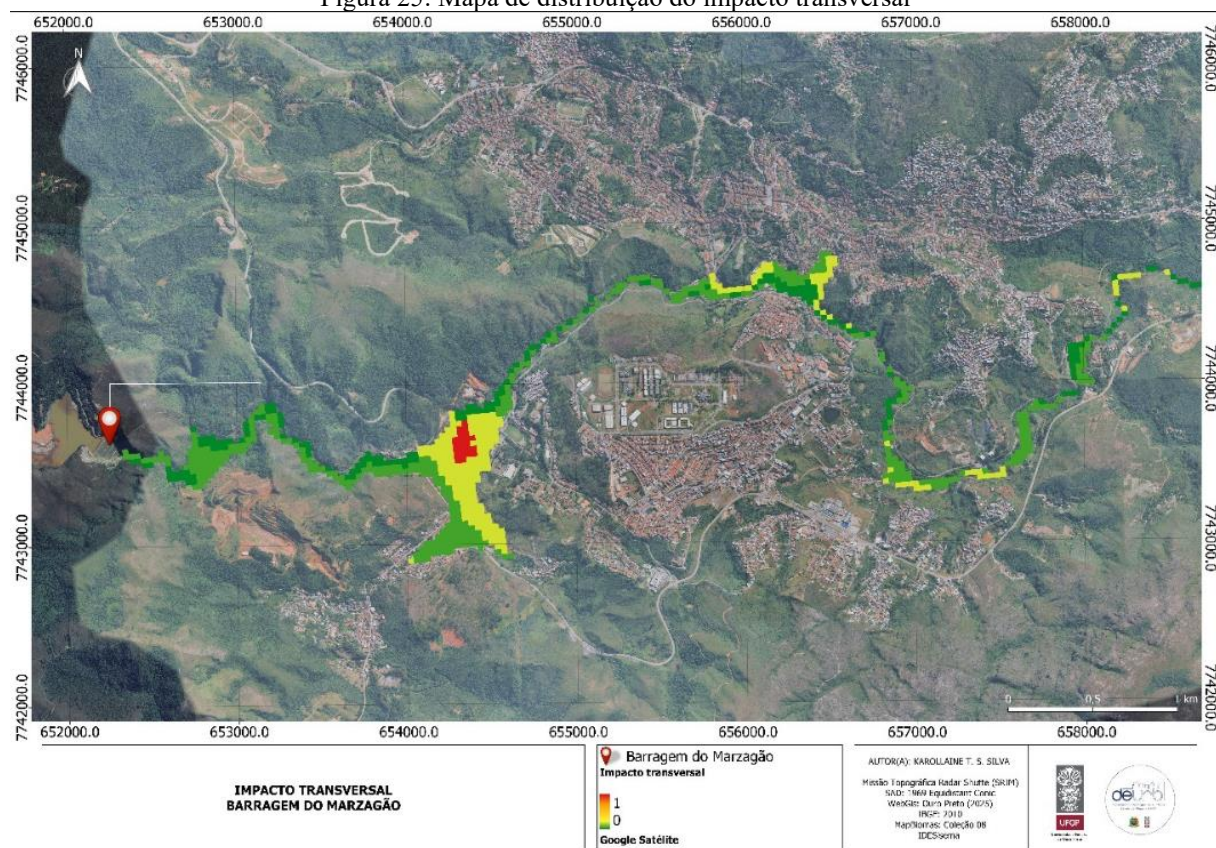
Com base na mancha de inundação disponibilizada pelo WebGIS de Ouro Preto (MG) e em análises complementares realizadas no Google Earth, verificou-se que os principais locais potencialmente impactados, considerando a distância a jusante a partir da crista da barragem, seriam: a empresa ACTECH, a aproximadamente 1,96 km; a região da Barra, a cerca de 3,93 km; e o bairro Antônio Dias, a 4,77 km. A mancha de inundação se estende ainda até cerca de 8,87 km, acompanhando o curso do recurso hídrico em direção ao município de Mariana (MG) e ultrapassando, em alguns trechos, o raio de 10 km.

4.2.2 Impacto transversal e HAND

Este indicador considerou o entalhamento dos vales e a distância dos cursos d'água. Áreas de planície aluvial, onde o entalhamento é fraco, apresentaram um maior espalhamento lateral da onda de rejeitos, gerando impacto em comunidades próximas dos recursos hídricos. Em vales com entalhamento mais forte, os impactos transversais foram mais limitados no canal de drenagem (Paiva, 2024).

O impacto transversal, representado na Figura 25, integrado à análise do HAND, evidencia como diferentes áreas são afetadas lateralmente em relação aos cursos d'água, onde teve uma variação de 0,0 a 1, com a média de 0,5 e desvio padrão de 0,456. Ao contrário do impacto longitudinal, que segue a orientação dos rios, o impacto transversal se distribui de forma irregular, indicando variações topográficas e padrões de drenagem diferenciados. As manchas avermelhadas dispersas pelo território sugerem pontos críticos de instabilidade, possivelmente associados ao uso e ocupação do solo.

Figura 25: Mapa de distribuição do impacto transversal



Fonte: Autoral (2025)

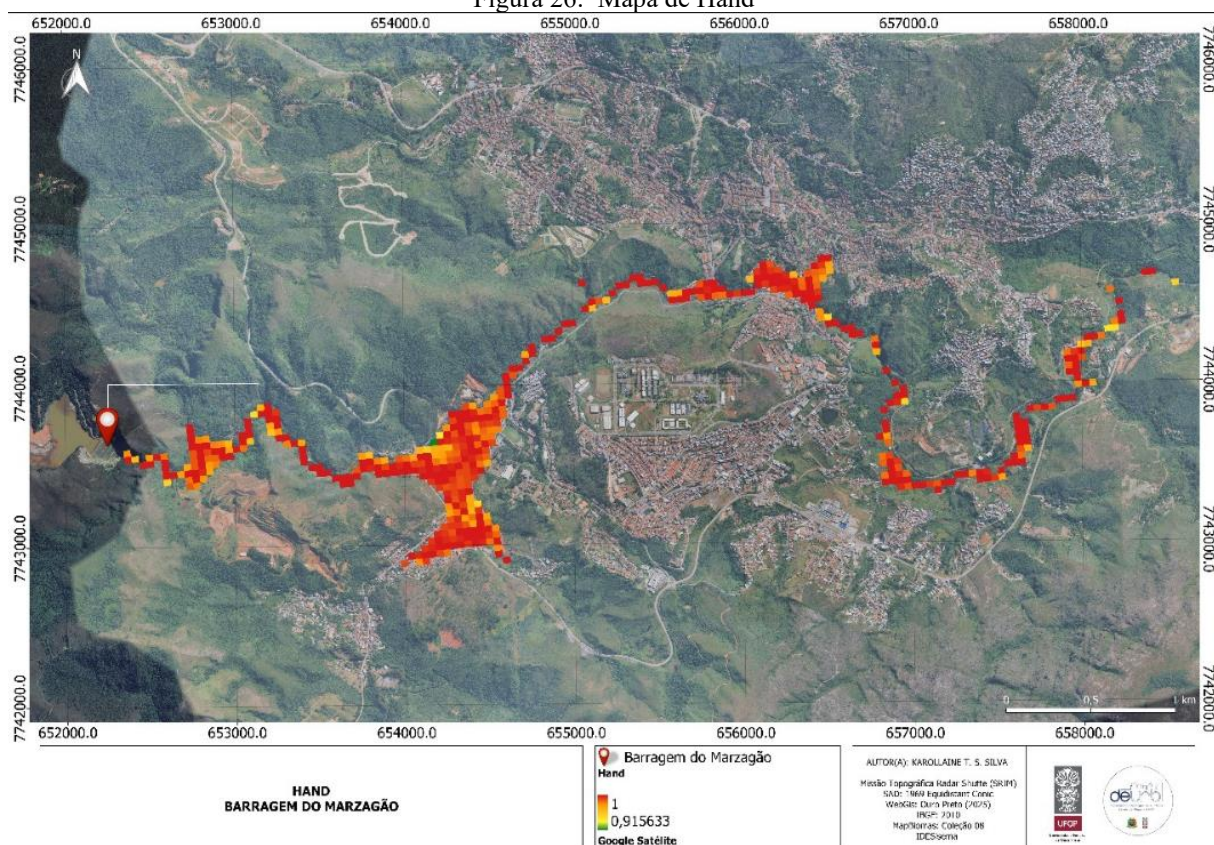
A análise revela que, nas áreas de vales encaixados, onde a drenagem é mais profunda, o impacto transversal é mais restrito, ficando concentrado dentro dos limites das calhas fluviais. Nesses locais, os rejeitos extravasados tendem a se depositar nas calhas e planícies aluvionares dos cursos d'água. Vale destacar que em algumas áreas dentro do centro urbano, apresentam o grau de impacto alto, devido sua drenagem não ser profunda e mais próximo ao nível do solo.

A análise do HAND é uma ferramenta essencial para identificar as áreas mais vulneráveis em cenários de inundação, especialmente em casos de rompimento de barragens, como o da Barragem do Marzagão. O HAND mede a altura de cada ponto em relação à drenagem mais próxima, oferecendo uma visão detalhada da topografia e da suscetibilidade de áreas específicas à acumulação de água e à propagação de enchentes. No contexto de um eventual rompimento da Barragem do Marzagão, o HAND permite identificar com precisão as áreas de risco imediato. Zonas com valores baixos de HAND são as mais próximas aos cursos d'água e, portanto, as mais expostas à inundação rápida e intensa, uma vez que o volume liberado pela barragem de rejeito se propagaria de forma preferencial ao longo dos leitos fluviais.

A análise da Figura 26 mostra valores variando de 0,916 a 1, com média de 0,958 e desvio-padrão de 0,038, representados por tonalidades que vão do amarelo ao vermelho e abrangem mais de 90% da área de estudo, correspondendo principalmente a regiões de baixada. Esses locais encontram-se próximos ao nível de drenagem ou apresentam diferença mínima de altitude em relação aos cursos d'água, o que os torna mais suscetíveis em caso de rompimento da barragem. Nessa situação, a onda de cheia tenderia a se propagar rapidamente pelos caminhos de menor resistência, favorecendo o acúmulo de rejeitos em grandes extensões e com profundidade significativa, configurando risco elevado para a infraestrutura e para a população.

Analizando os cursos d'água principais, fica evidente que essas regiões terão a maior concentração do fluxo em eventual rompimento da barragem do Marzagão. Isso porque o rejeito seguirá de forma acelerada pelos canais principais, impactando diretamente as áreas urbanizadas ou com atividades econômicas ao longo desses cursos. A infraestrutura nessas zonas, como pontes, estradas e edificações próximas, está em um estado crítico de vulnerabilidade.

