

**Dissertação de Mestrado**

**CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE PERIGO  
(iP) EM BARRAGENS DE REJEITO NAS  
BACIAS HIDROGRÁFICAS DA REGIÃO DO  
QUADRILÁTERO FERRÍFERO - MINAS  
GERAIS**

**AUTOR: LUCAS GOMES DE ALMEIDA**

**ORIENTADORA: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rosyelle Cristina Corteletti (UFOP)**

**ESCOLA DE MINAS / UFOP**

**COORIENTADOR: Prof. Dr. Cesar Falcão Barella (UFOP)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP**

**OURO PRETO - NOVEMBRO DE 2018**

A447c Almeida, Lucas Gomes de.  
Classificação do índice de perigo (IP) em barragens de rejeito nas bacias hidrográficas da região do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais [manuscrito] / Lucas Gomes de Almeida. - 2018.  
150f.: il.: color; tabs; mapas.

Orientadora: Prof. Dr. Rosyelle Cristina Corteletti.  
Coorientador: Prof. Dr. Cesar Falcão Barella.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.  
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

1. Barragens. 2. Índice de perigo. 3. Analytic Hierarchy Process - AHP. 4. Bacia hidrográfica. 5. Fundação. I. Corteletti, Rosyelle Cristina. II. Barella, Cesar Falcão. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Titulo.

CDU: 624.13

# CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE PERIGO (IP) EM BARRAGENS DE REJEITO NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DA REGIÃO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO – MINAS GERAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 1º de novembro de 2018 pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Presidente: Prof. Dr. Rosyelle Cristina Corteletti (UFOP)



Membro: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (UFOP)



Membro: Prof. Dr. Mônica Soares Resio Zuffo (Unimetrocamp - Wyden)

# DEDICATÓRIA

*Aos meus pais, ao meu irmão Thiago  
e à querida Ana Luiza.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sempre presente em minha vida, e aos meus pais, Geraldo e Tânia, pelo amor sincero e por sempre acreditarem nos meus sonhos.

Ao meu irmão, Thiago, pela força e torcida.

À amada e futura esposa, Ana Luiza, pela paciência e companheirismo incondicional, e à sua querida família, pelo carinho de sempre.

À estimada madrinha Raquel e familiares pelas orações e boas energias.

À minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Rosyelle Cristina Corteletti, pela paciência (mesmo nos momentos mais difíceis), confiança e atenção. Muito obrigado!

Ao Prof. Dr. César Falcão Barella pela orientação e debates enriquecedores.

À todos os docentes e servidores do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO) pela competência e o ensino de qualidade.

Aos coordenadores do MPEC/ICEB, em especial, Prof. Fábio, pelas oportunidades e por permitirem que essa pesquisa fosse realizada.

À Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) pela cooperação e por ter acreditado neste projeto.

Ao grande amigo, Me. Luiz Fernandes Dutra (Kvra), pela disponibilidade e grandes contribuições.

Às verdadeiras amigas de Belo Horizonte e Ouro Preto, particularmente, à Turma 2016 do NUGEO, pelos excelentes momentos e conhecimentos compartilhados.

Aos amigos e irmãos da República Tira Mágoa que em alguns momentos até duvidaram, mas que nunca deixaram de apoiar.

Por fim, à todos que, direta ou indiretamente, mesmo nos momentos mais difíceis, contribuíram para essa conquista. Os meus sinceros agradecimentos!

## RESUMO

As barragens são diques que possuem a função de armazenamento, especialmente, de rejeitos da mineração. Neste contexto, além do monitoramento constante, é de suma importância que essas barragens apresentem níveis aceitáveis e satisfatórios de segurança. Assim, o presente trabalho propõe a criação de uma metodologia para determinação de índices de perigo (iP) e o mapeamento de potenciais impactos nas unidades de análise (barragens de rejeito, bacias e sub-bacias hidrográficas associadas) do Quadrilátero Ferrífero (QF). O desenvolvimento da pesquisa ocorreu por meio da técnica de hierarquização conhecida como *Analytic Hierarchy Process* (AHP), que prevê a diminuição de subjetividade durante as etapas de análise. É relevante destacar também que esse tipo de ferramenta, além do caráter objetivo, permite a avaliação das causas e das ações de prevenção que possam minimizar possíveis acidentes. Para a quantificação desse número, primeiramente foram escolhidas barragens da região (Casa de Pedra, Doutor, Fundão, Itabiruçu, Maravilhas, Vigia e Auxiliar do Vigia), segundo critérios como a localização do empreendimento, a proximidade ao município de Ouro Preto (MG), o tipo de material barrado e a bacia hidrográfica a qual a barragem está inserida. Em seguida, foi realizada a dinâmica *brainstorming*, com a participação de especialistas do ramo em estudo. A partir dos cálculos realizados e da verificação de consistência das matrizes obtidas, foi possível a identificação dos parâmetros que apresentaram maior influência no iP: "Existência de população à jusante" e "Distância da barragem à ocupação urbana". Com intuito inovador, o trabalho desenvolveu a quantificação e a hierarquização dos índices, os quais foram discriminados em três graus de perigo: baixo, médio e alto. Segundo essa distinção das barragens de rejeito avaliadas, foram confeccionados dois mapas de perigo das duas principais bacias hidrográficas abordadas (rio Doce e rio São Francisco). Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a metodologia proposta mostrou-se eficaz e com viabilidade prática, podendo ser útil às empresas do ramo de mineração. Verifica-se também que ela permite ações mitigadoras e a redução de eventos que possam contribuir para o rompimento dessas barragens, propósito dos programas de gestão para empreendimentos desta natureza.

Palavras chave: Barragens de rejeito; Índice de perigo; *Analytic Hierarchy Process* - AHP; Bacia hidrográfica; Fundão.

## ABSTRACT

Dams are dikes that have storing function, especially, for mining tailings. In this context, besides constant monitoring, it is utmost importance that tailing dams presents acceptable levels and satisfactory of safety. Thereby, the present work proposes the creation of a methodology for determination of hazard indexes (iP) and mapping of potential impacts on analysis units (associated tailings dams, basins e sub-basins) of Quadrilátero Ferrífero. The development of the research occurred by means hierarchization technique, known as *Analytic Hierarchy Process* (AHP), which provides for diminution of subjectivity during analysis steps. It is also relevant to stands out that this type of tool, beyond objective character, allows causes evaluation and prevention actions that can minimize possible accidents. For the quantification of this dimensionless number, firstly were chosen dams of the region (Casa de Pedra, Doutor, Fundão, Itabiruçu, Maravilhas, Vigia e Auxiliar do Vigia), according to criteria such as venture location, proximity to Ouro Preto (MG) city, type of material barred and basin to which the dam is inserted. Then, was performed a brainstorming dynamic, with participation of experts from the field under study. From calculations made and consistency check of matrices obtained, were possible to identify the parameters that showed greatest influence on iP: "Existence of downstream population" and "Dam distance to urban occupation". With innovative intent, the study developed the quantification and the hierarchize of indexes which were discriminated in three danger degrees: low, medium e high. According to this distinctions of evaluated tailing dams were prepared two hazard maps of the two addressed main watersheds (Doce and São Francisco rivers). Based on obtained results, it is concluded that proposed methodology proved to be effective and with practical feasibility, being able to be useful for mining companies. It is also verified that it allows mitigating actions and reduction of events that may contribute to these dams break, purpose of management programs for such ventures.

Key words: Tailing dams; Hazard index; *Analytic Hierarchy Process* - AHP; Watershed; Fundão.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Retroescavadeira soterrada pela lama, após o acidente nas barragens da Herculano Mineração, em Itabirito (MG). Fonte: FEAM (2014).....	2
Figura 1.2 - Mapa de localização da região do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais....	6
Figura 2.1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.....	7
Figura 3.1 - Seção da barragem de terra homogênea com filtro vertical e tapete horizontal e aplicação da cortina de injeção. Fonte: Melo (2014).....	11
Figura 3.2 - Seção da barragem de terra zoneada com filtro vertical e tapete horizontal e aplicação da cortina de injeção. Fonte: Melo (2014).....	12
Figura 3.3 - Seção da barragem de terra-enrocamento construída a partir de um núcleo centralizado e métodos de tratamentos para fundação. Fonte: Melo (2014). ....	12
Figura 3.4 - Seção da barragem de terra-enrocamento construída com o núcleo inclinado à montante e aplicação da cortina de injeção. Fonte: Melo (2014). ....	12
Figura 3.5 - Ruptura por erosão interna - <i>piping</i> . Fonte: Gregoretti, Maltauro e Lanzoni (2010).....	16
Figura 3.6 - Ruptura por galgamento na barragem São Francisco, em Mirai (MG). Fonte: Rocha (2015). ....	17
Figura 3.7 - Barragem de Fundão, em Mariana (MG), após o processo de liquefação..	18
Figura 3.8 - Aumento dos riscos individuais para uma atividade perigosa em particular. Fonte: Melo, 2014.....	22
Figura 3.9 - Curva F-N para o risco social. Fonte: Melo, 2014.....	23
Figura 3.10 - Metodologias para análise de risco em barragens. Adaptado de Aleotti e Chowdhuty (1999) e Soeters e van Western (1996).....	24
Figura 3.11 - Imagem do <i>Google Earth</i> . Acessado em 21 de março de 2018.....	40
Figura 3.12 - O mundo real, segundo as representações vetorial e <i>raster</i> .....	42
Figura 3.13 - Imagem vetorial elaborada no <i>ArcGIS</i> : curvas de nível da região do QF.	43
Figura 3.14 - Imagem <i>raster</i> elaborada no <i>ArcGIS</i> : mapa de altitude da região do QF.	43
Figura 4.1 - Bacias e principais sub-bacias hidrográficas do rio Doce e São Francisco, na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. ....	45
Figura 4.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Romano <i>et al.</i> 2013). ....	46



Figura 4.3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Idades radiométricas são registradas à direita da coluna (Alkmim e Marshak, 1998). .....	47
Figura 5.1 - Contexto para o parâmetro "Localização na bacia hidrográfica" .....	55
Figura 6.1 - Localização das barragens, principais municípios e rodovias no limite do Quadrilátero Ferrífero. ....	65
Figura 6.2 - Localização das barragens nas bacias e principais sub-bacias hidrográficas do rio Doce e São Francisco. ....	66
Figura 6.3 - Mapa geológico da região da barragem Itabiruçu, em Itabira (MG). Fonte: adaptado de Lobato <i>et al.</i> (2005). ....	70
Figura 6.4 - Mapa hidrográfico da região de localização das barragens Itabiruçu e Conceição. Fonte: adaptado de Fuckner (2013). ....	71
Figura 6.5 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Itabiruçu. ....	72
Figura 6.6 - Mapa geológico da região da barragem Doutor, em Ouro Preto (MG), próxima ao distrito de Antônio Pereira. Fonte: adaptado de Lobato <i>et al.</i> (2005). ....	74
Figura 6.7 - Mapa hidrográfico da região de localização da barragem Doutor. Fonte: adaptado de Fuckner (2013). ....	77
Figura 6.8 - Mapa hidrográfico da barragem Doutor e parte da sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, próximas ao distrito de Antônio Pereira. Fonte: adaptado de Fuckner (2013)	77
Figura 6.9 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Doutor. ....	78
Figura 6.10 - Mapa geológico da região da barragem de Fundão em Mariana (MG), próxima aos distritos de Bento Rodrigues e Santa Rita Durão. Fonte: adaptado de Lobato <i>et al.</i> (2005). ....	82
Figura 6.11 - Mapa hidrográfico da barragem de Fundão e parte da sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, próxima às barragens de Germano e Santarém e distrito de Bento Rodrigues. Fonte: adaptado de Fuckner (2013). ....	83
Figura 6.12 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Fundão. ....	84

Figura 6.13 - Mapa geológico da região da barragem de Casa Pedra, em Congonhas (MG). Fonte: adaptado de Lobato <i>et al.</i> (2005). .....	87
Figura 6.14 - Mapa hidrográfico da barragem Casa de Pedra e da sub-bacia do rio Maranhão, próximas ao município de Congonhas. Fonte: adaptado de Teixeira (2017)	89
Figura 6.15 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Casa de Pedra. ....	90
Figura 6.16 - Mapa geológico da região da barragem Maravilhas II, em Itabirito (MG). Fonte: adaptado de Lobato <i>et al.</i> (2005). .....	93
Figura 6.17 - Mapa hidrográfico das barragens Maravilhas I e II, próximas ao município de Itabirito. Fonte: adaptado de Teixeira (2017). ....	95
Figura 6.18 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Casa de Pedra. ....	96
Figura 6.19 - Mapa geológico da região das barragens do Vigia e Auxiliar do Vigia, em Ouro Preto (MG). Fonte: adaptado de Lobato <i>et al.</i> (2005). .....	99
Figura 6.20 - Mapa hidrográfico das barragens Vigia e Auxliar do Vigia e parte da sub-bacia do rio Paraopeba, no município de Congonhas (MG). Fonte: adaptado de Teixeira (2017). .....	101
Figura 6.21 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura das barragens Vigia e Auxiliar do Vigia. ....	102
Figura 6.22 - Gráfico com os pesos distributivos com destaque para os 3 parâmetros de maior relevância. ....	107

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Descrição e função das zonas de aterro de barragens. Fonte: Melo (2014). .....	11
Tabela 3.2 - Diferentes proposições do conceito de <i>hazard</i> . Fonte: Corteletti, 2014.....	19
Tabela 3.3 - Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty (1991). ....	28
Tabela 3.4 - Quadro de classificação quanto à categoria de risco em função das características técnicas (CT). ....	32
Tabela 3.5 - Quadro de classificação quanto à categoria de risco em função do estado de conservação (EC). ....	33
Tabela 3.6 - Quadro de classificação quanto à categoria de risco em função do plano de segurança das barragens (PS). ....	34
Tabela 3.7 - Quadro para classificação de barragens, em função da categoria de risco (CRI), para disposição de resíduos e rejeitos.....	35
Tabela 3.8 - Quadro de classificação quanto ao dano potencial associado (DPA).....	36
Tabela 3.9 - Quadro para classificação de barragens, em função do dano potencial associado (DPA), para disposição de resíduos e rejeitos.....	37
Tabela 3.10 - Critérios para classificação das barragens. ....	37
Tabela 5.1 - Seleção e origem dos parâmetros selecionados para avaliação do perigo das barragens estudadas. ....	52
Tabela 5.2 - Seleção dos 13 parâmetros e respectivos atributos de análise do perigo das barragens estudadas (continua).....	53
Tabela 5.3 - Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty (1991). ....	56
Tabela 5.4 - Índice randômico médio do AHP. Fonte: Saaty (1991). ....	60
Tabela 5.5 - Critérios adotados para a classificação do índice de perigo (iP). ....	62
Tabela 6.1 - Compilação de dados da barragem Itabiruçu, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	68
Tabela 6.2 - Compilação de dados hidrográficos da barragem Itabiruçu, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	71
Tabela 6.3 - Compilação de dados da barragem do Doutor, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	73

Tabela 6.4 - Compilação de dados hidrográficos da barragem do Doutor, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	76
Tabela 6.5 - Compilação de dados da barragem de Fundão, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	79
Tabela 6.6 - Compilação de dados hidrográficos da barragem de Fundão, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	83
Tabela 6.7 - Compilação de dados da barragem Casa de Pedra, segundo o BDA. Acessado em 2018. ....	86
Tabela 6.8 - Compilação de dados hidrográficos da barragem Casa de Pedra, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	88
Tabela 6.9 - Compilação de dados da barragem Maravilhas II, segundo o BDA. Acessado em 2018. ....	91
Tabela 6.10 - Compilação de dados hidrográficos da barragem Maravilhas II, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	94
Tabela 6.11 - Compilação de dados da barragem do Vigia, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	97
Tabela 6.12 - Compilação de dados da barragem Auxiliar do Vigia, segundo o BDA. Acessado em 2018. ....	98
Tabela 6.13 - Compilação de dados hidrográficos da barragem do Vigia, segundo o BDA. Acessado em 2018.....	100
Tabela 6.14 - Compilação de dados hidrográficos da barragem Auxiliar do Vigia, segundo o BDA. Acessado em 2018. ....	100
Tabela 6.15 - Matriz quadrada para julgamento paritário dos parâmetros de avaliação propostos neste estudo. ....	104
Tabela 6.16 - Matriz normalizada [A'].....	105
Tabela 6.17 - Matriz ou vetor peso. ....	105
Tabela 6.18 - Multiplicação da matriz [A] pelo vetor peso. ....	106
Tabela 6.19 - Divisão do vetor AP pelo vetor peso .....	106
Tabela 6.20 - Peso distributivo dos parâmetros de avaliação do índice de perigo (iP) de uma barragem. ....	107
Tabela 6.21 - Parâmetros e atributos de análise e suas respectivas notas. (continua) ..	108
Tabela 6.22 - Ordem decrescente dos índices de perigo (iP), conforme vetor peso e nota de potencialidade. ....	111

Tabela 6.23 - Classificação do grau de perigo, conforme valores do iP obtidos.....	112
Tabela 6.24 - Classificação das barragens de rejeito alvo de estudo desse trabalho. ...	112
Tabela 7.1. Parâmetros de avaliação para determinação do índice de perigo (iP) para barragens de rejeitos. ....	128

## Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AHP - *Analitic Hierarchy Process*  
ALARP - *As Low As Reasonably Practicable*  
ANA - Agência Nacional de Águas  
APA - Área de Proteção Ambiental  
APP - Área de Preservação Permanente  
BDA - Banco de Declarações Ambientais  
CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens  
CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco  
CERH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos  
CERN - Consultoria e Empreendimentos de Recursos Naturais LTDA  
CMP - Cheia Máxima Provável  
CNPGB - Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens  
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos  
COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental  
CRI - Categoria de Risco  
CSN - Companhia Siderúrgica Nacional  
DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral  
DPA - Dano Potencial Associado  
EIA - Estudo de Impacto Ambiental  
ERP – *Enterprise Resource Planning*  
ESRI - *Environmental Systems Research Institute*  
ETA – *Event Tree Analysis*  
FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente  
FFB's - Formações Ferríferas Bandadas  
Fm. - Formação  
FMEA – *Failure Mode and Effect Analysis*  
FMECA – *Failure Mode, Effect and Criticality Analysis*  
FS - Fator de Segurança

FTA – *Fault Tree Analysis*  
HAZOP – *Hazard and Operability Analysis*  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IC - Índice de Consistência  
ICA - Índice de Consistência Aleatória  
ICOLD - *International Committee on Large Dams*  
IEF - Instituto Estadual de Florestas  
IFRC - *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies*  
IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas  
iP - índice de perigo  
ISDR - *International Strategy for Disaster Reducion*  
ISRM - *International Society for Rock Mechanics*  
HSE - *Health & Safety Executive*  
MDT - Modelo Digital de Terreno  
MIN - Ministério da Integração Nacional  
Namisa - Nacional Minérios S.A  
NBR - Norma Brasileira  
ONU - Organização das Nações Unidas  
PAE - Plano de Ação Emergencial  
PCA - planos de controle ambiental  
PNSB - Política Nacional de Segurança de Barragens  
QC - Quociente de Consistência  
QF - Quadrilátero Ferrífero  
RADA - Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental  
SEMAD - Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável  
SETE - Soluções e Tecnologia Ambiental LTDA.  
SIAM - Sistema Integrado de Informação Ambiental  
SIG - Sistema de Informação Geográfica  
SISEMA - Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos  
SNISB - Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens  
SR - Sensoriamento Remoto  
UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto  
UTM - Universal Transverso de Mercator

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivo .....	4
1.3. Justificativas .....	5
1.4. Localização .....	6
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>7</b>
2. METODOLOGIA DA PESQUISA .....	7
2.1. 1ª Etapa: Pesquisa bibliográfica do estado da arte.....	7
2.2. 2ª Etapa: Quantificação do índice de perigo (iP).....	8
2.3. 3ª Etapa: Resultados e discussões.....	8
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>9</b>
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9
3.1. Tipos de barragens .....	9
3.2. Tipos de rupturas em barragens .....	15
3.2.1. Erosão interna .....	15
3.2.2. Galgamento .....	16
3.2.3. Liquefação.....	17
3.3. Perigo na análise do risco geológico-geotécnico.....	18
3.4. Metodologias de análise de perigo e risco .....	23
3.4.1. Índice de perigo (iP).....	26
3.5. Legislação .....	31
3.6. Sensoriamento remoto (SR).....	38
3.6.1. Sistema de informação geográfica (SIG) .....	40
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>44</b>
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	44
4.1. Contextualização Geológica .....	46



<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>50</b>
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	50
5.1. 1ª Etapa: Compilação de dados.....	50
5.2. 2ª Etapa: Dinâmica <i>brainstorming</i> .....	55
5.3. 3ª Etapa: Aplicação do índice de perigo (iP) .....	57
5.3.1. Aplicação da matriz hierárquica.....	58
5.3.2. Consistência da matriz .....	58
5.3.3. Classificação do índice de perigo (iP).....	61
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>63</b>
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	63
6.1. Seleção das barragens .....	63
6.1.1. Bacia do rio Doce.....	67
6.1.2. Bacia do rio São Francisco.....	85
6.3. Parâmetros de análise .....	103
6.4. Dinâmica <i>Brainstorming</i> .....	103
6.5. Quantificação e classificação do índice de perigo (iP).....	108
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>115</b>
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	115
7.1. Considerações finais .....	115
7.2. Sugestões para pesquisas futuras .....	117
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>125</b>

# CAPÍTULO 1

---

## 1. INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas utilizadas a séculos pela sociedade com a função de armazenamento de água, tanto para o abastecimento humano quanto animal (pecuária e criação de animais), e nos últimos séculos também como para a indústria, a mineração e a irrigação (agricultura). Além disso, podem ser utilizadas para a geração de energia, controle de cheias, retenção de resíduos, paisagismo, lazer, prática de esportes e para navegação.

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Essas estruturas de contenção podem ser classificadas em dois grupos principais, sejam eles, as barragens de terra e/ou enrocamento e as de concreto, conforme o material utilizado em sua projeção. No caso das barragens de mineração ou, barragens de rejeito propriamente ditas, às quais têm a função de conter os resíduos, os próprios estéreis da mina (claramente sem valor econômico) são utilizados em sua construção.

Além de serem alvo de estudo deste trabalho, as barragens de rejeito possuem especial interesse, uma vez que são comumente mais utilizadas no Brasil. Isso se deve, entre outros fatores, à sua construção estar associada à tecnologias de baixo custo, as quais são realizadas em múltiplas etapas, em função da quantidade de rejeito produzido.

A avaliação do perigo em barragens de rejeitos é o primeiro passo para a análise e a avaliação de riscos oferecidos por esses tipos de estruturas. A percepção do risco se baseia na identificação do perigo potencial existente e na tentativa de quantificá-lo. Estes processos são partes de um novo ramo de estudo, caracterizado pelo gerenciamento de risco. Esse processo de avaliação das possíveis consequências, procura dar segurança tanto para o empreendedor/empreendimento como para os alvos potenciais, sejam eles a fauna, a flora, as construções e, principalmente, as vidas humanas, propiciando uma compreensão das implicações e das incertezas associadas

(Zuffo, 2010).

As causas dos rompimentos de barragens de rejeitos são as mais diversas possíveis, independentemente do seu tipo, porte e/ou geometria. Essas rupturas estão associadas à perda de capacidade de uma barragem, ou de parte dela, de funcionar como previsto (CNPGB, 2005). Desta forma, o levantamento prévio de metodologias na literatura capazes de entender e interpretar comportamentos passíveis de ruptura são de suma importância.

O tema desta dissertação está, tanto no Brasil como no restante do mundo, cada vez mais atual e debatido. O rompimento da barragem de rejeito Fundão, por exemplo, da empresa Samarco Mineração S. A., no município de Mariana (MG), em novembro de 2015 – que destruiu todo o distrito de Bento Rodrigues e vitimou 19 pessoas – é visto como um dos maiores desastres mundiais do gênero nos últimos 100 anos. Além desse, no Brasil cita-se também os casos das barragens da Herculano Mineração (2014), em Itabirito (Figura 1.1), com pelo menos 3 óbitos e da Rio Pomba Cataguases (2007), em Miraf, que deixou mais de 4.000 pessoas desabrigadas ou desalojadas, ambas também no estado de Minas Gerais.



Figura 1.1 - Retroescavadeira soterrada pela lama, após o acidente nas barragens da Herculano Mineração, em Itabirito (MG). Fonte: FEAM (2014).

A Comissão Internacional de Grandes Barragens (*International Committee on Large Dams - ICOLD*), segundo os números mais recentes, tem registrado em seu banco de dados, mais de 58 mil barragens no mundo todo. Ressalta-se que nesta avaliação são levados em consideração obras com no mínimo 15 m de altura e capacidade de armazenamento de pelo menos 3.000.000 m<sup>3</sup>.

Desta forma, o trabalho foi desenvolvido a partir da aplicação de uma metodologia baseada em técnicas de análise capazes de classificar um conjunto de barragens do Quadrilátero Ferrífero (QF), e suas respectivas bacias hidrográficas, segundo o perigo que essas estruturas oferecem, ou poderão oferecer, na região onde foram projetadas.

As características geológicas do Quadrilátero Ferrífero (QF) são, basicamente, compreendidas por estruturas sinclinais e anticlinais, as quais afloram sedimentos do Supergrupo Minas. Entre esses sedimentos, de idade paleoproterozóica, citam-se as Formações Ferríferas Bandadas (FFB's) da Formação Cauê, de importante papel econômico devido ao seu elevado teor de ferro e pureza (Dorr II, 1969).

Ante ao exposto, reitera-se a importância do estudo de perigo e de uma análise criteriosa dos danos potenciais associados às barragens de rejeito, além de medidas de mitigação e monitoramento de forma que essas barragens apresentem níveis aceitáveis e satisfatórios de segurança.

Assim, de forma sucinta, este trabalho foi realizado conforme a seguinte ordenação e estrutura:

- ✓ Capítulo 1: introdução e contextualização do tema no Brasil e no mundo, além dos objetivos esperados;

- ✓ Capítulo 2: desenvolvimento da pesquisa, etapas de trabalho e procedimentos realizados;

- ✓ Capítulo 3: revisão bibliográfica e apresentação de aspectos conceituais;

- ✓ Capítulo 4: escolha e identificação das unidades de análise e respectivos

contextos geológicos;

- ✓ Capítulo 5: Introdução de conceitos e aplicação da técnica em estudo;
- ✓ Capítulo 6: Análise e discussão de resultados;
- ✓ Capítulo 7: Conclusões, principais considerações e sugestões para pesquisas futuras.

## **1.2. OBJETIVO**

O objetivo geral deste trabalho é a criação de uma metodologia que estabeleça parâmetros que permitam a aplicação de uma técnica de hierarquização para determinação do índice de perigo (iP) e de potenciais impactos em unidades de análises (portfólio ou conjunto de barragens, bacias e sub-bacias hidrográficas associadas) no QF, região centro-sul de Minas Gerais.

Nesta avaliação será levada em conta a vida útil da barragem de rejeitos, estabelecendo-se níveis de segurança aceitáveis para cada uma das etapas e mecanismos de análise dos riscos associados à estabilidade destas obras. Assim, para se alcançar o objetivo principal e por meio da manutenção de um banco de dados em parceria com a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), apresentam-se ainda alguns objetivos específicos, tais como:

- ✓ Identificação, mapeamento e zoneamento das barragens de rejeitos e das bacias hidrográficas à jusante, por meio de análise de imagens de satélite e bases topográficas;
- ✓ Definição de cenários e de potenciais áreas afetadas no caso de uma ruptura hipotética, além da identificação de barragens, bacia e sub-bacias em estados mais críticos, e;
- ✓ Fornecimento de resultados que sustentarão a avaliação da condição das estruturas de contenção.

### **1.3. JUSTIFICATIVAS**

O Quadrilátero Ferrífero (QF) se caracteriza como uma das mais importantes províncias minerais do mundo devido ao seu potencial para produção de ouro e ferro. Seu arranjo geológico-estrutural é de grande complexidade, sendo a região alvo de inúmeras pesquisas e constantes transformações. Esta riqueza econômica atraiu investidores de todo mundo que motivaram o início das atividades de mineração e a instalação destas barragens de rejeitos.

Por outro lado, o QF também é a região de Minas Gerais que abriga a maior concentração urbana, com cerca 22% do total da população do estado (QFE-2050, 2009). Logo, subentende-se que devido à esta coexistência, um número maior de vidas humanas poderá estar sujeita à ocorrência de eventos, sejam eles de baixa magnitude ou, até mesmo, eventos catastróficos. Outro fator importante que deve ser levado em consideração na análise do perigo e do risco, diz respeito aos aspectos dinâmicos das variações ambientais e à ocorrência de eventos geológicos imprevisíveis.

Em face às complexidades e aos fatos supracitados, emerge a necessidade de elaboração de parâmetros e propostas para quantificação desse perigo, o qual ocorrerá por meio de um índice (número adimensional). Para essa estimativa, será levado em conta todos os seus alvos potenciais, os quais incluem, por exemplo, as edificações, os veículos, o meio ambiente e a própria população local.

Assim, a partir de uma revisão bibliográfica, a pesquisa justifica-se pela necessidade crescente de mapear o perigo e o risco de rompimento dessas barragens de rejeitos, cujos resultados poderão ser decisivos para eficácia de políticas, principalmente, intervencionistas, voltadas à ocupação humana e ao gerenciamento dos riscos. Neste sentido, pretende-se ampliar e aprofundar as abordagens adotadas nessa análise.

## 1.4. LOCALIZAÇÃO

O Quadrilátero Ferrífero (QF) está localizado na parte centro-sul do estado de Minas Gerais (MG) e com extensão territorial de aproximadamente 7.000 km<sup>2</sup>. Sua forma geométrica estende-se entre Ouro Preto, a sudeste do estado, Congonhas, a sudoeste, Belo Horizonte, a atual capital a noroeste e, Itabira, a nordeste (Figura 1.2). Além destes, a região compreende municípios como Sabará, Rio Piracicaba, Casa Branca, Itaúna, Nova Lima, Santa Bárbara, Mariana, entre outros, que possuem suas respectivas economias baseadas na extração mineral e na metalurgia.

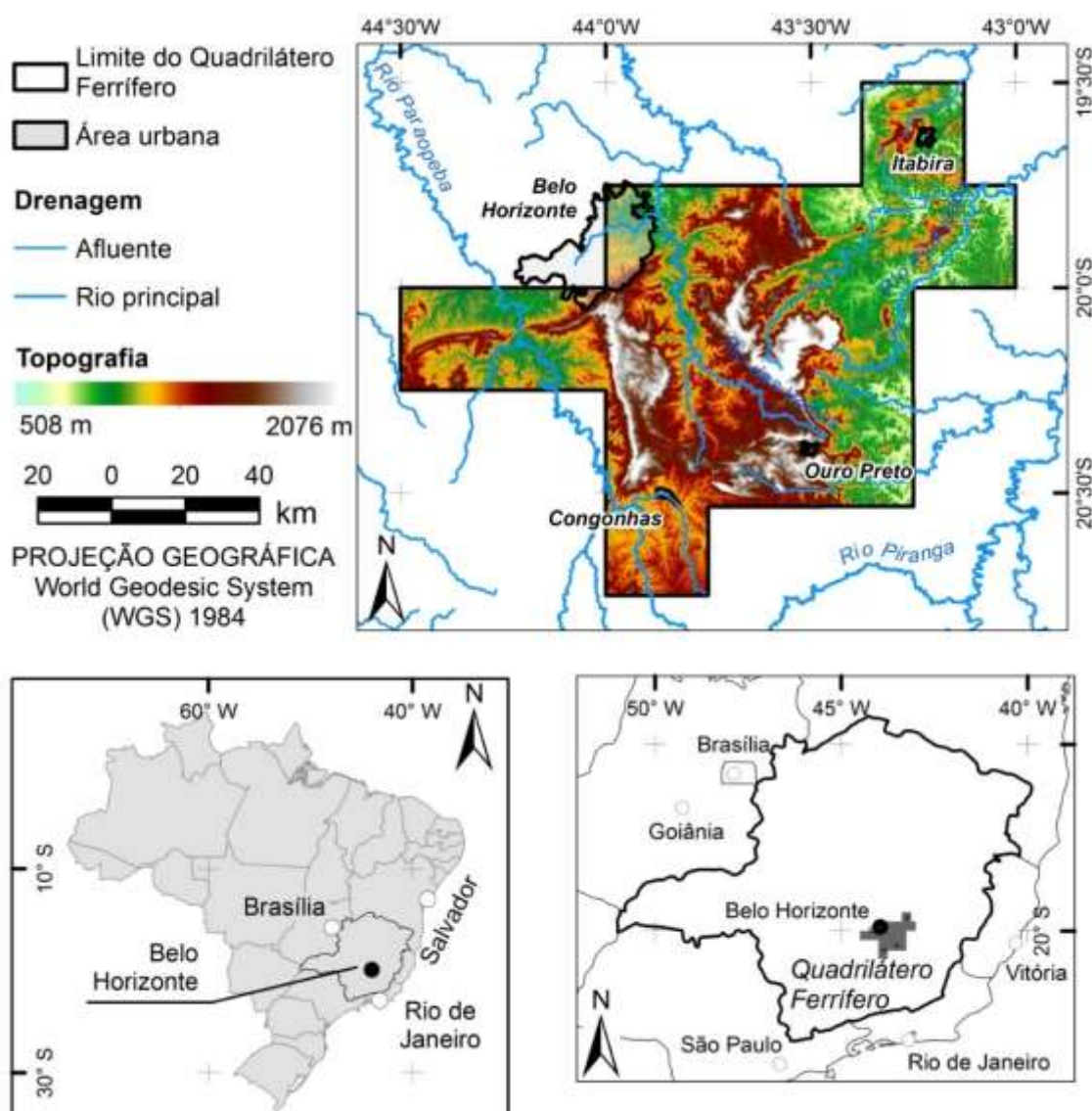


Figura 1.2 - Mapa de localização da região do Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGIA DA PESQUISA

O presente estudo foi conduzido e elaborado em três etapas principais, as quais serão melhores descritas neste capítulo, conforme fluxograma de atividades realizadas (Figura 2.1).

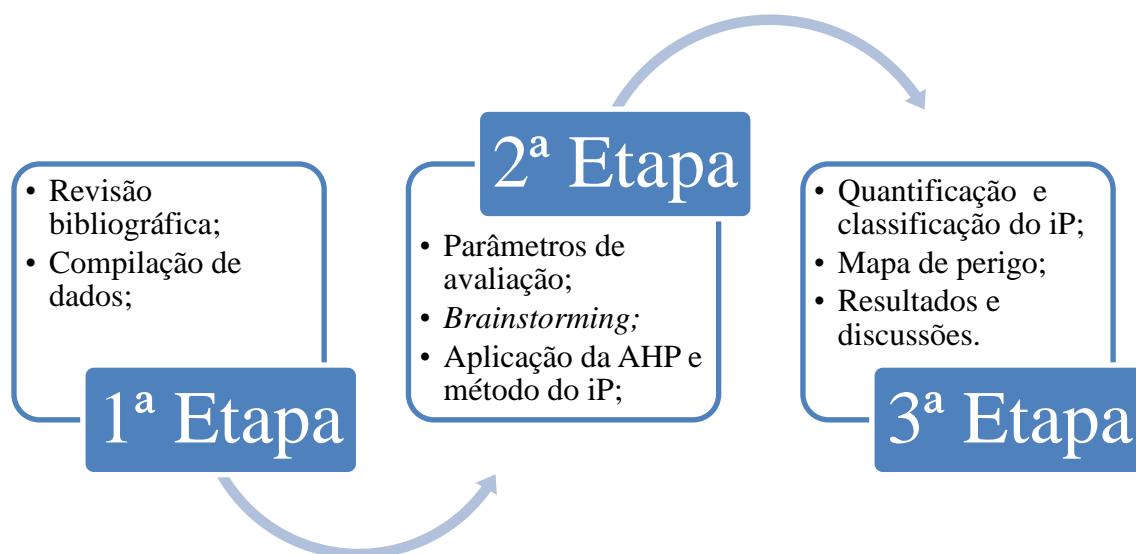


Figura 2.1 - Fluxograma da metodologia de pesquisa.

### 2.1. 1ª ETAPA: PESQUISA BIBLIOGRÁFICA DO ESTADO DA ARTE

Na primeira etapa do trabalho foi realizado a revisão bibliográfica e a compilação de dados existentes na literatura geológico-geotécnica. Entre os principais levantamentos, destaca-se:

- ✓ os tipos de barragens e estruturas de contenção de rejeitos, além das principais causas de rupturas;
- ✓ as legislações vigentes que tratam do tema;
- ✓ o contexto geológico, no qual a região do Quadrilátero Ferrífero está inserido;
- ✓ os parâmetros de avaliação dentro do contexto das unidades de análise



supracitadas;

✓ Conceitos e principais técnicas de análise de perigo e risco; identificação, mapeamento e zoneamento das barragens de rejeitos e das bacias hidrográficas à jusante, por intermédio das análises de imagens de satélite e bases topográficas.

## **2.2. 2ª ETAPA: QUANTIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE PERIGO (IP)**

Esta etapa consistiu na aplicação direta para a quantificação do índice de perigo (iP):

- ✓ Escolha e seleção dos parâmetros de avaliação;
- ✓ Dinâmica *brainstorming* com atribuição de pesos;
- ✓ Processo de Análise Hierárquica (AHP - *Analytic Hierarchy Process*) por meio da identificação dos parâmetros de contorno e da verificação de consistência da matriz de julgamentos;
- ✓ Aplicação do método do índice de perigo (iP);

## **2.3. 3ª ETAPA: RESULTADOS E DISCUSSÕES**

De posse das informações obtidas na 2ª etapa, foram realizadas as seguintes atividades:

- ✓ A análise dos resultados para elaboração do banco de dados georreferenciados em uma plataforma de Sistema de Informação Geográfica (SIG), o qual será disponibilizado à Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) - empresa parceira deste projeto, para atualização e manutenção deste;
- ✓ Método do índice de perigo (iP) para quantificação e classificação dos indicadores de perigo (iP) para o portfólio de barragens selecionadas;
- ✓ Classificação quanto ao nível de perigo das barragens abordadas;
- ✓ Confecção do mapa de perigo e respectivas barragens estudadas;
- ✓ Foram feitas as discussões e conclusões do trabalho e, finalmente, a confecção da dissertação que diz respeito à presente pesquisa.

