

## **Modelagem de superfície de custo aplicado ao mapeamento de áreas vulneráveis ao rompimento de barragens, Quadrilátero Ferrífero – MG**

**Surface cost modelling applied to the mapping of vulnerable areas to dam rupture, Quadrilátero Ferrífero – MG**

*Débora Joana Dutra*

Engenheira Ambiental e Sanitarista

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais na  
Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil  
[ddutra.ambiental@gmail.com](mailto:ddutra.ambiental@gmail.com)

*Amanda Fortunato Genta*

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária

[amandafgenta@gmail.com](mailto:amandafgenta@gmail.com)

*Carlos Wagner Gonçalves Andrade Coelho*

Doutor em Geografia – Tratamento da Informação Espacial pela PUC-Minas

Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Brasil  
[cwuniverso@yahoo.com.br](mailto:cwuniverso@yahoo.com.br)

### **Resumo**

A atividade minerária é um dos principais responsáveis pelo crescimento econômico do Brasil, principalmente do estado de Minas Gerais. Entretanto, devido à utilização de barragens de rejeito com alteamento a montante, alguns desastres ambientais estão associados a esse tipo de atividade nos últimos anos, como os municípios de Mariana e Brumadinho. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é mapear a vulnerabilidade da região do Quadrilátero Ferrífero, localizado no estado de Minas Gerais, em relação à ruptura de barragens. Além disso, verificamos os possíveis impactos ambientais por meio de análise da paisagem de forma que esse estudo sirva para futuros projetos que visem a conservação e a gestão proativa da paisagem. Para o mapeamento das áreas vulneráveis ao rompimento de barragens, utilizou-se a modelagem de superfície de custo e o método AHP. A análise foi realizada por meio da aplicação de um modelo espacial ponderado e análises estatísticas para verificação das áreas mais críticas em relação a possíveis impactos ambientais. Os resultados permitiram identificar possíveis áreas vulneráveis ao rompimento de barragens no Quadrilátero Ferrífero. A validação do modelo pode ser verificada por meio de análise de acidentes que já ocorreram na região, como os desastres de Brumadinho e Mariana. Conclui-se que a metodologia aplicada pode servir como subsídio para estudos futuros relativos a essa temática. Além disso, para aprimoramento do modelo sugere-se visitas a campo e análise de processos automatizados.

**Palavras-chaves:** AHP; sensoriamento remoto; mineração

### **Abstract**

Mining is one of the main factors responsible for economic growth in Brazil, especially in the state of Minas Gerais. However, due to the implantation of upstream tailings dams of rivers, several environmental disasters have been associated with this type of activity in recent years, such as those in Mariana and Brumadinho. Thus, this paper aims to map the vulnerability of the region of the Quadrilátero Ferrífero, located in the state of Minas Gerais, concerning the rupture of dams. In

addition, was verified the possible environmental impacts in the regions through landscape analysis so that this study can be used for future projects aimed at conservation and proactive landscape management. To map areas vulnerable to dams' rupture has been used cost surface modelling, and the AHP method. The analysis was carried out by applying a weighted spatial and statistical analysis to verify the most critical areas concerning possible environmental impacts. The results were allowed to identify possible areas vulnerable to the rupture of dams in the Quadrilátero Ferrífero region. The validation of the model was verified by analyzing accidents that have been already occurred in the region, such as the disasters of Brumadinho and Mariana. It was concluded that the applied methodology could serve as a subsidy for future studies related to this theme. In addition, to improve the model, field visits and automated process analysis are suggested.

**Keywords:** AHP; remote sensing; mining.

## 1. INTRODUÇÃO

Devido ao fato da mineração ser um dos pilares da economia global, esse tipo de atividade é de grande importância para o desenvolvimento de tecnologias pela humanidade. A aplicação dessas tecnologias depende principalmente da tipologia de mineral explorado, localização do empreendimento e volume do material que será extraído. A expansão da forma atual de trabalho das mineradoras ocorreu no século XX, principalmente após a segunda Guerra Mundial, e possibilitou o aumento de eventos que envolvem desastres relacionados a barragens de rejeitos e de passivos ambientais para a sociedade. Entre os anos de 1910 a 2019 foram contabilizados 250 eventos relacionados à desastres associados ao rompimento de barragens, como o de Aznalcóllar (1998) na Espanha; de Mout Polley (2014) no Canadá; de Fundão (2015) e de Brumadinho (2019) no Brasil (REIS *et al.*, 2020).

Historicamente, as barragens estão presentes ao longo da evolução da humanidade e possuem diversos fins, como armazenamento de água, geração de energia elétrica e redução de vazões de cursos d'água. Atualmente, devido aos desastres associados a esse tipo de construção, vários estudos tem sido realizados para verificar o seu potencial de dano em caso de falhas na construção dos empreendimentos. Na literatura, a principal função das barragens de mineração está associada à disposição final ou temporária dos rejeitos dessa atividade, que na maioria das vezes não possuem valor econômico e consistem no que não é aproveitado no final do processo de beneficiamento do minério, sendo eles alocados principalmente em barragens por um processo denominado como alteamento a montante. Neste tipo de construção o próprio rejeito solidificado é utilizado para a alocação dos diques. Dessa forma, apesar do menor custo econômico de implantação, é considerado um tipo perigoso de construção, sendo proibido em países como Peru e Chile (CARDOZO; PIMENTA; ZINGANO, 2017; SILVA, 2020; THOMÉ; PASSINI, 2018).