Figura 26: Mapa de Hand



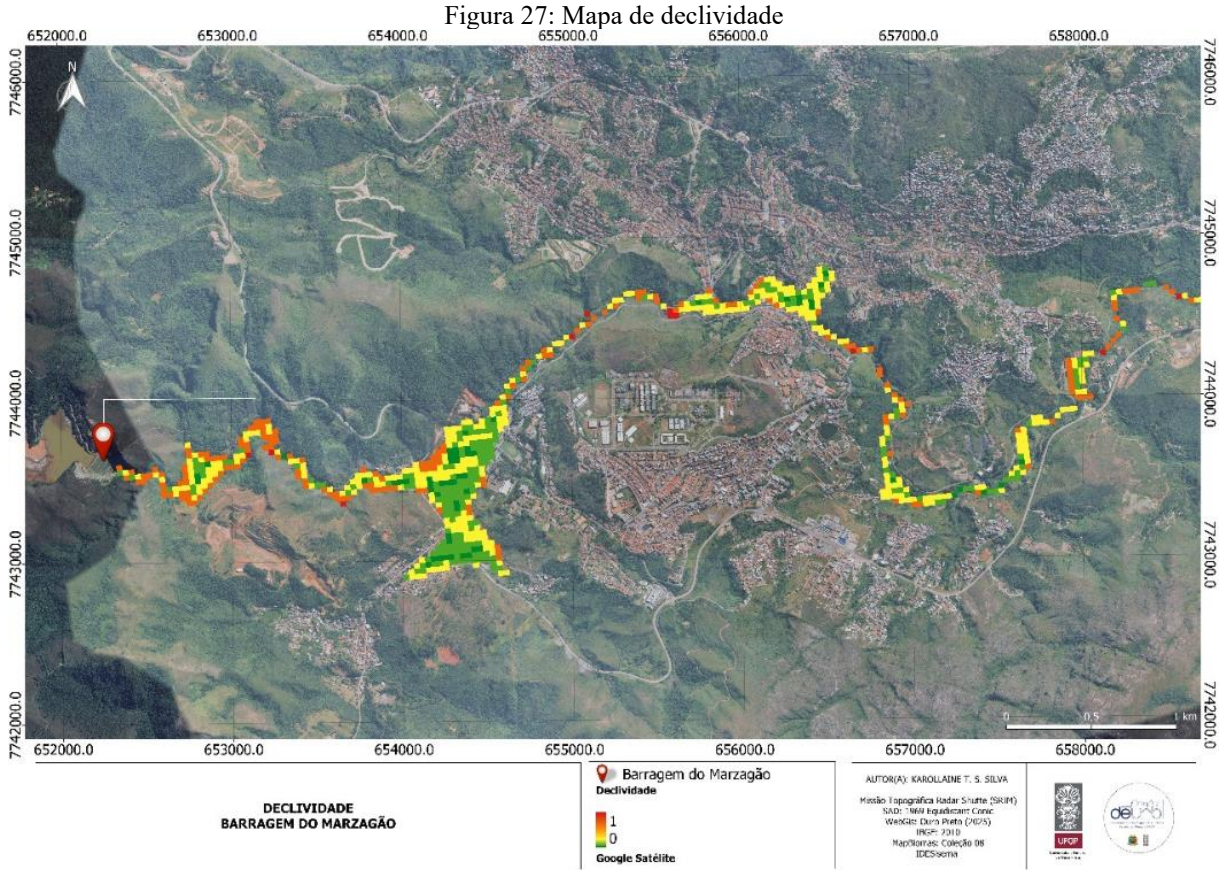
Fonte: Autoral (2025)

4.2.3 Declividade

O mapa de declividade, Figura 27, revela um panorama variado em relação à inclinação do terreno, onde teve variações de 0 a 1, com média de 0,5 e desvio padrão de 0,456. As áreas com alta declividade, próximo de 1, representadas por cores mais quentes, como vermelho e laranja, indicam trechos onde a inclinação é mais acentuada, resultando em escoamento superficial mais rápido (Costa, 2012) em uma eventual ruptura da barragem do Marzagão. Em termos práticos, essas regiões sofreriam maior erosão e processos de deslizamento de terra, uma vez que a água escoaria com maior intensidade, carregando consigo solo e detritos (Pellegrina, 2011). Essa dinâmica torna essas áreas mais vulneráveis a desastres naturais e à destruição de infraestrutura.

Por outro lado, as áreas representadas na cor verde indicam regiões de baixa declividade. Nessas áreas, o escoamento é mais lento. No entanto, em eventos de rompimento de barragem, essas regiões podem acumular grandes volumes de água e sedimentos, resultando em alagamentos prolongados. Para Santana (2023) a declividade do terreno é um fator essencial na formulação de estratégias de planejamento territorial, uma vez que interfere diretamente na

viabilidade de ocupação e no tipo de uso do solo que pode ser adotado. Em caso de rompimentos, comunidades nas áreas de declividades baixas, a jusante, sofreram impactos diretos nas suas moradias.

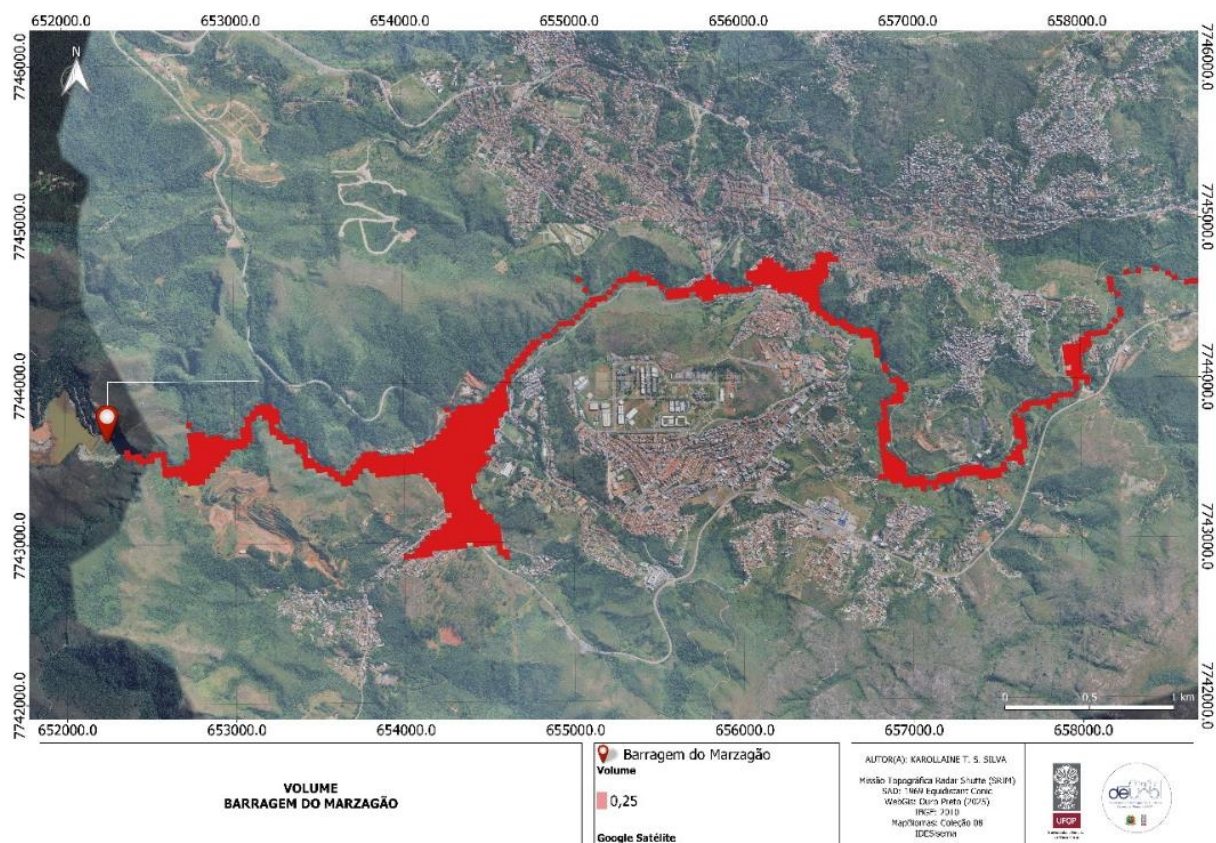


Fonte: Autoral (2025)

4.2.4 Volume

O mapa de volume, Figura 28, ilustra a área de impacto dos rejeitos na região de Marzagão, destacando a extensão da dispersão de rejeito ao longo dos cursos d'água. A barragem do Marzagão possui atualmente um volume de $3,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (ACTECH, 2024), um dado crucial para a análise.

Figura 28: Mapa de distribuição do volume de rejeito



Fonte: Autoral (2025)

Para Paiva (2024), o volume de rejeitos é um fator determinante na magnitude do impacto ambiental, e a extensão dessa mancha sugere uma carga significativa do material que será transportado gerando grande impactos nos recursos hídricos, ecossistemas aquáticos e nas comunidades a jusante da barragem.

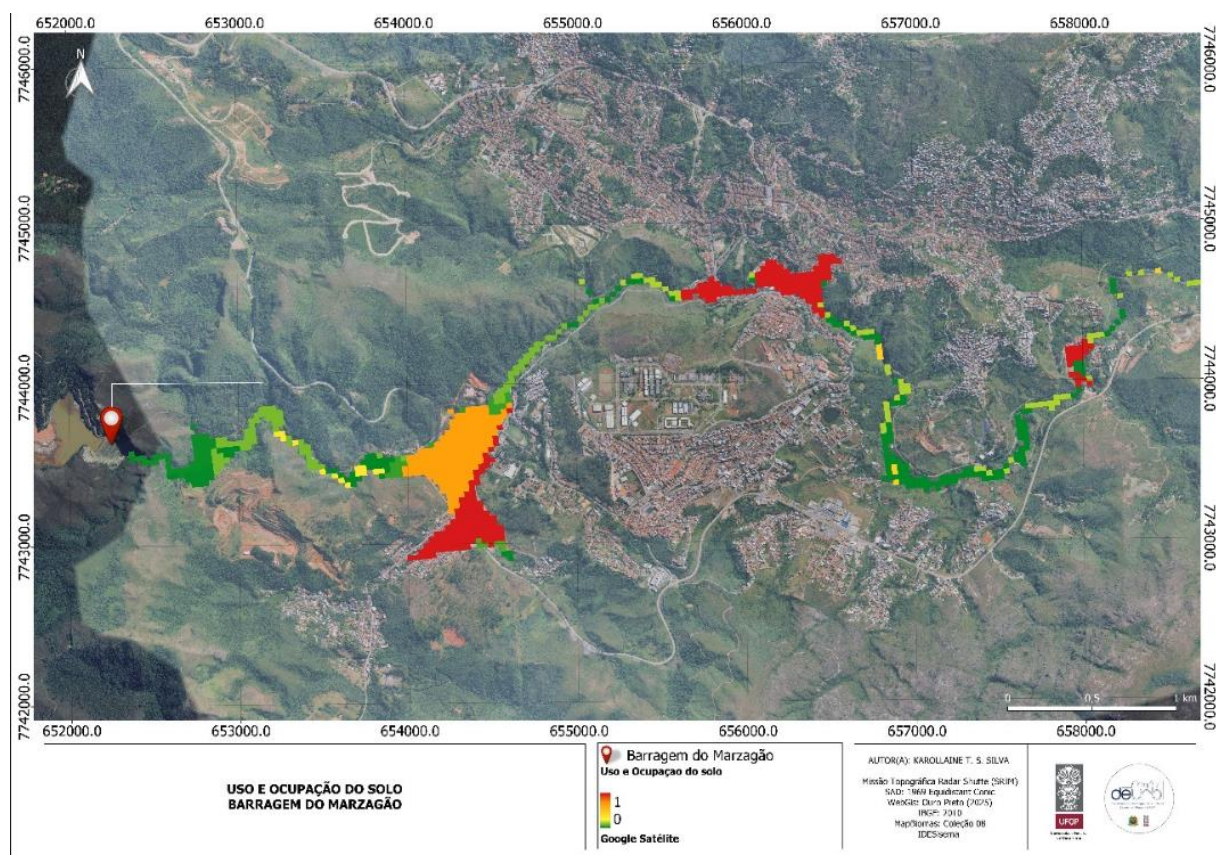
4.2.5 Uso e ocupação do solo

O uso e ocupação do solo é um fator determinante na avaliação dos impactos socioambientais em cenários de rompimento de barragens (Cristina, 2015). Áreas com ocupação urbana densa e proximidade dos rejeitos são especialmente vulneráveis, pois concentram infraestruturas críticas, moradias e atividades econômicas que podem ser severamente afetadas. Além disso, a contaminação do solo e da água em zonas agrícolas e áreas

de preservação ambiental compromete tanto a produção de alimentos quanto a biodiversidade local.

No município analisado, o mapa de uso e ocupação do solo na Figura 29 apresenta a distribuição das áreas ocupadas, utilizando uma escala de cores para indicar a intensidade da ocupação do território, onde variou de 0 à 1, com média de 0,5 e desvio padrão de 0,456. As áreas em verde representam regiões de menor ocupação, geralmente associadas a áreas de vegetação, zonas rurais ou locais com limitações topográficas que dificultam a urbanização. Essas áreas possuem menor adensamento populacional e menor quantidade de construções, o que reduz o impacto direto de um possível rompimento.

