

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Clarissa Malard Sales

**MODELAGEM PARA A ESTIMATIVA DE DANOS CAUSADOS AOS
DOMICÍLIOS POR ROMPIMENTO DE BARRAGENS:
UMA APLICAÇÃO DO MODELO HEC-FIA AO EVENTO DE FUNDÃO**

Belo Horizonte

2020

Clarissa Malard Sales

**MODELAGEM PARA A ESTIMATIVA DE DANOS CAUSADOS AOS
DOMICÍLIOS POR ROMPIMENTO DE BARRAGENS:
UMA APLICAÇÃO DO MODELO HEC-FIA AO EVENTO DE FUNDÃO**

Versão Final

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais do Departamento de Cartografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

Orientador: Prof.º Dr.º Ricardo Alexandrino Garcia

Belo Horizonte

2020

Sales, Clarissa Malard.

Modelagem para a estimativa de danos causados aos domicílios por rompimento de barragens [manuscrito] : uma aplicação do modelo HEC-FIA ao evento de Fundão / Clarissa Malard Sales. – 2020.

147 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientador: Ricardo Alexandrino Garcia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2020.

Bibliografia: f. 137-147.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Barragens e açudes – Segurança – Mariana (MG) – Teses. 3. Geoprocessamento – Teses. I. Garcia, Ricardo Alexandrino Garcia. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS
AMBIENTAIS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Modelagem para a Estimativa de Danos Causados nos Domicílios por Rompimento de Barragens: Uma Aplicação do Modelo HEC-FIA ao Evento de Fundão

CLARISSA MALARD SALES

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE, MODELAGEM E GESTÃO DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 20 de fevereiro de 2020, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Ricardo Alexandrino Garcia - Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais

Profa. Patrícia Moreira Procópio Calazans
Moreira & Procópio Empreendimentos LTDA

Prof. Carlos Fernando Ferreira Lobo
Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 20 de fevereiro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Ricardo Alexandrino Garcia pela orientação liberal com que conduziu esse mestrado. Obrigada pela confiança, disponibilidade, objetividade e entusiasmo com o tema do trabalho.

À Professora Úrsula Ruchkys e ao Professor Bráulio Magalhães pelas úteis discussões durante o seminário de dissertação.

Aos professores e professoras do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pelos valiosos ensinamentos.

Ao amigo Thiago Viera pelo auxílio essencial no desenvolvimento da modelagem. Obrigada pela disponibilidade e pela amizade.

Ao amigo Max Paulo pelas conversas produtivas nas nossas tardes no LESTE, pelas ideias que muito contribuíram para a construção dessa dissertação e sobretudo pela amizade.

Aos amigos da MP Consultoria pela parceria diária. Em especial à querida Patricia pela inspiração e conselhos motivadores.

Aos colegas do IGC pelas trocas de experiências sobre o tema do trabalho e sobre a vida.

A todos os meus amigos e amigas, que felizmente são muitos para citar nesse espaço. Obrigada pelos necessários momentos de descontração.

Aos meus pais, Antônio e Marília, pela educação de qualidade que recebi e principalmente, por me ensinarem a valorizá-la.

Às minhas irmãs, Mariana e Lígia, pelo exemplo.

Ao meu filho Gabriel, por ser minha fonte de força e motivação. É tudo por você.

À Geografia, ciência em que encontrei meu propósito e um novo olhar: atento, investigador e questionador.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo financiamento parcial desse trabalho.