No Brasil, a mineração é uma das principais atividades econômicas, sendo responsável pela ocupação de grande parte do território e crescimento econômico do país. A atividade se iniciou

no período colonial, principalmente com a produção de ouro e diamante e foi intensificada no período imperial com a extração e produção do ferro. Neste tipo de atividade, as barragens juntamente com as pilhas de rejeitos são consideradas as maiores construções dentro desse tipo de empreendimento. Entre os estados brasileiros, Minas Gerais possui grande parte da sua atividade econômica associada a essa atividade, principalmente pela presença do Quadrilátero Ferrífero, responsável por grande parte da produção de minério de ferro do país. Entretanto, apesar do grande avanço econômico proporcionado pela atividade, o estado apresentou dois dos maiores desastres ambientais associados a rompimento de barragens, sendo eles nos municípios de Mariana, próximo ao distrito de Bento Rodrigues, e Brumadinho, na região da mina do Feijão. A principal consequência dos desastres associados à mineração é relativa aos impactos socioambientais, uma vez, que a população local é a principal impactada em termos econômicos, sociais e ambientais (PAAZ; SOUZA, 2018; THOMÉ; PASSINI, 2018).

Segundo Ribeiro & Vieira (2017), o desastre ocorrido no município de Mariana causou diversos impactos ambientais oriundos principalmente pela lama do rejeito da barragem alteada a montante do curso d'água próximo da região. O acidente foi considerado o maior desastre ambiental de Minas Gerais, tendo causados impactos diversos na região, composta principalmente por povoados e vilas, e consequências socioambientais de grande dificuldade de solução, uma vez que regiões foram soterradas pela lama do rejeito.

Dessa forma, se torna importante a criação de metodologias e processos de gestão que possibilitem a conservação e a preservação de áreas que se encontram no entorno de atividades minerárias e que utilizem a tecnologia de alteamento de barragens a montante de corpos d'água. De acordo com Sanahuja (2014), as ações de gestão podem ser alocadas dentro de alguns dos princípios do desenvolvimento sustentável, sendo eles assegurar a disponibilidade e a gestão da água, promover o crescimento econômico inclusivo, bem como recuperar e promover dos uso correto dos ecossistemas terrestres.

Uma das principais formas de diagnosticar uma área e realizar ações prognósticas se dá pelo uso de modelos e de técnicas de análise das paisagens. Essas ações podem se dar por meio de visitas a campo ou pelo uso de tecnologias, como o sensoriamento remoto, modelos matemáticos, estatística e técnicas de geoprocessamento. Os estudos apresentados por Oliveira *et al.*, (2019) e Souza Junior *et al.*, (2017) mostram como a aplicação dessas tecnologias podem ser úteis para a análise de impactos e criação de ações que visem a solução dos problemas ocasionados por desastres ambientais.

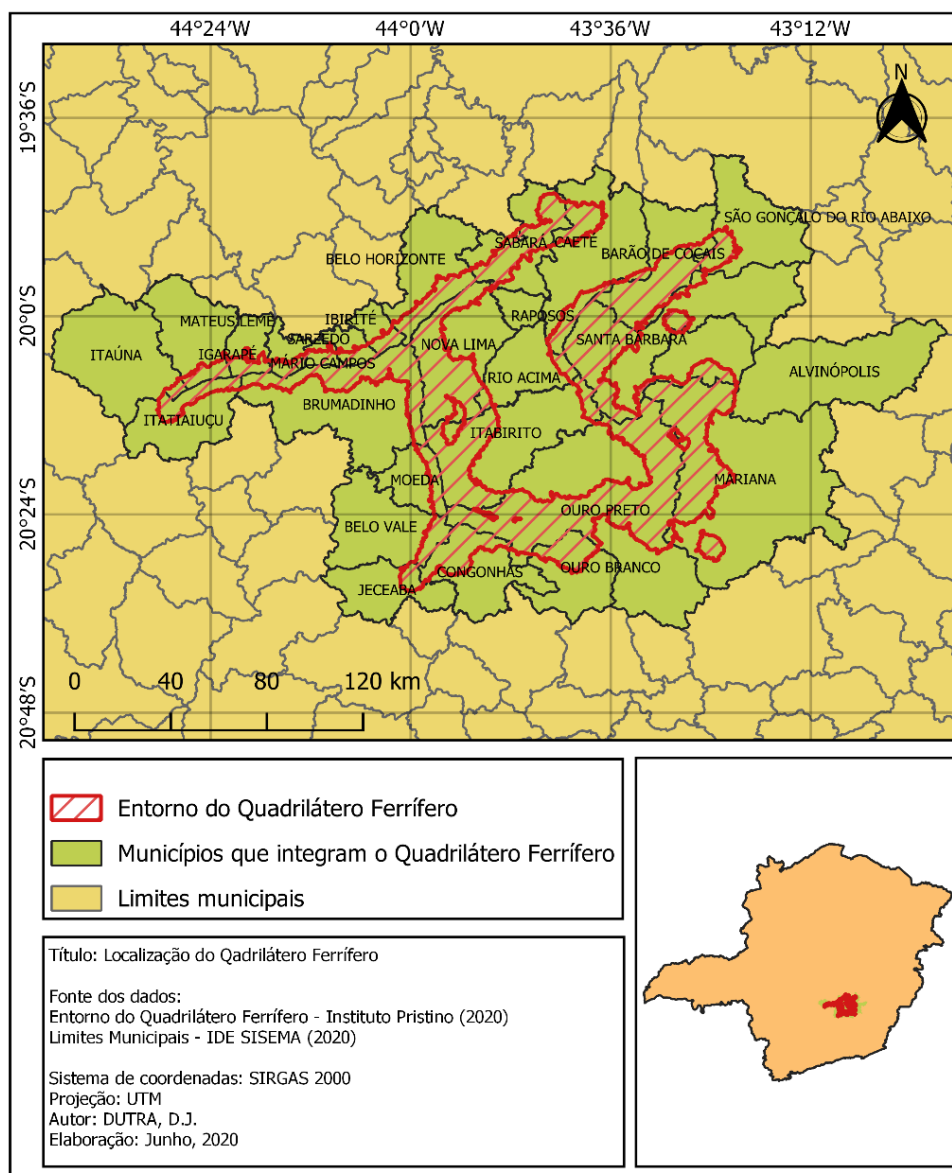
Assim, visando contribuir para a criação de medidas que possam evitar futuros acidentes relacionados ao rompimento de barragens, o objetivo do presente trabalho é mapear a vulnerabilidade da região do Quadrilátero Ferrífero (MG) em relação ao rompimento de barragens.

