



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA-UFBA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM SEGURANÇA DE BARRAGENS:
ASPECTOS TÉCNICOS E LEGAIS**

FABIO DE LIMA NORONHA

**SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA DAS BARRAGENS DE
MINERAÇÃO DE MG: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A MELHORIA DO
SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DE BARRAGENS**

Salvador
2020

FABIO DE LIMA NORONHA

**SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA DAS BARRAGENS DE
MINERAÇÃO DE MG: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A MELHORIA DO
SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE RISCO DE BARRAGENS**

Projeto de Pesquisa apresentado ao Curso de Especialização em Segurança de Barragens: Aspectos Técnicos e Legais, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Especialista em Segurança de Barragens

Orientador: Professor Ricardo Abrahão
Professora de Metodologia: Me. Alzira Ribeiro Mota

Salvador
2020

RESUMO

O risco de acidentes e desastres relacionados a falhas no projeto, construção, operação e manutenção de barragens constituem tema de estudo bastante recorrente. Porém, poucos são os trabalhos que relacionam falhas em barragens com processos geológicos que ocorrem no ambiente que as cercam. Paradoxalmente, são muitos os registros na literatura em que eventos pluviométricos extremos, enxurradas e movimentos de massa à montante das estruturas foram deflagradores ou contribuíram para a falha dessas barragens. A presente pesquisa busca contribuir ao tema da segurança de barragens, a partir da identificação de cenários de suscetibilidade natural à deflagração de deslizamentos, corridas e enxurradas em bacias hidrográficas com presença de barragens de mineração no estado de Minas Gerais. Para tal, realizou-se uma análise estatística e morfométrica da suscetibilidade natural à movimentos de massa e processos hidrológicos, através do emprego de ferramentas de geoprocessamento em variáveis derivadas de modelo digital de elevação - MDE e fotointerpretação, tais como inventario de cicatrizes de deslizamento, lineamentos geológicos, declividade e curvatura do terreno. O produto final é a construção de um SIG com o zoneamento da suscetibilidade a movimentos de massa de todas as barragens de mineração do estado de Minas Gerais, oriundas do cadastro oficial da ANM.

O zoneamento permitiu o cálculo de estatísticas para o universo de barragens estudado, com base na suscetibilidade geológica de seus sítios de locação. Os resultados demonstram que 38% dos terrenos no entorno das barragens possuem média a alta suscetibilidade a deflagração de deslizamentos, e que 30% das estruturas estão locadas em bacias hidrográficas com alta suscetibilidade aos processos de corridas de massa e enxurradas.

Adicionalmente, a partir dos dados extraídos deste panorama, propõe-se uma atualização da classificação das barragens prevista na PNSB, com a inclusão da suscetibilidade geológica como atributo de cálculo da Categoria de Risco.

Palavras-Chave: Suscetibilidade. Movimentos de massa. Enxurradas. Segurança de Barragens. Barragens de Mineração.

ABSTRACT

The risk of accidents and disasters related to failures in the design, construction, operation and maintenance of dams is a recurring theme of study. However, there are few works that relate failures in dams with geological processes that occur in the environment that surrounds them. Paradoxically, there are many records in the literature in which extreme rainfall events, flash floods and mass movements upstream of the structures were triggered or contributed to the failure of these dams. This research seeks to contribute to the theme of dam safety, from the identification of scenarios of natural susceptibility to the outbreak of landslides, debris flows and flash floods in hydrographic basins with the presence of tailing dams in the state of Minas Gerais. To this end, a statistical and morphometric analysis of the natural susceptibility to mass movements and hydrological processes was performed, through the use of geoprocessing tools in variables derived from the digital elevation model - DEM and photointerpretation, such as inventory of sliding scars, geological lineaments, slope and curvature of the terrain. The final product is the construction of a GIS with the zoning of susceptibility to mass movements of all tailing dams in the state of Minas Gerais, originating from the official registration of ANM.

The zoning allowed the calculation of statistics for the universe of dams studied, based on the geological susceptibility of their location. The results show that 38% of the land around the dams has medium to high susceptibility to landslides, and that 30% of the structures are located in hydrographic basins with high susceptibility to debris flow and flash flood processes.

Additionally, based on the data extracted from this panorama, it is proposed to update the PNSB's classification of dams, with the inclusion of geological susceptibility as a calculation attribute of the Risk Category.

Key words: Susceptibility. Mass movements. Flash Floods. Dam safety. Tailing dams.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Métodos de alteamento de barragens de mineração.	18
Figura 2: Barramento em anel: a) simples e b) múltiplo.	22
Figura 3: Barramento em bacia: a) simples e b) múltiplo.	22
Figura 4: Barramento em meia encosta: a) simples e b) múltiplo.	23
Figura 5: Barramento em meia vale: a) simples e b) múltiplo.	24
Figura 6: Causas de incidentes em barragens de mineração, levando em conta a representatividade de cada método construtivo.	26
Figura 7: imagem de satélite extraída do Google Earth, mostrando a configuração do vale à montante da barragem de Vajont (polígono verde), após o deslizamento de 1963.	31
Figura 8: Conceituação relacionada ao tema dos riscos geológicos, segundo Cerri e Amaral (1998).	32
Figura 9: Tipos de risco, conforme o processo causador.	33
Figura 10: áreas de atuação da suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco.	35
Figura 11: linha do tempo da legislação de segurança de barragens no Brasil até a promulgação da PNSB.	40
Figura 12: Características de uma barragem que a insere na PNSB.	41
Figura 13: Mapa da área de estudo mostrando a localização das barragens de mineração de MG cadastradas no SIGBM e seu contexto frente aos distritos minerários, conforme Machado e Silva (2010).	44
Figura 14: Distribuição das barragens de mineração, frente aos Domínios Geológico-ambientais provenientes do Mapeamento de Geodiversidade de MG (MACHADO E SILVA, 2010).	46
Figura 15: Barragens Cadastradas no SIGBM, agrupadas por UF, situação em 01/12/2020.	53
Figura 16: Municípios mapeados por CPRM e IPT através da metodologia para elaboração de cartas de suscetibilidade geológica a movimentos gravitacionais de massa e inundações (BITAR, 2014).	54
Figura 17: Fluxograma sintetizando das etapas de trabalho.	55
Figura 18: Estrutura geral de um SIG, com seus diferentes níveis e suas inter-relações.	57
Figura 19: Ferramenta <i>mosaic to new raster</i> utilizada no software ARCGIS 10.4 para a geração dos mosaicos de MDE. A seta indica o mosaico gerado para uma parte da área de estudo, abrangendo os municípios do Quadrilátero Ferrífero (MG).	59
Figura 20: Estrutura da base cartográfica elaborada para os passos seguintes de zoneamento da suscetibilidade a movimentos de massa para as barragens de mineração do estado de MG.	59
Figura 21: Sequência de procedimentos básicos desenvolvidos para o zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos. Em cinza constam os passos não executados neste estudo.	63
Figura 22: Exemplo de carta de declividades executada no software ARCGIS 10.4. A imagem retrata uma porção da área de estudo. As cores quentes indicam as maiores declividades.	64

- Figura 23: Combinação dos tipos de curvatura para determinar as formas de relevo. 64
- Figura 24: Exemplo de carta de curvatura das vertentes executada no software ARCGIS 10.4. A imagem retrata uma porção da área de estudo. Em cinza, terreno com forma côncavo-convergente; a cor vermelha classifica terrenos convexo-divergentes e; em verde, terrenos retilíneo-planares. Escala: 1:60.000. 65
- Figura 25: Exemplo de carta de densidade de lineamentos executada no software ARCGIS 10.4. A imagem retrata uma porção da área de estudo. Escala 1:50.000. 66
- Figura 26: Exemplo de cicatrizes mapeadas em áreas piloto. Fonte: Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Ouro Preto – MG (CPRM, 2014). Escala 1:10.000. 67
- Figura 27: Fatores predisponentes classificados, segundo valores da metodologia (BITAR,2014). A) densidade de lineamentos; B) curvatura das vertentes; e C) declividades. 68
- Figura 28: As classes ISD de cada fator condicionante são somadas, de modo a compor o ISD total da área de estudo. 69
- Figura 29: Relação entre área de cicatrizes e área total. 69
- Figura 30: Trecho da área de estudo mostrando o zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos, distinguindo-se as três classes pela tonalidade da cor marrom (mais escura: alta; intermediária: média; mais clara: baixa). Escala: 1:25.000. 70
- Figura 31: Porção da área de estudo mostrando bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa e enxurradas (delimitadas por traço e ponto na cor preta) e a enxurradas (tracejado em vermelho), indicadas sobre o zoneamento referente a movimentos gravitacionais de massa. Escala: 1:40.000. 71
- Figura 32: Delimitação do limite de abrangência referente à área fonte. 72
- Figura 33: Definição do limite das áreas de estudo quando não houver encostas adjacentes aos locais de interesse. 73
- Figura 34: Porção da área de estudo mostrando os pontos de cumes gerados a partir do MDE. Escala 1: 25.000. 74
- Figura 35: Porção da área de estudo mostrando o limite de abrangência das barragens (círculos pretos), com área proporcional à média das distâncias dos cumes do entorno (pontos amarelos) em relação ao ponto de cadastro SIGBM – ANM (pontos verdes). Escala 1: 40.000. 75
- Figura 36: Processo de cálculo da incidência das classes de suscetibilidade no interior do limite de abrangência das barragens, baseado em correlações de área (em hectares) bem como em proporção (%). Na tabela de atributos, cada linha representa uma barragem do cadastro da ANM. 76
- Figura 37: Porção da área de estudos mostrando as zonas de suscetibilidade geológica a deslizamentos inseridas no limite de abrangência de cada barragem de mineração. Nesta área também é possível identificar a incidência de barragens de mineração em microbacias hidrográficas suscetíveis ao processo de enxurradas. 82
- Figura 38: Representatividade de cada zona de suscetibilidade a deslizamentos em relação à área de estudo. 84
- Figura 39: Situação da localização das barragens de mineração de MG em relação à

suscetibilidade aos processos de corridas de massa e enxurradas.	85
Figura 40: Situação das barragens de mineração de MG em relação às notas de suscetibilidade a deslizamentos.	86
Figura 41: Situação das barragens de mineração de MG em relação às notas de suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas.	87
Figura 42: Localização das barragens de mineração de MG em relação aos padrões de relevo acidentados, conforme o Mapeamento de Geodiversidade de MG (MACHADO e SILVA, 2010).	88
Figura 43: Distribuição das notas de suscetibilidade a deslizamentos relacionando: a) a classificação final de risco; b) a CRI isoladamente; c) o DPA isoladamente; e d) o nível de emergência.	89
Figura 44: Distribuição das notas de suscetibilidade a corridas e enxurradas relacionando: a) a classificação final de risco; b) a CRI isoladamente; c) o DPA isoladamente; e d) o nível de emergência.	90
Figura 45: Distribuição das notas de suscetibilidade a deslizamentos relacionando os métodos construtivos das barragens de mineração.	92
Figura 46: Distribuição das notas de suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas relacionando os métodos construtivos das barragens de mineração.	93
Figura 47: Distribuição conjunta das notas de deslizamentos com as de corridas e enxurradas nas barragens: a) inseridas na PNSB e b) fora da PNSB. NC = nota de corridas e enxurradas. ND = notas de deslizamentos.	94
Figura 48: A seta indica um caso de barragem inserida em bacia suscetível a corridas, porém circundada por terrenos mais suaves, por se encontrar junto ao exutório.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais acidentes com mortes envolvendo barragens de mineração (1970-2001).	27
Tabela 2: Rupturas de barragens de rejeito ocorridas no Brasil.	28
Tabela 3: Estatística das causas de ruptura de barragens em relação aos aspectos geológicos-geotécnicos.	30
Tabela 4: Produção beneficiada dos principais minérios metálicos em MG no ano-base de 2019.	52
Tabela 5: Níveis e escalas de detalhamento aplicáveis na elaboração de mapas de zoneamento referentes a deslizamentos.	61
Tabela 6: cicatrizes de deslizamentos mapeadas nas áreas piloto oriundas dos mapeamentos feitos por CPRM e IPT.	67
Tabela 7: Padrões de relevo e amplitudes básicas, segundo critérios de classificação.	75
Tabela 8: Matriz de classificação das barragens de mineração, conforme a Portaria DNPM nº 70.389/2017.	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Síntese das vantagens e desvantagens de cada método construtivo de barragens de mineração.	19
Quadro 2: Classificação dos riscos segundo Augusto Filho et al. (1990).	34
Quadro 3: Processos do meio físico analisados na metodologia de zoneamento da suscetibilidade. A descrição de suas características se dá conforme Bitar (2014).	36
Quadro 4: Classificação americana conforme o dano potencial das estruturas. PdV = perda de vidas humanas. PeR = população em risco.	38
Quadro 5: Domínios e Unidades Geológico-ambientais e seus respectivos atributos, de acordo com Machado e Silva (2010).	47
Quadro 6: Cronograma composto para o desenvolvimento do trabalho.	56
Quadro 7: Faixas de classificação da CRI obtidas pela soma dos pontos oriundos das matrizes de Características Técnicas - CT, Estado de Conservação - EC e Plano de Segurança de Barragens – PS. Fonte: Portaria DNPM 70.389/2017.	78
Quadro 8: Faixas de classificação do DPA obtidas pela soma dos pontos oriundos de uma única matriz secundária. Fonte: Portaria DNPM 70.389/2017.	78
Quadro 9: Matriz de pontuação de Características Técnicas. Fonte: Portaria DNPM 70.389/2017.	79
Quadro 10: Proposta de matriz de pontuação de Suscetibilidade Geológica.	81
Quadro 11: Principais características geológico-ambientais de cada classe de suscetibilidade.	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALOS - *Advanced Land Observing Satellite*
ANM – Agência Nacional de Mineração
CB – Classe de Baixa Suscetibilidade a Deslizamentos
CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens
CENAD - Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRI – Categoria de Risco
CT – Características Técnicas
DCE – Declaração de Condição de Estabilidade
DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA – Dano Potencial Associado
EC – Estado de Conservação
EMPLASA - Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A.
HAND - *Height Above the Nearest Drainage*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICOLD - *International Commission on Large Dams*
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISD – Índice de Suscetibilidade a Deslizamentos
JAROS - *Japan Resources Observation System Organization*
JAXA - *Japan Aerospace Exploration Agency*
JTC1 - *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes*
MDE – Modelo Digital de Elevação
MG – Minas Gerais
MME – Ministério de Minas e Energia
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
NC - Nota de Corridas e Enxurradas
ND - Nota de Deslizamentos
PAEBM – Plano de Ação de Emergência de Barragem de Mineração
PALSAR - *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*

PNPDEC - Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

PS – Plano de Segurança

PSB – Plano de Segurança de Barragem

SG – Suscetibilidade Geológica

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SIGBM - Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração

ZAS – Zona de Autossalvamento

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	14
1. CAPÍTULO I - REVISÃO DE LITERATURA	16
1.1 BARRAGENS DE MINERAÇÃO	16
1.1.1 Métodos construtivos	17
1.1.2 Questões locacionais	21
1.2 ACIDENTES COM BARRAGENS	24
1.2.1 Acidentes com barragens de mineração	26
1.2.2 Relação dos acidentes com barragens e os processos geológicos analisados: movimentos de massa e hidrológicos	29
1.3 RISCOS GEOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS	32
1.3.1 Suscetibilidade geológica	35
1.3.2 Processos do meio físico analisados	36
1.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS E LEGISLAÇÃO	37
1.4.1 Segurança de barragens no Brasil	39
1.4.2 Impacto dos desastres com barragens de mineração na PNSB: regulamentações e atualizações	41
2. CAPITULO II – ÁREA DE ESTUDO	44
2.1 ASPECTOS GERAIS DO MEIO FÍSICO	45
2.2 MINERAÇÃO EM MG	52
3. CAPITULO III - METODOLOGIA	54
3.1 CRONOGRAMA	56
3.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E LEVANTAMENTO DO MATERIAL EXISTENTE... 56	
3.3 CONSTRUÇÃO DE UMA BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL EM FORMATO SIG... 57	
3.4 ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA	60
3.4.1 Deslizamentos	62
3.4.1.1 <i>Elaboração de mapas temáticos a partir do MDE</i>	63
3.4.1.2 <i>Fotointerpretação das feições associadas aos processos analisados</i>	66
3.4.1.3 <i>Classificação e zoneamento das suscetibilidades</i>	67
3.4.1.4 <i>Composição do pré-mapa de áreas suscetíveis</i>	69
3.4.2 Corridas de massa e enxurradas	70
3.5 CONSTRUÇÃO DE UM PANORAMA DAS SUSCETIBILIDADES DAS BARRAGENS DE MINERAÇÃO DE MG	72

3.5.1 Delimitação do limite de abrangência das barragens de mineração.....	72
3.5.2 Cálculo da incidência das classes de suscetibilidade nos limites de abrangência das barragens de mineração	76
3.6 PARAMETRIZAÇÃO DOS DADOS E PROPOSIÇÃO DA INCLUSÃO DA SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA NOS CRITÉRIOS DE CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DA CLASSE DE RISCO DA BARRAGEM	77
4. CAPITULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1 DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS DE SUSCETIBILIDADE PARAMETRIZADOS.....	85
4.1.1 Suscetibilidade geológica em relação aos atributos do sistema de classificação das barragens de mineração (Portaria DNPM 70.389/2017).....	88
4.1.2 Suscetibilidade geológica em relação ao método construtivo das barragens de mineração	92
4.1.3 Análise da distribuição conjunta das notas de deslizamentos e notas de corridas e enxurradas.....	93
5. CAPITULO V – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	96
REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE	103

INTRODUÇÃO

O risco de acidentes e desastres relacionados a falhas no projeto, construção, operação e manutenção de barragens constituem tema de estudo bastante recorrente. Porém, poucos são os trabalhos que relacionam a segurança de barragens com os processos geológicos que ocorrem no ambiente que as cercam. Paradoxalmente, não são raros os registros na literatura em que eventos pluviométricos extremos, enxurradas e movimentos de massa à montante ou no entorno das estruturas foram deflagradores ou contribuíram para a falha dessas barragens, por exemplo: barragem Vajont (Itália), barragem do Rio Ohio (EUA) e barragem Austin (EUA) (JANSEN, 1983).

Esta pesquisa tem como **objetivo geral** a identificação dos cenários de suscetibilidade natural à deflagração de deslizamentos, corridas de massa e enxurradas em microbacias hidrográficas com presença de barragens de mineração no estado de Minas Gerais, contribuindo, assim, para o aumento da segurança dessas estruturas.

A escolha do estado de Minas Gerais como área de estudo **justifica-se** por ser este o local que concentra 42% de todas as barragens de mineração no Brasil, somando 365 estruturas, conforme cadastro da ANM, autarquia responsável pela fiscalização destas barragens. Além disso, o estado foi o palco da maior parte dos acidentes e desastres envolvendo este tipo de barragem, como, por exemplo, a barragem de Fundão em Mariana (2015) e a barragem B1 em Brumadinho (2019).

O termo suscetibilidade pode ser descrito como a propensão natural dos terrenos ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico (FELL, 2013 *apud* BITAR, 2014). O conhecimento destes dados é tradicionalmente utilizado no planejamento do uso e ocupação do território, bem como no controle da expansão urbana.

No caso das barragens de mineração, a identificação da suscetibilidade geológica permitirá a construção de um panorama inédito dos terrenos nos quais estas estruturas estão inseridas, compartimentando-os em 3 classes de suscetibilidade (alta, média e baixa) a processos de movimentos de massa e hidrológicos, conforme a metodologia de mapeamento proposta por CPRM e IPT (BITAR, 2014).

Os **objetivos específicos** perseguidos são: (a) construção de um SIG com os dados de suscetibilidade geológica das 365 barragens de mineração de MG; (b) a produção de estatísticas sobre a suscetibilidade geológica das barragens de mineração no estado de MG; e (c) a proposição da inclusão da suscetibilidade geológica como critério de cálculo na classificação de risco das barragens de mineração na PNSB, através da geração de uma matriz com notas relacionadas ao grau de suscetibilidade a deslizamentos, corridas de massa e enxurradas.

A relevância dos dados produzidos nesta pesquisa traduz-se na possibilidade de sua utilização por gestores de barragens, como subsídio na avaliação de cenários de riscos a serem considerados no Plano de Segurança das estruturas (PSB) e nos Planos de Ação de Emergência (PAEBM). Aos órgãos fiscalizadores, a sua utilização pode se dar como ferramenta de gestão de segurança de barragens, servindo, por exemplo, como base para a formulação de exigências aos empreendedores, referentes à execução de investigações geotécnicas e hidrológicas detalhadas nas áreas identificadas como de média a alta suscetibilidade, incluindo medidas preventivas ou mitigadoras.

1. CAPÍTULO I - REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo dar-se-á a reunião e análise de publicações sobre tópicos que formam o arcabouço conceitual desta monografia, a saber: generalidades sobre barragens, barragens de mineração, acidentes com barragens, segurança de barragens e legislação, e riscos geológicos e hidrológicos aplicados à temática das barragens.

1.1 BARRAGENS DE MINERAÇÃO

Primordialmente, as barragens foram concebidas como fruto da necessidade do homem de reservar, fornecer ou controlar os recursos hídricos. Trata-se de uma estratégia adotada há milhares de anos. No fim do século XIX, desenvolveu-se a tecnologia suficiente para tornar as barragens construções para a geração de energia hidrelétrica (OLIVEIRA, 2018). Nesse sentido, as barragens, como obra tecnológica humana, **são fins** para a execução de uma gestão hídrica com dupla função: controle do recurso água e obtenção de eletricidade.

No caso da mineração, como ficará evidente a seguir, a construção de barragens constitui apenas **um meio** para o desenvolvimento desta atividade antrópica, mais precisamente no tocante à disposição dos seus resíduos, dentre os quais se destacam os estéreis e os rejeitos. As rochas ou solos que ocorrem externa ou internamente ao corpo do minério, normalmente sem valor econômico, recebem o nome de estéreis e são comumente dispostos em pilhas (OLIVEIRA, 2018). Os rejeitos, por sua vez, são resíduos resultantes do beneficiamento do minério, o qual comumente envolve a utilização de água no processo, gerando uma polpa ou lama geralmente com granulometria que varia de areia a silte ou argila (BOSCOV, 2008).

Nos primórdios da mineração não havia uma preocupação ambiental com a disposição desses rejeitos, sendo estes muitas vezes descartados diretamente no solo, em áreas próximas à mina. Com o desenvolvimento tecnológico da atividade minerária houve o aumento da quantidade de rejeitos produzidos e conseqüentemente surgiu a necessidade de removê-los das áreas de produção para outros locais, geralmente próximos a cursos d'água. E, para que ali pudessem ser depositados e contidos, tornou-se necessária a construção de barramentos (IBRAM, 2016).

Estas barragens representam então, uma categoria especializada desse tipo de estrutura, dotada de método construtivo e porte distintos e funcionamento próprio em comparação com as barragens hidrelétricas e de controle hídrico.

A Portaria nº 70.389 de 17 de maio de 2017 do então Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), hoje Agência Nacional de Mineração (ANM), define barragem de mineração em seu artigo 2º, inciso II como:

II. Barragens de Mineração: barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais.

1.1.1 Métodos construtivos

A construção das barragens de mineração pode se dar com a utilização de material de empréstimo ou com o próprio rejeito a ser disposto na barragem.

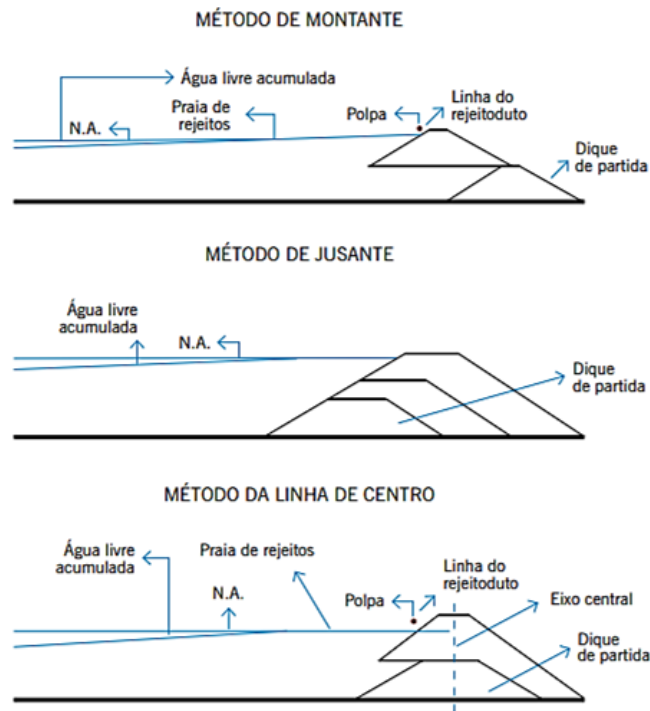
Boscov (2008) detalha que inicialmente constrói-se o dique de partida de material de empréstimo, o qual deve ter uma capacidade de retenção de rejeitos para dois ou três anos de operações de lavra. A polpa oriunda do processo de beneficiamento é descarregada ao longo do perímetro da crista do dique, formando uma praia. A descarga pode ser feita com ciclones ou espigotes.

Como os rejeitos tem uma distribuição granulométrica ampla, as partículas mais grossas e mais pesadas (geralmente tamanho areia) sedimentam-se mais rapidamente, ficando nas zonas perto do dique, e as partículas menores e menos densas ficam em suspensão e são transportadas para as zonas centrais da bacia de sedimentação.

Ao final da vida útil do dique de partida, a sua capacidade de contenção chega ao limite, motivo pelo qual são realizados alteamentos, os quais permitem a continuidade do uso da barragem.

Existem três métodos utilizados de alteamento: método para montante, método de linha de centro e método para jusante, referindo-se à direção em que os alteamentos são feitos em relação ao dique de partida (figura 1).

Figura 1: Métodos de alteamento de barragens de mineração.



Fonte: (IBRAM, 2016).

No alteamento de montante o rejeito é lançado no dique em direção ao montante de sua linha de simetria, formando uma praia de rejeitos, que será utilizada como base para o próximo alteamento, conforme esquematizado na figura 1. A principal vantagem do método de montante é o menor volume de material necessário para os alteamentos e a menor área ocupada pela estrutura, o que o torna o método mais econômico para as mineradoras. Todavia, esse método apresenta baixo controle construtivo, tendo em vista que o alteamento é feito sobre material não compactado. Em fase de operação, esse tipo de construção é criticado por apresentar alto risco de ruptura por liquefação e por dificultar a implantação de sistema de drenagem (ARAÚJO, 2006).

O método de jusante é assim chamado porque, nos alteamentos, o eixo gravitacional da barragem se desloca para jusante. Nesse método os rejeitos são ciclizados e somente é utilizada a fração mais grossa no alteamento, a qual é compactada sobre o dique de partida, quando as

condições de umidade da zona o permitam. É o método com o melhor controle estrutural, pois garante que todo o corpo do barramento esteja devidamente compactado (BOSCOV, 2018). Em outras palavras, proporciona maior segurança graças aos alteamentos controlados, isto é, com disposição de fração grossa, dos rejeitos a jusante, compactação e sistema contínuo de drenagem. Contudo, esta alternativa apresenta maior custo construtivo, considerando especialmente a quantidade e o tipo de material utilizado (ARAÚJO, 2006). Na figura 1 é representado esquematicamente o método de jusante.

O método de alteamento intermediário seria o método de linha de centro, que possui a característica tanto de alteamento para montante quanto para jusante. Isso porque o alteamento é realizado de forma vertical em cima do dique de partida (como no método para jusante) e, ainda, utiliza-se menos material, como no método de alteamento para montante. Tal configuração faz com que o alteamento tenha como parte da fundação o dique anterior (material compactado) e a outra parte o rejeito não compactado (figura 1).

O quadro 1 sumariza as principais vantagens e desvantagens de cada método, segundo França *et al.* (2010).

Quadro 1: Síntese das vantagens e desvantagens de cada método construtivo de barragens de mineração.