*“Quem nunca viu a sorte pensa que ela não vem
E enche a cacimba de mágoa
Hoje se abraçam forte, corta esse mal, planta o bem
Transforma lágrima em água
O sertão vai virar mar
É o mar virando lama
Gosto amargo do Rio Doce
De Regência a Mariana”*

*Trecho da música “Cacimba de Mágoa”
Compositores: Gabriel Contino / Ricardo Cruz
Artista: Falamansa*

RESUMO

O rompimento da barragem de Fundão em Mariana – MG expôs para a sociedade brasileira um problema até então pouco conhecido: os riscos que o armazenamento de rejeitos de mineração em barragens oferece para o meio ambiente e para as populações que vivem próximas a essas estruturas. O risco de uma barragem de rejeitos está relacionado com a possibilidade de ocorrência de uma falha na estrutura e com o seu potencial de causar danos ao meio ambiente e a sociedade. A legislação brasileira em segurança de barragens obriga que mineradoras apresentem estudos a fim de comprovar o bom funcionamento dessas estruturas, planos de ações emergenciais a serem tomadas em caso de um rompimento, além de um relatório de causas e consequências, com a descrição dos danos materiais, à vida e à propriedade. Muitos estudos acerca da probabilidade de ocorrência de uma ruptura de barragem têm sido realizados, com o desenvolvimento, refinamento e popularização de modelos capazes de prever áreas inundadas em caso de uma barragem romper. Porém, os modelos preditivos para danos correlatos, ou seja, os diversos tipos de perdas que ocorreriam caso a estrutura falhe, são pouco conhecidos ou discutidos no Brasil. Existem disponíveis na literatura, diversas metodologias de classificação e estimativa de danos causados por enchente, tanto no caso desta ser proveniente de um evento natural, como em casos de desastres com barragens. O presente trabalho realizou, a partir da modelagem hidrodinâmica e da caracterização socioeconômica da área afetada pelo rompimento da barragem de Fundão, uma estimativa dos danos diretos causados nos domicílios nesse evento. Para isso foi utilizado o modelo desenvolvido pelo *U. S. Army Corps of Engineers*, o HEC-FIA. Os resultados sugeriram que a aplicação de modelos espacialmente explícitos, combinados com técnicas de geoprocessamento, podem contribuir para o conhecimento dos danos causados nesse tipo de evento, para o ordenamento das áreas expostas ao risco de rompimento de barragens e para o planejamento de ações emergenciais no caso de uma falha ocorrer.

Palavras-chave: Ruptura de barragens, danos diretos, gestão de risco, Barragem de Fundão

ABSTRACT

The Fundão dam failure in Mariana, Minas Gerais, exposed to the Brazilian society a until then unknown problem: the risks that storage mining tailings in dams inflict to the environment and especially to the populations that live near these structures. The risk of a tailings dam is related to the possibility of a structure failure and its potential to cause damage to the environment and society. Brazilian dam safety legislation requires mining companies to submit studies to prove the proper functioning of these structures, as well as a report of causes and consequences, describing material damage to life and property in the event of a breach. Many studies about dam break probability have been conducted, with development, refinement and popularization of capable models to predicting flooded areas in case a dam rupture. However, the related damages are less known or discussed in Brazil. There are many methodologies available in the literature for the classification and estimation of flood damage, whether it comes from a natural event or in case of dam disasters. From the hydrodynamic modeling and the impacted area socioeconomic characterization by the Fundão dam rupture, the present work estimated the direct damage caused to the households in this event. For this, the model developed by the US Army Corps of Engineers named HEC-FIA was used. The results suggested that the application of spatially explicit models, combined with geoprocessing techniques, may contribute to the knowledge of the damage, also to the planning of the areas exposed to the risk of dam rupture and to the planning of emergency actions in the region in case a failure happen.