Figura 29: Mapa de Uso e Ocupação do solo



Fonte: Autoral (2025)

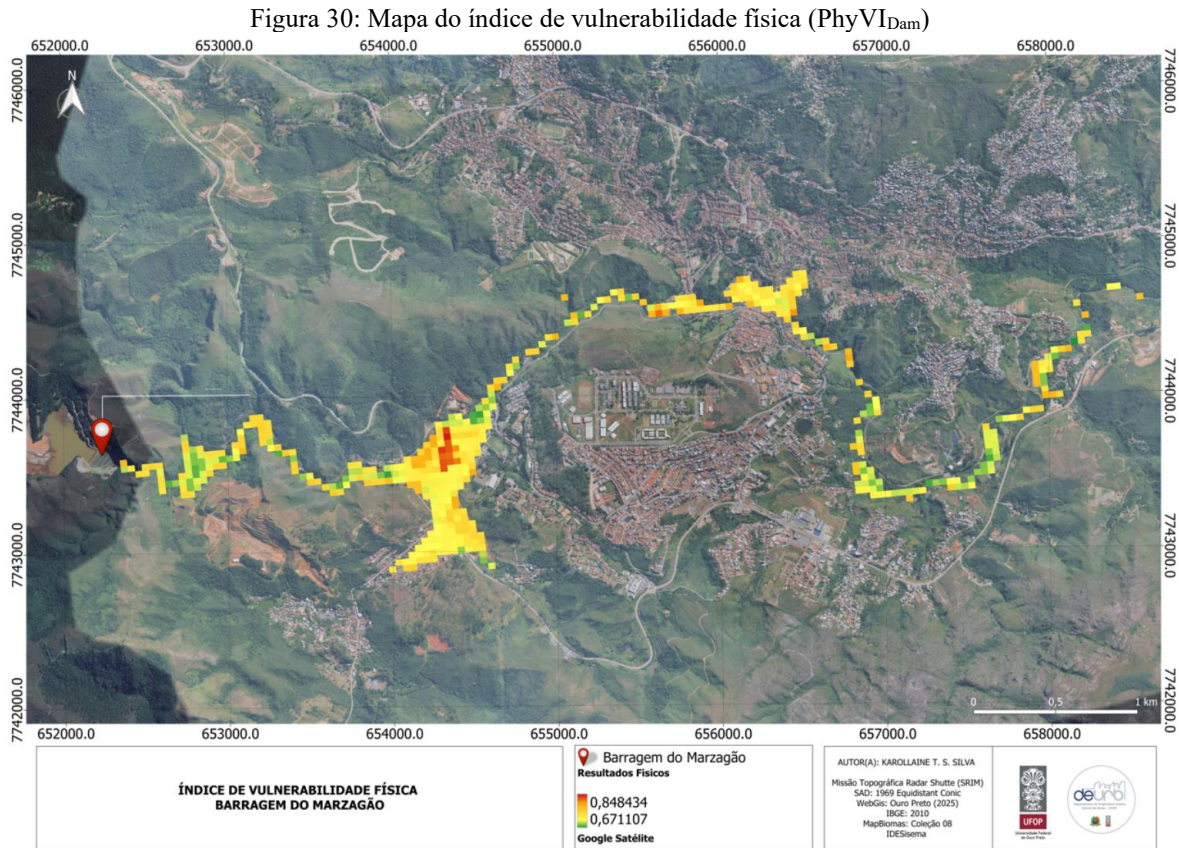
As zonas em amarelo e laranja indicam um elevado número de ocupação do solo, correspondendo a áreas com infraestrutura mais consolidada e maior presença de edificações. Nesses setores, a vulnerabilidade a desastres aumenta devido à concentração de pessoas e bens materiais. Já as áreas em vermelho representam os setores mais ocupados, onde há uma grande

densidade de edificações e infraestrutura urbana consolidada. Esses locais apresentam o maior risco em caso de rompimento, pois concentram a maior parte da população e podem sofrer danos significativos, incluindo soterramento de construções, destruição de vias de acesso e necessidade de evacuação em massa.

Em caso de uma eventual ruptura da barragem do Marzagão, as áreas centrais a jusante seriam as mais severamente afetadas, devido à maior concentração de pessoas e infraestrutura. O impacto direto sobre os moradores comprometeria não apenas suas moradias, mas também sua segurança e meios de subsistência, aumentando significativamente o risco de perdas humanas e materiais. A alta densidade populacional nesses setores reforça a necessidade de medidas preventivas, como planos eficazes de evacuação e monitoramento contínuo da estrutura da barragem, para minimizar os danos e proteger a comunidade local.

4.2.6 Vulnerabilidade física

Aplicando-se a metodologia de Paiva (2024), combinando os dados físicos com a Equação 2, foi possível obter Figura 30, com as principais áreas impactadas.



Fonte: Autoral (2025)

A análise do mapa de vulnerabilidade física (Figura 29), elaborado a partir do índice PhyVIDam, indica que toda a área a jusante da Barragem do Marzagão apresenta valores normalizados superiores a 0,525, enquadrando-se predominantemente nas classes alta e muito alta, conforme a classificação proposta por Paiva (2024) (Quadro 5). Os valores acima de 0,750, correspondentes ao nível muito alto de vulnerabilidade, concentram-se próximos ao leito principal e em trechos onde a declividade e a configuração do vale favorecem o confinamento e a aceleração da onda de inundação. Esse padrão é especialmente evidente na região da Barra, onde o entalhamento do vale, ao longo de aproximadamente 1,25 km a montante, atua, em caso de ruptura, como um corredor de intensificação do fluxo, aumentando a energia de impacto e, consequentemente, a severidade dos danos físicos.

Nessas zonas de maior criticidade, os danos previstos abrangem destruição generalizada de edificações, perdas em infraestrutura de transporte e serviços, degradação ambiental por deposição de rejeitos e interrupção prolongada de atividades econômicas. Já os trechos com valores entre 0,525 e 0,750, classificados como de alta vulnerabilidade, embora sujeitos a impactos relativamente menos intensos, ainda apresentam risco significativo devido à proximidade com o curso d'água e à fragilidade estrutural das construções.

De forma geral, os resultados evidenciam que, em caso de ruptura da barragem de rejeitos, haveria perdas materiais e ambientais expressivas, além de comprometimento direto da infraestrutura urbana e das atividades econômicas locais. Diante desse cenário, a gestão de riscos demanda a adoção de medidas integradas, combinando soluções estruturais — como obras de contenção, reforço e monitoramento da barragem — e não estruturais, incluindo sistemas de alerta e planos de evacuação.

Por fim, destaca-se que a análise foi conduzida com base em dados públicos, o que limitou a inclusão de parâmetros hidrodinâmicos mais precisos, tais como altura e velocidade da onda de inundação e tempo de chegada aos diferentes pontos a jusante. O Quadro 5 apresenta uma síntese das faixas de classificação e dos tipos de danos potenciais — materiais, ambientais e econômicos — associados a cada intervalo de valor normalizado, segundo Paiva (2024). Essa estrutura fornece subsídios sólidos para a definição de prioridades de intervenção e para o direcionamento de políticas públicas de segurança de barragens no município de Ouro Preto.

Quadro 5 – Danos e prejuízos normalizados para o índice físico

PRINCIPAIS DANOS E PREJUÍZOS EM EVENTUAL ROMPIMENTO		Faixa de valor normalizado PhyVIDam	Recomendação de classificação
Faixa normatizada para Minas Gerais			
Danos humanos	Mortos e feridos graves	>0,750	Muito Alto
Danos materiais	Bens materiais e instalações destruídas		
Danos ambientais	Contaminação e/ou poluição da água; contaminação e degradação do solo e redução da biodiversidade		
Prejuízos econômicos:	Impacto no turismo, redução de safras, perda de rebanhos e paralisação de produção industrial		
Prejuízos físicos	Degradação do uso e ocupação do solo, abastecimento de água, impacto na distribuição de energia		
Danos humanos:	Feridos leves e desabrigados	0,525 - 0,750	Alto
Danos materiais	Bens, imóveis e instalações destruídos/danificados		
Danos ambientais	Contaminação e/ou poluição da água; contaminação e degradação do solo e redução da biodiversidade		
Prejuízos econômicos:	Impacto no turismo, redução de safras, perda de rebanhos e paralisação de produção industrial		
Prejuízos físicos	Degradação do uso e ocupação do solo, abastecimento de água, impacto na distribuição de energia		
Danos humanos:	Desabrigados e desalojados	0,475 - 0,525	Moderado
Danos materiais	Bens, imóveis e instalações destruídos/danificados		
Danos ambientais	Contaminação e/ou poluição da água; contaminação e degradação do solo e redução da biodiversidade		
Prejuízos econômicos:	Impacto no turismo, redução de safras, perda de rebanhos e paralisação de produção industrial		
Prejuízos físicos	Abastecimento de água		
Danos humanos:	Eventuais desabrigados e desalojados	< 0,475	Baixo
Danos materiais	Eventuais bens e imóveis e instalações danificados		
Danos ambientais	Contaminação e/ou poluição da água; contaminação e degradação do solo e redução da biodiversidade		
Prejuízos econômicos:	Impacto no turismo, redução de safras, perda de rebanhos e paralisação de produção industrial		
Prejuízos físicos	Abastecimento de água		

Fonte: Adaptado Paiva (2024)

4.3 Integração da gestão de riscos de barragens ao plano diretor de ouro preto: análise crítica e propostas

Esta etapa consiste em uma análise comparativa de caráter técnico-normativo entre os Planos Diretores de Brumadinho e Mariana, municípios afetados, respectivamente, pelos rompimentos das barragens de Fundão (2015) e B1 (2019), e o Plano Diretor de Ouro Preto, atualmente em processo de revisão. O propósito central é identificar lacunas estruturais e deficiências operacionais no instrumento de planejamento urbano de Ouro Preto, especialmente à gestão de riscos tecnológicos associados à Barragem do Marzagão. A avaliação tem como base os indicadores $SoVI_{Dam}$ e $PhyVI_{Dam}$ (Paiva, 2024), aplicados sobre a área delimitada pela mancha de inundação da barragem, conforme mapeamento disponibilizado no WebGis (2025).

4.3.1 Plano Diretor Mariana

De acordo com Lopes (2016), o rompimento da Barragem de rejeito de Fundão, ocorrido em 2015 no município de Mariana (MG), foi classificado como o maior desastre ambiental da história do Brasil. O evento teve repercussão nacional e internacional, mobilizando a mídia estrangeira, organizações ambientais e instituições multilaterais, em razão da magnitude dos danos socioambientais.

A barragem de rejeito, de propriedade da mineradora Samarco, controlada pela Vale e pela BHP Billiton, liberou aproximadamente 43 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, que percorreram mais de 600 km até atingir o Oceano Atlântico, afetando o leito do Rio Doce e diversas comunidades ao longo de seu percurso. Além do impacto ambiental, que comprometeu de forma significativa a qualidade da água, da fauna e da flora de uma extensa região, os efeitos sociais foram igualmente severos. Conforme Falcão (2020), dezenas de comunidades a jusante da estrutura foram diretamente atingidas, incluindo a destruição total do distrito de Bento Rodrigues, perdas humanas, deslocamento forçado de moradores e interrupção de atividades econômicas locais, como agricultura, pesca e comércio.

Em resposta ao desastre, o município de Mariana revisou seu Plano Diretor, instituído pela Lei Complementar nº 228, de 22 de dezembro de 2022, estruturando-o como um instrumento abrangente de ordenamento territorial com ênfase na gestão de riscos geotécnicos, hidrológicos e tecnológicos. Alinhado aos princípios do desenvolvimento sustentável e da prevenção de desastres, o plano estabelece diretrizes rigorosas para conter a expansão urbana

em áreas vulneráveis, incluindo zonas suscetíveis a deslizamentos, inundações e rompimentos de barragens, além de delimitar áreas impróprias para a atividade minerária, com base em critérios ambientais, socioculturais e de segurança pública. Entre as disposições mais relevantes, destaca-se a exigência de que empreendimento minerários em operação cumpram integralmente os requisitos da Lei Federal nº 12.334/2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens. Isso inclui a atualização periódica dos Planos de Ação de Emergência (PAEs), instalação de sirenes, definição e manutenção de rotas de fuga, realização de simulados regulares, criação de zonas de amortecimento e exclusão, além da implementação de programas contínuos de educação, comunicação de risco e fortalecimento da cultura de segurança.

O plano também prevê a realização de avaliações técnicas sobre a aptidão geológica e geotécnica das áreas destinadas à expansão urbana, conforme orienta a Lei nº 12.608/2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil. Essas avaliações visam garantir que novos empreendimentos urbanos sejam implantados apenas em áreas seguras, reduzindo o risco geotécnico e hidrológico. Outro ponto de destaque é a reavaliação periódica das zonas classificadas como de risco alto ou muito alto, sobretudo em terrenos com alta declividade ou suscetibilidade a erosão e movimentos de massa. Além disso, o plano prioriza medidas estruturantes, como a ampliação e modernização da drenagem urbana, o controle de cheias, a melhoria do saneamento ambiental e a recuperação de áreas degradadas, compondo uma abordagem integrada para a resiliência urbana.