	Vantagens	Desvantagens
Montante	<ul style="list-style-type: none"> • menor custo de construção; • maior velocidade de alteamento; • menores volumes na etapa de alteamento; • pouco uso de equipamentos de terraplenagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • menor coeficiente de segurança, em função da linha freática, em geral, situada muito próxima ao talude de jusante; • a superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados, porém não devidamente compactados; • há possibilidade de ocorrer <i>piping</i>, resultando no surgimento de água na superfície do talude de jusante, principalmente quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados; • há risco de ruptura provocado pela liquefação da massa de rejeitos, por efeito de sismos

		naturais ou vibrações causadas por explosões ou movimentação de equipamentos.
Jusante	<ul style="list-style-type: none"> • maior segurança por alteamento controlado; • menor probabilidade de <i>piping</i> e de rupturas horizontais, em consequência da maior resistência ao cisalhamento; • maior resistência a vibrações provocadas por sismos naturais e vibrações em razão do emprego de explosivos nas frentes de lavra; • instalação de sistema de drenagem e impermeabilização, à medida que se processa o alteamento. 	<ul style="list-style-type: none"> • custo mais elevado; • maior volume de material a ser movimentado e compactado; • menor velocidade de alteamento da barragem; • não possibilita a proteção com cobertura vegetal e tampouco drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos no talude de jusante; • requer o emprego de hidrociclones e a construção de enrocamento de pé para conter o avanço do <i>underflow</i>; • requer a construção de dique a jusante para contenção dos materiais do <i>underflow</i>.
Linha de Centro	<ul style="list-style-type: none"> • facilidade construtiva; • o material para o alteamento pode vir de áreas de empréstimo, estéril ou do <i>underflow</i> dos hidrociclones; • permite o controle da linha freática no talude de jusante. 	<ul style="list-style-type: none"> • a área a montante é passível de escorregamentos; • há necessidade do uso de hidrociclones; • este método, além do dique inicial, requer um enrocamento de pé para conter o avanço do <i>underflow</i>; • não permite tratamentos da superfície do talude de jusante.

Modificado de FRANÇA *et al.* (2010).

Considerando a importância do método construtivo na segurança de barragens, a ANM, órgão responsável por regular e fiscalizar o tema para as barragens de mineração, define, na Resolução nº 13/2019, art. 2º, parágrafo único, o seguinte:

I - método "a montante": a metodologia construtiva de barragens onde os maciços de alteamento, se apoiam sobre o próprio rejeito ou sedimento previamente lançado e depositado,

estando também enquadrados nessa categoria os maciços formados sobre rejeitos de reservatórios já implantados;

II - método "a jusante": consiste no alteamento para jusante a partir do dique inicial, onde os maciços de alteamento são construídos com material de empréstimo ou com o próprio rejeito;

III - método "linha de centro": método em que os alteamentos se dão de tal forma que o eixo da barragem se mantém alinhado com o eixo do dique de partida, em razão da disposição do material construtivo parte a jusante e parte a montante em relação à crista da etapa anterior;

Devido à menor segurança do método a montante comprovada pelos acidentes de grandes proporções envolvendo esse tipo de construção no Brasil, a Resolução nº 13/2019 no caput do art. 2º faz a seguinte proibição:

Art. 2º Fica proibida a utilização do método de alteamento de barragens de mineração denominado "a montante" em todo o território nacional.

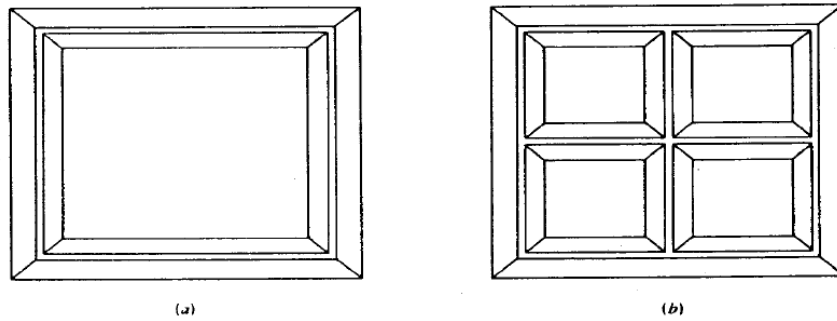
1.1.2 Questões locacionais

Diferentemente das barragens convencionais, cujo projeto é antecedido por uma fase de inventário ou plano diretor para a seleção dos melhores sítios barráveis em função da geologia e da topografia, para só então, depois de muito estudo de viabilidade eleger o melhor local (COSTA, 2012), as barragens de mineração padecem pela rigidez locacional inerente à atividade minerária, limitando as possibilidades locacionais de sua construção.

Assim, geralmente a configuração do barramento vai depender basicamente da topografia disponível no entorno da mina (BOSCOV, 2008). As configurações mais comuns são: anel, bacia, meia encosta e vale.

O barramento em anel é apropriado para terrenos planos, onde faltam depressões topográficas naturais. Requer grande volume de aterro em relação ao volume represado. As contribuições externas da bacia hidrográfica são eliminadas, em virtude de sua configuração fechada (figura 2).

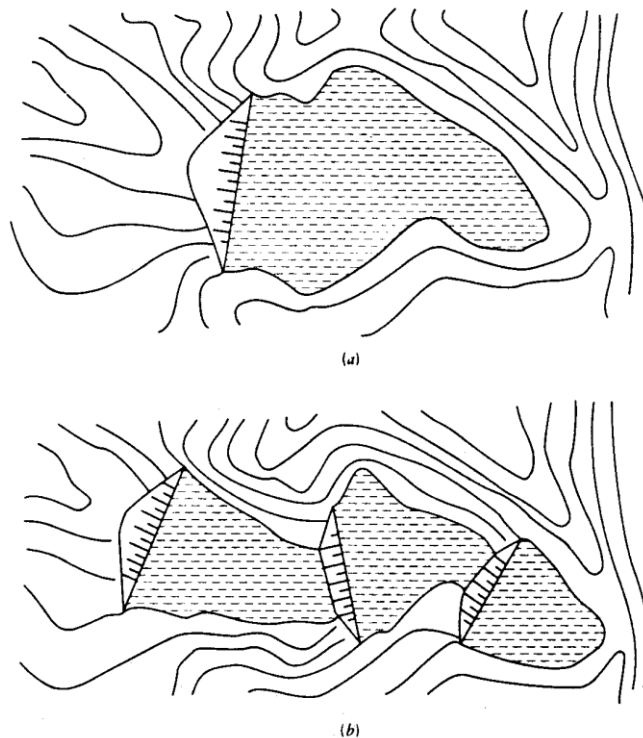
Figura 2: Barramento em anel: a) simples e b) múltiplo.



Fonte: (BOSCOV, 2008).

O barramento em bacia não difere no arranjo das estruturas convencionais para represamento de água, uma vez que os rejeitos são confinados por uma barragem perpendicular ao fluxo da bacia, localizada em um talvegue. Pode ser simples ou múltiplos, conforme ilustrado na figura 3.

Figura 3: Barramento em bacia: a) simples e b) múltiplo.

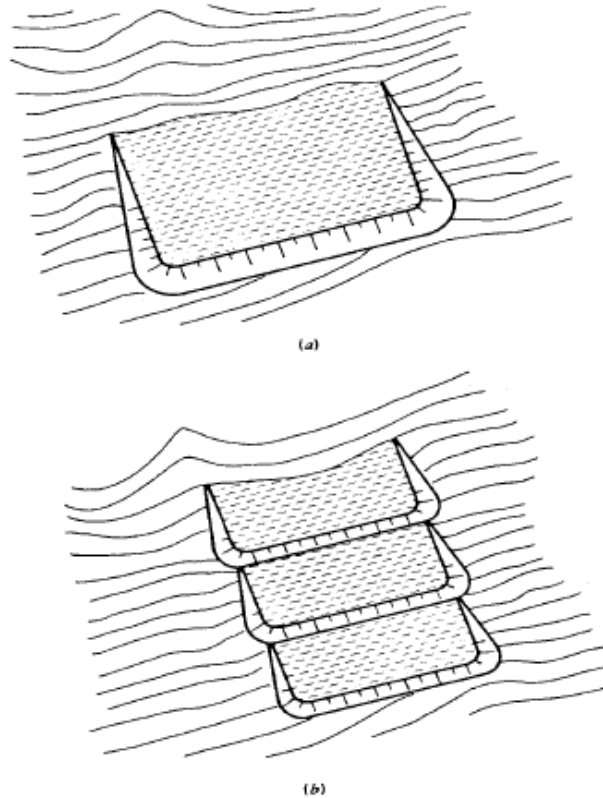


Fonte: (BOSCOV, 2008).

O represamento a meia encosta é usado quando não há drenagem natural na zona de deposição de rejeitos e os taludes mais íngremes da encosta tem inclinação inferior a 10%. O volume de

aterro para a confecção dos diques pode ser excessivo em relação ao volume de armazenamento de rejeitos. Também pode ser simples ou múltiplo (figura 4).

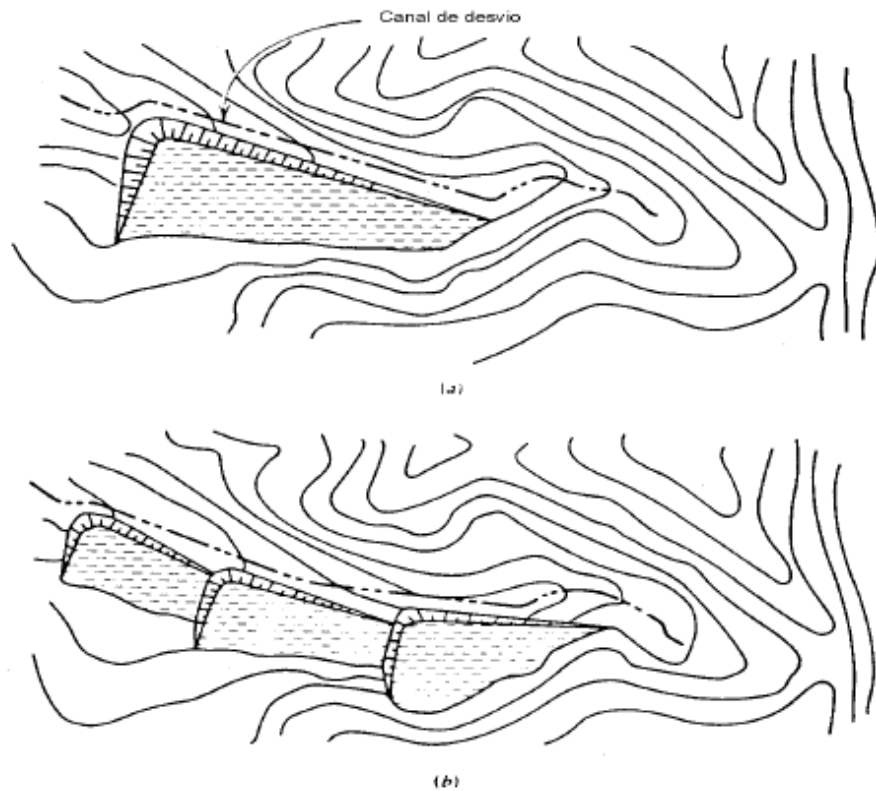
Figura 4: Barramento em meia encosta: a) simples e b) múltiplo.



Fonte: (BOSCOV, 2008).

Da combinação dos represamentos em bacia e a meia encosta, surge o barramento em vale, utilizado em vales amplos, quando existem áreas adequadas para a construção da estrutura nas margens, porém sem interferência com o curso d'água (figura 5). O dique de partida deve ser reforçado e possuir proteção em seu pé, já que as cheias do curso d'água podem provocar erosão e afetar a estabilidade da obra.

Figura 5: Barramento em meia vale: a) simples e b) múltiplo.



Fonte: (BOSCOV, 2008).

1.2 ACIDENTES COM BARRAGENS

O estudo dos aspectos envolvidos nos acidentes com barragens é de suma importância para o entendimento dos riscos e consequências decorrentes. Independentemente do uso a que se destinam essas estruturas, o ponto em comum é que todas armazenam energia potencial, capaz de provocar acidentes ou desastres na região de jusante, caso sua carga seja liberada repentinamente por ocasião de uma ruptura.

Machado e Azeez (2018) destacam a necessidade de se identificar a linha tênue que diferencia os termos incidente e acidente. Segundo os autores, o primeiro termo se refere a um episódio imprevisto que altera o desenrolar dos acontecimentos, mas sem consequências desastrosas, enquanto que o segundo se refere a um acontecimento inesperado e desagradável, com consequências graves e lamentáveis.

A recém-publicada Lei nº 14.066 (BRASIL, 2020), a qual altera a PNSB, também faz a conceituação dos termos em seu artigo 2º, aplicando-os ao contexto das barragens:

XII - acidente: comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável do conteúdo do reservatório, ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa;

XIII - incidente: ocorrência que afeta o comportamento da barragem ou de estrutura anexa que, se não controlada, pode causar um acidente;

Outra novidade da referida lei é a introdução do conceito de desastre, ainda no artigo 2º, da norma:

XIV - desastre: resultado de evento adverso, de origem natural ou induzido pela ação humana, sobre ecossistemas e populações vulneráveis, que causa significativos danos humanos, materiais ou ambientais e prejuízos econômicos e sociais;

A inclusão deste último termo se deu em resposta aos dois recentes desastres brasileiros com barragens de mineração: barragem de Fundão, em Mariana, e barragem B1, em Brumadinho. Ambos os desastres ocorridos no estado de MG.

Medeiros (1999) aponta que acidentes em barragens têm origem em algum tipo de anormalidade, a qual, se detectada, pode ser diagnosticada como capaz de resultar em acidente, ou até mesmo provocar ruptura. Uma vez deflagradas, as rupturas sempre provocam grandes impactos negativos à infraestrutura regional e às populações que ocupam o vale à jusante, superando a capacidade de resiliência dos elementos expostos. As consequências podem envolver a perda de vidas humanas e danos ambientais, o primeiro é irreparável e o segundo é de difícil recomposição.

Entretanto, foi somente a partir da década de 1950, após uma série de desastres envolvendo estas estruturas, que o tema de segurança de barragens começou a ganhar importância entre a comunidade técnica e órgãos governamentais.

Em 1973, o *International Commission on Large Dams (ICOLD)* compilou uma estatística dos modos de ruptura de barragens entre 1900 e 1973. Assim, para os diferentes tipos de barragens, o galgamento correspondeu a um percentual de 34% das causas de ruptura, falhas na fundação representaram 30%, *piping* e percolação somaram 28%, e os 8% restantes se deram por causas diversas. Para o caso específico de barragens de terra e enrocamento, este estudo apontou que

a maior incidência das rupturas se deu por *piping* e percolação (38%), seguido pelo galgamento (35%).

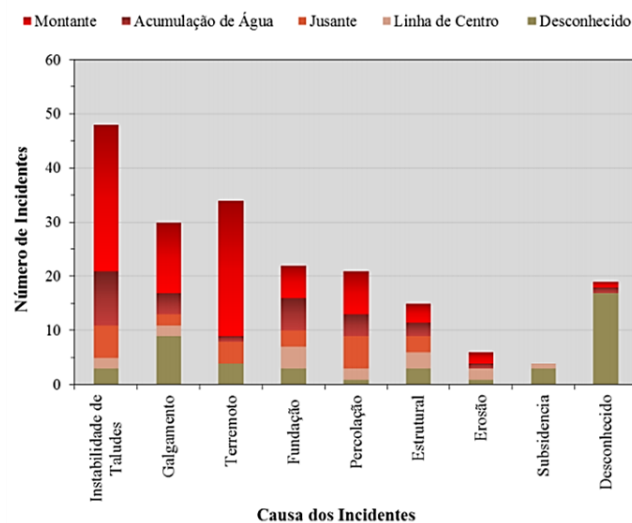
Jansen (1983), em publicação do *Bureau of Reclamation* sobre acidentes com barragens sob o título “Barragens e Segurança Pública” (*Dams and Public Safety*) concluiu que 59% dos acidentes foram devido a causas geológico-geotécnicas, 23% se deram por causas hidrológico-hidráulicas e 12% provocadas por falhas de construção. O restante das causas apontadas refere-se a atos de guerra (6%), operação inadequada (3%) e terremotos (1%).

Pereira (2020), em sua publicação “Acidentes e Rupturas de Barragens”, na qual faz uma revisão e compilação sobre o tema, ressalta que a complexidade das questões geológico-geotécnicas e hidrológicas possuem a maior contribuição nos acidentes com barragens.

1.2.1 Acidentes com barragens de mineração

ICOLD (2001), em seu boletim nº 121, apresenta uma relação de mais de 400 registros de falhas em barragens de rejeitos espalhados pelo mundo. O estudo aponta que as principais causas de incidentes e falhas para barragens de mineração são instabilidade de taludes, galgamentos e terremotos. O estudo também comparou os diferentes métodos construtivos e concluiu que o alteamento para montante possui a maior contribuição no número das falhas e incidentes relacionados a estas três principais causas (figura 6).

Figura 6: Causas de incidentes em barragens de mineração, levando em conta a representatividade de cada método construtivo.



Fonte: (ICOLD, 2001 *apud* MACHADO E AZEEZ, 2018).

Com base nos dados deste boletim do ICOLD, CBDB (2012) em sua publicação “Barragens de Rejeito no Brasil”, organizou uma listagem dos acidentes de barragens de mineração com maior número de mortes registradas no período de 1970 até 2001. (tabela 1).

Tabela 1: Principais acidentes com mortes envolvendo barragens de mineração (1970-2001).

ANO	BARRAGEM / PAÍS	NUM. DE MORTES
1985	Stava / Itália	269
1972	Buffalo Creek / USA	125
1970	Mufilira / Zâmbia	89
1994	Merriespruit / África do Sul	17
1974	Bakofeng / África do Sul	12
1995	Placer / Filipinas	12
1986	Fernandinho / Brasil	7
2001	Rio Verde / Brasil	5
1978	Arcturus / Zâmbia	1

Fonte: (CBDB, 2012).

No período considerado, o Brasil já fazia parte desta listagem com dois casos, a barragem de Fernandinho e a barragem Rio Verde, ambas de contenção de rejeitos da mineração de ferro e localizadas no estado de MG.

Em uma compilação mais recente, Fonseca (2019) sumariza os principais acidentes com barragens de mineração ocorridos no Brasil (tabela 2).

Tabela 2: Rupturas de barragens de rejeito ocorridas no Brasil.

Mina/Projeto-Localização	Tipo de Minério	Ano do Acidente	Mortes	Descrição
VALE, Barragens do Feijão-Ferro, Brumadinho-MG	Fe	25/01/2019	207	A barragem da Mina Córrego do Feijão rompeu, matando centenas de pessoas e contaminando o Rio Paraopeba.
Samarco (VALE e BHP) - Fundão/Minas Gerais	Fe	5/11/2015	19	A barragem de Fundão rompeu e liberou aproximadamente 56 milhões de m ³ de rejeito.
Mineração Herculano - Ferro, Itabirito/Minas Gerais.	Fe	10/9/2014	3	Um grande volume de rejeito foi despejado sobre veículos e trabalhadores.
Mineração Rio Pomba Cataguases, Mirai/Minas Gerais (Indústrias Químicas Cataguases).	Al	10/1/2007	0	A lama chegou a 4.000 residências na Zona da Mata e o abastecimento de água foi comprometido nas cidades de Minas Gerais e Rio de Janeiro.
Mineração Rio Pomba Cataguases, Mirai/Minas Gerais (Indústrias Químicas Cataguases).	Al	03/2006	0	O rompimento liberou 400.000,00 m ³ de litros de lama em direção ao município do Rio de Janeiro.
Mineração Rio Pomba Cataguases, Mirai/Minas Gerais (Indústrias Químicas Cataguases).	Al	2003	0	1.002,00 m ³ de resíduos tóxicos foram despejados no Rio Pomba e Rio
Sebastião das Águas Claras, Nova Lima/Minas Gerais.	Fe	22/06/2001	2	2 mortes, 3 desaparecidos e 8km de rejeitos descendo pelo Córrego Taquara afetando uma área de 40 hectares.
Mineração Serra Grande - Crixas/Goiás.	Au	01/02/1994	0	
Pico de São Luís, Minas Gerais.	Fe	02/10/1986	0	
Itabirito, Minas Gerais.	Fe	01/5/1986	7	
TOTAL= 10 Acidentes			238 mortes	

Fonte: (FONSECA, 2019).

Os dois acidentes mais recentes elencados na tabela 2 colocaram Minas Gerais e o Brasil como palco dos dois maiores desastres mundiais envolvendo rupturas com barragens de mineração: Fundão (Mariana – MG) e B1, no córrego do Feijão (Brumadinho – MG).

Em 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento abrupto da estrutura de contenção de rejeitos na barragem de Fundão, na unidade de Germano, em Mariana (MG), operada pela Samarco, um empreendimento em conjunto entre a Vale S. A. e a BHP Billiton. A ruptura causada por liquefação lançou de 43 milhões de m³ de rejeitos de minério de ferro, causando um desastre ambiental ao poluir 668 km de cursos d'água do rio Doce até o oceano Atlântico e a morte de 19 pessoas (CARMO *et al.*, 2017 apud CONCEIÇÃO e LIMA, 2016).

Já no caso de Brumadinho, a ruptura da barragem B1, embora tenha despejado uma quantidade menor de rejeitos em comparação à Fundão, provocou impactos sociais maiores. No dia da ruptura, 25 de janeiro de 2019, o volume de dejetos liberado foi de cerca de 12 milhões de m³ e a velocidade da lama atingiu 80 quilômetros por hora. No momento da tragédia, sirenes de segurança deveriam ter sido acionadas para alertar trabalhadores da Vale e moradores da região. Isso, porém, não aconteceu. O resultado foram 259 mortes e 11 desaparecidos. A lama, que continha ferro, sílica e água, atingiu o rio Paraopeba, o que acabou por afetar, de maneira negativa, a qualidade da água.

A série de rupturas em barragens de mineração aqui elencadas, ocorridas em um período de tempo relativamente curto, reforçam o trabalho de Davies (2001) *apud* Conceição e Lima (2016), no qual se estimou a taxa de falhas em barragens de rejeito como sendo da ordem de 2 a 5 por ano. Dado o número de barragens de rejeito levantados no estudo, cerca de 3.500, a taxa de falha pode chegar a 1 em 700. Essa taxa é considerada muito alta, principalmente se comparada às falhas em barragens de água, que é de aproximadamente 1 em 10.000 (CONCEIÇÃO e LIMA, 2016).

1.2.2 Relação dos acidentes com barragens e os processos geológicos analisados: movimentos de massa e hidrológicos

Como reportado por Jensen (1983), as principais causas de falhas em barragens estão relacionadas aos aspectos geológico-geotécnicos. A tabela 3 separa a contribuição de cada um desses aspectos para a ocorrência dos acidentes.

Tabela 3: Estatística das causas de ruptura de barragens em relação aos aspectos geológicos-geotécnicos.

Aspecto geológico-geotécnico	Porcentagem
Problemas nas fundações	40
Recalques diferenciais	10
Pressões neutras elevadas	5
Deslizamentos de taludes/encostas naturais	2
Materiais deficientes	2

Modificado de JANSEN (1983).

Apesar de configurar uma baixa representatividade, a possibilidade de ocorrência de processos de movimentos de massa nas encostas do reservatório, nas ombreiras da barragem ou no próprio maciço deve ser levada em consideração nas avaliações da segurança dessas estruturas.

Oliveira *et al.* (2013) destacam que a construção de barragens impõe diversas solicitações aos maciços geológicos naturais, que podem interferir na estabilidade geológico-geotécnica. A principal solicitação é o empuxo hidráulico causado pelo enchimento do reservatório, resistido pelo peso da barragem e pela fundação. Na condição de enchimento, o maciço geológico tem suas condições de estabilidade alteradas em virtude do carregamento e da mudança nas linhas de percolação da água em subsuperfície.

Muitas barragens falharam onde o risco de deslizamento foi ignorado ou recebeu atenção inadequada, por exemplo: barragem de Vajont (Itália), barragem do rio Ohio (EUA), barragem Austin (EUA). As consequências de deslizamentos de terra podem incluir dano ou ruptura do maciço ou o galgamento da barragem por ondas (JANSEN, 1983).

Costa (2012) aponta que foi a partir dos acidentes ocorridos com a barragem de Vajont, na Itália, em 1963 e, no ano seguinte, na barragem de Gepatsch, na Áustria, é que se passou a dar maior importância ao estudo de estabilidade de encostas no entorno do sítio de locação das barragens.

No caso mais famoso, em Vajont (figura 7), o deslizamento de uma massa de 250 milhões de metros cúbicos de rocha e solo proveniente de uma encosta natural instável no entorno da estrutura deslizou com uma velocidade de 25 m/s para dentro do reservatório. Como resultado, houve a expulsão instantânea de um volume de 40 milhões de metros cúbicos de água que se

deslocou por sobre o maciço, causando a destruição da cidade de Longarone, situada à jusante. O desastre provocou a morte de mais de 2.600 pessoas.

Figura 7: imagem de satélite extraída do Google Earth, mostrando a configuração do vale à montante da barragem de Vajont (polígono verde), após o deslizamento de 1963.



Fonte: o AUTOR.

Para garantir a segurança hidrológica das barragens contra eventos naturais de cheias e enxurradas, a publicação “Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas”, Eletrobrás/CBDB (2003) determina que as estruturas com altura superior a 30 metros ou com DPA alto tenham os seus órgãos extravasores projetados para suportar a vazão máxima provável (VMP), enquanto que as com altura menor do que 30 metros, ou com volume de reservatório com capacidade menor do que $50 \times 10^6 \text{ m}^3$, devem estar projetadas para suportar vazão com recorrência mínima de 1.000 anos.

No entanto, como apontado por Jansen (1983), 23% das falhas em barragens se deram por causas hidrológico-hidráulicas. Christian e Baecher (2002) *apud* Pereira (2020) apresentam algumas razões para esta alta taxa de falhas:

- Quando o evento hidrológico causador da falha se dá antes do término da construção dos órgãos extravasores. Exemplo: Barragem de Teton (EUA) em 1976.

- Quando se tratam de barragens de mineração, visto que normalmente nesta classe de estrutura não são utilizadas boas práticas de engenharia no projeto e durante a construção, ou a manutenção é deficiente. Exemplos: barragem de Zgorigrad em 1966 (mineração de zinco, Bulgária), barragem de Buffalo Creek em 1972 (mineração de carvão, EUA) e barragem de Soth Fork em 1989 (EUA).
- Quando os sistemas extravasores são antigos e sua capacidade encontra-se desatualizada para as condições climáticas atuais das bacias hidrográficas onde se situam. Exemplos: barragem de Lower Otay em 1916 (EUA), barragem de Walnut Grove em 1890 (EUA) e barragem de Frías em 1970 (Argentina).

1.3 RISCOS GEOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS

Cerri e Amaral (1998) definem risco geológico como uma situação de perigo, perda ou dano ao homem e às suas propriedades, em razão da possibilidade de ocorrência de processo geológico, induzido ou não.

Os autores também resumem outros conceitos básicos relacionados à análise de áreas de risco, conforme a figura 8, bem como apresentam uma equação para análise do risco. A equação possui dois parâmetros principais: a possibilidade de ocorrência de um evento (P); e as consequências sociais e/ou econômicas potenciais (C). Dessa forma, o risco (R) corresponde à:

$$R = P \times C$$

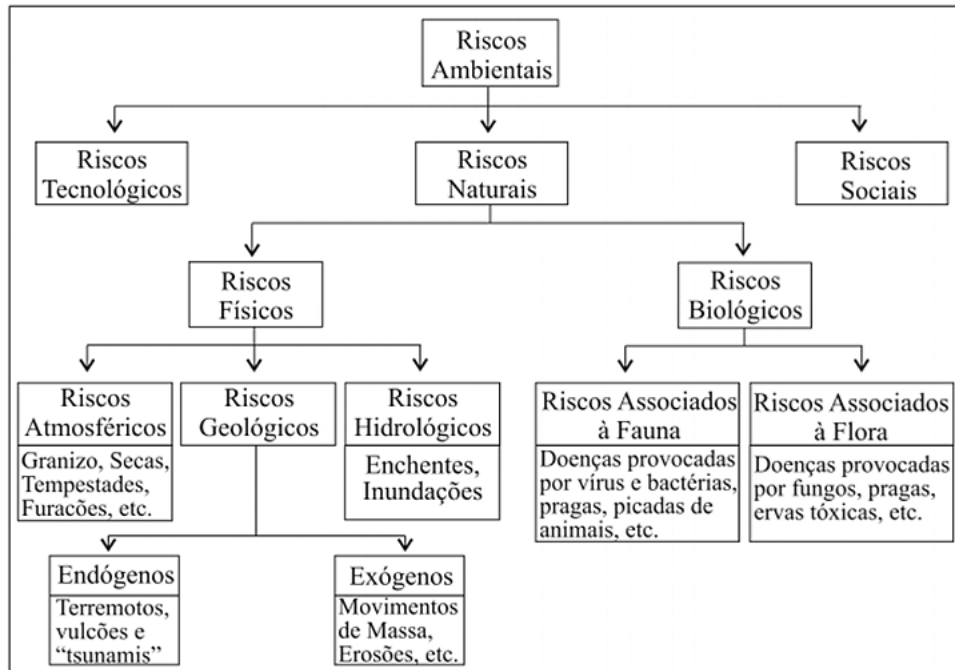
Figura 8: Conceituação relacionada ao tema dos riscos geológicos, segundo Cerri e Amaral (1998).