# CAPÍTULO 3

---

## 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos acerca das estruturas de contenção de rejeitos, os materiais mais utilizados em projetos para construção e os principais tipos de rupturas de barragens, além de uma breve revisão da geologia regional e da origem do minério de ferro. Por fim, serão abordados também alguns dos principais conceitos e métodos de avaliação do perigo e do risco, aplicados às barragens de mineração.

### 3.1. TIPOS DE BARRAGENS

O termo barragem deriva da palavra francesa *barrage*, criada do século XII, que tem origem nas palavras *barre*, em francês, e *barra*, em latim vulgar, que significam "travessa, tranca de fechar porta" (CBDB, 2014). Ainda segundo o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB), as barragens são definidas como bloqueios artificiais com a capacidade de preservar água (ou qualquer outro líquido), rejeitos ou detritos, para fins de armazenamento e/ou controle.

O dimensionamento para escolha do tipo e a área de uma barragem depende de vários fatores, tais como os materiais disponíveis na obra, seu potencial de risco e as condicionantes relativas à escolha e à geologia da região, como a forma do vale, a natureza da fundação e a sua sequência construtiva. Conforme Cruz (1996), os grandes grupos de barragens existentes podem ser divididos em:

✓ Barragens de terra e/ou enrocamento (bloco de rocha ou material granular): edificadas com materiais naturais (tais como argilas, siltes e areias) oriundos de áreas de empréstimo, devidamente selecionados, os quais são corretamente transportados, lançados e compactados em camadas sucessivas, com o auxílio de equipamentos especiais. Podem também ser construídas em seções homogêneas ou zoneadas, segundo

volume e qualidade do material disponível, além da possibilidade de serem projetadas com materiais produzidos artificialmente, tais como britas, enrocamentos ou rejeitos de mineração. Ressalta-se ainda, tendo em vista os altos níveis de segurança, a importância de que sejam construídas sob rigorosas técnicas de gerenciamento e a utilização de sistemas de extravasores (vertedouros) para que sejam evitados grandes galgamentos;

✓ Barragens de concreto: construídas exclusivamente com materiais granulares, de origem artificial, aos quais adicionam-se cimento e compostos químicos. Sua construção está associada à utilização de concreto armado ou rolado. Apesar de serem muito resistentes, essas estruturas exigem fundações e ombreiras em maciços rochosos e, se mal projetadas, podem se tornar muito vulneráveis e oferecer consequências catastróficas. Entre os tipos mais comuns, cita-se as de concreto gravidade, concreto em arco e de contraforte.

O bom desempenho de uma barragem está diretamente associado ao seu projeto de construção. Esses projetos são rigorosamente desenvolvidos em algumas principais zonas de aterro, as quais são apresentadas juntamente com suas respectivas descrições e funções, conforme compilação modificada (Tabela 3.1) de Melo (2014). Por se tratar da não existência de um padrão ou norma universal para construção de barragens, o autor realiza uma indicação alfanumérica que tornam alguns conceitos mais didáticos.

Na sequência, Melo (*op. cit.*) apresenta algumas seções de barragens de terra e terra-enrocamento, além das principais avaliações de tratamento mais utilizadas em fundações. Primeiramente, nas Figuras 3.1 e 3.2 identifica-se, respectivamente, as seções de uma barragem de terra homogênea e de uma zoneada, nas quais foram instalados, filtro vertical e tapete horizontal. Nesses casos, sugere-se ainda a cortina de injeção de cimento, por exemplo, se o material da fundação for mais permeável do que o do núcleo da barragem.

Tabela 3.1 - Descrição e função das zonas de aterro de barragens. Fonte: Melo (2014).

ZONA	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
1	Núcleo argiloso	Controle de percolação através da barragem.
2A	Filtro fino	a) Controle de erosão interna da zona 1; b) Controle de erosão interna da fundação barragem / drenagem (quando usado como tapete horizontal); c) Controle de poropressão no talude de jusante quando utilizado como dreno vertical.
2B	Filtro grosso	a) Descarga / drenagem das águas de percolação coletadas nos drenos vertical ou horizontal; b) Controle de erosão interna da zona 2A para o enrocamento.
2C	(i) Filtro/Transição sob <i>rip-rap</i> <sup>1</sup>	Controle de erosão da zona 1 através do <i>rip-rap</i> <sup>1</sup>
	(ii) Filtro/Transição de montante	Controle de erosão da zona 1 para o enrocamento de montante do núcleo da barragem.
1-3	Solo-enrocamento	Fornece estabilidade e controle parcial de erosão interna.
3	Enrocamento fino	Fornece estabilidade. Usualmente é livremente drenante para permitir descarga da percolação através da barragem. Previne erosão interna da zona 2B para o enrocamento grosso.
3B	Enrocamento grosso	Proporciona estabilidade. Usualmente é livremente drenante para permitir descarga da percolação através e sob a barragem.
4	<i>Rip-rap</i> <sup>1</sup> , Enrocamento de proteção	Controle de erosão da face de montante por ações de ondas e também utilizado para controle de erosão do pé de jusante devido ao refluxo de água vertida.

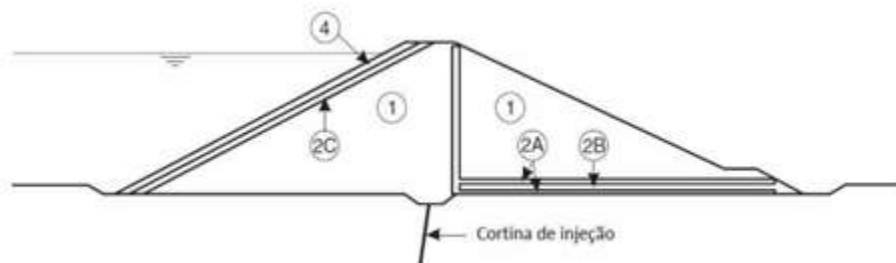


Figura 3.1 - Seção da barragem de terra homogênea com filtro vertical e tapete horizontal e aplicação da cortina de injeção. Fonte: Melo (2014).

<sup>1</sup> Enrocamentos (pedras ou blocos) selecionados com função de proteção ao talude.

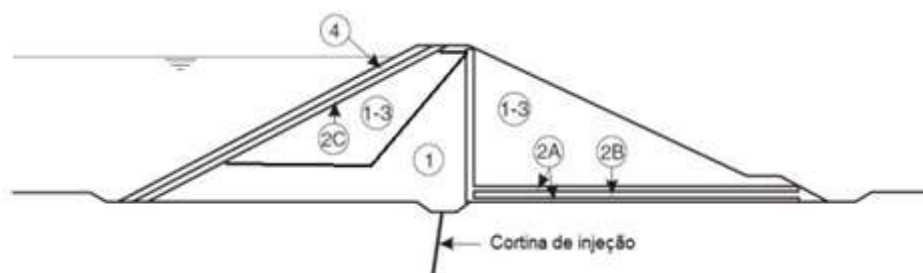


Figura 3.2 - Seção da barragem de terra zoneada com filtro vertical e tapete horizontal e aplicação da cortina de injeção. Fonte: Melo (2014).

O autor apresenta também mais duas seções de barragens de terra-enrocamento, Figuras 3.3 e 3.4, com a primeira delas construídas a partir de um núcleo central e a segunda com o núcleo inclinado à montante, nas quais também são sugeridas a cortina de injeção. Além dessa técnica de tratamento, são citados ainda a possibilidade de escavação e sistemas *cut off*, que atuarão como trincheiras ou cortinas de vedação para interrupção do fluxo de água sob a fundação da barragem.

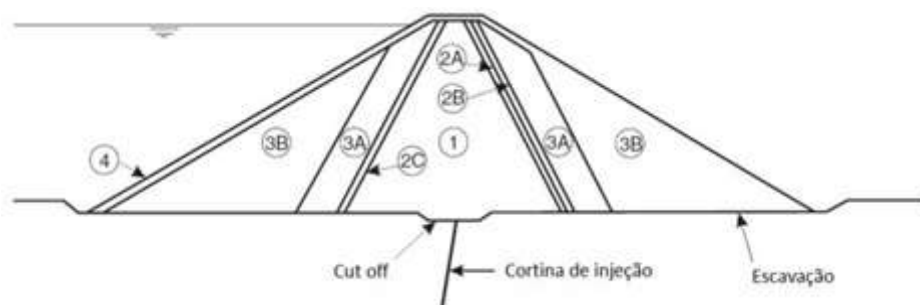


Figura 3.3 - Seção da barragem de terra-enrocamento construída a partir de um núcleo centralizado e métodos de tratamentos para fundação. Fonte: Melo (2014).

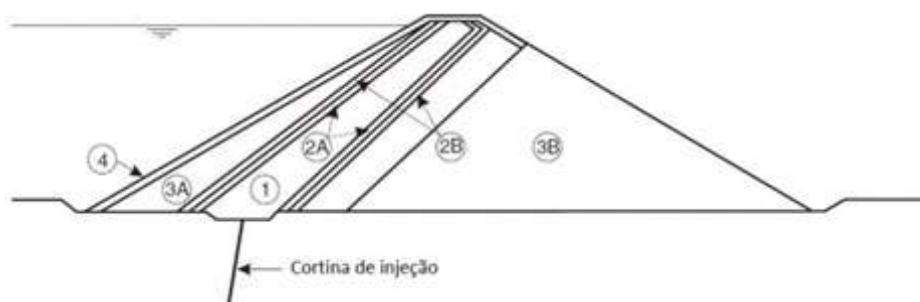


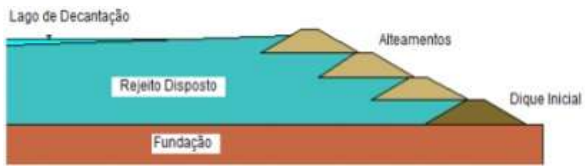
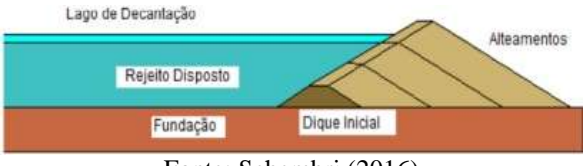

Figura 3.4 - Seção da barragem de terra-enrocamento construída com o núcleo inclinado à montante e aplicação da cortina de injeção. Fonte: Melo (2014).

Cruz (*op. cit.*) considera que a barragem deva atender, principalmente, a três princípios básicos, sejam eles: o controle do fluxo, a estabilidade e a compatibilidade das deformações. Assim, por questões de segurança, os projetos de barragens devem possuir elevados coeficientes de segurança e algumas características essenciais, como a vedação (que lhes conferem elevado grau de estanqueidade), um elemento drenante (que lhes proporcionem uma drenagem interna eficaz em caso de ocorrência de erosão interna - *piping*) e um elemento estabilizante (estabilização também em caso de rupturas).

Hoje os tipos mais comuns de barragens são as de terra e/ou enrocamento, principalmente porque sua construção envolve o uso dos materiais localmente disponíveis, com o mínimo de processamento, e também porque podem ser utilizadas em situações para fundações menos resistentes. Além do mais, os requisitos topográficos e de fundação para as barragens de terra são menos restritivos do que para outros tipos de barragens. Seus solos possuem, essencialmente, granulometria fina e de baixa permeabilidade, sendo o comportamento do aterro condicionado, principalmente, pelas poropressões (Melo, *op. cit.*).

As principais metodologias de ampliação dessas barragens de rejeitos, caracterizadas geotecnicamente por processos sucessivos de alteamento, são definidas por Schembri (2016) e compiladas na Tabela 3.2, conforme a direção de deslocamento do seu eixo em relação ao eixo do dique de partida:

Tabela 3.2 - Descrições dos tipos de métodos de construção e operação em barragens de rejeito. Fonte: Schembri, 2016

Método	Características	Modelo	Vantagens	Desvantagens
<b>Montante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• início de construção dado por um dique de inicial/partida;</li> <li>• estruturada com aterro compactado ou enrocamento;</li> <li>• alteamentos realizados a montante do dique de partida.</li> </ul>	 <p>Fonte: Schembri (2016)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• facilidade de construção;</li> <li>• mais baixo custo benefício;</li> <li>• o próprio rejeito serve de fundação para os próximos diques.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• susceptibilidade a erosão interna;</li> <li>• liquefação;</li> <li>• baixa segurança.</li> </ul>
<b>Jusante</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• possui um caráter mais conservador;</li> <li>• estrutura inicial se desenvolve a partir de um dique primário;</li> <li>• alteamento realizados à jusante do dique de partida;</li> <li>• processo de construção, ampliação, e alteamentos ocorrem de forma independente da disposição do rejeito.</li> </ul>	 <p>Fonte: Schembri (2016)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• inexistência de restrições para a altura final da estrutura;</li> <li>• melhor controle do lençol freático e do nível d'água;</li> <li>• método de construção e operação dão melhores condições de estabilidade para as estruturas;</li> <li>• drenagem interna pode ser instalada durante qualquer etapa de expansão;</li> <li>• os alteamentos da barragem podem ser construídos com o próprio rejeito.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• a grande quantidade de material necessário para a estrutura de aterro;</li> <li>• altos custos dispendiosos.</li> </ul>
<b>Linha de centro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• estrutura inicial se desenvolve a partir de um dique de partida;</li> <li>• estrutura física se aproxima do método à jusante;</li> <li>• é lançado de modo periférico à sua crista, formando a praia de deposição;</li> <li>• alteamentos são feitos com material argiloso sobre a divisa do talude à jusante do maciço de partida e da praia de rejeitos.</li> </ul>	 <p>Fonte: Schembri (2016)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• maior estabilidade entre todos os métodos;</li> <li>• material argiloso pode ser oriundo do decapeamento da mina, estéril ou empréstimo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• os alteamentos da barragem não podem ser construídos com o próprio rejeito</li> <li>• logística e custo para transporte de material argiloso</li> </ul>

## **3.2. TIPOS DE RUPTURAS EM BARRAGENS**

O histórico de acidentes envolvendo ruptura de barragens também não é assunto recente na história da humanidade. A barragem de St. Francis, por exemplo, para abastecimento de água de parte da cidade de Los Angeles (EUA), apresentou uma falha em 1928, que resultou na morte de 450 pessoas.

O registro com mortes mais recente, ocorreu em 2015. Neste rompimento foram registrados 19 óbitos, 1 desaparecimento, 600 desabrigados (ou desalojados), a destruição total de um distrito e o corte no abastecimento de água de muitas pessoas.

Os estudos de rupturas de barragens mostram que as falhas são derivadas da atuação de forças externas e internas em suas estruturas. Essas forças, por sua vez, são controladas, de forma geral, pela atuação de fatores ligados aos aspectos geológicos da área, a qual a barragem está inserida. Assim, entre as principais condições para a diminuição de eficiência de uma barragem, cita-se: a erosão interna, o galgamento e a liquefação (XIONG, 2011).

### **3.2.1. Erosão interna**

No caso das barragens de terra ou enrocamento, esse tipo de ruptura ocorre devido à uma falha estrutural, por meio de infiltrações na fundação ou no corpo da barragem (durante a compactação do maciço). A água, ao percolar, produz a erosão, o arraste de materiais e, conseqüentemente, um canal de fluxo que, ao longo do tempo, ganha dimensão e causa a ruptura total da barragem (Figura 3.5) (ANA, 2012).

A criação de um caminho para o fluxo de água e o arraste de partículas de solo, resulta no fenômeno conhecido por *piping*, momento em que as forças erosivas superam as forças de resistência. Geralmente, essas forças de resistência são analisadas durante a elaboração do projeto de construção da barragem, uma vez que dependem da coesão e da granulometria do material à ser utilizado (Sherard *et al.*, 1963).



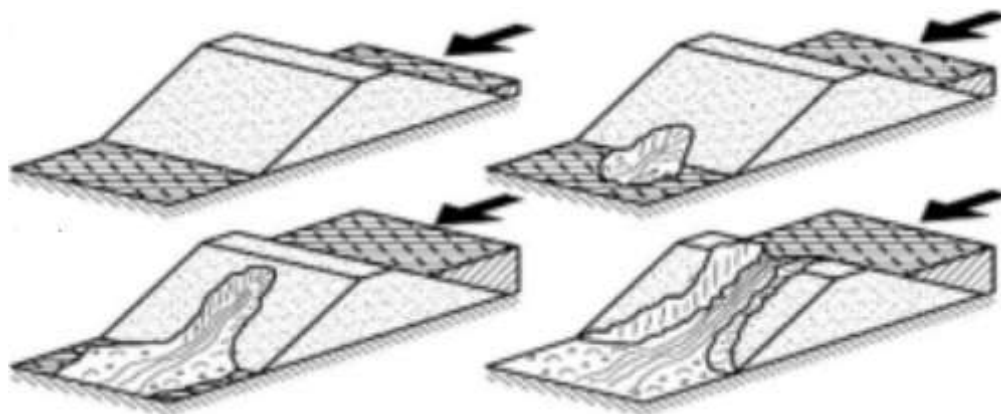


Figura 3.5 - Ruptura por erosão interna - *piping*. Fonte: Gregoretti, Maltauro e Lanzoni (2010).

### 3.2.2. Galgamento

A ruptura por galgamento ou, *overtopping*, se dá quando o nível d'água no reservatório se eleva além da cota da crista da barragem. No caso das contenções de terra, esse fenômeno produzirá o arraste de rejeitos, solo e água, além da sua ruptura por consequência (Figura 3.6). Os eventos de galgamento, geralmente, devem-se à repetitivos períodos chuvosos, que produzem cheias nos cursos fluviais, sendo essas superiores à capacidade do vertedouro (ANA, 2012).

Outra possível causa para ocorrência deste processo é a ruptura de barragens à montante, de tal modo que as estruturas à jusante, por exemplo em uma mesma rede de drenagem, são incapazes de absorver todo o volume deslocado. Com a elevação da linha freática para além da cota da crista e, conseqüente instabilidade, poderá ocorrer o fenômeno conhecido por ruptura em cascata. Como exemplo desse tipo de ruptura, lembra-se do acidente de 2015, que após a perda de resistência de Fundão, todo o material foi carreado, provocando o galgamento da barragem de Santarém, em Mariana (MG). Outro importante evento aconteceu na barragem de São Francisco, da empresa Rio Pomba Cataguases, em 2007, no município de Miraf (MG), que deixou mais de 4.000 pessoas desabrigadas.

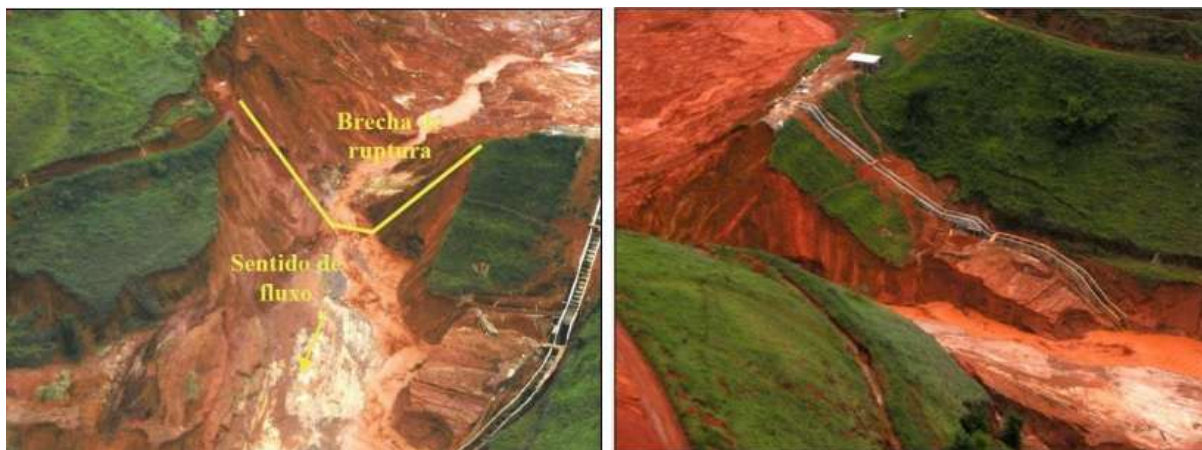


Figura 3.6 - Ruptura por galgamento na barragem São Francisco, em Mirai (MG).  
Fonte: Rocha (2015).

### 3.2.3. Liquefação

Para Pereira (2005), o fenômeno da liquefação pode ser compreendido como a ação necessária para transformar qualquer substância, em seu estado natural, para o estado fluido e, no caso das barragens de terra (ou solo propriamente dito), do estado sólido para o estado liquefeito. Essa alteração se deve à uma elevada aplicação de carga, seja ela de origem estática ou dinâmica.

Pereira (*op. cit.*) diz ainda que neste processo ocorre a "perda repentina da resistência dos materiais granulares, fofos e saturados, induzida por uma redução significativa das tensões efetivas e, em consequência, por um desenvolvimento de elevadas poropressões. O mecanismo, em muitos casos, é causado pelos efeitos de vibrações, associadas os eventos sísmicos ou detonações. Por outro lado, em regiões assísmicas, caso do Quadrilátero Ferrífero, o fenômeno pode ocorrer mesmo sob carregamentos estáticos" (Figura 3.7).



Figura 3.7 - Barragem de Fundão, em Mariana (MG), após o processo de liquefação.

### 3.3. PERIGO NA ANÁLISE DO RISCO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

O relatório organizado pela *International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)* “*Living with Risk: a global review of disaster reduction initiatives*” (ONU, 2004) caracteriza o perigo como um evento físico ou atividade humana potencialmente danosa que pode causar perdas de vidas, ferimentos a pessoas, danos a propriedades, interrupção de atividades econômicas ou degradação ambiental.

Sobreira (2001), procurando-se definir alguns preceitos à compreensão do assunto, menciona que no Brasil o termo perigo (“*hazard*”) não é muito bem utilizado entre pesquisadores e profissionais da área. Erroneamente, esse tem sido utilizado como sinônimo de vocábulos como probabilidade, vulnerabilidade, suscetibilidade e, mais equivocadamente ainda, como risco (“*risk*”). O desalinhamento se deve, em sua maior parte, pela tradução incorreta da expressão para a língua portuguesa.

Para o termo *hazard*, aplicado em um contexto geológico-geotécnico, Corteletti (2014), apresentou de forma sistemática e organizados de forma cronológica os vários conceitos do termo. (Tabela 3.3)

Tabela 3.2 - Diferentes proposições do conceito de *hazard*. Fonte: Corteletti, 2014.

Ano	Autor	Perigo ( <i>hazard</i> )
1984	Varnes <sup>2</sup>	A probabilidade de ocorrência de um processo potencialmente danoso (com uma dada magnitude/intensidade) numa determinada área e num certo período de tempo (probabilidades temporais e espaciais).
1990	Augusto Filho <i>et al.</i>	É visto como a probabilidade (ou frequência) de ocorrência de um fenômeno destrutivo.
1993	Zuquette	Evento perigoso: representa um perigo (latente) que se associa a um fenômeno de origem natural ou provocado pelo homem, que se manifesta em um lugar específico, em tempos determinados, produzindo efeitos adversos nas pessoas, nos bens, e/ou no meio ambiente.
1994	Fell <sup>2</sup>	Refere-se ao potencial de evento geotécnico que cause danos em uma área; tal dano poderia incluir perdas de vida ou lesões, danos a propriedades, perturbação social e econômica ou degradação do meio ambiente.
1997	Einstein	Trabalha com a incerteza de um perigo, com previsibilidade limitada. É a probabilidade de que um perigo particular ocorra em um determinado período de tempo.
1997	IUGS-LWG International Union of Geological Sciences – (Landslide Working Group)	Uma condição com potencial para causar consequências indesejáveis. Ameaças de escorregamento devem ser descritas por zonas e magnitudes.
1998	ABGE	Caracterizou como melhor termo para <i>hazard</i> , nas áreas geotécnicas, a palavra suscetibilidade.
1998	Rodrigues-Carvalho	perigo natural: a probabilidade de ocorrência, num determinado período de tempo e numa dada área, de um fenômeno potencialmente danoso (extraída de <i>United Nations Disaster Relief Office - UNDRO</i> , 1992).
1999	Hartford	condição externa que pode causar impactos indesejáveis ao sistema da barragem, como, por exemplo, enchentes e terremotos
2004	JTC32	O potencial de que uma ameaça particular ocorra dentro de um determinado período de tempo.
2007	ASG	Uma condição com o potencial de causar uma consequência indesejável. Na descrição de evento geotécnico, o <i>hazard</i> deve incluir o local, volume (ou área), classificação e velocidade dos deslizamentos e probabilidade da sua ocorrência ao longo de um determinado período de tempo.
2008	USGS - United States Geological Survey	<i>Hazard</i> para eventos geotécnicos: refere-se ao potencial de ocorrência de eventos geotécnico que cause danos dentro de uma área. Tais como: perdas de vidas ou lesões, danos à propriedade, perturbação social e econômica, ou degradação do meio ambiente.

---

<sup>2</sup> Varnes (1984) e Fell (1994) destacam que o termo *hazard* não deve ser restrito a fenômenos naturais.

Para fins de padronização, este trabalho terá como base os conceitos propostos por Fell (1994), o qual estabelece o perigo como potencial de ocorrência de um evento que cause danos em uma determinada área.

Em uma análise de perigo, normalmente implantam-se procedimentos para identificação das probabilidades de ocorrências e as possíveis consequências no caso de um evento específico. Entretanto, sua quantificação é considerada uma das etapas mais complexas, pois dependendo da precisão desejada, este processo envolverá uma grande quantidade de variáveis e incertezas.

Assim, para quantificação desse perigo, é necessário que se entenda também a definição de risco. Conforme sugerido por Varnes (*op. cit.*), esse será dado pelo número de vidas perdidas, de pessoas feridas, de danos às propriedades e da interrupção de atividades econômicas devido à um fenômeno prejudicial particular para uma dada região, dado um intervalo de tempo específico. Tal risco pode ser quantificado como o produto da vulnerabilidade (V), do custo (A) (ou a quantidade de elementos em risco) e do perigo (H). Neste caso, o perigo é multiplicado pelas perdas esperadas para todos os diferentes tipos de elementos em risco (Equação 3.1).

$$R = \sum H [\sum (V \times A)] \quad (3.1)$$

O mapeamento de risco consiste na identificação, análise e demarcação das áreas de ocorrência. Geralmente é executado por meio de atividades de campo, nas quais são avaliadas: as possibilidades (probabilidades) de ocorrência dos processos destrutivos (perigo), a vulnerabilidade do elemento em risco (percentagem de perda esperada para o elemento submetido a situação perigosa) e as consequências, sejam elas sociais e/ou econômicas, em caso de processo destrutivo. Em suma, o risco se expressa por meio de um cálculo relativo aos danos sociais e/ou econômicos em um determinado período de tempo (Faria, 2011).

Após a caracterização do problema, por meio da análise de risco, são identificadas as opções disponíveis para a gestão desse risco. Na grande maioria dos casos, pois neste contexto sempre haverá alguém ou algo em exposição, pode ser que não seja necessário

fazer nada. Por outro lado, na grande maioria, é necessário tomar atitudes que eliminem por completo as causas do problema, reduzindo-se assim, a severidade ou a frequência de eventos (Silva, 2009).

Segundo a HSE - *Health & Safety Executive* (2001), órgão executivo de saúde e segurança do Reino Unido, essa redução é também conhecida por Tolerabilidade dos Riscos (ou aceitabilidade). Ela ocorre até um dado momento em que as pessoas, obtendo alguns benefícios, estão habituadas a conviver com os riscos e confiantes de que eles estão sendo devidamente geridos. Cita-se como exemplo, a construção de uma barragem para armazenamento de água que poderá favorecer o abastecimento e até a disponibilidade de energia elétrica para uma determinada população local.

Melo (2014) cita ainda que no momento em que os benefícios não justificam mais os riscos, é importante e necessário que se leve em consideração o banimento da prática ou processo associado. Neste caso, estão sendo levados em conta, os riscos associados à construção do referido empreendimento, principalmente, para as pessoas instaladas à jusante deste.

A HSE (2001 *apud* Melo, 2014) aponta também o triângulo da Figura 3.8 e os princípios da aceitabilidade e tolerabilidade. Os riscos associados à "Região inaceitável", mais escura e no topo da imagem, torna o empreendimento, conseqüentemente, inaceitável independentemente dos seus benefícios. Em contra partida, na parte mais clara e na base, na "Região amplamente aceitável", encontram-se as estruturas as quais os riscos são classificados como insignificantes e adequadamente controlados.

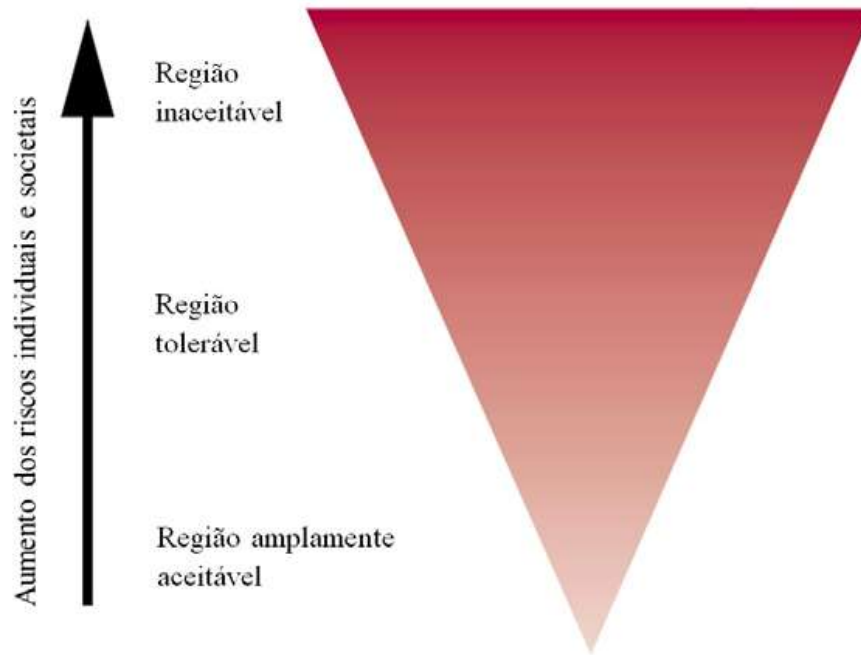


Figura 3.8 - Aumento dos riscos individuais para uma atividade perigosa em particular.  
 Fonte: Melo, 2014.

Por fim, especifica-se além dessas, a zona central na "Região tolerável", local em que os riscos são considerados às atividades para as quais a população está preparada para aceitar, desde que obtenham benefícios e garantias da gestão do risco. Nesse último caso, como determinado pelo critério e pela própria tradução do termo ALARP - *As Low As Reasonably Practicable*, o risco deve ser preservado tão baixo quanto razoavelmente praticável. Além disso, independentemente do seu custo, os riscos dessa região serão periodicamente verificados para garantir que eles continuem cumprindo o princípio supracitado (HSE, 2001 *apud* Melo, 2014).

Melo (2014) evidencia também que quando existe o risco de várias fatalidades em um único evento, trata-se nesse caso, do risco social, expresso pela HSE por meio de curvas F-N. Neste gráfico, em geral, são plotados no eixo das ordenadas as frequências acumuladas de acidentes (F), e, no eixo das abscissas, as respectivas consequências expressas em número de fatalidades (N).

Revela-se nesse tipo de representação, de maneira geral, três grandes zonas de análise, as quais se apresentam em conformidade com os princípios definidos por HSE (2001) e estão separadas pelos limites de aceitabilidade e tolerabilidade (Figura 3.9):

- ✓ a zona de risco aceitável;
- ✓ a zona de risco inaceitável e;
- ✓ a zona intermediária, de riscos toleráveis, com aplicação do critério ALARP.

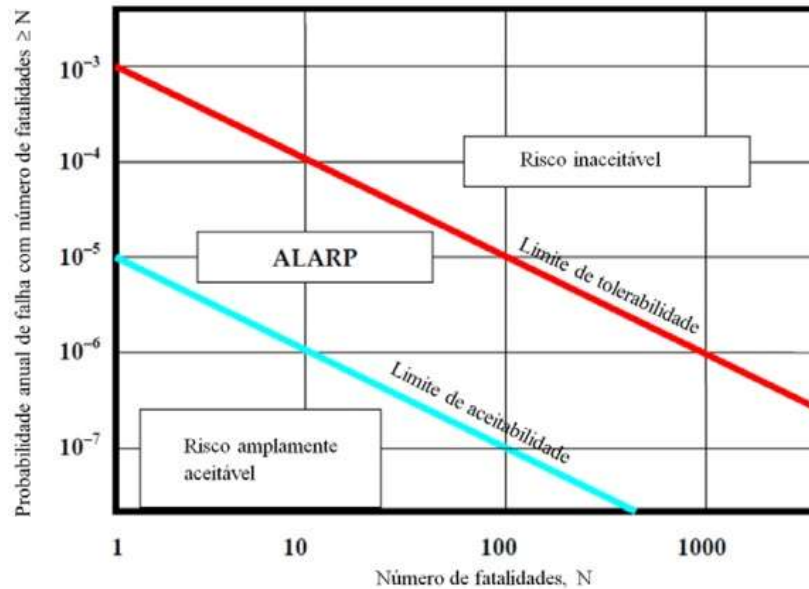


Figura 3.9 - Curva F-N para o risco social. Fonte: Melo, 2014.

O supramencionado autor ressalta ainda que nessa análise de risco quantitativa são consideradas apenas as consequências relativas à perda de vidas humanas, ocultando-se outras consequências possíveis, como as políticas e as ambientais. Nesse sentido, verifica-se a importância da existência de regulamentos para construção e gerenciamento de obras para os fins estudados nessa pesquisa.

### 3.4. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE PERIGO E RISCO

Por se tratar de um tema recente, para as avaliações de perigo e risco em barragens de rejeito ainda não existem metodologias específicas aplicadas à esse ramo de estudo. Entretanto, tendo em vista algumas aplicações e os resultados obtidos, por exemplo, para movimentos de massa (perigo, susceptibilidade e risco), nesse trabalho serão abordados dois métodos principais de análise: os qualitativos e os quantitativos (Figura 3.10).





Figura 3.10 - Metodologias para análise de risco em barragens. Adaptado de Aleotti e Chowdhuty (1999) e Soeters e van Western (1996).

O primeiro enfoque, baseado em métodos heurísticos (geomorfológicos) de menor esforço, apresentará um caráter mais descritivo (por exemplo, baixo, médio e alto) e subjetivo, uma vez que dependerá sempre do conhecimento técnico do responsável pela avaliação. Já as técnicas quantitativas, por meio de modelos determinísticos e valores numéricos (estatística), fazem uso de métodos mais elaborados, os quais visam a redução de subjetividade (Barella, 2016).

De acordo com Melo (*op. cit.*), tanto as análises qualitativas quanto as quantitativas, de aplicações recentes em barragens, apresentam relevantes limitações. As qualitativas, normalmente, tendem a ser subjetivas, ao passo que as quantitativas expõem as dificuldades na caracterização das incertezas de avaliação. O autor enfatiza ainda que as duas abordagens, quando separadas no estudo geotécnico, não podem ser consideradas totalmente adequadas, uma vez que não modelam a realidade do problema por completo.

Ainda segundo o autor, a escolha do tipo de análise irá depender de uma série de fatores, entre eles, a exatidão dos resultados desejados, a natureza do problema e a qualidade e quantidade de dados disponíveis para acesso. De forma superficial, quando a quantidade de informação é considerada baixa, torna-se mais adequada uma análise qualitativa e vice-versa. Nesses casos, recomenda-se a utilização do método que lide tanto com os fatores qualitativos como os quantitativos em um problema de decisão, aproximando-se desta forma, de um modelo ainda mais realista.

A essa metodologia dá-se o nome de AHP (*Analytic Hierarchy Process*) ou Processo de Hierarquização Analítica, o qual é utilizado em abordagens de comparação e ponderação de multicritérios na tentativa de minimizar as incertezas envolvidas no processo. Se caracteriza também por dividir um problema principal em níveis hierárquicos, conforme pesos dos critérios.

Saaty (1980) estabelece que o cálculo da hierarquia é realizado de maneira ascendente. O tomador de decisões, em uma tentativa de minimizar as falhas, compara todos os pares de indicadores em cada nível, começando pelas alternativas e subindo pela hierarquia até atingir o objetivo final. Ainda, segundo o autor, as preferências são encontradas por julgamentos numéricos e comparações paritárias (duas a duas) das alternativas de cada atributo, usando uma escala de valor. A mesma escala é usada para determinar os pesos dos atributos por comparações, também par a par, dos critérios que têm o mesmo objetivo.

Para Lozano (2006), de uma questão complexa, com múltiplos critérios, estrutura-se uma hierarquia com inúmeros níveis, fixando-se o objetivo principal no nível mais elevado (primeiro nível), a definição dos critérios em vários níveis inferiores, por exemplo, no segundo nível, e assim por diante. Por consequência, uma árvore de atributos, com um número arbitrário de níveis, é gerada. Essa subdivisão tem fim quando se determina que os indicadores são avaliadores dos objetivos dos níveis acima da árvore. Finalmente, abaixo dos indicadores são colocadas as alternativas. O autor ressalta ainda a aplicabilidade do AHP para situações as quais envolvem vários objetivos e tomadas de decisões, uma vez que esses objetivos têm interações e correlações.

Wolff (2008) propõe, de maneira hierárquica, que uma decisão complexa (objetivo principal) seja transformada em decisões mais simples e, a partir de uma sequência de alternativas, inferir prioridades à cada uma delas. O método se desenvolve pela comparação dessas alternativas, duas a duas, em relação à determinados critérios. Seu resultado será a matriz (ou valor numérico) de prioridades das alternativas, ou seja, a distribuição em termos de relevância delas.

Segundo Faria (2011), o método é um modelo de ponderação para auxiliar na tomada de decisão em problemas que envolvem a valoração e a hierarquização de fatores por meio da avaliação de um conjunto de critérios explicitados por pesos relativos, dentro de regras matemáticas preestabelecidas.