Além disso, verificou-se os possíveis impactos ambientais por meio de análise da paisagem de forma que esse estudo sirva para futuros projetos que visem a conservação e a gestão proativa do meio ambiente.

## **2. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

### **2.1. Estudo de caso: Áreas vulneráveis ao rompimento de barragens na região do quadrilátero ferrífero**

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) abrange 52 municípios do estado de Minas Gerais, dentre eles a capital Belo Horizonte. Abrangendo uma área de 18000 km<sup>2</sup>, a QF se caracteriza como uma região de grande importância mineral, geológica e ambiental. Em relação ao turismo ambiental, a região possui a presença de regiões como a Serra do Gandarela, Serra da Piedade, Serra do Curral, Serra do Rola Moça, Serra da Moeda, Serra do Ouro Branco e Serra do Caraça que estão, em grande parte, inseridas em regiões de preservação, por exemplo, nas Áreas de Proteção Ambiental (APA). A inserção dessas regiões em áreas de preservação se deve ao grande interesse pelas jazidas de ferro que sustenta as zonas serranas e que formam, no ponto de vista geológico, um quadrilátero, sendo esse aspecto responsável pela nomenclatura da região. A intensa presença de ferro nas jazidas, é responsável por diversos debates entre a população local, empreendimentos e órgãos de fiscalização/ legislação, principalmente após os desastres ambientais oriundos por rompimento de barragens de rejeitos (CAMARGOS; MOURA; REZENDE, 2020; CASTRO; RUCHKYS, 2017). O presente estudo foi realizado em uma porção da QF, de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup>, localizada entre as coordenadas 19°45'S e 20°48'S e 43°07'W e 44°27'W (Figura 1).



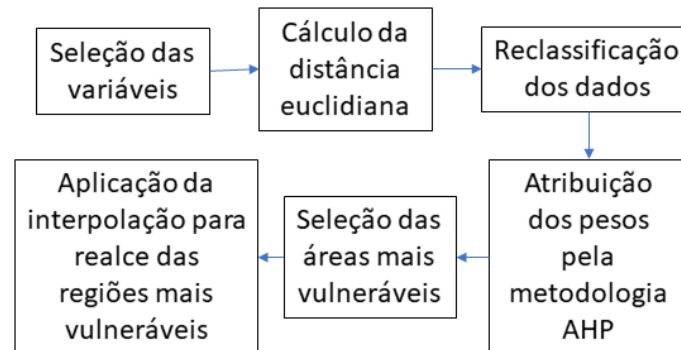
**Figura 1** - Localização do Quadrilátero Ferrífero – MG.

**Fonte:** Autores, 2020.

## 2.2. Método: Superfície de menor custo

A metodologia de menor custo é uma técnica que permite representar o custo por unidade de distância, sendo ele associado a um determinado deslocamento dentro de uma paisagem. O custo acumulado da superfície é calculado como o produto do custo e da distância entre as variáveis utilizadas dentro do modelo estabelecido, por meio da utilização de equações ponderadas para cada classe analisada. É importante ressaltar que o uso do solo está associado a caminhos que podem receber um certo valor de resistência, sendo que quanto maior o número de elementos que impedem a facilidade de movimento, maior a resistência do espaço. Assim, os valores atribuídos a cada pixel da imagem são valorados de acordo com o uso da terra podendo ser calculados de diversas formas, que variam desde a consulta de especialistas até o uso de técnicas estatísticas.(CHARDON; ADRIANSEN; MATTHYSEN, 2003; ETHERINGTON, 2016; GOODCHILD, 1977).