Por fim, adota uma estratégia territorial voltada à redução da dependência econômica da mineração, incentivando a diversificação produtiva, o fortalecimento da agroecologia e a descentralização econômica. Essa orientação busca consolidar um modelo de desenvolvimento urbano que una justiça territorial, segurança ambiental e sustentabilidade de longo prazo, reafirmando o papel do planejamento urbano como ferramenta essencial para a construção de cidades mais seguras, inclusivas e resilientes.

4.3.2 Plano Diretor de Brumadinho

Em 25 de janeiro de 2019, o rompimento da Barragem de rejeito B1, localizada em Brumadinho (MG), desencadeou uma das maiores tragédias socioambientais da história do Brasil. A estrutura, destinada à contenção de rejeitos de mineração e beneficiamento de minério

de ferro, possuía capacidade aproximada de 11,3 milhões de metros cúbicos, altura de 86 metros, crista a 942 metros de altitude e comprimento estimado de 720 metros (CIAEA, 2020).

De acordo com Cardoso (2020), a ruptura ocorreu em decorrência de uma falha estrutural, liberando uma onda de rejeitos que se espalhou rapidamente pela região. Segundo Masuki (2024), o desastre causou a morte de, pelo menos, 272 pessoas, embora se estime que mais de 300 trabalhadores estivessem presentes no local no momento do colapso. A força destrutiva e o amplo espalhamento da lama dificultaram a localização de todas as vítimas e resultaram em severos impactos ambientais, sociais e econômicos para o município e áreas vizinhas.

Como resposta institucional, foi revisado o Plano Diretor municipal, culminando na promulgação da Lei Complementar nº 128, de 29 de maio de 2023. O novo Plano Diretor Participativo de Brumadinho apresenta abordagem abrangente, com forte ênfase na prevenção de desastres tecnológicos. Entre as principais medidas, destaca-se a criação do Plano Municipal de Gestão de Barragens, que estabelece diretrizes obrigatórias para o controle de riscos, como a exigência de Planos de Ação de Emergência (PAEs), previstos na Lei Estadual nº 23.291/2019, a atualização periódica de cenários de ruptura e a entrega de simulações hidrodinâmicas à Prefeitura. Essas informações são integradas a um banco de dados vinculado ao sistema ambiental municipal, ampliando a transparência e a capacidade de resposta.

O plano também regulamenta a Sobrezona de Proteção Ambiental e Ocupação Restrita 1, correspondente às Zonas de Autossalvamento (ZAS), nas quais ficam proibidas novas ocupações residenciais, parcelamentos do solo e usos incompatíveis com a segurança da população. Além disso, prevê a instalação de sinalização de risco, a implementação de programas permanentes de educação comunitária e a formação de brigadas voluntárias de emergência, incorporando ações de proteção civil ao planejamento urbano.

No campo normativo, reafirma-se a obrigatoriedade de cumprimento da Lei Federal nº 12.334/2010, que institui a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), e estabelece-se a vedação à implantação de novas estruturas de contenção em áreas onde já existam comunidades inseridas nas ZAS. Determina-se, ainda, que as barragens em operação sejam descomissionadas ao término de sua vida útil, com reabilitação ambiental das áreas ocupadas. Complementarmente, o plano incorpora o Plano Municipal de Meio Ambiente e Redução de Riscos, que adota as sub-bacias hidrográficas como unidades de planejamento e propõe

conexões ecológicas e corredores de preservação ambiental. Tais medidas articulam-se às políticas de saneamento, habitação, mobilidade e uso do solo, garantindo uma abordagem transversal de mitigação de riscos e de recuperação socioambiental.

O Quadro 6 sintetiza as principais convergências e diferenças entre os planos, destacando os avanços normativos e apontando críticas sobre a implementação prática dos mecanismos previstos.

Quadro 6 – Análise dos Planos Diretores

Município	ZAS	Exigências (PAE)	Mancha de inundação	Instrumentos	Integração com Política Nacional (PNSB)	Mineração	Análise	Críticas
Brumadinho	Sobrezonas com uso restrito, baseadas em PAE	Obrigatório por lei municipal e estadual, baseado na Lei 23.291/2019	Base para restrições de uso e planejamento urbano	Sobrezonas, restrições de parcelamento, proibição de ocupações em áreas críticas	Expressa no plano e alinhada com a Lei Federal 12.334/2010	Com restrições fortes em áreas de risco, estímulo à diversificação econômica	Plano robusto, pós-rompimento, foca em proteção civil, reorganização urbana e medidas preventivas claras. Integra mapas de risco ao planejamento urbano.	Poderia avançar na implementação prática dos mecanismos, com auditoria contínua e transparência dos PAEs para a população.
Mariana	APR-3 (Rompimento de barragem) cobre zonas com risco de rompimento de barragens	Exigido como condicionante para zoneamento APR-3	Fundamentam áreas APR-1 e APR-3	APR-1 e APR-3 com proibições legais claras, inclusive para ZEIS	Implementa diretrizes conforme Lei 12.608/2012 e PNSB	Condicionada ao zoneamento e recuperação ambiental	Boa articulação de zoneamento com riscos. Define APRs com base técnica. Poderia ter maior detalhamento sobre protocolos de emergência locais.	Necessita ampliar os mecanismos de resposta e prever simulados, sirenes e maior articulação intermunicipal.

Fonte: Adaptado Lei Complementar nº 128 (2023) e Plano Diretor de Mariana (2022)

4.3.3 Revisão do Plano Diretor de Ouro Preto

A revisão do Plano Diretor de Ouro Preto vem sendo conduzida no âmbito do processo licitatório nº 287/2022 e materializada em volumes técnicos atualizados em 2024, disponíveis no site da Prefeitura. O novo material representa um avanço em termos de estrutura técnica e diagnóstica, especialmente pela incorporação de dados geotécnicos, cartografias de risco e diretrizes ambientais. Contudo, evidencia, ao mesmo tempo, fragilidades históricas da política urbana municipal no tratamento dos riscos associados a barragens.

A comparação entre o texto vigente da Lei Complementar nº 29/2006 e os documentos da proposta de revisão revela uma mudança relevante na integração de informações técnicas. Ainda assim, persiste a lacuna normativa quanto à articulação entre o planejamento territorial e a gestão de risco tecnológico, particularmente no que se refere às barragens, à obrigatoriedade de Planos de Ação de Emergência (PAEs) e à integração com a Defesa Civil municipal.

A legislação atualmente em vigor, de 2006, mantém um modelo genérico de Plano Diretor, centrado nas diretrizes de uso e ocupação do solo, na função social da cidade e na proteção do patrimônio natural e cultural, relevante pelo fato de grande parte de Ouro Preto integrar o Patrimônio Mundial da UNESCO. Entretanto, o documento não menciona a palavra “barragem” em nenhum trecho e não aborda áreas de influência dessas estruturas. Segundo Pardini (2019), o município abriga diversas barragens, incluindo estruturas a montante comparáveis às que colapsaram em Mariana (Fundão) e Brumadinho (B1). O plano vigente também não dispõe de instrumentos para controle territorial das Zonas de Autossalvamento (ZAS) nem de protocolos municipais de atuação em caso de rompimento, o que contraria as obrigações previstas na Lei nº 12.334/2010 (Política Nacional de Segurança de Barragens).

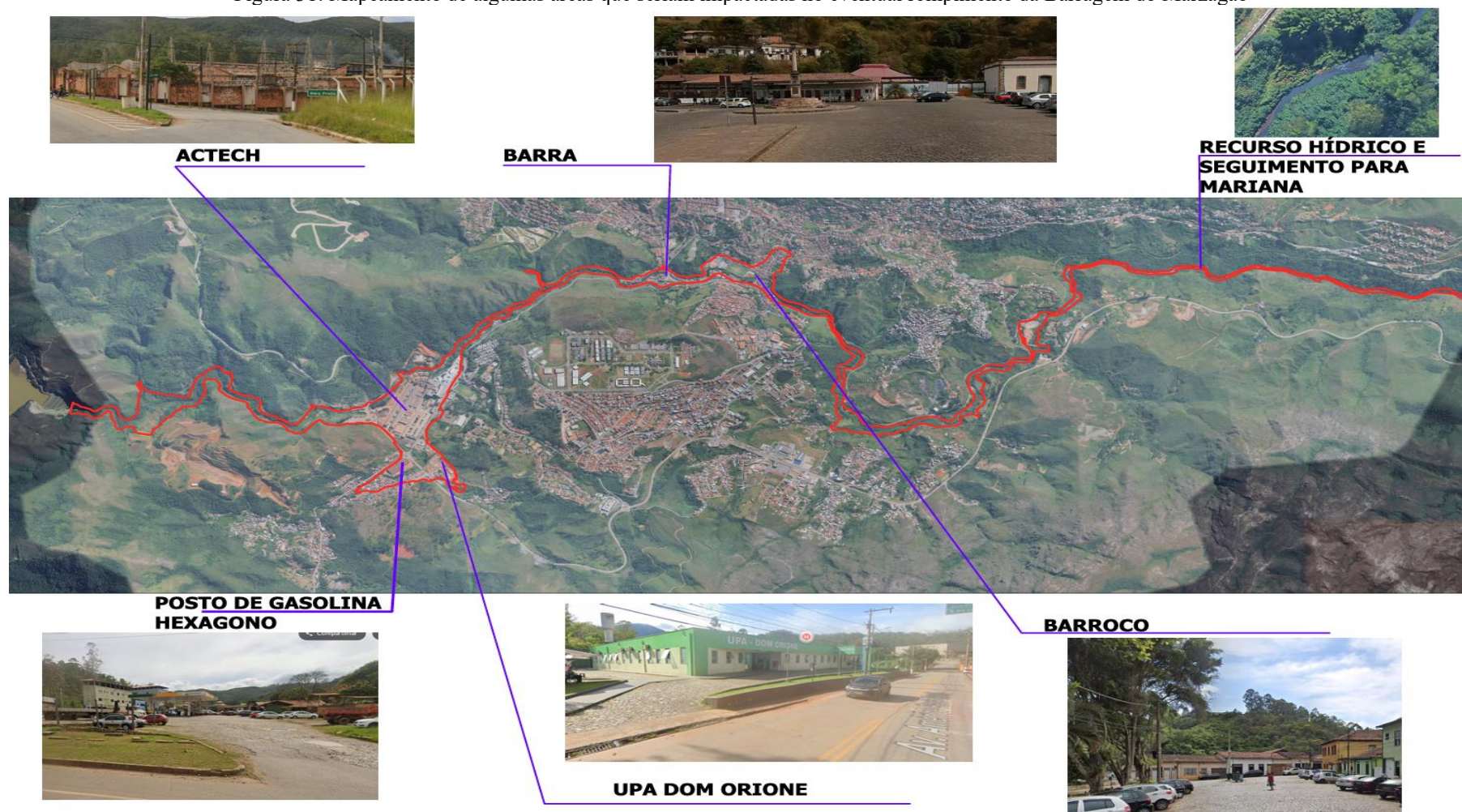
A proposta de revisão, baseada no Relatório de Leitura Técnica, Volumes I e II, inclui mapas de suscetibilidade a movimentos de massa, inundações, delimitação de setores de risco e zonas urbanas sensíveis. No entanto, as implicações das barragens existentes sobre o ordenamento territorial são tratadas de forma marginal. No caso específico da Barragem do Marzagão, localizada próxima a núcleos habitacionais e com risco concreto para a população, a proposta não estabelece diretrizes claras de gestão territorial associadas ao seu PAE. Essa omissão é grave diante da vulnerabilidade das comunidades a jusante e da necessidade de

alinhamento com a Política Nacional de Segurança de Barragens e o Decreto Estadual nº 48.078/2020, que prevê a obrigatoriedade de PAE para estruturas de rejeitos de mineração. Embora a Marzagão esteja vinculada a rejeitos industriais, os índices de vulnerabilidade $PhyVI_{Dam}$ e $SoVI_{Dam}$ indicam alto potencial de dano, justificando plenamente sua inclusão em planos emergenciais.

Apesar de a empresa responsável ter declarado, em nota publicada pelo portal Voz Ativa (2019), que a barragem é estável e monitorada, a ausência de um PAE robusto, integrado ao ordenamento territorial e às políticas de proteção civil, representa um ponto crítico. A proposta de revisão tampouco delimita zonas de risco específicas para rompimentos, nem propõe zonas de amortecimento, restrições construtivas ou protocolos permanentes de desocupação e controle populacional em áreas vulneráveis. Também não estabelece a obrigatoriedade de integração dos PAEs aos Planos Diretores Locais (PDLs) ou a outros instrumentos descentralizados de gestão territorial.