Por fim, destaca-se também o sucesso da aplicabilidade do AHP em diferentes áreas do conhecimento, conforme trabalhos já publicados. Entre eles, incluí-se a seleção de corpo docente (Grandzol, 2005), prioridades na pesquisa de agricultura internacional (Braunschweig e Becker, 2004), a avaliação de riscos em projetos de ERP – *Enterprise Resource Planning* (Huang, 2004) e as prioridades em sistema de gestão de segurança (Chan *et al.*, 2004).

#### **3.4.1. Índice de perigo (iP)**

Corteletti e Filgueiras (2015) desenvolveram, inicialmente, uma metodologia para classificação do índice de perigo (iP) aos movimentos gravitacionais de massa. A partir do tratamento de dados, análise desses movimentos e suas inter-relações, e a caracterização dos domínios geológico geotécnicos suscetíveis a movimentação, o processo teve como base os seguintes aspectos:

- ✓ importância dos atributos dos processos de alteração do meio físico;
- ✓ distribuição das alterações no tempo e no espaço;
- ✓ magnitude das alterações;
- ✓ confiabilidade das alterações previstas.

Por meio dos princípios e conceitos de perigo (*hazard*) *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 32 (2004) - JTC 32*, e da AHP, método de análise multicriterial, esse índice foi desenvolvido e aplicado primeiramente no Morro do Itararé, localizado na divisa entre Santos e São Vicente, na serra do Mar, no estado de São Paulo.

A relação matemática (Equação 3.2) foi desenvolvida nesse estudo para expressar as condições de um bloco, ou um conjunto deles, atingirem uma edificação localizada em algum ponto da encosta natural, ao se movimentarem. Ressalta-se que neste caso, os movimentos poderiam ocorrer por queda, tombamento, deslizamento ou rolamento (movimentos de massa em rocha).

$$iP = \sum_{i=1}^n (P_i \times At_i) \quad (3.2)$$

Sendo:

$P$  - parâmetro de potencial para o movimento de bloco;

$At$  - atributos de potencialidade para o movimento de bloco;

$n$  - número de pontos inspecionados.

Os índices de perigo (iP) foram localizados e identificados ao longo da encosta por meio de pontos, cujos afloramentos possuíam um potencial em atingir as edificações. Essa identificação ocorreu a partir da escolha de parâmetros, quantitativos e qualitativos, e a inserção de atributos a cada um deles, cuja características potencializavam o movimento de massa em rochas. No caso supracitado, os valores ponderais dos parâmetros e atributos para o cálculo dos índices de perigo foram imputados com pesos, conforme proposto na Escala de Razão de Saaty (1991), apresentada na Tabela 3.3.

Os valores contemplaram ainda a quantificação e a aplicação da tabela de índices de perigo (iP) do movimento de bloco ao atingir as edificações locais, ordenadas em uma matriz de acordo com os princípios do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). A seleção dos parâmetros utilizados para o cálculo do índice de perigo (iP) foram determinadas a partir das características de contorno, debatidas na literatura como “o fenômeno da queda de bloco”.

Tabela 3.3 - Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty (1991).

INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA	DEFINIÇÃO	EXPLICAÇÃO
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i.	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.

Os valores contemplaram ainda a quantificação e a aplicação da tabela de índices de perigo (iP) do movimento de bloco ao atingir as edificações locais, ordenadas em uma matriz de acordo com os princípios do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). A seleção dos parâmetros utilizados para o cálculo do índice de perigo (iP) foram determinadas a partir das características de contorno, debatidas na literatura como “o fenômeno da queda de bloco”.

Segundo os trabalhos no Morro do Itararé e os estudos para queda de blocos, este conceito é aplicado ao instante de contato entre o bloco rochoso e a superfície. Assim, trata-se das condições do maciço e do meio físico, que levam o bloco a iniciar o movimento e percorrer uma trajetória ao longo de uma encosta. As condições para o início do movimento e o seu percurso são caracterizados pelo seu alto valor de aleatoriedade. Uma vez iniciado o movimento, a trajetória do bloco é controlada pelas características do bloco (formato, geomecânica) e, principalmente, pela morfologia da encosta (inclinação, altitude) e suas características superficiais (vegetação, sistemas de

drenagem, presença de solo). Desta forma, a determinação dos parâmetros para o cálculo do índice de perigo de movimento de blocos (iP), teve como base os seguintes componentes:

- ✓ distância entre o ponto de afloramento e as edificações – determinação de segurança;

- ✓ características do bloco e do terreno (desencadeamento do movimento): a correlação entre as condições físicas do bloco e as condições do terreno controlam o início do movimento (velocidade = 0);

- ✓ características morfológicas das encostas: o tipo de movimento de bloco (queda, salto, rolamento e deslizamento) é controlado pela inclinação ao longo da encosta);

- ✓ geometria do talude: controla a trajetória do bloco;

- ✓ características superficiais do terreno (drenagem, vegetação, cobertura de solo): determinam as perdas de energia do movimento e sua trajetória;

- ✓ classificação de resistência do maciço (ISRM) – determinam uma maior ou menor capacidade de fragmentação do bloco durante o trajeto.

Em seguida, as faixas de hierarquização foram determinadas a partir dos valores máximo e mínimo e do valor médio do iP calculado. Por fim, os resultados obtidos classificaram os índices de perigo dentro de faixas hierárquicas de perigo, sejam elas: alto, médio e baixo.

Concluiu-se que a proposta de classificação do índice de perigo (iP) facilita a tomada de decisão na indicação dos pontos que necessitam ser tratados ou que justifiquem alguma ação mitigadora. Além dessas, o método subsidia ainda a análise e a tomada de decisão nas intervenções de áreas expostas à algum tipo de movimento de massa.

No ano seguinte, Corteletti e Filgueiras (2016) empregaram também a metodologia de classificação do índice de perigo (iP) para os taludes marginais do reservatório da UHE de Aimorés, em Minas Gerais.

Nesse segundo projeto, o cálculo do índice de perigo (iP) dos escorregamentos e processos erosivos foram determinadas a partir das características de contorno discutidas na literatura, tendo como base “o fenômeno de escorregamentos e processos erosivos nas áreas marginais de reservatórios desencadeados ou acelerados devido ao processo de deplecionamento do lago”.

Os atributos e os parâmetros para o cálculo do índice de perigo (iP) de processos erosivos e/ou escorregamentos, teve como base os seguintes componentes:

- ✓ estruturas afetadas;
- ✓ distância entre a margem e as estruturas adjacentes (estradas, ferrovias, edificações) – determinação de segurança;
- ✓ tipo de talude: encosta, corte e aterro, controle do tipo de movimento ocorrido;
- ✓ movimento esperado ou identificado: controlado pela geometria do talude, contato solo-rocha, processo erosivo já instalado;
- ✓ características superficiais do terreno (drenagem, vegetação, cobertura de solo): determinam a magnitude do evento.

A classificação dos índices de perigo (iP) apontaram, mais uma vez, os pontos ao longo da margem do reservatório, os quais escorregamentos e/ou processos erosivos possuíam um potencial em atingir uma ou mais estruturas existentes.

Mais recente ainda, a metodologia de classificação do índice de perigo (iP) foi adotada da mesma forma por Donasollo *et al.* (2017). Nesse caso, o estudo teve como princípio os movimentos gravitacionais de massa em rodovias, tendo como estudo de caso, a rodovia RS-115, na região de Gramado, no Rio Grande do Sul.

Nesse trabalho, a quantificação e a aplicação do índice considerou os escorregamentos e os movimentos que tinham potencial para afetar a rodovia em estudo. Para esse tipo de estrutura, foram relacionados novos atributos e parâmetros:

- ✓ Altura do talude;
- ✓ Inclinação do talude;
- ✓ Extensão do talude;
- ✓ Distância do pé do talude até a borda do acostamento,
- ✓ Estruturas afetadas em caso de ocorrência de evento;
- ✓ Cobertura vegetal da face do talude,
- ✓ Erosão no talude;
- ✓ Indícios de movimentos.

Assim, para os três casos citados, os índices de perigo (iP) caracterizaram os pontos, sejam eles ao longo da rodovia, do reservatório ou de uma determinada área, as quais os taludes próximos tinham potencial em atingir e/ou provocar um acidente geotécnico. Finalmente, ressalta-se ainda que em todos os três projetos e em função dos processos de movimento de massa (e/ou erosões), os cálculos dos iP's foram obtidos a partir da Equação 3.2.

### **3.5. LEGISLAÇÃO**

A Resolução Nº 143 de 2012, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2012), define barragem como qualquer estrutura em um curso de água, permanente ou temporário, para fins de contenção e/ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas.

Já a segurança de barragens é controlada no país pela Lei 12.334/2010, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Tal Lei também é responsável pela criação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de



Barragens (SNISB). Segundo o seu texto, essa se aplica à sistemas que apresentem pelo menos uma das características abaixo:

- ✓ Altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, maior ou igual a 15 m (quinze metros);
- ✓ Capacidade total do reservatório maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup> (três milhões de metros cúbicos) e/ou;
- ✓ Reservatório que contenha resíduos perigosos conforme normas técnicas aplicáveis.

Quanto à categoria de risco, o CNRH (2012) classifica os aspectos da própria barragem que podem influenciar na ocorrência de acidentes, levando-se em conta os seguintes critérios gerais, melhores descritos nas Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6:

Características técnicas (CT):

- a) altura do barramento;
- b) comprimento do coroamento da barragem e;
- c) tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro.

Tabela 3.4 - Quadro de classificação quanto à categoria de risco em função das características técnicas (CT).

Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de projeto (c)
Altura ≤ 15 m (0)	Comprimento ≤ 50m (0)	Decamilenar ou CMP (Cheia Máxima Provável) (0)
15 m < Altura < 30 m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milenar (2)
30 m ≤ Altura ≤ 60 m (4)	200m ≤ Comprimento ≤ 600m (4)	TR = 500 anos (5)
Altura > 60 m (7)	Comprimento > 600m (7)	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável (10)

Estado de conservação da barragem (EC):

- d) confiabilidade das estruturas extravasoras;
- e) percolação;
- f) deformações e recalques e;
- g) deterioração dos taludes.

Tabela 3.5 - Quadro de classificação quanto à categoria de risco em função do estado de conservação (EC).

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e Recalques (f)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (g)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)

Plano de Segurança da barragem (PS):

- h) existência de documentação de projeto;
- i) estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem;
- j) manuais de procedimentos para inspeções de segurança e de monitoramento;
- k) Plano de Ação Emergencial (PAE) - quando exigido pelo órgão fiscalizador e;
- l) relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação.

Tabela 3.6 - Quadro de classificação quanto à categoria de risco em função do plano de segurança das barragens (PS).

Documentação de Projeto (h)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (i)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (j)	Plano de Ação Emergencial - PAE (k)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (l)
Projeto executivo e como construído (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança (0)
Projeto executivo ou como construído (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)
Projeto básico (5)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto conceitual (8)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)
Não há documentação de projeto (10)	-	-	-	Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Análise de Segurança (8)

Assim, a pontuação total para definição da faixa de classificação (Tabela 3.7) e categoria de risco (CRI), será dada pelo somatório dos critérios gerais (Equação 3.1):

$$\text{Pontuação total (CRI)} = \text{CT} + \text{EC} + \text{PS} \quad (3.1)$$

Tabela 3.7 - Quadro para classificação de barragens, em função da categoria de risco (CRI), para disposição de resíduos e rejeitos.

	<b>CATEGORIA DE RISCO</b>	<b>CRI</b>
<b>FAIXA DE CLASSIFICAÇÃO</b>	ALTO	$\geq 60$ ou $EC^*=10$ (*)
	MÉDIO	35 a 60
	BAIXO	$\leq 35$

(\*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente categoria de risco ALTO e necessidade de providências imediatas pelo responsável da barragem.

Quanto ao dano potencial associado (DPA), os critérios à serem utilizados para classificação, levam em consideração aspectos melhores descritos na Tabela 3.8, tais como:

- a) o volume dos rejeitos ou resíduos armazenados;
- b) a existência de população à jusante, com potencial de perda de vidas humanas;
- c) impactos ambientais (por exemplo, áreas de proteção definidas em legislação) e;
- d) impactos socioeconômicos (unidades habitacionais, infraestrutura e/ou serviços).

Tabela 3.8 - Quadro de classificação quanto ao dano potencial associado (DPA).

Volume total do reservatório (a)	Existência de população à jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto socioeconômico (d)
Muito pequeno ≤ 500 mil m <sup>3</sup> (1)	Inexistente (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área a jusante da barragem) (0)	Insignificante (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	Inexistente (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões de m <sup>3</sup> (2)	Pouco frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	Pouco significativo (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APP's, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	Baixo (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões de m <sup>3</sup> (3)	Frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	Significativo (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APP's, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	Médio (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões de m <sup>3</sup> (4)	Existente (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	Muito significativo (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) (8)	Alto (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito Grande ≥ 50 milhões de m <sup>3</sup> (5)	-	Muito significativo agravado (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I-Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) (10)	-

Assim, a pontuação total dos critérios gerais do dano potencial associado (DPA), será classificado conforme Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Quadro para classificação de barragens, em função do dano potencial associado (DPA), para disposição de resíduos e rejeitos.

FAIXA DE CLASSIFICAÇÃO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
		ALTO
	MÉDIO	$7 < \text{DPA} < 13$
	BAIXO	$\leq 7$

O Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM (2005), por meio da Deliberação Normativa nº 87, de 17 de junho de 2005, que altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17/12/2002, e dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais, determina critérios para definição do porte da barragem. Nesta análise, são utilizados os seguintes parâmetros de avaliação do potencial de dano ambiental:

- ✓ a altura do maciço;
- ✓ o volume do reservatório;
- ✓ a existência de ocupação humana a jusante da barragem;
- ✓ o interesse ambiental na área a jusante da barragem e;
- ✓ as instalações na área a jusante da barragem.

Ainda segundo essa deliberação, após o somatório dos valores (V) atribuídos a cada parâmetro de classificação apresentado na Tabela 3.10, as barragens serão classificadas em três categorias:

Tabela 3.10 - Critérios para classificação das barragens.

Altura da barragem H (m)	Volume do reservatório ( $\times 10^6 \text{ m}^3$ )	Ocupação humana a jusante	Interesse ambiental a jusante	Instalações na área de jusante
$H < 15$ V= 0	$V_r < 0,5$ V= 0	Inexistente V= 0	Pouco significativo V= 0	Inexistente V= 0
$15 \leq H \leq 30$ V= 1	$0,5 \leq V_r \leq 5$ V= 1	Eventual V= 2	Significativo V= 1	Baixa concentração V= 1
$H > 30$ V= 2	$V_r > 5$ V= 2	Existente V= 3	Elevado V= 3	Alta concentração V= 2
-	-	Grande V= 4	-	-

✓ baixo potencial de dano ambiental – Classe I: quando o somatório dos valores (V) dos parâmetros for menor ou igual a 2;

✓ médio potencial de dano ambiental – Classe II: quando o somatório dos valores (V) dos parâmetros for maior que 2 e menor ou igual a 5 e;

✓ alto potencial de dano ambiental – Classe III: quando o somatório dos valores (V) dos parâmetros for maior que 5.

Entre outros aspectos, nesse trabalho também serão debatidas as formas mais comuns, e suas respectivas particularidades, de acidentes originados em barragens de todo o mundo, conforme registros de eventos já ocorridos.

### **3.6. SENSORIAMENTO REMOTO (SR)**

O Relatório de Desastres Mundiais (*World Disaster Report*) da *International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies* (IFRC), de 2011, mostra que tanto a intensidade como a frequência dos desastres naturais aumentaram significativamente nas últimas décadas. Nos anos de 2001 a 2010, por exemplo, foram registrados 4.022 desastres em todo mundo, eventos esses que somados resultaram na morte de mais de 1 milhão de pessoas.

Grande parte dessas mortes estão diretamente relacionadas às altas taxas de crescimento populacional e consequentes processos desordenados de ocupação e urbanização, principalmente, nas áreas consideradas de risco. Entretanto, outro importante percentual são de vítimas, que estão correlacionadas à rupturas de barragens de contenção, uma vez que estão associados à eventos abruptos e de ampla área de abrangência (IFRC, 2011).

Neste contexto, Vanacôr (2006, *apud* Silva, 2017) ressalta que o conhecimento prévio de feições associadas à escorregamentos de massa e respectivas cicatrizes auxiliam nas análises de imagens obtidas por meio de SR. No caso deste trabalho especificamente, a visualização, por exemplo, das principais estruturas de uma barragem poderá permitir a identificação de áreas de potencial perigo à uma determinada região. Vanacôr (2006),

destaca ainda em seu trabalho que:

- ✓ as cicatrizes são definidas pela remoção da cobertura vegetal e exposição de camadas superficiais do solo, com possibilidade de visualização do material transportado;

- ✓ a interpretação de feições é influenciada pelo contraste existente, resultante das diferenças espectrais ou espaciais, das cicatrizes e o seu entorno;

- ✓ quanto melhor a resolução espacial dessas imagens, mais fácil será o reconhecimento das feições de interesse;

- ✓ é de suma importância a alta repetição dos registros (de dias até semanas), antes e depois de uma determinada ocorrência, facilitando a identificação das modificações e;

- ✓ o Modelo Digital de Terreno (MDT) tem sido cada vez mais utilizado para análises visuais, especialmente, para estudos de topografia, geomorfologia e modelagem superficial.

Lopes (2009, *apud* Silva, 2017) menciona que o *Google Earth*, *software* da empresa Google LLC, de altíssima interatividade entre usuário e o globo terrestre, possui capacidade de capturar imagens de praticamente todos os pontos do planeta, por meio de sensores acoplados à satélites. Seu banco de dados dispõe de um conjunto de cenas oriundas desses sensores, os quais possuem diversas resoluções espaciais e espectrais, formando assim, uma única imagem da Terra.

Por meio dessas imagens é possível identificar, entre outros aspectos, aglomerações urbanas, municípios, aeroportos, rodovias, ferrovias, edificações, lugares e etc. (Figura 3.11). Por fim, essas imagens podem e, na maioria das vezes, são alteradas periodicamente, mantendo-se desta forma, o servidor sempre atualizado.



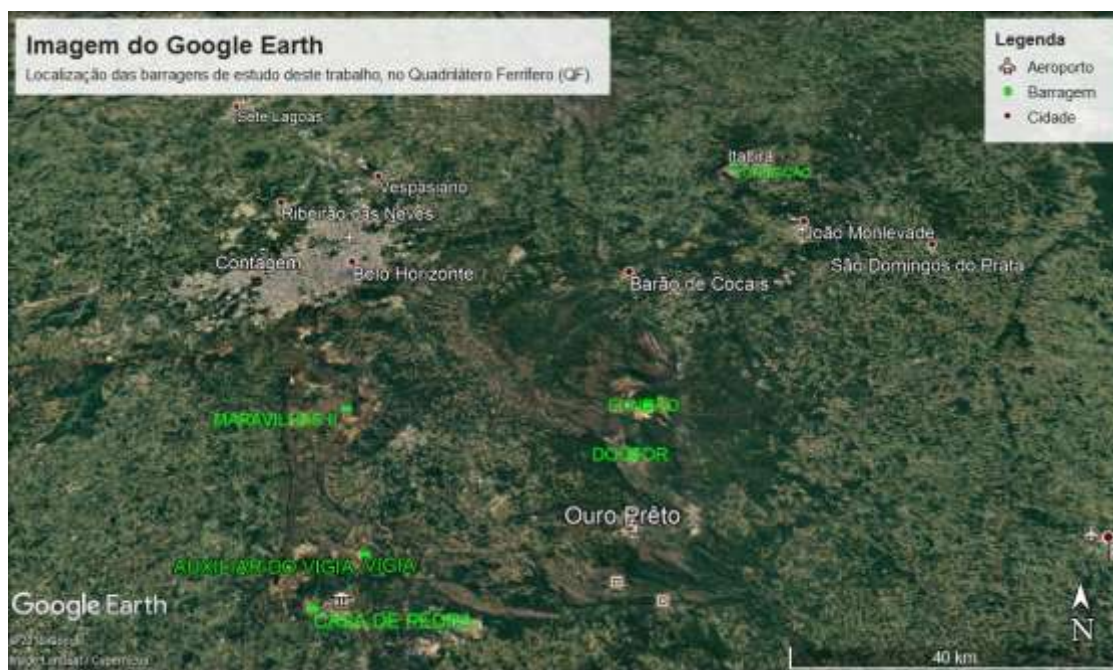


Figura 3.11 - Imagem do *Google Earth*. Acessado em 21 de março de 2018.

Neste contexto, a utilização do Sensoriamento Remoto (SR), e seu crescente número de sensores e plataformas, em conjunto às ferramentas de Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitem que alguns desastres possam ser mais facilmente mapeados ou até previstos. Por consequência, tornam-se também interessantes instrumentos na avaliação do perigo, principalmente, por suas vastas aplicabilidades.

### 3.6.1. Sistema de informação geográfica (SIG)

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é uma ferramenta que, entre outras tarefas, permite adquirir, armazenar, interpretar e transformar informações espaciais. Os dados existentes neste conjunto de *softwares* e *hardwares* mapeiam objetos reais conforme sua posição na Terra, em um sistema de coordenadas e dados cartográficos. Assim, um SIG pode ser aplicado tanto em estudos relativos ao meio ambiente como para recursos naturais, partindo-se do princípio que os dados armazenados representam um modelo palpável, isto é, real (Burrough, 1986).

Star e Estes (1990) definem um SIG como sendo um sistema de informação desenhado para trabalhar com dados referenciados mediante coordenadas geográficas. Neste caso,

a sua base de dados apresenta capacidades específicas de informações georreferenciadas e um conjunto de operações para que estes sejam trabalhados. Para Bernhardsen (1999), o termo SIG tem sido utilizado, genericamente, para sistemas computacionais com competência para manipular dados geográficos.

Olaya (2011) define em seu trabalho que a partir de um Sistema de Informação Geográfica é possível a realização de operações associadas à gestão de dados espaciais, entre elas, a sua leitura, o armazenamento e edição. Além desses, inclui-se também ações que viabilizem a tomada de decisão, seja por análise de dados ou geração de mapas e gráficos (bi e/ou tridimensionais).

A inclusão de novos dados na base cartográfica, associados ou não à novos fatores ou atributos de fatores pré-existent, provoca a necessidade de uma retroalimentação dinâmica, a qual será realizada durante o processo de análise. Esses procedimentos levam ao cruzamento, integração e tratamento dos dados, possibilitando, por exemplo, que fatores não mapeáveis em campo possam ser devidamente representados nos mapas finais (Salamuni e Stellfeld, 2001).

Viviani e Manzato (2005) citam ser inevitáveis que, nos dias de hoje, os arquivos produzidos sejam armazenados em diferentes ambientes, principalmente pela quantidade de *softwares* existentes e pela grande propagação das técnicas de geoprocessamento. Entretanto, apesar de cada uma dessas plataformas apresentarem ferramentas e potenciais específicos, as arquiteturas de dados espaciais digitais (modelos de representação) mais utilizadas ainda são a vetorial e a matricial (*raster*). As imagens vetorizadas são ocupadas por entidades (pontos, linhas e polígonos - respectivamente 1, 2 e 3 pares de coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) descritas segundo uma coordenada geométrica. Já as imagens do tipo *raster* são células (*pixels*) constituídas por números que representam, cada um deles, também uma entidade (Figuras 3.12, 3.13 e 3.14).

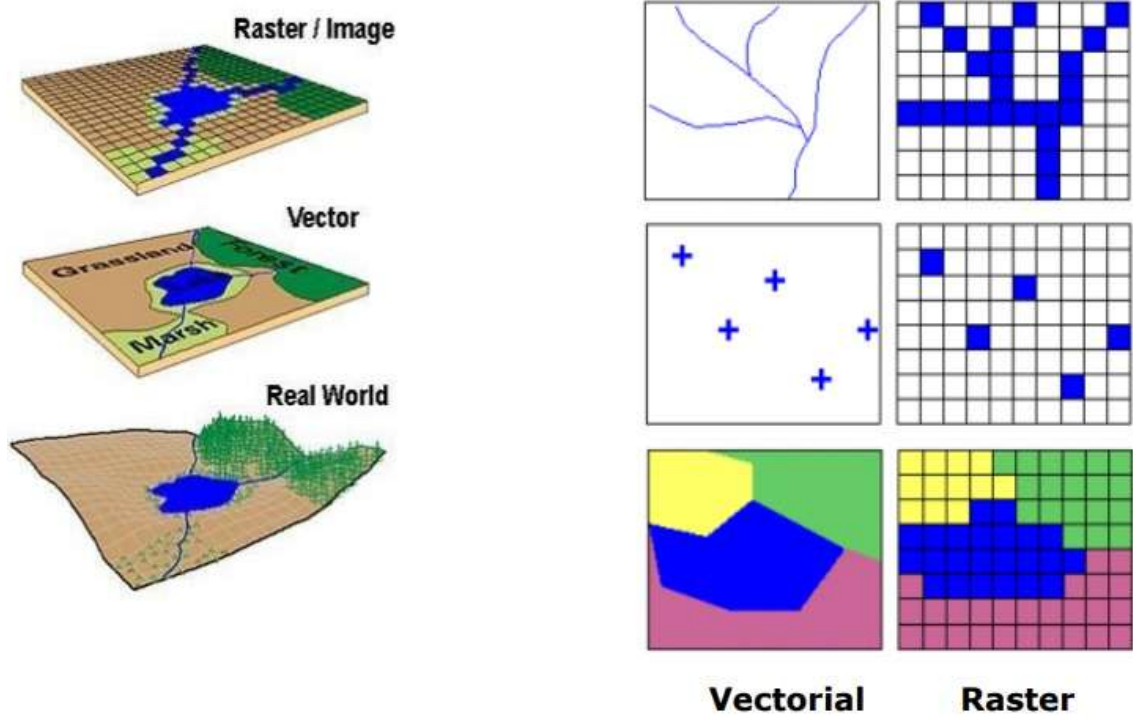


Figura 3.12 - O mundo real, segundo as representações vetorial e *raster*.

O SIG tem sido utilizado em inúmeras áreas de atuação, especialmente por possibilitar a geração de novos dados a partir de informações isoladas (gráficos e alfanuméricos), aperfeiçoando-se cada vez mais todas as variáveis de análise. Nas empresas, em geral, ele está associado aos trabalhos de planejamento das atividades e gerenciamento de dados, apoiando todo o processo de tomada de decisão, principalmente nas áreas de estrutura (Viviani e Manzato, *op. cit.*).

Entre outras ferramentas, inclui-se algumas necessárias para verificar e examinar os dados, apresentado-os em mapas de excelente qualidade. Ele é utilizado, principalmente, por profissionais de várias áreas, sejam eles do planejamento e ordenamento de território e cadastro, dos serviços de urgência, de estudos demográficos, de energia e/ou recursos hídricos e etc.

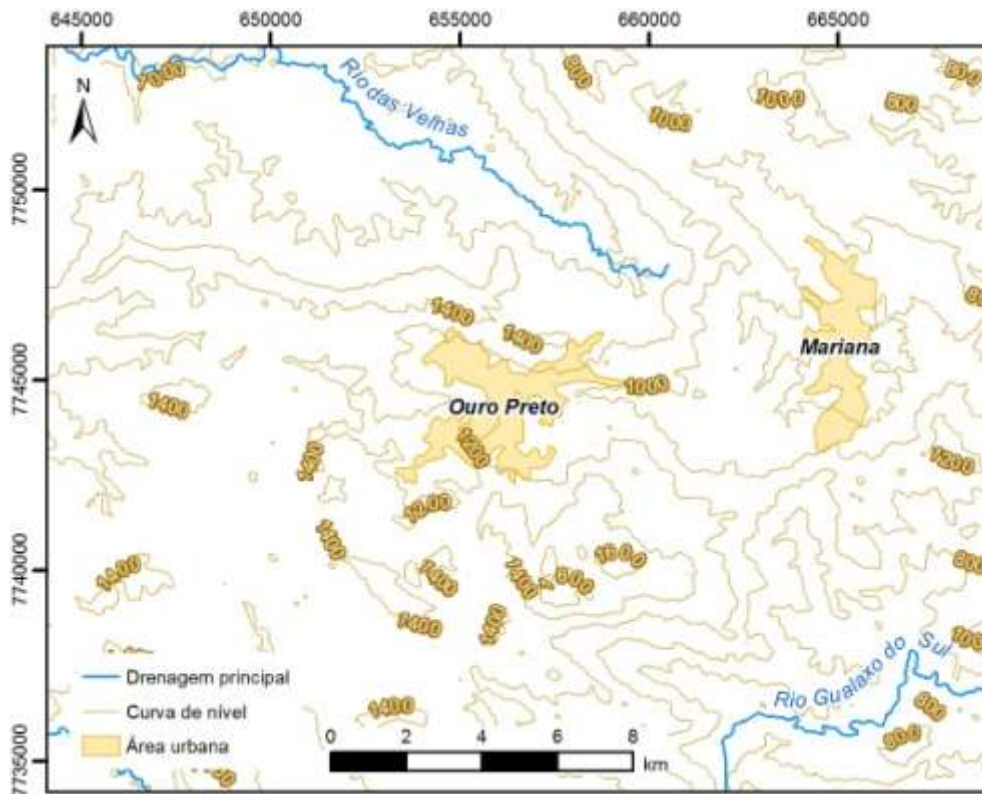


Figura 3.13 - Imagem vetorial elaborada no ArcGIS: curvas de nível da região do QF.

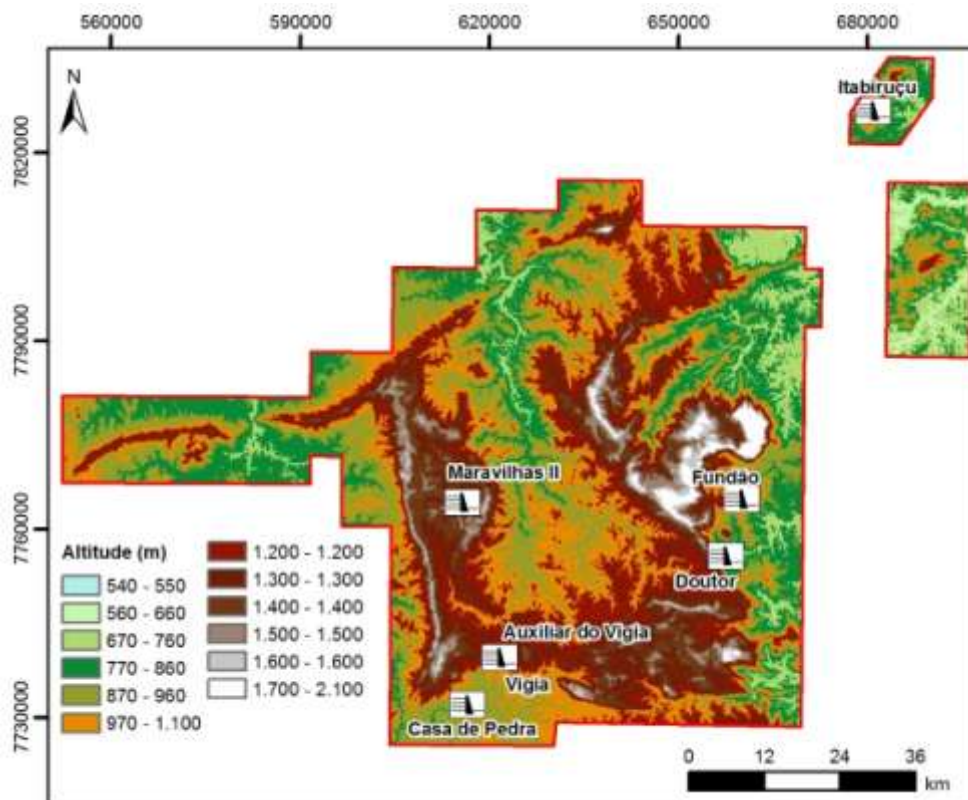


Figura 3.14 - Imagem raster elaborada no ArcGIS: mapa de altitude da região do QF.

# CAPÍTULO 4

---

## 4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi desenvolvido na região do Quadrilátero Ferrífero (QF), especificamente em Minas Gerais (MG), devido à sua importância na produção de minério de ferro. A área de aplicação do estudo localiza-se nas duas principais bacias do QF, a do rio Doce e a do rio São Francisco, e suas respectivas sub-bacias.

Na Figura 4.1, por meio de uma imagem de satélite (*Google Earth*), são apresentados o limite do QF, os principais municípios, as rodovias federais e estaduais que compreendem a região no estado de Minas Gerais.



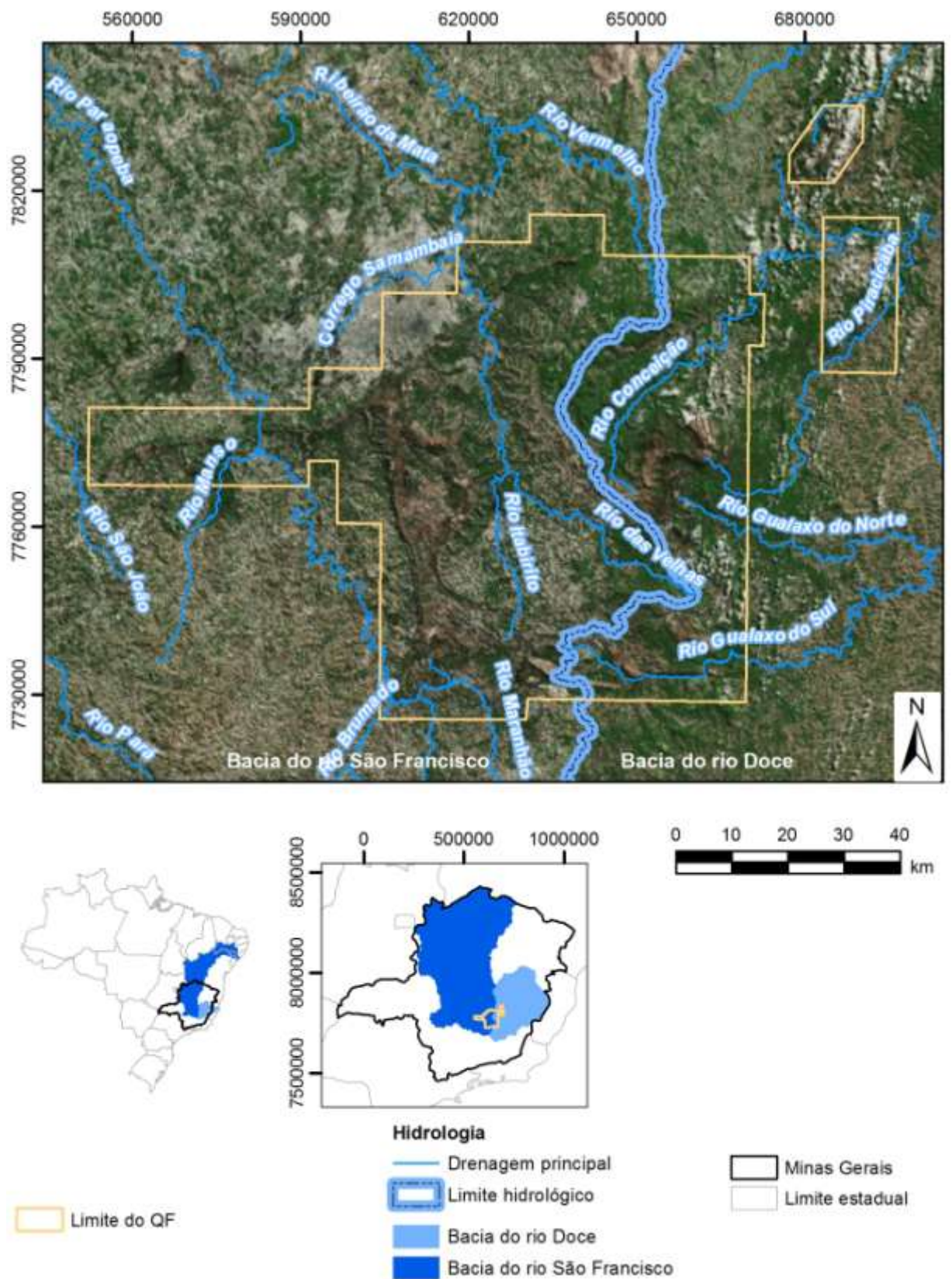


Figura 4.1 - Bacias e principais sub-bacias hidrográficas do rio Doce e São Francisco, na região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

#### 4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

O Quadrilátero Ferrífero (QF), localizado na porção meridional do cráton São Francisco (Almeida 1977), conforme Figura 4.2, é compreendido por complexos gnáissicos, seqüências metavulcanossedimentares neoarqueanas, coberturas plataformais de idade paleoproterozoica, intrusões magmáticas e coberturas sedimentares fanerozoicas (Dorr II 1969, Renger *et al.* 1994, Machado *et al.* 1996, Alkmim e Marshak 1998, Almeida *et al.* 2005, Baltazar e Zucchetti 2007).

