



III MCSM

Modelagem Computacional no Sertão Mineiro



PPGMCS

Programa de Pós-Graduação em
Modelagem Computacional e Sistemas

BARRAGENS DE MINERAÇÃO A MONTANTE DE TERRAS INDÍGENAS DO CENTRO-NORTE DE MINAS GERAIS: GRAFO HIDROGRÁFICO PONDERADO POR DECLIVIDADE E FLUXO, CENÁRIOS DE RUPTURA EM CASCATA E POPULAÇÃO POTENCIALMENTE EXPOSTA

Jordana Gabriela Fernandes^{2,3} - jordana.funai@gmail.com

Heveraldo Rodrigues de Oliveira² - heveraldo.oliveira@unimontes.br

Nilton Alves Maia² - nilton.maia@unimontes.br

Laís Freitas Coutinho dos Santos² - freitaslais9@gmail.com

Samir Soares de Melo² - samirsoaresdemelo@gmail.com

Jhemerson Lincon Pereira da Silva¹ - jhemersonlincon00@gmail.com

Patrícia Takaki Neves² - patricia.takaki@unimontes.br

¹ Pesquisador indígena do povo Xakriabá.

² Universidade Estadual de Montes Claros, UNIMONTES- Montes Claros, MG, Brazil

³ Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI) – Brasília, DF, Brasil

Resumo. O Centro-Norte de Minas Gerais abarca as Terras Indígenas (TIs) Xakriabá, Kaxixó e outros territórios tradicionais, como os dos Aranãs e dos Maxacalis Itinerantes, hidrologicamente expostos a 17 barragens de rejeitos de mineração cadastradas em bases de dados oficiais, situadas nos rios Paraopeba, das Velhas e Paracatu, afluentes do São Francisco. Este trabalho modela a respectiva rede hidrográfica como grafo dirigido $G=(V, E)$ com 35 nós e 34 arestas ponderadas por tempo de trânsito cinemático (coeficiente de Manning, $n=0,040$), aplica Dijkstra para cenários de ruptura em cascata e quantifica incerteza por Monte Carlo ($N=10.000$) com probabilidades calibradas no ICOLD Bulletin 99. O volume total mobilizável é $327,4 \text{ Mm}^3$; no cenário em cascata, a frente de rejeitos atinge a TI Kaxixó em cerca de 18 h a 22 horas, a TI Xakriabá de 18 a 34,5 horas, e a foz no Atlântico em cerca de 14 dias, expondo aproximadamente 20.000 indígenas em 4 TIs e 2 Localidades Indígenas. A contribuição central é a comprovação de que empreendimentos minerários não são pontuais e o critério hidrológico baseado em grafo ponderado por Manning eficiente para complementar a metodologia de buffer euclidiano em conformidade com a Portaria Interministerial nº 60 de 2015.

Palavras-chave: Barragens de mineração, Terras Indígenas, grafo hidrográfico, ruptura em cascata, Rio São Francisco.

1. INTRODUÇÃO

Em relação à distribuição espacial das populações indígenas de Minas Gerais, a região Norte se destaca por possuir a maior concentração de indivíduos no estado, localizada na Terra Indígena (TI) Xakriabá. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE, 2023), essa TI, localizada às margens do Rio São Francisco, concentrava aproximadamente 9.852 indivíduos em 2022. De forma complementar, a TI Kaxixó, situada no curso do Rio Paraopeba, conta com cerca de 350 indígenas da etnia Kaxixó. Além dessas terras, as localidades indígenas, definidas pelo IBGE como aglomerados permanentes de habitantes declarados indígenas, somavam aproximadamente 7.430 indígenas distribuídos ao longo do corredor hidrológico que conecta o Rio Paraopeba ao Rio São Francisco e se estende até o Oceano Atlântico. Esses territórios estão hidrologicamente expostos ao conjunto de 17 barragens de rejeitos, com volume total¹ de 327,4 Mm³.

Conforme estabelecido pela Portaria Interministerial 60/2015 (Brasil, 2015), a realização do Estudo do Componente Indígena (ECI) é exigida apenas quando um empreendimento dista até 10 km de uma TI, considerando uma distância euclidiana. Nenhuma das 17 barragens mapeadas satisfaz esse critério, uma vez que todas distam entre 450 e 640 km das TIs analisadas. Contudo, essas barragens estão hidrologicamente conectadas às TIs via calha fluvial, como demonstrou Brumadinho/2019 (CPRM, 2019). Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo propor um novo critério hidrológico, baseado em grafo ponderado pela equação de Manning, como substituto ao buffer euclidiano para barragens de mineração. Proporcionando uma abordagem mais eficiente para a avaliação dos impactos ambientais dos empreendimentos sobre os territórios indígenas.