Para o presente estudo, aplicou-se a metodologia apresentada na Figura 2 para a construção de um modelo de superfície de custo que possibilitasse o mapeamento das áreas susceptíveis ao rompimento de barragens. Para a montagem do modelo, utilizou-se o *software* DINAMICA EGO e dados de hidrografia, altimetria, localização das barragens de rejeito e ocupação humana.



**Figura 2** - Fluxograma metodológico  
**Fonte:** Autores, 2020.

Em relação a escolha das variáveis é importante ressaltar que apesar das considerações de Cota *et al.*, (2019) e da legislação referente à Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) demonstrarem a importância do uso de dados como o potencial de danos e o grau de risco quando se estuda empreendimento minerário, é necessário ressaltar que para a metodologia proposta, o modelo não permite a inserção de variáveis qualitativas. Isso se deve ao fato de que o modelo trabalha de forma espacial, buscando atribuir pesos as variáveis conforme o cálculo da distância euclidiana. Neste aspecto, a inserção das variáveis presentes na PNSB poderia causar um sobrepeso, oriundo de duplicidade de informação no modelo, e indicar erroneamente regiões de maior vulnerabilidade. Dessa forma, em casos em que julguem de extrema importância a inclusão dessas variáveis, sugere-se o uso de outras metodologias ou uma filtragem dos dados de potencial e grau de risco dos empreendimentos antes da criação da variável barragens de rejeito.

### 2.2.1. Cálculo da distância euclidiana

A distância euclidiana é uma função que cria uma superfície em que cada célula indica um valor da distância mais curta entre a célula e a localização do objeto mais próxima, ou seja, é a distância em linha reta calculada pelo Teorema de Pitágoras em relação a cada variável utilizada (STEPHANY; MACHADO, 2019). Para a construção do modelo, é necessário a transformação dos dados vetoriais em matriciais. Dessa forma, calculou-se a distância euclidiana das variáveis barragem, aglomerados humanos e hidrografia. Essa ação visa identificar a distância de cada componente do modelo até o limite da região de estudo.

### 2.2.2. Reclassificação dos rasters

Os dados de altimetria foram convertidos em valores de declividade, em graus, e reclassificados de acordo com as diretrizes contidas no Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), conforme Tabela 1. Em relação a variável hidrografia, analisou-se dados de distância de até 1000 m, uma vez que distâncias maiores do que essas não interferem na implantação de barragens e aglomerações humanas em regiões. Dessa forma, reclassificou-se os valores de drenagem de acordo com os dados mostrados na Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

**Tabela 2.** As outras variáveis foram reclassificadas em dez classes por meio de aplicação de estatística descritiva, que variam entre 1 e 10, onde quando menor o intervalo da distância euclidiana, maior o valor atribuído a classe.

**Tabela 1:** Reclassificação dos dados de declividade.

Valores em graus	Reclassificação
0 – 5	1
5-10	3
10 – 30	5
30 – 45	7
> 45	10

**Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

**Tabela 2:** Reclassificação dos dados de hidrografia.

Distância	Reclassificação
0 – 500	10
500 - 700	7
700 - 900	5
900 - 1000	3
> 1000	1

**Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

### 2.2.3. Atribuição dos pesos (AHP)

A Analytic Hierarchy Process (AHP) é um processo que aplica uma formulação sistêmica e de múltiplos atributos para a solução de problema, sendo ela aplicada em diversas áreas como ciências ambientais, economia e administração. A aplicação desse processo é utilizada principalmente para tomada de decisão e possui uma grande flexibilidade, pois os especialistas consultados atribuem valores a cada variável do modelo e a matriz é construída de acordo com a escala presentes na Tabela 3 (LUO *et al.*, 2019; WIND; SAATY, 1980).

**Tabela 3:** Escala fundamental de Saaty (1980).

1	Igual importância	As duas classes contribuem igualmente
3	Importância pequena de uma sobre a outra	Uma classe favorece o processo em relação a outro
5	Importância grande ou essencial	A classe favorece fortemente um processo em relação à outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma classe é muito fortemente favorecida em relação à outra podendo ser demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A classe favorece um processo em relação à outra, com o mais alto grau de segurança
2,4,6,8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição intermediária entre as classes

**Fonte:** Saaty (1980).

No processo de análise de opiniões de especialistas, a tomada de decisão é elaborada por meio de um sistema de hierarquia para solução do problema. Assim, a comparação é analisada de modo a avaliar a importância dos pesos para cada variável (VEISI; LIAGHATI; ALIPOUR, 2016). A matriz e os pesos utilizados para a elaboração do modelo, resultante da análise com especialistas, estão descritos na Tabela 4.