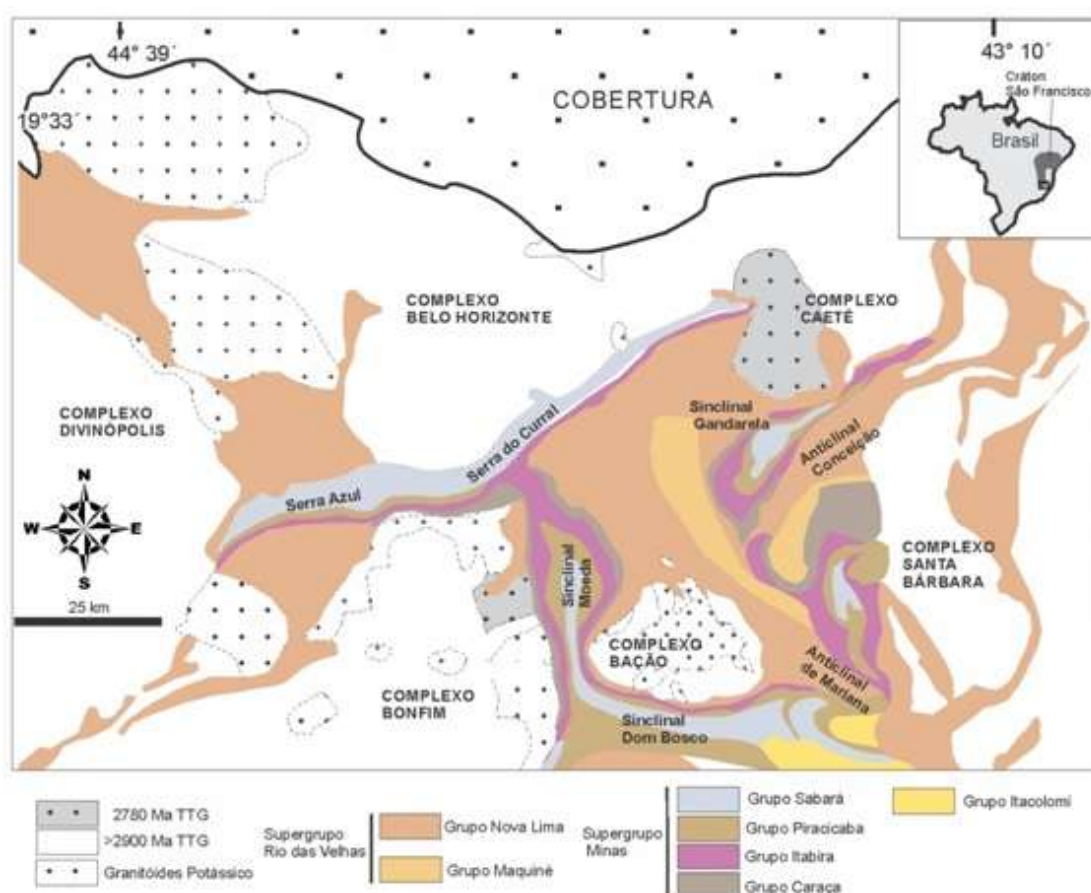


Figura 4.2 - Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero (Romano *et al.* 2013).

Estratigraficamente falando, os depósitos de ferro da região estão preferencialmente localizados no Supergrupo Minas, o qual foi depositado discordantemente sobre o Supergrupo Rio das Velhas. Este supergrupo, por sua vez, é subdividido, da base para o topo, nos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira (alvo de estudo), Piracicaba e Sabará, de acordo com a Figura 4.3 (Dorr II, 1969).



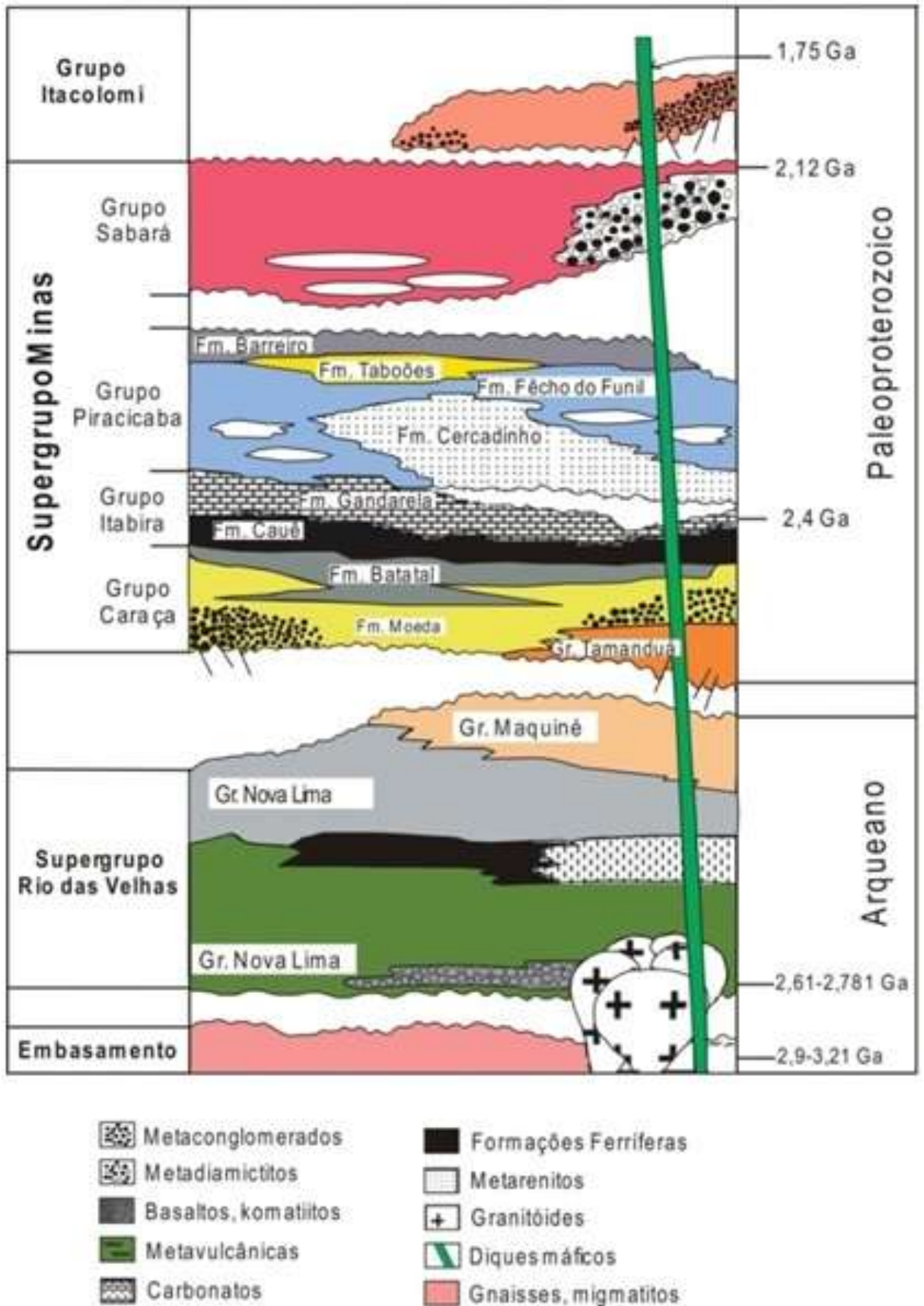


Figura 4.3 - Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Idades radiométricas são registradas à direita da coluna (Alkmim e Marshak, 1998).



Já o Grupo Itabira é definido por duas grandes formações. A primeira delas é a Formação (Fm.) Cauê, que registra a maior transgressão marinha do QF, responsável pela deposição de grandes quantidades de ferro. A segunda é a Fm. Gandarela que, por sua vez, apresentam rochas essencialmente carbonáticas (Dorr II 1969, Babinski *et al.* 1995).

Para Dorr II (1969), a Fm. Cauê, responsável pelas formações ferríferas bandadas, é constituída de rochas como itabiritos, itabiritos dolomíticos e anfibolíticos, com lentes de margas, xistos e filito, além da predominância de minerais como hematita e quartzo. Estes litotipos apresentam cores cinza prateado e marrom a ocre (itabirito anfibiólítico) e, em função do seu grau metamórfico, estão normalmente alteradas e intensamente fraturadas. O autor cita ainda que os bandamentos da formação são os mais espessos do Supergrupo Minas, possuindo tamanhos variando entre 200 e 400m para zonas mais estáveis, os quais podem elevar-se para 1.000m em áreas mais tectonicamente instáveis.

Diferentemente dos tempos atuais, em função das atividades vulcânicas submarinas e/ou ação de fontes hidrotermais, dissolvia-se no mar, ferro em abundância. A grande dúvida pairava na forma como esse elemento se precipitava no fundo do oceano, uma vez que não era perceptível a presença de oxigênio na sua forma livre (Almeida, 2015).

De acordo com a teoria mais aceita, a comprovação da existência de vida bacteriana (antes das FFBS), confirma a hipótese da ocorrência de um processo físico-químico, por ação de microrganismos autotróficos, conhecido como fotossíntese. Essa atividade fotossintética provocou a proliferação das cianobactérias e o aumento de oxigênio no meio marinho, o que fez com que o ferro dissolvido na água, conseqüentemente, se precipitasse sob uma forma oxidada. A esses bandamentos ferrosos avermelhados dá-se o nome de formações ferríferas bandadas. Já as camadas *cherts* ou, bandas claras, depositar-se-iam em épocas de menor atividade vulcânica (ou com menor disponibilidade de ferro), durante vários ciclos de deposição (Eriksson 1983, Beukes 1984).

Segundo os dados disponíveis no Banco de Declarações Ambientais (BDA) da Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM), de fevereiro de 2013, o estado de

Minas Gerais possui 728 barragens cadastradas em seu sistema, todas elas voltadas à mineração, atividade industrial ou destilaria de álcool. Entre as barragens idealizadas para a contenção de resíduos da mineração, isto é, aproximadamente 450 estruturas, destacam-se os principais minérios: ferro, ouro, bauxita, apatita, fosfato e zinco.

# CAPÍTULO 5

---

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

Como abordado nos Capítulos 3 e 4 e, apesar de se tratar de um ramo de estudo ainda recente da geotecnia, a avaliação do perigo em barragens de rejeito e atividades minerárias tem atraído cada vez mais a atenção de empreendedores, órgãos responsáveis do governo e, principalmente, da população diretamente envolvida. A fim de se alcançar o objetivo geral desse trabalho, o presente capítulo abordará as 3 etapas principais para o desenvolvimento da metodologia proposta, as quais incluem: compilação de dados e escolha dos parâmetros de análise, dinâmica *brainstorming* e a aplicação do índice de perigo (iP).

Neste trabalho será adotado como *software* padrão, o *ArcGIS* - versão 10.6, um dos SIG's mais utilizados e que foi criado pela empresa *Environmental Systems Research Institute* (ESRI) para efetuar vários tipos de análises em ambiente georreferenciado. Para as imagens geradas e abordadas nesse estudo, será utilizado o sistema de coordenadas projetadas Universal Transverso de Mercator (UTM) South America 1969, fuso 23S. Ressalta-se também que o programa possui uma das interfaces gráficas mais fáceis de se utilizar, além de suportar dados espaciais e tabulares, que facilitam as visualizações de gráficos, mapas e tabelas.

### 5.1. 1ª ETAPA: COMPILAÇÃO DE DADOS

Como citado anteriormente, a primeira etapa para o desenvolvimento desse estudo, intitulada "Compilação de dados", ocorreu por meio de um extenso banco de dados do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do estado de Minas Gerais (SISEMA). Este órgão é formado pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), pelos conselhos estaduais de Política Ambiental (COPAM) e de Recursos Hídricos (CERH) e por outros órgãos vinculados,

entre eles, a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), responsável pela qualidade ambiental no Estado.

Entre as ferramentas e acessos disponibilizados pelo convênio entre NUGEO/UFOP e a FEAM, incluí-se o Banco de Declarações Ambientais (BDA), muito utilizado para gestão dos registros de áreas contaminadas ou com suspeitas de contaminação, em Minas Gerais (MG). Entre outras tarefas, o BDA permite também o acompanhamento de informações e documentos referente às barragens devidamente cadastradas. Ressalta-se que até o momento de escrita do trabalho, o sistema apresentava dados relativos ao ano de 2017.

Após algumas visitas à sede da FEAM, localizada na Cidade Administrativa de Minas Gerais, e a liberação para acesso ao BDA, foram selecionadas as seguintes barragens para análise: Casa de Pedra, Doutor, Fundão, Itabiruçu, Maravilhas II, Vigia e Auxiliar do Vigia. Para essa seleção foram levados em consideração, além de outros fatores:

- ✓ a localização do empreendimento, dentro do Quadrilátero Ferrífero (QF);
- ✓ a proximidade ao município de Ouro Preto (MG) e ao NUGEO;
- ✓ o tipo de material barrado;
- ✓ a bacia hidrográfica a qual a barragem está inserida e;
- ✓ a classificação em função do risco associado, tanto para o COPAM bem como para o DNPM.

Em seguida, após um criterioso processo de avaliação e triagem de dados, foram levantados 13 parâmetros de análise, os quais irão exercer papel fundamental no julgamento do índice de perigo de cada uma das barragens (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Seleção e origem dos parâmetros selecionados para avaliação do perigo das barragens estudadas.

	PARÂMETRO	FONTE	OBSERVAÇÃO
1	Altura	CNRH (2012) Resolução Nº 143 de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos	Parâmetro para avaliação da diferença entre a elevação do ponto mais alto (crista) e o ponto mais baixo (profundo) da fundação da barragem de rejeitos.
2	Coroamento (extensão longitudinal da crista)		Parâmetro para avaliação do comprimento da superfície que delimita superiormente (dique vertedor) o corpo da barragem de rejeitos.
3	Impacto ambiental		Parâmetro para avaliação do dano associado à área afetada a jusante de uma barragem, em função da periculosidade do rejeito armazenado (classe).
4	Impacto socioeconômico		Parâmetro para avaliação da existência e concentração de instalações na área afetada a jusante da barragem de rejeitos.
5	Existência de população		Parâmetro para avaliação da existência (permanente ou temporária) ou não de vidas humanas a jusante da barragem de rejeitos
6	Volume	MIN (2002) Ministério da Integração Nacional	Parâmetro para avaliação da capacidade de armazenamento do reservatório ou barragem de rejeitos.
7	Tempo de recorrência		Parâmetro para avaliação do período calculado para ocorrências de igual magnitude de um fenômeno natural (chuvas, por exemplo) na barragem de rejeitos. Geralmente, esse período (tempo de retorno ou vazão de projeto) é estimado pelo inverso da probabilidade de ocorrência do fenômeno.
8	Idade		Parâmetro para avaliação do tempo (em anos) de operação da barragem de rejeitos
9	Material de construção		Parâmetro para avaliação do tipo de material empregado para construção da barragem de rejeitos.
10	Método construtivo	Do autor	Parâmetro para avaliação do tipo de construção ou de alteamento empregado na barragem de rejeitos.
11	Distância ocupação urbana		Parâmetro para avaliação da menor distância (em linha reta) da ocupação urbana mais próxima a jusante da barragem de rejeitos.
12	Instrumentação		Parâmetro para avaliação da existência (ou não) e dos tipos de instrumentação geotécnica na barragem de rejeitos.
13	Localização hidrográfica (Figura 5.1)		Parâmetro para avaliação da localização da barragem de rejeitos na bacia e respectiva sub-bacia hidrográfica.

Nesse levantamento, o qual será melhor julgado por especialistas da área na próxima etapa dessa metodologia, foram considerados os parâmetros e também os respectivos atributos que poderão influenciar, direta ou indiretamente, no comportamento e na segurança de uma determinada estrutura (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 - Seleção dos 13 parâmetros e respectivos atributos de análise do perigo das barragens estudadas (continua).

	PARÂMETRO DE ANÁLISE	ATRIBUTO
1	Altura	Altura $\leq$ 15m
		15m < altura < 30m
		30m $\leq$ altura $\leq$ 60m
		altura > 60m
2	Extensão longitudinal do coroamento (crista)	comprimento $\leq$ 50m
		50m < comprimento < 200m
		200m $\leq$ comprimento $\leq$ 600m
		comprimento > 600m
3	Impacto ambiental	Pouco significativo (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APP's, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT)
		Significativo (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APP's, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT)
		Muito significativo (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT)
		Muito significativo agravado (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I- Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT)
4	Impacto socioeconômico	Inexistente (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem)
		Baixo (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem)
		Médio (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem)
		Alto (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem)
5	Existência de população à jusante	Inexistente (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área a jusante da barragem)
		Pouco frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local)
		Frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas)
		Existente (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)
6	Volume	Pequeno: 500.000m <sup>3</sup> < volume $\leq$ 5.000.000m <sup>3</sup>
		Médio: 5.000.000m <sup>3</sup> < volume $\leq$ 25.000.000m <sup>3</sup>
		Grande: 25.000.000m <sup>3</sup> < volume $\leq$ 50.000.000m <sup>3</sup>
		Muito grande: volume > 50.000.000m <sup>3</sup>

Tabela 5.2 - Seleção dos 13 parâmetros e respectivos atributos de análise do perigo das barragens estudadas (conclusão).

7	Tempo de recorrência ou Vazão de projeto (sistema extravasor)	Decamilenar ou CMP (Cheia Máxima Provável) - TR = 10.000 anos
		Milenar - TR = 1.000 anos
		TR = 500 anos
		TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável
8	Idade (Tempo de operação)	> 30 anos
		entre 10 e 30 anos
		entre 5 e 10 anos
		< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação
9	Tipo de barragem quanto ao material de construção	Concreto
		Alvenaria de pedra / Concreto rolado
		Terra e/ou enrocamento
		Terra
10	Método construtivo e/ou tipos de alteamentos	Linha de centro
		À jusante
		À montante
		2 ou mais processos diferentes
11	Distância (d) horizontal ou reduzida da ocupação urbana	$d > 5\text{km}$
		$1,5\text{km} < d \leq 5\text{km}$
		$0,5\text{km} < d \leq 1,5\text{km}$
		$d \leq 0,5\text{km}$
12	Instrumentação na barragem (tipos)	medidor de nível d'água, piezômetro, medidor de vazão, marco de superfície e batimetria
		medidor de nível d'água, piezômetro, medidor de vazão e marco de superfície
		medidor de nível d'água, piezômetro e medidor de vazão
		medidor de nível d'água e piezômetro
13	Localização na bacia hidrográfica (Figura 5.1)	A) Uma única barragem instalada sobre o córrego (ou ribeirão)
		B) Uma única barragem instalada sobre a drenagem principal da região
		C) Duas ou mais barragens instaladas sobre córregos (ou ribeirões) diferentes, porém na mesma bacia
		D) Duas ou mais barragens instaladas (em cascata) sobre o mesmo córrego (ou ribeirão) e mesma sub-bacia

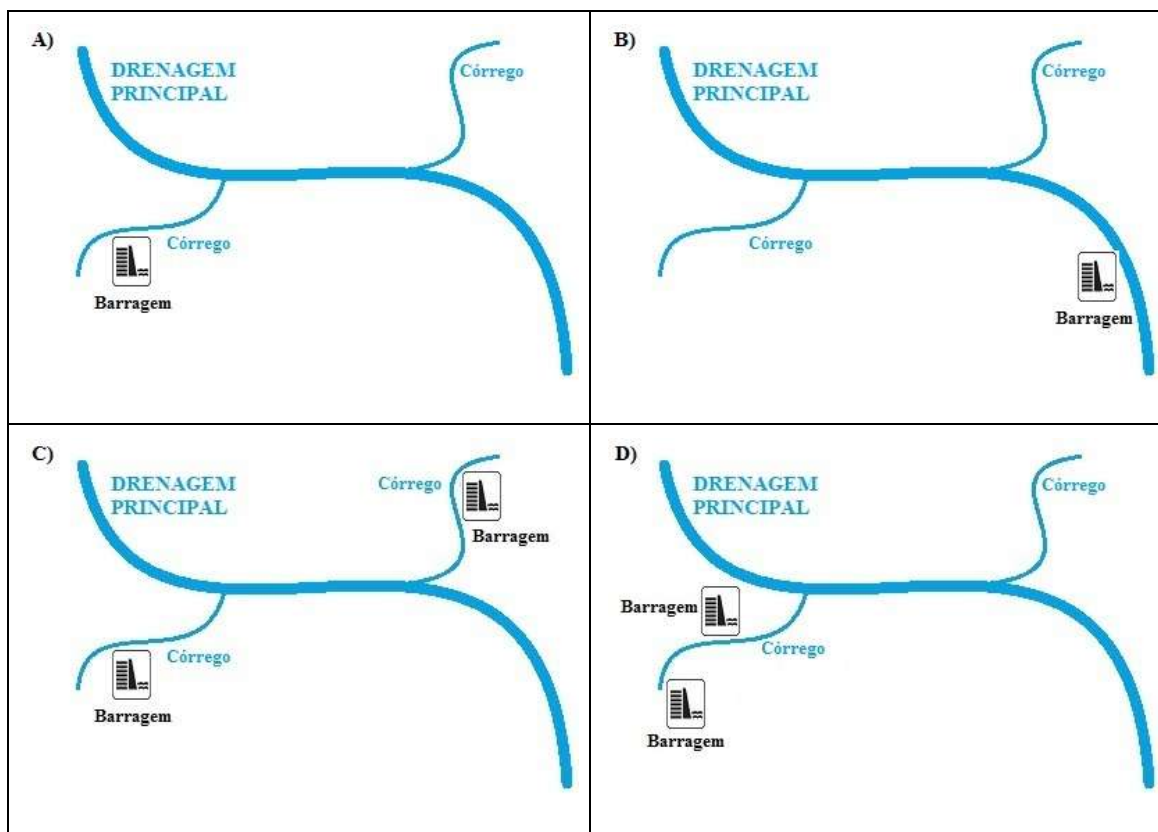


Figura 5.1 - Contexto para o parâmetro "Localização na bacia hidrográfica".

## 5.2. 2ª ETAPA: DINÂMICA *BRAINSTORMING*

Estabelecidos os parâmetros que serão utilizados nas avaliações, teve início a 2ª etapa da metodologia proposta, denominada *brainstorming* e caracterizada pelo debate de especialistas da área de geotecnia, especificamente, em barragens de rejeito e em mineração. Essa dinâmica teve como objetivo a valoração de pesos e a redução da subjetividade durante essa quantificação.

Oportunamente, ressalta-se que participaram dessa atividade os senhores Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira, engenheiro civil e docente da UFOP, Luciano Junqueira de Melo, engenheiro de minas e servidor da FEAM, Prof.ª Dr.ª Rosyelle Cristina Corteletti, geóloga e docente do NUGEO, além dos mestrandos em geotecnia, Géssica Borges de Carvalho, engenheira ambiental, Lucas Gomes de Almeida, engenheiro geólogo, e Thiago Eustáquio Tavares Magalhães, engenheiro civil.



Assim, a partir dos conceitos expostos e a necessidade de construção da hierarquia proposta, nessa etapa da pesquisa foram solicitados aos especialistas da área o preenchimento de um formulário (Anexo I). Esse documento é apresentado por meio de uma matriz quadrada comparativa [A] que tem como base a comparação dos pares de parâmetros de análise deste trabalho. As comparações representam, respectivamente, a relevância de um parâmetro da "Linha A" em relação ao parâmetro da "Coluna A", da chamada matriz de decisão.

Para valoração dos parâmetros citados na Tabela 5.1, neste estudo utilizou-se a Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty (1991). Essa escala apresenta a variação de intensidade 1 a 9, em que 1 que exprime a indiferença de importância de um parâmetro em relação ao outro e 9 revela a extrema importância de um parâmetro sobre outro. Entre as duas intensidades, estão os estágios intermediários de importância, sejam eles 2, 4, 6 e 8 (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 - Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty (1991).

<b>INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>	<b>EXPLICAÇÃO</b>
1	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6 e 8	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.
Recíprocos dos valores acima de zero	Se a atividade i recebe uma das designações diferentes acima de zero, quando comparada com a atividade j, então j tem o valor recíproco quando comparada com i.	Uma designação razoável.
Racionais	Razões resultantes da escala	Se a consistência tiver de ser forçada para obter valores numéricos n, somente para completar a matriz.

Assim, desconsiderando-se as comparações entre os próprios critérios, que nesse caso estarão identificados pela diagonal principal da matriz de decisão [A] e representarão importância 1, concluí-se que apenas metade das comparações precisam ser feitas, uma vez que a outra metade constitui-se das comparações recíprocas. Destaca-se também que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, por consequência, como o seu inverso, sempre menor do que 1.

O processo de atribuição de pesos consistiu em ordená-los segundo as preferências dos especialistas, as quais são emitidas em forma de juízo e, então, convertidas em valores numéricos. Nesse momento, identificou-se que os julgamentos dos parâmetros, por exemplo, se baseiam sumariamente na resposta do seguinte questionamento: "Tendo-se em vista o objetivo principal, qual desses dois parâmetros é mais importante e qual a sua intensidade em relação ao outro?". Evidencia-se que tal atividade foi aplicada tanto para a escolha dos parâmetros bem como para a seleção dos atributos.

### **5.3. 3ª ETAPA: APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE PERIGO (iP)**

Para fins de aperfeiçoamento das abordagens de avaliação do perigo, considera-se pertinente a utilização de técnicas que possam diminuir a subjetividade das análises em barragens de rejeito. Assim, a aplicação da metodologia de classificação de índice de perigo (iP), sua proposição e adaptação para o contexto em estudo, são partes da última etapa de organização desse trabalho.

O Processo de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*) é um dos métodos aplicáveis à hierarquização dos setores em risco e, no caso desse trabalho, à quantificação do índice de perigo (iP). A grande vantagem desse método é a possibilidade de se alternar entre etapas de cálculo e de diálogo, ou seja, pressupõe-se uma intervenção contínua e direta dos responsáveis, e não somente na definição do problema (Baasch, 1995). A esse processo dá-se o nome de conferência de decisões.

Basicamente, o método procura definir pesos aos fatores dos níveis mais baixos da

hierarquia que irão interferir no objetivo geral, como por exemplo, a influência do parâmetro "idade" no processo de estabilidade de uma barragem.

### **5.3.1. Aplicação da matriz hierárquica**

Em seguida ao preenchimento da matriz de comparações paritárias [A], ou matriz de decisão, foi necessário obter o vetor de pesos relativos ou autovetor ( $\vec{P}$ ) ou, também conhecido, vetor de prioridades da matriz. Esse vetor possui papel fundamental uma vez que fornecerá a prioridade de julgamento (em porcentagem), em termos de importância, dos ( $n$ ) parâmetros avaliados.

Como proposto por Saaty (2000, *apud* Pereira, 2010), para o cálculo do referido autovetor, nesse trabalho foi adotado o algoritmo aproximado de matrizes recíprocas e consistentes baseado na média aritmética dos valores normalizados. Portanto, primeiramente, dividiu-se cada julgamento pelo somatório dos termos de cada coluna em que o julgamento se encontra. A matriz resultante desse processo será denominada de matriz normalizada [A'].

Na sequência, realizou-se a soma dos valores de cada uma das linhas da matriz normalizada [A'], os quais foram divididos pelo número total de parâmetros ( $n$ ), para obtenção do autovetor ( $\vec{P}$ ) ou peso relativo.

### **5.3.2. Consistência da matriz**

A garantia de consistência de uma matriz, por exemplo, da matriz comparativa [A] desse trabalho, se desenvolve a partir de uma quantidade de dados e cálculos baseados na metodologia proposta por Saaty (1991). A partir do autovetor ( $\vec{P}$ ) obtido, verifica-se a taxa de consistência (IC), por meio do autovalor máximo ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) da matriz [A] de julgamentos.

Essa taxa é calculada pela multiplicação da matriz inicial  $[A]$  pelo autovetor peso ( $\vec{P}$ ), a qual resultou em um novo vetor ( $\overrightarrow{AP}$ ). A média aritmética desse novo vetor, por sua vez, foi dividido mais uma vez, pelo autovetor ( $\vec{P}$ ), conforme Equação 5.1:

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \text{m\acute{e}dia do vetor } \frac{\overrightarrow{AP}}{\vec{P}} \quad (5.1)$$

Em seguida, os valores do vetor ( $\overrightarrow{AP}$ ) deverão ser somados e divididos pelo número de parâmetros ( $n$ ) avaliados, obtendo-se dessa forma, o autovalor máximo ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) da matriz inicial  $[A]$ . Observa-se neste momento que, quanto mais próximo for autovalor máximo ( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) do número ( $n$ ) de componentes, mais consistente será o resultado.

Finalmente, a partir do parâmetro anterior e da Equação 5.2, é possível calcular o Índice de Consistência (IC) da matriz comparativa  $[A]$ , sendo ( $n$ ) o número de parâmetros ou a ordem da matriz quadrada:

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (5.2)$$

Sendo:

$n$  - números de parâmetros em análise;

( $\lambda_{m\acute{a}x}$ ) - autovalor máximo da matriz  $[A]$ .

Nesse caso, conforme proposto por Saaty (1991), considera-se que os julgamentos com índice de consistência (IC) menor que 10% como aceitáveis e, por isso, indica-se o prosseguimento dos cálculos da metodologia de estudo. Já para os índices maiores do que 10%, recomenda-se a reavaliação dos parâmetros e os seus respectivos julgamentos (atribuição de pesos), até que a consistência diminua e atinja um nível favorável.

Para garantia da consistência de uma matriz, ressalta-se também que o valor de  $\lambda_{m\acute{a}x}$  deverá ser sempre maior que o número ( $n$ ) de parâmetros em análise e que quanto mais próximo de ( $n$ ), maior a consistência da matriz comparativa.

Oportunamente, Saaty (1991) cita ainda um outro recurso para avaliação de consistência das matrizes de julgamento, também conhecido como Quociente de Consistência (QC) ou Razão de Consistência, que pode ser calculado pela Equação 5.3:

$$QC = \frac{IC}{ICA} \quad (5.3)$$

Sendo:

*IC* - Índice de Consistência;

*ICA* - Índice de Consistência Aleatória.

Essa propriedade relaciona o Índice de Consistência (IC), obtido anteriormente, à um Índice de Consistência Aleatória (ICA). O último, trata de um número adimensional randômico, o qual foi calculado por meio de médias obtidas em testes laboratoriais (Tabela 5.4) e utilizado em função da ordem da matriz quadrada (ou número *n* de parâmetros) em estudo.

Tabela 5.4 - Índice randômico médio do AHP. Fonte: Saaty (1991).

Ordem ( <i>n</i> )	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ICA	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Como regra geral, também adota-se valores de Quociente de Consistência (QC) igual ou menores que 10% como aceitáveis, enquanto que, para valores maiores que 10%, recomenda-se revisões nas análises iniciais em busca de menores inconsistências.

Destaca-se que as fases 1 e 2 dessa 3ª etapa, caracterizadas pela aplicação da matriz hierárquica e verificação de consistências das respectivas matrizes, foram aplicadas da forma semelhante na avaliação dos parâmetros e também dos seus respectivos atributos.

### 5.3.3. Classificação do índice de perigo (iP)

Para quantificação do índice de perigo (iP) do conjunto de barragens selecionadas, foram utilizados os pesos, em porcentagem, obtidos por meio do autovetor ( $\vec{P}$ ), em função do peso ponderado de cada atributo analisado neste estudo, conforme a Equação 5.4. Finalmente, para que os resultados pudessem ser melhores distinguidos, neste trabalho optou-se para que fossem multiplicados por 100, uma vez que a técnica da AHP fornece valores em porcentagem:

$$iP = \sum_{i=1}^n (P_i \times At_i) \times 100 \quad (5.4)$$

Sendo:

$n$  - números de parâmetros em análise;

$P_i$  – peso do parâmetro de potencial em porcentagem para ocorrência de ruptura em barragens de rejeitos obtido por meio da AHP;

$At_i$  – peso da potencialidade do atributo para ocorrência de ruptura das barragens de rejeitos.

A partir dos resultados alcançados, teve início o processo de classificação desses índices. Essa divisão teve a finalidade de estabelecer graus distintos, de acordo com os valores obtidos para o índice de perigo (iP). Nesse trabalho foram adotados também os níveis de perigo baixo, médio e alto para o respectivo portfólio. Além disso, ressalta-se também que os critérios escolhidos para essa classificação não dizem respeito ao método AHP, mas sim uma forma de complementá-lo.

Em seguida, como posposto por Faria (2011), optou-se pelo método estatístico de fatiamento para a distinção entre os níveis supracitados, o qual possui como base o uso da média aritmética ( $\bar{X}$ ) diminuída ou somada da metade do desvio padrão. Assim, alcançada a média dos ( $n$ ) índices de perigo obtidos, outro parâmetro estabelecido foi o estimador do desvio padrão amostral ( $s$ ), o qual foi calculado por meio da Equação 5.5.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (iP_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (5.5)$$

Sendo:

$n$  - número de barragens de rejeitos avaliadas;

$iP_i$  -  $i$ -ésimo índice de perigo (iP);

$\bar{X}$  - média aritmética dos índices de perigos (iP) obtidos.

Cabe ressaltar que a Equação 5.6, é uma formulação que estatisticamente está no intervalo de confiança da média e se considerado a metade do desvio padrão, cada uma das áreas de cauda da curva de distribuição ficam próximas de 10%, condicionando o intervalo de confiança da média à 80% da amostra.

$$iP = \bar{X} \pm 1/2 s \quad (5.6)$$

Sendo:

$\bar{X}$  - média aritmética dos índices de perigo (iP) obtidos;

$s$  - desvio padrão dos índices de perigo (iP) obtidos.

Por fim, foi proposta a Tabela 5.5 com os critérios adotados para classificação dos índices de perigo (iP). Nessa classificação foram considerados os perigos alto (vermelho) e baixo (verde), respectivamente como a soma e a subtração da metade do desvio padrão ( $s$ ) em relação à média aritmética ( $\bar{X}$ ), enquanto que para os valores intermediários, adotou-se o grau de perigo como médio (amarelo).

Tabela 5.5 - Critérios adotados para a classificação do índice de perigo (iP).

Índice de Perigo	Grau de perigo
$iP < \bar{X} - 1/2 s$	Baixo
$\bar{X} - 1/2 s \leq iP \leq \bar{X} + 1/2 s$	Médio
$iP > \bar{X} + 1/2 s$	Alto

# CAPÍTULO 6

---

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados o processo de seleção das barragens, os resultados de todo processo da aplicação do método AHP e da classificação do índice de perigo (iP) das estruturas alvo da pesquisa. O desenvolvimento do trabalho passa pela análise dos resultados obtidos com o *brainstorming* e a relevância de cada um dos parâmetros avaliados, para que finalmente fosse possível hierarquizar o iP do conjunto das 6 barragens de rejeitos caracterizadas.

Os resultados obtidos nesse estudo terão papel fundamental na identificação e definição de potenciais áreas de rupturas. Ressalta-se também a possibilidade de sua utilização como ferramenta de prevenção, principalmente, no que diz respeito à população local e os órgãos competentes envolvidos.

### 6.1. SELEÇÃO DAS BARRAGENS

Após a identificação dos condicionantes geológicos e geomorfológicos, de papel fundamental e direta influência nas estruturas alvo de estudo desse trabalho, destaca-se a importância do levantamento de técnicas capazes para melhor avaliar o perigo e o risco envolvido.

Serão retratados aspectos relativos à estrutura, vias de acessos, geologia, características geomorfológicas e recursos hídricos das áreas das barragens em estudo, segundo os planos de controle e estudos de impacto ambiental (PCA e EIA) apresentados pelos empreendedores.

É válido destacar que essas informações foram obtidas e compiladas por intermédio do



Banco de Declarações Ambientais (BDA), do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA) do estado de Minas Gerais. Este órgão é composto pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), o Instituto Estadual de Florestas (IEF), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) e a Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM). Ressalta-se ainda a utilização do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM), isto é, um conjunto de procedimentos do SEMAD para localização e identificação dos processos de cada uma das barragens analisadas.

Na Figura 6.1, por meio de uma imagem de satélite (*Google Earth*), são apresentados o limite do QF, os principais municípios, as rodovias federais e estaduais que compreendem a região no estado de Minas Gerais e, finalmente, a localização das barragens que serão abordadas nesse trabalho.

Para escolha das unidades de análise foram selecionadas, além de suas respectivas sub-bacias, as duas principais bacias do QF: a do rio Doce e a do rio São Francisco. Em seguida, considerando-se a proximidade à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e por meio de uma triagem de parâmetros, foram separadas as seguintes barragens para análise: Itabiruçu, Doutor e Fundão (que será analisada anteriormente à ruptura de 2015), todas instaladas na bacia do rio Doce, e Casa de Pedra, Maravilhas II, Vigia e Auxiliar do Vigia, alusivas à bacia do rio São Francisco, conforme Figura 6.2.

Segundo a Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) nº 87 de 2005, todas as barragens são classificadas como Classe III (somatório de parâmetros maior que 5), entre outros fatores, devido às suas alturas e volumes, além da existência de ocupação humana, instalações e ao elevado interesse ambiental à jusante.

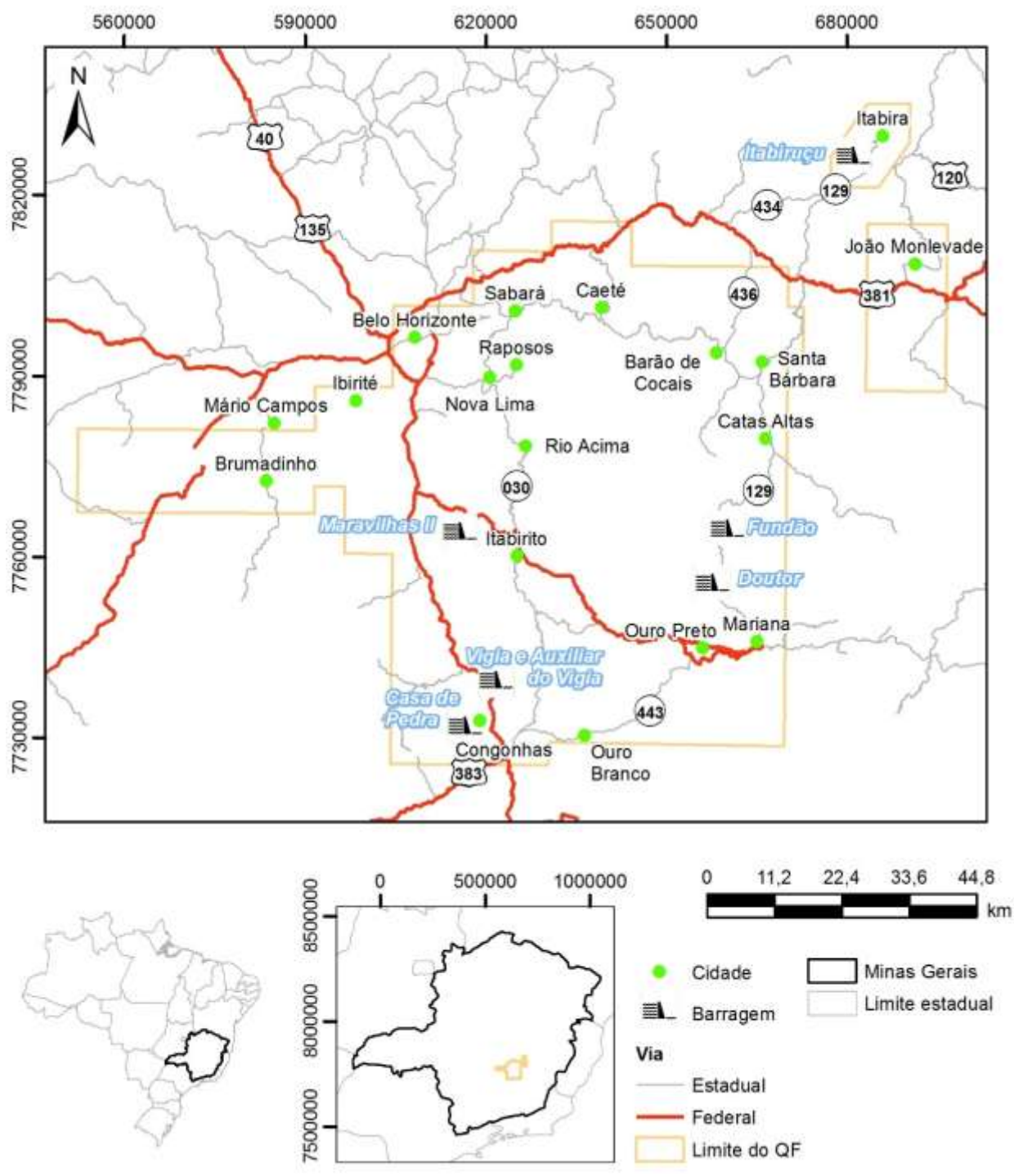


Figura 6.1 - Localização das barragens, principais municípios e rodovias no limite do Quadrilátero Ferrífero.