Keyword: dam break, direct damage, risk management, Fundão Dam

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Barragens de Mineração no Brasil	29
Figura 2.2 Registros de acidentes e incidentes em barragens brasileiras	36
Figura 2.3 Causas de rompimento de barragens	38
Figura 2.4: Formas de rupturas do tipo galgamento e liquefação	39
Figura 2.5: Barragens de rejeito com alteamentos sucessivos	41
Figura 2.6: Métodos construtivos das barragens inseridas na PNSB	41
Figura 2.7: Categoria de risco das barragens inseridas na PNSB	43
Figura 2.8: Curvas de danos versus profundidade para as classes sociais A e B	47
Figura 2.9: Curvas de danos versus profundidade para as classes sociais C e D	47
Figura 2.10: Dano potencial associado das barragens inseridas na PNSB	49
Figura 2.11: Exemplo de estrutura de gestão de risco	56
Figura 2.12: Classes de risco das barragens inseridas na PNSB	57
Figura 2.13: Associação de profundidade de inundação às estruturas	64
Figura 2.14: Zonas de letalidade de inundação no HEC-FIA	69
Figura 3.1: Mapa de localização das estruturas da mina Germano	73
Figura 3.2: Estruturas da barragem de Fundão	74
Figura 3.3: Cronologia da chegada da onda	77
Figura 3.4: Passagem da onda de cheia (vazão de pico)	78
Figura 3.5: Vista Geral da Rua São Bento em Bento Rodrigues	79
Figura 3.6: Bento Rodrigues após a passagem da lama de rejeitos	79
Figura 3.7: Vista aérea de Bento Rodrigues após a passagem da lama	80
Figura 3.8: Paracatu de Baixo após a passagem da lama de rejeitos	80
Figura 3.9: Gesteira após a passagem da lama de rejeitos	81
Figura 3.10: Barra Longa após a passagem da lama de rejeitos	81
Figura 3.11: Vista aérea de Barra Longa após a passagem da lama	82
Figura 4.1: Fluxograma da modelagem hidrodinâmica	88
Figura 4.2: Topografia do terreno utilizado na modelagem	89
Figura 4.3: Hidrograma de ruptura	90
Figura 4.4: Fluxograma da etapa de criação do inventário de estruturas	91
Figura 4.5: Características principais dos projetos de residências unifamiliares	96
Figura 4.6: Características principais dos projetos de residências multifamiliares	97
Figura 4.7: Valores definidos para o CUB em janeiro de 2010	98

Figura 4.8: Fluxo de dados para a estimativa de danos diretos e perdas de vida	101
Figura 4.9: Importação do inventário no HEC-FIA	103
Figura 4.10: Curvas de Dano versus profundidade para conteúdos	103
Figura 4.11: Curvas de Dano versus profundidade para edificações	104
Figura 4.12: Parâmetros de tempo de alerta e mobilização utilizados	105
Figura 4.13: Limite das zonas de letalidade e risco hidrodinâmico no HEC-FIA	106
Figura 5.1: Mancha de inundação observada	108
Figura 5.2: Mapa de uso do solo	109
Figura 5.3: Profundidade máxima da inundação nas seções	112
Figura 5.4: Velocidade máxima da inundação nas seções	112
Figura 5.5: Risco hidrodinâmico da inundação nas seções	113
Figura 5.6: Tempo de chegada da onda de inundação nas seções	113
Figura 5.7: Profundidade máxima da inundação simulada	114
Figura 5.8: Velocidade máxima da inundação simulada	114
Figura 5.9: Risco hidrodinâmico da inundação simulada	115
Figura 5.10: Tempo de chegada da onda de inundação simulada	115
Figura 5.11: Comparação das manchas de inundação em Bento Rodrigues	117
Figura 5.12: Comparação das manchas de inundação em Paracatu de Baixo	117
Figura 5.13: Comparação das manchas de inundação em Gesteira	118
Figura 5.14: Comparação das manchas de inundação em Barra Longa	118
Figura 5.15: Estruturas mapeadas por número de andares	122
Figura 5.16: Comparação dos valores estimados e observados	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Rompimento de barragens no Brasil nos últimos 20 anos	33
Tabela 2.2: Acidentes e Incidentes com barragens no RSB 2016	34
Tabela 2.3: Causas de rompimento de barragem	37
Tabela 2.4: Cálculo da categoria de risco	42
Tabela 2.5: Categoria de risco segundo o CNRH	43
Tabela 2.6: Tipologia de danos decorrentes de inundações em áreas urbanas	45
Tabela 2.7: Cálculo do dano potencial associado	48
Tabela 2.8: Classificação por dano potencial associado	48
Tabela 2.9: Comparação das premissas das metodologias de avaliação de danos	50
Tabela 2.10: Sistema de classificação de perigo pela USBR	51
Tabela 2.11: Proposta de classificação de risco hidrodinâmico	53
Tabela 2.12: Número esperado de vítimas em função do tempo de alerta	54
Tabela 2.13: Matriz de análise risco x dano	56
Tabela 2.14: Matriz probabilidade x consequência	58
Tabela 4.1: Valores de Coeficiente de Manning para as classes de uso do solo	90
Tabela 4.2: Classificação econômica Brasil 2010	94
Tabela 4.3: Limites das classes econômicas	95
Tabela 4.4: Valores atribuídos às edificações por classe econômica	98
Tabela 4.5: Valores para conteúdos por classe econômica	99
Tabela 5.1: Usos do solo mapeados na mancha de inundação observada	110
Tabela 5.2: Resultados do modelo hidrodinâmico nas seções transversais	111
Tabela 5.3: Largura das manchas de inundação nas seções transversais	116
Tabela 5.4: Comparação geral entre as manchas de inundação	116
Tabela 5.5: Porcentagem de domicílios afetados por setor censitário	119
Tabela 5.6: Proporção das classes econômicas por setor censitário	120
Tabela 5.7: Média de moradores nos domicílios por grupo de risco	122
Tabela 5.8: Valores estimados na mancha de inundação observada	124
Tabela 5.9: Resultado da simulação de danos diretos	125
Tabela 5.10: Resultado da simulação de perdas de vida	127
Tabela 5.11: Danos observados no evento	128
Tabela 5.12: Resumo dos danos humanos diretos	129
Tabela 5.13: Índice IPCA utilizado na atualização dos valores	130