Acidente	•Fato já ocorrido, onde foram registradas conseqüências sociais e econômicas (perdas e danos);
Evento	•Fato já ocorrido onde não foram registradas conseqüências sociais e econômicas relacionadas diretamente a ele;
Risco	•Possibilidade de ocorrência de um acidente;
Suscetibilidade	•Possibilidade de ocorrência de um evento.

Modificado de CERRI E AMARAL (1998).

Uma das classificações de risco mais conhecida e amplamente utilizada é a proposta por Cerri (1993), onde o autor parte da concepção de risco ambiental, que engloba todos os tipos de risco, e o divide em riscos tecnológicos, sociais e naturais. Os riscos naturais são subdivididos, de acordo com o processo desencadeador, em físicos e biológicos (figura 9).

Figura 9: Tipos de risco, conforme o processo causador.



Fonte: (RECKZIEGEL E ROBAINA, 2005)

Reckziegel e Robaina (2005) fazendo uma revisão sobre o tema, destacam que a classificação de Cerri inclui os riscos sociais (assaltos, guerras, sequestros, atentados, etc.), como uma subdivisão dos riscos ambientais. Também aborda a concepção de risco tecnológico, que são decorrentes de acidentes ligados diretamente à ação do homem.

Augusto Filho *et al.* (1990) apresentam uma proposta de classificação em que os riscos físicos são divididos em atmosféricos, quando relacionados aos processos originados de agentes atuantes na atmosfera; e geológicos, quando associados a processos originados na astenosfera e hidrosfera. Os riscos geológicos são ainda divididos em endógenos e exógenos, dependendo da dinâmica a que estão relacionados, se interna ou externa (quadro 2).

Quadro 2: Classificação dos riscos segundo Augusto Filho et al. (1990).

CLASSIFICAÇÃO		PROCESSOS
Atmosféricos		- Tufões - Ciclones - Tempestades - Secas
Geológicos	Endógenos	- Terremotos - Vulcanismo - Tsunamis
	Exógenos	- Escorregamentos - Enchentes - Erosão - Subsidência - Solos expansivos

Fonte: (AUGUSTO FILHO *et al.*, 1990)

Os autores salientam que, apesar das enchentes estarem relacionadas a processos atmosféricos (chuvas), seus condicionantes são de natureza geológica/geomorfológica, sendo por isso classificadas como decorrentes de processos geológicos exógenos.

A Codificação Brasileira de Desastres classifica os desastres causados por rompimento de barragens como tecnológicos e relacionados a obras civis (CENAD, 2012 *apud* FONSECA, 2019), porém, como visto na revisão sobre os acidentes com barragens, muitos acidentes tiveram como causa o advento de um fenômeno natural intenso, responsável por abalar a estrutura da barragem. Como exemplos, podemos citar os eventos pluviométricos extremos, os quais podem desencadear volumes de cheia acima da capacidade dos órgãos extravasores, os processos de enxurradas e movimentos de massa, ou até mesmo terremotos, que podem comprometer a estabilidade do maciço.

Assim, constata-se que os riscos naturais (geológico e hidrológico) estão intimamente ligados aos riscos tecnológicos, como no caso da falha de uma barragem.

Por fim, apesar de não ser empregado neste estudo, registra-se que outro viés dado ao termo risco geológico se dá no contexto da contratação e execução de obras de engenharia, referindo-se à possibilidade de ocorrência de condições geológicas durante uma obra, diferentes daquelas previstas nos estudos de projeto, gerando impactos nas soluções adotadas no projeto, no prazo de execução e no custo da obra (PASTORE, 2009).

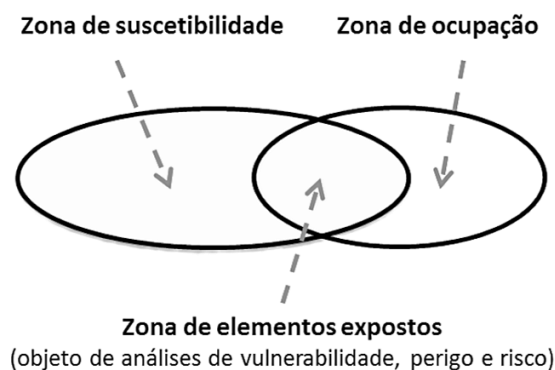
1.3.1 Suscetibilidade geológica

Bitar (2014) aponta que, no âmbito das geociências aplicadas, a acepção do termo suscetibilidade pode ser sintetizada como a propensão dos terrenos ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo do meio físico.

Uma área cujos terrenos apresentam o predomínio de declividade alta, por exemplo, pode ser considerada como propensa a ocorrência de deslizamentos e corridas de massa, independentemente de previsão acerca de quando poderá ocorrer um evento e tampouco do grau de certeza atribuível a essa possibilidade. A declividade se salienta, então, como um dos fatores predisponentes ao desenvolvimento do processo e, por essa razão, passível de inclusão entre os parâmetros necessários à análise do grau de suscetibilidade presente na área. Evidencia-se, assim, o vínculo entre fatores predisponentes e propensão dos terrenos a processos do meio físico (BITAR, 2014).

O conceito de mapeamento de suscetibilidade se refere ao primeiro passo de uma análise progressiva de risco geológico (FELL *et al.*, 2008). Áreas de atingimento, severidade, probabilidade de ocorrência e tempos de recorrência dos processos não são abordados pelas análises de suscetibilidade, sendo tema de análises de vulnerabilidade, perigo e risco (figura 10).

Figura 10: áreas de atuação da suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco.



Fonte: (BITAR, 2014).

A descrição metodológica do mapeamento de suscetibilidade empregado neste trabalho será detalhada no capítulo 3.

1.3.2 Processos do meio físico analisados

A análise de suscetibilidade realizada neste estudo teve como objeto os processos de movimentos gravitacionais de massa (deslizamentos e corridas de massa) e hidrológicos (enxurradas). As características de cada tipologia são apresentadas no quadro 3, conforme definição empregada na metodologia de zoneamento de suscetibilidade da CPRM/IPT (BITAR, 2014).

Quadro 3: Processos do meio físico analisados na metodologia de zoneamento da suscetibilidade. A descrição de suas características se dá conforme Bitar (2014).

Grupo/Processo		Características
Movimentos Gravitacionais de Massa	Deslizamentos	<ul style="list-style-type: none"> • altas velocidades; • desenvolve-se em encostas com declividade e amplitude média a alta; • superfícies de ruptura planar (translacional), circular (rotacional) ou em cunha (acompanhando planos de fragilidade estrutural dos maciços terrosos ou rochosos); • geralmente deflagrado por eventos de chuvas de alta intensidade ou com elevados índices pluviométricos acumulados;
	Corridas	<ul style="list-style-type: none"> • alta energia de transporte, caracterizado por fluxos concentrados de blocos rochosos e troncos vegetais imersos em matriz com alta concentração de sedimentos de diferentes granulometrias; • tem origem na ocorrência de deslizamentos nas encostas e no retrabalhamento de depósitos antigos situados ao longo de cursos d'água. • deflagrado por eventos de chuvas de alta intensidade, gerados nas porções superiores das encostas em bacias de drenagem serranas e restritas. • movimento gravitacional de massa com maior potencial de impacto destrutivo; • inclui enxurradas associadas.
Hidrológicos	Enxurradas	<ul style="list-style-type: none"> • característica brusca e de curta duração; • desenvolvida em bacias de drenagem restritas no contexto de relevo serrano ou morros altos, por ocasião de chuvas intensas; • caracteriza-se por alta energia de transporte e capacidade de arraste, com elevado potencial de impacto destrutivo; • pode induzir a instabilização e solapamento de taludes marginais ao longo do curso d'água.

Modificado de Bitar (2014).

1.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE SEGURANÇA DE BARRAGENS E LEGISLAÇÃO

O risco de ruptura de uma barragem é sempre uma realidade potencial a ser considerada, visto que se deflagrada, acarreta sempre consequências traumáticas, mesmo quando não ocorrem perdas humanas ou catástrofes ambientais (CARVALHO, 2018). Como marco temporal, Persechini *et al.* (2016) destacam que durante os anos de 1950 e 1960, ocorreu uma crescente preocupação internacional com a segurança de barragens, destacando o trabalho desenvolvido pela Comissão Internacional de Grandes Barragens (ICOLD). Essa preocupação estava embasada na ocorrência de ruptura de barragens, na taxa crescente de construção dessas estruturas e no incremento da expansão urbana em vales de rios, associados ao envelhecimento das barragens existentes (MENESCAL, 2009 *apud* PERSECHINI *et al.*, 2016). Neste contexto, vários países do mundo, inclusive o Brasil, têm se preocupado em legislar sobre o tema segurança de barragens, destacando-se também Estados Unidos e Portugal, em uma lista de mais de 50 países.

Os EUA contam com uma das Políticas de Segurança de Barragens mais antigas da comunidade internacional. Ela foi criada em 1972 com a publicação Lei Nacional de Segurança de Barragens, a qual posteriormente passou a incorporar a Lei Nacional de Recursos Hídricos, em 1996.

Na atual política de barragens americana, as estruturas são avaliadas sob o ponto de vista estrutural, hidráulico-hidrológico e sísmico. Os objetivos são os de identificar as barragens que representam ameaças ao público e rapidamente providenciar as medidas corretivas que garantam a sua proteção, assim como, os recursos financeiros necessários.

O tema de segurança de barragens é compartilhado por diferentes agências federais envolvidas com o planejamento, construção, operação e desativação das barragens, podendo-se citar o *Bureau Of Reclamation* (BUREC), o *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), o *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) e o *U.S. Army Corps Of Engineers* (USACE).

Para entrarem na política de barragens americana, as estruturas devem obedecer aos critérios mínimos: altura > 7,6 m e volume > 18.500m³ ou altura > 6 m e volume > 62.000m³. No quadro 4 estão os critérios de classificação utilizados nos EUA, segundo o dano potencial.

Quadro 4: Classificação americana conforme o dano potencial das estruturas. PdV = perda de vidas humanas. PeR = população em risco.

País ou Estado/Província	Classes ou Categorias	Nomes das Classes	Níveis de Danos Potenciais	Consequências	Observações	Situação em relação à perda de vidas
EUA/FEMA	3	Alto, significativo e baixo	Equivalentes às classes	PdV e perdas econômicas, ambientais e de serviços vitais	PdV implica classe alta	As categorias de PdV são definidas para “nenhuma esperada” e “provável, uma ou mais esperadas”.
EUA/Estados	Existe um sistema de classificação para cada um dos 50 estados e Porto Rico					
EUA/USACE	3	Alto, significativo e baixo	Equivalentes às classes	PdV e perdas econômicas, ambientais e de serviços vitais	PdV implica categoria alta	PdV alto sempre que houver a perda de uma ou mais vidas.
EUA/USBR	3	Alto, significativo e baixo	Equivalentes às classes	PeR e perdas econômicas	PeR > 6 implica classe alta	Considera a PdV em faixas, de “nenhuma”, de “1 a 6 vidas em perigo” e “maior do que 6”.

Fonte: (USACE, 2013 *apud* PERSECHINI *et al.*, 2016).

Os regulamentos que tratam da segurança de barragens em Portugal foram adotados por um decreto-lei em 1990. Os regulamentos são complementados por quatro códigos que definem todos os requisitos e padrões relacionados ao projeto, construção, operação, observação e inspeção de barragens. Um desses códigos, o Código Português de Práticas para Observação e Inspeção de Barragens, fornece metodologias para avaliar a segurança das barragens existentes.

As barragens em Portugal são classificadas em duas categorias. As grandes barragens, tem mais de 15 metros, um volume de armazenamento superior a 1.000.000 m³, ou representam um risco importante para a vida humana e perdas econômicas. A segunda categoria consiste em pequenas barragens e inclui todas as barragens que não atendem aos critérios acima.

Nos quatro códigos que complementam o regulamento, as barragens são classificadas em três grupos com base em uma Índice de Risco Global. Esse índice leva em consideração três fatores: condições ambientais, condição e confiabilidade da estrutura e riscos econômicos/humanos. Cada um desses fatores contém vários componentes, que são avaliados por inspeção de barragem.

Com base nesse índice, as barragens são classificadas em três classes, de acordo com suas características de risco e desempenho. Os valores do índice são usados para determinar prioridades na avaliação e no tratamento da segurança das barragens.

1.4.1 Segurança de barragens no Brasil

A atual legislação brasileira sobre segurança de barragens, Lei 12.334/2010 – Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), surgiu como um efeito reativo após os inúmeros acidentes envolvendo essas estruturas no Brasil. Apesar de sermos um país com grande dependência destas estruturas, seja para garantir nossa matriz energética ou para gerir os rejeitos de nossa vasta produção mineral, ao compararmos o desenvolvimento de políticas públicas sobre a segurança de barragens em outros países, ressalta-se o caráter tardio desta reação no Brasil: Inglaterra (1930), EUA (1972), Espanha (1992), entre outros.

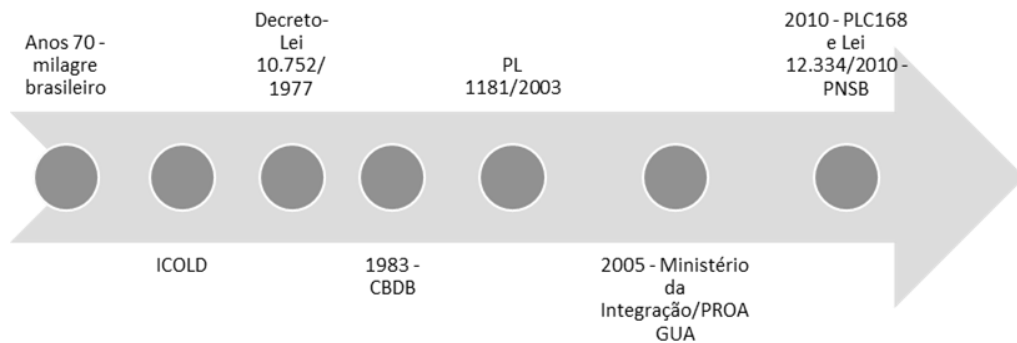
Entretanto, há de se destacar que em tempos de pré-política sobre segurança de barragens, a comunidade técnica brasileira, de forma autônoma, já buscava a regulamentação para o projeto, construção, operação e manutenção das barragens em publicações que antecederam e serviram de base para a elaboração da PNSB. Como linha do tempo para a nossa legislação (figura 11), podemos citar os seguintes acontecimentos e atuações:

- Anos 70: milagre brasileiro, momento em que muito se construiu e se aprendeu em engenharia de grandes barragens hidrelétricas e barragens de reservação;
- À época, na falta de regulamentação nacional, as diretrizes e publicações da ICOLD (Comissão Internacional de Grandes Barragens), conjuntamente com outras poucas, foram as únicas fontes de consulta por parte da comunidade técnica;
- Decreto-Lei 10.752/1977: resposta à ruptura de duas barragens em SP e nunca regulamentado;
- Atuação sobre boas práticas do CBDB (Comitê Brasileiro de Barragens), com publicações relevantes sobre o tema, desde seus primórdios como o trabalho Diretrizes para a inspeção e avaliação de segurança de barragens em operação, de 1983;
- PL 1181/2003, motivado pelo rompimento da barragem de Cataguazes em 2003. Foi elaborado no âmbito do GT de segurança de barragens do CNRH e representa o texto de partida para a PNSB;
- Manual do Ministério da Integração/PROAGUA com primeira edição de 2005, que versa sobre segurança e inspeção de barragens e determina parâmetros para definir o potencial de risco, quais sejam: Importância (ligado ao valor estratégico da obra e ao

dano potencial), Grau de Periculosidade (características técnicas) e Grau de Vulnerabilidade (estado de conservação);

- Com um trâmite total de 7 anos, após a aprovação da PL 1183/2003 na Câmara de Infraestrutura do Senado, essa recebe o nome de PLC 168/2010, e finalmente é sancionada pela Presidência da República em 2010 como a nossa atual PNSB.

Figura 11: linha do tempo da legislação de segurança de barragens no Brasil até a promulgação da PNSB.



Fonte: o AUTOR.

A PNSB estabelece, em seu conteúdo, critérios para o enquadramento de barragens, assim como relaciona os instrumentos de controle e gestão. Neves (2018) destaca que a lei veio suprir uma lacuna quanto à definição de responsabilidades relacionadas à segurança de barragens, dividindo entre os fiscalizadores e os empreendedores essas responsabilidades. Explicitou que o empreendedor é o responsável legal pela segurança de sua barragem e definiu os responsáveis pela fiscalização, de acordo com as características das barragens. São reguladas pela PNSB as barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais que apresentem pelo menos uma das seguintes características:

I - altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual

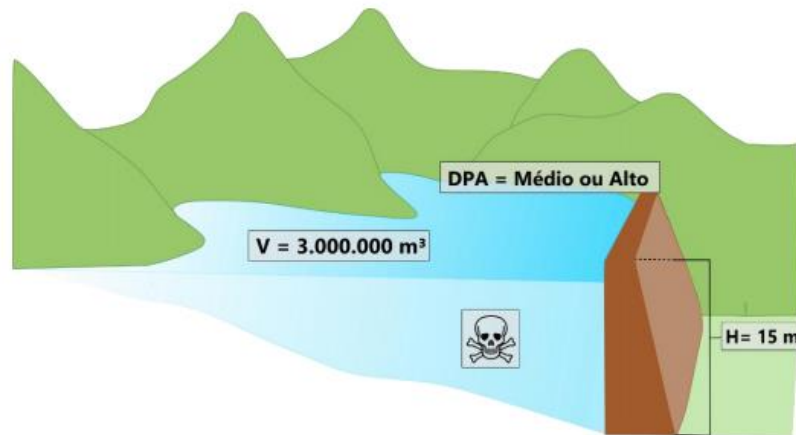
a 15m;

II - capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000m³;

III - reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis;

IV - categoria de dano potencial associado, médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Figura 12: Características de uma barragem que a insere na PNSB.



Fonte: (NEVES, 2018).

Como avanços e conquistas, a PNSB e regulamentos posteriores das agências representam a concentração de esforços para trazer à luz o ponto focal da gestão de riscos para as barragens brasileiras, através da implantação de instrumentos que trazem um diagnóstico do cenário atual. Como exemplos, podemos citar o cadastro de barragens e o Sistema Nacional de Informações Sobre Barragens (SNISB), o Sistema de Classificação das Barragens através do Potencial de Risco e o Plano de Segurança de Barragens (PSB). As ações emergenciais após incidentes e acidentes também tem lugar de destaque através do Plano de Ação Emergencial de Barragens, o PAE.

1.4.2 Impacto dos desastres com barragens de mineração na PNSB: regulamentações e atualizações

A ANM, autarquia federal, vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), que tem por finalidade promover o planejamento e o fomento da exploração e do aproveitamento dos recursos minerais, através da PNSB, teve incorporadas as competências de órgão fiscalizador da segurança das barragens de acumulação de rejeitos de mineração.

Desse modo, a Portaria do Diretor Geral do DNPM nº 70.389 de 17 de maio de 2017 e respectivas retificações foram publicadas em cumprimento aos artigos 8º, 9º, 10º, 11º e 12º da PNSB, regulamentando a temática no que se refere às Barragens de Mineração. Foram abordados temas relativos à Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, a Classificação destas estruturas, o Plano de Segurança e as Revisões Periódicas, as Inspeções de Segurança

Regulares e Especiais, assim como os Planos de Ações Emergenciais para Barragens de Mineração.

Posteriormente, em resposta aos desastres de Mariana e Brumadinho, ambas barragens de mineração alteadas pelo método de montante, a ANM publicou a Resolução nº 13/2019. Esta norma trouxe as seguintes modificações e novidades em relação à Portaria 70.389/2017:

- Proibição da utilização do método de alteamento à montante;
- Prazo para desativação de instalações na área da ZAS;
- Prazo para apresentar projeto e descaracterização de barragens construídas à montante;
- Estabelecimento de Fatores de Segurança para cálculo de estabilidade de barragens;
- Determinação de critérios para o sistema de monitoramento de barragens e de alerta automático;
- Determinação de execução de estudos/implementação de soluções para aporte de água.

Posteriormente foi publicada a Resolução ANM nº 32/2020, a qual atualizou os critérios para a inclusão de uma barragem em situação de emergência (pontuação 10 para o Estado de Conservação e DCE não apresentada ou DCE não atestando a estabilidade), trouxe novos requisitos para a elaboração do mapa de inundação e deu prazo de 3 anos para barragens construídas antes da PNSB, para apresentar projeto “*as is*”, entre outras modificações.

Por fim, a normativa mais recente é a Resolução ANM nº 40 de 06 de julho de 2020, que trouxe modificações quanto aos prazos e requisitos para a implantação do sistema de monitoramento das barragens de mineração.

Os dois desastres com barragens de mineração citados, além de provocarem atualizações nas normativas da ANM, recentemente promoveram a alteração da própria PNSB, com a publicação da Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, de modo a dar maior atenção à gestão do risco desta classe de barragem. Até então, o texto da PNSB não dava o devido destaque às barragens de mineração.

Dentre as principais modificações, que incluem alguns critérios já adotados pela ANM, destacam-se as seguintes:

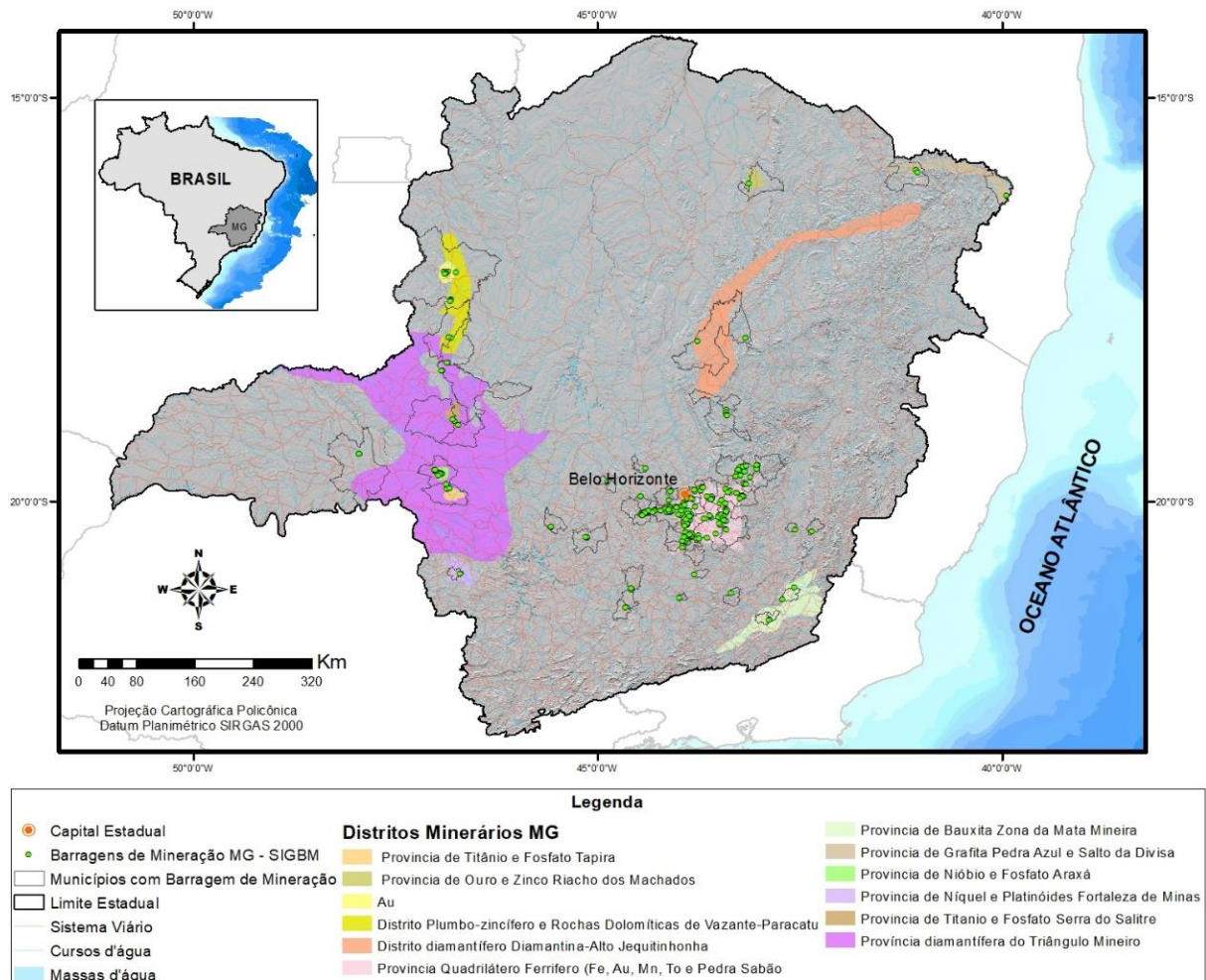
- Inclusão do critério CRI alto para a inclusão na PNSB.

- Alteração do conceito de barragem para incluir estruturas construídas em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.
- Necessidade de que o PSB seja elaborado e assinado por responsável técnico com registro no respectivo conselho profissional e tenha a manifestação de ciência por parte do empreendedor, no caso de pessoa física, ou do titular do cargo de maior hierarquia na estrutura da pessoa jurídica.
- Necessidade de elaboração de Plano de Ação de Emergência (PAEBM) para todas as barragens destinadas à acumulação ou à disposição de rejeitos de mineração.
- Proibição de construção ou alteamento de barragens de mineração pelo método a montante. Para as barragens já construídas ou alteadas por este método, é previsto que o empreendedor deverá descaracterizar as estruturas até 25/02/2022, podendo esse prazo ser prorrogado pela ANM.

2. CAPITULO II – ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a distribuição das barragens de mineração presentes no cadastro da ANM para o estado de Minas Gerais. As barragens estão localizadas em 61 municípios (figura 13), os quais estão concentrados em distritos minerários, destacando-se o Quadrilátero Ferrífero, a Província Diamantífera do Triângulo Mineiro, o Distrito Plumbo-zincífero e Rochas Dolomíticas de Vazante-Paracatu e a Província de Grafita Pedra Azul e Salto da Divisa.

Figura 13: Mapa da área de estudo mostrando a localização das barragens de mineração de MG cadastradas no SIGBM e seu contexto frente aos distritos minerários, conforme Machado e Silva (2010).



Modificado de Machado e Silva (2010).

2.1 ASPECTOS GERAIS DO MEIO FÍSICO

O estado de Minas Gerais apresenta grande diversidade geológica, ocorrendo nessa área sequências de idades arqueana a fanerozoica, em contextos tectônicos e metamórficos dos mais variados. Tal variedade geológica se reflete na história mineradora do estado, cujo desenvolvimento está intimamente ligado à exploração de recursos minerais desde o período colonial (MACHADO E SILVA, 2010).

Dado o caráter aplicado, optou-se por caracterizar a área com base no conceito de geodiversidade. CPRM (2006) a define como:

“A geodiversidade representa a natureza abiótica (meio físico) constituída por uma variedade de ambientes, fenômenos e processos geológicos que dão origem às paisagens, rochas, minerais, fósseis, água, solos e outros depósitos superficiais que propiciam o desenvolvimento da vida na Terra”.