**Tabela 4:** Matriz de Saaty (1980) elaborada com a consulta aos especialistas.

	Declividade	Hidrografia	Barragens	Cidades	Pesos
Declividade	1	9	5	3	0,53
Hidrografia	1/9	1	7	5	0,28
Barragens	1/5	1/7	1	1/3	0,06
Cidades	1/3	1/5	3	1	0,13

**Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

#### 2.2.4. Seleção das áreas mais vulneráveis

A área de vulnerabilidade de rompimento de barragem (AVRB), em cada pixel do mapa, foi calculada por meio de álgebra de mapas, dentro do modelo proposto, através da equação ponderada apresentada pela Equação 1, sendo possível a sua aplicação para diferentes variáveis geoambientais. Onde VP1, VP2 e VPn são, respectivamente, o valor de cada pixel das variáveis utilizadas no cálculo; e P1, P2 e Pn são os pesos atribuídos após a elaboração da matriz do modelo AHP.

$$AVRB = (VP1 * P1) + (VP2 * P2) + \dots + (VPn * Pn) \quad \text{Eq.1}$$

Após esse processo, selecionou-se as áreas que apresentaram maiores vulnerabilidades, com resultados entre nove e dez, e aplicou a técnica de interpolação do Inverso da Distância Ponderada (IDW) para criação das regiões que apresentam maior sensibilidade para esse tipo de desastre. De acordo com Girão, Vicens & Fernandes(2019) o IDW, trabalha com a relação que a



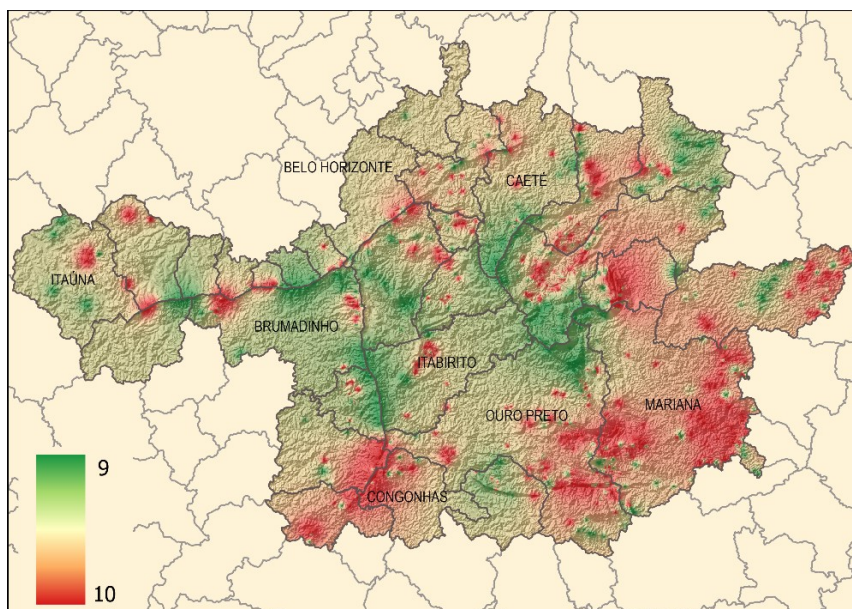
intensidade de um fenômeno, ou seja, nesse processo os locais mais próximos são considerados mais semelhantes quando comparados com os pontos mais distantes. Assim, essa técnica permite a suavização de análises ao longo de um determinado terreno, pois quanto mais distante o ponto da referência analisada, menor a sua influência na área de uma determinada região.

Utilizou-se os dados de uso do solo do projeto MapBiomass para a análise dos impactos na paisagem ocasionados em caso de rompimento nas áreas de alta vulnerabilidade. Para isso, utilizou-se o software QGis 3.10.3 para a realização da classificação da paisagem. Os rasters foram reclassificados em seis classes, sendo eles floresta, formação campestre, outras áreas, área urbana, mineração e corpos d'água.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

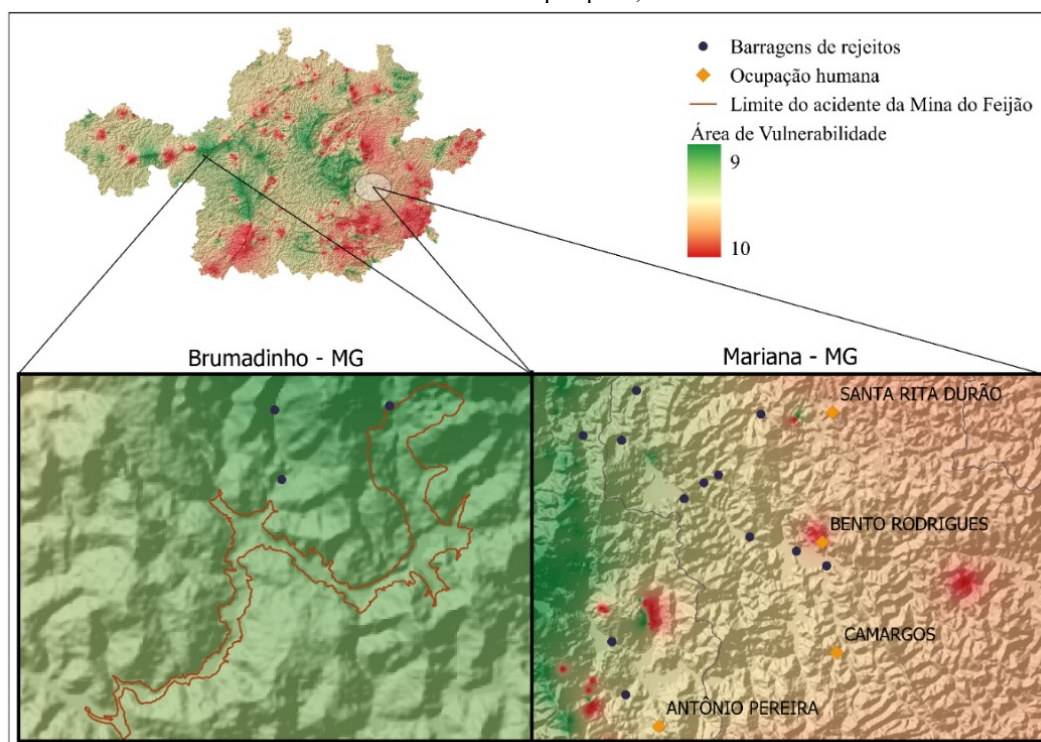
Através da aplicação do modelo de vulnerabilidade ao rompimento de barragens utilizando a metodologia AHP, foi possível identificar que o Quadrilátero Ferrífero apresentou áreas de vulnerabilidades entre nove e dez, representadas, respectivamente, pelas cores verde e vermelha na Figura 3. Essas áreas estão localizadas próximas as zonas serranas apresentando como destino de fluxo regiões de vale com diversos tipos de ocupação humana, como vilas povoados e sedes municipais.