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ABEP	Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional das Águas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CIF	Comitê Interfederativo
CNEFE	Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CRI	Categoria de Risco
CUB	Custo Unitário Básico
DPA	Dano Potencial Associado
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
GRG	Gestão de Riscos Geotécnicos
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
HEC-FIA	Hydrologic Engineering Center's Flood Impact Analysis
MAB	Movimento dos Atingidos por Barragens
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MPMG	Ministério Público de Minas Gerais
MPF	Ministério Público Federal
MTPS	Ministério do Trabalho e Previdência Social
NBR	Norma Técnica Brasileira

OAB	Ordem dos Advogados do Brasil
ONU	Organização das Nações Unidas
PAE	Plano de Ações Emergências
PIB	Produto Interno Bruto
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança da Barragem
RSB	Relatório de Segurança de Barragens
SEDRU/MG	Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional de Política Urbana e Gestão Metropolitana
SEMAD/MG	Secretária de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SINDSAMA	Sindicato dos Servidores Públicos do Meio Ambiente de Minas Gerais
SINDUSCOM/MG	Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de Minas Gerais
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens
TTAC	Termo de Transição e Ajustamento de Conduta
UHE	Usina Hidrelétrica
USACE	United States Army Corps of Engineers
USBR	United States Bureau of Reclamation
UTM	Universal Transversa de Mercator
ZAS	Zona de Autossalvamento