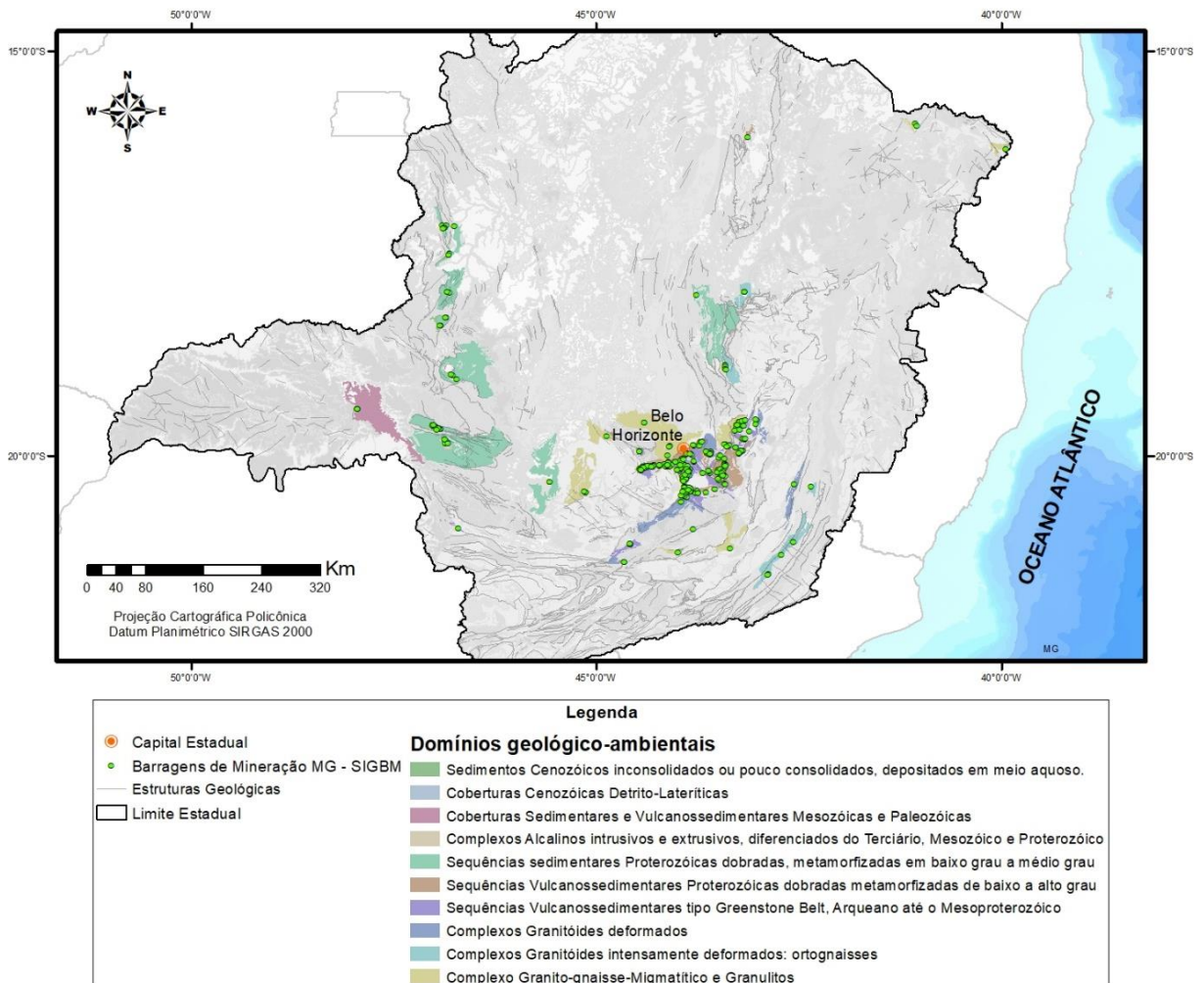
A aplicação do mapeamento da geodiversidade se dá na identificação das aptidões e restrições de uso do meio físico de uma área, bem como os impactos advindos de seu uso inadequado. Machado e Silva (2010) destacam que, além disso, ampliam-se as possibilidades de melhor conhecer os recursos minerais, os riscos geológicos e as paisagens naturais inerentes a uma determinada região composta por tipos específicos de rochas, relevo, solos e clima. Dessa forma, obtém-se um diagnóstico do meio físico e de sua capacidade de suporte para subsidiar atividades antrópicas.

O Mapa de Geodiversidade do estado de MG fez a divisão do território em Domínios e Unidades Geológicas-ambientais baseada, sobretudo, nas relações entre a geologia e o relevo. Em resumo, os Domínios e Unidades agrupam conjuntos estratigráficos de comportamento semelhante frente ao uso e ocupação dos terrenos. Este agrupamento baseia-se na seleção de atributos que permitem uma série de interpretações na análise ambiental, tais como: o grau de deformação tectônica (dobramentos e faturamento) do substrato, a sua resistência ao intemperismo (físico e químico), as características do manto de alteração proveniente, o grau de coerência (ou dureza) das rochas e os atributos do relevo (tipo de padrão, declividades e amplitudes).

Como será visto na descrição da metodologia do zoneamento de suscetibilidade (Capítulo 3), alguns destes atributos estão relacionados intrinsicamente ao método, a exemplo dos atributos do relevo e a presença de descontinuidades e planos de fraqueza nas rochas. Já outros atributos estão relacionados indiretamente.

A figura 14 mostra a distribuição das barragens cadastradas em MG, frente a estes Domínios e o quadro 5 detalha os respectivos atributos desses Domínios, de acordo com Machado e Silva (2010).

Figura 14: Distribuição das barragens de mineração, frente aos Domínios Geológico-ambientais provenientes do Mapeamento de Geodiversidade de MG (MACHADO E SILVA, 2010).



Modificado de Machado e Silva (2010).

Quadro 5: Domínios e Unidades Geológico-ambientais e seus respectivos atributos, de acordo com Machado e Silva (2010).

DOMÍNIO	UNIDADE GEOLÓGICO-AMBIENTAL	DEFORMAÇÃO TECTÔNICA	CISALHAMENTO/FRAATURAMENTO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO FÍSICO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO QUÍMICO	TEXTURA MANTO DE ALTERAÇÃO	GRAU DE COERÊNCIA	UNIDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIA	RELEVO	DECLIVIDADE	AMPLITUDE
Domínio dos sedimentos Cenozóicos inconsolidados ou pouco consolidados, depositados em meio aquoso.	Ambiente de planícies aluvionares recentes - Material inconsolidado e de espessura variável que da base para o topo é formado por cascalho, areia e argila.	Não dobrada	Ausente	Não se aplica	Não se aplica	Não se aplica	Muito brandas	Depósitos aluvionares	Areia, Cascalho, Argila, Silte	Planícies Fluviais ou flúvio-lacustres	0 a 3°	Zero
Domínio das coberturas Cenozóicas Detrito-Lateríticas	Depósitos detrito-lateríticos - Proveniente de processos de lateritização em rochas de composições diversas sem a presença de crosta.	Ausente	Pouco a moderadamente fraturada	Moderada a alta	Moderada a alta	Variável na vertical	Variável na vertical	Coberturas detrito-lateríticas com concreções ferruginosas	Areia, Laterita, Argila, Cascalho	Chapadas e Platôs	0 a 5°	0 a 20 metros
Domínio das coberturas Sedimentares e Vulcanossedimentares Mesozóicas e Paleozóicas pouco a moderadamente consolidadas, associadas a grandes e profundas bacias sedimentares do tipo sinéclise	Intercalações de sedimentos arenosos, siltico-argilosos e folhelhos.	Não dobrada	Pouco a moderadamente fraturada	Baixa a moderada na vertical	Baixa a moderada na vertical	Variável de arenoso a argilo-siltoso	Variável na vertical	Formação Marília	Arenito, Argilito Arenoso, Calcário	Planaltos e Baixos Platôs	0 a 5°	20 a 50 metros
Domínio dos Complexos Alcalinos intrusivos e extrusivos, diferenciados do Terciário, Mesozóico e Proterozóico	Gabro, anortosito, carbonatito, dique de lamprófito.	Intensamente dobrada	Intensamente fraturada	Moderada a alta	Baixa	Predominantemente argiloso	Duras	Complexo alcalino Araxá	Dunito, Peridotito, Piroxenito, Carbonatito, Glimmerito	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros
								Complexo alcalino Tapira	Glimmerito, Dunito, Peridotito, Piroxenito, Carbonatito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
Domínio das Sequências sedimentares Proterozóicas dobradas, metamorizadas em baixo grau a médio grau	Intercalações irregulares de metassedimentos arenosos e siltico-argilosos.	Pouco a moderadamente dobrada	Pouco a moderadamente fraturada	Baixa a alta na vertical	Baixa a alta na horizontal e na vertical	Predominantemente argilo-siltico-arenoso	Médias	Grupo Canastra Indiviso	Filito, Mica xisto, Grafita xisto, Sericita Xisto, Metarenito, Quartzito, Calcário, Ardósia, Metassiltito, Metargilito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
								Formação Paracatu	Quartzito, Sericita Filito Carbonoso, Metassiltito	Superfícies Aplainadas Degradadas	0 a 5°	10 a 30 metros
	Metarenito, quartzitos e metaconglomerados.		Moderada a alta	Moderada a alta	Predominantemente arenoso	Formação Sopa-Brumadinho		Quartzito, Metaconglomerado, Filito, Metapelito	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros	
	Predomínio de metacalcários, com intercalações subordinadas de metassedimentos siltico-argilosos e arenosos.		Baixa	Baixa	Predominantemente argiloso	Formação Vazante - Unidade B		Fosforito, Chert, Metapelito, Calcário Dolomítico	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10°	20 a 50 metros	
						Supergrupo Paraopeba		Arcóseo, Argilito, Calcarenito, Dolomito, Folhelho, Marga, Ritmito, Siltito				
						Formação Vazante - Unidade B		Fosforito, Chert, Metapelito, Calcário Dolomítico	Superfícies Aplainadas Degradadas	0 a 5°	10 a 30 metros	
Supergrupo Paraopeba	Arcóseo, Argilito, Calcarenito, Dolomito, Folhelho, Marga, Ritmito, Siltito											

DOMÍNIO	UNIDADE GEOLÓGICO-AMBIENTAL	DEFORMAÇÃO TECTÔNICA	CISALHAMENTO/FRAATURAMENTO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO FÍSICO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO QUÍMICO	TEXTURA MANTO DE ALTERAÇÃO	GRAU DE COERÊNCIA	UNIDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIA	RELEVO	DECLIVIDADE	AMPLITUDE
	Predomínio de metassedimentos silítico-argilosos, com intercalações de metagrauvacas.		Intensamente fraturada	Baixa a alta na vertical	Baixa a alta na vertical	Predominantemente argilo-silítico-arenoso		Formação Tabuões	Filito	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10°	20 a 50 metros
	Formação Rio Verde							Filito, Calcixisto, cloritaxisto, sericita xisto	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros	
	Formação Vazante - Unidade A							Fosforito, Quartzito, Ardósia	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10°	20 a 50 metros	
	Formação Vazante - Unidade A							Fosforito, Quartzito, Ardósia	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros	
	Formação Vazante - Unidade A							Fosforito, Quartzito, Ardósia	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros	
	Formação Vazante - Unidade A							Fosforito, Quartzito, Ardósia	Superfícies Aplainadas Degradadas	0 a 5°	10 a 30 metros	
Domínio das Sequências Vulcanossedimentares Proterozóicas dobradas metamorizadas de baixo a alto grau	Metacherts, metavulcânicas, formações ferríferas e/ou formações maganésíferas, metacalcários, metasedimentos arenosos e silíticos argilosos.	Pouco a moderadamente dobrada	Pouco a moderadamente fraturada	Baixa a alta na horizontal e na vertical	Baixa a alta na horizontal e na vertical	Variável de arenoso a argilo-siltoso	Variável na horizontal e vertical	Formação Cauê	Itabirito, Dolomito, Filito, Dolomito	Chapadas e Platôs	0 a 5°	0 a 20 metros
								Grupo Dom Silvério	Xisto, Quartzito, Quartzito Ferruginoso, Anfibolito, Formação Manganésifera (gondito)	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros
								Grupo Dom Silvério	Xisto, Quartzito, Quartzito Ferruginoso, Anfibolito, Formação Manganésifera (gondito)	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
								Formação Cauê	Itabirito, Dolomito, Filito, Dolomito	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
								Grupo Dom Silvério	Xisto, Quartzito, Quartzito Ferruginoso, Anfibolito, Formação Manganésifera (gondito)	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
								Grupo Itabira	Itabirito, Dolomito, Filito, Xisto	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
								Formação Fecho do Funil	Xisto	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10°	20 a 50 metros
								Grupo Sabará	Xisto, Metagrauvaca, Metatufo	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros
								Grupo Sabará	Xisto, Metagrauvaca, Metatufo	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
	Grupo Sabará			Xisto, Metagrauvaca, Metatufo	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros					
	Predomínio de quartzito.			Moderada a alta	Moderada a alta	Predominantemente arenoso	Duras	Grupo Caraça	Filito, Quartzito, Metaconglomerado	Chapadas e Platôs	0 a 5°	0 a 20 metros
								Formação Cercadinho	Quartzito e Filito Ferruginosos, Dolomito	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10°	20 a 50 metros
								Grupo Caraça	Filito, Quartzito, Metaconglomerado	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
								Grupo Itacolomi	Quartzito, Filito, Metaconglomerado	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
								Unidade Maquiné, associação aluvionar	Quartzito, Metaconglomerado	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
Grupo Caraça		Filito, Quartzito, Metaconglomerado	Escarpas Serranas					25 a 60°	300 a 2.000 metros			

DOMÍNIO	UNIDADE GEOLÓGICO-AMBIENTAL	DEFORMAÇÃO TECTÔNICA	CISALHAMENTO/FRAATURAMENTO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO FÍSICO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO QUÍMICO	TEXTURA MANTO DE ALTERAÇÃO	GRAU DE COERÊNCIA	UNIDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIA	RELEVO	DECLIVIDADE	AMPLITUDE						
	Predomínio de rochas metabásicas e metaultramáficas.			Baixa a alta na horizontal e na vertical	Baixa a alta na horizontal e na vertical	Predominantemente argilo-siltoso	Variável na horizontal e vertical	Seqüência Metavulcanossedimentar Riacho dos Machados	Ortoanfíbrito, Mica xisto, Metaultramafito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros						
	Predomínio de rochas metacalcárias, com intercalações de finas camadas de metassedimentos siltico-argilosos.	Intensamente dobrada	Intensamente fraturada	Baixa a moderada na vertical	Baixa a moderada na vertical		Variável na vertical	Formação Gandarela	Dolomito, Itabirito Dolomítico, Filito, Mármore	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10°	20 a 50 metros						
								Grupo Piracicaba	Filito, Xisto, Dolomito, Quartzito	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10°	20 a 50 metros						
								Formação Gandarela	Dolomito, Itabirito Dolomítico, Filito, Mármore	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros						
								Grupo Piracicaba	Filito, Xisto, Dolomito, Quartzito	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros						
Domínio das Sequências Vulcanossedimentares tipo Greenstone Belt, Arqueano até o Mesoproterozóico	Predomínio de seqüência sedimentar.	Intensamente dobrada	Zonas de cisalhamento	Baixa a alta na horizontal e na vertical	Baixa a alta na horizontal e na vertical	Variável de arenoso a argilo-siltoso	Variável na horizontal e vertical	Grupo Maquiné	Quartzito, Metaconglomerado, Quartzo-mica xisto, Filito, Conglomerado	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros						
								Grupo Maquiné	Quartzito, Metaconglomerado, Quartzo-mica xisto, Filito, Conglomerado	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros						
								Unidade Nova Lima, associação química-pelítica	Metapelito, Formação Ferrífera Bandada	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros						
								Unidade Nova Lima, associação ressedimentada	Metarenito, Metapelito, Rocha Calcissilicática, Metagrauvaca	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros						
								Unidade Nova Lima, associação vulcanoclástica	Metagrauvaca, Metapelito, Aglomerado, Tufo Lapilitico, Formação Ferrífera Bandada, Metaconglomerado	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros						
	Seqüência vulcânica komatiítica, associadas a talco-xistos, anfíbolitos, cherts, formações ferríferas e metaultrabásitos.		Intensamente dobrada					Intensamente fraturada						Unidade Fortaleza de Minas, rochas metaultramáficas	Metaultramáfica	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
														Unidade Nova Lima, associação vulcânica-química	Formação Ferrífera Bandada, Metabasalto Komatiítico, Metachert, Filito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
														Unidade Nova Lima, associação vulcânica máfica-ultramáfica	Metagabro, Serpentinito, Xisto	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
	Seqüência vulcano-sedimentar.		Intensamente dobrada					Intensamente fraturada						Grupo Nova Lima	Xisto, Metagrauvaca, Metamáfica, Formação Ferrífera Bandada, Quartzito, Metaultramáfica, Calcissiltito, Metachert	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
														Grupo Nova Lima	Xisto, Metagrauvaca, Metamáfica, Formação Ferrífera Bandada, Quartzito, Metaultramáfica, Calcissiltito, Metachert	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros

DOMÍNIO	UNIDADE GEOLÓGICO-AMBIENTAL	DEFORMAÇÃO TECTÔNICA	CISALHAMENTO/FRAATURAMENTO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO FÍSICO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO QUÍMICO	TEXTURA MANTO DE ALTERAÇÃO	GRAU DE COERÊNCIA	UNIDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIA	RELEVO	DECLIVIDADE	AMPLITUDE
								Grupo Nova Lima	Xisto, Metagrauvaca, Metamáfica, Formação Ferrífera Bandada, Quartzito, Metaultramáfica, Calcissilito, Metachert	Escarpas Serranas	25 a 60°	300 a 2.000 metros
Domínio dos Complexos Granitóides deformados	Séries graníticas alcalinas.	Não dobrada	Pouco a moderadamente fraturada	Moderada a alta	Moderada a alta	Predominantemente argilo-síltico-arenoso	Duras	Corpo Itabira	Granito, Sienogranito	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
	Corpo Itutinga							Granito	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros	
	Complexo Caeté							Granito, Granodiorito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros	
	Complexo Juiz de Fora, unidade tonalítica							Tonalito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros	
	Suíte Alto Maranhão							Granito, Granodiorito, Tonalito, Migmatito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros	
	Corpo Açucena, biotita granito							Biotita granito	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros	
	Corpo Bicas							Granito	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros	
Domínio dos Complexos Granitóides intensamente deformados: ortognaisses	Associações charnockíticas.	Pouco a moderadamente dobrada	Pouco a moderadamente fraturada	Moderada a alta	Moderada a alta	Predominantemente argilo-síltico-arenoso	Duras	Complexo Juiz de Fora, unidade enderbítica	Enderbito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
	Indeterminado.	Intensamente dobrada	Intensamente fraturada					Complexo Juiz de Fora, unidade enderbítica	Enderbito	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
								Corpo Jacém	Granito	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros
								Corpo Intrusivas Graníticas a Tonalíticas	Granito, Tonalito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
								Corpo Rio Itanguá	Granitóides	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
								Unidade Guanhões - Metagranitóides	Metagranodiorito, Metagranito, Metatonalito, Quartzito Monzonito	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros
	Séries graníticas sub-alcalinas: cálcio-alcalinas (baixo, médio e alto-K) e toleíticas.	Intensamente dobrada	Intensamente fraturada					Corpo Tonalito Bom Jesus do Galho	Metatonalito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
Domínio dos Complexo Granito-gnaiss-Migmatítico e Granulitos	Predominam gnaiss ortoderivado. Podem conter porções migmatíticas.	Intensamente dobrada	Zonas de cisalhamento	Baixa a alta na horizontal e na vertical	Baixa a alta na horizontal e na vertical	Predominantemente argilo-síltico-arenoso	Duras	Complexo Belo Horizonte	Gnaiss, Granodiorito, Migmatito	Domínio de Colinas Amplas e Suaves	3 a 10°	20 a 50 metros
								Complexo Belo Horizonte	Gnaiss, Granodiorito, Migmatito	Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos	5 a 20°	30 a 80 metros
								Complexo Divinópolis	Granito, Granodiorito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
								Complexo Mantiqueira	Ortognaisse, anfibolito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
								Corpo Souza Noschese	Ortognaisse	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°	80 a 200 metros
								Suíte Borrachudos	biotita-(hornblenda) granito, ortognaisse, augen-gnaiss granítico, quartzito-monzonito	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
	Predominam migmatitos ortoderivados.							Intensamente fraturada	Complexo Serra de Jabitacá	Anfibolito, Migmatito, Metagranodiorito, Metatonalito	Domínio de Morros e de Serras Baixas	15 a 35°

DOMINIO	UNIDADE GEOLÓGICO-AMBIENTAL	DEFORMAÇÃO TECTÔNICA	CISLHAMENTO/FRAATURAMENTO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO FÍSICO	RESISTÊNCIA AO INTEMPERISMO QUÍMICO	TEXTURA MANTO DE ALTERAÇÃO	GRAU DE COERÊNCIA	UNIDADE GEOLÓGICA	LITOLOGIA	RELEVO	DECLIVIDADE	AMPLITUDE
	Predomínio de gnaisses paraderivados. Podem conter porções migmatíticas.		Zonas de cisalhamento					Unidade Jequitinhonha - unidade gnáissica	Gnaisse	Domínio Montanhoso	25 a 45°	300 a 2.000 metros
Unidade Jequitinhonha								Kinzigito, Rocha Calcissilicática, Metamáfica, Biotita Gnaisse, Metaultramafito	Superfícies Aplainadas Degradadas	0 a 5°	10 a 30 metros	
Unidade Jequitinhonha - unidade gnáissica								Gnaisse	Vales Encaixados	10 a 25(>.45)	100 a 300 metros	

Fonte: compilado da tabela de atributos do Mapa de Geodiversidade de MG (MACHADO E SILVA, 2010).

2.2 MINERAÇÃO EM MG

Segundo o Boletim do Setor Mineral (MME, 2019), a produção do setor responde por cerca de 4,06% do PIB brasileiro. ANM (2020) aponta que 89,4% do valor da produção de minérios metálicos no Brasil provém dos estados de Minas Gerais e Pará. O *commodity* mais produzido é o minério de ferro, representando 72,8% do valor total da produção nacional.

O estado de Minas Gerais configura como o maior produtor nacional de minério de ferro. Dados do Anuário Mineral - ano base 2019 (ANM, 2020) mostram que a produção beneficiada chegou a mais de 203 milhões de toneladas. A tabela 4 mostra a produção beneficiada dos principais minérios metálicos em MG no ano-base de 2019, conforme dados de ANM (2020).

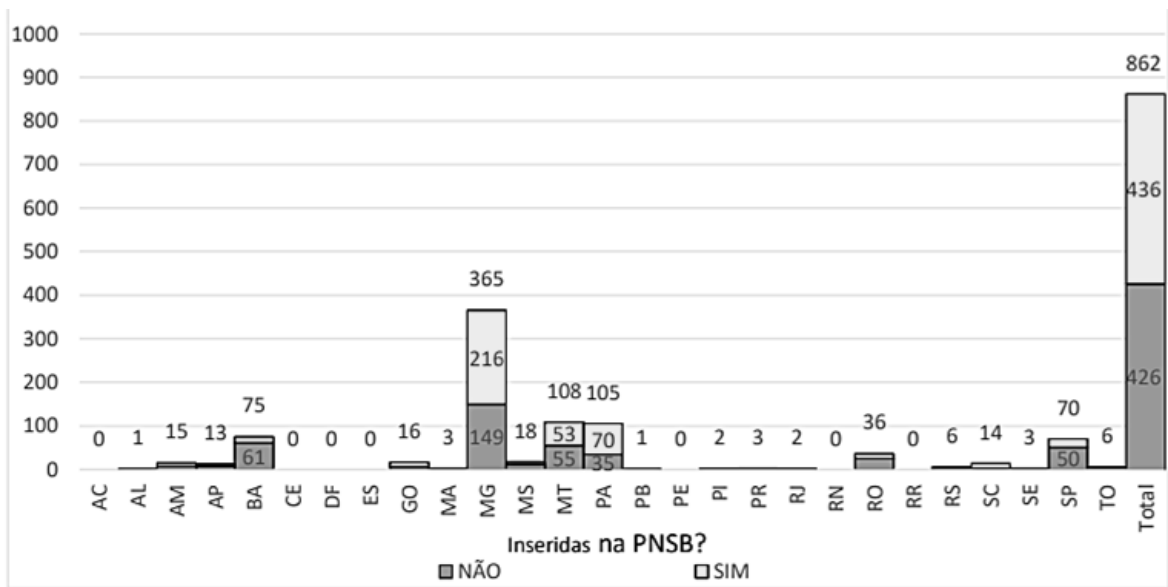
Tabela 4: Produção beneficiada dos principais minérios metálicos em MG no ano-base de 2019.

Substância Mineral	Produção Beneficiada (em toneladas)
Ferro	203.650.519
Alumínio	1.043.412
Zinco	414.166
Manganês	409.022
Nióbio	239.162
Estanho	287,19
Ouro	33,695

Fonte: (ANM, 2020).

Com toda esta vasta produção de minério beneficiado, há também uma colossal geração de rejeitos. Como em Minas Gerais o método mais utilizado para disposição de rejeitos de mineração são barragens, é no estado onde está localizado 42% de todas as barragens cadastradas no SIGBM-ANM. O número mais recente do cadastro SIGBM (ANM, 2020) aponta que em MG existem 365 barragens de mineração, sendo que 216 estruturas estão inseridas na PNSB e 149 não estão (figura 15).

Figura 15: Barragens Cadastradas no SIGBM, agrupadas por UF, situação em 01/12/2020.



Fonte: (ANM, 2020).

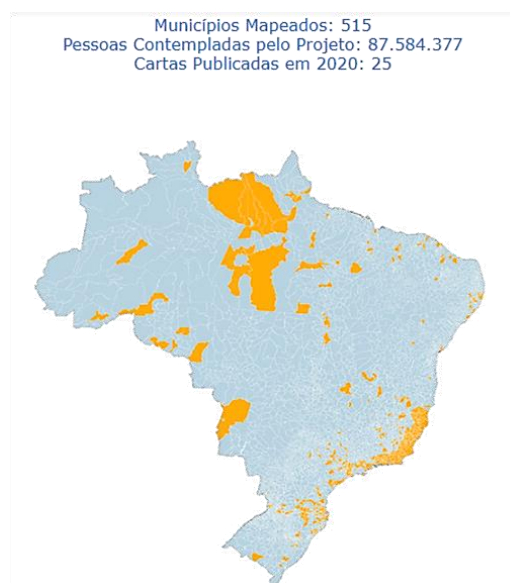
3. CAPITULO III - METODOLOGIA

Os procedimentos de geoprocessamento descritos neste capítulo foram executados no software ARCGIS 10.4, no entanto, todas as funções utilizadas podem ser encontradas também em outros softwares de geoprocessamento, estando assim o método passível de ser aplicado em outras plataformas.

Os insumos para os procedimentos de geoprocessamento executados neste trabalho, tais como imagens de satélite, MDE, mapas temáticos, bem como as informações sobre as barragens foram obtidos de fontes acessíveis a todos os usuários na internet, destacando-se os sites da ANM, CPRM, IPT, IBGE e *Earth Data* (NASA).

Fazem parte do desenvolvimento desta monografia alguns procedimentos descritos na metodologia para a elaboração de cartas de suscetibilidade geológica a movimentos gravitacionais de massa e inundações, elaborada pela CPRM em parceria com o IPT (BITAR, 2014). Tal metodologia está bastante consolidada, tendo sido produzidas por estas instituições mais de 500 cartas, as quais contemplam municípios espalhados em todo o território nacional (figura 16).

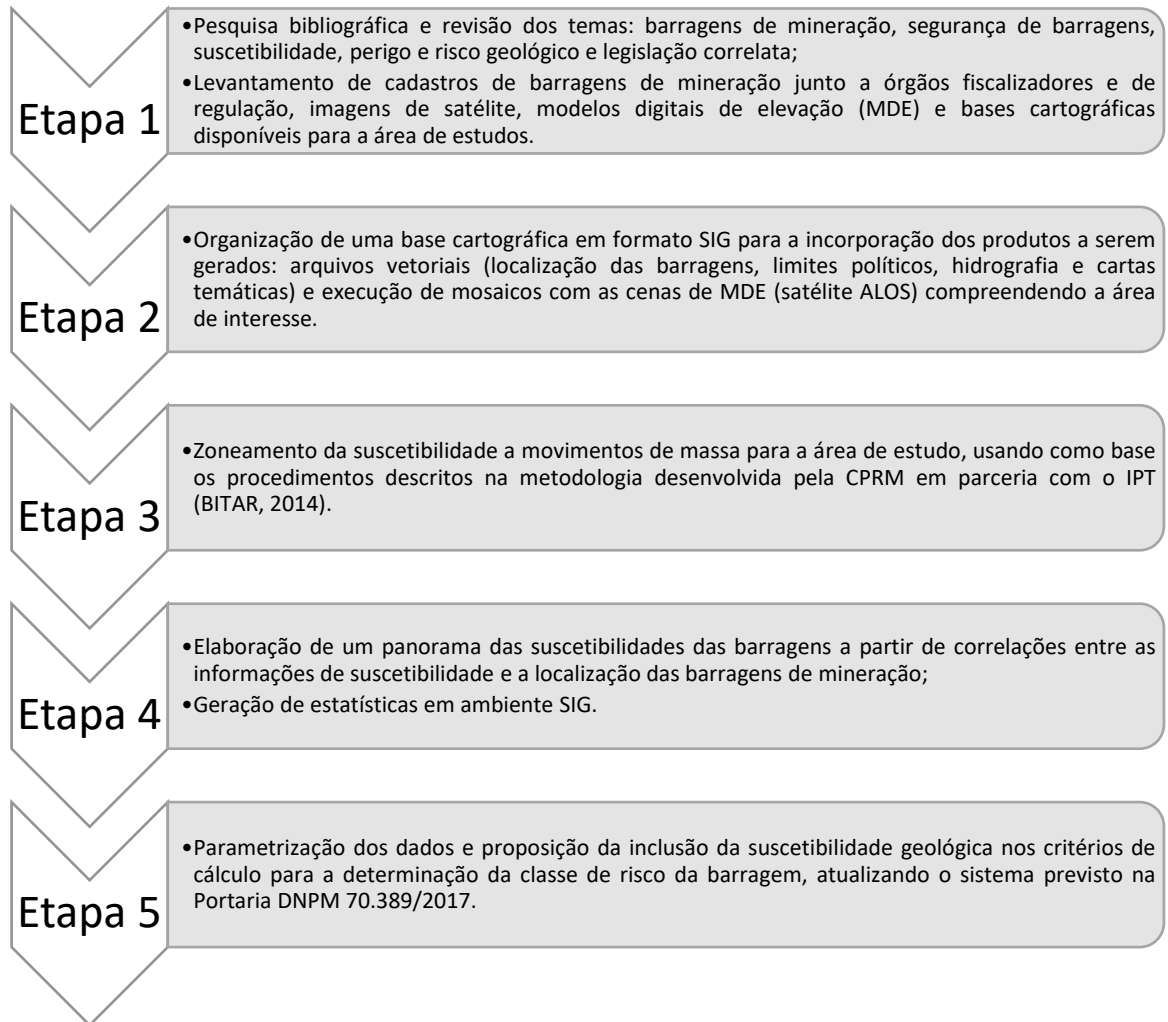
Figura 16: Municípios mapeados por CPRM e IPT através da metodologia para elaboração de cartas de suscetibilidade geológica a movimentos gravitacionais de massa e inundações (BITAR, 2014).