Em relação à validação do modelo por meio da análise de áreas onde já ocorreram acidentes envolvendo rompimento de barragens (Figura 4), como nos municípios de Brumadinho e Mariana, que estão inseridos dentro das áreas de maior vulnerabilidade. Em Brumadinho, a área do desastre da mina do Córrego do Feijão está inserida na região de valor nove. A região pertencente ao desastre da barragem de Fundão, na cidade de Mariana, apresentou variação entre os valores nove e dez, sendo o distrito de Bento Rodrigues inserido no maior valor de vulnerabilidade do modelo.



**Figura 3** - Áreas que apresentaram nível de vulnerabilidade 9 e 10 após a aplicação do modelo.

**Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.



**Figura 4** - Validação do modelo por meio de análise em regiões onde já ocorreram episódios recentes de acidentes envolvendo barragens de rejeito com alteamento a montante.

**Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

A análise do uso do solo por meio da plataforma MapBiomias, Tabela 5, permitiu verificar que dentro das áreas que apresentaram grande vulnerabilidade ao rompimento de barragens, o principal impacto associado a essa questão é a supressão florestal (41,428%) e de outras áreas, formada principalmente por atividades agropecuárias (44,693%). Isso permite identificar que a principal população atingida caso ocorra esse tipo de desastre é a população que ocupa a zona rural. Freitas, Silva & Menezes (2016), em seus estudos sobre o impacto do rompimento de barragens em

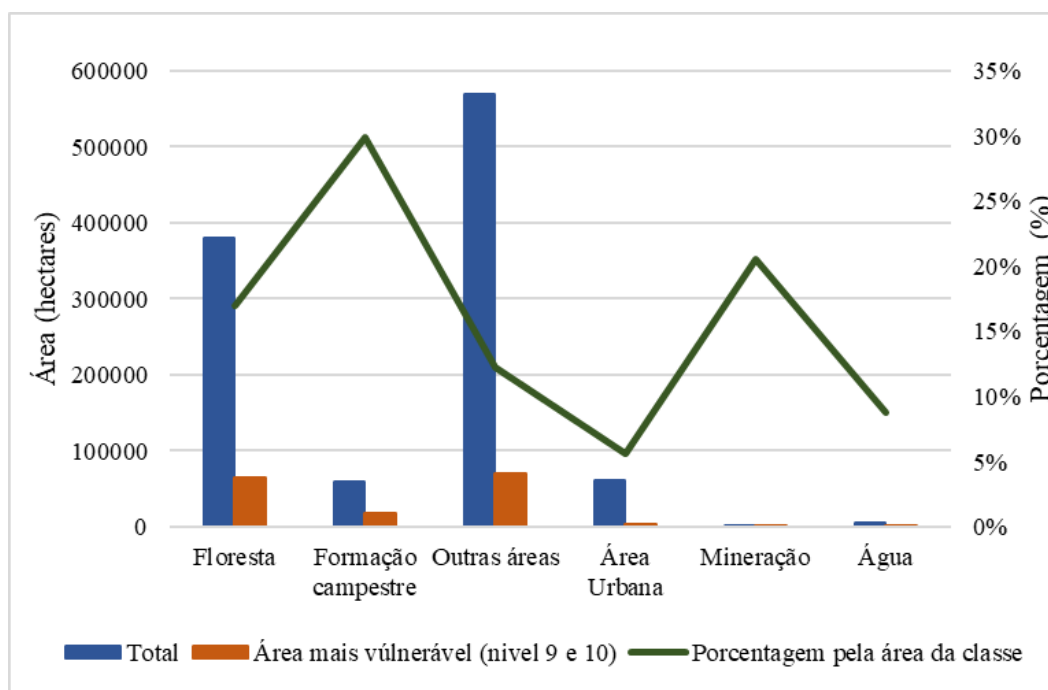
regiões rurais verificaram que a população rural é a principal impactada por esse tipo de desastre. Os autores relatam que em relação a Mariana, grande parte da população teve as suas casas e cultivos soterrados pela lama, além de diversos impactos econômicos.