A análise espacial realizada a partir da mancha de inundação disponibilizada no WebGIS, e da interpretação de imagens do Google Earth (2025), identificou estruturas que seriam severamente impactadas em um eventual rompimento da Barragem do Marzagão Figura 31. No entanto, tais áreas não estão mapeadas de forma efetiva na proposta de revisão do Plano Diretor, revelando um descompasso entre o diagnóstico técnico disponível e as diretrizes de ordenamento territorial apresentadas.

Figura 31: Mapeamento de algumas áreas que seriam impactadas no eventual rompimento da Barragem do Marzagão



Fonte: Autoral (2025)

Mesmo após os rompimentos de Mariana (2015) e Brumadinho (2019), o município de Ouro Preto, que compartilha com Mariana parte de suas bacias hidrográficas, áreas residenciais, vias e demais infraestruturas, continua tratando o risco de barragens como uma variável ambiental rotineira, e não como um risco tecnológico de alto impacto. A proposta de revisão do Plano Diretor não traduz essa realidade em diretrizes concretas de prevenção, mitigação e resposta, mantendo-se omissa quanto à articulação com a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e as determinações da ANA, IGAM e outros órgãos de fiscalização competentes.

Embora o documento mencione os Planos Municipais de Redução de Riscos (PMRR), essa referência aparece de forma genérica, sem conexão direta com empreendimentos minerários ou estruturas de contenção. Os volumes I e II da leitura técnica apresentam setores de risco mapeados, porém sem regramento eficaz para impedir o adensamento populacional nessas áreas e sem a exigência de Estudo de Ruptura Hipotética (ERH) como condicionante para aprovação de novos empreendimentos. Ademais, instrumentos como o Código de Obras e a Lei de Uso e Ocupação do Solo, também em revisão, não preveem a compatibilização obrigatória com mapas de inundação e com a delimitação das Zonas de Autossalvamento (ZAS) das barragens em operação ou desativadas.

Outra lacuna importante é a ausência de mecanismos de monitoramento e avaliação contínua das ações relacionadas à gestão de riscos e segurança de barragens. Enquanto municípios como Mariana e Brumadinho definiram metas, cronogramas e indicadores para acompanhar a implementação das políticas de prevenção e contenção de desastres, Ouro Preto ainda carece de instrumentos institucionais que permitam fiscalizar o cumprimento das diretrizes propostas. A inexistência de um sistema de monitoramento reduz a transparência e compromete a efetividade das ações, sobretudo em um contexto onde a rapidez de resposta é fundamental para a mitigação de danos.

A proposta revisada também não prevê a criação de instâncias técnicas intersetoriais permanentes, como conselhos de risco ou comitês técnicos integrados, voltadas à temática de barragens. Em Mariana, por exemplo, a participação formal da Defesa Civil, do setor minerário e das secretarias de meio ambiente, habitação e planejamento urbano possibilita atuação coordenada e fortalece o controle social. Em Ouro Preto, a abordagem permanece

excessivamente setorializada, dificultando respostas integradas e efetivas a potenciais emergências.

No que se refere à mobilidade urbana, não há integração da segurança de barragens com as rotas de fuga e acessibilidade em situações de evacuação. Brumadinho, após 2019, adotou um modelo de mobilidade emergencial, com vias de escape, corredores de segurança e sinalização adequada nas ZAS. Em Ouro Preto, onde a malha viária é composta por ruas estreitas, aclives e restrições topográficas, a ausência de um planejamento específico para evacuações representa um agravante significativo.

Por fim, o plano revisado não vincula os processos de licenciamento urbano à presença de estruturas de contenção ou às áreas de influência de barragens. Diferentemente de Mariana e Brumadinho, que condicionam novos empreendimentos à apresentação de estudos de risco, mapas de inundação ou delimitação de ZAS, Ouro Preto não estabelece exigências claras para ERH, pareceres da Defesa Civil ou outros documentos técnicos essenciais para ocupações em áreas de alto risco. Essa omissão perpetua a insegurança física e jurídica, permitindo o adensamento populacional sem os devidos controles prévios.

Para facilitar a compreensão, o Quadro 7 apresenta uma comparação entre a Lei Complementar nº 29/2006 e a proposta de revisão do Plano Diretor, acompanhada das críticas identificadas nesta análise.

Quadro 7 – Análise do Plano Diretor de Ouro Preto (MG)

ANÁLISE DO PLANO DIRETOR DE OURO PRETO					
Análise	Categoria	Lei complementar (2006)	Plano Diretor revisado (2024)	Análise do documento	Críticas
Mineração	Reconhecimento da atividade	Inexistente. O plano não reconhece a mineração como setor estruturante do território. Nenhuma menção a concessões minerárias, empresas ou impacto socioambiental.	Presente. A mineração é considerada eixo econômico relevante, com citação direta a empresas como Vale, Samarco, CSN, Gerdau e Topázio Imperial.	O novo plano supera a omissão histórica, mas ainda trata a mineração como dado econômico e não como vetor de conflito territorial, exigindo maior regulamentação.	Apesar de reconhecer a mineração como atividade econômica, ainda carece de normas urbanas específicas sobre uso do solo em áreas mineradas.
Mineração	Impactos ambientais e sociais	O plano de 2006 ignora os impactos ambientais da mineração, concentrando-se em erosão, ocupação de encostas e supressão vegetal genérica.	Aponta degradação ambiental, contaminação de recursos hídricos, alterações paisagísticas, conflitos sociais e risco à saúde e ao patrimônio.	A caracterização atual é adequada, mas ainda sem instrumentos normativos de mitigação obrigatória, como exigência de planos municipais de compensação ambiental.	Descreve impactos ambientais e sociais, mas não apresenta obrigações legais para mitigação ou compensação urbanística.
Mineração	Atuação sobre o território	Nenhum mecanismo de controle urbanístico sobre áreas mineradas. Não trata da sobreposição entre concessões e áreas habitadas.	Reconhece a sobreposição entre atividade mineradora e assentamentos urbanos, mas não proíbe formalmente a expansão urbana nestas áreas.	Persistem riscos fundiários e urbanos em zonas mineradas. Falta compatibilização normativa entre títulos minerários e perímetros urbanos.	Falta proibição legal da ocupação urbana em áreas concessionadas à mineração.

ANÁLISE DO PLANO DIRETOR DE OURO PRETO					
Análise	Categoria	Lei complementar (2006)	Plano Diretor revisado (2024)	Análise do documento	Críticas
Mineração	Gestão de rejeitos	Nenhuma menção a barragens, resíduos minerais ou seus riscos.	Aponta a necessidade de fiscalização sobre disposição de rejeitos e sugere transição para tecnologias mais seguras.	Embora o plano recomende mudanças, não obriga cronogramas ou metas concretas para eliminação de estruturas com alto risco, como alteamento a montante.	Embora cite as barragens e seus riscos, não define política municipal estruturada de prevenção ou monitoramento.
Barragens	Inclusão no diagnóstico territorial	Ausente. O tema não aparece no texto, apesar de haver barragens em operação.	Presente com detalhamento técnico. Lista 18 barragens e identifica as com alto potencial de dano: Marzagão, Água Fria, B5, Vigia.	O plano de 2024 reconhece os riscos tecnológicos, mas ainda sem uma estrutura municipal de governança específica para barragens.	Trata os riscos de forma descritiva e dependente da atuação das empresas e órgãos estaduais.
Barragens	Manchas de inundação	Não consideradas. Nenhuma mancha de inundação foi incorporada ao zoneamento ou à lógica de parcelamento do solo.	Reconhece as manchas de inundação baseadas em simulações (dam break), com ênfase em áreas como Saramenha, Antônio Pereira e Miguel Burnier.	Grande avanço. Entretanto, as manchas são apenas referência técnica: ainda não são zonas legalmente restritivas ao uso urbano.	Manchas de inundação não são zonas legalmente vinculantes no plano diretor.

ANÁLISE DO PLANO DIRETOR DE OURO PRETO					
Análise	Categoria	Lei complementar (2006)	Plano Diretor revisado (2024)	Análise do documento	Críticas
Barragens	Participação comunitária e transparência	Ausente/Não informado	Menciona ações educativas e simulados de evacuação, mas com abrangência limitada.	A governança do risco permanece centrada nas empresas. Falta envolvimento ativo das comunidades nas ZAS e ZSS.	Ações educativas são superficiais e não articuladas com um plano de resposta comunitária amplo, nem todas barragens tem áreas de Zoneamento demarcadas
Barragens	Plano de Ação de Emergência (PAEBM)	Não citado.	Reconhece o PAEBM como exigência legal, destaca limitações na sua aplicação (Barragem do Marzagão) e recomenda integração municipal.	O plano apoia-se em legislações federais e estaduais, mas não propõe um plano de resposta emergencial municipal próprio.	Mesmo com PAEBM legalmente exigido em alguns casos, o município não possui plano emergencial próprio. Marzagão não se enquadra como barragem de mineração
Barragens	Gestão e fiscalização	Nenhuma proposta de fiscalização de estruturas de contenção.	Aponta fragilidade institucional da Prefeitura e dependência da ANM, FEAM e das mineradoras para dados e controle.	Reconhecimento importante, mas falta proposição de órgão técnico municipal independente para gestão de risco tecnológico.	Reconhece fragilidade institucional, mas não propõe a criação de corpo técnico permanente municipal.

ANÁLISE DO PLANO DIRETOR DE OURO PRETO					
Análise	Categoria	Lei complementar (2006)	Plano Diretor revisado (2024)	Análise do documento	Críticas
Uso e Ocupação do Solo	Zoneamento vinculado ao risco	Baseado em fatores ambientais (topografia, vegetação, patrimônio). Nenhuma integração com áreas de risco por barragens.	Introduz a ideia de restringir o uso do solo em manchas de inundação, mas ainda como diretriz, sem normatização obrigatória.	O plano precisa transformar as diretrizes em normas vinculantes, com atualização legal dos mapas urbanísticos com base nas áreas de risco.	Embora mencione riscos, ainda não vincula legalmente as restrições de uso ao zoneamento.
Uso e Ocupação do Solo	Parcelamento e licenciamento urbano	Não prevê mecanismos para avaliar o risco tecnológico. Permite parcelamento em áreas mineradas.	Sinaliza que os estudos de risco (PAEBM, dam break) devem ser considerados nos licenciamentos, mas sem tornar isso obrigatório.	Falta estabelecer protocolo técnico de análise de risco pré-licenciamento e suspender aprovações em áreas de autossalvamento.	Licenciamento urbano segue sem exigência formal de estudos de risco tecnológico.
Uso e Ocupação do Solo	Regularização fundiária	Prevê reassentamento para risco geológico, mas ignorava risco de barragens.	Não apresenta política de reassentamento para moradores em áreas de ZAS ou áreas mineradas com risco iminente.	O município precisa elaborar plano de reassentamento progressivo para comunidades sob risco estrutural, com garantias de moradia digna.	Não apresenta plano de reassentamento urbano para áreas em ZAS ou zonas de influência de barragens. Algumas barragens não apresentam ZAS

ANÁLISE DO PLANO DIRETOR DE OURO PRETO					
Análise	Categoria	Lei complementar (2006)	Plano Diretor revisado (2024)	Análise do documento	Críticas
Uso e Ocupação do Solo	Expansão urbana em áreas críticas	Não havia qualquer restrição.	O plano desestimula a expansão urbana em áreas de influência de barragens, mas sem dispositivo legal impeditivo.	O risco de novas ocupações em zonas críticas continua. Faltam normas de vedação expressa no texto legal.	Falta vedação expressa à expansão urbana em áreas de risco; recomendações não têm força de lei.
Uso e Ocupação do Solo	Integração com instrumentos de controle	Aplicação parcial de EIV, sem incorporar riscos tecnológicos.	Recomenda que o risco de barragens seja analisado nos EIVs, mas sem metodologia específica.	A ausência de protocolos técnicos para EIV (Estudo de impacto de vizinhança) em áreas de mineração ou barragens enfraquece a prevenção territorial.	EIV continua sem metodologia obrigatória para análise de risco em áreas de mineração ou barragens.

Fonte: Plano Diretor (2006) e da Lei Complementar (2024)

Dada a relevância de Ouro Preto no contexto minerário estadual e nacional, o Plano Diretor deve adotar postura proativa, indo além do diagnóstico. O texto atual não define uma matriz de responsabilidades que integre Prefeitura, empresas mineradoras, Defesa Civil, Ministério Público e comunidades, nem prevê mecanismos de monitoramento permanente das barragens ou atualização compulsória dos PAEs no sistema municipal de informações territoriais (SIGWEB). Essa lacuna compromete a governança territorial e a efetividade das ações preventivas.