SUMÁRIO

CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 JUSTIFICATIVA.....	23
1.2 OBJETIVOS GERAIS	25
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2. BARRAGENS DE MINERAÇÃO E GESTÃO DE RISCO	27
2.1 MINERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	27
2.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA EM SEGURANÇA DE BARRAGENS.....	29
2.3 HISTÓRICO DE ACIDENTES E INCIDENTES COM BARRAGENS.....	32
2.4 CATEGORIA DE RISCO DAS BARRAGENS DE REJEITO.....	36
2.5 DANOS POTENCIAIS ASSOCIADOS À RUPTURA DE BARRAGENS.....	44
2.6 GESTÃO DE RISCO DE BARRAGENS	55
2.7 MODELAGEM.....	58
3. O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO	72
3.1 A BARRAGEM DE FUNDÃO	72
3.2 O ROMPIMENTO	75
3.3 A ÁREA AFETADA	78
3.4 CONSEQUÊNCIAS E MEDIDAS TOMADAS APÓS O ROMPIMENTO	82
4. METODOLOGIA.....	87
4.1 MAPEAMENTO DA MANCHA DE INUNDAÇÃO OBSERVADA	87
4.2 MAPEAMENTO DO USO DO SOLO DO VALE A JUSANTE	87
4.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA.....	87
4.4 CRIAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESTRUTURAS DOS DOMICÍLIOS	91
4.5 CÁLCULO DO DANO DOS DOMICÍLIOS NA MANCHA DE INUNDAÇÃO.....	100

4.6	APLICAÇÃO DO MODELO HEC-FIA	101
4.7	LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES SOBRE O EVENTO DE FUNDÃO	107
4.8	ANÁLISE COMPARATIVA.....	107
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	108
5.1	MAPEAMENTO DA MANCHA DE INUNDAÇÃO OBSERVADA	108
5.2	MAPEAMENTO DO USO DO SOLO	109
5.3	PROPAGAÇÃO DA ONDA DE INUNDAÇÃO.....	111
5.4	CRIAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESTRUTURAS DOMICILIARES.....	119
5.5	CÁLCULO DOS DANOS NA MANCHA DE INUNDAÇÃO.....	124
5.6	MODELO DE ESTIMATIVA DE DANOS – HEC-FIA	125
5.7	LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES DO EVENTO	128
5.8	ANÁLISE COMPARATIVA.....	129
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	134
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nessa seção apresento, de forma pessoal, o contexto no qual surgiu o interesse pelo tema da pesquisa e, conseqüentemente, a motivação pelo desenvolvimento do presente trabalho.

O meu interesse pelo tema de ruptura de barragens e estimativa dos danos correlatos despertou em 2016, durante minha participação em um projeto profissional de uma mineradora com a finalidade de realizar a gestão de risco de barragens. Tal projeto teve como principal objetivo identificar, quantificar e minimizar os riscos inerentes às estruturas sob responsabilidade da empresa.

A gestão de risco de barragens é definida como o processo de tomada de decisão integrando os resultados obtidos no cálculo da probabilidade de ocorrência de ruptura de uma estrutura com suas conseqüências potenciais, de modo a definir as medidas preventivas adequadas à situação e, em seguida, implementá-las. Esse projeto teve como objetivo a redução e o controle dos riscos para níveis aceitáveis, em consonância com as exigências legais definidas para estudos de segurança de barragens no Brasil. O risco era expresso em unidade monetária, o que permitia a comparação e hierarquização das estruturas, independentemente do tipo e das características de cada uma.

Nesse contexto, tive acesso aos métodos e modelos preditivos para simulação de inundações decorrentes de ruptura de barragens e para a quantificação das conseqüências desse tipo de evento. O primeiro sendo capaz de prever a extensão, tempo, profundidade e velocidade de uma inundação e o segundo, visando estimar os possíveis danos causados, por meio do levantamento socioeconômico da área atingida a jusante da estrutura e dos parâmetros hidrodinâmicos da mancha de inundação, resultantes da simulação de ruptura.

Em paralelo ao desenvolvimento das atividades no âmbito da gestão de risco, e logo após o rompimento da barragem de Fundão, participei do desenvolvimento de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) com o intuito de auxiliar as equipes técnicas da Samarco, seus consultores e os órgãos reguladores no reconhecimento e mitigação dos impactos e na prevenção de novos eventos na área impactada pelo rejeito proveniente da barragem em Mariana-MG.

A partir de julho de 2017 e até julho de 2018, trabalhei como consultora para a Fundação Renova, entidade criada para a reparação, recuperação e reconstrução dos municípios afetados pelo rompimento da barragem de Fundão, atuando na modelagem de dados espaciais produzidos pelos 42 programas socioambientais em desenvolvimento.