**Tabela 5:** Área total e de grande vulnerabilidade de rompimento de barragens na extensão do Quadrilátero Ferrífero.

Classe	Municípios		Áreas Vulneráveis (nível 9 e 10)	
	Área (hac)	Porcentagem	Área (hac)	Porcentagem
Floresta	379377,886	35,293%	64289,667	41,428%
Formação campestre	58544,42115	5,446%	17481,282	11,265%
Outras áreas	568912,6093	52,926%	69357,641	44,693%
Área Urbana	62050,10029	5,773%	3461,6976	2,231%
Mineração	570,5452854	0,053%	117,29865	0,076%
Água	5467,732659	0,509%	477,60311	0,308%

**Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

Em relação a área total dos municípios que integram o Quadrilátero Ferrífero (Figura 5), foi possível identificar que 16,95% da área corresponde a florestas, 29,86% de formação campestre, 12,19% de outras áreas, 5,57% de área urbana, 20,55% de atividades de mineração e 8,74% de corpos d'água. Isso permite verificar que em caso de rompimentos de barragens, o principal impacto apresentado nos municípios do Quadrilátero Ferrífero é a supressão de vegetação, sendo as áreas de cerrado as principais impactadas. De acordo com Silva & Andrade (2017), pelo fato da mineração utilizar como matéria-prima recursos não renováveis, a região de implementação do empreendimento sofre uma grande alteração do seu equilíbrio ecológico e possui como principal impacto a retirada da vegetação nativa, ocasionando mudanças no crescimento florestal da área escolhida para extração mineral. Além disso, essas ações causam outras categorias de impactos ambientais associadas a poluição das águas, ar, solo e sonora.



**Figura 5** - Porcentagem de área de cada classe vulnerável ao rompimento de barragem ao longo de todos os municípios que compõem o quadrilátero ferrífero.

**Fonte:** Dados da pesquisa, 2020.

A área urbana é menos impactada devido à recomendação que esse tipo de atividade não ocorra próximo a regiões urbanizadas. Entretanto, é importante ressaltar que alguns municípios do Quadrilátero Ferrífero, como Sarzedo e Itabirito, obtiveram uma parte da expansão das suas áreas urbanas no entorno de atividades mineradoras pelo fato desse tipo de atividade ser a principal matriz econômica da região. Guimarães & Milanez (2017) mostra em seus estudos que a mineração causa diversas mudanças na paisagem, sendo ela não associada apenas à questão de supressão de vegetação. Em relação às áreas urbanas, esse tipo de atividade tende a causar a destruição de bairros para implementação de empreendimentos, causando diversos impactos principalmente em vilas e povoados. Além disso, a proximidade desse tipo de atividade a áreas populacionais pode causar diversos problemas, como doenças respiratórias e desvalorização econômica de imóveis.

A pesquisa apontou que o principal desafio para evitar futuros desastres é a aplicação de ações de gestão da paisagem que possibilitem a criação de medidas mitigadoras para evitar futuros impactos ambientais em regiões de grande vulnerabilidade ao rompimento de barragens. De acordo com Silva & Andrade (2017), os futuros impactos ocasionados pela implantação ou funcionamento de áreas minerárias podem ser diagnosticados durante o processo de planejamento do empreendimento, sendo de grande importância o reconhecimento desses cenários antes da construção do processo para que se possa evitar possíveis desastres ambientais.

#### 4. CONCLUSÃO

A pesquisa permitiu identificar possíveis áreas vulneráveis ao rompimento de barragens na região do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, por meio da aplicação da técnica de superfície de custo com utilização da análise AHP. A validação do modelo pode ser verificada por meio de análise de acidentes que já ocorreram na região, como os desastres de Brumadinho e Mariana. Essas regiões atingiram os maiores níveis de vulnerabilidade, entre nove e dez.

Em relação aos impactos ambientais identificados, em caso de desastre ambiental a principal população afetada está localizada na zona rural. Os dados de uso do solo utilizados do projeto MapBiomias permitiram analisar que grande parte das mineradoras presentes no quadrilátero ferrífero está alocada próxima a vilas e povoados. Dessa forma, grande parte das atividades nessas regiões consiste nas atividades agrícolas e pecuárias. Além disso, a principal região impactada pelo rompimento de barragens é a florestal, causado principalmente pela supressão da vegetação próxima da área de implantação dos empreendimentos.

Conclui-se que a metodologia aplicada pode servir como subsídio para estudos futuros relativos a essa temática. Outro fator importante, é a necessidade de visitas a campo e levantamento de censo para melhorias do modelo e elaboração de novas plataformas, visto que apesar da metodologia AHP ser relevante dentro da literatura científica, ela possui como aspecto negativo uma grande influência do modelador durante o processo, uma vez que para a determinação dos pesos é necessário a consulta a especialistas para a elaboração da matriz. Assim, sugere-se para aprimoramento do modelo o uso de metodologias que trabalhem de forma automática na atribuição de pesos no processo de análise de vulnerabilidade ao rompimento de barragens.