A revisão em andamento, baseada nos volumes técnicos publicados em 2024, representa avanço em relação à Lei Complementar nº 29/2006, principalmente pela incorporação de tecnologias e dados atualizados. No entanto, persistem fragilidades na articulação entre planejamento urbano e gestão de riscos, especialmente no caso da Barragem do Marzagão. Faltam diretrizes específicas para o ordenamento em áreas de influência direta, mecanismos alinhados ao PAE e previsão normativa para delimitação de ZAS e zonas de salvaguarda, com restrições de ocupação e controle de densidade, conforme exigido pela Lei Federal nº 14.066/2020.

O plano também deve ir além da simples identificação de áreas vulneráveis, integrando geoprocessamento (SIG) e modelagem hidrodinâmica (HEC-RAS, ArcGIS) para delimitar manchas de inundação em cenários de rompimento e orientar a criação de zonas de amortecimento e corredores de evacuação. A aplicação de análises multicritério (AHP), como a metodologia de Paiva (2024), pode subsidiar a hierarquização de áreas críticas e a priorização de investimentos em infraestrutura resiliente.

A governança territorial deve ser fortalecida por meio de um Comitê Municipal de Gestão de Riscos e Ordenamento Territorial, com participação de Defesa Civil, sociedade civil, universidades e órgãos técnicos, garantindo atualização periódica das informações e integração entre planejamento e planos emergenciais.

Por fim, a comunicação de risco precisa ser incorporada como política pública permanente, incluindo programas de educação ambiental, simulações de evacuação, sinalização de rotas de fuga e materiais acessíveis à população, especialmente idosos. Com essas melhorias, o Plano Diretor pode evoluir para um instrumento integrado de planejamento e proteção, assegurando uso responsável do solo e convivência segura com estruturas potencialmente perigosas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa reforça a importância de análises voltadas à avaliação de riscos associados a barragens, especialmente em contextos urbanos com condições de vulnerabilidade. A aplicação integrada do Sistema de Informações Geográficas (SIG) e do método AHP possibilitou o uso dos índices $PhyVI_{Dam}$ e $SoVI_{Dam}$, permitindo identificar setores urbanos que, em um cenário hipotético de rompimento da Barragem de Marzagão, em Ouro Preto (MG), estariam mais suscetíveis a impactos. Essa combinação de ferramentas evidenciou não apenas áreas com maior propensão a danos físicos e estruturais, mas também aquelas em que fatores socioeconômicos poderiam dificultar a resposta e a recuperação das populações potencialmente atingidas.

Os resultados apontam que, caso ocorresse um rompimento, haveria possibilidade de danos relevantes, tanto de ordem humana quanto ambiental, urbana e patrimonial. A mancha de inundação disponibilizada no WebGIS indica a presença de setores com alta densidade populacional, como o bairro da Barra, que reúne características de vulnerabilidade física, presença de encostas, declividade acentuada e adensamento habitacional em margens de cursos d'água, associadas a condições sociais mais sensíveis, como baixa renda, presença de pessoas com deficiência, analfabetismo e habitações inadequadas.

A análise física também identificou que áreas próximas ao entalhamento, a jusante da região da Barra, tenderiam a atuar como canais naturais de escoamento da onda de cheia, potencializando a velocidade do fluxo e aumentando o risco de danos a vias urbanas, equipamentos públicos e sistemas de abastecimento e esgotamento sanitário. Nesse cenário, haveria possibilidade de interrupção temporária de serviços essenciais e, dependendo da intensidade do evento, de perdas humanas. Além disso, existe a preocupação com a qualidade ambiental da bacia hidrográfica, visto que rejeitos eventualmente mobilizados poderiam conter contaminantes resultantes de atividades industriais da ACTECH, representando risco de poluição do solo e da água e exigindo atenção especial ao monitoramento ambiental.

Do ponto de vista da gestão de riscos, a inexistência de um Plano de Ação de Emergência (PAE) específico para a Barragem de Marzagão constitui um ponto crítico, considerando as diretrizes da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e da Lei Estadual nº 22.796/2017, que estabelecem a obrigatoriedade de tais instrumentos para estruturas com potencial de dano alto. A ausência desse planejamento preventivo, associada a um contexto

urbano de topografia acidentada, acessos limitados e baixa integração institucional, pode dificultar a adoção de respostas rápidas e coordenadas.

Os dados obtidos neste estudo oferecem subsídios técnicos relevantes para apoiar decisões do poder público municipal e estadual. Recomenda-se a inclusão de diretrizes de gestão de risco no Plano Diretor, baseadas em indicadores de vulnerabilidade territorial, bem como a elaboração de um PAE participativo que contemple as comunidades potencialmente atingidas e integre os resultados desta pesquisa, como mapas de inundação, índices e dados sociais.

Em síntese, este trabalho contribui para a compreensão dos riscos aos quais estão expostas as comunidades a jusante da Barragem de Marzagão. Ao integrar variáveis geográficas, físicas e sociais, evidencia-se que a prevenção de desastres demanda uma abordagem sistêmica, fundamentada em dados técnicos, marcos normativos atualizados e participação social.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade e aprofundamento deste trabalho em estudos futuros, recomenda-se:

- Ampliar o conjunto de indicadores de vulnerabilidade, incluindo variáveis socioeconômicas, ambientais e estruturais que permitam uma análise mais precisa e abrangente dos impactos potenciais;
- Incorporar dados hidrodinâmicos, como altura da lâmina d'água e velocidade de escoamento, a fim de enriquecer a modelagem e a compreensão dos efeitos da mancha de inundação sobre o território;
- Expandir a área de estudo para o município de Mariana, considerando a continuidade do escoamento da mancha ao longo do curso hídrico e a relevância regional do impacto;
- Elaborar um Plano de Ação de Emergência (PAE) com base nos dados $\text{PhyVI}_{\text{Dam}}$ e SOVI_{Dam} obtidos neste estudo, visando uma resposta mais eficaz diante de cenários de rompimento ou emergência.

REFERÊNCIAS

ACTECH. **Barragem do Marzagão.** 2024. Disponível em: https://actechbr.com/images/sustentabilidade/Material_para_Web.pdf. Acesso em: 05 de março de 2025.

AIRES, A. A; COSTAS, J. D; BEZERRA, J.M; RÊGO, A. T. A. **Análise multicritério da suscetibilidade erosiva da microbacia hidrográfica da Barragem de Pau dos Ferros/RN.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 15, n. 2, p. 1128-1141, 2022.

AMORIM, D. I. M. (2025). **Desenvolvimento Sustentável na Bovinocultura: Uma Análise da Relação entre Pecuária, Qualidade de Vida e Meio Ambiente São Félix do Xingu.** Brazilian Journal of Agroecology and Sustainability, 6(2), 80–116. <https://doi.org/10.52719/bjas.v6i2.7027>.

ANUÁRIO Brasileiro de Desastres Naturais (2013). **Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres.** Brasília: CENAD, 2014.

ALKMIM, F. F. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero. In: **GEOPARQUES DO BRASIL: Propostas.** Volume I. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2004.

ALMEIDA, H. M de. **Caracterização geoquímica da água e sedimentos de fundo do Ribeirão Mazargo, Ouro Preto - MG.** 2017. 99 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

ALMEIDA. **Estudo de impacto ambiental/relatório de impacto ambiental: o significativo impacto à luz do ordenamento jurídico brasileiro.** Ufba.br, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/27541>. Acesso em: 18 mar. 2025.

ALVES, R. S. **Do território, às minas e um horizonte de exploração: análise do "programa um teto tudo" desenvolvido pela política de habitação na cidade de Ouro Preto-MG.** 2021. 98 f. Monografia (Graduação em Serviço Social) - Instituto de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, Mariana, 2021.

AVELAR, M. S. **Vulnerabilidade e percepção de risco de acidentes com barragens de caulim em Barcarena.** Orientadora: Milena Marília Nogueira de Andrade. 2019. 92 f.

Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11841>. Acesso em: 15 mar. 2025.

ANSALONI, T. **Nota da Hindalco sobre barragem de Marzagão após últimos acontecimentos em áreas da Vale**. 3 jul. 2019. Disponível em: <https://jornalvozativa.com/noticias/nota-da-hindalco-sobre-barragem-de-marzagao-apos-ultimos-acontecimentos-em-areas-da-vale/>. Acesso em: 7 abr. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS — ABNT. **NBR 13028:2017. Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 16 p. ISBN 978-85-07-07286-7.

AVILA, LUCIELE OLIVEIRA. **Precariedade de moradias, a falta de infraestrutura básica e a baixa capacidade de resposta aumentam os danos em casos de desastres**. 2015. 253 p. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/134683>. Acesso em: 15 mar. 2025.

AZEVEDO, ÚRSULA RUCHKYS; MACHADO, Maria Márcia Magela; CASTRO, Paulo de Tarso Amorim; RENGGER, Friedrich Ewald; TREVISOL, Andréa; BEATO, Décio Antônio Chaves. **Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG)**. In: GEOPARQUES DO BRASIL: PROPOSTAS. Volume I. CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2009. p. 185-202.

BARROS, T. R. Proposta para produção de aglomerantes para a construção civil a partir de resíduos gerados na indústria de alumina. 2017. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2017. Disponível em: https://reciclos.ufop.br/sites/default/files/reciclos/files/tcc_thamires_rangueri.pdf?m=1567474505. Acesso em: 05 março, 2025.

BASTOS, F. H. **Movimentos de massa no Maciço de Baturité (Ce) e contribuições para estratégias de planejamento ambiental**. 2012. 257 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

BESSA J., O., DOUSTDAR N.M., & CORTESI, L. A. (2011). Vulnerabilidade de municípios do Paraná aos riscos de desastres naturais. **Caderno IPARDES - Estudos E**

Pesquisas, 1(1), 82–100. Recuperado de <https://ipardes.emnuvens.com.br/cadernoipardes/article/view/80>.

BIEDACHA, M.M. **Previsão da suscetibilidade a escorregamentos de taludes rodoviários utilizando sistema de informações geográficas em trechos das rodovias BR-158 e BR-373**. 2024. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2024.

BOFF, R. A.; CABRAL, S. M. **Vulnerabilidade socioeconômica: Desigualdade social, exclusão e pobreza no Brasil**. Boletim de Conjuntura (BOCA), Boa Vista, v. 13, n. 38, p. 71–88, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.7648187. Disponível em: <https://revista.ioles.com.br/boca/index.php/revista/article/view/848>. Acesso em: 17 mar. 2025.

BORGES, M. C. P. **Desenvolvimento de um índice de vulnerabilidade urbana a alagamentos em municípios brasileiros a partir dos dados do SNIS**. 2023. 188 f., il. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) — Universidade de Brasília, Brasília, 2023.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. **Estatuto da Cidade**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 11 jul. 2001. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. **Ministério da Integração Nacional. Histórico da Defesa Civil**. 2013. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Anuario-Brasileiro-de-Desastres-Naturais-2013.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2024.

BRITO, C. Y. P.; PORFIRIO; COSTA, V. A. **A ocupação de áreas a jusante de barragens: uma análise da vulnerabilidade populacional no município de Tucuruí-PA, Brasil**. Orientador: Júnior Hiroyuki Ishihara. 2021. 88 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campus Universitário de Tucuruí, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2021.

CAMILLO O.M; EMANUEL. 2021. **A governança das políticas públicas de compensação de danos consequentes de ruptura de barragens de mineração no estado de Minas Gerais: um estudo de caso do rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG).** Tesis de maestría, Flacso Brasil.

CARDOSO, S, D. **O rompimento da barragem B1 da mina Córrego do Feijão em Brumadinho/MG: uma análise do caso sob a perspectiva do direito do trabalho.** São Luís: Centro Universitário UNDB, 2020.

CAROLO, FABIANA. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos: instrumento para o desenvolvimento sustentável?: estudo das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.** 2007. 203 f., il. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

CARTIER, R; BARCELLOS, C; HÜBNER, C; . Vulnerabilidade social e risco ambiental: uma abordagem metodológica para avaliação de injustiça ambiental. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 25, p. 2695–2704, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.org/article/csp/2009.v25n12/2695-2704/>>. Acesso em: 15 mar. 2025.