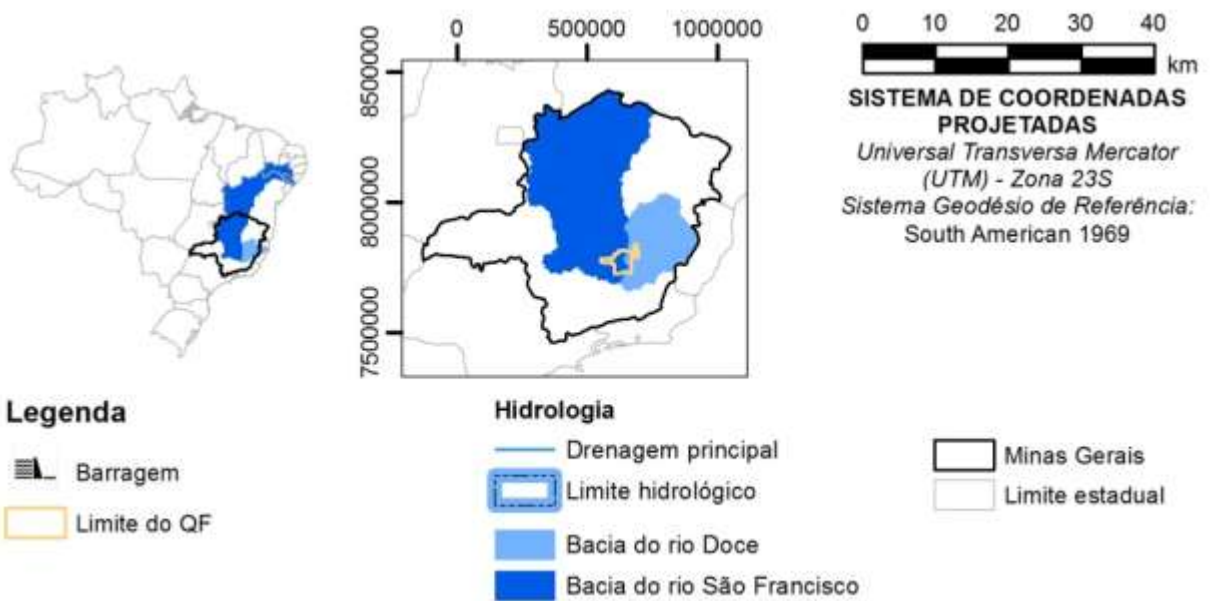


Figura 6.2 - Localização das barragens nas bacias e principais sub-bacias hidrográficas do rio Doce e São Francisco.

Já para a Diretoria de Fiscalização do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), por intermédio da Lei Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, e do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, que classifica as barragens de rejeitos quanto à categoria de risco (CRI) e ao dano potencial associado (DPA), em seu documento mais recente (dez/2016), todas as barragens foram classificadas como classe C, em uma escala entre A e E, de baixo risco e alto dano potencial associado.

Em atendimento ao preconizado nas normas brasileiras, é válido destacar também que todas as barragens são anualmente reavaliadas por uma equipe de auditoria que garante ou não as condições de segurança. Essas avaliações ocorrem por meio de inspeções, estudos de estabilidade e análises de documentos disponibilizados pelos empreendedores.

Nesse sentido, conforme dados disponíveis no BDA, até o ano de 2017, todas as barragens estudadas apresentavam tais declarações, além de prazos para cumprimento de recomendações dos auditores para que se mantivessem em situação de operação. Exceção à esse contexto, destaca-se a barragem de Fundão que alcançou sua última declaração de estabilidade no ano de 2015, antes do acidente.

### **6.1.1. Bacia do rio Doce**

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), responsável pela implementação da gestão dos recursos hídricos brasileiros, a bacia do rio Doce apresenta aproximadamente 853 km de extensão até a sua foz. Outro aspecto relevante diz respeito à sua área de drenagem, estimada em cerca de 83.400 km<sup>2</sup>, sendo que 86% de suas águas estão em Minas Gerais (MG) e 14% no Espírito Santo (ES). Enquanto suas nascentes estão localizadas, principalmente, junto às encostas das serras do Espinhaço e da Mantiqueira, a população de aproximadamente 3,5 milhões de habitantes está disposta em cerca de 230 municípios desses dois estados.

De acordo com os estudos e relatórios de impacto ambiental da empresa Vale S. A., após o acidente de 2015, em Mariana (MG), mais de 34 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos foram

lançados no rio Doce. Este evento desencadeou uma série de impactos ambientais, entre eles o comprometimento de mais de 600 km de cursos d'água e quase 1.600 ha de vegetação.

Seus afluentes principais, pela margem direita, são os rios Caratinga-Cuieté, Casca, Manhuaçu, Matipó e Piranga (no estado de Minas Gerais), Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce (no Espírito Santo). Já pela margem esquerda, os principais afluentes são os rios Carmo, Corrente Grande, Piracicaba, Suaçuí Grande e Santo Antônio (em Minas Gerais), Pancas e São José (no estado do Espírito Santo).

#### 6.1.1.1. Barragem Itabiruçu

A barragem Itabiruçu (Tabela 6.1), localizada no município de Itabira (MG) e operando desde 1981, o empreendimento da Vale S.A. dista de Ouro Preto cerca de 150 km. A melhor forma de acesso se dá por meio da rodovia federal, BR-356, até Mariana (MG) por cerca de 15 km e pela rodovia estadual, MG-129, por mais 80 km. Nesse trajeto, são percorridos municípios como Catas Altas, Santa Bárbara e Barão de Cocais. Em seguida, opta-se pela rodovia estadual, MG-436, em 50 km e, antes do trevo do município de Itabira (MG), acessa-se a estrada que leva à portaria da empresa depois de percorridos mais 5 km.

Tabela 6.1 - Compilação de dados da barragem Itabiruçu, segundo o BDA. Acessado em 2018.

EMPREENDEDOR	MUNICÍPIO	IDADE (anos)	PREVISÃO DE TÉRMINO
Vale S.A.	Itabira	37	2029
MATERIAL	MÉTODO CONSTRUTIVO	ALTURA (m)	COROAMENTO (m)
Terra	Jusante	71	810
VOLUME DO RESERVATÓRIO (m <sup>3</sup> )	VOLUME ATERRO (m <sup>3</sup> )	TEMPO DE RECORRÊNCIA (anos)	
130.900.000	5.700.000	10.000	
INSTRUMENTAÇÃO			
Marco de superfície, medidor de nível d'água, medidor de vazão e piezômetro			

Segundo dados do EIA, de novembro de 2017, regularizados no processo COPAM 119/1986/107/2013, e do mapeamento realizado pela empresa responsável em escala de 1:2.000, no distrito ferrífero de Itabira, dois grandes compartimentos geológicos distintos são identificados. O primeiro, representado pelas rochas supracrustais do grupo Nova Lima, do Supergrupo Rio das Velhas, e dos grupos Itabira e Piracicaba, pertencentes ao Supergrupo Minas. O segundo constituído pelas rochas do embasamento granito-gnáissico, que abrange a maior parte da área do município. A região é caracterizada ainda por um megasinclinal redobrado, o qual está inserido no fechamento do sinclinal de Itabira.

Em suma, os litotipos que compõem a geologia da área da barragem de Itabiruçu são rochas de idade Pré-cambriana, especificamente arqueanas e paleoproterozóicas, além dos diques de diabásio com provável idade mesozóica. As unidades litológicas mapeadas foram individualizadas segundo uma cronologia de estratificação, da mais antiga para a mais recente, o que possibilita definições tais como (Figura 6.3):

✓ Grupo Nova Lima: a unidade é formada por um conjunto metavulcano-sedimentar, onde xistos de origem sedimentar se intercalam com possíveis vulcânicas máfico-ultramáficas e *metacherts* sílicoferruginosos. Na área mapeada, as rochas incidem sempre nas bordas das litologias provenientes da Fm. Cauê, isto é, ocorrem como encaixantes do minério. Essas litologias se apresentam, normalmente, em forma de lentes, uma simetria provavelmente formada pela intensa deformação gerada durante o tectonismo de regime dúctil.

✓ Grupo Itabira: a unidade é composta por rochas da Fm. Cauê, as quais são constituídas, basicamente, por formações ferríferas bandadas ou não, respectivamente, itabiritos e hematitas, e ocorre na porção central e nordeste do sinclinal de Itabira.

✓ Grupo Piracicaba: a unidade é caracterizada por rochas da Fm. Cercadinho, estando os quartzitos e quartzitos ferruginosos, localmente manganésíferos, associados a quartzo-xistos, xistos carbonáticos e dolomitos. Ocorrem, principalmente, na porção norte e leste da área de estudo, no núcleo do sinclinal de Itabira e sobre as formações ferríferas.



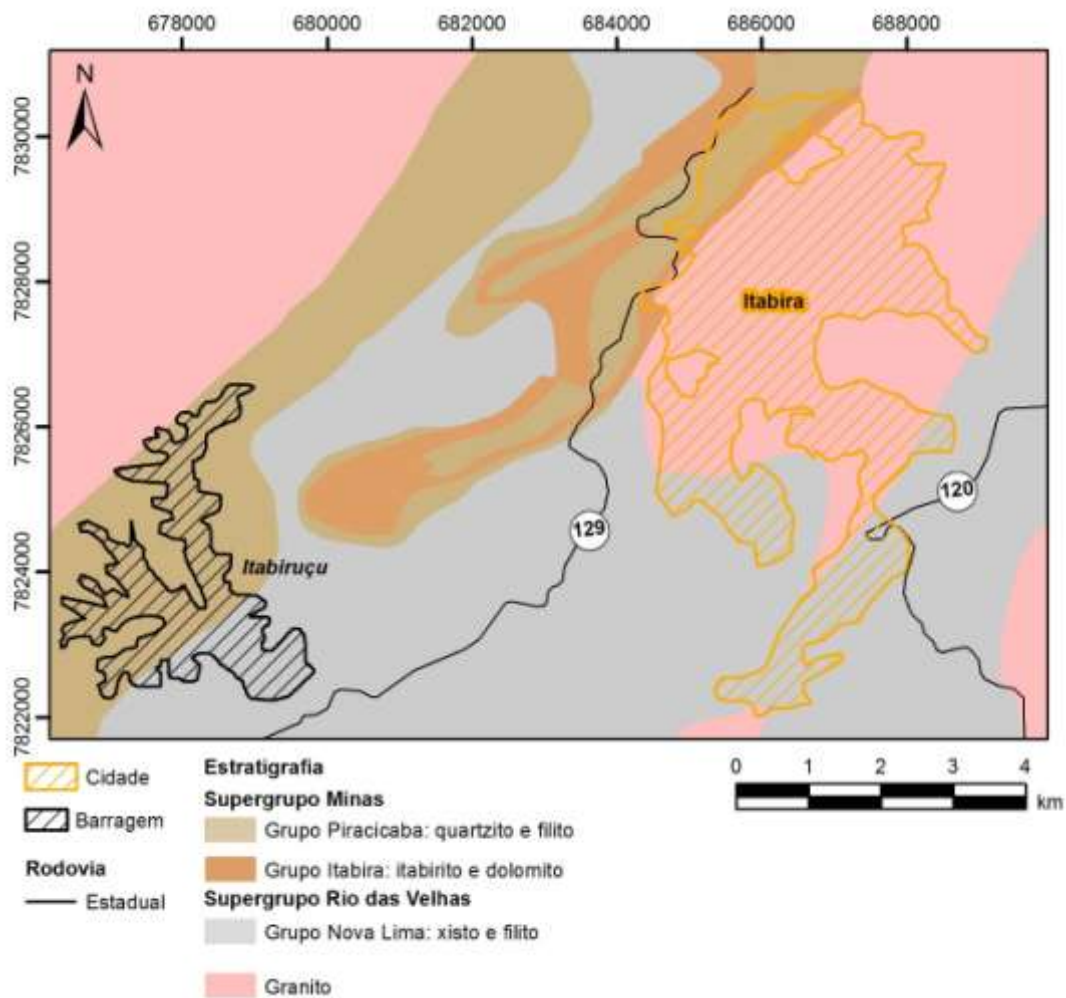


Figura 6.3 - Mapa geológico da região da barragem Itabiruçu, em Itabira (MG). Fonte: adaptado de Lobato *et al.* (2005).

A geomorfologia e o relevo da região configuram-se em cristas e escarpas, que se sobressaem as falhas geológicas, formando cumes com topografias elevadas (até cerca de 1.300 m), vales encaixados e ravinas, além de pequenos trechos de colinas.

O complexo minerador de Itabira está situado no médio rio Doce. Trata-se, neste caso, de um divisor de águas das sub-bacias do rio Santo Antônio, a norte, e do rio Piracicaba, a sul, as quais têm suas águas drenadas para duas microbacias distintas: rio do Peixe e ribeirão Girau (Jirão).

Finalmente, especificamente a barragem de Itabiruçu (Tabela 6.2), encontra-se no contexto da sub-bacia hidrográfica do rio do Peixe, afluente do rio Piracicaba, ambos

pertencentes à bacia hidrográfica do rio Doce (Figura 6.4). Entre as principais funções, cita-se: a contenção dos rejeitos gerados pelas usinas da Mina Conceição, acumulação e recirculação das águas liberadas pelos rejeitos e contenção de sedimentos oriundos das Pilhas de Itabiruçu, Maravilhas, Itabirito Duro e parte da Cava de Conceição.

Tabela 6.2 - Compilação de dados hidrográficos da barragem Itabiruçu, segundo o BDA. Acessado em 2018.

HIDROGRAFIA				
BACIA	SUB-BACIA	ÁGUA BARRADA	CURSO À JUSANTE	LOCALIZAÇÃO HIDROGRÁFICA
rio Piracicaba	rio do Peixe	córrego Itabiruçu	ribeirão do Peixe	C), conforme Figura 5.1
ÁREA DE JUSANTE				
OCUPAÇÃO HUMANA	INTERESSE AMBIENTAL	INSTALAÇÕES	CONCENTRAÇÃO DAS INSTALAÇÕES	DISTÂNCIA DO CENTRO URBANO
Passagem de pessoas ou veículos, local de permanência eventual, povoado ou Bairro	Área foi totalmente descaracterizada, curso d'água	Área de pastagem, barragem, estrada, residência, indústria	Alta	0,874km (Figura 6.5)

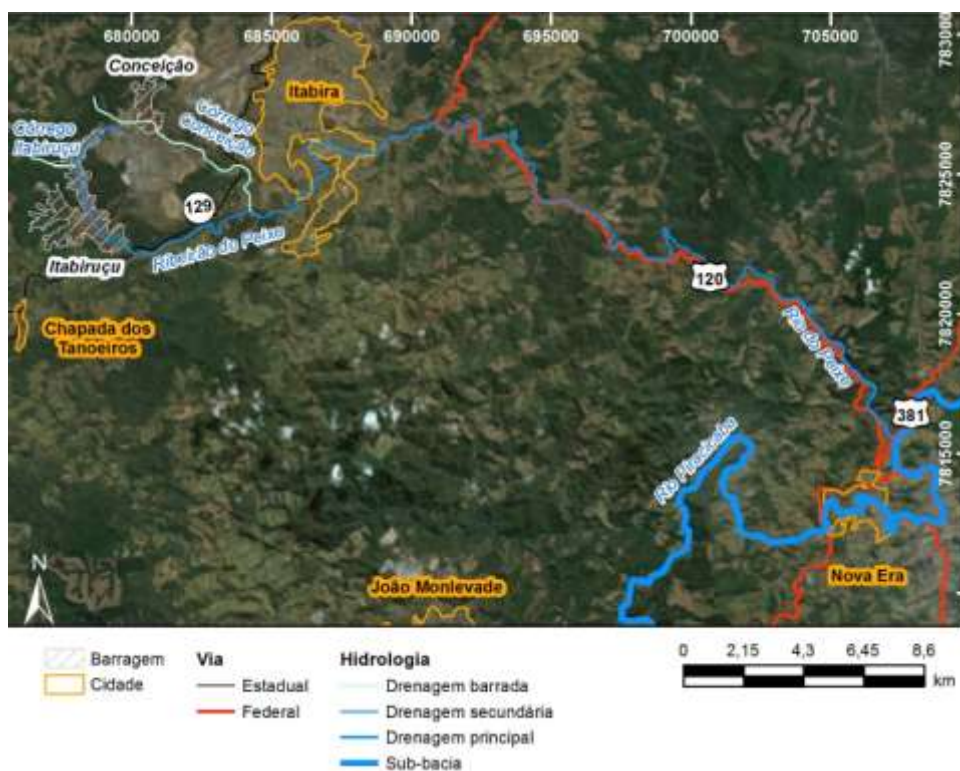


Figura 6.4 - Mapa hidrográfico da região de localização das barragens Itabiruçu e Conceição. Fonte: adaptado de Fuckner (2013).





Figura 6.5 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Itabiruçu.

### 6.1.1.2. Barragem Doutor

A barragem Doutor (Tabela 6.3), idealizada e operando desde 2001 para conter os rejeitos e lamas resultantes da concentração do minério de ferro das minas de Capanema e Timbopeba, da empresa Vale S. A., está localizada em um distrito de Ouro Preto, conhecido como Antônio Pereira, cerca de 31 km de sua sede. Ressalta-se que todas as licenças e autorizações de funcionamento da estrutura estão disponíveis no processo COPAM 058/1984/039/07.

Tabela 6.3 - Compilação de dados da barragem do Doutor, segundo o BDA. Acessado em 2018.

EMPREENDEDOR	MUNICÍPIO	IDADE (anos)	PREVISÃO DE TÉRMINO
Vale S.A.	Ouro Preto	17	2021
MATERIAL	MÉTODO CONSTRUTIVO	ALTURA (m)	COROAMENTO (m)
Terra	Linha de centro	77	850
VOLUME DO RESERVATÓRIO (m³)	VOLUME ATERRO (m³)	TEMPO DE RECORRÊNCIA (anos)	
35.805.814	3.379.510	10.000	
INSTRUMENTAÇÃO			
Medidor de nível d'água, medidor de vazão e piezômetro			

Assim, partindo-se do referido município, a forma mais fácil de acesso ao empreendimento se dá também por meio da rodovia dos Inconfidentes ou BR-356, até Mariana (MG), por aproximadamente 15 km. Em seguida, continua-se pela rodovia estadual, MG-129, por mais 14 km, até o distrito de Antônio Pereira. Por fim, segue-se em frente pela estrada de Alegria até a portaria da empresa.

Segundo o relatório elaborado por Nicho Engenheiros Consultores Ltda, em dezembro de 2002, o mapeamento para pesquisa geológica do empreendimento ocorreu por meio de caminhamento com descrição de afloramentos e tomada de atitudes estruturais das rochas. A área em estudo se encontra sobre o flanco nordeste do anticlinal Mariana, próximas à junção dos sinclinais Santa Rita e Conta História, um importante divisor de águas entre as bacias dos rios das Velhas e Doce.

Nesta área, em geral, o minério de ferro cubado é composto por itabiritos moles a pulverulentos e subordinadamente hematitas friáveis e duras, semelhante ao minério economicamente lavrado no restante do QF. Esse projeto se encontra estruturado sobre litologias pertencentes ao Supergrupos Minas (Grupo Caraça, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba) e Rio das Velhas (Grupo Nova Lima) que, em termos de estratigrafia, é mais antigo que o primeiro e estão em contato tectônico por meio de falhas de empurrão (Figura 6.6):

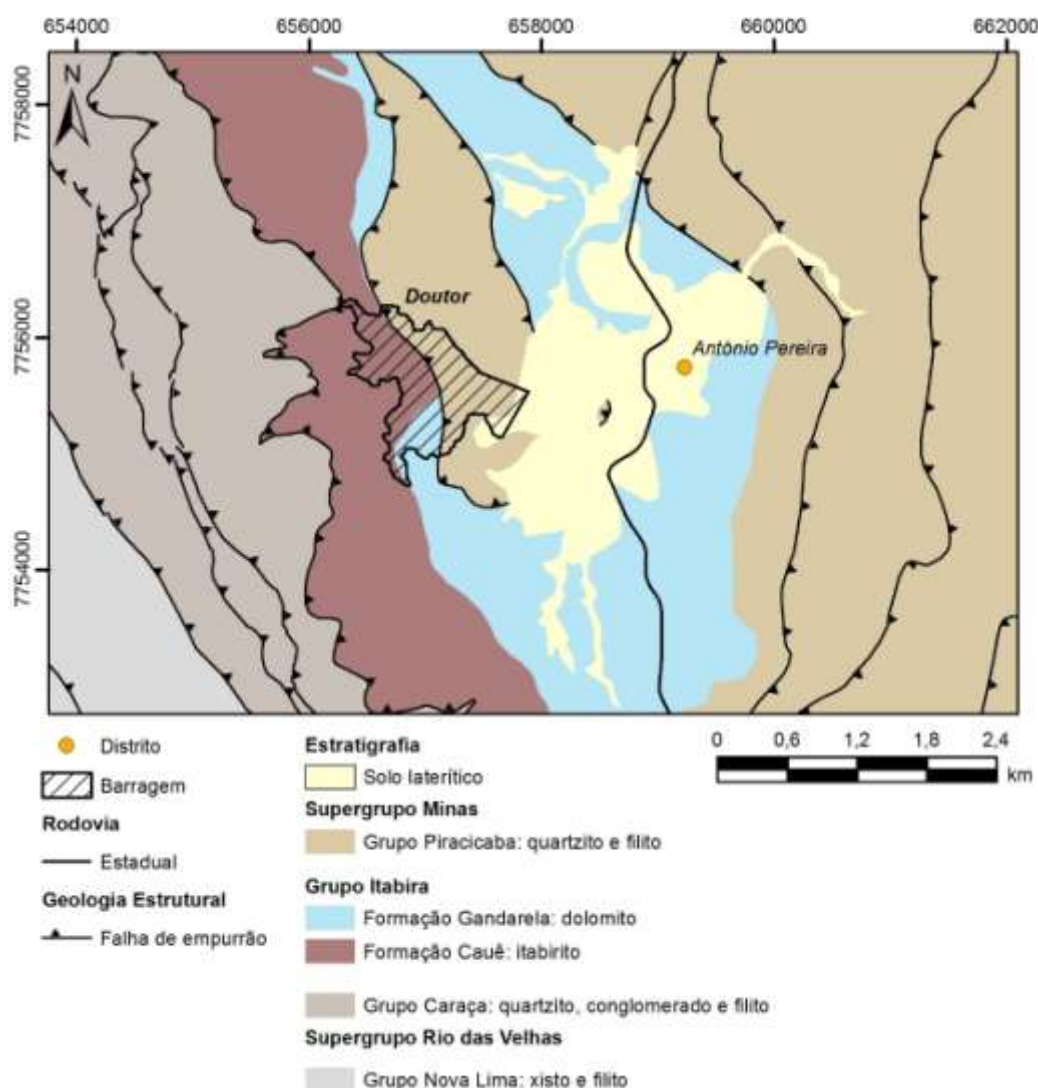


Figura 6.6 - Mapa geológico da região da barragem Doutor, em Ouro Preto (MG), próxima ao distrito de Antônio Pereira. Fonte: adaptado de Lobato *et al.* (2005).

✓ Grupo Nova Lima: representado por uma sequência de xistos e filitos, estando os últimos extremamente alterados.

✓ Grupo Caraça: aflora predominante na região sudeste e, localmente, na porção nordeste da área, e representado pelas Formações Moeda e Batatal. A primeira é formada por quartzitos sericíticos, generalizadamente milonitizados, enquanto a Fm. Batatal, é caracterizada por filitos grafitosos, de coloração cinza.

✓ Grupo Itabira: é representado pelas Fm. Cauê e Gandarela. O Cauê ocupa boa parte da área, sendo composta predominantemente por itabiritos moles, de teor médio, bandamentos milimétrico a centimétricos. Ocorrem ainda pequenas lentes de hematita dura e pacotes descontínuos de hematita mole a pulverulenta, notadamente na porção leste da área. No Gandarela foram identificadas rochas dolomíticas e filitos ferruginosos.

✓ Grupo Piracicaba: é representado, na área mapeada, pela Formação Cercadinho, que por sua vez apresenta filitos de coloração acinzentada, rósea e sericíticos, com alguma hematita.

✓ Mais recente ainda, são as formações compostas por lateritas e cangas (solos residuais), além da camada de aluvião preferencialmente arenosa e espessa.

O meio físico é marcado por alinhamentos montanhosos cujos cumes chegam a atingir altitudes médias de 1800 m, com grandes desníveis altimétricos e complexa estrutura geológica. Na área em estudo foram distinguidos relevos colinosos contendo vales erosivos abertos e superfícies de aplainamento, onde predominam relevos escarpados e encostas de altas declividades (compreendidas entre 30 a 45%).

As altitudes supracitadas contribuem para tornar as condições climáticas mais próximas das características dos climas subtropicais, notadamente pela influência do regime térmico. Por outro lado, a distribuição sazonal das precipitações revela um regime tipicamente tropical com uma estação seca bem definida durante o inverno e por chuvas no verão. Dorr (1969) cita ainda que essas elevações criam um obstáculo à penetração das massas de ar que se deslocam em direção ao interior do continente, provocando a formação de chuvas, principalmente, orográficas.

Localizadas na vertente oriental da Serra de Ouro Preto, regionalmente denominada por

Serra de Antônio Pereira, a área é permeada por uma rica rede de drenagens, as quais têm suas cabeceiras inseridas nas serras locais. No caso desse complexo minerário, a região é atravessada pelas sub-bacias hidrográficas dos rios Gualaxo do Norte e do Carmo, os quais ao encontrar com o rio Piranga, contribuem para o rio Doce, no município homônimo (Tabela 6.4 e Figuras 6.6 e 6.7).

Tabela 6.4 - Compilação de dados hidrográficos da barragem do Doutor, segundo o BDA. Acessado em 2018.

HIDROGRAFIA				
BACIA	SUB-BACIA	ÁGUA BARRADA	CURSO À JUSANTE	LOCALIZAÇÃO HIDROGRÁFICA
rio Piracicaba	rio Piranga	córrego Doutor	rio Gualaxo do Norte	C), conforme Figura 5.1
ÁREA DE JUSANTE				
OCUPAÇÃO HUMANA	INTERESSE AMBIENTAL	INSTALAÇÕES	CONCENTRAÇÃO DAS INSTALAÇÕES	DISTÂNCIA DO CENTRO URBANO
Passagem de pessoas ou veículos, local de permanência eventual, povoado ou bairro	Curso d'água, mata ciliar	Barragem, comércio, escola, estrada, ponte, residência	Baixa	2,29km (Figura 6.9)



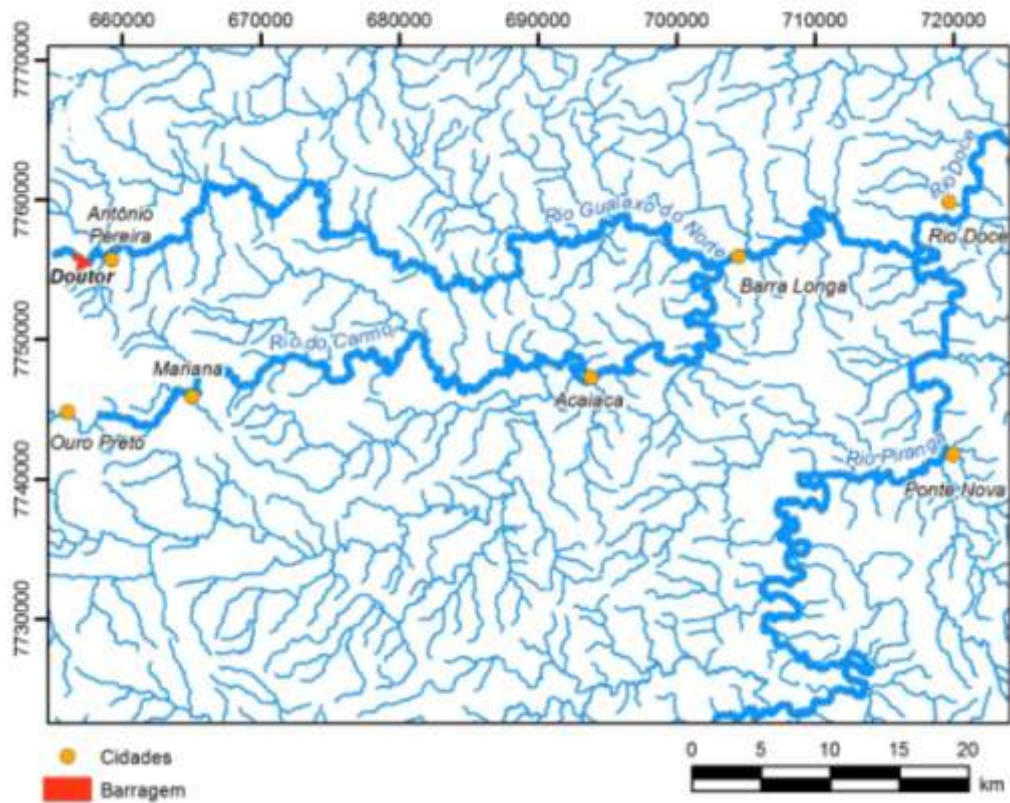


Figura 6.7 - Mapa hidrográfico da região de localização da barragem Doutor. Fonte: adaptado de Fuckner (2013).

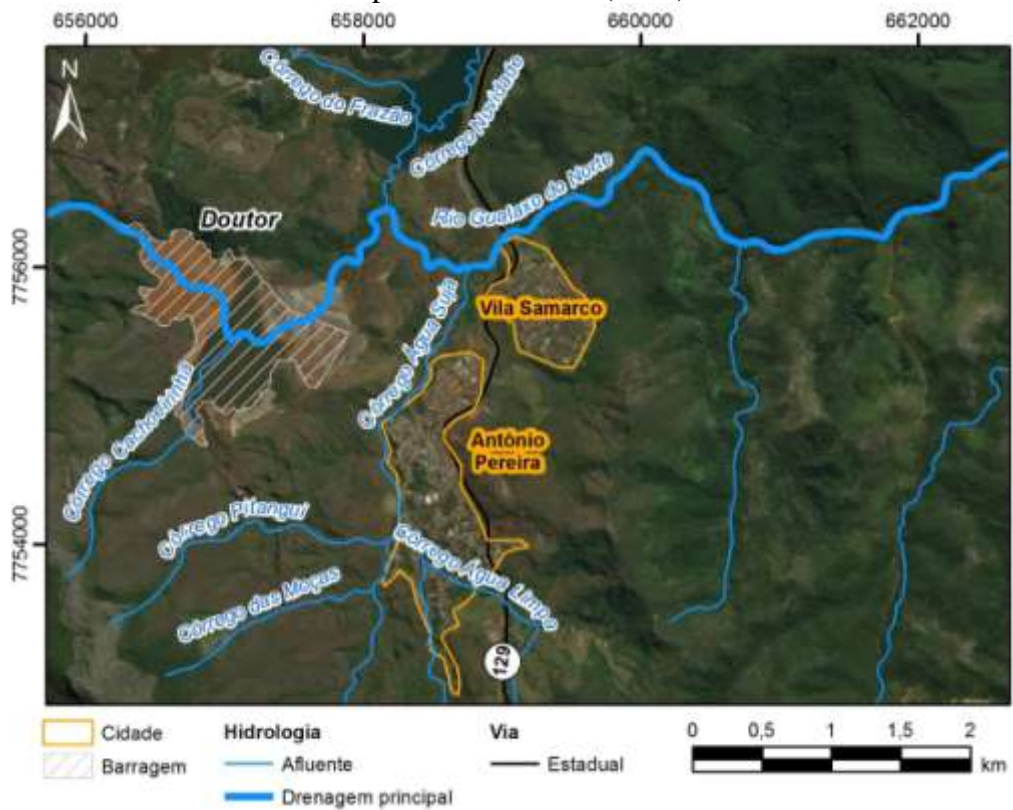


Figura 6.8 - Mapa hidrográfico da barragem Doutor e parte da sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, próximas ao distrito de Antônio Pereira. Fonte: adaptado de Fuckner (2013)



Figura 6.9 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Doutor.

### 6.1.1.3. Barragem Fundão

No caso desta barragem, considerada atualmente pelos órgãos competentes como descaracterizada, em função do acidente ocorrido em 2015, serão apontadas duas análises distintas. A primeira diz respeito às características e avaliações feitas pela empresa, Samarco Mineração S.A., por meio do EIA elaborado em outubro de 2013 (Tabela 6.5), pela empresa SETE - Soluções e Tecnologia Ambiental LTDA., e disponíveis no processo COPAM 015/1984/095/2013. Já a segunda análise, ocorrerá após a sua ruptura e seus respectivos desdobramentos. Desta forma, a partir dos resultados obtidos será possível estabelecer uma comparação entre a metodologia proposta neste trabalho e o acidente ocorrido.

Tabela 6.5 - Compilação de dados da barragem de Fundão, segundo o BDA. Acessado em 2018.

EMPREENDEDOR	MUNICÍPIO	IDADE (anos)	PREVISÃO DE TÉRMINO
Samarco Mineração S. A.	Mariana	7*	2040
MATERIAL	MÉTODO CONSTRUTIVO	ALTURA (m)	COROAMENTO (m)
Terra-enrocamento	Montante e linha de centro	130	840
VOLUME DO RESERVATÓRIO (m <sup>3</sup> )	VOLUME ATERRO (m <sup>3</sup> )	TEMPO DE RECORRÊNCIA (anos)	
91.866.000	804.300	10.000	
INSTRUMENTAÇÃO			
Marco de superfície, medidor de nível d'água, piezômetro e medidor de vazão			

\* Desde sua criação, em 2008, até o acidente em 2015.

O complexo minerador Germano-Alegria, o qual as barragens de Germano, Fundão e Santarém estão inseridas, situa-se na porção sudeste do QF, no município de Mariana (MG), aproximadamente 43 km de Ouro Preto (MG), município de instalação da UFOP. Entre alguns dos distritos próximos, cita-se Santa Rita Durão e Bento Rodrigues. Assim, a principal forma de acesso também é feita pela Rodovia dos Inconfidentes ou BR-356, até a sede do município de Mariana. Em seguida, percorre-se mais 29 km pela MG-129, estrada que leva à Catas Altas e Santa Bárbara, até a portaria da empresa.



Reitera-se novamente que segundo o CNRH, por intermédio da Resolução Nº 143 de 2012, que classifica os empreendimentos quanto ao risco e ao dano potencial associado (DPA), a barragem de Fundão era classificada como Classe C, de baixo risco (CRI igual a 9) e alto dano potencial associado (DPA igual 22). Destaca-se também que a Geoestável Consultoria e Projetos, por meio do documento "Declaração de Condições de Estabilidade - Disposição de Rejeitos no Vale Córrego do Fundão", realizou auditoria técnica atestando que a barragem se encontrava em condições adequadas de segurança, em relação à estabilidade física das fundações dos maciços existentes.

Para a avaliação do meio físico, a Samarco realizou campanhas de campo, em escala de 1:5.000, durante os períodos de março de 2012 e junho de 2013, para avaliação das condições geológico-geotécnicas, caracterização dos recursos hídricos e dos aspectos geomorfológicos. Foram utilizados ainda, estudos existentes como material de apoio, dentre os quais, cita-se o Projeto Unificação e Alteamento das Barragens de Rejeito Germano e Fundão (Geoestável, 2012).

A fundação da barragem era composta, genericamente, por solo coluvionar (origem laterítica e com pedregulhos de itabiritos), sobrepostos a uma cama de solo residual mais resistente, esta por sua vez, sobreposta à camadas de rochas alteradas e sãs, de maior resistência.

Na implantação do empreendimento foram identificadas litologias, principalmente, do Supergrupo Minas, as quais eram caracterizadas por sequências que contemplam sedimentos químicos e clásticos. Entre essas rochas, cita-se o filito sericítico, os metadiamicritos e filitos grafitosos pertencentes ao Grupo Sabará.

Extrapolando-se a região do entorno da barragem, também foram constatadas, além das já supracitadas, as litologias pertencentes aos Grupos:

- ✓ Grupo Maquiné: constituído, basicamente, por quartzitos micáceos típicos do Itacolomi (com lentes de metaconglomerado polimíticos compostos por seixos, calhaus e matacões) e filitos;

- ✓ Grupo Piracicaba: caracterizada por rochas clásticas como quartzitos, filitos,

filitos grafitosos e, ocasionalmente, dolomitos;

✓ Grupo Sabará: filitos sericíticos e grafitosos, xistos metavulcânicos e quartzitos sericíticos e feldspáticos.

Como se sabe, a borda leste do QF é marcada por intenso retrabalhamento. Assim, na área do empreendimento, especificamente na barragem Germano, ressalta-se a complexidade geológica demarcada pela presença de um conjunto falhas de empurrão e sinclinais, respectivamente, o sistema de falhas Água Quente e os sinclinais de Santa Rita e Alegria (Figura 6.10).