Fonte: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres/Produtos-por-Estado---Cartas-de-Suscetibilidade-a-Movimentos-Gravitacionais-de-Massa-e-Inundacoes-5384.html>.

A metodologia definida para o alcance dos objetivos propostos nessa monografia é mostrada no fluxograma abaixo (figura 17) e as técnicas utilizadas são detalhadas nos próximos itens.

Figura 17: Fluxograma sintetizando das etapas de trabalho.



Fonte: o AUTOR.

3.1 CRONOGRAMA

O desenvolvimento da monografia contou com o seguinte cronograma (quadro 6).

Quadro 6: Cronograma composto para o desenvolvimento do trabalho.

ATIVIDADES/ PERÍODO (2020)	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Etapa 1										
Etapa 2										
Etapa 3										
Etapa 4										
Etapa 5										
Entrega da versão final do Projeto de Pesquisa										

Fonte: o AUTOR.

3.2 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E LEVANTAMENTO DO MATERIAL EXISTENTE

Como subsídio para a execução de uma revisão bibliográfica que embasasse o desenvolvimento desse estudo, buscou-se na literatura publicações técnicas que abordassem os temas de segurança de barragens, aspectos técnicos e construtivos de barragens de mineração, suscetibilidade, perigo e riscos geológicos e registros de acidentes ou incidentes em barragens, envolvendo aspectos de riscos geológicos. As publicações consultadas, devidamente citadas neste estudo e elencadas nas referências bibliográficas, compreendem livros, capítulos de livros, manuais e boletins técnicos, teses e dissertações acadêmicas, materiais didáticos de cursos, bem como normas legais.

Para a definição do objeto de estudo, fez-se o download no site da ANM dos arquivos georreferenciados das barragens de mineração do estado de MG, cadastradas no SIGBM - ANM. A caracterização da área de estudo contou com material bibliográfico e cartográfico oriundo do mapeamento de geodiversidade do estado de MG (MACHADO E SILVA, 2010) e mapeamento geológico do estado de MG (CPRM, 2003).

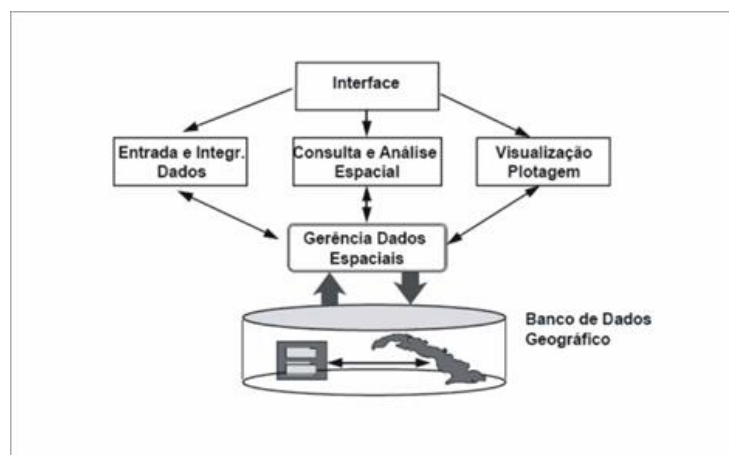
Por fim, como insumo para as análises posteriores em ambiente SIG, procedeu-se o download de cenas de MDE do satélite ALOS, que abrangessem os limites da área de estudo. Ao todo, foram adquiridas 71 cenas de MDE com resolução espacial de 12,5m.

3.3 CONSTRUÇÃO DE UMA BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL EM FORMATO SIG

Conforme Câmara (1995), o termo sistemas de informação geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em seus atributos, mas também através de sua localização espacial. Dessa forma, o SIG oferece ao usuário uma visão inédita de seu ambiente de trabalho, em que todas as informações disponíveis sobre um determinado assunto estão ao seu alcance, inter-relacionadas com base no que lhes é fundamentalmente comum - a localização geográfica. Para que isto seja possível, a geometria e os atributos dos dados num SIG devem estar georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica.

A estruturação de um SIG se sustenta nos seguintes componentes: interface com o usuário, entrada e integração dos dados, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem, e armazenamento e recuperação de dados (CÂMARA, 1995). O inter-relacionamento entre os componentes é apresentado na figura 18.

Figura 18: Estrutura geral de um SIG, com seus diferentes níveis e suas inter-relações.



Fonte: (CÂMARA, 1995).

Na presente pesquisa, o SIG é usado principalmente como o ambiente para a aplicação da metodologia desenvolvida pela CPRM e IPT (BITAR, 2014), com vistas ao zoneamento de

suscetibilidade a movimentos de massa para as barragens de mineração do estado de MG, bem como um banco de dados, onde serão incorporados os produtos gerados nas fases seguintes do trabalho.

Como ponto de partida, buscou-se junto ao Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração (SIGBM - ANM), os arquivos georreferenciados das barragens de mineração cadastradas para o estado de MG, disponíveis no site da ANM.

O passo seguinte foi fazer a aquisição das cenas de MDE que cobrissem a distribuição geográfica das barragens e que possuíssem uma resolução espacial compatível com a escala de análise da metodologia da suscetibilidade (1:25.000). Por esse motivo, fez-se o download de cenas do MDE adquiridas pelo satélite ALOS.

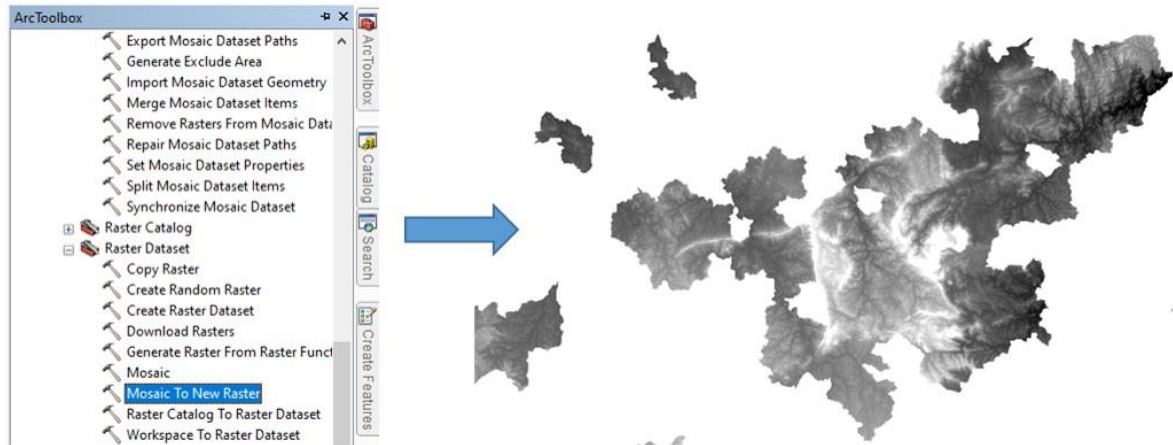
O ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) é um projeto conjunto entre a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA) e a *Japan Resources Observation System Organization* (JAROS). Seu desenvolvimento tem como um dos principais objetivos proporcionar dados de observação da Terra que contribuam ao desenvolvimento sustentável, cartografia topográfica, vigilância do meio ambiente, desastres e mudanças climáticas em todo o mundo (Oliveira, 2017). Este satélite é equipado com um sensor imageador ativo de alta frequência por micro-ondas, o PALSAR, que permite a aquisição de dados topográficos reais da superfície terrestre (MDE) com resolução espacial de 12,5m, uma vez que não sofrem interferências de nuvens e facilidade em ultrapassar o dossel vegetal.

Oliveira (2017) aponta os procedimentos para a download das cenas MDE:

- a) Cadastro gratuito no geoportal de descarregamento de imagens de satélite da *Alaska Satellite Facility* (UAF/NASA), disponível em: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>
- b) Delimitação da área de interesse no eclã (mapa-múndi) do geoportal.
- c) Ao indicar a Plataforma ALOS PALSAR, o usuário terá que selecionar dentre as opções de imagens disponíveis, o ALOS PALSAR modo FBD, que é o que contém o DEM.

Uma vez adquiridas as cenas, foram gerados os mosaicos do MDE final no software ARCGIS 10.4, através da ferramenta *mosaic to new raster*, disponível na *toolbox raster dataset* (figura 19).

Figura 19: Ferramenta *mosaic to new raster* utilizada no software ARCGIS 10.4 para a geração dos mosaicos de MDE. A seta indica o mosaico gerado para uma parte da área de estudo, abrangendo os municípios do Quadrilátero Ferrífero (MG).

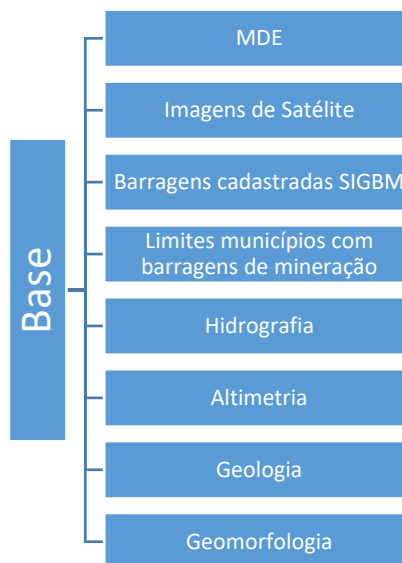


Fonte: o AUTOR.

Os demais arquivos que compõem a base cartográfica são constituídos por imagens de satélite do acervo multi-escala do BING Maps, disponibilizadas de forma nativa no ARCGIS 10.4, assim como arquivos vetoriais de hidrografia, altimetria, limites políticos e cartas temáticas, extraídos do Mapa de Geodiversidade do estado de MG (MACHADO E SILVA, 2010) e do Mapa geológico de MG (CPRM, 2003).

Assim, a estrutura da base cartográfica organizada neste estudo é elencada no esquema mostrado na figura 20.

Figura 20: Estrutura da base cartográfica elaborada para os passos seguintes de zoneamento da suscetibilidade a movimentos de massa para as barragens de mineração do estado de MG.



Fonte: o AUTOR.

3.4 ZONEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA

Para o zoneamento da suscetibilidade a movimentos de massa das áreas de entorno das barragens de mineração de MG foi aplicada a metodologia desenvolvida pela CPRM, em parceria com o IPT (BITAR, 2014).

Esta metodologia foi formatada em atenção às diretrizes específicas da Lei Federal 12.608/2012 (BRASIL, 2012), que estabelece a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC). Assim, a sua elaboração conta com a premissa da construção de um modelo aplicável em nível nacional, aberto a adaptações necessárias a cada região e que permita a comparabilidade entre os diferentes locais mapeados.

Segundo esta proposta, as suscetibilidades são analisadas para cada processo individualmente, elaborando-se um mapa de áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa, refletindo-se na compartimentação dos terrenos em zonas, segundo comportamentos homogêneos desses processos ante os fatores condicionantes. As zonas estão representadas por polígonos, que denotam os distintos graus de incidência espacial, denominadas classes de suscetibilidade (alta, média e baixa) e indicam a propensão relativa dos terrenos ao fenômeno abordado (BITAR, 2014).

Os processos do meio físico analisados compreendem os principais tipos de movimentos gravitacionais de massa (deslizamentos; rastejos; quedas, tombamentos, deslocamentos e rolamentos de rochas; e corridas de massa) e de processos hidrológicos (inundações e enxurradas), os quais estão frequentemente associados a desastres naturais ocorridos no País.

É importante salientar que na elaboração desta metodologia foram considerados os princípios apresentados no guia para zoneamento de suscetibilidade, perigo e risco a deslizamento (FELL *et al.*, 2008 *apud* BITAR, 2014), elaborado pelo Comitê Técnico de Deslizamentos e Taludes Construídos (*Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes - JTC-1*). Considerando a tabela 5, na qual estão descritos os níveis e escalas de detalhamento aplicáveis na elaboração de mapas de zoneamento referentes a deslizamentos, BITAR (2014) enquadra a metodologia no nível básico, situando-se na interface entre regional e local, em face da escala de referência adotada: 1:25.000.

Tabela 5: Níveis e escalas de detalhamento aplicáveis na elaboração de mapas de zoneamento referentes a deslizamentos.

Objetivo	Tipo de zoneamento				Nível de zoneamento			Escalas
	Inventário	Suscetibilidade	Perigo	Risco	Básico	Intermediário	Avançado	
Zoneamento Regional								
Informativo	X	X	-	-	X	-	-	1:25.000 até
Consultivo	X	X	(X)	-	X	(X)	-	1:250.000
Legal	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Zoneamento Local								
Informativo	X	X	X	(X)	X	(X)	-	1:5.000 até
Consultivo	(X)	X	X	X	X	X	X	1:25.000
Legal	-	(X)	X	(X)	-	X	X	
Zoneamento pontual								
Informativo	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	1:5.000 até
Consultivo	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	NUC	1:1.000
Legal	-	(X)	X	X	-	X	X	
Projeto	-	(X)	(X)	X	-	(X)	X	

Nota: X = aplicável; (X) pode ser aplicável; NR = não recomendado; NUC = não utilizado comumente.

Modificado de BITAR (2014).

Sobre a aplicação desta metodologia para os objetivos propostos no estudo aqui apresentado, é importante que se destaque as seguintes adaptações:

- Como o enfoque desta pesquisa está relacionado aos movimentos gravitacionais de massa e processos hidrológicos de alta energia (enxurradas) que podem afetar as áreas de montante e entorno das barragens de mineração, somente os passos metodológicos aplicados a esses processos foram empregados, não abrangendo a modelagem de inundação.
- Tendo em vista que o tempo necessário para desenvolver todos os passos descritos na figura 21, frente ao grande número de barragens analisadas, excederia o tempo de cronograma formatado para este tipo de estudo, optou-se por limitar o avanço desta pesquisa até a composição do pré-mapa de áreas suscetíveis. Portanto, não foi executada etapa de campo proposta para a validação do pré-mapa.

Nos subitens seguintes serão detalhados os fluxos de trabalho para a modelagem das suscetibilidades relacionadas aos processos de deslizamentos, corridas de massa e enxurradas.

3.4.1 Deslizamentos

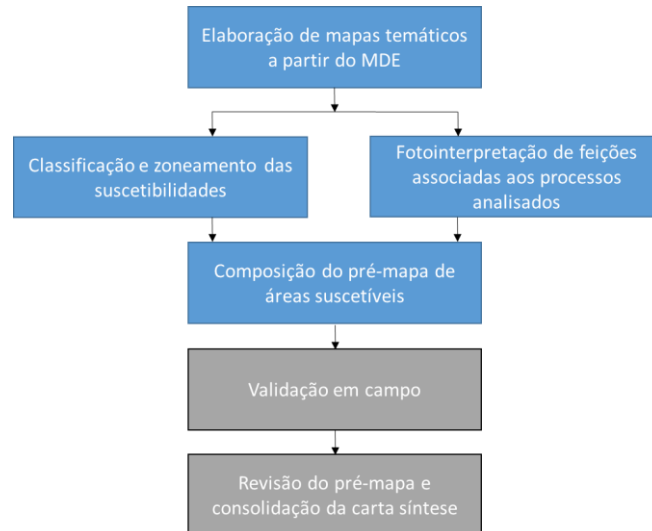
Os procedimentos para elaboração do mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos estão fundamentados no paradigma de que os registros do passado constituem um guia para a análise do futuro, assumindo-se que as áreas com características geomorfológicas e geológicas semelhantes às de locais afetados por deslizamentos são propensas a novas ocorrências (FELL *et al.*, 2008 *apud* BITAR, 2014).

Como forma de traduzir este paradigma para uma linguagem analítica, opta-se pelo mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos baseado em modelagem estatística. As abordagens estatísticas (ou probabilísticas) se fundamentam nas relações observadas entre cada fator condicionante e a distribuição dos deslizamentos em área (GUZZETTI *et al.*, 1999), visando a uma menor subjetividade e a uma maior repetitividade no mapeamento de áreas suscetíveis (FERNANDES *et al.*, 2001).

Nesta metodologia são utilizados como insumos três fatores predisponentes de deslizamentos, frequentemente associados à distribuição das cicatrizes, referenciados em literatura técnico-científica e com possibilidades de mapeamento dentro do escopo dos trabalhos: declividade, curvatura das vertentes e densidade de lineamentos estruturais (correlatos a fraturas, juntas, zonas de falhas e outras descontinuidades), que refletem, respectivamente, a influência combinada de aspectos geomorfológicos, hidrológico-pedológicos e geológicos (STABILE *et al.*, 2013).

Assim, como sequência de procedimentos básicos para o zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos, Bitar (2014) cita o seguinte (figura 21):

Figura 21: Sequência de procedimentos básicos desenvolvidos para o zoneamento da suscetibilidade a deslizamentos. Em cinza constam os passos não executados neste estudo.



Modificado de BITAR (2014).

3.4.1.1 *Elaboração de mapas temáticos a partir do MDE*

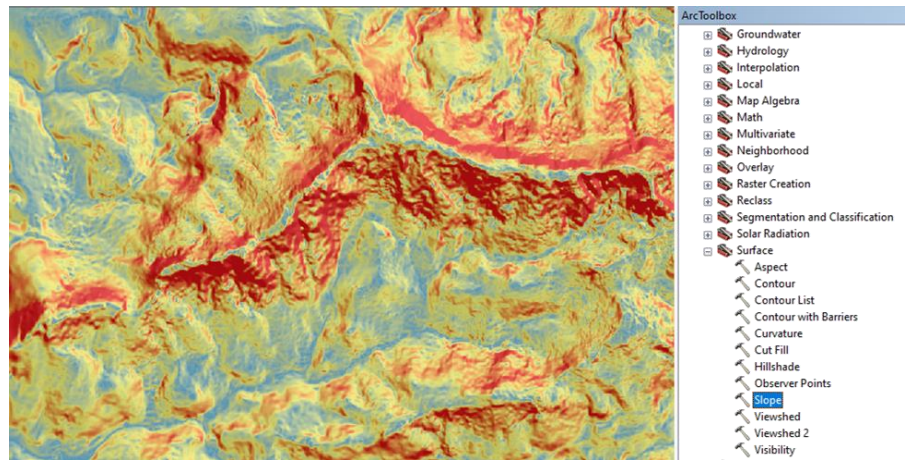
Uma vez gerados os mosaicos de MDE para a área de estudo, é nesta etapa que são produzidas cartas temáticas em ambiente SIG, que servirão como descritores do terreno usados nas próximas fases do fluxo de trabalho.

Os mapas temáticos gerados consistem na carta de declividades, na carta de curvatura das vertentes e na carta de densidade de lineamentos estruturais.

Para a geração da carta de declividades, o MDE foi submetido à ferramenta *slope*, disponível na *toolbox surface* do ARCGIS 10.4 (figura 22). A ferramenta *slope* calcula a taxa de mudança máxima no valor de cada célula (pixel) comparando aos seus vizinhos. Basicamente, a mudança máxima na elevação sobre a distância entre a célula e seus oito vizinhos identifica a descida em declive mais íngreme da célula (BURROUGH E MCDONELL, 1998).

Stabile *et al.* (2013) aponta que a declividade é o parâmetro mais associado aos deslizamentos, sendo utilizado praticamente em todos os trabalhos cujo foco é identificar os controles desse tipo de movimento de massa nas encostas. A maior parte dos estudos define limiares, ou seja, ângulos a partir do qual a frequência de deslizamentos ou outras tipologias de movimentos de massa aumentam significativamente.

Figura 22: Exemplo de carta de declividades executada no software ARCGIS 10.4. A imagem retrata uma porção da área de estudo. As cores quentes indicam as maiores declividades.



Fonte: o AUTOR.

Florenzano (2008) aponta que a análise da curvatura das vertentes se dá em termos de curvatura vertical (convexo, côncavo ou retilínea) e horizontal (convergente, divergente ou planar), vide figura 23. Escala: 1:60.000.

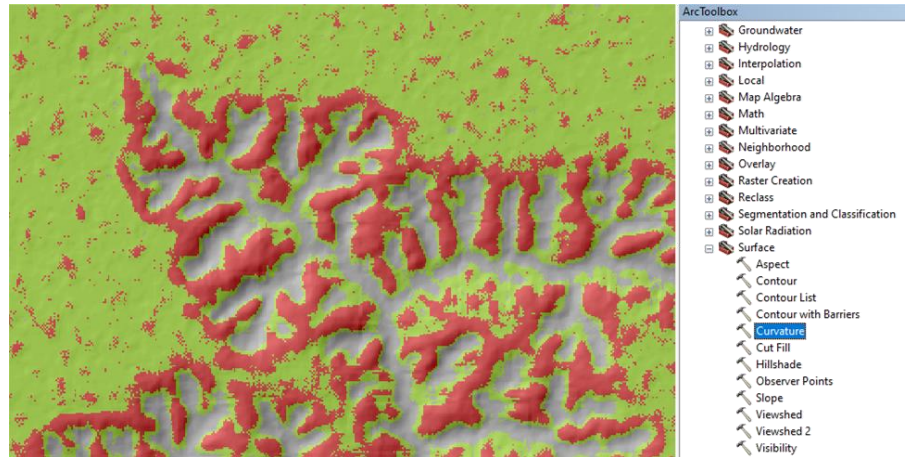
Figura 23: Combinação dos tipos de curvatura para determinar as formas de relevo.

		Curvatura horizontal		
		convergente	planar	divergente
Curvatura vertical	côncava			
	retilínea			
	convexa			

Fonte: (DIKAU, 1990 *apud* FLORENZANO, 2008).

Para a geração da carta de curvatura das vertentes, o MDE foi submetido à ferramenta *curvature* da *toolbox surface* no ARCGIS 10.4 (figura 24). Para adequá-lo à escala de trabalho, a carta de curvatura gerada inicialmente foi tratada por meio do módulo *focal statistics* (ferramenta *neighborhood*), utilizando um raio circular de 5 células, ou seja, 25 m, no qual foi calculada a média da curvatura no entorno de cada célula do MDE.

Figura 24: Exemplo de carta de curvatura das vertentes executada no software ARCGIS 10.4. A imagem retrata uma porção da área de estudo. Em cinza, terreno com forma côncavo-convergente; a cor vermelha classifica terrenos convexo-divergentes e; em verde, terrenos retilíneo-planares. Escala: 1:60.000.



Fonte: o AUTOR.

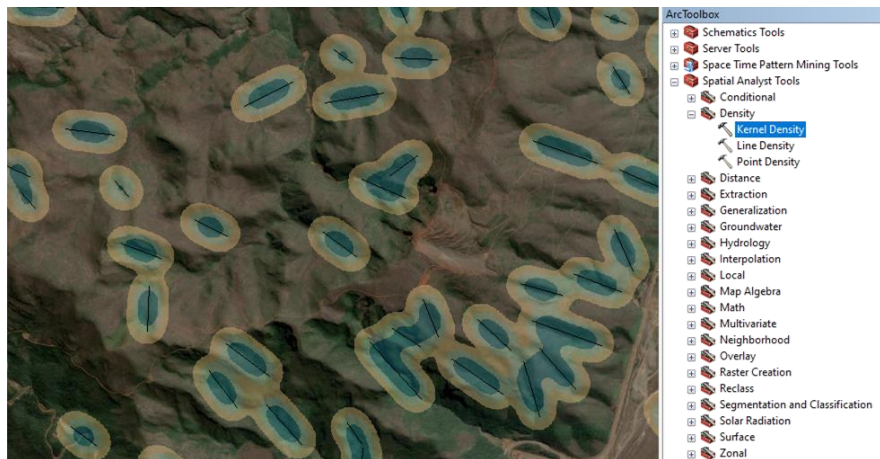
Estudos apontam as zonas de *hollows* (convergências e concavidades) como as mais favoráveis à ocorrência de deslizamentos, por serem zonas de convergência de sedimentos e fluxos d'água, favorecendo a saturação dos horizontes pedológicos (FERNANDES *et al.*, 2001). A ocorrência de vertentes retilíneas e planares sugere a sua importância como palco de ocorrência de processos erosionais e movimentos de massa de alta velocidade e rasos (SELBY, 1985), como os deslizamentos planares. Já perfis de vertente convexos e divergentes, por terem comportamento oposto aos *hollows*, favorecem a dispersão de fluxo d'água, tanto em superfície como em subsuperfície (TROEH, 1965). Cabe salientar que, embora não favoreçam a concentração de água no perfil de solo (o que poderia gerar poro-pressões críticas à deflagração de deslizamentos), o perfil convexo pode estar associado à ocorrência de rastejo (BLOOM, 1970).

Os fatores relacionados às estruturas geológicas mais comumente empregados em modelos de suscetibilidade são a distância e a densidade de lineamentos (STABILE *et al.*, 2013). Os lineamentos são feições lineares, mapeáveis (em fotografias aéreas, imagens de satélite ou modelos digitais de terreno), simples ou compostas, cujas partes são alinhadas de forma retilínea ou levemente curva, presumivelmente refletindo um fenômeno de subsuperfície (O'LEARY *et al.*, 1976 *apud* STABILE *et al.*, 2013). A associação entre as estruturas geológicas e os movimentos de massa em análises estatísticas ainda é pouco explorada no Brasil, todavia é alvo de vários estudos internacionais, que normalmente associam a presença de fraturas

(representadas por lineamentos) à ruptura da massa rochosa e à consequente diminuição de sua resistência (DONATI e TURRINI, 2002 *apud* STABILE *et al.*, 2013).

Para o mapeamento dos lineamentos, a inclusão da altimetria nas imagens de satélite do repositório BING Maps foi obtida através da fusão com o relevo sombreado, gerado a partir do MDE no ARCGIS 10.4. Posteriormente, essas feições foram delimitadas na escala de observação 1:25.000. O cálculo da distância e densidade de lineamentos foi obtido a partir do módulo *kernel density* (ferramenta *density*), que calcula a densidade de feições lineares a partir de um raio de busca (SILVERMAN, 1986 *apud* STABILE *et al.*, 2013). Desse modo, a carta de lineamentos representa a sua densidade a partir de suas distâncias relativas (figura 25).

Figura 25: Exemplo de carta de densidade de lineamentos executada no software ARCGIS 10.4. A imagem retrata uma porção da área de estudo. Escala 1:50.000.



Fonte: o AUTOR.

3.4.1.2 Fotointerpretação das feições associadas aos processos analisados

Para determinar a relação entre os fatores predisponentes e os deslizamentos, Bitar (2014) aponta a necessidade de se definirem áreas piloto para a execução do mapeamento de cicatrizes de deslizamentos, através de fotointerpretação. As cicatrizes de deslizamentos são mapeadas por polígonos, delimitando-se, preferencialmente, a área correspondente à superfície de ruptura e excluindo-se, assim, as áreas de arraste e de deposição dos materiais mobilizados (figura 26).

Figura 26: Exemplo de cicatrizes mapeadas em áreas piloto. Fonte: Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Ouro Preto – MG (CPRM, 2014). Escala 1:10.000.



Fonte: o AUTOR.