CARVALHO, S.A; ADOLFO, L.G.S. O Direito Fundamental ao Saneamento Básico como Garantia do Mínimo Existencial Social e Ambiental. **Revista Brasileira de Direito**, v. 8, n. 2, p. 6–37, 2012. Disponível em: . Acesso em: 26 mar. 2025.

COELHO, C. **Passivos ambientais com base nos relatórios de impacto ambiental: um estudo das atividades de energia hidrelétrica de Santa Catarina.** 2010. reponame: Repositório Institucional da UFSC, [s. l.], 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/94283>. Acesso em: 18 mar. 2025.

COELHO, P.P. **A sustentabilidade do ambiente urbano e os instrumentos de gestão municipal: recomendação para um código de obras para o município de ouro preto-MG.** Ufmg.br, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-AMUFL8>>. Acesso em: 17 mar. 2025.

COFFERI, F.P; HUHNR, R; THOMAZ GREGORY BORDIGNON. OCUPAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO PODENDO CAUSAR DESLIZAMENTOS. **Enaproc**, v. 1, n. 1, 2014.

COSTA, REINALDO. Riscos, vulnerabilidades e condicionantes urbanos. São Paulo: **Paco Editorial**, 2019. *E-book* (132 p.). ISBN 9788546216291. Disponível em: <https://doi.org/10.33681/paco.ac-9788546216291>. Acesso em: 15 mar. 2025.

COSTA, S. L. DA; SOARES, M. J. N.; PESSOA, F. M. G. Sistema jurídico brasileiro de licenciamento ambiental. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 7–22, 19 set. 2015.

COSTA, J. C.; ALMEIDA, P. C. Telhado verde: redução e retardo do escoamento superficial. **Revista de Estudos Ambientais**, v. 14, n. 2, p. 49-55, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7867/1983-1501.2012v14n2p49-55>.

CRISTINA, T. **Impactos socioambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão no município de Barra Longa, Minas Gerais**. Ufmg.br, 2015. Disponível em: . Acesso em: 26 mar. 2025.

CUTTER, S. L., BORUFF, B. J., ; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242–261, jun. 2003. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>

CUNHA, A. L. **Aspectos metodológicos do processo de enquadramento dos corpos de água da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba**. Ufmg.br, 2013.

DANTAS, C. M. B. **Território e determinação social da saúde mental em contextos rurais: cuidado integral às populações do campo**. Athenea digital, 2020, vol.VOL 20, núm. 1, p. e-2169, <https://raco.cat/index.php/Athenea/article/view/372177>.

DE CÁSSIO SANTOS DOURADO, R.; HERBÊNIA LIMA CRUZ SANTOS, M.; SIMONE GONÇALVES ROSA PACHECO, C.; DEL MONTE COCOZZA, F. Integração de Sistemas Agroflorestais, Agroecologia e Educação Ambiental para Sustentabilidade na Bahia: Revisão Sistemática. **Revista Semiárido De Visu**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 589–605, 2024. DOI: 10.31416/rsdv.v12i2.695.

MINAS GERAIS. Decreto nº 47.383, de 2 de março de 2018. Licenciamento Ambiental. **Diário do Executivo – Minas Gerais**, Belo Horizonte, 3 mar. 2018. Disponível em: <https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&num=47383&comp=&ano=2018>. Acesso em: 14 ago. 2025.

DEYSE SCORPIONI DE OLIVEIRA. **Análise multicritério aplicada ao diagnóstico e adequação de estradas florestais**. 2023. 45 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais - Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati - PR.

DIAS, TARCILLA K.O. **Análise da Participação Pública em audiências dos processos de licenciamento ambiental no estado de Minas Gerais**. 2024. 40 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

DUTRA, B. A; NUNES, D. M. (2018). **Dano moral coletivo: Uma análise crítica acerca do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana – Minas**. CADERNOS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2(2). Recuperado de <https://cesuscvirtual.com.br/CIC/CESUSC/article/view/95>.

EMMEDOEFER, M. L. ., & SETTE A. F.21). **Desafios para uma cidade ser criativa em uma sociedade (pós) pandêmica: Um estudo sobre Ouro Preto (MG) Brasil**. *Brazilian Creative Industries Journal*, 1(1), 194–219. <https://doi.org/10.25112/bcij.v1i1.2672>.

ESGOLMIN, L. M. **Relação entre a favela e o lixo: uma ação transformadora**. 2010. 192 f. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2010.

FANTIN, A. P. C. **Indicadores de sustentabilidade urbana: diretrizes para a governança inteligente e sustentável das cidades**. 2024. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2024.

FERREIRA, L. S. S. **Instrumentos e mecanismos políticos-institucionais nas práticas empresariais e estatais: reflexões a partir do desastre da Samarco no Vale do Rio Doce**. 2024. 217 f. Tese (Doutorado em Antropologia) — Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

FERREIRA, M. L; ANJOS, J.A. **Proposições para criação da APA da barragem de Morrinhos localizada no município de Poções/BA**. In: ANJOS, José Ângelo Sebastião Araújo dos. *Geologia ambiental e médica do estado da Bahia: avaliação de impactos ambientais (AIA): Licenciamento e Estudos Ambientais*. Salvador: EDUFBA, 2021. v. 1, cap. 9, p. 200 213. ISBN 978-65-00-23593-7.

FERREIRA, I. F. C. B.; PENNA, N. A. **Território da Violência: um olhar geográfico sobre a Violência Urbana**. GEOUSP Espaço e Tempo (Online), São Paulo, Brasil, v. 9, n. 1, p. 155–168, 2005. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2005.73979.

FIGUEREDO, T. P. **Reabilitação de espaços públicos no bairro Piedade, Ouro Preto, Minas Gerais**. 2019. 70 f. Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

FREITAS, C. M.; MARIANO, S. Acidentes de trabalho que se tornam desastres: os casos dos rompimentos em barragens de mineração no Brasil. **Fiocruz.br**, 2019.

FREITAS, S; M. **Aplicação e técnicas de quantificação da infiltração e da recarga de aquíferos do Alto Rio das Velhas**. [manuscrito] / Suzy Magaly Alves Cabral de Freitas – 2010. ii, 139f. : il. color.; grafs.; tabs.; mapas. (Contribuições às ciências da terra, Série M, v.70, n.306) ISSN: 85-230-0108-6

FIOROTT, T. H. **A morte do Uatu: impactos do desastre da Samarco/Vale/BHP sobre a sustentabilidade do povo Krenak**. 2017. 156 f., il. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) —Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

FURTADO, R. H. F. **Análise intraurbana do município de Pombal-PB com base na construção de Índice de Vulnerabilidade Social (IVS)**. Ricardo Henrique Fernandes Furtado. – Pombal, 2019.

HAFNER, A. V. **Conservação e reúso de água em edificações: experiências nacionais e internacionais**. 2007. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

GUIMARÃES. I. J. **Impacto do rompimento de uma barragem de rejeitos de minério de ferro sobre a qualidade das águas superficiais**. Estudo de caso: bacia do Rio Doce. Ufmg.br, 2015.

HAFNER, A. V. **Conservação e reúso de água em edificações: experiências nacionais e internacionais**. 2007. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Brasileiro de 2010. Ouro Preto: IBGE, 2022.

JUAREZ B. R. O Planejamento Urbano de Pequenos Municípios Com Base no Plano Diretor. **Desenvolvimento em Questão** [en línea]. 2013, 11(22), 4-34.

LASCHEFSKI, K. A. Rompimento de barragens em Mariana e Brumadinho (MG): Desastres como meio de acumulação por despossessão. **AMBIENTES**, v. 2, n. 1, p. 46, 2020.

LOMBARDI, MÔNICA. **Expansão urbana e fragilidade ambiental no vetor sudoeste da cidade de Presidente Prudente São Paulo – Brasil**. Unesp.br. Disponível em: Acesso em: 26 mar. 2025.

LUIZ, AIDEE M. M. T. **Conflitos socioambientais gerados pelo complexo hidrelétrico de Santo Antônio: uma análise nos processos de remanejamento das comunidades afetadas**. Aídee Maria Moser Torquato Luiz. – Porto Alegre, 2019. 214 p.

KOSTESKI, L. E. **Aplicação do Método dos Elementos Discretos formado por barras no estudo do colapso de estruturas**. Ufrgs.br, 2025.

MAIA, A. V. F; SILVA, T. H. C, & JORDÃO, L. R (2020). Negócios minerais e riscos no Brasil: A irracionalidade do licenciamento ambiental e a responsabilidade por desastres. **Revista de Direito e Desenvolvimento Sustentável**, 8 (2), 190–209. <https://doi.org/10.37497/sdgs.v8i2.38>.

MACHADO, I. N. **Participação e comunicação: estudo do processo de Revisão do Plano Diretor de Ouro Preto**. 2022. 91 f. Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

MAGNAGO, W; NUNES, P. C. **O uso de recursos digitais para potencializar a alfabetização**. ARACÊ, [S. l.] , v. 3, pág. 6401–6413, 2024.DOI:10.56238/arev6n3127.Disponívelem: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/1317>. Acesso em: 25 mar. 2025.

MARAJÓ, L. Uso e Ocupação do solo da Área de preservação permanente (APP) da microbacia do Córrego Barreiro, Uberaba (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 2, 2020.

MASUKI, F.Y. **A morosidade processual como ofensa aos direitos humanos: um estudo de caso sobre Mariana e Brumadinho.**[2024]. In: AGAPITO, Leonardo Simões (org.). Mineração, direito penal e desastres ambientais, p. 326. Disponível em:https://www.researchgate.net/profile/Leonardo-Agapito/publication/391016020_Mineracao_direito_penal_e_desastres_ambientais/links/6808262c60241d5140151daf/Mineracao-direito-penal-e-desastres-ambientais.pdf#page=326.

Acesso em: 5 ago. 2025.

MATTEDI, M. A., Mello, B. J., Souza, C. M. de M., Vicentainer, D. A., & Kormann, T. C. (2024). Aplicação do índice de vulnerabilidade socioambiental a desastres por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG): estudo de caso do município de Blumenau (SC). **Revista De Gestão Ambiental E Sustentabilidade**, 13(1), e23423. <https://doi.org/10.5585/2024.23423>.

MEDEIROS, T. L.; Lopes, A. J. T. (2025). **A educação indígena nos dias atuais: relato de experiência no município de Careiro Castanho, Amazonas, Brasil.** Caderno Pedagógico, 22(5), e14771. <https://doi.org/10.54033/cadpedv22n5-108>.

MELLO, G, C; AUGUSTO, C. A. (2013). Revitalização de rios urbanos. **Revista Eletrônica De Gestão E Tecnologias Ambientais**, 1(1), 131–144. <https://doi.org/10.9771/gesta.v1i1.7111>.

MELLO, B. J., SOUZA, C. M. de M., AUMOND, J. J., Silva, J. I. A. O., Langa, E. D; de Novaes, J. M. (2023). A vulnerabilidade socioambiental a desastres: : cenários e desafios para o município de Brusque (SC). **Revista De Gestão Ambiental E Sustentabilidade**, 12(2), e22638. <https://doi.org/10.5585/geas.v12i2.22368>.

MENEZES, S. K. O. **Proposta de um sistema de microdrenagem para a Universidade Federal de Alagoas - Campus Sertão (Delmiro Gouveia - AL).** 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia-Campus do Sertão, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2019.

MILANEZ, B; SANTOS, R. S. Mineração e captura regulatória: a estratégia da Anglo American em Conceição do Mato Dentro (MG), Brasil. **Revista Pós Ciências Sociais**, v. 16, n. 32, p. 69–91, 12 Jan 2020

MOREIRA, Robson. “Movimento dos Atingidos por Barragens: uma longa história de lutas, conquistas e combate às injustiças sociais”. *Observatório de Justiça e Conservação*, 22 de janeiro de 2022. Disponível em: <https://justicaeco.com.br/movimento-dos-atingidos-por-barragens-uma-longa-historia-de-lutas-conquistas-e-combate-as-injusticas-sociais/>. Acesso em: 29 jul 2025.

MOTTA, DIANA MEIRELLES; PÊGO, Bolívar. **Licenciamento Ambiental para o Desenvolvimento Urbano**. Rio de Janeiro: IPEA, 2013. 732 p. ISBN 978-85-7811-189-2.

NASCIMENTO, João Paulo Santos do. **Eventos extremos: o impacto da crise climática nas migrações no Brasil**. 2024. 32 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

NEVES-SILVA, P.; HELLER, L. Rompimento da barragem em Brumadinho e o acesso à água das comunidades atingidas: um caso de direitos humanos. **Ciência e Cultura**, v. 72, n. 2, p. 47–50, 1 abr. 2020.