Durante o tempo que trabalhei na instituição, pude perceber a dimensão dos danos causados pelo evento, que foi considerado o maior desastre com barragem da história do Brasil. Além desse fato constatado, ficou evidente que não houve nenhum estudo realizado para a prevenção e gestão do risco associado àquela estrutura, apesar das metodologias já desenvolvidas no âmbito daquele projeto.

O contato direto com as equipes técnicas desses programas e o acesso ao grande volume de dados sobre a área atingida, me inseriu no grande desafio enfrentado pela Fundação Renova, que se por um lado tem a responsabilidade de indenizar a população atingida, por outro deve garantir que o fundo criado para tal seja destinado de maneira transparente, com tratamento igualitário e possibilitando um resultado ágil.

Assim, surgiu a motivação em aplicar os métodos e modelos já consolidados ao rompimento de Fundão, realizando uma estimativa dos danos diretos causados nos domicílios e das perdas de vida humana. Como danos diretos, considera-se aqueles ocorridos pelo contato com a lama de rejeitos proveniente da barragem. A aplicação de modelos preditivos em um evento ocorrido, ou a retroanálise, busca não só colaborar para o processo de gestão da crise instaurada, mas também contribuir para a melhoria dos modelos dessa natureza, avaliando as variáveis e parâmetros utilizados, além da sua disseminação em empresas de mineração, órgãos reguladores e sociedade acadêmica.

Cabe ressaltar que minhas referências aqui apresentadas, se limitam ao objeto de estudo deste trabalho: a modelagem para estimativa dos danos diretos, ou seja, aqueles causados pelo contato com a onda de rejeitos. Reconheço que este recorte não representa a totalidade das consequências do rompimento da barragem de Fundão, que ainda hoje surgem e se renovam durante o processo de reparação. Dessa forma, busquei realizar essa pesquisa com um olhar atento, de responsabilidade e respeito aos diversos agentes envolvidos no desastre de Fundão, admitindo que seria indevido ou falso tentar expressar a experiência dos atingidos. Espero que ao final, tenha sido bem-sucedida nesse propósito, dentro do limite aqui estabelecido.

1. INTRODUÇÃO

A mineração faz parte da ocupação territorial e da história de Minas Gerais desde o século XVII. De acordo com Enríquez *et.al.* (2011), é um dos setores econômicos estratégicos para alavancar e dinamizar o crescimento nacional. Os diferentes cenários para o setor mineral indicam que a demanda global por bens minerais ainda permanece bastante aquecida, tendo em conta a dinâmica de crescimento populacional, com a previsão de alcançar 9,7 bilhões em 2050, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU).

Segundo o IBRAM (2018), a atividade minerária representa 1,4% do PIB nacional, empregando cerca de 180 mil trabalhadores diretamente. É um importante fomentador da indústria nacional, pois é o segmento fornecedor de matéria-prima para todos os tipos de indústrias existentes no país. Ao final de 2017 o setor de mineração empregava 651 mil trabalhadores diretamente, e ao longo da cadeia industrial, o segmento extrativo mineral atinge o fator multiplicador de um para onze postos de trabalho. Sendo assim, o setor gerou quase 2 milhões de vagas de emprego de forma direta, indireta ou induzida no período analisado.

É inegável a relevância da mineração para a economia do país e para a geração de bens e riquezas que atraíam olhares para o mercado nacional. Porém, devido ao grande impacto causado por essa atividade, existem questões socioambientais que devem ser avaliadas e ponderadas.

Para Enríquez *et.al.* (2011), o desenvolvimento da mineração no Brasil se deu em bases não sustentáveis e os seus efeitos perduram até os dias atuais. Por isso, um grande trabalho é necessário para reconhecer e enfrentar as externalidades geradas pela atividade de mineração. O depósito de rejeitos em barragens, a disposição de estéreis em pilhas e o uso de produtos químicos durante o processo de beneficiamento do minério estão entre as ações que mais apresentam riscos de impactos ambientais negativos. As barragens, tanto para o armazenamento de água, regularização de vazão, geração de energia e retenção de resíduos minerais podem aumentar a exposição da sociedade a níveis de riscos considerados relevantes.