A caracterização geomecânica dessas rochas foi pautada na classificação proposta pela *International Society for Rock Mechanics* (ISRM, 2007) que preconiza o grau de intemperismo dos materiais em estudo. Após a análise de estruturas como foliação e famílias de fraturas, concluiu-se pelo predomínio de rochas altamente à completamente intemperizadas, respectivamente, classes W4 e W5. Destaca-se ainda a proximidade da classificação ao termo solo residual, momento em que a rocha perde toda sua estrutura original, em função de ações intempéricas.

No que tange aos aspectos morfodinâmicos da região, observa-se ainda uma relação direta entre processos erosivos e/ou movimentos de massa e as intervenções antrópicas, relacionadas basicamente às atividades de mineração. Presença de erosão laminar e em sulcos, nas superfícies de solos expostos, além de assoreamento devido à disposição de rejeitos no reservatório de rejeito.

A rede de drenagens da região pertence à bacia hidrográfica do rio Doce, abrangendo parcela da sub-bacia do rio do Carmo, o qual tem suas nascentes localizadas na serra do Veloso, em Ouro Preto. Esse rio, ao confluir com o rio Piranga, forma o rio Doce, nas proximidades do município Rio Doce.

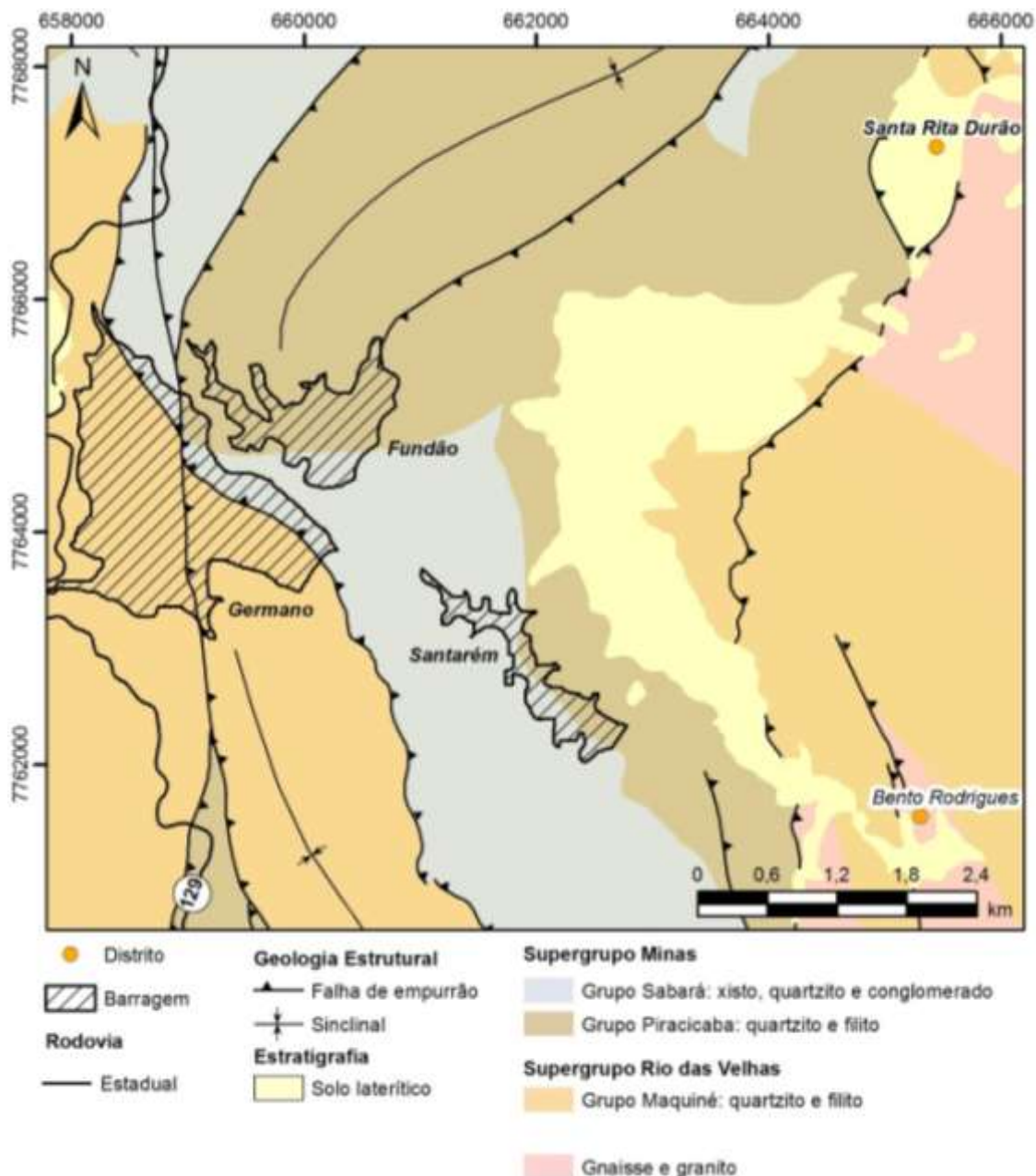


Figura 6.10 - Mapa geológico da região da barragem de Fundão em Mariana (MG), próxima aos distritos de Bento Rodrigues e Santa Rita Durão. Fonte: adaptado de Lobato *et al.* (2005).

Evidencia-se ainda que a barragem de Fundão foi projetada sobre o vale do córrego homônimo, um dos afluentes e formador da microbacia do córrego Santarém (sub-bacia do rio Gualaxo do Norte e bacia estadual do rio Doce), e, por consequência, posicionado à montante da barragem Santarém, em um sistema de cascata (Tabela 6.6, Figura 6.11 e Figura 6.12). Válido ressaltar que essa barragem visava, além da disposição de rejeitos, a recirculação de água para uso industrial.

Tabela 6.6 - Compilação de dados hidrográficos da barragem de Fundão, segundo o BDA. Acessado em 2018.

HIDROGRAFIA				
BACIA	SUB-BACIA	ÁGUA BARRADA	CURSO À JUSANTE	LOCALIZAÇÃO HIDROGRÁFICA
rio Piranga	rio Gualaxo do Norte	córrego Fundão	córrego Santarém	D), conforme Figura 5.1
ÁREA DE JUSANTE				
OCUPAÇÃO HUMANA	INTERESSE AMBIENTAL	INSTALAÇÕES	CONCENTRAÇÃO DAS INSTALAÇÕES	DISTÂNCIA DO CENTRO URBANO
Passagem de pessoas ou veículos, povoado ou bairro	Curso d'água, mata ciliar, área de preservação permanente (APP) e descaracterização total da área	Barragem, área de plantio e pastagem, comércio, escola, ponte e residência	Baixa	6,61km (Figura 6.12)

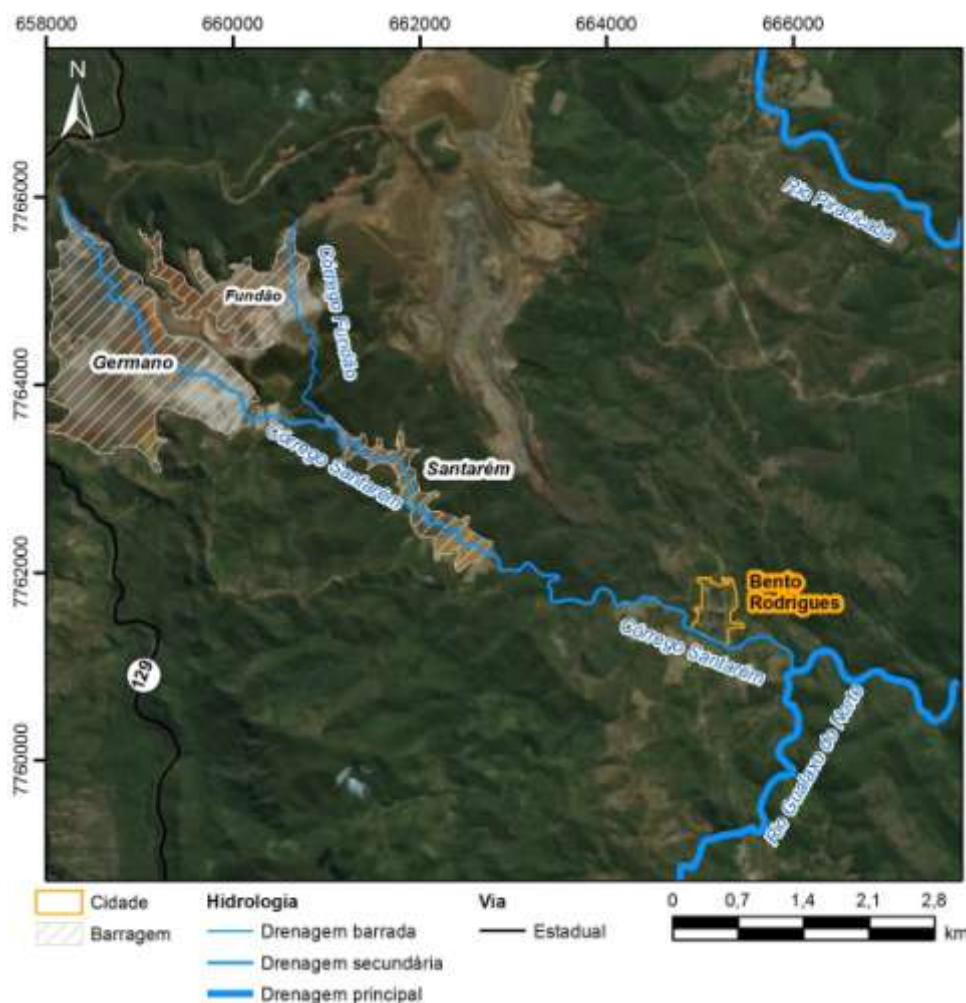


Figura 6.11 - Mapa hidrográfico da barragem de Fundão e parte da sub-bacia do rio Gualaxo do Norte, próxima às barragens de Germano e Santarém e distrito de Bento Rodrigues. Fonte: adaptado de Fuckner (2013).



Figura 6.12 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Fundão.

### **6.1.2. Bacia do rio São Francisco**

O rio São Francisco, das suas nascentes, na Serra da Canastra (MG), até a sua foz, no Oceano Atlântico (entre os estados de Alagoas e Sergipe), percorre cerca de 2.697 km e o comprimento total da rede de drenagem, da respectiva bacia hidrográfica, é de 121.657 km. Assim, a área total da bacia hidrográfica corresponde a 638.883 km<sup>2</sup>, os quais abrangem 507 municípios e 7 unidades da federação, sejam eles os estados de Alagoas, Bahia, Distrito Federal, Goiás, Minas Gerais, Pernambuco e Sergipe (CBHSF, 2015).

Esta bacia é subdividida em 4 regiões fisiográficas principais, as quais, segundo os dados municipais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015), se classificam por:

- ✓ Alto São Francisco, que corresponde à 16% da área total da bacia e integra 169 municípios e 50% da população residente à região;

- ✓ Médio São Francisco, que satisfaz 63% de sua área, 178 municípios e 24% da população residente;

- ✓ Submédio São Francisco, que reflete 17% da respectiva bacia, 91 municípios e 16% da população local, além do;

- ✓ Baixo São Francisco, que corresponde à apenas 4% da região de avaliada, 90 municípios e 10% da população.

O IBGE (Op. cit.) define ainda que apesar da maior parte da população do São Francisco residir em áreas urbanas, cerca de 77%, a região possui uma baixa densidade demográfica, com apenas 22,5 pessoas por km<sup>2</sup>.

#### **6.1.2.1. Barragem Casa de Pedra**

A mineração Casa de Pedra, empreendimento da Companhia Siderúrgica Nacional - CSN que teve início em 1992, está localizada a aproximadamente 10 km da sede do



município de Congonhas. Partindo-se do município de Ouro Preto, o melhor trajeto se dá por meio da rodovia estadual, MG-129, sentido Ouro Branco e, em seguida, pela rodovia MG-443 até confluir à rodovia federal, Presidente Juscelino Kubitschek, também conhecida por BR-040. Finalmente, segue-se por esta última até a Estrada Casa de Pedra, rodovia municipal asfaltada, que leva à portaria do empreendimento.

A barragem Casa de Pedra (Tabela 6.7), como fundamentado no processo COPAM 103/1981/058/2008, foi concebida inicialmente para ser construída em cinco etapas, com alteamentos para montante. Entretanto, por consequência da necessidade de armazenamento de água na barragem para funcionamento da planta de beneficiamento de minério, o projeto original foi reformulado, passando a ser adotado o método de alteamento para linha de centro, com aterro compactado. Além disso, definiu-se também pela sua construção em três etapas e não em cinco como no projeto inicial.

Tabela 6.7 - Compilação de dados da barragem Casa de Pedra, segundo o BDA. Acessado em 2018.

EMPREENDEDOR	MUNICÍPIO	IDADE (anos)	PREVISÃO DE TÉRMINO
CSN Mineração S. A.	Congonhas	26	2020
MATERIAL	MÉTODO CONSTRUTIVO	ALTURA (m)	COROAMENTO (m)
Terra homogênea	Montante e Linha de centro	84	900
VOLUME DO RESERVATÓRIO (m <sup>3</sup> )	VOLUME ATERRO (m <sup>3</sup> )	TEMPO DE RECORRÊNCIA (anos)	
9.283.500	3.054.500	10.000	
INSTRUMENTAÇÃO			
Medidor de nível d'água, marco de deslocamento superior, batimetria, medidor vazão dreno interno, medidor de vazão e piezômetro			

Segundo estudos realizados pela DAM Projetos de Engenharia, em outubro de 2014, a barragem encontra-se inserida no mapa geológico denominado Quadrícula Casa de Pedra, localizada no extremo sudoeste do QF, representando o extremo sul do sinclinal da serra da Moeda, que culmina na Falha do Engenho.

Dois grandes grupos de litologias, do topo à base, ocorrem na região: os granitoides das suítes Brás Pires e Alto Maranhão, corpos intrusivos associados ao Orógeno Mineiro, e

os xistos do Grupo Nova Lima, pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas. O Grupo Nova Lima é externo ao QF e indiviso devido aos fortes eventos deformacionais. Consiste, principalmente, de xisto verde metassedimentar e metavulcânico e filito com intercalações de quartzito, grauvacas, dolomitos, talco xistos e formações ferríferas (Figura 6.13).

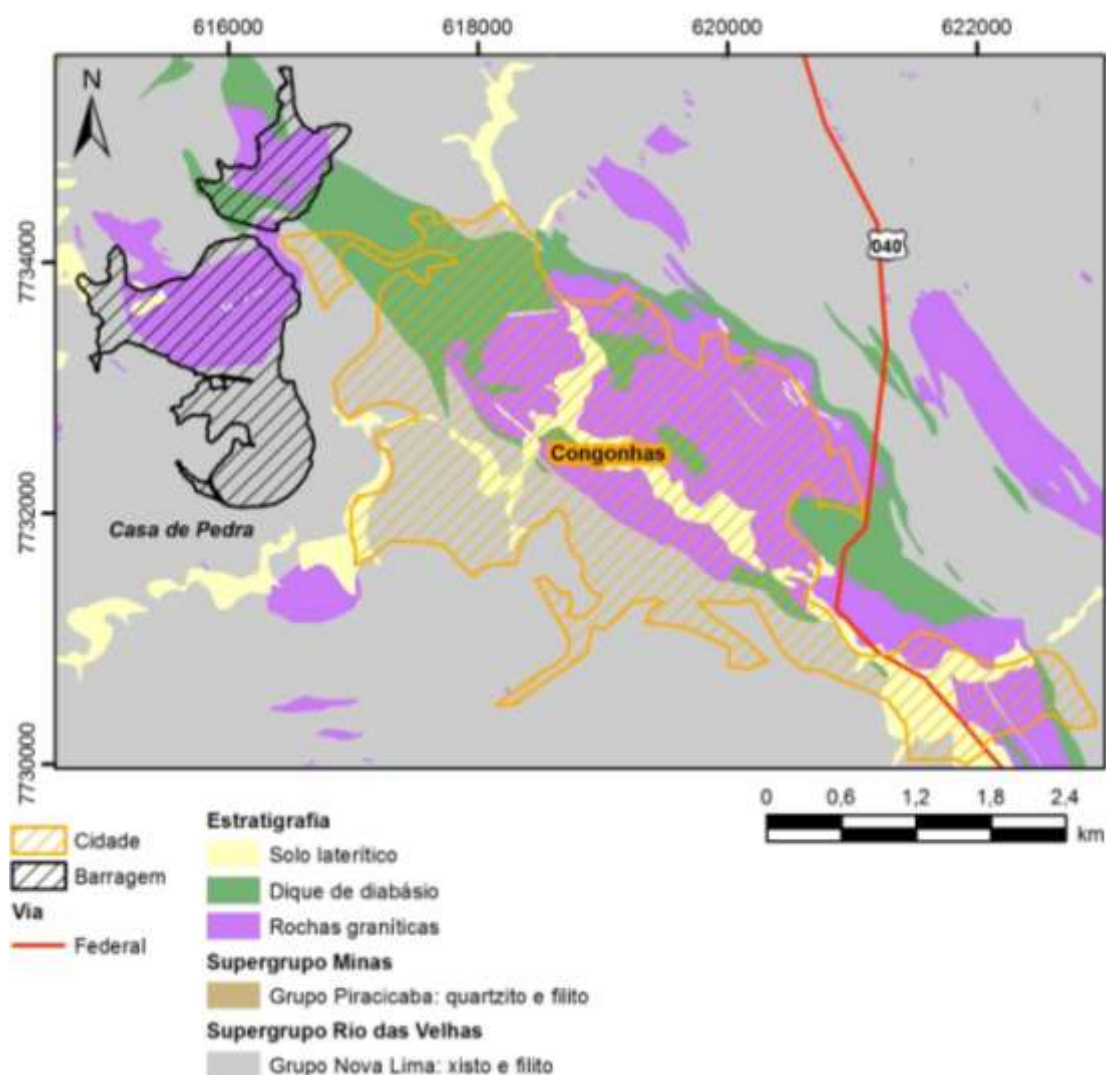


Figura 6.13 - Mapa geológico da região da barragem de Casa Pedra, em Congonhas (MG). Fonte: adaptado de Lobato *et al.* (2005).

Conforme seções geológico-geotécnicas apresentadas nos estudos supracitados, a barragem foi assentada em solo residual de filito, após a remoção da capa superficial de colúvio de menor capacidade de suporte. De acordo com investigações realizadas, o solo residual de filito é constituído por silte argilo-arenoso e consistência rija a dura.



Dentro dessas unidades, distingue-se setores bem individualizados que refletem os condicionamentos geológicos e os processos erosivos que atuaram em sua evolução, caracterizados pelos extensos alinhamentos de crista denominados serra do Curral, Moeda, Serrinhas, do Itabirito, do Gandarela e do Ouro Fino. O município de Congonhas, por exemplo, localizado na borda sudoeste do QF, apresenta altitudes médias em torno de 800 – 1.000m, com altitude máxima de 1.630m, no Pico da Bandeira (ponto mais alto da serra do Mascate).

A área da barragem está situada em um dos principais tributários da bacia do rio São Francisco, o rio Paraopeba, que percorre até a sua foz, na represa de Três Marias (Felixlândia/MG), 510 km. Já na parte alta da bacia do rio Paraopeba, encontra-se a sua principal sub-bacia, a do rio Maranhão, principal nível de base do município de Congonhas e que possui como um de seus afluentes, o córrego Casa de Pedra (Figura 6.14).

Localizada na região central de MG, em municípios como Conselheiro Lafaiete e Ouro Branco, e com uma área de contribuição de 714,6 km<sup>2</sup>, essa sub-bacia abriga cerca de 175.000 habitantes (IGAM, 2003). Vindo do município de Conselheiro Lafaiete, ela percorre o município pelo povoado de Joaquim Murinho, espalhando-se toda a região urbana de Congonhas, até encontrar-se com o rio Paraopeba (Tabela 6.8 e Figura 6.15).

Tabela 6.8 - Compilação de dados hidrográficos da barragem Casa de Pedra, segundo o BDA. Acessado em 2018.

HIDROGRAFIA				
BACIA	SUB-BACIA	ÁGUA BARRADA	CURSO À JUSANTE	LOCALIZAÇÃO HIDROGRÁFICA
rio Paraopeba	rio Maranhão	córrego Casa de Pedra	rio Maranhão	A), conforme Figura 5.1
ÁREA DE JUSANTE				
OCUPAÇÃO HUMANA	INTERESSE AMBIENTAL	INSTALAÇÕES	CONCENTRAÇÃO DAS INSTALAÇÕES	DISTÂNCIA DO CENTRO URBANO
Passagem de pessoas ou veículos e município	Curso d'água, área de preservação permanente (APP) e mata ciliar	Ponte, residência, área de pastagem, estrada e ferrovia	Alta	1,14km (Figura 6.15)

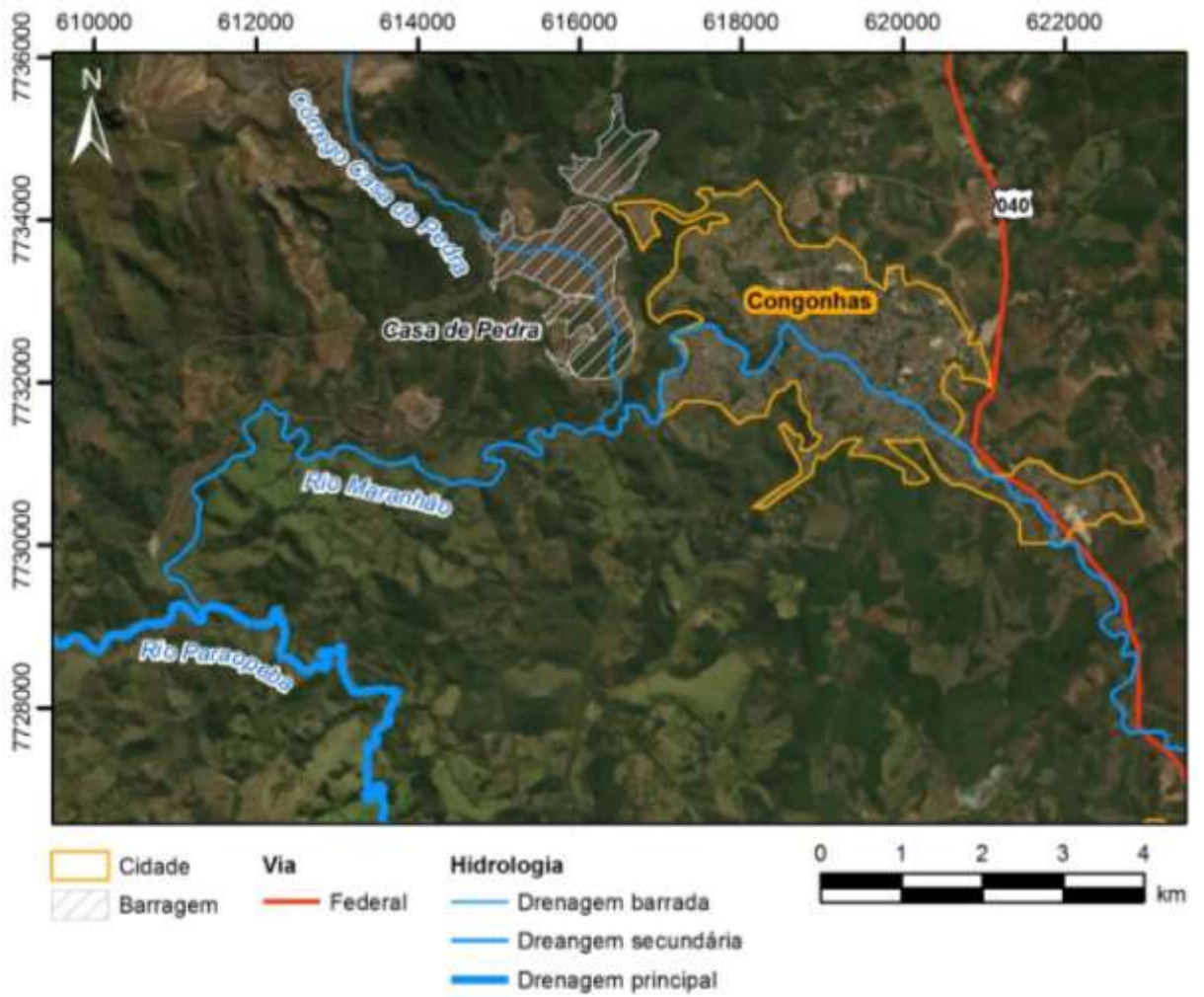


Figura 6.14 - Mapa hidrográfico da barragem Casa de Pedra e da sub-bacia do rio Maranhão, próximas ao município de Congonhas. Fonte: adaptado de Teixeira (2017)



Figura 6.15 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Casa de Pedra.

### 6.1.2.2. Barragem Maravilhas II

A partir de Ouro Preto/MG, o acesso à área do empreendimento (Tabela 6.9) é feito pela BR-356 (rodovia dos Inconfidentes), por aproximadamente 52 km, sentido à Nova Lima e Belo Horizonte. No posto da Polícia Rodoviária Federal, entra-se à esquerda para a Mina do Pico. Até a área da barragem Maravilhas II, segue-se por mais 6 km, por meio da estrada de terra, à direita da portaria da mina.

Tabela 6.9 - Compilação de dados da barragem Maravilhas II, segundo o BDA.  
Acessado em 2018.

EMPREENDEDOR	MUNICÍPIO	IDADE (anos)	PREVISÃO DE TÉRMINO
Vale S. A.	Itabirito	23	2022
MATERIAL	MÉTODO CONSTRUTIVO	ALTURA (m)	COROAMENTO (m)
Terra homogênea	Jusante	90	730
VOLUME DO RESERVATÓRIO (m <sup>3</sup> )	VOLUME ATERRO (m <sup>3</sup> )	TEMPO DE RECORRÊNCIA (anos)	
76.300.000	3.904.000	500	
INSTRUMENTAÇÃO			
Marco de superfície, medidor de nível d'água, medidor de vazão e piezômetro			

Conforme EIA para Alçamento da Barragem de Rejeitos Maravilhas II - El. 1.300 m, elaborado pela Sete Soluções e Tecnologia Ambiental Ltda., em julho de 2012, e disponível no processo COPAM 211/1991/057/2010, a área da barragem em estudo está situada no município de Itabirito, ao longo do Sinclinal Moeda, o qual é caracterizado por uma mega dobra que envolve as unidades do Supergrupo Minas. Essa feição apresenta grande importância no QF, tanto pela sua dimensão quanto pela sua estruturação cênica, além de seu alto potencial econômico decorrente das grandes jazidas de minério de ferro situadas dentro da Formação Cauê.

Segundo estudos da empresa de consultoria contratada pela Vale S. A., a VOGBR Recursos Hídricos e Geotecnia (2009), as serras da Moeda e Itabirito correspondem, respectivamente, aos flancos oeste e leste do Sinclinal Moeda sendo sustentadas por rochas dos grupos Caraça e Itabira. O relevo associado às essas é bastante acidentado, podendo ser classificado como de serra. Na porção central do sinclinal há uma região

quase tão acidentada quanto estas, sustentada por metassedimentos do Grupo Piracicaba, que compreende uma unidade geomorfológica de morrotes, com relevo ondulado a forte ondulado.

Na área do projeto identificou-se apenas rochas que compõem a sequência metassedimentar, Grupos Itabira e Piracicaba, do Supergrupo Minas, e uma pequena porção de coberturas sedimentares recentes (solo laterítico argiloso). Localmente observou-se ainda rochas intrusivas máficas (muitas vezes alteradas) e também depósitos recentes que recobrem as unidades do Supergrupo supracitado (Figura 6.16).

O Grupo Itabira é representado pela Formação Gandarela, composta por dolomitos, calcários magnesiano e itabiritos dolomíticos, com filito e quartzito. O Grupo Piracicaba, composto pela Formação Cercadinho, tem predominância de rochas quartzíticas, com alternância de quartzitos ferruginosos, quartzitos e filitos sericíticos alterados (ferruginosos ou não).

A região do empreendimento está localizada no platô do sinclinal Moeda. Esse platô consiste de uma extensa superfície suspensa, disposta na direção norte-sul, o qual exibe uma configuração morfológica que pode ser subdividida em duas unidades: as abas externas e o platô do interior da sinclinal.

Essas abas da sinclinal estão alçadas a altitudes que variam entre 1500 e 1600 m e são sustentadas por quartzitos da Fm. Moeda (Grupo Caraça) e itabiritos da Fm. Cauê (Grupo Itabira). No topo das abas, notam-se cristas ou platôs, estes muitas vezes capeados por canga, atingindo larguras entre 500 e 1.300 m.

Localmente, a área da mineração está situada na depressão interna (platô central) do sinclinal Moeda, cujo modelado de relevo é colinoso, com vertentes convexas e topos alongados e arredondados. Essa depressão é limitada pelo conjunto de serras e subserras formadoras do alinhamento elevado da Serra dos Inconfidentes ou Itabirito. As cotas são, em média, de 1300m, enquanto que o Pico do Itabirito destaca-se no relevo atingindo uma altitude superior a 1580 m.



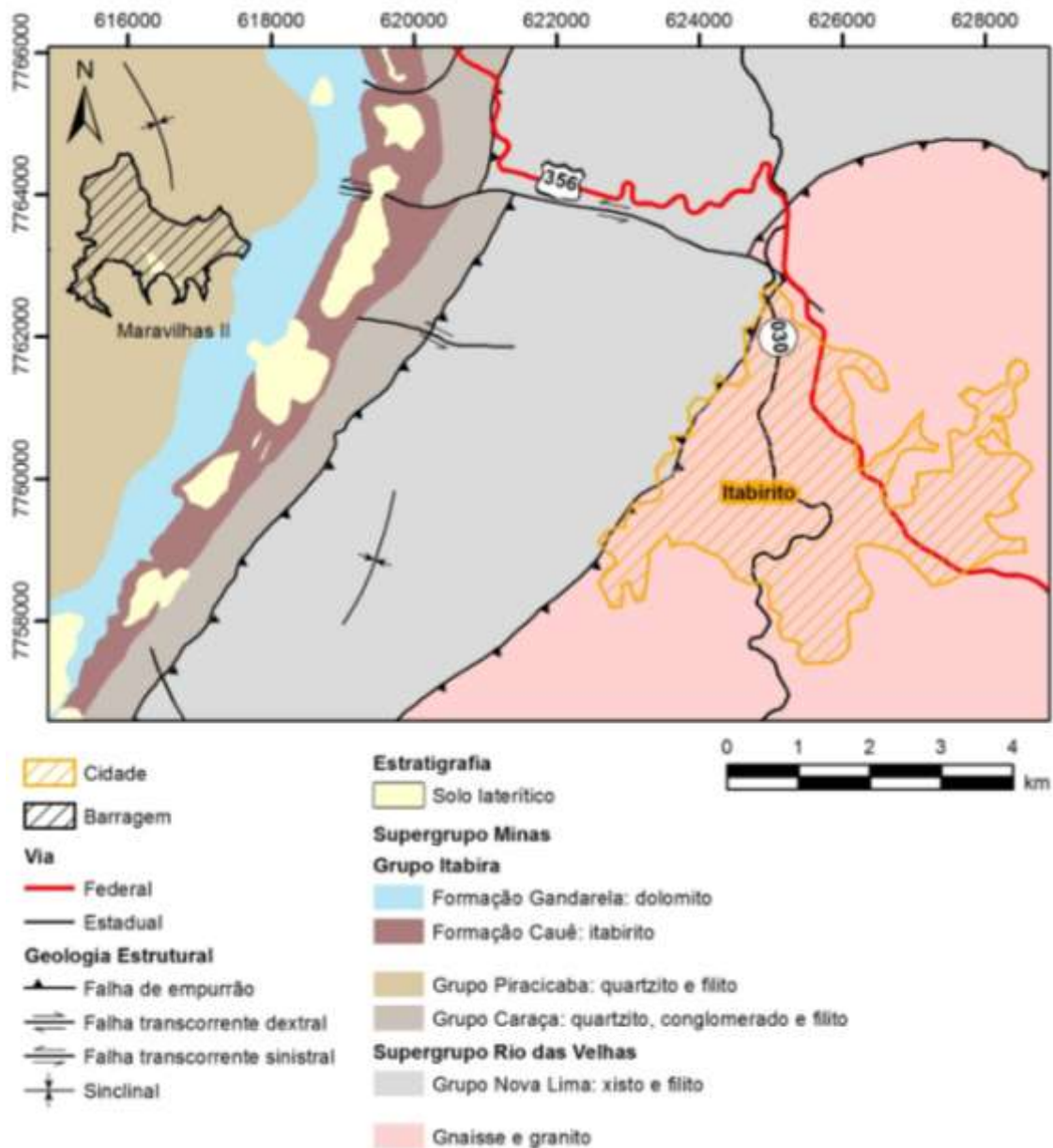


Figura 6.16 - Mapa geológico da região da barragem Maravilhas II, em Itabirito (MG).  
 Fonte: adaptado de Lobato *et al.* (2005).

É válido ressaltar que esse modelo de colinas mostra-se muito suscetível ao desenvolvimento de voçorocas de grandes dimensões, em função da existência de lençóis freáticos livres no manto de intemperismo arenosos, além do controle estrutural e atividade antrópica. Os processos de voçorocamento sobre esses terrenos ocorrem com uma maior intensidade nas cabeceiras de drenagem, conforme observado às margens da barragem Maravilhas II, onde as feições erosivas atingem grandes dimensões e profundidades superiores a 15 metros.

As áreas de influência da barragem situam-se na sub-bacia hidrográfica do córrego Sapecado (ou Maravilhas), afluente do ribeirão Congonhas, que faz parte da sub-bacia do rio do Peixe, sendo o último, afluente da margem esquerda do rio das Velhas (Tabela 6.10). O rio das Velhas é o corpo hídrico principal da região de inserção da Mina do Pico, onde se insere a barragem Maravilhas II, que tem suas nascentes na Área de Proteção Ambiental (APA) das Andorinhas, no município de Ouro Preto, em uma altitude de 1.500m. Já a sua foz, ocorre no rio São Francisco, no distrito de Barra do Guaicuí, no município de Várzea da Palma (MG).

Tabela 6.10 - Compilação de dados hidrográficos da barragem Maravilhas II, segundo o BDA. Acessado em 2018.

HIDROGRAFIA				
BACIA	SUB-BACIA	ÁGUA BARRADA	CURSO À JUSANTE	LOCALIZAÇÃO HIDROGRÁFICA
rio das Velhas	rio do Peixe	córrego Sapecado	córrego Sapecado	C), conforme Figura 5.1
ÁREA DE JUSANTE				
OCUPAÇÃO HUMANA	INTERESSE AMBIENTAL	INSTALAÇÕES	CONCENTRAÇÃO DAS INSTALAÇÕES	DISTÂNCIA DO CENTRO URBANO
Poucos habitantes	Curso d'água e mata ciliar significativa	Área de pastagem, estrada, ponte e residência	Baixa	1,1km (Figura 6.18)

A área do empreendimento abrange toda a sub-bacia do córrego Maravilhas, desde suas nascentes até a sua confluência com o ribeirão Congonhas. Ele recebe toda a drenagem da Mina do Pico, a qual é direcionada para as barragens Maravilhas I e II. A barragem Maravilhas II situa-se imediatamente a jusante da barragem Maravilhas I (Figura 6.17 e Figura 6.18).

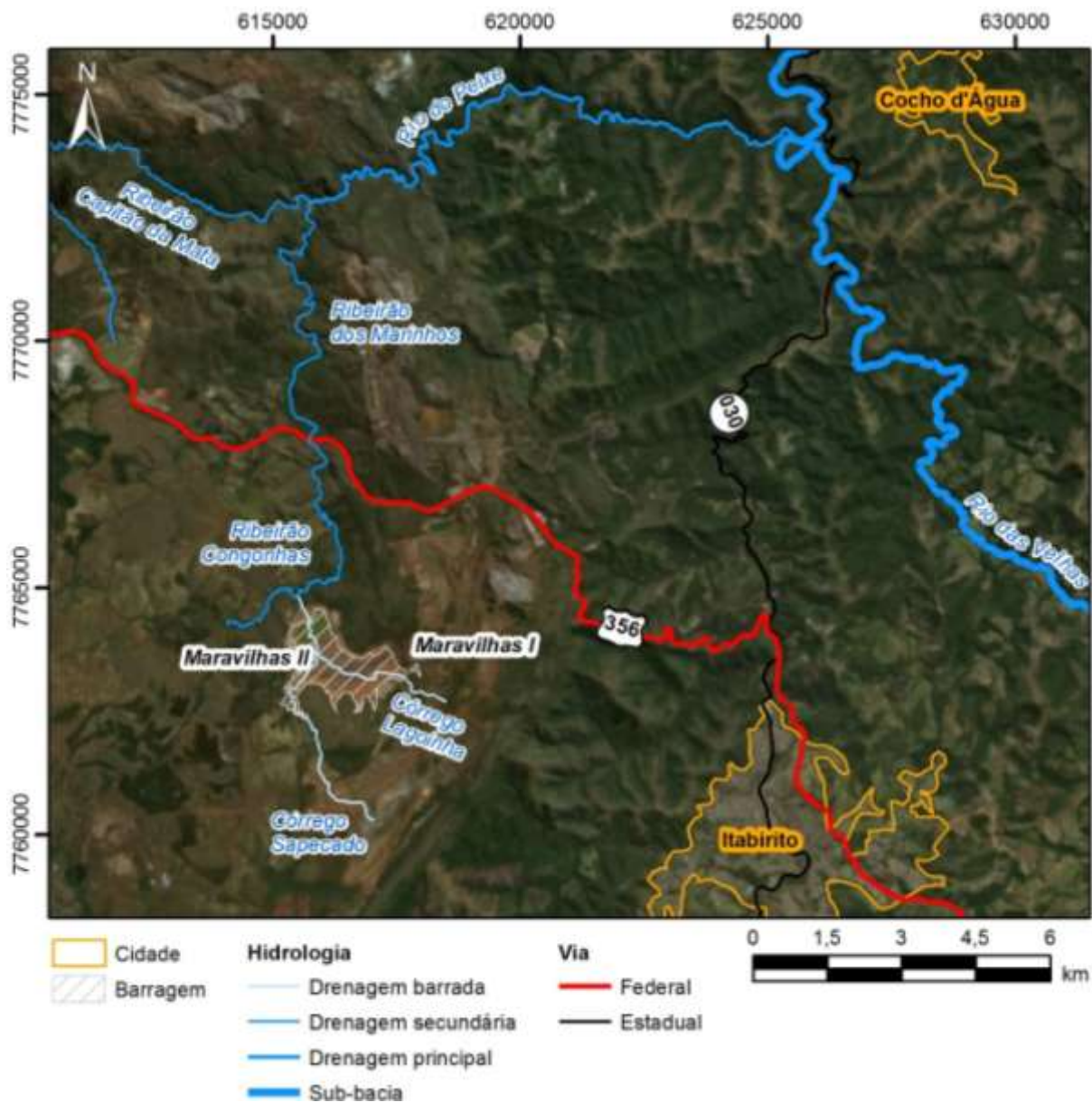


Figura 6.17 - Mapa hidrográfico das barragens Maravilhas I e II, próximas ao município de Itabirito. Fonte: adaptado de Teixeira (2017).