Para a presente pesquisa, utilizou-se um mapeamento de cicatrizes já existente em três cartas de suscetibilidade executadas pela CPRM e IPT para municípios integrantes da área de estudo: Ouro Preto (CPRM, 2014), Congonhas (CPRM, 2014) e Nova Lima (IPT, 2015). No total, foram contabilizadas 127 cicatrizes de deslizamento mapeadas (tabela 6).

Tabela 6: cicatrizes de deslizamentos mapeadas nas áreas piloto oriundas dos mapeamentos feitos por CPRM e IPT.

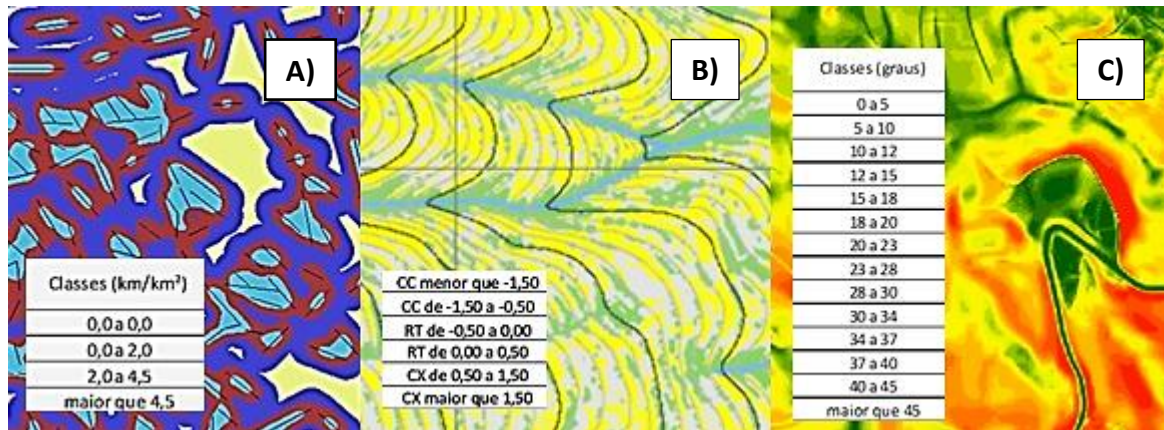
Áreas piloto	Número de cicatrizes mapeadas
Ouro Preto	120
Congonhas	03
Nova Lima	04

Fonte: o AUTOR.

3.4.1.3 Classificação e zoneamento das suscetibilidades

Após a produção das cartas temáticas dos fatores predisponentes, cada um é dividido em classes. Após testes baseados em valores encontrados na literatura técnica e legislações, foi definida a seguinte compartimentação para cada fator predisponente (figura 27).

Figura 27: Fatores predisponentes classificados, segundo valores da metodologia (BITAR,2014). A) densidade de lineamentos; B) curvatura das vertentes; e C) declividades.



Modificado de BITAR (2014).

Stabile *et al.* (2013) detalha os principais passos para avaliar a relação entre os deslizamentos e cada um dos parâmetros analisados:

- Calcular a porcentagem da área dentro de cada uma das classes que foi afetada por deslizamentos, ou seja, em que foram mapeadas cicatrizes.

$$PD = \frac{A_d}{A_t} \times 100$$

Onde: PD= porcentagem da área afetada por deslizamentos em cada classe do fator condicionante; Ad= área afetada por deslizamentos na classe; At= área total da classe.

- Para que a intensidade do evento mapeado não tenha influência nos resultados, dividir cada um dos valores pela média da área afetada por deslizamentos na área de estudo. Esse índice é denominado ISD (Índice de Suscetibilidade a Deslizamentos).

$$ISD = \frac{PD}{PD_t}$$

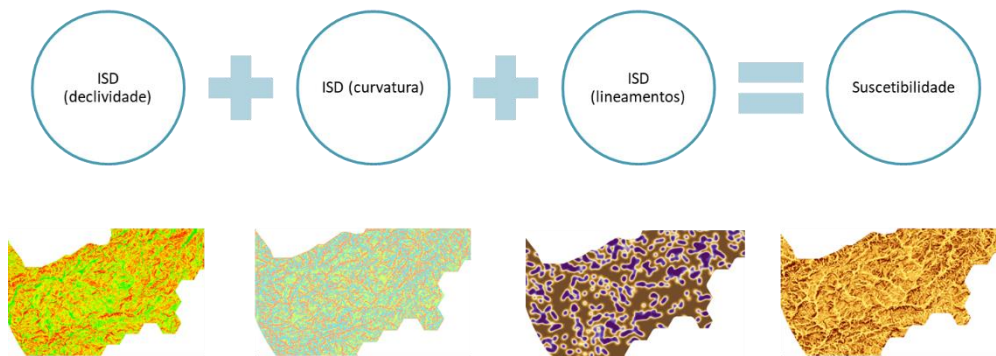
Onde: ISD= índice de suscetibilidade a deslizamentos; PD= porcentagem da área afetada por deslizamentos em cada classe do fator condicionante; PD_t= porcentagem da área afetada por deslizamentos na área de estudo.

Na prática, o resultado da equação 2 determina o quanto cada fator influencia a deflagração dos deslizamentos.

3.4.1.4 Composição do pré-mapa de áreas suscetíveis

Para o mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos, as cartas dos fatores predisponentes considerados (declividade, curvatura de vertente e densidade de lineamentos estruturais) são reclassificadas segundo os respectivos valores de ISD, e posteriormente somados (figura 28).

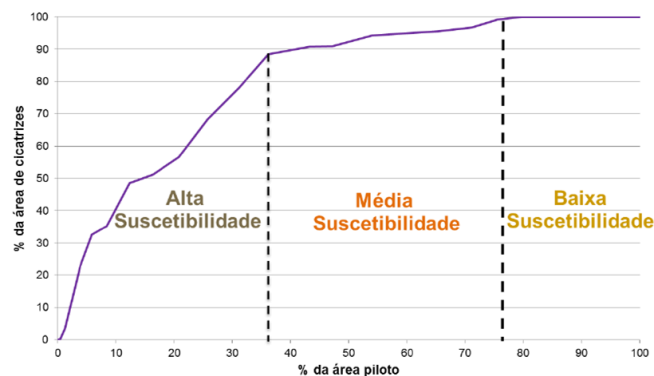
Figura 28: As classes ISD de cada fator condicionante são somadas, de modo a compor o ISD total da área de estudo.



Fonte: (BITAR, 2014).

Para definição das classes de suscetibilidade (alta, média e baixa), visando elaborar o zoneamento, busca-se incluir o maior número de deslizamentos nas classes mais altas, em uma área mínima (FELL *et al.*, 2008 *apud* BITAR, 2014). Para tanto, são elaboradas curvas que relacionam a área de ocorrência de deslizamentos com cada área piloto, segundo sua suscetibilidade (figura 29).

Figura 29: Relação entre área de cicatrizes e área total.

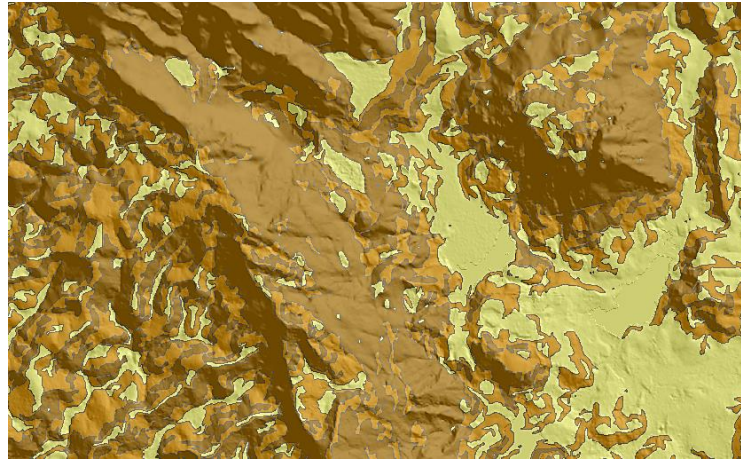


Fonte: (BITAR, 2014).

A alta suscetibilidade é definida no limite superior da curva (em geral contemplando 90% dos deslizamentos), enquanto a suscetibilidade média é dada a partir da abrangência dos demais deslizamentos ocorridos na área piloto, totalizando cerca de 100% da área das cicatrizes

mapeadas. Por sua vez, a baixa suscetibilidade representa as demais áreas cuja ocorrência de deslizamentos na área piloto é nula ou desprezível. Dessa forma, compõe-se o zoneamento da suscetibilidade em três classes, conforme visto na figura 30.

Figura 30: Trecho da área de estudo mostrando o zoneamento de suscetibilidade a deslizamentos, distinguindo-se as três classes pela tonalidade da cor marrom (mais escura: alta; intermediária: média; mais clara: baixa). Escala: 1:25.000.



Fonte: o AUTOR.

3.4.2 Corridas de massa e enxurradas

Nesta etapa busca-se identificar a existência de bacias hidrográficas com suscetibilidade aos processos de corridas de massa e enxurradas. Considerando a escala de referência (1:25.000), foram estabelecidos critérios e parâmetros físicos específicos para esse fim, por meio de cruzamento de atributos do meio físico obtidos a partir de MDEs, de modo a compor um modelo apropriado de abordagem.

O atributo chave para corridas de massa e enxurradas é a amplitude do perfil longitudinal da bacia de drenagem (diferença entre a altitude da cabeceira até o ponto de exutório). Para corridas de massa, a bacia deve estar em ambiente de alta suscetibilidade a movimentos de massa.

Considerando os pressupostos citados, os critérios e parâmetros utilizados na modelagem de bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa, compreendem:

- a) Unidades de relevo serrano;
- b) Terrenos com alta suscetibilidade a deslizamentos;

- c) Amplitude > 500 metros;
- d) Bacias de drenagem com Área < 10 km²; e
- e) Relação entre amplitude e área da bacia dada pelo Índice de Melton (M), onde $M = \text{Amplitude} / \text{raiz quadrada da Área}$, que deve ser > 0,3.

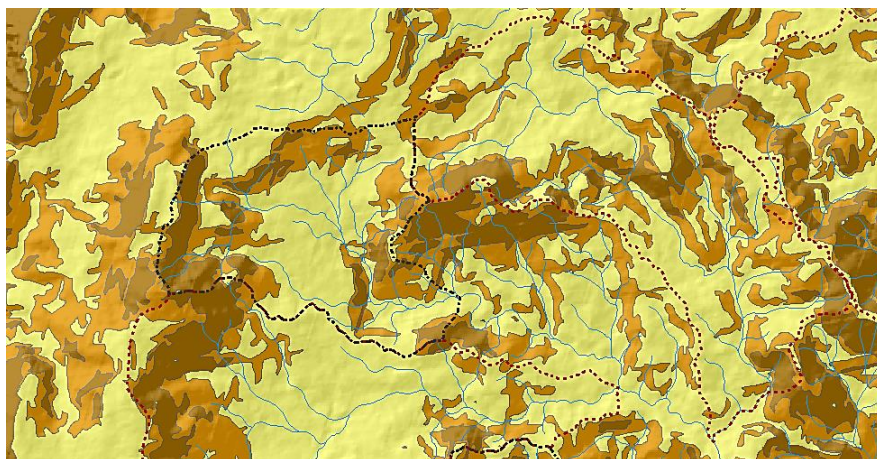
O valor de 0,3 para o Índice de Melton é baseado no trabalho de Wilford (2004) *apud* Bitar (2014), no qual são discutidos limiares para diferentes tipos de fluxos, incluindo as corridas de massa.

Para enxurradas, os critérios e parâmetros considerados são:

- a) Unidades de relevo serrano e/ou de morros altos;
- b) Amplitude > 300 metros; e
- c) Bacias de drenagem com Área < 10 km².

Tais critérios são aplicados no MDE através de ferramentas de geoprocessamento, de modo a delimitar automaticamente as bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa e enxurradas, as quais são lançadas sobre o zoneamento de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa, dada a correlação entre os processos (figura 31).

Figura 31: Porção da área de estudo mostrando bacias de drenagem suscetíveis a corridas de massa e enxurradas (delimitadas por traço e ponto na cor preta) e a enxurradas (tracejado em vermelho), indicadas sobre o zoneamento referente a movimentos gravitacionais de massa. Escala: 1:40.000.



Fonte: o AUTOR.

3.5 CONSTRUÇÃO DE UM PANORAMA DAS SUSCETIBILIDADES DAS BARRAGENS DE MINERAÇÃO DE MG

Uma vez que a área de estudo foi zoneada em termos da suscetibilidade a deslizamentos, corridas de massa e enxurradas, esta etapa tem o objetivo de correlacionar as barragens de mineração a essas zonas, de modo a se determinar a incidência desses movimentos gravitacionais de massa em relação aos sítios de locação das barragens.

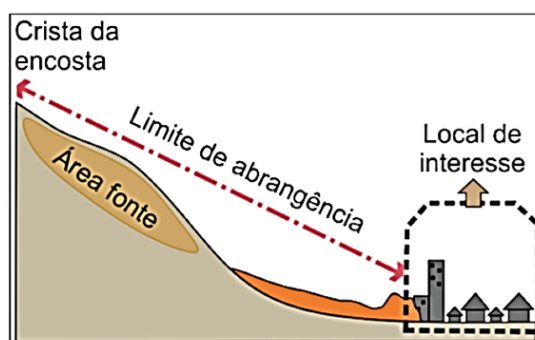
Esta estimativa da incidência é obtida por meio de cálculos efetuados diretamente em ambiente de SIG, os quais baseiam-se em correlações de área entre as zonas e o entorno das barragens (em hectares) bem como em proporção (%). Para alcançar este objetivo, foram desenvolvidas pelo autor duas etapas metodológicas: a delimitação de um limite de abrangência e o cálculo das incidências, propriamente dito.

3.5.1 Delimitação do limite de abrangência das barragens de mineração

Como as estimativas baseiam-se em relações de área, primeiramente, foi necessário definir uma área de abrangência para análise de cada barragem, haja vista que as barragens de mineração são cadastradas no SIGBM - ANM apenas com um par de coordenadas localizadas no centro da crista da estrutura, resultando em um único ponto.

CPRM (2018), no Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa, define que a área ou limite de abrangência para as análises deve se estender desde o local de interesse até as cristas das encostas que o circundam, uma vez que são os locais onde já ocorreu mobilização de material em eventos pretéritos ou onde ela pode ocorrer (figura 32).

Figura 32: Delimitação do limite de abrangência referente à área fonte.

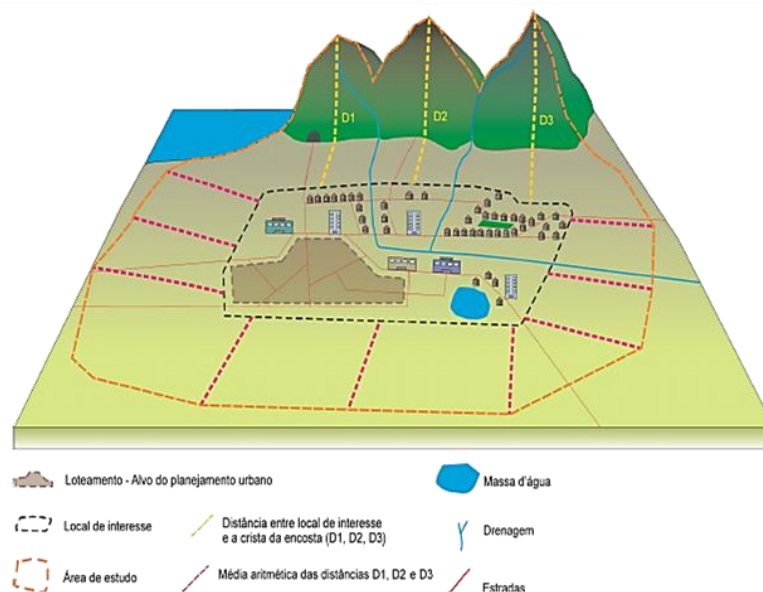


Fonte: (CPRM, 2018).

Dentro desta premissa, definiu-se como limite de abrangência uma área circular em torno do ponto de cadastro da barragem, perfazendo um raio de entorno.

É comum que as barragens estejam apenas parcialmente envoltas por encostas, o que ocorre normalmente nas ombreiras e região de montante. Assim, seguiu-se o critério descrito em CPRM (2018), no qual, para estes casos, a definição do limite de abrangência deverá ser realizada a partir do cálculo da média das distâncias entre o local de interesse e as cristas das encostas mais próximas, utilizando-se, no mínimo, 03 distâncias para o cálculo da média (figura 33). Para viabilizar este cálculo foram utilizadas ferramentas de geoprocessamento sobre o MDE da área de estudo, em ambiente SIG.

Figura 33: Definição do limite das áreas de estudo quando não houver encostas adjacentes aos locais de interesse.



Fonte: (CPRM, 2018).

Inicialmente, foi preciso determinar a posição das cristas ou cumes das elevações do terreno. Para isto inverteu-se o MDE multiplicando-o por -1 com a função *raster calculator*. O produto desta operação é um novo *raster*, onde os picos foram transformados em depressões. Posteriormente, fez-se um mapa de direção de fluxo a partir do MDE invertido, e então, aplicou-se a este mapa a função *sink* utilizada para identificar depressões espúrias. O resultado foi uma camada em formato *raster* onde cada pixel corresponde a um cume. Em seguida converteu-se esta camada para o formato vetorial do tipo ponto (figura 34).

Figura 34: Porção da área de estudo mostrando os pontos de cumes gerados a partir do MDE. Escala 1: 25.000.



Fonte: o AUTOR.

Posteriormente, atribuiu-se a esses pontos valores de amplitude, que corresponde à distância altimétrica entre a base da encosta e seu respectivo cume, a partir da função *add surface information*. As amplitudes foram obtidas com a aplicação do algoritmo HAND - *Height Above the Nearest Drainage* (RENNÓ *et al.*, 2008). O HAND é um algoritmo utilizado na modelagem de inundação das cartas de suscetibilidade (BITAR, 2014), por medir a diferença altimétrica entre qualquer ponto da grade do MDE e o respectivo ponto de escoamento na drenagem mais próxima. Em outras palavras, a utilização do HAND nos fornece diretamente a variação de amplitude do relevo.

Para assegurar que ruídos do MDE fossem eliminados e que somente os cumes de encostas com amplitude suficiente para gerar deslizamentos fossem computados na definição do limite de abrangência das barragens, foram utilizados os critérios e parâmetros de classificação de padrões de relevo definidos por IPT/Emplasa (1990). Esta ação tem a função de limpar o ruído do arquivo de pontos para só admitir a permanência de cumes com amplitude superior a 40 metros, ou seja, maiores ou iguais ao padrão “colinas” (tabela 7).

Tabela 7: Padrões de relevo e amplitudes básicas, segundo critérios de classificação.

Padrão de relevo	Amplitude predominante (m)
Colinas	40 a 70
Morrotes	60 a 90
Morros baixos	90 a 110
Morros altos	140 a 200
Serras	> 300
Escarpas	100

Modificado de IPT/EMPLASA (1990).

O raio de abrangência de cada barragem foi calculado com base na média da distância dos cumes mais próximos do seu respectivo ponto de cadastro no SIGBM - ANM, utilizando a função *generate near table*. Por fim, aplicou-se a função *buffer* nos pontos de cadastro SIGBM – ANM para a delimitação dos limites de abrangência, utilizando como raio o valor da média calculado. Assim, o limite de abrangência adequa-se ao terreno do entorno da barragem, de modo que uma barragem localizada em um vale mais dissecado (fechado) terá um raio de abrangência menor do que uma barragem localizada em um vale mais aberto, por exemplo. Tal dinâmica permitiu a definição de um limite de abrangência capaz de englobar proporcionalmente os sítios de locação da maior parte das estruturas e as encostas mais próximas, com potencial de deflagração dos processos analisados (figura 35).

Figura 35: Porção da área de estudo mostrando o limite de abrangência das barragens (círculos pretos), com área proporcional à média das distâncias dos cumes do entorno (pontos amarelos) em relação ao ponto de cadastro SIGBM – ANM (pontos verdes). Escala 1: 40.000.



Fonte: o AUTOR.

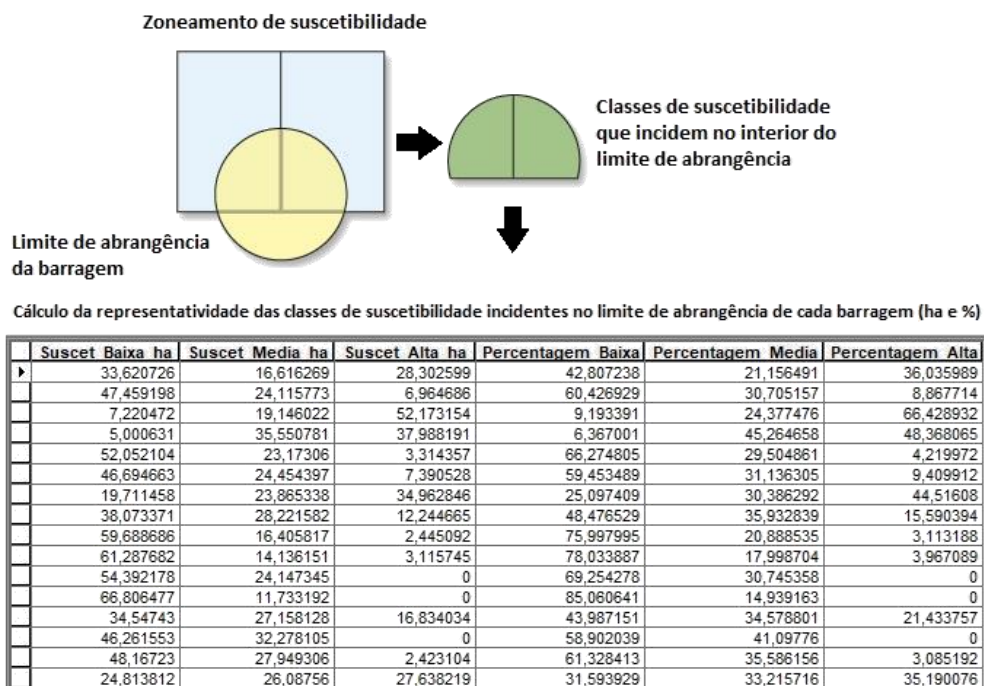
Como se trata de uma área média medida a partir de um único ponto (limitação do SIGBM), é importante salientar que em alguns casos este raio acabou sendo insuficiente para englobar todo o sítio de locação de barragens com reservatórios de maior porte. Entretanto, a proposta mostrou-se satisfatória para a maioria dos casos.

3.5.2 Cálculo da incidência das classes de suscetibilidade nos limites de abrangência das barragens de mineração

Para o cálculo das incidências, inicialmente, procedeu-se a sobreposição e corte do zoneamento de suscetibilidade pelos limites de abrangência através da ferramenta *intersect*. Na prática, este passo acrescenta as informações de incidência das zonas de suscetibilidade às áreas de abrangência.

Finalmente, o cálculo da representatividade das três classes de suscetibilidade em relação ao limite de abrangência de cada barragem é feito diretamente em ambiente SIG, através de sua tabela de tributos, em termos de área (em hectares) e proporção (%). A figura 36 demonstra esquematicamente o processo.

Figura 36: Processo de cálculo da incidência das classes de suscetibilidade no interior do limite de abrangência das barragens, baseado em correlações de área (em hectares) bem como em proporção (%). Na tabela de atributos, cada linha representa uma barragem do cadastro da ANM.



Fonte: o AUTOR

3.6 PARAMETRIZAÇÃO DOS DADOS E PROPOSIÇÃO DA INCLUSÃO DA SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA NOS CRITÉRIOS DE CÁLCULO PARA A DETERMINAÇÃO DA CLASSE DE RISCO DA BARRAGEM

A Política Nacional de Segurança de Barragens tem como um de seus instrumentos de aplicação o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado.

A Resolução CNRH nº 143/2012, determina que as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, por categoria de risco, por dano potencial associado e pelo seu volume, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

Para normatizar a classificação das barragens de mineração, a Portaria DNPM nº 70.389/2017 utiliza uma matriz que analisa a categoria de risco versus o dano potencial associado da barragem (tabela 8).

Tabela 8: Matriz de classificação das barragens de mineração, conforme a Portaria DNPM nº 70.389/2017.

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO ANM nº 70.389/2017		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D
BAIXO	B	C	E

Fonte: (BRASIL, 2017).

Da Portaria DNPM nº 70.389/2017 define-se:

“Categoria de Risco - CRI: classificação da barragem de acordo com os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente, levando-se em conta as características técnicas, o estado de conservação e o Plano de Segurança da Barragem”;

“Dano Potencial Associado - DPA: dano que pode ocorrer devido ao rompimento ou mau funcionamento de uma barragem, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, a ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas, impactos sociais, econômicos e ambientais”;

As faixas de classificação da CRI são obtidas pela soma dos pontos oriundos das matrizes de Características Técnicas - CT, Estado de Conservação - EC e Plano de Segurança de Barragens

– PS (quadro 7), já a categoria referente ao DPA é fornecida por uma única matriz secundária (quadro 8).

Quadro 7: Faixas de classificação da CRI obtidas pela soma dos pontos oriundos das matrizes de Características Técnicas - CT, Estado de Conservação - EC e Plano de Segurança de Barragens – PS. Fonte: Portaria DNPM 70.389/2017.

PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		
CLASSIFICAÇÃO DE RISCO		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	CATEGORIA DE RISCO	CRI
	ALTO	≥ 65 ou $EC^+ = 10$ (*)
	MÉDIO	$37 < CRI < 65$
	BAIXO	≤ 37

Fonte: (BRASIL, 2017).


Quadro 8: Faixas de classificação do DPA obtidas pela soma dos pontos oriundos de uma única matriz secundária. Fonte: Portaria DNPM 70.389/2017.

PONTUAÇÃO TOTAL (DPA)		
CLASSIFICAÇÃO DE DANO		
FAIXAS DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 13
	MÉDIO	$7 < DPA < 13$
	BAIXO	≤ 7

Fonte: (BRASIL, 2017).

Cada uma dessas matrizes secundárias expõe características relacionadas à barragem, que funcionam como descritores da probabilidade de falha e das respectivas consequências. Dependendo do grau de contribuição dessas características são atribuídas pontuações. Assim, se a característica pouco contribui terá pontuação zero ou baixa, aumentando à medida que aumenta a contribuição da característica para a probabilidade de falha e consequências. O quadro 9 traz como exemplo a matriz secundária de pontuação das Características Técnicas.

Quadro 9: Matriz de pontuação de Características Técnicas.

 Departamento Nacional de Produção Mineral				
QUADRO 2 - MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO (RESÍDUOS E REJEITOS)				
1.1 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS (CT)				
Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)	Método Construtivo (d)	Auscultação (e)
Altura ≤ 15m (0)	Comprimento ≤ 50m (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0)	Etapa única (0)	Existe instrumentação de acordo com o projeto técnico (0)
15m < Altura < 30m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milenar (2)	Alteamento a jusante (2)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto, porém em processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (2)
30m ≤ Altura ≤ 60m (4)	200 ≤ Comprimento ≤ 600m (2)	TR = 500 anos (5)	Alteamento por linha de centro (5)	Existe instrumentação em desacordo com o projeto sem processo de instalação de instrumentos para adequação ao projeto (6)
Altura > 60m (7)	Comprimento > 600m (3)	TR inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável (10)	Alteamento a montante ou desconhecido ou que já tenha sido alteado a montante ao longo do ciclo de vida da estrutura (10)	Barragem não instrumentada em desacordo com o projeto (8)
CT = ∑ (a até e)				

Fonte: (BRASIL, 2017).

Uma vez que os procedimentos metodológicos descritos nos subitens anteriores permitiram a inserção das informações de suscetibilidade a movimentos de massa às áreas de abrangência das barragens de mineração, bem como permitiram o cálculo da representatividade de cada zona em termos de área e proporção, propõe-se a inclusão da suscetibilidade geológica nos critérios de cálculo para a determinação da CRI da barragem, atualizando o sistema previsto na Portaria DNPM 70.389/2017. Assim, a suscetibilidade a deslizamentos, corridas de massa e enxurradas foi parametrizada, de modo a permitir a sua formatação como atributo de uma matriz de pontuação secundária.

Para os deslizamentos, utilizou-se a percentagem de ocorrência da classe de baixa suscetibilidade no interior do limite de abrangência das barragens como balizador para a definição das notas da coluna “Deslizamentos” da matriz de “Suscetibilidade Geológica”. Tal escolha baseia-se na premissa de que uma barragem construída em um sítio com predomínio de

baixa suscetibilidade a deslizamentos encontra-se em um cenário de maior estabilidade geológica frente à deflagração desses processos nas encostas naturais de seu entorno, acarretando menor propensão de impactos negativos à sua CRI.