Segundo Machado (2017), as barragens são susceptíveis a falhas, como qualquer outra obra na engenharia. Se por um lado a probabilidade de ocorrência de ruptura é baixa, caso isso venha a ocorrer, os danos nas áreas localizadas a jusante podem ser catastróficos, principalmente quando estas são ocupadas por populações urbanas ou rurais. Além disso, algumas barragens de rejeito possuem materiais com alto índice de contaminação, como arsênio e cianeto, portanto estão associadas a um alto risco decorrente de sua ruptura.

Para Rocha (2015), em caso de ruptura de uma barragem, há um acréscimo significativo da vazão dos cursos d'água à jusante, ou seja, aqueles para onde se dirigem o fluxo do material armazenado, e por consequência, uma área extensa está sujeita à ocorrência de inundação e ao aumento da velocidade de escoamento. Da mesma maneira, o material armazenado na barragem pode resultar na contaminação dos leitos dos rios, impactando o meio ambiente.

A maioria das decisões tomadas em relação a segurança de barragens está relacionada à vida humana em risco (VEIGA-PINTO, 2008). Porém, a estimativa das perdas econômicas e a capacidade de pesar essas perdas no caso de uma ruptura são uma necessidade nos programas de gestão de risco, à medida que a ocorrência de ruptura dessas estruturas se torna mais recorrente e os vales a jusante, mais ocupados. Nesse sentido, torna-se importante o conhecimento dessas consequências, para que seja feita uma gestão adequada do risco e ações de prevenção possam ser tomadas.

O tema de ruptura de barragens vem sendo tratado em dissertações, teses e artigos (Brasil, 2005; Balbi, 2008; Melo, 2013; Rocha, 2015; Menezes, 2016; Machado, 2017; entre outros). Esses estudos abordam e consolidam modelos matemáticos unidimensionais e bidimensionais para definição da mancha de inundação em cenários de ruptura hipotética de uma barragem, e tratam dos processos de gestão de risco na mineração.

Estudos acerca das consequências socioeconômicas decorrentes de cheias naturais foram desenvolvidos no Brasil nas últimas décadas, com destaque para Machado (2005), que aborda a relação entre a profundidade e velocidade da inundação com a intensidade do dano socioeconômico. Para a autora, o dano é definido por toda alteração nos sistemas naturais, sociais e econômicos e podem ser classificados em diretos, quando ocorrem pelo contato físico dos bens com a água e indiretos, quando ocorrem devido a transtornos ao sistema produtivo em geral.

O tema também foi discutido por Cançado (2009), em que as consequências econômicas da inundação sobre as pessoas e a cidade são avaliadas, caracterizando os danos diretos e indiretos, mas incorporando também a vulnerabilidade, o que implica em avaliar a capacidade de enfrentamento e recuperação da população exposta.

Menezes (2016) realizou uma pesquisa que avalia duas metodologias disponíveis para classificação de danos associados a ruptura de barragens na literatura: o índice de risco proposto por Viseu (2006) e a classificação de risco, desenvolvida por USBR (1988). Segundo a autora, uma problemática no processo de classificação dos danos é a necessidade de estimar o hidrograma de ruptura da barragem com uso de equações empíricas que envolvem muitas incertezas. Embora essas equações tenham sido geradas a partir de casos observados, elas foram elaboradas para barragens distintas com causas de colapso diferentes.

Matos (2018) realizou uma modelagem hidrodinâmica de perdas de vidas humanas associadas à ruptura da barragem de Fundão, para o subdistrito de Bento Rodrigues, ressaltando a importância do sistema de alerta para a prevenção de mortes em caso de desastres dessa natureza.