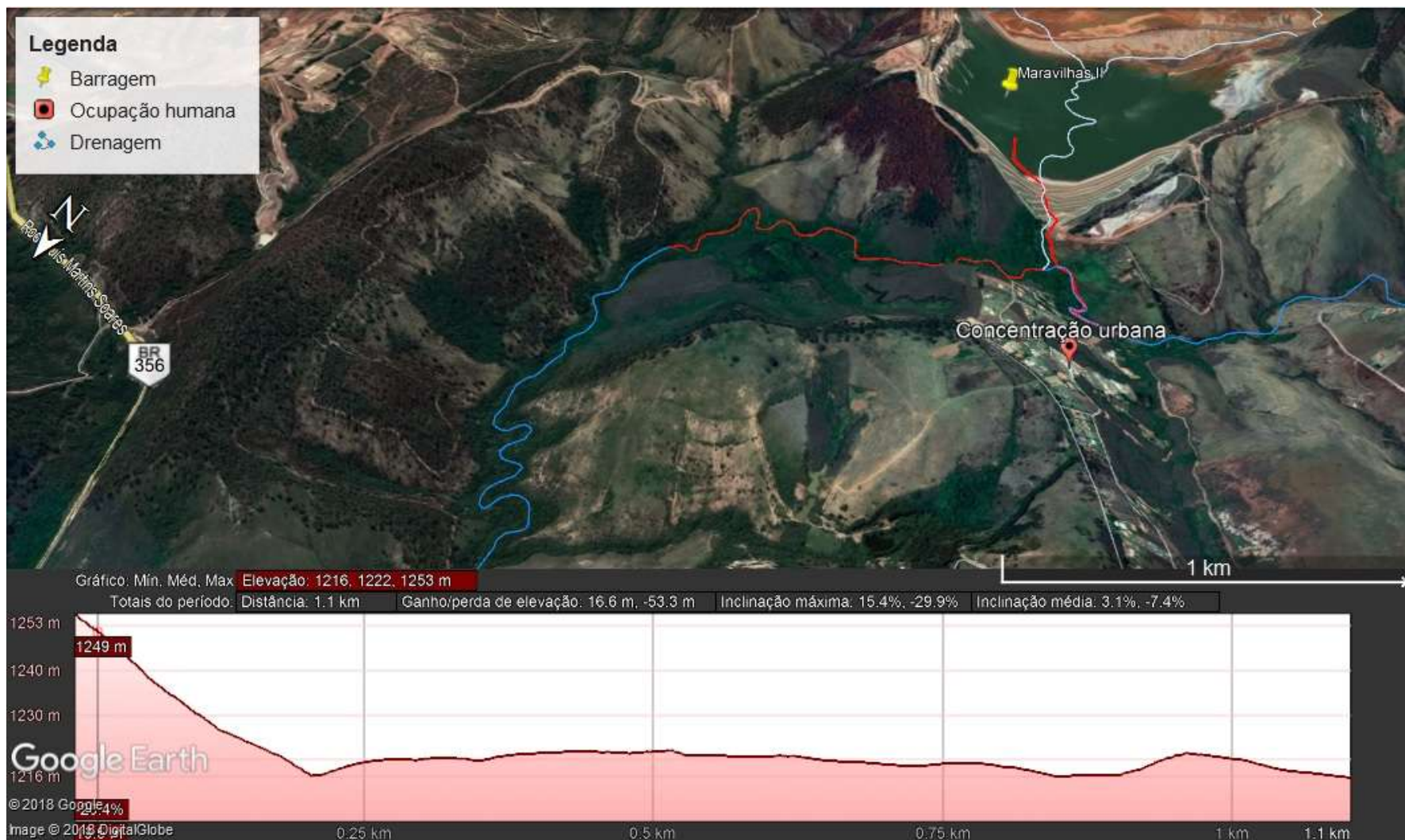


Figura 6.18 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura da barragem Casa de Pedra.

### 6.1.2.3. Barragens Vigia e Auxiliar do Vigia

As barragens Vigia e Auxiliar do Vigia (Tabelas 6.11 e 6.12), da Nacional Minérios S.A. (Namisa), uma subsidiária da CSN Mineração S.A., são partes do empreendimento conhecido por Minas do Itacolomy LTDA. e suas atividades tiveram início, respectivamente, nos anos de 1994 e 1995. Esses projetos encontram-se em fase de operação (processo copam 01469/2002/007/2007), porém não estão recebendo mais rejeitos, em função do atual processo de beneficiamento adotado.

As barragens estão localizadas no município de Ouro Preto (MG), próximas aos povoados de Pires, Mota e do limite com o município de Congonhas (MG). Em relação à UFOP, as estruturas distam de aproximadamente 62 km e seu melhor acesso se dá pelas rodovias BR-356, no trevo de Saramenha, MG-129, por cerca de 30 km no sentido Ouro Branco, e MG-443, por mais 8 km, até a MG-030. Em seguida, por meio da rampa de acesso à Congonhas, segue-se por mais 5 km até confluir à rodovia federal, BR-040. Por fim, percorre-se mais 13 km até a sinalização para entrada na área da mineradora, além de 1,2 km até a portaria da empresa.

Tabela 6.11 - Compilação de dados da barragem do Vigia, segundo o BDA. Acessado em 2018.

EMPREENDEDOR	MUNICÍPIO	IDADE (anos)	PREVISÃO DE TÉRMINO
Nacional Minérios S. A.	Ouro Preto	24	2041
MATERIAL	MÉTODO CONSTRUTIVO	ALTURA (m)	COROAMENTO (m)
Terra-enrocamento	Montante	28	360
VOLUME DO RESERVATÓRIO (m <sup>3</sup> )	VOLUME ATERRO (m <sup>3</sup> )	TEMPO DE RECORRÊNCIA (anos)	
550.000	130.000	10.000	
INSTRUMENTAÇÃO			
Medidor de nível d'água e piezômetro			

Tabela 6.12 - Compilação de dados da barragem Auxiliar do Vigia, segundo o BDA.  
Acessado em 2018.

EMPREENDEDOR	MUNICÍPIO	IDADE (anos)	PREVISÃO DE TÉRMINO
Nacional Minérios S. A.	Ouro Preto	23	2034
MATERIAL	MÉTODO CONSTRUTIVO	ALTURA (m)	COROAMENTO (m)
Terra-enrocamento	Montante	36	600
VOLUME DO RESERVATÓRIO (m <sup>3</sup> )	VOLUME ATERRO (m <sup>3</sup> )	TEMPO DE RECORRÊNCIA (anos)	
6.000.000	600.000	10.000	
INSTRUMENTAÇÃO			
Medidor de nível d'água e piezômetro			

Segundo o Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental (RADA), produzido pela Consultoria e Empreendimentos de Recursos Naturais LTDA. (CERN), em dezembro de 2007, localmente a caracterização geomorfológica do empreendimento está estreitamente ligada a uma relação entre os atributos geológicos e as configurações de relevo.

As camadas de itabirito da Fm. Cauê, protegidas da erosão pela laterização, formam as cristas que suportam as principais estruturas serranas que correspondem, dentre outras, Serra do Batateiro, Mascate, Pico da Bandeira, Morro do Engenho e Serra do Pires. Nesse patamar altimétrico, caracterizado pelo relevo escarpado, com depósitos de tálus, as cotas variam entre 1200 e 1500 metros.

Uma segunda feição mais suavizada, embora ainda correspondendo a uma variedade de terrenos acidentados, desenvolve-se uma unidade geomorfológica associada aos metassedimentos detríticos representados por filitos, xistos e quartzitos que compõem o Grupo Itacolomi ou mesmo unidades do Supergrupo Minas, sejam elas Grupos Caraça e Piracicaba. Ressalta-se que tais unidades não foram mapeáveis na escala do mapa publicado (Figura 6.19).

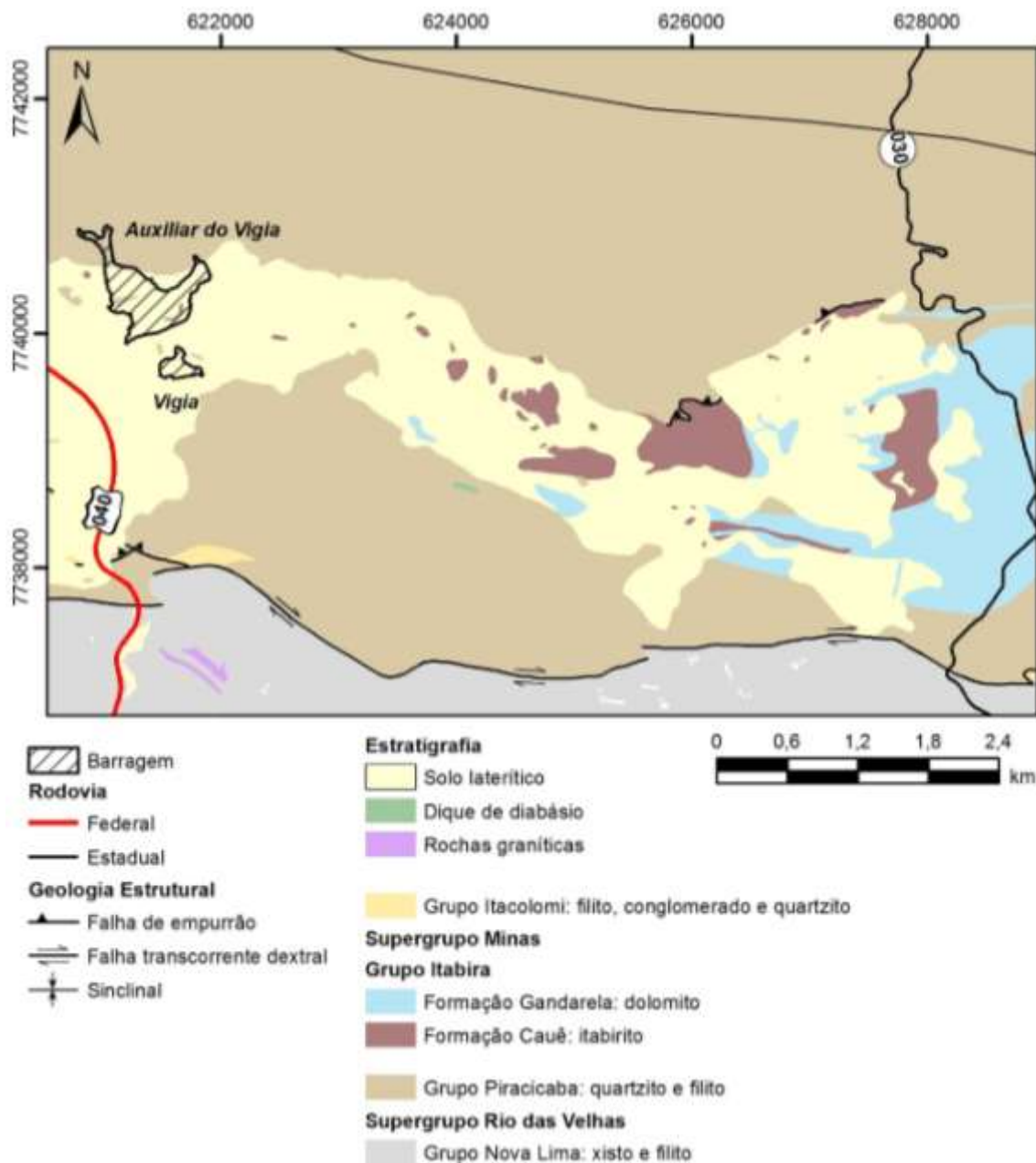


Figura 6.19 - Mapa geológico da região das barragens do Vigia e Auxiliar do Vigia, em Ouro Preto (MG). Fonte: adaptado de Lobato *et al.* (2005).

Em geral as formações superficiais consistem, fundamentalmente, de canga e depósitos aluvio-coluvionares laterizados. Como mais expressiva, cita-se as coberturas lateríticas do flanco nordeste da Serra do Pires, sobre a qual foram edificadas as instalações de beneficiamento da mineração. A altitude média está em torno de 1.020m.

A barragem do Vigia, bem menor que a do Auxiliar do Vigia, também estão instaladas em um sistema de cascata dentro sub-bacia do rio Preto. Essa sub-bacia, formada pela

confluência das águas dos córregos Pires Velho, Água Santa e Buraco dos Lobos, se caracteriza por ser um dos principais tributários da bacia do rio Paraopeba (Tabelas 6.13, 6.14 e Figuras 6.20 e 6.21).

Tabela 6.13 - Compilação de dados hidrográficos da barragem do Vigia, segundo o BDA. Acessado em 2018.

HIDROGRAFIA				
BACIA	SUB-BACIA	ÁGUA BARRADA	CURSO À JUSANTE	LOCALIZAÇÃO HIDROGRÁFICA
rio Paraopeba	rio Preto	córrego do Vigia	rio Preto	D), conforme Figura 5.1
ÁREA DE JUSANTE				
OCUPAÇÃO HUMANA	INTERESSE AMBIENTAL	INSTALAÇÕES	CONCENTRAÇÃO DAS INSTALAÇÕES	DISTÂNCIA DO CENTRO URBANO
Passagem de pessoas ou veículos, povoado e bairro	Curso d'água e descaracterização total da área	Estrada e residência	Baixa	0,36km (Figura 6.21)

Tabela 6.14 - Compilação de dados hidrográficos da barragem Auxiliar do Vigia, segundo o BDA. Acessado em 2018.

HIDROGRAFIA				
BACIA	SUB-BACIA	ÁGUA BARRADA	CURSO À JUSANTE	LOCALIZAÇÃO HIDROGRÁFICA
rio Paraopeba	rio Preto	córrego do Vigia	rio Preto	D), conforme Figura 5.1
ÁREA DE JUSANTE				
OCUPAÇÃO HUMANA	INTERESSE AMBIENTAL	INSTALAÇÕES	CONCENTRAÇÃO DAS INSTALAÇÕES	DISTÂNCIA DO CENTRO URBANO
Passagem de pessoas ou veículos, povoado e bairro	Curso d'água e descaracterização total da área	Barragem, Estrada, Residência	Alta	0,36km



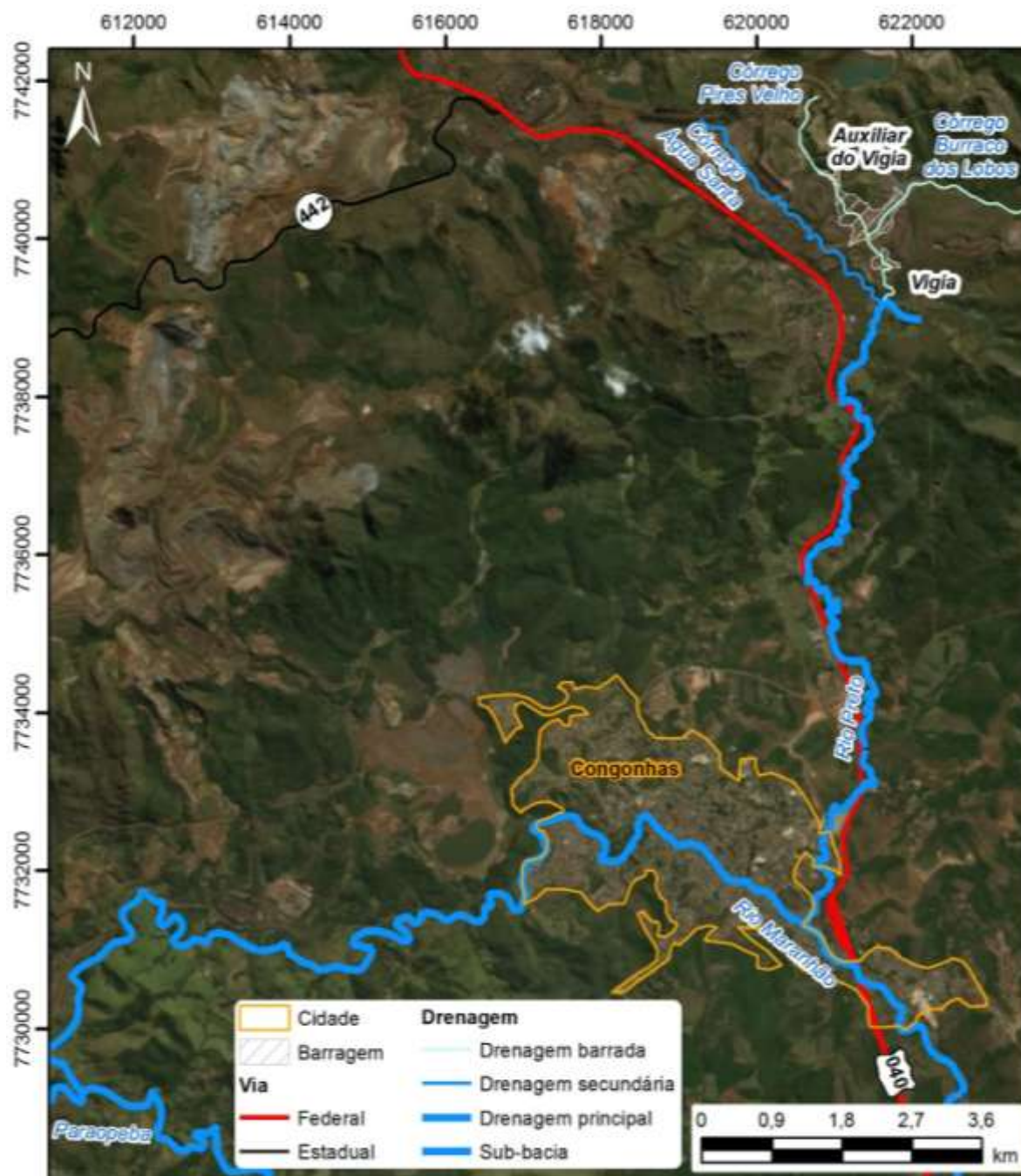


Figura 6.20 - Mapa hidrográfico das barragens Vigia e Auxiliar do Vigia e parte da sub-bacia do rio Paraopeba, no município de Congonhas (MG). Fonte: adaptado de Teixeira (2017).

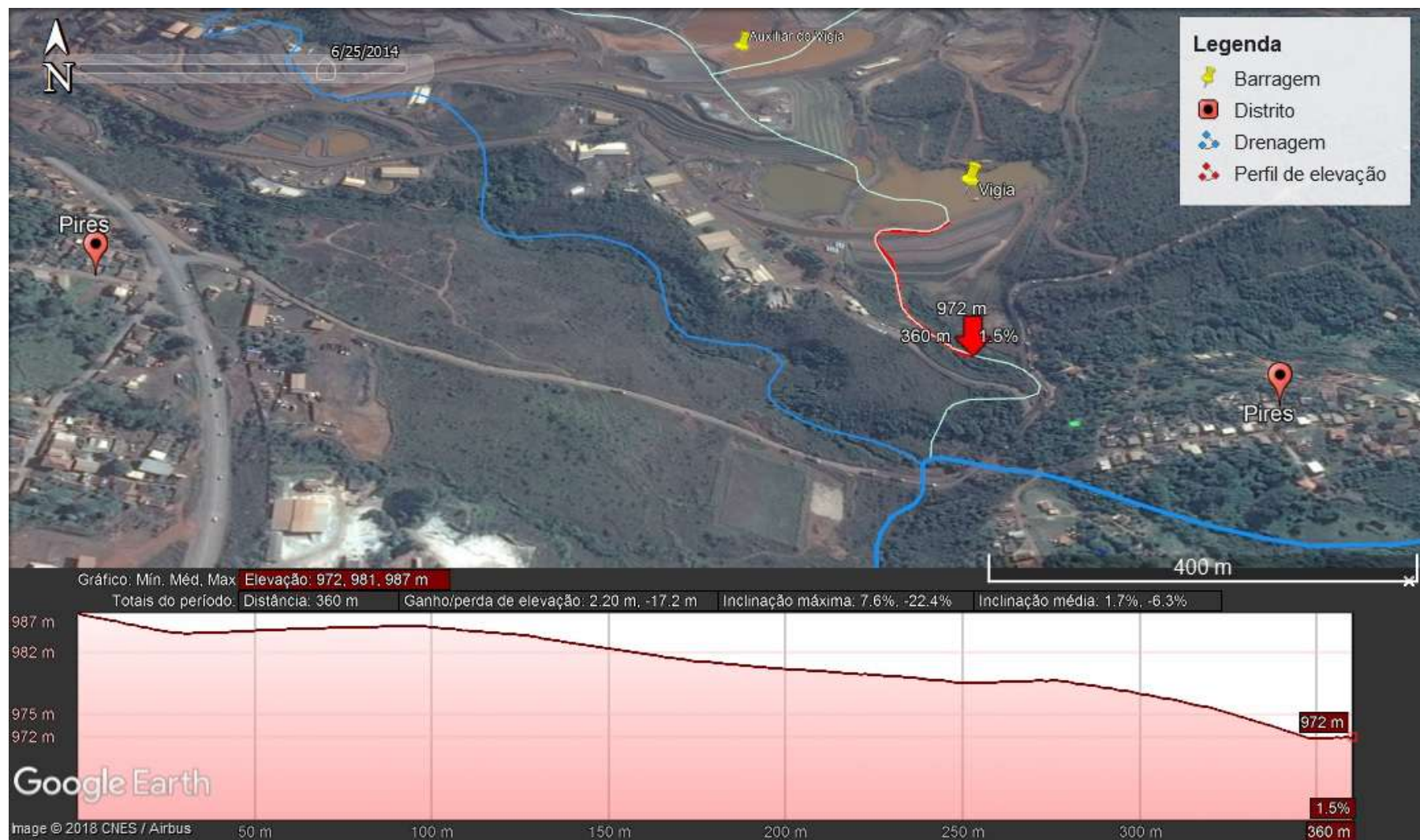


Figura 6.21 - Provável fluxo de lama conforme drenagem da região e o perfil de elevação (ponto mais alto do talude e a ocupação urbana mais próxima), em caso de ruptura das barragens Vigia e Auxiliar do Vigia.

### **6.3. PARÂMETROS DE ANÁLISE**

A partir da compilação e o levantamento de dados da literatura geotécnica, inicialmente foram selecionados, para avaliação das condições de uma barragem de rejeitos de mineração, 9 parâmetros existentes na legislação vigente e seus respectivos atributos. Em seguida, tendo em vista a necessidade de se obter modelos, cada vez mais próximos do real, foram criados ainda mais 4 critérios de análise, os quais sejam:

- ✓ o método construtivo e/ou os tipos de alteamentos realizados nas barragens durante todo o período de operação;
- ✓ a distância horizontal (ou reduzida) em relação à ocupação urbana mais próxima;
- ✓ o(s) tipo(s) de instrumentação existente(s) nessas estruturas e;
- ✓ a localização de cada uma delas dentro da bacia hidrográfica.

### **6.4. DINÂMICA *BRAINSTORMING***

Após a dinâmica do brainstorming e a partir dos dados compilados, foi possível estabelecer uma matriz [A] de comparação (Tabela 6.15), a qual será utilizada para hierarquização dos 13 parâmetros de avaliação pré-estabelecidos. De forma análoga, esse mesmo método de aplicação e verificação de consistência da matriz hierárquica foi realizado aos atributos de cada um dos parâmetros.



Tabela 6.15 - Matriz quadrada para julgamento paritário dos parâmetros de avaliação propostos neste estudo.

Coluna A x Linha A	Altura	Coroamento	Volume	Tempo de recorrência	Impacto ambiental	Impacto socioeconômico	Existência de população	Idade	Material de construção	Método construtivo	Distância da ocupação urbana	Instrumentação	Localização hidrográfica
Altura	<b>1</b>	1	1	1/3	1/5	1/7	1/7	1/3	1/3	1/3	1/7	1/5	1/4
Coroamento	1	<b>1</b>	1	1/2	1/4	1/5	1/7	1/2	1/2	1/3	1/6	1/3	1/4
Volume	1	1	<b>1</b>	1/2	1/6	1/3	1/9	1/2	1/3	1/4	1/7	1/3	1/3
Tempo de recorrência	3	2	2	<b>1</b>	1/4	1/5	1/6	1	1/2	1/2	1/5	1/3	1/2
Impacto ambiental	5	4	6	4	<b>1</b>	1/3	1/3	4	5	3	1/2	3	2
Impacto socioeconômico	7	5	3	5	3	<b>1</b>	1/6	4	6	4	1/2	4	4
Existência de população	7	7	9	6	3	6	<b>1</b>	6	7	6	1	7	4
Idade	3	2	2	1	1/4	1/4	1/6	<b>1</b>	1/2	2	1/4	1/2	1/2
Material de construção	3	2	3	2	1/5	1/6	1/7	2	<b>1</b>	1/2	1/5	1/3	1/3
Método construtivo	3	3	4	2	1/3	1/4	1/6	1/2	2	<b>1</b>	1/5	1/2	1/3
Distância da ocupação urbana	7	6	7	5	2	2	1	4	5	5	<b>1</b>	5	4
Instrumentação	5	3	3	3	1/3	1/4	1/7	2	3	2	1/5	<b>1</b>	4
Localização hidrográfica	4	4	3	2	1/2	1/4	1/4	2	3	3	1/4	1/4	<b>1</b>
<b>TOTAL (soma)</b>	<b>50,0</b>	<b>41,0</b>	<b>45,0</b>	<b>32,3</b>	<b>11,5</b>	<b>11,4</b>	<b>3,9</b>	<b>27,8</b>	<b>34,2</b>	<b>27,9</b>	<b>4,8</b>	<b>22,8</b>	<b>21,5</b>

Em continuidade ao método AHP, primeiramente foi necessário obter a matriz normalizada [A'], isto é, uma derivada da matriz de comparação original [A]. Para isso, portanto, dividiu-se cada termo da matriz inicial pela soma de todos os termos da coluna correspondente e, em seguida, somou-se todos os termos de cada uma das linhas (Tabela 6.16). Os resultados da soma de cada uma dessas linhas foi dividido pelo número total de parâmetros ( $n$ ), neste caso, 13, para obtenção do vetor peso ou autovetor ( $\vec{P}$ ) (Tabela 6.17).

Tabela 6.16 - Matriz normalizada [A'].

[A'] =	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	<b>0,23</b>
	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	<b>0,26</b>
	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	<b>0,25</b>
	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	<b>0,41</b>
	0,10	0,10	0,13	0,12	0,09	0,03	0,08	0,14	0,15	0,11	0,11	0,13	0,09	<b>1,38</b>
	0,14	0,12	0,07	0,15	0,26	0,09	0,04	0,14	0,18	0,14	0,11	0,18	0,19	<b>1,80</b>
	0,14	0,17	0,20	0,19	0,26	0,53	0,25	0,22	0,20	0,21	0,21	0,31	0,19	<b>= 3,08</b>
	0,06	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,04	0,04	0,01	0,07	0,05	0,02	0,02	<b>0,49</b>
	0,06	0,05	0,07	0,06	0,02	0,01	0,04	0,07	0,03	0,02	0,04	0,01	0,02	<b>0,50</b>
	0,06	0,07	0,09	0,06	0,03	0,02	0,04	0,02	0,06	0,04	0,04	0,02	0,02	<b>0,57</b>
	0,14	0,15	0,16	0,15	0,17	0,18	0,25	0,14	0,15	0,18	0,21	0,22	0,19	<b>2,29</b>
	0,10	0,07	0,07	0,09	0,03	0,02	0,04	0,07	0,09	0,07	0,04	0,04	0,19	<b>0,92</b>
	0,08	0,10	0,07	0,06	0,04	0,02	0,06	0,07	0,09	0,11	0,05	0,01	0,05	<b>0,81</b>

Tabela 6.17 - Matriz ou vetor peso.

autovetor ( $\vec{P}$ ) =	0,017
	0,020
	0,019
	0,032
	0,106
	0,139
	0,237
	0,038
	0,038
	0,044
	0,176
	0,071
	0,062

Após a determinação do vetor peso e como mencionado no capítulo anterior, foi realizado a verificação de consistência da matriz de comparação dos 13 parâmetros (julgamentos), por meio de 2 métodos distintos. O primeiro dos métodos, também conhecido por Índice de Consistência (IC), sugere que preliminarmente a matriz inicial [A] seja multiplicada pelo autovetor ( $\vec{P}$ ), obtendo-se assim um novo vetor ( $\vec{AP}$ ), que em seguida foi dividido pelo autovetor ( $\vec{P}$ ) (Tabelas 6.18 e 6.19).

Tabela 6.18 - Multiplicação da matriz [A] pelo vetor peso.

$$\text{matriz [A] x autovetor } (\vec{P}) = \begin{array}{|l} 0,24 \\ 0,28 \\ 0,28 \\ 0,43 \\ 1,54 \\ 2,12 \\ 3,70 \\ 0,52 \\ 0,51 \\ 0,59 \\ 2,61 \\ 1,04 \\ 0,87 \end{array}$$

Tabela 6.19 - Divisão do vetor AP pelo vetor peso

$$\text{Vetor (AP) / autovetor } (\vec{P}) = \begin{array}{|l} 13,58 \\ 13,92 \\ 14,27 \\ 13,37 \\ 14,50 \\ 15,25 \\ 15,62 \\ 13,77 \\ 13,29 \\ 13,58 \\ 14,83 \\ 14,64 \\ 13,85 \end{array}$$

**TOTAL = 184,46**

Em seguida, o somatório de cada um dos termos desse novo vetor foi dividido pelo número total de julgamentos, 13, encontrando-se assim, o autovalor máximo ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) e o Índice de Consistência (IC) da matriz de comparação inicial [A]. Por fim, calculou-se também o Quociente ou a Razão de Consistência, conforme índices randômicos apresentados na Tabela 5.3 (Equações 6.1, 6.2 e 6.3).

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{184,46}{13} = 14,19 \quad (6.1)$$

$$IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n-1} = \frac{14,19 - 13}{13-1} = 0,099 \quad (6.2)$$

$$QC = \frac{IC}{ICA} = \frac{0,099}{1,56} = 0,064 \quad (6.3)$$

Logo, a partir da proposta de Saaty (1991) e dos valores obtidos para IC e QC (menores que 0,1), afirma-se que a matriz de parâmetros pode ser ordenada de forma hierárquica e, principalmente, por consequência, que o vetor peso obtido é considerado aceitável. Ressalta-se que esta hierarquização permitiu estabelecer, dentre todos os critérios escolhidos, qual terá maior influência na determinação do índice de perigo (iP). Nesse sentido, a Tabela 6.20 apresenta os pesos distributivos, de cada um dos parâmetros, em ordem decrescente de relevância.

Tabela 6.20 - Peso distributivo dos parâmetros de avaliação do índice de perigo (iP) de uma barragem.

Parâmetro	Peso
Existência de população	23,68%
Distância da ocupação urbana	17,58%
Impacto socioeconômico	13,88%
Impacto ambiental	10,64%
Instrumentação	7,10%
Localização hidrográfica	6,25%
Método construtivo	4,38%
Material de construção	3,82%
Idade	3,77%
Tempo de recorrência	3,19%
Coroamento	2,03%
Volume	1,93%
Altura	1,75%

Destaca-se, neste caso, o parâmetro "Existência de população" que possui maior vetor de prioridade e logo, por consequência, apresentará maior impacto na avaliação. Por outro lado, vê-se que o parâmetro "Altura", já não influenciará tanto na determinação do índice de perigo (iP) (Figura 6.22).

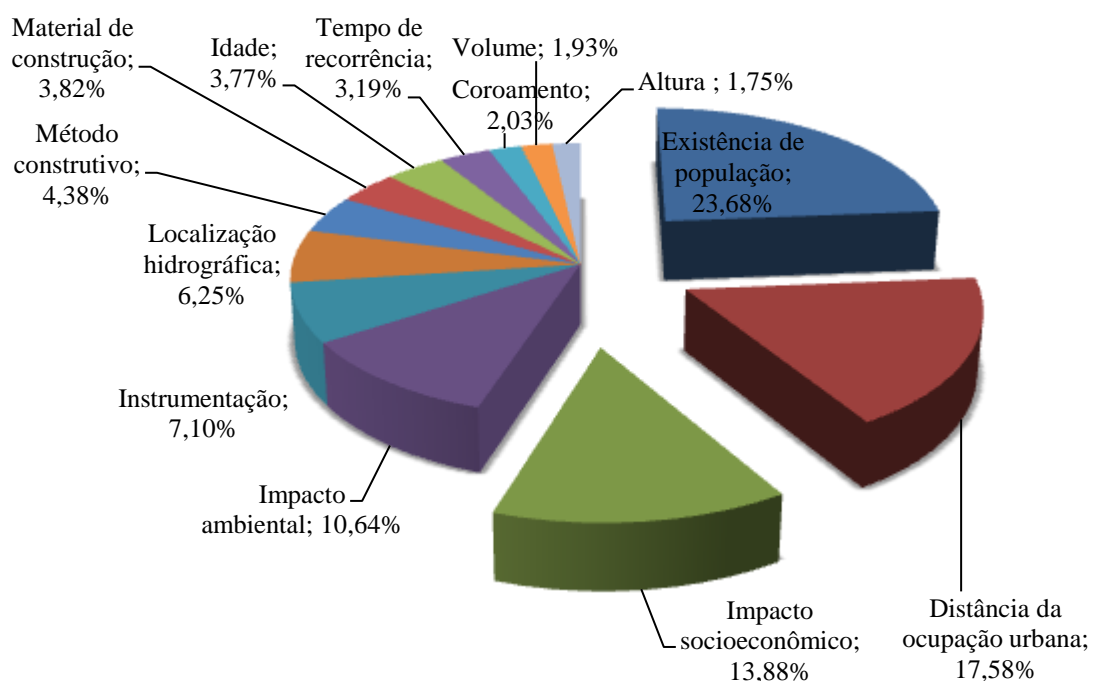


Figura 6.22 - Gráfico com os pesos distributivos com destaque para os 3 parâmetros de maior relevância.

## 6.5. QUANTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DO ÍNDICE DE PERIGO (IP)

Para a quantificação do índice de perigo (iP), primeiramente foram utilizados os parâmetros e os atributos mais relevantes na pesquisa, pré-estabelecidos na 1ª etapa do trabalho (Tabela 6.20). Em seguida, foi necessário estimar o quanto e de que forma, por meio também de notas (em uma escala de 0 a 10), tais parâmetros contribuirão para a avaliação da estrutura de contenção.

Destaca-se que a maioria dessas notas, especialmente as dos 9 primeiros parâmetros, foram obtidas na etapa de inicial, caracterizada pela compilação bibliográfica. Já os pesos dos 4 últimos parâmetros (e respectivos atributos), foram determinados por meio da dinâmica *brainstorming* supracitada, a qual contou com a experiência e o conhecimento técnico de especialistas da área geotécnica (Tabela 6.21).

Tabela 6.21 - Parâmetros e atributos de análise e suas respectivas notas. (continua)

	PARÂMETRO DE ANÁLISE	NOTAS	ATRIBUTO
1	Altura	0	Altura $\leq$ 15m
		1	15m < altura < 30m
		4	30m $\leq$ altura $\leq$ 60m
		7	altura > 60m
2	Extensão longitudinal do coroamento (crista)	0	comprimento $\leq$ 50m
		1	50m < comprimento < 200m
		4	200m $\leq$ comprimento $\leq$ 600m
		7	comprimento > 600m
3	Impacto ambiental	2	Pouco significativo (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APP's, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT)
		6	Significativo (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APP's, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT)
		8	Muito significativo (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT)
		10	Muito significativo agravado (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I- Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT)

Tabela 6.21 - Parâmetros e atributos de análise e suas respectivas notas. (continuação)

4	Impacto socioeconômico	0	Inexistente (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem)
		1	Baixo (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem)
		3	Médio (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem)
		5	Alto (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infraestrutura de relevância socioeconômico-cultural na área afetada a jusante da barragem)
5	Existência de população à jusante	1	Inexistente (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área a jusante da barragem)
		3	Pouco frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local)
		5	Frequente (não existem pessoas ocupando permanentemente a área a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas)
		10	Existente (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas)
6	Volume	3	Pequeno: $500.000\text{m}^3 < \text{volume} \leq 5.000.000\text{m}^3$
		5	Médio: $5.000.000\text{m}^3 < \text{volume} \leq 25.000.000\text{m}^3$
		7	Grande: $25.000.000\text{m}^3 < \text{volume} \leq 50.000.000\text{m}^3$
		10	Muito grande: $\text{volume} > 50.000.000\text{m}^3$
7	Tempo de recorrência ou Vazão de projeto (sistema extravasor)	1	Decamilenar ou CMP (Cheia Máxima Provável) - TR = 10.000 anos
		2	Milenar - TR = 1.000 anos
		4	TR = 500 anos
		10	TR < 500 anos ou Desconhecida / Estudo não confiável
8	Idade (Tempo de operação)	0	> 30 anos
		1	entre 10 e 30 anos
		2	entre 5 e 10 anos
		3	< 5 anos ou > 50 anos ou sem informação
9	Tipo de barragem quanto ao material de construção	4	Concreto
		6	Alvenaria de pedra / Concreto rolado
		8	Terra enrocamento
		10	Terra
10	Método construtivo e/ou tipos de alteamentos	1	Linha de centro
		2	À jusante
		3	À montante
		4	2 ou mais processos diferentes
11	Distância (d) horizontal ou reduzida da ocupação urbana	3	$d > 5\text{km}$
		5	$1,5\text{km} < d \leq 5\text{km}$
		8	$0,5\text{km} < d \leq 1,5\text{km}$
		10	$d \leq 0,5\text{km}$

Tabela 6.21 - Parâmetros e atributos de análise e suas respectivas notas. (conclusão)

12	Instrumentação na barragem (tipos)	1	medidor de nível d'água, piezômetro, medidor de vazão, marco de superfície e batimetria
		2	medidor de nível d'água, piezômetro, medidor de vazão e marco de superfície
		3	medidor de nível d'água, piezômetro e medidor de vazão
		4	medidor de nível d'água e piezômetro
13	Localização na bacia hidrográfica	2	Uma única barragem instalada sobre o córrego (ou ribeirão)
		5	Uma única barragem instalada sobre a drenagem principal da região
		7	Duas ou mais barragens instaladas sobre córregos (ou ribeirões) diferentes, porém na mesma bacia
		10	Duas ou mais barragens instaladas (em cascata) sobre o mesmo córrego (ou ribeirão) e mesma sub-bacia

Ressalta-se que para o critério "Impacto ambiental", foi utilizado a nota 10 à todas as estruturas, uma vez que todas as barragens recebem rejeitos da mineração de ferro, resíduos sólidos classificados como "Classe I- Perigoso" pela NBR 10004 da ABNT. Salienta-se também que a etapa de conferência de decisões não pôde ser realizada de forma tão desejável, em virtude da ausência de alguns dos especialistas/colaboradores nessa dinâmica.