A Portaria Interministerial 60/2015 (PI 60/2015) exige Estudo do Componente Indígena (ECI) em processos de licenciamento ambiental apenas quando o empreendimento dista até 10 km de uma TI, critério operacionalizado por raio euclidiano via análise geoespacial. Nenhuma das 17 barragens mapeadas satisfaz esse critério, uma vez que todas distam entre 450 e 640 km. Contudo, essas barragens estão hidrologicamente conectadas às TIs via calha fluvial, como demonstrou Brumadinho/2019 (CPRM, 2019). Este trabalho tem como objetivo propor critério hidrológico, baseado em grafo ponderado pela equação de Manning como substituto ao buffer euclidiano para barragens de mineração; Proporcionando uma abordagem mais eficiente para a avaliação dos impactos ambientais dos empreendimentos sobre os territórios indígenas.

2. METODOLOGIA

¹ Este montante equivale a 28 vezes o volume de Brumadinho/2019 (“Histórico Do Rompimento Das Barragens Da Vale Na Mina Córrego Do Feijão | MG.GOV.BR,” n.d.).

Para construção do grafo direcionado $G=(V,E)$, foi empregado a linguagem de programação Python, com o objetivo de modelar a rede hidrográfica, composto por 35 vértices, correspondentes a municípios e confluências fluviais distribuídos ao longo do sistema hidrográfico compreendido entre Ouro Preto (MG) e a foz do rio São Francisco, em Piaçabuçu (AL), e 34 arestas direcionadas que representam os trechos de escoamento superficial.

A estrutura topológica do grafo foi referenciada à base hidrográfica Ottobacia da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), nível 4 (ANA, 2026). As informações referentes às barragens de mineração foram obtidas a partir do cadastro oficial da Agência Nacional de Mineração (ANM), por meio do Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM), atualização de 2026 (ANM, 2026). A delimitação das Terras Indígenas foi extraída pela base de dados pública da Fundação Nacional dos Povos Indígenas (FUNAI, 2026). Os dados populacionais utilizados na estimativa dos impactos potenciais foram provenientes do Censo Demográfico de 2022 (IBGE, 2023).

Para a caracterização do relevo, foi empregado o Modelo Digital de Elevação (MDE) derivado da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30 m, complementado pelos dados do projeto TOPODATA. As cotas do leito dos cursos d'água foram corrigidas com informações da rede hidrométrica HidroWeb, da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (USGS, 2026; INPE, 2026; ANA, 2026).

O peso de cada aresta é o tempo de trânsito pela equação de Manning integrada à onda cinemática (Chow, 1959):

$$v_{onda} = (5/3) \cdot (1/n) \cdot R^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

onde $n=0,040$ (rugosidade para canal natural); R é o raio hidráulico por classe de canal (pequeno: 2,5 m; médio: 5,0 m; SF médio: 9,0 m; SF inferior: 13,0 m); S é a declividade calculada a partir das cotas de leito v_2 (HidroWeb). As velocidades variam de aproximadamente 16 km/h no Paraopeba superior a aproximadamente 3 km/h no São Francisco (SF) inferior.

Foram avaliados cenários de ruptura em cascata, quando a onda atinge um nó com barragem, esta é ativada como nova fonte (Dijkstra modificado). O escore de exposição acumulada (E_j) foi definido neste estudo como a soma dos pesos (p_k) das barragens localizadas a montante de cada Terra Indígena j , identificadas por busca em grafo utilizando o algoritmo de Dijkstra reverso (DIJKSTRA, 1959).

A variabilidade dos cenários de ruptura foi representada por simulação de Monte Carlo ($N = 10.000$ iterações). Para cada barragem, a ocorrência de ruptura foi modelada como um evento aleatório com probabilidade anual dependente da sua categoria de classificação (NDE, Alto,

Médio ou Baixo), adotando-se como referência as frequências de falha reportadas pelo *ICOLD Bulletin 99* (ICOLD, 1995).

3. RESULTADOS

Foram identificadas 17 barragens de rejeitos nos rios Paraopeba, das Velhas e Paracatu hidrologicamente conectadas às TIs analisadas. A Tabela 1 consolida os dados obtidos na análise por barragem.