NIERWINSKI, HELENA PAULA. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração**. 2010: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da UFRGS, [s. l.], 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/26869>. Acesso em: 18 mar. 2025.

NIPASSA, O. Cheias e Inundações Urbanas em Moçambique: O caso da Cidade da Matola. **Zenodo**, 2023. Disponível em: <<https://zenodo.org/records/10433497>>. Acesso em: 17 mar. 2025.

NUTHAMMACHOT, N.; STRATOULIAS, D. Multi-criteria decision analysis for forest fire risk assessment by coupling AHP and GIS: method and case study. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 12, p. 17443–17458, 1 dez. 2021.

OLEGÁRIO, K. F.; SANTOS, F. V.; MELO, M. G. de S.; MONTEIRO, R. R.; RODRIGUES, L. B. Licenciamento ambiental municipal: Análise da aplicação em Itapetinga, Bahia. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, Boa Vista, v. 17, n. 51, p. 58–83, 2024. DOI: 10.5281/zenodo.10840143.

OLIVEIRA, Simone Santos; PORTELLA, Sergio Luiz Dias; KATONA, Laura Luna. Interseccionalidade e rupturas dos modos de vida pelos rompimentos de barragem: reflexões a partir de uma mídia em aderência. **RECIIS - Revista Eletrônica de Comunicação, Informação e Inovação em Saúde**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 319-332, abr./jun. 2021.

OLIVEIRA, R. B. **Sistema de Informação Geográfica no mapeamento de vulnerabilidade e risco a deslizamentos e inundações em Ubatuba SP**. 2016. 81 f. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Geografia) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2016.

ONIAS, W. L. **As tradições gastronômicas de Ouro Preto e suas influências no turismo local**. 2023. 40 f. Monografia (Graduação em Turismo) - Escola de Direito, Turismo e Museologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>

OURO PRETO. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano e Habitação. Grupo de Trabalho da Infraestrutura de Dados Espaciais de Ouro Preto. **Relatório da Base de Dados da Infraestrutura de Dados Espaciais de Ouro Preto**. Ouro Preto, jan. 2025. Versão 1.2. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/folders/1t8Js48zay8Ay6L5TY72M9AkCvpa6l3N->. Acesso em: 17 set. 2025.

OPERÁRIO VERDE. **Funcionamento clandestino, manutenção preventiva ou modernização?**. 22 mar. 2023. Disponível em: <https://operarioverde.blogspot.com/2023/03/?m=0>. Acesso em: 7 abr. 2025.

PAIVA, C. A. **Risco e vulnerabilidade de comunidades a jusante de barragens de rejeito no licenciamento ambiental: diagnóstico e propostas de aprimoramento**. 2024. 316 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Núcleo de Pesquisas e Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.b

PESSOA, C. V. **Lama, Luto e Luta: os impactos psicossociais e o enfrentamento dos atingidos pelo rompimento da barragem da mineração em Mariana (MG)**. Belo Horizonte: Editora Dialética, 2021. 216 p. ISBN 6558777614, 9786558777618.

PELLEGRINA, G. J. **Proposta de um procedimento metodológico para o estudo de problemas geoambientais com base em banco de dados de eventos atmosféricos severos**.

2011. 184 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, 2011.

PEREIRA, I. G. S. **Vulnerabilidades, mercado de trabalho e saúde das mulheres transexuais e travestis: uma reflexão bioética**. 2024. 100 f. Dissertação (Mestrado em Bioética) — Universidade de Brasília, Brasília, 2024.

PESSOA, C, V. **Lama, Luto e Luta: os impactos psicossociais e o enfrentamento dos atingidos pelo rompimento da barragem da mineração em Mariana (MG)**. Belo Horizonte: Editora Dialética, 2021. 216 p. ISBN 6558777614, 9786558777618.

PINHEIRO; FREDERICO GARCIA SOBREIRA; LANA. Influência da expansão urbana nos movimentos em encostas na cidade de Ouro Preto, MG. **Rem Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 3, p. 169–174, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rem/a/LJY3CQ4zNXW4hKsLrfrRwVg/>>. Acesso em: 12 dez. 2024.

REIS, E.; ZÊZERE, J. L.; VIEIRA, G. T; RODRIGUES, M. L. (2003). Integração de dados espaciais em SIG para avaliação da susceptibilidade de ocorrência de deslizamentos. **Finisterra**, 38(76). <https://doi.org/10.18055/Finis15>.

RIBEIRO, A. L. **Criação de um roteiro geral para elaboração e verificação da qualidade do Estudo de Impacto Ambiental (EIA)**. 2017. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

RIBEIRO, A. J. A.; SILVA, C. A. U.; BARROSO, S. H. A. Metodologia para criação de um banco de dados georeferenciado a partir de dados geotécnicos obtidos em "as built" e projetos rodoviários. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 12, n. 2, p. 1-13, jun./dez. 2016.

RONCANCIO, D. J. et al. A vulnerabilidade social aos perigos naturais e tecnológicos em Portugal. **Natural Hazards**, v. 63, n. 2, p. 557–582, 2016.

ROCHA, C. L. G. **Análise dos fatores condicionantes de uso da bicicleta como modo de transporte em viagens de acesso ao campus Morro do Cruzeiro - UFOP**. 2024. 57 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2024.

ROCHA, C, S. **Instrumentos de planejamento e gestão de riscos aplicados a desastres com barragens de rejeitos de mineração: uma proposta metodológica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/36567>. Acesso em: 5 ago. 2025.

ROCHA, L. L. **Gestão e governança preventiva e precaucional no desastre da barragem da Samarco/Vale/BHP em Mariana/MG**. 2022. 229 p.

RÖHRLICH, M.; MISTRY, M.; RUHRBERG, M. e MARTENS, P. N. (2001). **Bauxite mining in Brazil, different viewpoints concerning environmental and sustainable development**. VI SMMT/XVIII ENTMM –Rio de Janeiro/Brazil, p.507-513.

ROQUETTI, D. R; MORETTO, E. M; PULICE, S. M. **Deslocamento populacional forçado por grandes barragens e resiliência socioecológica: o caso da usina hidrelétrica de Barra Grande no Sul do Brasil**. Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. 20, n. 3, p. 117-138, jul.-set. 2017.

ROSA, D; MAYORGA, C. (2023). **O rompimento da Barragem da Samarco: impactos na vida das mulheres em Mariana/MG**. Revista Psicologia & Saberes, 12(1). Recuperado de <https://revistas.cesmac.edu.br/psicologia/article/view/1455>

ROSIÈRE, C. A; FARID CHEMALE JR. **Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – Uma visão geral e discussão**. Geonomos, 2000. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11571>>. Acesso em: 17 maio 2024.

SALGADO, L.D. **Rios urbanos: uma abordagem sistêmica considerando saneamento e revitalização**. Rio de Janeiro: UFRJ. p.24-31. Dissertação de Mestrado, 2014.

SANTOS, L, F; **Avaliação da viabilidade técnica do reaproveitamento de rejeitos da mineração de alumina para a construção civil**. 2020. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2732/1/MONOGRAFIA_Avalia%C3%A7%C3%A3oViabilidadeT%C3%A9cnica.pdf. Acesso em 07 de março, de 2025.

SANTOS, A. R. **Vulnerabilidade social e a política de assistência social: a realidade da população em risco social.** Pucgoias.edu.br, 2023. Disponível em: <<https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/6803>>. Acesso em: 18 mar. 2025.

SANTOS, B. J. **A importância das informações estatísticas do censo do IBGE 2022 para a gestão das políticas públicas no município de Irará (Bahia).** (2025). RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar <https://doi.org/10.47820/recima21.v6i3.6240> - ISSN 2675-6218, 6(3), e636

SANTOS, J. J. **Análise de riscos estruturais e ambientais aplicada a barragem dos reservatórios Coremas - Mãe d'água.** 2024. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). - Centro de Ciências e Tecnologias Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2024.

SANTANA, R. A. **Fragilidade ambiental na bacia hidrográfica Riacho Reginaldo, Maceió – Alagoas.** 2024. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2023.

SARTORI, A. A. C. **Multicritérios na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais.** 2010. xii, 98 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2010.

SILVA, E. M. **A Importância do Ensino de Climatologia nas Ações de Defesa Civil em Regiões de Vulnerabilidade Socioeconômica de Fortaleza/CE.** 2019. Disponível em: <http://scielo.br/j/rbmet/a/LLzfDGkqB5Hbb48JrPyVgyt/>. Acesso em: 17 mar. 2025.

SILVA, G. J. B.; PEIXOTO, R. A. F; SANTANA, V. P; FERREIRA, Gabriela Andrade. **Proposta para produção de aglomerantes para construção civil a partir de resíduos gerados na indústria de alumina.** Relatório Final. Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Escola de Minas, Departamento de Engenharia Civil. Ouro Preto, 2020.

SILVA, H. N. **Usina hidrelétrica de Estreito: Zona de Autossalvamento e as narrativas de moradores frente à segurança da barragem.** 2024. 142 f. Dissertação (Mestrado em

Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.237>.

SILVA, A. S. **Resíduos sólidos drenados em sub-bacia hidrográfica urbana em Santa Maria – RS**. 2010. Universidade Federal de Santa Maria, [s. l.], 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7743>. Acesso em: 18 mar. 2025.

SCHMITT, J. **Crime sem castigo: a efetividade da fiscalização ambiental para o controle do desmatamento ilegal na Amazônia**. 2015. 188 f., il. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) — Universidade de Brasília, Brasília, 2015

SOARES, V. C. O. **Demografia dos Desastres: um estudo para populações em áreas de risco de rompimentos de barragem em Nova Lima, Minas Gerais**. 2020. 201 p. Dissertação de mestrado — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SOUZA, W. M. **Impactos socioeconômicos e ambientais dos desastres associados às chuvas cidade do Recife-PE**. Ufeg.edu.br, 2025. Disponível em: . Acesso em: 29 mar. 2025.

SPERLING, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 443 p. ISBN 85-7041-114-6.

TAMIARANA, A. E. C. **Avaliação de políticas públicas educacionais: um estudo sobre a exclusão escolar no Centro de Educação de Jovens e Adultos de Maracanaú - CEJAM**. 2024. 128 f. Dissertação (Mestrado em Avaliação de Políticas Públicas) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024.

TERRIN, K. A. P; BLANCHET, L. A. Direito de energia e sustentabilidade: uma análise dos impactos negativos das usinas hidrelétricas no Brasil. **Revista Videre**, 11(22), 47–63. (2019).. <https://doi.org/10.30612/videre.v11i22.11215>.

TUCCI, C. E. M. Urbanização e Recursos Hídricos. Bicudo, C.E.de M.; Tundisi, J.G.; SCHEUENSTUHL, M.C.B. (Org.) In: **Águas do Brasil: Análises Estratégicas**. São Paulo. Academia Brasileira de Ciências / Instituto de Botânica. 2010.

TOMAZ, L. F; ROCHA, R. B. F. G. **Uma análise dos impactos da mineração em Mariana**. 2024. 52 f. Monografia (Graduação em Serviço Social) - Instituto de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto, Mariana, 2024.

VETTORAZZI, C. A. **a AMC, por sua vez, facilita a ponderação de diferentes fatores, auxiliando na priorização e escolha de alternativa.** 2006. 151 p. Doutorado — a AMC, por sua vez, facilita a ponderação de diferentes fatores, auxiliando na priorização e escolha de alternativa, Piracicaba, 2006.

VIEIRA, R. C. M; HONORATO, L. G. F. (2023). A intervenção do assistente social na prevenção da violação de direitos de crianças em situação de vulnerabilidade social. **Revista Ibero-Americana De Humanidades, Ciências E Educação**, 9(11), 4375–4393. <https://doi.org/10.51891/rease.v9i11.12708>.

VOXMS. **Estudo revela que quatro barragens na região de Brumadinho têm alto risco de rompimento.** Disponível em: <<https://www.voxms.com.br/cidades/estudo-revela-que-quatro-barragens-na-regiao-de-brumadinho-tem-alto-risco-de-rompimento>>. Acesso em: 5 ago. 2025.

ZONEAMENTO URBANO. Set. 2010. Disponível em: https://www.ouropreto.mg.gov.br/static/arquivos/menus_areas/zoneamento-ouropreto-1.pdf. Acesso em: 7 abr. 2025.