No caso das enxurradas e corridas de massa, o fator determinante para as notas é a incidência ou não da barragem em uma microbacia hidrográfica suscetível. Corridas e enxurradas são processos de alta energia hidrodinâmica, entretanto, por sua elevada concentração de sólidos, bem como por seu amplo raio de alcance, as corridas configuram o tipo de processo com maior potencial destrutivo (TOMINAGA, 2012). Adicionalmente, Bitar (2014) aponta que bacias hidrográficas onde ocorrem corridas de massa apresentam atributos físicos que possibilitam também a geração de enxurradas; por outro lado, nem todas as bacias hidrográficas onde podem ocorrer enxurradas têm atributos que possam gerar também corridas de massa. Por esse motivo, em caso de incidência das barragens em microbacias suscetíveis, a nota deverá ser diferenciada em relação ao processo e proporcional ao seu potencial destrutivo, impondo menor ou maior impacto negativo a CRI. Tal abordagem resulta na coluna “Corridas e Enxurradas” da matriz de “Suscetibilidade Geológica”.

Como propõe-se a inclusão da suscetibilidade geológica como atributo na soma final da CRI, a matriz proposta é compatível com a sistemática de notas presente na Portaria DNPM 70.389/2017 (quadro 10). É importante salientar que os critérios de corte e as respectivas notas são aqui propostas empiricamente, não tendo passado por consulta pública ou sob o crivo de um painel de especialistas, tal como foram os critérios publicados na legislação. Outrossim, é importante dizer que a escolha de valores numéricos baixos para as notas dos atributos da matriz proposta foi assim definida para não superdimensionar o seu impacto na nota final da CRI, haja vista que a proporção de registros de acidentes em barragens que tiveram como causa a deflagração dos processos analisados é baixa, conforme literatura técnica.

Quadro 10: Proposta de matriz de pontuação de Suscetibilidade Geológica.

MATRIZ DE CLASSIFICAÇÃO QUANTO À CATEGORIA DE RISCO	
SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA (SG)	
Deslizamentos (em relação à proporção de ocorrência da classe baixa - CB no limite de abrangência da barragem) (o)	Corridas de Massa e Enxurradas (em relação à incidência da barragem em microbacia hidrográfica suscetível) (p)
CB > 90% (0)	Não incide (0)
70% < CB ≤ 90% (1)	Incide em microbacia suscetível a enxurradas (2)
50% < CB ≤ 70% (2)	Incide em microbacia suscetível a corridas de massa (4)
CB ≤ 50% (3)	
SG = \sum (o até p)	

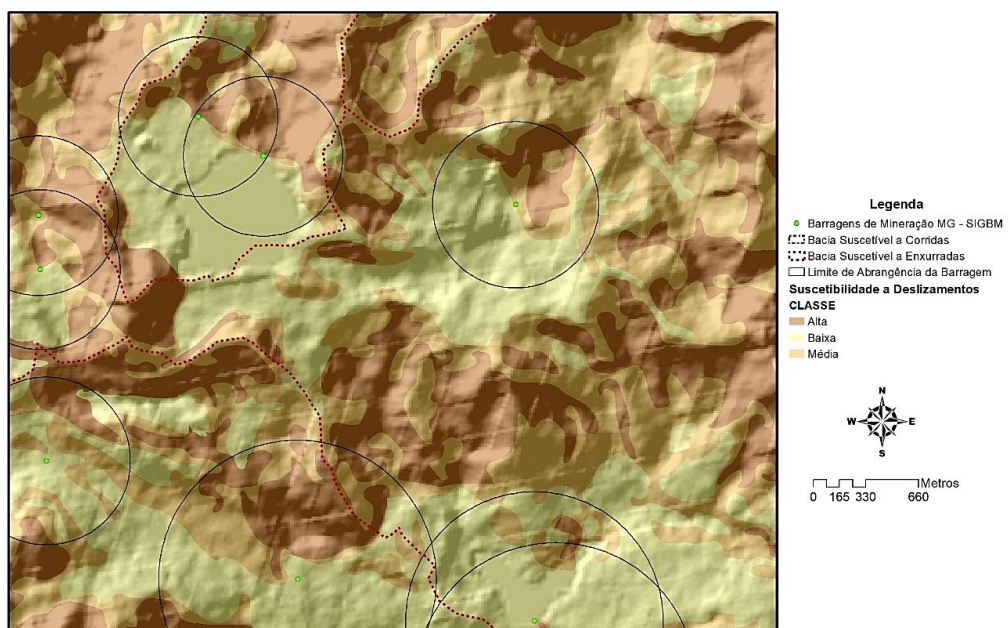
Fonte: o AUTOR.

4. CAPITULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Antes da apresentação dos resultados e sua discussão, é importante salientar que o cadastro de barragens de mineração do SIGBM – ANM é dinâmico. O número de barragens cadastradas sofre mudanças ao longo do tempo, assim como os dados de classificação dessas estruturas são atualizados constantemente, em função das ações fiscalizatórias dessa instituição. As estatísticas e cenários aqui abordados referem-se ao retrato do cadastro SIGBM com período de referência de novembro de 2020, o qual conta com um total de 365 barragens de mineração. Destas, 216 estruturas integram a PNSB e outras 149 não estão inseridas, por não se enquadrarem nos requisitos previstos nesta legislação.

O zoneamento da suscetibilidade a movimentos de massa na área de estudo permitiu a divisão do terreno em 3 classes homogêneas (alta, média e baixa) com diferentes propensões à deflagração natural dos processos geológicos analisados, além da delimitação das microbacias propensas à deflagração de enxurradas e corridas de massa (figura 37).

Figura 37: Porção da área de estudos mostrando as zonas de suscetibilidade geológica a deslizamentos inseridas no limite de abrangência de cada barragem de mineração. Nesta área também é possível identificar a incidência de barragens de mineração em microbacias hidrográficas suscetíveis ao processo de enxurradas.



Fonte: o AUTOR.

O quadro 11 sumariza as principais características geológico-ambientais de cada classe de suscetibilidade, integrando as informações extraídas do mapeamento de geodiversidade de MG (MACHADO E SILVA, 2010).

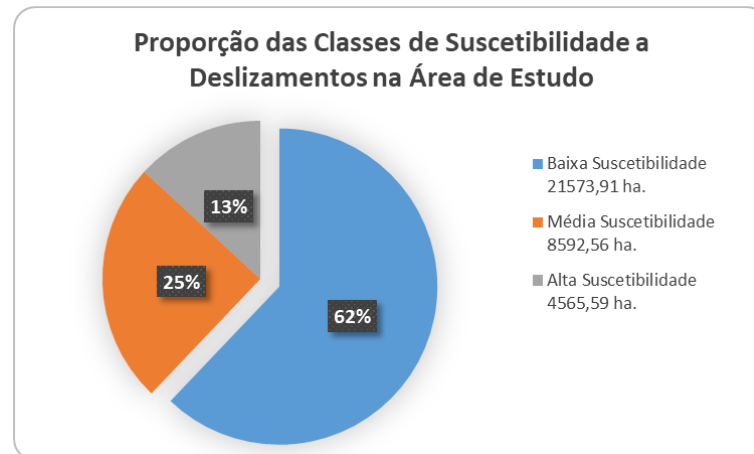
Quadro 11: Principais características geológico-ambientais de cada classe de suscetibilidade.

Classe	Características predominantes
Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Relevo: Domínio Montanhoso, Escarpas Serranas, Domínio de Morros e de Serras Baixas, Vales Encaixados, Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos, Degraus Estruturais e Rebordos Erosivos; • Forma das encostas: retilíneas e côncavas; • Amplitudes: 50 a 2.000 m; • Declividades: 20 a 45° (podem ocorrer vertentes > 45°); • Litologia: Itabirito, Dolomito, Filito, Xisto, Quartzito, Metagrauvaca, Metamáfica, Metarenito, Metapelito; • Densidade de lineamentos/estruturas: alta; • Grau de coerência das rochas do substrato: duras a variável; • Resistência ao intemperismo: baixa a alta na horizontal e na vertical. • Solos: variável de arenoso a argilo-siltoso; • Processos: deslizamento, queda de rocha e rastejo.
Média	<ul style="list-style-type: none"> • Relevo: Domínio Montanhoso, Domínio de Morros e de Serras Baixas, Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos, Domínio de Colinas Amplas e Suaves, Chapadas e Platôs; • Forma das encostas: côncavas, convexas e retilíneas; • Amplitudes: 30 a 2.000 m; • Declividades: 5 a 25°; • Litologia: Filito, Xisto, Dolomito, Quartzito, Metagrauvaca, Metamáfica; Itabirito, Dolomito, Filito, Quartzito. • Densidade de lineamentos/estruturas: média; • Grau de coerência das rochas do substrato: variável; • Resistência ao intemperismo: baixa a alta na horizontal e na vertical; • Solos: predominantemente argilo-siltoso; • Processos: deslizamento, queda de rocha e rastejo.
Baixa	<ul style="list-style-type: none"> • Relevo: Domínio de Morros e de Serras Baixas, Domínio de Colinas Amplas e Suaves, Superfícies Aplainadas Degradadas, Planaltos e Baixos Platôs, Domínio de Colinas Dissecadas e Morros Baixos, Chapadas e Platôs; • Forma das encostas: convexas suavizadas e topos amplos; • Amplitudes: 5 – 200 m; • Declividades: 0 - 10°; • Litologia: Fosforito, Quartzito, Ardósia, Filito, Xisto, Dolomito, Arenito, Sedimentos inconsolidados; • Densidade de lineamentos/estruturas: baixa; • Grau de coerência das rochas do substrato: média; • Resistência ao intemperismo: baixa. • Solos: predominantemente argilo-síltico-arenoso; • Processos: rastejo.

Fonte: o AUTOR.

A partir de tais cenários, inicialmente, foram geradas estatísticas que mostram um panorama geral com base na representatividade de cada zona, em porcentagem (figura 38), ou na incidência das barragens de mineração em microbacias suscetíveis (figura 39).

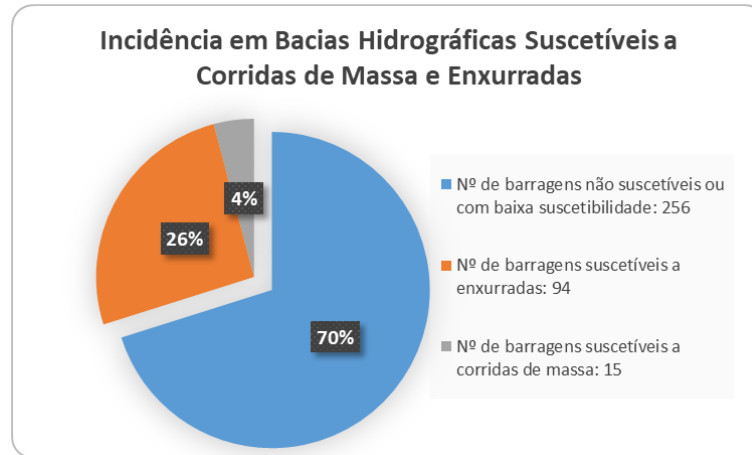
Figura 38: Representatividade de cada zona de suscetibilidade a deslizamentos em relação à área de estudo.



Fonte: o AUTOR.

Os resultados mostraram uma maior representatividade global da classe de baixa suscetibilidade a deslizamentos, representando 62% dos terrenos analisados. Terrenos nessa condição são comumente representados por padrões de relevo com declividades suaves e baixas amplitudes, tais como planícies e terraços fluviais, colinas, planaltos e platôs. Os terrenos com média e alta suscetibilidade a deslizamentos somam os 38% restantes da área de estudo, sendo 25% de relevos que apresentam média suscetibilidade e 13% traduzidos por encostas com alta propensão a deslizamentos.

Figura 39: Situação da localização das barragens de mineração de MG em relação à suscetibilidade aos processos de corridas de massa e enxurradas.



Fonte: o AUTOR.

Com relação às corridas de massa e enxurradas, as análises demonstraram que 70% das barragens de mineração cadastradas se encontram inseridas em microbacias não suscetíveis ou com baixa suscetibilidade a esses processos. Entretanto, destaca-se que 94 barragens (26%) estão localizadas em microbacias com alta suscetibilidade a enxurradas e que 15 barragens (4%) estão localizadas em terrenos com alta suscetibilidade a corridas de massa.

Este panorama geral chama a atenção por demonstrar que mais de 30% do universo amostral dos terrenos de entorno das barragens de mineração de MG apresentam suscetibilidade média a alta aos processos geológicos e hidrológicos analisados. A deflagração desses processos pode afetar negativamente a segurança das barragens, por este motivo, recomenda-se que nas estruturas enquadradas nesses casos sejam realizados estudos geotécnicos e hidrológicos mais detalhados, com a avaliação da influência da barragem no grau de suscetibilidade natural dos terrenos e, onde necessário, elaborar análise de riscos, carta de riscos e plano de gerenciamento de riscos, incluindo-se a execução de medidas preventivas estruturais e não estruturais.

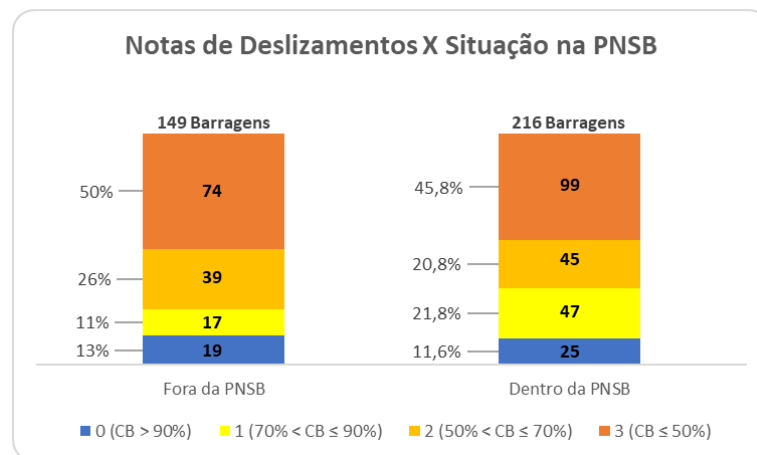
4.1 DISTRIBUIÇÃO DOS DADOS DE SUSCETIBILIDADE PARAMETRIZADOS

Como forma de traduzir os dados gerais de proporção de cada zona de suscetibilidade em termos de número de barragens categorizadas, bem como propor a inclusão da suscetibilidade geológica nos critérios de cálculo para a determinação da CRI, procedeu-se a parametrização da suscetibilidade como atributos de uma matriz de pontuação, conforme descrito no capítulo

de metodologia. A discretização dos dados de suscetibilidade segue as notas propostas no quadro 10. Embora saiba-se que o cálculo de CRI não se aplique às barragens fora da PNSB, optou-se por incluí-las nesta parametrização somente para que a sua distribuição frente à suscetibilidade geológica também fosse delineada.

No caso da suscetibilidade a deslizamentos, a categorização se deu conforme faixas de pontuação que consideram a representatividade dos terrenos mais estáveis (classe baixa) no interior dos limites de abrangência das barragens, como balizador das notas. Assim, quanto maior a proporção da classe de baixa suscetibilidade no entorno da barragem, menor será a propensão de deflagração de deslizamentos no limite de abrangência da barragem e, em consequência, menor será a propensão de impactos negativos decorrentes desses processos à segurança da estrutura.

Figura 40: Situação das barragens de mineração de MG em relação às notas de suscetibilidade a deslizamentos.



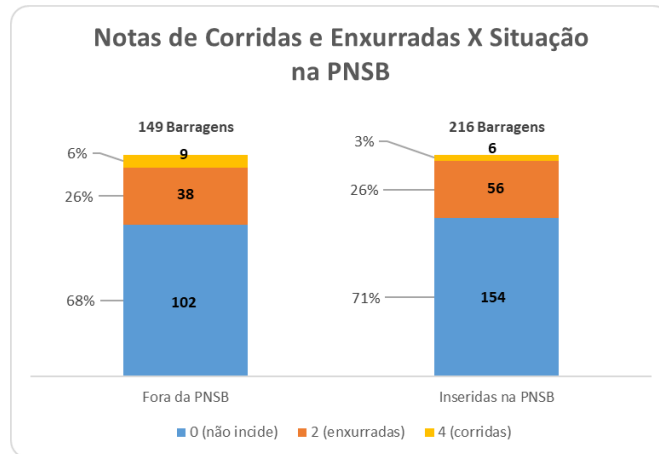
Fonte: o AUTOR.

Ao analisarmos ambas as situações (barragens de mineração dentro e fora da PNSB) podemos observar um comportamento bastante semelhante na distribuição das notas, com leve diferença nas notas 1 ($70\% < CB \leq 90\%$) e 2 ($50\% < CB \leq 70\%$), cujo enquadramento das barragens é menos proporcional nas barragens não incluídas na PNSB, indicando uma menor proporção da classe de baixa suscetibilidade a deslizamentos (figura 40).

Notadamente nas duas situações frente à PNSB, a maior frequência de barragens de mineração de MG insere-se na nota 3 ($CB \leq 50\%$), sendo 74 barragens fora da PNSB (50%) e 99 barragens inseridas na PNSB (45,8%). Isto equivale a dizer que quase a metade das barragens cadastradas pela ANM no estado de MG encontram-se em uma situação na qual os terrenos potencialmente

mais instáveis (classes média e alta) podem estar representando mais da metade das áreas de entorno dessas estruturas.

Figura 41: Situação das barragens de mineração de MG em relação às notas de suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas.



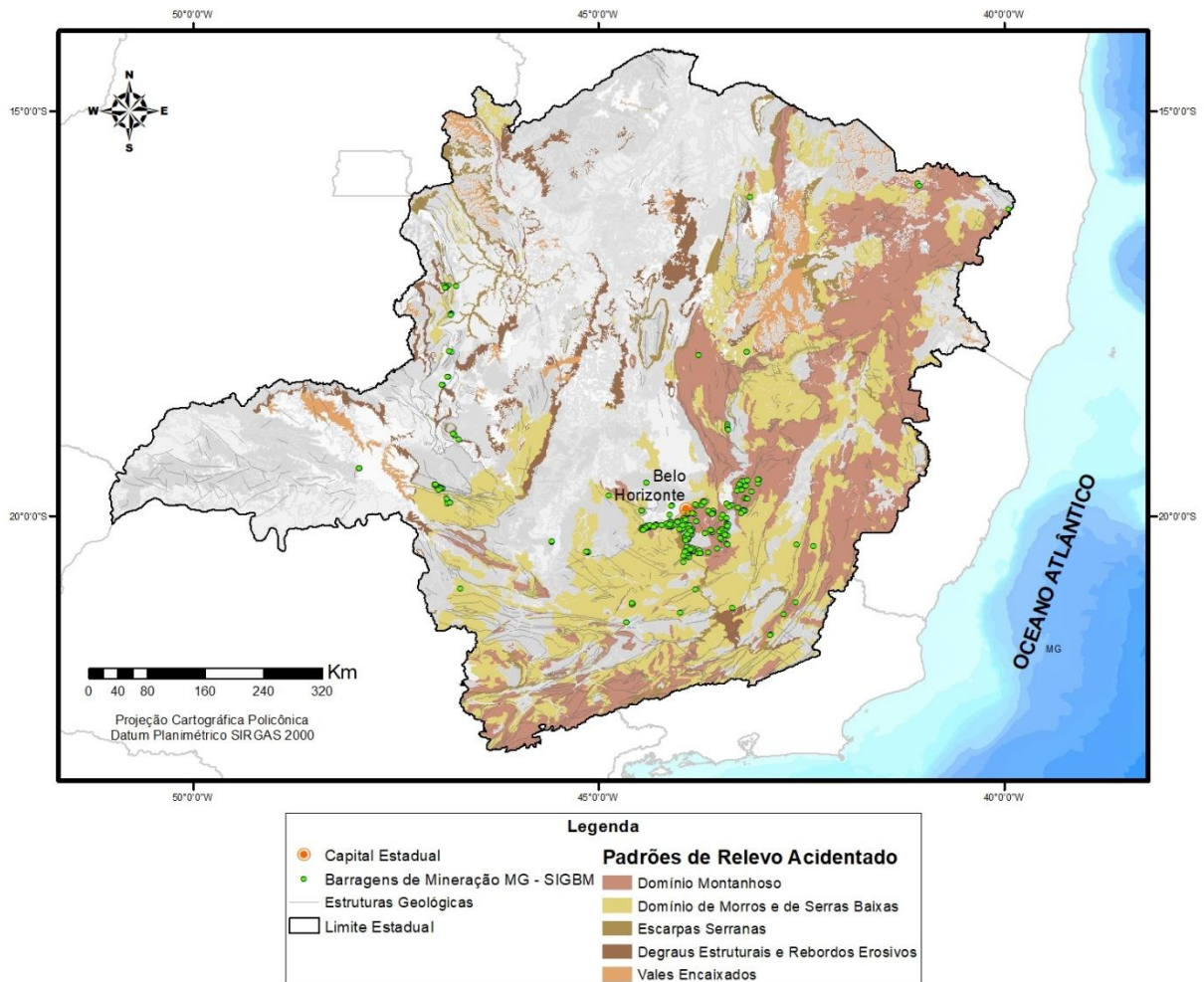
Fonte: o AUTOR.

As barragens dentro e fora da PNSB também apresentam uma distribuição semelhante frente às notas para incidência em microbacias hidrográficas suscetíveis a corridas de massa e enxurradas (figura 41). Cerca de 70% de todas as barragens cadastradas foram construídas em microbacias não suscetíveis ou com baixa suscetibilidade. Entretanto, considerando a grande energia e o alto potencial destrutivo destes processos, é importante destacar que 38 barragens de mineração não inseridas na PNSB (26%) e 56 que fazem parte da Política (26%) encontram-se em relevos com alta suscetibilidade a enxurradas. No caso das corridas de massa, apesar do número ser bem menor para ambos os grupos, registra-se que 9 barragens não inseridas na PNSB e 6 dentro da Política inserem-se em microbacias com alta suscetibilidade, constituindo 6% e 3%, respectivamente.

Esses dados são perfeitamente correlacionáveis ao fato de que a grande maioria das barragens de mineração de MG localiza-se em domínios geológicos, cuja evolução morfodinâmica se reflete em terrenos acidentados, esculpidos em litologias com resistências contrastantes ao intemperismo e apresentando alta concentração de planos e discontinuidades, oriundos de intensa tectônica dúctil e rúptil, resultando muitas vezes em comportamentos geotécnicos desfavoráveis, conforme dados do Mapeamento de Geodiversidade de MG (MACHADO e SILVA, 2010). Ao plotarmos o cadastro de barragens de mineração da ANM sobre estes dados cartográficos, observa-se que mais de 75% das estruturas foram construídas em relevos

compostos por padrões montanhosos, de escarpas serranas, de morros e serras baixas, de vales encaixados ou de degraus estruturais (figura 42).

Figura 42: Localização das barragens de mineração de MG em relação aos padrões de relevo acidentados, conforme o Mapeamento de Geodiversidade de MG (MACHADO e SILVA, 2010).



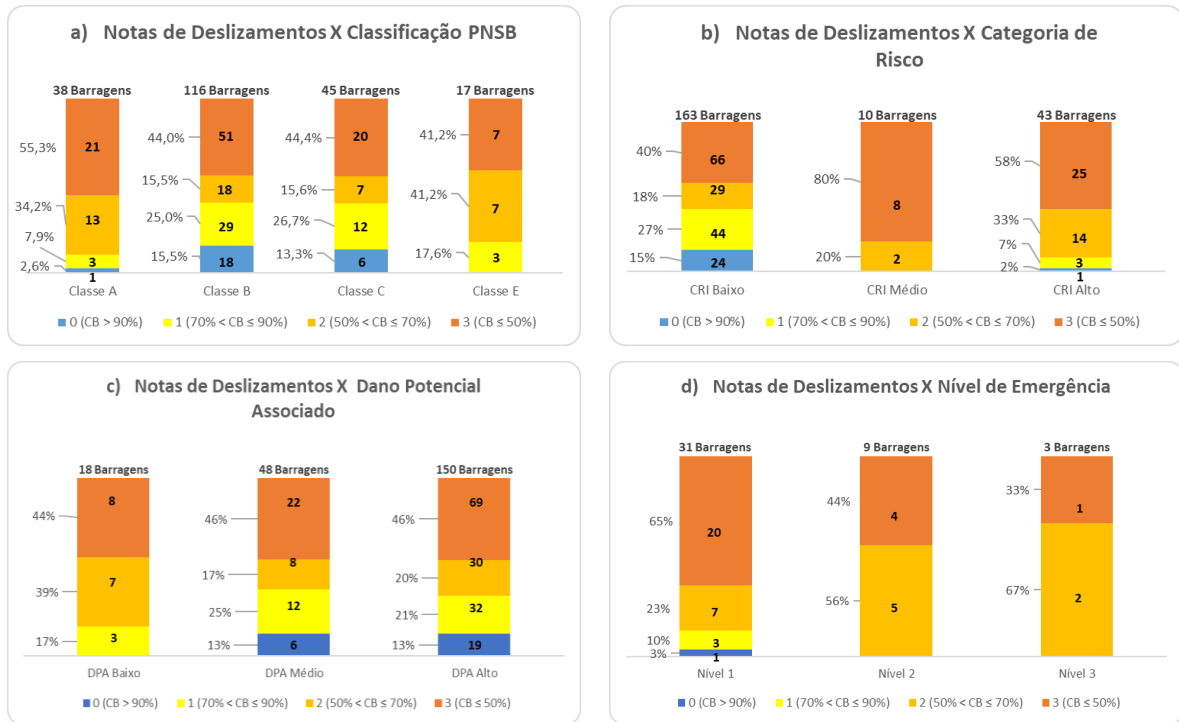
Modificado de Machado e Silva (2010).

4.1.1 Suscetibilidade geológica em relação aos atributos do sistema de classificação das barragens de mineração (Portaria DNPM 70.389/2017)

Para as barragens inseridas na PNSB foram geradas estatísticas relacionando as notas propostas para a suscetibilidade geológica com os atributos do sistema de classificação das barragens, previsto na Política e regulamentada pela Portaria DNPM 70.389/2017, tais como a classificação de risco propriamente dita, a CRI isoladamente, o DPA isoladamente e o nível de emergência isoladamente. Tais relações foram feitas com o objetivo de se identificar

convergências ou divergências no comportamento desses parâmetros em relação aos gráficos de tendência geral discutidos anteriormente (figuras 40 e 41).

Figura 43: Distribuição das notas de suscetibilidade a deslizamentos relacionando: a) a classificação final de risco; b) a CRI isoladamente; c) o DPA isoladamente; e d) o nível de emergência.



Fonte: o AUTOR.

Em relação às notas de deslizamentos, embora não representem o maior grupo em número absoluto de estruturas, constata-se que as barragens com classificação “A”, situação de maior risco da PNSB, são aquelas que apresentam a maior ocorrência da nota 3 (CB ≤ 50%), representando 55,3% dessas estruturas (figura 43-a). As demais classes seguem esta tendência, com a nota 3 para deslizamentos representando 44% da classe “B”, 44,4% da classe “C” e 41,2% da classe “E”. No cadastro de barragens de mineração da ANM utilizado neste trabalho, período de referência novembro de 2020, não há registro de barragem classe “D” em MG.

Isoladamente, DPA e CRI também refletem a tendência de distribuição das notas de deslizamento observada na classificação da PNSB, haja vista que a classificação é definida pelo cruzamento entre DPA e CRI (figura 43-b e c). Tomando-se as piores situações em termos de segurança como exemplo, as estruturas com nota 3 representam 58% do grupo de barragens com CRI alto e 46% das estruturas com DPA alto. Justamente nas situações nas quais as

barragens aspiram maior atenção por parte da gestão de risco (DPA e CRI altos), ocorre a maior proporção de terrenos mais propensos a deslizamentos no entorno das barragens.