Tabela 1 — 17 barragens de mineração a montante das TIs do Norte de Minas (ANM/SIGBM 2026). Ej = escore de exposição acumulada; t chegada = tempo de chegada no Cenário B. — = afluente não intercepta diretamente.

Barragem	Empreendedor	Rio	Nível ANM	Vol. (Mm³)	Ej Kax.	Ej Xak.	t chegada (h)
Forquilha IV	Vale	Paraopeba	NDE	8,5	12	39	18,4
Pontal	Vale	Paraopeba	Alto	15,2	12	39	18,4
Maravilhas I	Usiminas	Paraopeba	Alto	9,2	12	39	19,0
Maravilhas III	Usiminas	Paraopeba	Alto	6,8	12	39	19,0
Paraopeba I	Vale	Paraopeba	Médio	14,0	12	39	19,0
Bonfim	Anglo American	Paraopeba	Alto	19,5	12	39	19,5
Congonhas Vale	Vale	Paraopeba	Alto	21,0	12	39	19,5
Galinheiro	CSN	Paraopeba	Médio	8,2	12	39	19,5
Grupo	Vale	Paraopeba	Médio	5,8	12	39	20,0
B3/B4	Vale	Paraopeba	Médio	4,1	12	39	20,0
Fernandinho	Usiminas	Paraopeba	Alto	7,0	12	39	22,0
Retiro Baixo	CCM	Paraopeba	Médio	8,9	26	39	18,0
Doutor	Vale	R. Velhas	Médio	7,7	—	39	28,0
Abóbora	Vale	R. Velhas	Médio	9,8	—	39	28,0
Capitão do Mato	Vale	R. Velhas	Médio	10,5	—	39	28,0
Vargem Grande	Vale	R. Velhas	Alto	18,0	—	39	28,0
Paracatu	Kinross	Paracatu	Alto	56,0	—	39	34,5
TOTAL	—	—	—	327,4	26	39	—

O trecho Paraopeba superior (entre o Quadrilátero Ferrífero e a confluência com o São Francisco) apresenta as maiores velocidades cinemáticas (aproximadamente 16 km/h), resultado da alta declividade e do raio hidráulico reduzido.

Assim, a TI Kaxixó (Ej=26) é a mais imediatamente vulnerável: 11 barragens no Paraopeba a montante, chegada em 18 a 22 horas. A TI Xakriabá (Ej=39) recebe o corredor completo via Rio das Velhas, Paracatu e São Francisco com tempo de chegada da onda de 18 a 34,5 horas.

No São Francisco inferior, a planície costeira impõe declividades residuais mínimas ($S_{\min} = 2 \times 10^{-5}$), reduzindo a velocidade para aproximadamente 3 km/h e estendendo o tempo de trânsito até a foz para cerca de 14 dias.

No cenário analisado, o corredor abrange 32 municípios entre Ouro Preto/MG e Piaçabuçu/AL, com potencial de expor $4,4 \times 10^6$ habitantes. Destes, aproximadamente 20.000 são indígenas em 4 TIs e 2 Localidades Indígenas, conforme censo de 2022.

4. CONCLUSÕES

Evidencia-se que a exposição indígena ao rompimento de barragens de mineração não é um fenômeno pontual, mas um processo distribuído ao longo de toda a bacia hidrográfica, com temporalidades distintas para cada território. Assim, o critério hidrológico aqui proposto configura-se como complemento necessário a análise de distância euclidiana, sugerido na Portaria Interministerial nº 60/2015, por incorporar a direção do escoamento, a declividade do canal e o efeito cumulativo das rupturas em cadeia.

Embora as 17 barragens analisadas distem entre 450 e 640 km das TIs do Centro-Norte de Minas Gerais (muito além, portanto, do buffer de até 10 km previsto em normativa vigente para temática análoga), o grafo dirigido ponderado pela equação de Manning demonstrou que essas estruturas permanecem conectadas por uma calha fluvial contínua, capaz de transportar uma onda de rejeitos até as TIs Kaxixó e Xacriabá em 18 horas e até a foz do rio São Francisco, no Oceano Atlântico, em aproximadamente 14 dias.