## REFERÊNCIAS

- CAMARGOS, L. M.; MOURA, A. C. M.; REZENDE, C. Análise multicritérios na identificação de classificação de importância hídrica no Quadrilátero Ferrífero - MG. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 3, p. 23–34, 2020.
- CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – Uma revisão. **Holos**, v. 8, p. 77, 2017.
- CASTRO, P. T. A.; RUCHKYS, U. A. Iniciativas sobre patrimônio geológico e temas correlatos no Quadrilátero Ferrífero, MG. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 27, n. 2, p. 314–331, 2017.
- CHARDON, J. P.; ADRIAENSEN, F.; MATTHYSEN, E. Incorporating landscape elements into a connectivity measure: A case study for the Speckled wood butterfly (*Pararge aegeria* L.). **Landscape Ecology**, v. 18, n. 6, p. 561–573, 2003.
- COTA, G. E. M.; ROSA, N. M. G.; ROMEIRO, C. E.; MENDES, I. A. S.; JUNIOR, A. P. M. Aspectos Legais da Segurança de barragens de rejeito de minério: implicações para a qualidade ambiental e uso múltiplos da água no alto rio das Velhas (MG). **GEOgraphia**, Niterói, v. 21, n. 45, p. 32-46, 2019.

- ETHERINGTON, T. R. Least-Cost modelling and landscape ecology: concepts, applications and opportunities. **Current Landscape Ecology Reports**, v. 1, n. 1, p. 40–53, 2016.
- FREITAS, C. M.; SILVA, M. A.; MENEZES, F. C. O desastre na barragem de mineração da Samarco - Fratura exposta dos limites do Brasil na resução de riscos de desastres. **Ciência e Cultura**, v. 68, n. 3, p. 25–30, 2016.
- GIRÃO, R. S.; VICENS, R. S.; FERNANDES, P. J. F. Correção altimétrica do ASTER GDEM através do método de superfícies de compensação de erros. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 2, p. 392–433, 2019.
- GOODCHILD, M. F. An evaluation of lattice solutions to the problem of corridor location. **Environment and Planning A: Economy and Space**, v. 9, n. 7, p. 727–738, 1977.
- GUIMARÃES, C. L.; MILANEZ, B. Mineração, impactos locais e os desafios da diversificação: revisitando Itabira. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 41, p. 215–236, 2017.
- LUO, Y.; LIAN, Y.; YU, K.; SUN, L. Using Analytic Hierarchy Process ( AHP ) for discussing key success factors in the sustainable development of healthy cities. **Preprints**, v. 1, 2019.
- OLIVEIRA, T. R.; OLIVEIRA, V. S.; PONTES, M.; LIBÓRIO, M. P.; HADAD, R. M.; LAUDARES, S. Metodologia para análise de danos ambientais do rompimento da barragem de Fundão em Bento Rodrigues (MG). **Holos**, v. 7, p. 1–17, 2019.
- PAAZ, C.; SOUZA, L. R. As consequências sociais do rompimento da barragem de fundão em Mariana (Minas Gerais – Brasil): uma análise por meio de pesquisa de campo. **Revista Catalana de Dret Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 1–50, 2018.
- REIS, M. O.; MOURA, A. C. M. B.; COTA, G. E. M.; JUNIOR, A. P. M. Panorama dos rompimentos de barragens de rejeiro de minério no mundo. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 30, n. 61, p. 368–390, 2020.
- RIBEIRO, L. G. G.; VIEIRA, G. C. O rompimento das barragens no município mineiro de Mariana: o desastre ambiental e a intervenção do ministério público. **Revista do mestrado em direito da Universidade Católica de Brasília**, v. 11, n. 1, p. 43–67, 2017.
- SANAHUJA, J. A. De los objetivos del milenio al desarrollo sostenible: Naciones Unidas y las metas globales post-2015. **Anuario CEIPAZ 2014-15**, n. April, p. 49–83, 2014.
- SANTOS, A. S. R. M.; MAURO, T. L.; SOUZA, L. A.; SENIGALIA, R. L. C.; CASTRO, D. A.; SANTOS, E. S. Métodos de classificação supervisionada aplicados no uso e ocupação do solo no município de Presidente Médice - RO. **Biodiversidade**, v. 18, n. 1, p. 150–159, 2019.
- SILVA, M. L.; ANDRADE, M. C. K. Os impactos ambientais da atividade mineradora. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v. 11, n. 6, p. 82, 2017.
- SILVA, I. M. Análise da atuação do Estado na fiscalização das barragens de mineração: O caso Samarco. **Revista de Iniciação Científica e Extensão da Faculdade de Direito de Franca**, v. 4, n. 1, p. 439–458, 2020.
- SOUZA JÚNIOR, T. F.; MACHADO, A. M. L.; CENTENO, J. A. S.; TEIXEIRA, S. C.; LUZ, C.

C. Método de levantamento de transferência de material rompido através de modelo físico de barragem - Aplicação da técnica de triangulação a laser. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 6, p. 1163–1174, 2017.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**, v. 18, n. 34, p. 49–65, 2018.

VEISI, H.; LIAGHATI, H.; ALIPOUR, A. Developing an ethics-based approach to indicators of sustainable agriculture using analytic hierarchy process (AHP). **Ecological Indicators**, v. 60, p. 644–654, 2016.

WIND, Y.; SAATY, T. L. Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. **Management Science**, v. 26, n. 7, p. 641-658, 1980.

Trabalho enviado em 30/1/2020  
Trabalho aceito em 22/04/21