Assim, estabelecidos todos os parâmetros ( $P_i$ ) e notas/pesos dos atributos ( $At_i$ ), conforme Equação 6.4 e demonstração para a barragem de Fundão, teve início a etapa de cálculos para quantificação dos índices de perigo (iP). Os resultados dessa quantificação (iP) são apresentados na Tabela 6.22, em ordem decrescente, isto é, das contenções mais perigosas às menos perigosas. Ressalta-se que os dados foram obtidos por meio da Equação (6.4).

$$iP = \sum_{i=1}^n (P_i \times At_i) \times 100 \quad (6.4)$$

Sendo:

$n$  - número de parâmetros em análise;

$P_i$  – peso do parâmetro de potencial em porcentagem para ocorrência de ruptura em barragens de rejeitos obtido por meio da AHP;

$At_i$  – nota da potencialidade do atributo para ocorrência de ruptura das barragens de rejeitos.

É válido destacar os valores máximo e mínimo, respectivamente,  $iP = 618,5$  de Fundão e  $iP = 446,5$  da barragem do Doutor, sendo o maior deles justificados pela relevância da existência de população à jusante. Como exemplo didático, foi demonstrado o cálculo do índice de perigo ( $iP$ ) para a barragem de Fundão, antes de sua ruptura.

$$iP_{Fundão} = [(1,75\% * 7) + (2,03\% * 7) + (1,93\% * 10) + (3,19\% * 1) + (10,64\% * 10) + (13,88\% * 3) + (23,68\% * 10) + (3,82\% * 2) + (3,77\% * 8) + (4,38\% * 4) + (17,58\% * 3) + (7,10\% * 2) + (6,25\% * 10)] * 100$$

$$iP_{Fundão} = 618,5$$

Tabela 6.22 - Ordem decrescente dos índices de perigo ( $iP$ ), conforme vetor peso e nota de potencialidade.

PARÂMETROS	$P_i$	Fundão ( $Pp_i$ )	Auxiliar do Vigia e Vigia ( $Pp_i$ )	Casa de Pedra ( $Pp_i$ )	Itabiruçu ( $Pp_i$ )	Maravilhas II ( $Pp_i$ )	Doutor ( $Pp_i$ )
Altura	1,75%	7	4	7	7	7	7
Coroamento	2,03%	7	4	7	7	7	7
Volume	1,93%	10	5	5	10	10	7
Tempo de recorrência	3,19%	1	4	1	1	4	1
Impacto ambiental	10,64%	10	10	10	10	10	10
Impacto socioeconômico	13,88%	3	5	5	5	1	1
Existência de população	23,68%	10	3	5	3	3	3
Idade	3,82%	2	1	1	0	1	1
Material de construção	3,77%	8	8	10	10	10	10
Método construtivo	4,38%	4	3	4	2	2	4
Distância ocupação urbana	17,58%	3	10	8	8	8	5
Instrumentação	7,10%	2	4	1	2	2	3
Localização hidrográfica	6,25%	10	10	2	7	7	7
<b>TOTAL</b>	<b>-</b>	<b>77</b>	<b>71</b>	<b>66</b>	<b>72</b>	<b>72</b>	<b>66</b>
<b>(iP)</b>	<b>x 100</b>	<b>618,5</b>	<b>598,2</b>	<b>552,8</b>	<b>540,9</b>	<b>498,7</b>	<b>446,5</b>

O índice de perigo tem o intuito de destacar os pontos em uma área, região ou extensão, com maior possibilidade de problemas de origem geológico-geotécnica, além dos aspectos sociais e ambientais. O índice facilita a indicação de alerta dos pontos à serem tratados e/ou que necessitam passar por algum tipo de manutenção e prevenção.



Dessa forma, torna-se de suma importância também a classificação desses resultados obtidos. Como exposto anteriormente, para tanto foi adotado o método de fatiamento estatístico, por meio da média aritmética ( $\bar{X}$ ) e do desvio padrão ( $s$ ), respectivamente, Equações 6.5 e 6.6.

$$\bar{X} = 542,6 \quad (6.5)$$

$$s = 63,5 \quad (6.6)$$

Dessa forma, o  $iP$  para situações hipotéticas de ruptura das barragens de rejeitos foram classificados na seguintes faixas: baixo, médio e alto grau de perigo, segundo o conjunto de estruturas selecionadas (Tabela 6.23):

Tabela 6.23 - Classificação do grau de perigo, conforme valores do  $iP$  obtidos.

Índice de perigo	Grau de perigo
$iP < 510,8$	Baixo
$510,8 \leq iP \leq 574,3$	Médio
$iP > 574,3$	Alto

Em seguida a determinação das 3 faixas de distribuição, as barragens alvo de estudo desse trabalho, foram classificadas quanto ao seu grau de perigo e distinguidas pelas cores vermelho, amarelo e verde, conforme apresentado na Tabela 6.24. Por fim, foram elaborados também dois mapas de perigo, um para cada bacia hidrográfica estudada nesse trabalho, os quais apresentam a localização e a classificação de cada uma das barragens em um Sistema de Informações Geográficas (Anexos II e III).

Tabela 6.24 - Classificação das barragens de rejeito alvo de estudo desse trabalho.

Barragem	Grau de Perigo
Fundão	Alto
Vigia e Auxiliar do Vigia	Alto
Casa de Pedra	Médio
Itabiruçu	Médio
Maravilhas II	Baixo
Doutor	Baixo

Analisando-se o estudo obtido em Casa de Pedra, por exemplo, ressalta-se ainda a importância do método AHP. Vê-se que o somatório simples dos pesos ponderados (Tabela 6.8), em um total de 66, poderia resultar em uma classificação de baixo grau de perigo (assim como a barragem Doutor). Entretanto, com o uso da metodologia proposta, mostrou que esta foi situada em outra faixa de classificação, ou seja, como de médio grau de perigo. Apesar de não ser possível afirmar que se trata do melhor método existente, os testes de consistência desse tipo de matriz (IC e QC menores que 10%) podem garantir resultados mais condizentes.

Oportunamente, faz-se o alerta para a última classificação de risco, de dezembro de 2016, do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), por meio do Cadastro Nacional de Barragens de Mineração. Neste documento todas as barragens supracitadas (incluindo a de Fundão até o seu rompimento) são identificadas como de baixo risco e de classe C, em uma escala variando de A e E. Entretanto, especialmente nos casos de Fundão, Vigia e Auxiliar do Vigia, Casa de Pedra e Itabiruçu, conforme os parâmetros de avaliação desse trabalho, observa-se que elas foram identificadas como de médio ou alto grau de perigo.

Analisando os resultados obtidos pela classificação do (iP) e a classificação dessas barragens segundo o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), percebe-se que a Resolução de 2012 aponta uma classificação quanto à categoria de risco, ao dano potencial associado e pelo volume do reservatório. Dada a comparação dos resultados, deve-se considerar as seguintes questões:

✓ A classificação do CNRH usa o conceito "risco" de forma negligente, uma vez que a Equação 3.1 não apresenta dados relativos às consequências e aos danos, ou mesmo, vulnerabilidade, em caso de um acidente geotécnico. Vê-se ainda que a classificação dos danos potenciais associados é dada de forma independente, conforme apresentado na "Tabela 3.8 - Quadro de classificação quanto ao dano potencial associado (DPA)". Logo, essa Equação (3.1) expressa, na verdade, também o perigo de ruptura segundo o Plano Nacional de Segurança de Barragens. Dessa forma, entende-se que os dois dados, podem ser comparados;

✓ As Tabelas 3.4, 3.5 e 3.6 para classificação do CNRH apresenta as notas dos aspectos da própria barragem que podem influenciar na ocorrência de acidentes geotécnicos. Notou-se que esta quantificação não apresenta critérios de contorno e foram estabelecidas de forma heurística, ou seja, intuitivamente a partir das características gerais da estrutura. Um exemplo disso, é visto na notas atribuídas aos parâmetros "Altura" e "Comprimento" (coroamento da barragem), para a classificação em função das características técnicas (CT). Foram definidos a mesma nota, também para a "Vazão de projeto" (Tabela 3.4);

✓ Já o índice de perigo (iP) possui uma relação entre os parâmetros e atributos a partir do método AHP, que estabelece pesos a partir da relevância de cada um deles no processo de análise do perigo de ruptura de barragens. Nesse sentido, cita-se como exemplo, os parâmetros "Altura" com importância igual a 1,75%, "Coroamento" no valor de 2,03% e "Tempo de recorrência" com influência de 3,19%. Dessa forma, o método proporciona também menores índices de incertezas para as classificações e os pesos dados;

✓ Nota-se que na classificação utilizada pelo CNRH (Brasil, 2012) (Tabelas 3.7 e 3.9), quanto à categoria de risco e danos potenciais associados à essas estruturas, para que sejam alcançados os resultados mais críticos (risco alto), é necessário que as barragens estejam em condições precárias ou praticamente na iminência de ruptura. Já o iP, por possuir uma sensibilidade maior dos seus parâmetros e atributos, consegue apontar, de forma preventiva, o perigo quanto ao Plano Nacional de Segurança de Barragens.

Neste sentido, tendo em vista o acidente ocorrido na barragem de Fundão, em Mariana (MG), e os resultados alcançados com essa pesquisa, destaca-se a importância de estudos para avaliação do perigo, além de medidas efetivas que garantam a segurança de todos.

# CAPÍTULO 7

---

## 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A elaboração desse trabalho teve como propósito principal a criação de uma metodologia que pudesse auxiliar no gerenciamento e na avaliação de riscos oferecidos por uma barragem de rejeitos de mineração. Por se tratar de uma atividade industrial de extrema relevância e tão praticada no Brasil, principalmente pelo seu importante papel econômico, a garantia de estabilidade geotécnica dessas estruturas tem se tornado cada vez mais imprescindível para sua existência. Mais uma vez, destaca-se a necessidade de que sejam minimizados todos os impactos e as consequências associadas à esses processos, sejam eles sociais, ambientais ou econômicas.

Recorda-se que as informações obtidas, por meio da parceria com a Fundação de Meio Ambiente (FEAM) do Estado de Minas Gerais, foram extraídas dos documentos mais recentes disponíveis em seu banco de dados, os quais, todavia, podem ter sido elaborados em momentos diferentes.

### 7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Assim, ante aos fatos expostos, concluí-se que o Processo de Análise Hierárquica (AHP) se adéqua à este e outros estudos, uma vez que possui uma série de características relevantes que poderão facilitar a sua execução, as quais destacam-se:

- ✓ tratar-se de um processo de decisão estruturado e que pode ser repetido quantas vezes forem necessárias (conferência de decisão);
- ✓ a aplicação tanto em situações que envolvem julgamentos subjetivos, por exemplo nas metodologias qualitativas, como nas análises quantitativas;
- ✓ a possibilidade de estabelecer-se um objetivo central para o problema em foco;

✓ a existência de vários estudos que envolvem essa metodologia, os quais poderão sustentar os resultados obtidos neste trabalho e, conseqüentemente, servindo como referência na literatura geotécnica e futuras aplicações;

✓ a garantia de verificação das matrizes de comparação (julgamentos) por meio do índice e da razão de consistência;

✓ a viabilidade de aplicação em grupos de decisão, o que pode ser de grande valia para empresas, por exemplo, as do ramo de mineração.

Por outro lado, como limitações da dinâmica *brainstorming* e do método AHP, observou-se:

✓ o número limite de parâmetros na comparação paritária, definido como número máximo de 15 (Saaty, 1991);

✓ a discrepância, por parte dos especialistas da área, entre alguns julgamentos para um mesmo parâmetro. Essa divergência pode ser justificada, entre outros motivos, pelas diferentes formações dos profissionais envolvidos e, conseqüentemente, pelas diferentes percepções geotécnicas;

✓ por consequência, a dificuldade em se atingir o índice e a razão de consistência iguais ou inferior a 10% (verificação de consistência da matriz de comparação) a medida que se aumenta o número de critérios na comparação paritária.

Os dados obtidos durante a etapa de atribuição de pesos, ressalta que as alternativas criadas para este tipo de análise não tiveram nenhum tipo de preferência ou vícios por parte dos especialistas. Nesse sentido, como era de se esperar, os parâmetros para existência e de distância das barragens, que envolvem a possibilidade de perdas humanas, também foram identificados como de maior relevância nessa avaliação.

É válido destacar também a antiga barragem de Fundão, da Samarco Mineração S.A., a qual apresentou o maior índice de perigo nesse trabalho, segundo os dados divulgados em outubro de 2013 e a comparação com o restante das unidades avaliadas. O resultado obtido, associado ao rompimento dessa barragem em 2015, permite concluir, mais uma vez, que a metodologia proposta mostrou-se eficaz e com viabilidade prática, podendo ainda ser útil às empresas do ramo de mineração.

Por meio de análises multivariadas e algumas ferramentas estatísticas, foi possível hierarquizar, em escalas (baixo, médio e alto) de perigo, as barragens foco de estudo desse trabalho. Esse tipo de hierarquização, conseqüentemente, permitirá a avaliação de causas e de estudos de prevenção e de ações mitigadoras que possam minimizar possíveis acidentes.

## **7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Nesse sentido, esse trabalho, por se tratar apenas de uma proposta metodológica, poderá servir como base para futuras pesquisas, as quais:

- ✓ incluem novos parâmetros de análise e pesos ponderais e modelos que melhores se adéquem ao desenvolvimento do estudo para diminuição ainda mais do índice de incerteza;

- ✓ a continuidade da aplicação do índice de perigo (iP) nas demais barragens do Quadrilátero Ferrífero (QF), como sugestão de critério e análise comparativa à classificação dada pelo Cadastro Nacional de Barragens de Mineração;

- ✓ investimentos em processos efetivos de Sistema de Informação Geográfica (SIG), a partir da criação de um banco de dados georreferenciados, com o objetivo de desenvolver um sistema dinâmico para o mapeamento do índice de perigo de rupturas em barragens de rejeito da mineração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. 1999. *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58(1): 21-44.

ALKMIM, F. F.; MARSHAK S. 1998. The Transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic collision and collapse in the Southern São Francisco Craton region. *Precambrian Research*, 90: 29-58.

ALMEIDA, F. F. M. 1977. O Cráton de São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, 7(4): 349-364.

ALMEIDA, L. G. 2015. Análise petrográfica, mineralógica e geoquímica de amostras de itabirito da mina de Conta História, Quadrilátero Ferrífero, Mariana – Minas Gerais. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Geologia.

ALMEIDA, L. G.; CASTRO, P. T.; ENDO, I.; FONSECA, M. A. 2005. O Grupo Sabará no Sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: Uma Revisão Estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*. 35(2): 177-186.

ANA. 2012. Agência Nacional de Águas. Previsão de Eventos Críticos na Bacia do Rio Paraíba do Sul, R 06 – Estudos de Ruptura de Barragens. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. Brasília. 113p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 10.004. Classificação de Resíduos.

AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L. E. S.; AMENOMORI, C. J. 1990. Riscos geológicos: aspectos conceituais. In: Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano, 1, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, 334-341.

BAASCH, S. S. N. 1995. Um sistema de suporte multicritério aplicado na gestão dos resíduos sólidos nos municípios catarinenses. Tese de Doutorado, Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

BABINSKI, M.; CHEMALE, F. Jr.; VAN SCHMUS, W. R. 1995. The Pb/Pb age of the Minas supergroup carbonate rocks, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Precambrian Research*, 72: 235-245.

BALTAZAR, O. F.; ZUCCHETTI, M. 2007. Lithofacies associations and structural evolution of the Achaean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. *Ore Geology Reviews* 32: 471–499.

BARELLA, C. F. 2016. Abordagens estatísticas aplicadas ao mapeamento de susceptibilidade a movimentos de massa: análise de diferentes técnicas no contexto do quadrilátero ferrífero. Tese de Doutorado, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 253p.

- BERNHARDSEN, T. 1999. Geographic information systems: an introduction. New York: Wiley.
- BEUKES, N. J. 1984. Sedimentology of the Kuruman and Griquatown Iron-Formations, Transvaal Supergroup, Griqualand West, South Africa. *Precambrian Research*, 24: 47-84.
- BRASIL. 2010. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais. Brasília.
- BRASIL. 2012. Resolução nº 143, de 10 de junho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume. Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). Brasília.
- BRAUNSCHWEIG, T.; BECKER, B. 2004. Choosing research priorities by using the analytic hierarchy process: an application to international agriculture. *R & D Management [S.I.]*, v. 34, n. 1, 77-86.
- BURROUGH, P.A. 1986. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Oxford, Clarendon Press. 193p.
- CARRARA, A.; CARDINALI, M.; GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P. 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135–175.
- CBDB. 2014. Comitê Brasileiro de Barragens. *Revista Brasileira de Barragens*. 1ª edição. Rio de Janeiro, 60p.
- CBHSF. 2015. Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco 2016-2025, RP1A - Diagnóstico da Dimensão Técnica e Institucional. Volume 2: Caracterização da bacia hidrográfica - 2ª parte. Salvador, 26 de agosto de 2015, 214p.
- CHAN, A. H. S.; KWOK, W. Y.; DUFFY, V. G. 2004. Using AHP for determining priority in a safety management system. *Industrial Management & Data Systems*, v. 104, n. 5, 430–445.
- CNPGB. 2005. Grupo de Trabalho de Análise de Riscos em Barragens: 1º Relatório de Progresso (Janeiro 2005), Lisboa: Comissão Nacional Portuguesa de Grandes Barragens.
- COPAM. 2005. CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação Normativa nº 87. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17/12/2002. *Lex: Diário do Executivo - Minas Gerais*.
- CORTELETTI, R. C. 2014. Proposta de metodologia para análise de risco geológico – geotécnico em ferrovias: Estudo de caso: Estrada de Ferro Carajás (EFC). Tese (Doutorado) Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. UFOP. Ouro Preto, 135p.
- CORTELETTI, R. C.; FILGUEIRAS, R. A. C. 2015. Projeto de contenção da encosta



do morro do itararé - Associação dos Funcionários da Baixada Santista. São Vicente, SP. Vale Fertilizantes. 180p.

CORTELETTI, R. C.; FILGUEIRAS, R. A. C. 2016. Identificação e análise de áreas de instabilidade geotécnica, ao longo do reservatório da UHE (Usina Hidrelétrica Eliezer Batista) Aimorés, MG.

CRUZ, P. T. 1996. 100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção projeto. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos. 648p.

DAI, F. C.; LEE, C. F. 2001. Frequency – volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology* 59 (3/4), 253 – 266.

DONASSOLLO, A.; CORTELETTI, R. C.; GOMES, R. C. 2017. Identificação de pontos de perigo de movimentos de massa utilizando o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Estudo de caso: rodovia RS-115, Taquara - Gramado, RGS. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, 2017, Florianópolis. Anais COBRAE.

DORR II J. V. N. 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. USGS/DNPM. Professional Paper 641-A. 110p.

ERIKSSON, K. A. 1983. Siliciclastic-hosted iron-formations in the early Archean Barberton and Pilbara Sequences. *Journal of the Geological Society*, 30: 473-482.

FARIA, D. G. M. 2011. Mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas precárias brasileiras com a incorporação do Processo de Análise Hierárquica (AHP). Tese (Doutorado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 194p.

FEAM. 2014. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Inventário de barragem do Estado de Minas Gerais - ano 2014. Belo Horizonte. 44p.

FELL, R. 1994. Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*. Canadá, v.31, 261-272.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A .T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. 2001. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. In: *Revista Brasileira de Geomorfologia*, vol.2, n.1. União da Geomorfologia Brasileira, 51-71.

FUCKNER, M. A. 2013. Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia Hidrográfica do Doce. Agência Nacional de Águas. Coordenação de Conjuntura e Gestão da Informação. Brasília.

GEOESTÁVEL CONSULTORIA E PROJETOS. 2012. Declaração de Condição de Estabilidade do ano 2012 da Disposição de rejeitos no Vale do Córrego do Fundão. - Unidade Germano - Complexo Minerador Germano-Alegria, Mariana/MG. Belo Horizonte: Samarco. 6 p. Relatório.

GLADE, T.; CROZIER, M. J. 2005. A review of scale dependency in landslide hazard

and risk analysis. In: Landslide hazard and risk (T. Glade, M. Anderson, J.M. Crozier, Eds.). John Willey & Sons, Chichester, 75-138.

GRANDZOL, J. R. 2005. Improving the Faculty Selection Process in Higher Education: a case for the analytic hierarchy process. *IR Applications*, v. 6, 13p.

GREGORETTI, C.; MALTAURO, A.; LANZONI, S. 2010. Laboratory Experiments on the Failure of Coarse Homogeneous Sediment Natural Dams on a Sloping Bed. *Journal Of Hydraulic Engineering, Tennessee*, v. 136, n. 11, p.868-879, nov. 2010.

HARTFORD, D.N.D. 1999. Emerging principles and practices in dam risk management. In: *Proceedings of the International Workshop on Risk Analysis in Dam Safety Assessment*, Taipei, Taiwan.

HARTFORD, D. N. D.; BAECHE G. B. 2004. *Risk and uncertainty in dam safety*. London: Thomas Telford Publishing. 391p.

HSE. 1995. Health and Safety Executive. *Generic Terms and Concepts in the Assessment and Regulation of Industrial Risks*, Health and Safety Executive Discussion Document DDE2, HSE Books.

HSE. 2001. Health and Safety Executive. *Reducing risks, protecting people*. Norwich: Her Majesty's Stationery Office. 74p.

HUANG, B. 2004. A GIS-AHP Method for HAZMAT Route Planning with consideration of Security. *Environmental Informatics Archive*. Volume 2, 814-830.

IBGE. 2015. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Cidades@*. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br>>.

ICOLD, 2005. Risk assessment in dam safety management, A reconnaissance of benefits, methods and current applications. *International Commission On Large Dams: Bulletin 130*.

IFRC. 2011. International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies. *World Disaster Report*. Genebra. 1–251.

JTC32. 2004. *Technical Committee on Risk Assessment and Management Glossary of Risk Assessment Terms*. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). Version 1.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. 1976. *Decisions with Multipleobjectives: Preferences and Value Tradeoffs*. New York, USA: Ed. John Wiley & Sons.

LOBATO, L. M.; BALTAZAR, O. F.; REIS, L. B.; ACHTSCHIN, A. B.; BAARS, F. J.; TIMBÓ, M. A.; BERNI, G. V.; MENDONÇA, B. R. V. ; FERREIRA, D. V. 2005. *Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa*. Belo Horizonte: CODEMIG.

LOPES, E. E. 2009. *Proposta Metodológica para Validação de Imagens de Alta Resolução do Google Earth para a Produção de Mapas*. 2009. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

- LOZANO, F. A. L. 2006. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- MACHADO, N., SCHRANK, A. NOCE, C. M., GAUTHIER, G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a transamazonian foreland basin in Quadrilitero Ferrifero, Southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters*. 14: 259-276.
- MELO, A. V. 2014. Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 168p.
- MIN. 2002. Ministério da Integração Nacional. Manual de Segurança e Inspeção de Barragens – Brasília: Secretaria de Infraestrutura Hídrica (SIH), 148p.
- OLAYA, V. 2011. *Sistemas de Informacion Geografica*. Madrid. 5-30.
- ONU. 2004. *Living with Risk. A global review of disaster reduction initiatives*. Inter-Agency Secretariat International Strategy for Disaster Reduction (ISDR). Genebra, Suíça, <[www.unisdr.org](http://www.unisdr.org)>, 152p.
- PEREIRA, E. L. 2005. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. Dissertação de Mestrado NUGEO/UFOP.
- PEREIRA, R. A. 2010. Aplicação do método AHP na redução de multas em empresas de telecomunicações. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 100p.
- QFE-2050. 2009. Quadrilátero Ferrífero: Centro de estudos avançados [DEGEO/EM/UFOP]. Desenv.: Optilog. Disponível em: [www.qfe2050.ufop.br/](http://www.qfe2050.ufop.br/). Acessado em: 17/02/2017.
- RENGER, F. E., Noce C. M., ROMANO, A. W., MACHADO, N. 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 2(1): 1-11.
- ROCHA, F. F. 2015. Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 200p.
- ROMANO, R.; LANA C.; ALKMIM F. F.; STEVENS, G.; ARMNSTRONG, R. 2013. Stabilization of the southern portion of the Sao Francisco craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Precambrian Research*, 224: 143-159.
- SAATY, T. L. 1980. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hil. 287p.
- SAATY, T. L. 1991. Método de análise hierárquica. São Paulo: McGraw-Hill.
- SAATY, T. L. 2000. *Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process*. RWS. Pittsburg.
- SALAMUNI, E.; STELLFELD, M. C. 2001. Banco de dados geológicos georeferenciados da bacia sedimentar de Curitiba (PR) como base de Sistema de

Informação Geográfica (SIG). Boletim Paranaense de Geociências. Editora da UFPR. n. 49, 21-31.

SCHEMBRI, G. P. R. 2016. Análise do potencial de risco e classificação das barragens de rejeito da mineração no estado de Minas Gerais. Revista Científica Semana Acadêmica. Fortaleza, ano MMXVI, Nº. 000085.

SHERARD, J. L.; WOODWARD, R. J.; GIZIENSKI, S. F. 1963. Earth and EarthRock Dams – Engineering Problems of Design and Construction. John Wiley and Sons, New York.

SILVA, D. F. S. 2017. Avaliação do alcance de deslizamentos em função da geometria da encosta. Estudo de caso: estrada de Ferro Vitória-Minas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. 193p.

SILVA, E. C. 2009. Gestão integrada para identificação e análise dos riscos. In: XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador/BA. 14p.

SOBREIRA, F. G. Susceptibilidade a Processos Geológicos e suas Consequências na Área Urbana de Mariana, MG. Geo.br 1, 43-60.

SOETERS, R.; VAN WESTERN, C. J. 1996. *Slope instability recognition, analysis, and zonation*. Landslides: Investigation and Mitigation, A.K. Turner & R.L. Shuster (eds.), Transportation Research Board, National Research Council, special Report 247, 129-177.

STAR. J; ESTES. J. 1990. Geographic Information Systems: An Introduction. Prentice-Hall.

TEIXEIRA, A. A. 2017. Base Hidrográfica Ottocodificada da Bacia do Rio São Francisco. Agência Nacional de Águas. Coordenação de Conjuntura e Gestão da Informação. Brasília.

VANACÔR, R. N. 2006. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 132p.

VAN WESTEN, C.J.; RENGERS, N.; TERLIEN, M.T.J.; SOETERS, R. (1997) Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. Geol Rundsch 86(2):404–414

VARNES, D. J. 1984. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. Unesco, Paris.

VIANNA, L. F. V. 2015. Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens: auxílio ao processo de tomada de decisão. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

VIVIANI, E.; MANZATO, G. G. 2005. Geração de modelos digitais de superfície por meio de plataformas computacionais com estrutura vetorial e raster. Ciencia y

Engenharia/ Science and Engineering Journal, v. 14, n. 2, 27-33.

XIONG, Y. 2011. A Dam Break Analysis Using HEC-RAS. Journal Of Water Resource And Protection. Mississippi, 370-379.

WOLFF, C. S. 2008. O método AHP – revisão conceitual e proposta de simplificação. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 138p.

ZUFFO, M. S. R. 2010. Análise de risco em barragens: um índice de priorização. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 286p.

## **ANEXOS**

---



---

## ANEXO I

Formulário para realização da dinâmica *brainstorming*

---



Nome do(a) avaliador(a):

Formação (Graduação):Nível de escolaridade:

Cargo/Função:Empresa:

Prezado(a),

Meu nome é Lucas Gomes de Almeida, sou graduado em Engenharia Geológica pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e atualmente sou aluno do Programa de Pós-graduação em Geotecnia (NUGEO) da referida Instituição. Nesse sentido, gostaria poder contar com sua colaboração para finalizar meu trabalho de conclusão de curso que diz respeito à elaboração de uma dissertação de mestrado. Esse trabalho trata da avaliação de parâmetros associados à análise de risco em barragens de rejeitos de mineração, a fim de se obter um índice de perigo (iP) para cada uma delas.

De acordo com a Tabela 1, nota-se que valores de intensidade igual a 1 exprimem a indiferença de importância de um critério (ou subcritério) em relação ao outro, enquanto 9 revela a extrema importância de um critério (ou subcritério) sobre outro. Entre as duas intensidades, estão os estágios intermediários de importância, sejam eles 2, 4, 6 e 8.

Tabela 1. Escala de Razão ou Escala Fundamental de Saaty (1991).

<b>INTENSIDADE DE IMPORTÂNCIA</b>	<b>DEFINIÇÃO</b>	<b>EXPLICAÇÃO</b>
<b>1</b>	Mesma importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
<b>3</b>	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma atividade em relação à outra.
<b>5</b>	Importância grande ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
<b>7</b>	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação à outra; sua dominação de importância é demonstrada na prática.
<b>9</b>	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra com o mais alto grau de certeza
<b>2, 4, 6 e 8</b>	Valores intermediários entre os valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições.





Desconsiderando-se as comparações entre os próprios critérios, que nesse caso estarão identificados pela diagonal principal da matriz comparativa e representarão importância 1, concluí-se que apenas metade das comparações precisam ser feitas, uma vez que a outra metade constitui-se das comparações recíprocas.

Assim, conforme parâmetros de análise apresentados na Tabela 2, solicito gentilmente o preenchimento das matrizes em anexo (espaços em branco) com valores de intensidade variando de 1 a 9 e, preferencialmente, com números ímpares. Destaca-se também que o elemento mais importante da comparação é sempre usado como um valor inteiro da escala, e o menos importante, por consequência, como o seu inverso, sempre menor do que 1.

Tabela 7.1. Parâmetros de avaliação para determinação do índice de perigo (iP) para barragens de rejeitos.

	PARÂMETRO	FONTE	OBSERVAÇÃO
1	Altura	CNRH (2012) Resolução Nº 143 de 2012 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos	Parâmetro para avaliação da diferença entre a elevação do ponto mais alto (crista) e o ponto mais baixo (profundo) da fundação da barragem de rejeitos.
2	Coroamento (extensão longitudinal da crista)		Parâmetro para avaliação do comprimento da superfície que delimita superiormente (dique vertedor) o corpo da barragem de rejeitos.
3	Impacto ambiental		Parâmetro para avaliação do dano associado à área afetada a jusante de uma barragem, em função da periculosidade do rejeito armazenado (classe).
4	Impacto socioeconômico		Parâmetro para avaliação da existência e concentração de instalações na área afetada a jusante da barragem de rejeitos.
5	Existência de população		Parâmetro para avaliação da existência (permanente ou temporária) ou não de vidas humanas a jusante da barragem de rejeitos
6	Volume	MIN (2002) Ministério da Integração Nacional	Parâmetro para avaliação da capacidade de armazenamento do reservatório ou barragem de rejeitos.
7	Tempo de recorrência		Parâmetro para avaliação do período calculado para ocorrências de igual magnitude de um fenômeno natural (chuvas, por exemplo) na barragem de rejeitos. Geralmente, esse período (tempo de retorno ou vazão de projeto) é estimado pelo inverso da probabilidade de ocorrência do fenômeno.
8	Idade		Parâmetro para avaliação do tempo (em anos) de operação da barragem de rejeitos
9	Material de construção		Parâmetro para avaliação do tipo de material empregado para construção da barragem de rejeitos.
10	Método construtivo	Própria	Parâmetro para avaliação do tipo de construção ou de alteamento empregado na barragem de rejeitos.
11	Distância ocupação urbana		Parâmetro para avaliação da menor distância (em linha reta) da ocupação urbana mais próxima a jusante da barragem de rejeitos.
12	Instrumentação		Parâmetro para avaliação da existência (ou não) e dos tipos de instrumentação geotécnica na barragem de rejeitos.
13	Localização hidrográfica		Parâmetro para avaliação da localização da barragem de rejeitos na bacia e respectiva sub-bacia hidrográfica.



<b>Linha A</b> <b>Coluna A</b>	<i>Altura</i>	<i>Coroamento</i>	<i>Volume</i>	<i>Tempo de recorrência</i>	<i>Impacto ambiental</i>	<i>Impacto socioeconômico</i>	<i>Existência de população</i>	<i>Idade</i>	<i>Material de construção</i>	<i>Método construtivo</i>	<i>Distância da ocupação urbana</i>	<i>Instrumentação</i>	<i>Localização hidrográfica</i>
Altura	1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Coroamento		1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Volume			1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Tempo de recorrência				1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Impacto ambiental					1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Impacto socioeconômico						1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Existência de população							1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Idade								1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Material de construção									1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Método construtivo										1	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
Distância da ocupação urbana											1	#DIV/0!	#DIV/0!
Instrumentação												1	#DIV/0!
Localização hidrográfica													1

---

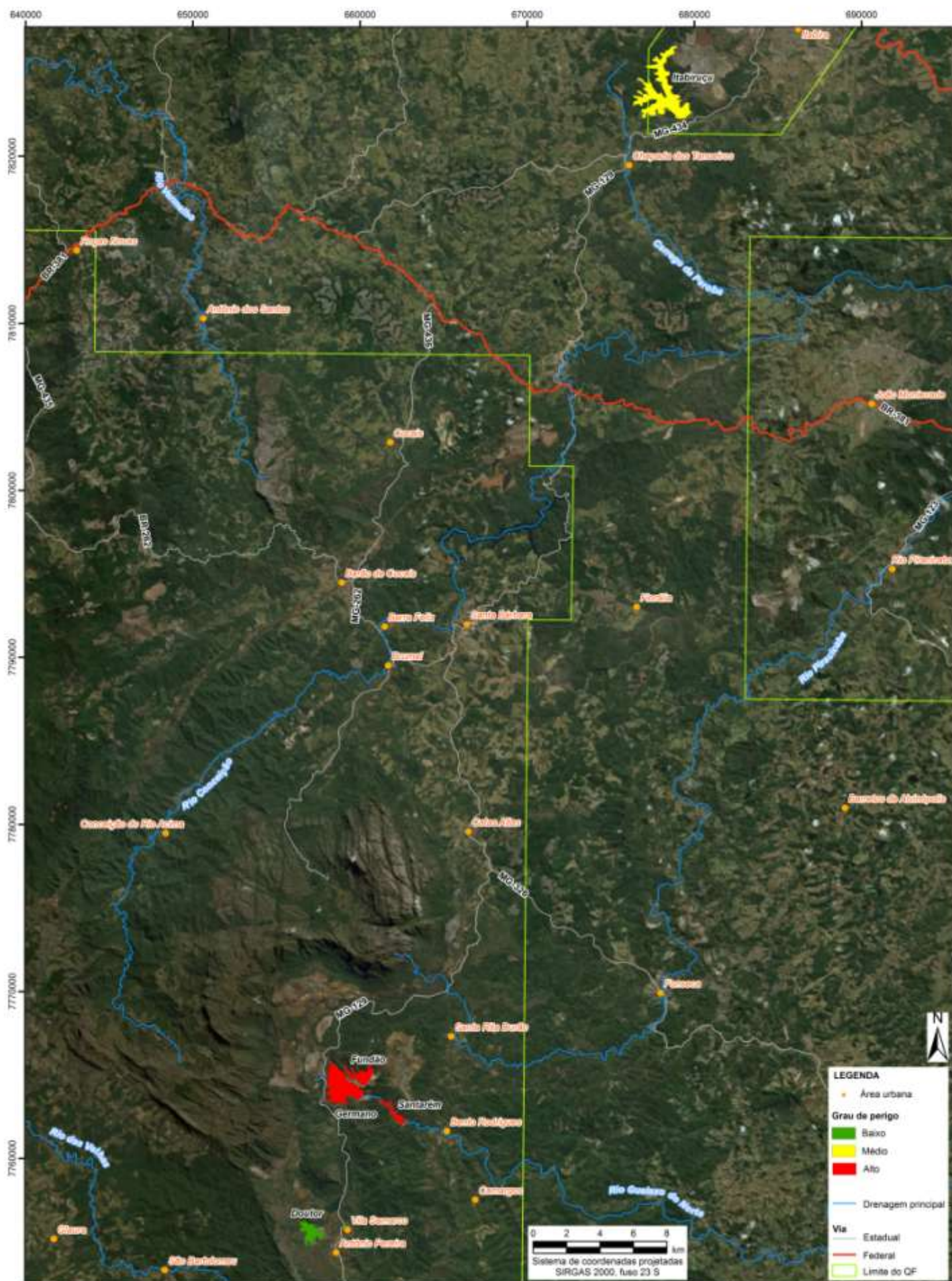
## ANEXO II

Mapa de perigo das barragens de rejeito de mineração  
estudadas na bacia do rio Doce

---



## Barragens de rejeito estudadas na bacia do rio Doce



---

## ANEXO III

Mapa de perigo das barragens de rejeito de mineração  
estudadas na bacia do rio São Francisco

---