A magnitude dos números reforça essa leitura, um volume mobilizável de 327,4 Mm³, distribuído por 17 estruturas classificadas majoritariamente como Alto ou Médio risco pelo SIGBM, expõe hidrológicamente cerca de 20.000 indígenas em quatro Terras Indígenas e duas Localidades Indígenas. Ao longo de todo o corredor de 32 municípios entre Ouro Preto (MG) e Piaçabuçu (AL), a população potencialmente exposta chega a 4,4 milhões de habitantes.

Os cenários modelados restringem-se à hipótese de ruptura em cascata. Como desdobramento direto dessa pesquisa, propõe-se a modelagem de cenários adicionais de ruptura: de um lado, a ruptura isolada da barragem de maior escore de exposição acumulada a montante da TI mais vulnerável, a exemplo da barragem Retiro Baixo, no rio Paraopeba; de outro, a ruptura simultânea de múltiplas estruturas, sem o efeito de reativação sequencial da cascata.

Recomenda-se a realização de estudo etnográfico junto às comunidades tradicionais ao longo de todo o rio São Francisco, de modo a qualificar como o risco de rompimento é percebido, narrado e enfrentado no cotidiano desses grupos. De modo complementar, é necessário verificar diretamente junto às comunidades situadas nos trechos hidrográficos a jusante das barragens identificadas como mais críticas se existem Planos de Ação de Emergência construídos em conjunto com essas populações, se há ciência efetiva, por parte delas, do risco representado por estruturas situadas centenas de quilômetros a montante de seus territórios, e se houve, em algum momento, processo de consulta livre, prévia e informada a esse respeito.

Por fim, sugere-se a elaboração de representações cartográficas do grafo hidrográfico, nas quais os arcos que hoje conectam topologicamente os nós sejam substituídos por segmentos georeferenciados e calibrados à geometria real do canal, com base na hidrografia Ottobacia de nível 4 da ANA. Essa representação converteria o modelo topológico em um produto cartográfico compatível com os processos de licenciamento ambiental e com a comunicação de risco às comunidades afetadas. Espera-se, com esses desdobramentos, consolidar o critério hidrológico aqui proposto como instrumento aplicável à proteção de comunidades indígenas do Centro-Norte de Minas Gerais frente à empreendimentos minerários a montante.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FUNAI e FAPEMIG (grant OET-00243-26) pelo suporte institucional.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sistema de Informações de Segurança de Barragens — SIGBM: Classificação Nacional de Risco. Brasília: ANM, 2026. Acesso em: jun. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Portal de Metadados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH). Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/>. Acesso em: Julho de 2026.
- BRASIL. Portaria Interministerial nº 60, de 24 de março de 2015. Brasília: MMA/MJ/MinC/MS, 2015.
- CHOW, V. T. Open-channel Hydraulics. New York: McGraw-Hill, 1959.
- BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, dispõe sobre o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece toda a regulamentação referente à segurança de barragens de mineração. Brasília, DF, 2017.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, v. 1, p. 269–271, 1959.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM). Nota Técnica: Modelagem Hidrológica do Rompimento da Barragem Córrego do Feijão, Brumadinho-MG. Belo Horizonte: CPRM, 2019.
- FUNDAÇÃO NACIONAL DOS POVOS INDÍGENAS (FUNAI). Base de dados geoespaciais de Terras Indígenas. Brasília: FUNAI, 2024. WFS: <https://geoserver.funai.gov.br/geoserver/Funai/wfs>. Acesso em: jun. 2026.
- HATJE, V.; PEDREIRA, R. M. A.; DE REZENDE, C. E. *et al.* The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports*, v. 7, art. 10706, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-11143-x.
- Histórico do rompimento das barragens da Vale na Mina Córrego do Feijão | MG.GOV.BR. (n.d.). In www.mg.gov.br. Acessado em Jul. 2026, from <https://www.mg.gov.br/pro-brumadinho/pagina/historico-do-rompimento-das-barragens-da-vale-na-mina-corrego-do-feijao>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo Demográfico 2022: características gerais dos indígenas. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). TOPODATA: Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos: INPE. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/>. Acesso em: 26 jul. 2026.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). Dam Failures — Statistical Analysis. Bulletin 99. Paris: ICOLD, 1995.
- RUAN, S.; HAN, S.; LU, C.; GU, Q. Proactive control model for safety prediction in tailing dam management: applying graph depth learning optimization. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 172, p. 329–340, 2023. DOI: 10.1016/j.psep.2023.02.024.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Reston, VA: USGS. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 26 jul. 2026.