O artigo 37 da Portaria DNPM 70.389/2017, em seus incisos I, II e III define os níveis de emergência:

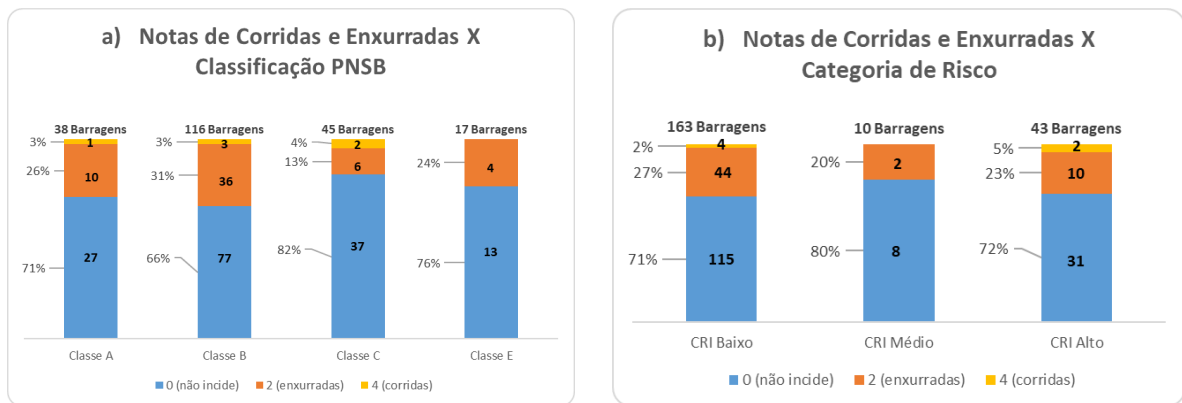
“I. Nível 1 – Quando detectada anomalia que resulte na pontuação máxima de 10 (dez) pontos em qualquer coluna do Quadro 3 - Matriz de Classificação Quanto à Categoria de Risco (1.2 - Estado de Conservação), do Anexo V, ou seja, quando iniciada uma ISE e para qualquer outra situação com potencial comprometimento de segurança da estrutura;

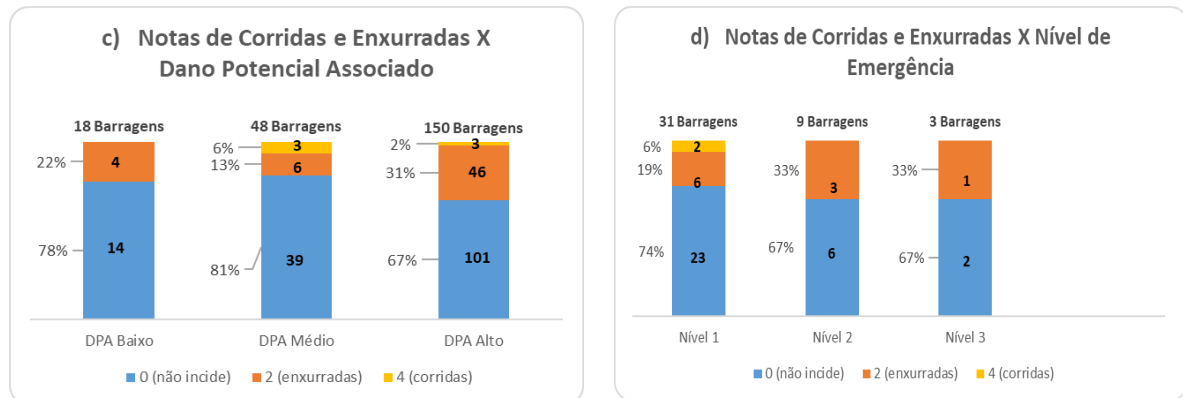
II. Nível 2 – Quando o resultado das ações adotadas na anomalia referida no inciso I for classificado como “não controlado”, de acordo com a definição do § 1º do art. 27 desta Portaria; ou

III. Nível 3 – A ruptura é iminente ou está ocorrendo”.

O gráfico da figura 43-d mostra que quase a totalidade das barragens que se encontram em situação de emergência possuem notas 2 e 3 para deslizamentos. Mesmo que tal estado de emergência muito provavelmente não tenha como causa os processos de deslizamentos, o atingimento por um eventual deslizamento tem maior potencial para configurar um gatilho para a ruptura de estruturas com este grau de fragilidade.

Figura 44: Distribuição das notas de suscetibilidade a corridas e enxurradas relacionando: a) a classificação final de risco; b) a CRI isoladamente; c) o DPA isoladamente; e d) o nível de emergência.





Fonte: o AUTOR.

Como já visto na figura 41, 62 barragens de mineração de MG inseridas na PNSB localizam-se em microbacias hidrográficas com alta suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas, perfazendo 29% do total. Ao analisarmos este grupo com relação à classificação de risco da PNSB (figura 44 – a) é possível constatar que a maior parte das barragens com nota 2 (suscetível a enxurradas) encontra-se na classificação “B”, representando 31%, seguido pela classe “A”, perfazendo 26%. As barragens com nota 4 (suscetível a corridas de massa) representam um reduzido grupo de 6 estruturas e distribuem-se da seguinte forma: 1 na classe “A”, 3 na classe “B” e 2 na classe “C”.

Tomando-se a CRI isoladamente (figura 44 – b), as barragens suscetíveis a corridas de massa e enxurradas predominam na CRI baixo, sendo que 27% deste grupo possui nota 2 e 2% a nota 4. No que diz respeito ao grupo com CRI alto, constata-se que 10 barragens estão localizadas em terrenos com alta suscetibilidade a enxurradas, enquanto que 2 estruturas se situam em bacias com alta suscetibilidade à deflagração de corridas de massa. Já quando averiguamos o DPA isoladamente (figura 44 - c), 46 barragens suscetíveis a processos de enxurradas (nota 2) encontram-se enquadradas com DPA alto, representando 31% deste grupo. As barragens suscetíveis a corridas (nota 4) estão igualmente distribuídas em DPA médio e alto, com 3 estruturas em cada grupo.

Quanto à situação de emergência (figura 44 –d), 2 barragens no nível 1 encontram-se em terrenos com alta suscetibilidade a corridas. Com nota 2 (enxurradas) há 6 barragens em emergência nível 1, 3 estruturas em nível 2 e uma em nível 3.

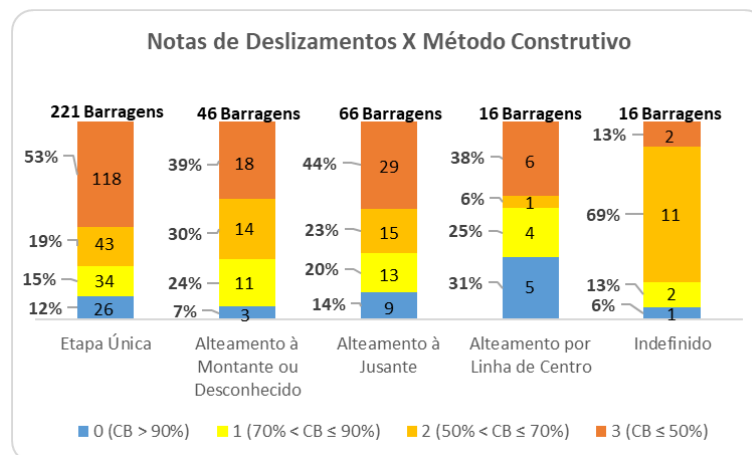
4.1.2 Suscetibilidade geológica em relação ao método construtivo das barragens de mineração

Outra importante análise realizada a partir das estatísticas é com relação à distribuição das notas de deslizamentos e as notas de corridas e enxurradas, frente ao método construtivo das barragens. Desta vez a análise agrupará todo o universo de barragens estudado, ou seja, as incluídas e as fora da PNSB.

Como visto no capítulo de revisão bibliográfica, a forma de construção está diretamente relacionada ao grau de segurança da barragem. Barragens de mineração construídas com o método a montante são criticadas por apresentar alto risco de ruptura por liquefação e por dificultar a implantação de sistema de drenagem (ARAÚJO, 2006).

A própria Portaria DNPM 70.389/2017 atribui notas diferentes ao tipo de método construtivo para o cálculo da CRI. Assim, as barragens com o método de montante possuem as maiores notas, contribuindo mais para o aumento do risco da barragem. Posteriormente, a Resolução ANM nº 13 proíbe a construção de novas barragens com este método construtivo, devido aos desastres de Mariana e Brumadinho, os quais foram provocados pela ruptura (liquefação) de barragens deste tipo.

Figura 45: Distribuição das notas de suscetibilidade a deslizamentos relacionando os métodos construtivos das barragens de mineração.

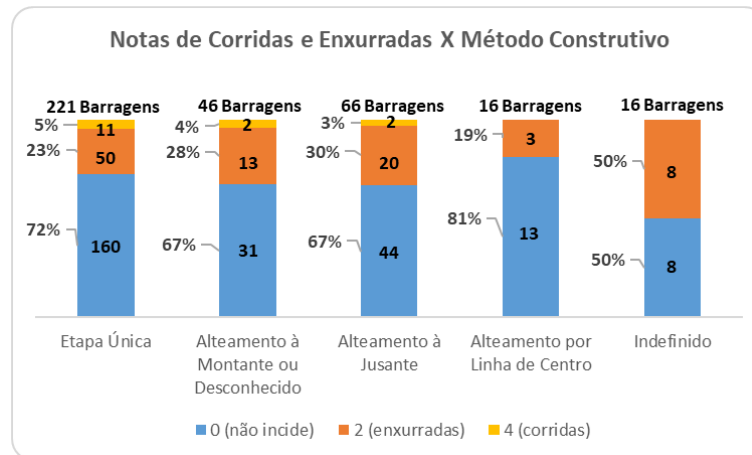


Fonte: o AUTOR.

A partir da figura 45, o quadro geral mostra a maior ocorrência da nota 3 ($CB \leq 50\%$) de deslizamentos, com exceção das barragens cadastradas como “método indefinido”, nas quais há o claro predomínio da nota 2 ($50\% < CB \leq 70\%$). Cabe destaque que 69% das barragens construídas pelo método à montante, as quais demandam especial atenção dos órgãos

fiscalizadores em razão de sua maior fragilidade geotécnica, possuem no seu entorno mais de 30% de terrenos com média a alta suscetibilidade a deslizamentos. Já as barragens construídas pelo método linha de centro, mesmo que representando um pequeno grupo de estruturas, são as que apresentam a maior proporção de terrenos de baixa suscetibilidade a deslizamentos no entorno de seus sítios de construção.

Figura 46: Distribuição das notas de suscetibilidade a corridas de massa e enxurradas relacionando os métodos construtivos das barragens de mineração.



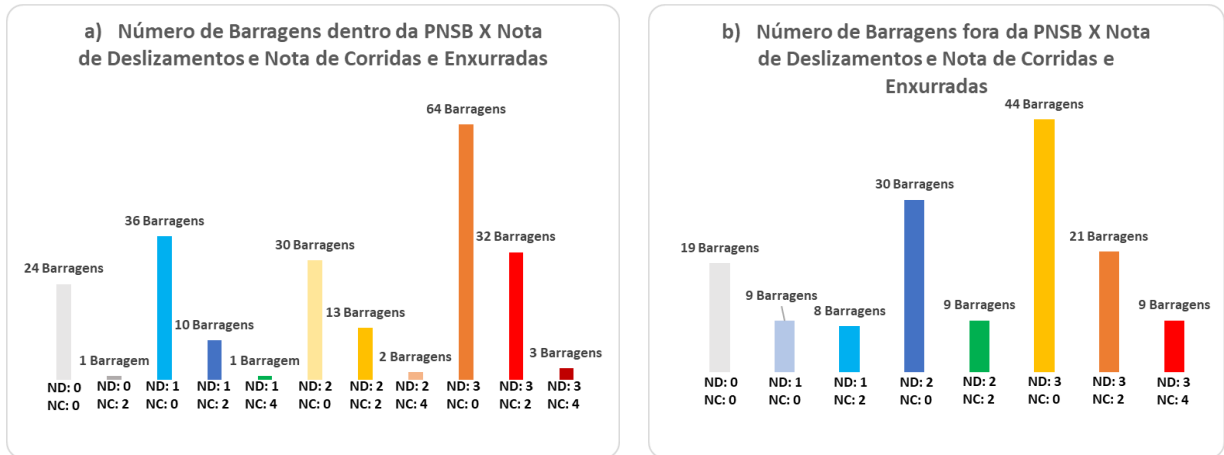
Fonte: o AUTOR.

A maior incidência de barragens de mineração em bacias com alta suscetibilidade a corridas de massa se dá no grupo das estruturas construídas em etapa única, com 11 casos (figura 46). Em tese, este grupo é o que apresentaria a menor vulnerabilidade geotécnica, por não ter sofrido alteamentos, denotando um maior controle construtivo e robustez. Já no grupo com maior vulnerabilidade aos processos aqui analisados, com alteamento a montante, é digno de nota que 28% das barragens estão localizadas em terrenos com alta suscetibilidade a enxurradas e 4% em bacias com alta suscetibilidade a corridas. As barragens com método de construção indefinido possuem a maior proporção de barragens com nota 2 (enxurradas), correspondendo a 50% do grupo.

4.1.3 Análise da distribuição conjunta das notas de deslizamentos e notas de corridas e enxurradas

Aproveitando o poder de análise proporcionado pelo SIG elaborado neste trabalho, fez-se uma análise da distribuição conjunta das notas de deslizamentos com as notas de corridas e enxurradas, de modo a avaliar a sinergia de sua distribuição.

Figura 47: Distribuição conjunta das notas de deslizamentos com as de corridas e enxurradas nas barragens: a) inseridas na PNSB e b) fora da PNSB. NC = nota de corridas e enxurradas. ND = notas de deslizamentos.



Fonte: o AUTOR.

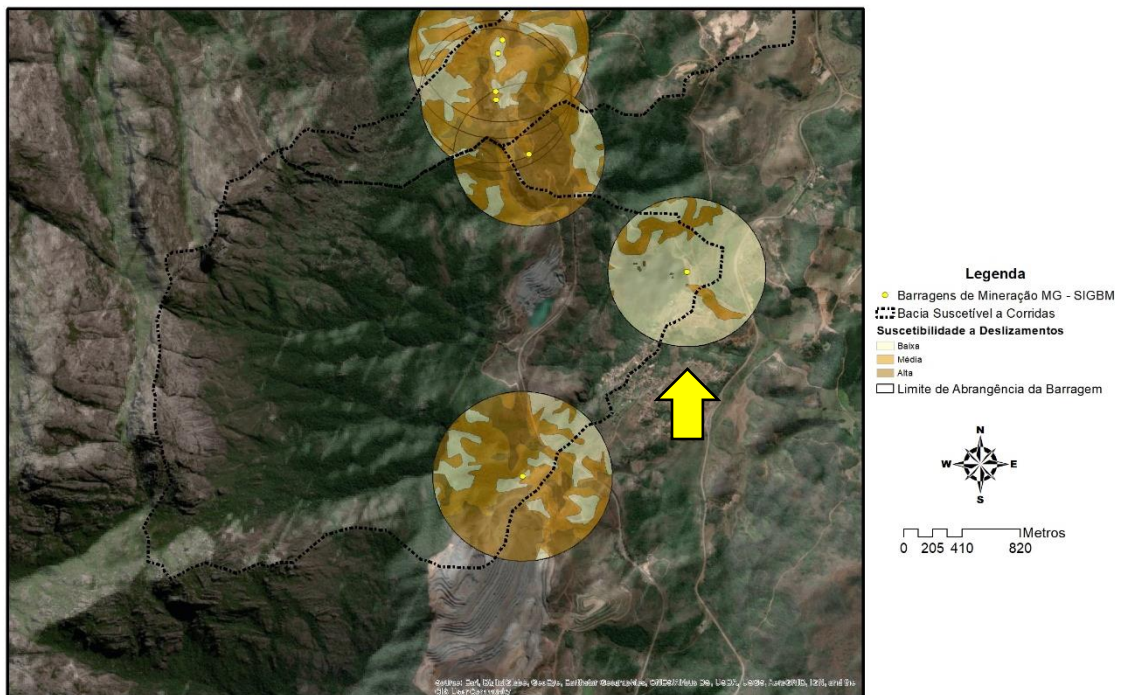
Em ambos os grupos de barragens de mineração apresentados na figura 47, a maior frequência das estruturas apresenta conjuntamente a nota 3 para deslizamentos (ND) e nota 0 para corridas e enxurradas (NC), seguido das frequências de barragens que apresentam a combinação de nota 0 para corridas e enxurradas com variações das notas de deslizamentos. Tal comportamento sugere que a suscetibilidade a deslizamentos não tem forte correlação com a ocorrência de bacias suscetíveis a enxurradas e corridas, no universo de barragens analisado.

Em contrapartida, quando tomamos a suscetibilidade a corridas de massa (NC: 4), verificamos que no grupo das barragens fora da PNSB a sua ocorrência se dá exclusivamente em terrenos com a maior nota de deslizamentos (NC: 3). No grupo de barragens inseridas na PNSB, as corridas estão relacionadas com as notas de deslizamentos (ND) 3 e 2, principalmente. Para as enxurradas (NC: 2), as maiores frequências também se relacionam às notas de deslizamentos (ND) 3 e 2, respectivamente.

Os gráficos sugerem que a suscetibilidade a corridas e enxurradas tende a ocorrer em terrenos que apresentam maior proporção das classes de deslizamento média a alta. Esta constatação vem ao encontro dos pressupostos enunciados por Bitar (2014) para o mapeamento dos terrenos suscetíveis a enxurradas e corridas de massa, os quais, segundo o autor, caracterizam-se por apresentar amplitudes e declividades elevadas e, no caso das corridas de massa, as bacias devem, necessariamente, compreender terrenos de alta suscetibilidade a deslizamentos.

Observa-se na figura 47 que 2 barragens não seguem esta correlação, pois agregam a incidência de bacias de corridas e enxurradas com notas baixas de deslizamento. Verificou-se que os limites de abrangência dessas barragens se posicionam junto ao exutório das bacias hidrográficas suscetíveis, no único trecho onde predominam os terrenos mais suaves, explicando tal combinação (figura 48).

Figura 48: A seta indica um caso de barragem inserida em bacia suscetível a corridas, porém circundada por terrenos mais suaves, por se encontrar junto ao exutório.



Fonte: o AUTOR.

5. CAPITULO V – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados e discutidos no Capítulo IV foram bastante relevantes para a montagem de um panorama da suscetibilidade geológica das barragens de mineração no estado de Minas Gerais. A metodologia aplicada neste estudo permitiu a identificação dos cenários de suscetibilidade natural à deflagração de deslizamentos, corridas de massa e enxurradas nos quais estas estruturas foram construídas.

A opção por trabalhar esses dados em formato SIG permitiu agregar potentes ferramentas de geoprocessamento para a parametrização dos dados de suscetibilidade e geração de estatísticas, revelando importantes informações para a gestão da segurança de barragens. Desse modo, confirma-se a relevância da proposta de se incluir critérios de suscetibilidade geológica para a classificação de barragens proposta na PNSB e Portaria DNPM nº 70.389/2017, de modo a contribuir para o aumento da segurança dessas estruturas.

Aponta-se o grande potencial do mapeamento de suscetibilidade geológica para o planejamento da locação de novas barragens, a nível de plano diretor, bem como a sua utilização pelos órgãos fiscalizadores e licenciadores como uma ferramenta de gestão territorial.

É importante destacar que segundo Bitar (2014) o mapeamento de suscetibilidade limita-se a atividades de gestão territorial e de planejamento e não se destina à análise de estabilidade de terrenos a nível de projeto, bem como não se destina ao uso em qualquer outra escala que não seja a de referência. Motivo pelo qual recomenda-se que os órgãos fiscalizadores exijam dos empreendedores estudos geotécnicos de detalhe nas áreas identificadas como de média a alta suscetibilidade, incluindo medidas preventivas.

Com principal limitação deste trabalho cita-se o fato de não ter sido possível executar a etapa de campo para a validação das informações produzidas, haja vista o grande número de estruturas a vistoriar e o longo tempo demandado nesta tarefa, o qual excederia o cronograma previsto para o formato desta monografia. Outra limitação importante é o fato do cadastro de barragens de mineração da ANM trabalhar apenas com pares de coordenadas (pontos), o que inicialmente dificultou a avaliação da extensão espacial das estruturas. Como forma de contornar essa dificuldade, neste estudo desenvolveu-se uma metodologia para definir as áreas de abrangência das barragens. Embora isto tenha permitido o desenvolvimento das análises,

salienta-se que são áreas teóricas, não representando exatamente o polígono formado pelos sítios de locação de cada barragem.

Contudo, considera-se que os resultados produzidos foram capazes de atingir os objetivos propostos nesta monografia.

Como considerações finais, é importante salientar que os critérios de corte e as respectivas notas de suscetibilidade foram aqui propostas empiricamente, não tendo passado por consulta pública ou sob o crivo de um painel de especialistas, tal como foram os critérios publicados na legislação.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Cecília Bhering de. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (Coppe) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

ANM – AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. Brasília, 2020. Disponível em: < <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>>. Acesso em : 29 nov. 2020.

AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L. E. S.; AMENOMORI, C. J. **Riscos geológicos: aspectos conceituais**. In: 1º SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, 1990, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE, 1990, p.334-341

BITAR, Omar Yazbek (Coord.) **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações 1:25.000: nota técnica explicativa**. São Paulo: IPT; Brasília, DF : CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2014. 50p. (IPT Publicação 3016)

BLOOM, A. **Superfície da Terra**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1970.

BOSCOV, Maria Eugenia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 248p.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial**. Brasília, 11 abr. 2012.

BRASIL. Resolução 143 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, de 10 de julho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Diário Oficial**. Brasília, 04 set. 2012.

BRASIL. Portaria 70.389 do Departamento Nacional de Mineração – DNM, de 17 de maio de 2017. Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração, conforme art. 8º, 9º, 10, 11 e 12 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens - PNSB. **Diário Oficial**. Brasília, 19

mai. 2017.

BRASIL. Resolução 13 da Agência Nacional de Mineração – ANM, de 08 de agosto de 2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. **Diário Oficial**. Brasília, 01 out. 2020.

BRASIL. Resolução 32 da Agência Nacional de Mineração – ANM, de 11 de maio de 2020. Altera a Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017 e dá outras providências. **Diário Oficial**. Brasília, 18 mai. 2020.

BRASIL. Resolução 40 da Agência Nacional de Mineração – ANM, de 06 de julho de 2020. Altera o artigo 7º da Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. **Diário Oficial**. Brasília, 07 jul. 2020.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). **Diário Oficial**. Brasília, 01 out. 2012.

BURROUGH, Peter A., MCDONNELL, R. A. **Principle of geographic information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998.

CÂMARA, Gilberto. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. São José dos Campos. Tese de Doutorado - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. 1995.

CARVALHO, Géssica Borges de. **Incidências de impactos decorrentes de acidentes com barragens de rejeito**. 2018. xvii, 207f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2018.

CBDB – COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Barragens de rejeito no Brasil**. Rio de Janeiro: CBDB, 2012. 306p.

CERRI, L.E.S. **Riscos Geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para prevenção de acidentes**. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente – Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP, Rio Claro, 1993. 197p.

CERRI, L.E.S.; AMARAL, C.P. **Riscos geológicos**. In: Oliveira, A.M.S., Brito, S.N.A. (eds) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. 587p.

CONCEIÇÃO, R. A. C. da; LIMA, A. M. M. **Análise do potencial de risco de rompimento em barragens de rejeito de mineração do estado do Pará utilizando a metodologia Risk-Based Profiling System (RBPS)** São Paulo: Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e

Ambiental (RBGEA) - Volume 6, n.1 e 2, 2016.

COSTA, Walter Duarte. **Geologia de barragens**. 1ªed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 352p.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: CPRM, 2003. Escala 1:1.000.000.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geodiversidade do Brasil**. Brasília, 2006. Escala 1:2.500.000. Legenda expandida. 68p. CD-ROM.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Ouro Preto - MG**. Rio de Janeiro, 2014. 1 mapa, color. Escala 1:100.000.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Congonhas - MG**. Rio de Janeiro, 2014. 1 mapa, color. Escala 1:50.000.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Manual de mapeamento de perigo e risco a movimentos gravitacionais de massa**. Rio de Janeiro: CPRM, 2018.

ELETROBRÁS/CBDB. **Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas**. 2003.

FERNANDES, Nelson Ferreira *et al.*. **Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas suscetíveis**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FLORENZANO, Tereza Gallotti (org.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 318 p.

FONSECA, Dianne Danielle Farias. **Panorama das barragens de rejeito mineral dos estados do Pará e Amapá**. 2019. 63f. Dissertação (Mestrado) –Universidade Federal do Pará. Belém, 2019.

GUZZETTI, Fausto *et al.*. **Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy**. Geomorphology, v. 31, p. 181-216, 1999.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS. **Lessons from Dam Incidents**. Paris: ICOLD, Reduced Edition, 1973.

ICOLD – INTERNATIONAL COMMISSION OF LARGE DAMS. **Tailings dams: risk of dangerous occurrences - Lessons learnt from practical experiences**. Paris: UNEP/ICOLD, Bulletin 121, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO - IBRAM. **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. 1 ed. Brasília, 2016. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 11 out. 2020.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, Empresa Metropolitana de Planejamento da Grande São Paulo - EMPLASA. **Carta de aptidão física ao assentamento urbano, escala 1:50.000 - guia de utilização.** São Paulo: IPT/ Emplasa, 1990.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Nova Lima - MG.** Rio de Janeiro, 2015. 1 mapa, color. Escala 1:50.000.

JANSEN, R.B. **Dams and Public Safety.** US Govt. Printing Office, US Bureau of Reclamation, Denver, USA. 1983. 332 p.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. (orgs.). **Tratamento de Minérios.** 5ª Edição: Ed. - Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 965 p.: il.

MACHADO, Marceley Ferreira; SILVA, S. F. da (Orgs.). **Geodiversidade do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: CPRM, 2010. 94 p. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade.

MACHADO, Lucas Vasconcellos Teani; AZEEZ, D. G.. **Incidentes e acidentes em barragens.** In: SIMPÓSIO DE GESTÃO AMBIENTAL E BIODIVERSIDADE, 7., 2018, Rio de Janeiro. Anais. 355-358.

MEDEIROS, C.H.A.C. **Utilização da Técnica de Análise de Probabilidade de Risco na Avaliação de Segurança de Barragens.** In: XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, 1999, Belo Horizonte. Anais... Vol.I. Belo Horizonte: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens (CBGB). 1999. p 77-81.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim do setor mineral brasileiro.** 2 ed. Brasília, 2019.. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes/boletim-do-setor-mineral>>. Acesso em : 07 nov. 2020.

NEVES, Luiz Paniago. **Segurança de barragens: legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada.** 2018. E-book (67 p.). Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/e-book-livre-legislacao-federal-brasileira-emseguranca-de-barragens-autor-luiz-paniago-neves/view>>. Acesso em: 05 ago. 2020.

OLIVEIRA, H. V. B. de; VAZ, L. F.; CARNEIRO, C. D. R. **Avaliação de Risco Geológico em barragens.** São Paulo: Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (RBGEA) - Volume 3, nº1, 2013.

OLIVEIRA, Antônio M. dos Santos; MONTICELI, J. J. (org). **Geologia de engenharia e ambiental.** 1ªed. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2018. Vol. 3. 356p.

OLIVEIRA, H. P. V. **Tutorial para obtenção, correções e interpolação (opcional) do Modelo Digital de Elevação (sensor PALSAR) do Satélite ALOS-1 de 2006 a 2011.** Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/352325754/Tutorial-MDE-ALOS-1-Huascar-Vidal-v1>>.

Acesso em 28 set. 2020.

PASTORE, Eraldo Luporini. **Risco geológico em obras civis**. Engenharia, São Paulo, n. 592, 2009. p.110 – 115. Disponível em: <http://www.brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao592/Art_Risco_Geologico_em_Obras_Civis.pdf>. Acesso em 10 set. 2020.

PEREIRA, Geraldo Magela. **Acidentes e rupturas de barragens de armazenamento de água**. São Paulo: ABGE, 2020. 307p.

PERSECHINI, M. I.; MUANIS, F. P.; DE NIS, E.; NUNES, C. M. **Segurança de barragens: engenharia a serviço da sociedade**. Banco Mundial– 1ª Edição. Brasília, 2015. 104p.

RECKZIEGEL, Bernadete Weber; ROBAINA, L. E. S. **Riscos geológico-geomorfológicos: revisão conceitual**. Ciência e Natura, vol. 27, núm. 2, 2005, pp. 65-84.

RENNÓ, C. D. *et al.*. **HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia**. Remote Sensing of Environment, 112(9), 2008. pp. 3469-3481.

SELBY, Michael John. **Earth's Changing Surface**. Oxford [Oxfordshire] : Clarendon Press ; Oxford [Oxfordshire] ; New York : Oxford University Press, 1985. 607 p.

STABILE, Rodrigo Augusto *et al.*. **Análise de fatores condicionantes de instabilizações em encostas como subsídio para a modelagem estatística da suscetibilidade a deslizamentos**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 14., 2013, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: ABGE, 2013. 1 CD ROM.

TOMINAGA, L.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). **Desastres naturais; conhecer para prevenir**. São Paulo : Instituto Geológico, 2009 - 196 p.

TROEH, F. R. **Landform equations fitted to contour maps**. American Journal of Sciences, 1965. (263):616-627.

APÊNDICE

**CARTA DE SUSCETIBILIDADE GEOLÓGICA DAS BARRAGENS DE MINERAÇÃO NO
ESTADO DE MINAS GERAIS**