Em 2012, o *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) desenvolveu um SIG com a capacidade de analisar impactos de enchente: o *Flood Impact Analysis* (FIA), de modo a calcular os danos em uma área atingida por esse tipo de evento. A partir de dados socioeconômicos da área inundada e das características hidrodinâmicas da inundação, é possível estimar o valor monetário do dano e a perda de vidas humanas baseado em parâmetros pré-determinados pelo analista.

São muitas as iniciativas e interesse pela discussão do tema no Brasil e no mundo, pois esse grande passivo socioambiental necessita de regulamentação e fiscalizações eficientes, a fim de se evitar desastres. Segundo o IBRAM (2018), diversas mineradoras têm investido na gestão de risco de estruturas de contenção de rejeito a fim de definir medidas preventivas à situação. Esses estudos buscam integrar a avaliação de probabilidade de uma estrutura falhar às possíveis consequências decorrentes desse evento.

Por parte do poder público, ações têm sido tomadas no sentido de garantir o bom funcionamento dessas estruturas. De acordo com Neves (2018), a inserção legal do Brasil no tema de Segurança de Barragens se deu com a promulgação da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Essa lei estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e dispôs sobre as responsabilidades de fiscalização e controle das estruturas.

Segundo a Agência Nacional de Mineração - ANM (2019), atualmente o Brasil possui 769 estruturas de contenção de rejeitos cadastradas e sob fiscalização de diversos órgãos federais e estaduais. Ainda assim, nas últimas duas décadas, foram registrados dez desastres com rompimento de barragens no Brasil, com média de um desastre a cada dois anos.

Em 5 de novembro de 2015, ocorreu o rompimento da barragem de Fundão no complexo minerário de Germano, no município de Mariana - MG. O desastre provocou o vazamento de aproximadamente 33 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério, segundo dados informados pelo site da Mineradora Samarco, proprietária da barragem (SAMARCO, 2019). A lama despejada no Córrego Santarém atingiu o Rio Doce percorrendo 670 quilômetros de extensão, impactando 39 municípios até a foz no Estado do Espírito Santo.

Considerado o maior desastre com barragem da história do Brasil em quantidade de rejeito liberado (MINAS GERAIS, 2016; MP-MG, 2016; MT-MG, 2016; Morgenstern *et. al.*, 2016; entre outros), esse evento trouxe consequências socioeconômicas irreparáveis causadas pela inundação nas áreas a jusante da estrutura, principalmente nas localidades de Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, Gesteira e Barra Longa. Entre membros da comunidade e empregados da Samarco, dezenove óbitos foram confirmados e um número considerável de famílias perdeu suas casas.

Os danos decorrentes do desastre tiveram grande repercussão na sociedade, resultando na paralisação das atividades da empresa e fomentando a discussão sobre a segurança dos empreendimentos minerários, os impactos negativos que causam no meio ambiente e na sociedade e a responsabilidade de ressarcimento desses danos.

Diante disso, o Estado de Minas Gerais e do Espírito Santo junto com a União, ingressou com uma ação judicial de vinte bilhões de reais contra a Samarco e sugeriu a criação de um fundo privado controlado pela Justiça e cuja gestão fosse feita por um conselho ou comitê. (MINAS GERAIS, 2016).

Segundo a AGU (2016), como forma de definir as obrigações de ressarcimento e reparação de danos, além das responsabilidades do poder público e da mineradora nas ações necessárias para tal, em 21 de março de 2016, a União e diversas autarquias públicas federais, estaduais e municipais, representados pela Advocacia Geral da União (AGU), as partes celebraram um acordo denominado Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC).

De acordo com o TTAC (AGU, 2016), ficou estabelecida a formação de uma Fundação para gerenciar e executar projetos e programas socioambientais e compensatórios para reparação, recuperação e reconstrução da área afetada pelo rompimento da barragem. Nesse acordo também ficou definida a formação de um Comitê Interfederativo (CIF), composto por cerca de 70 instituições públicas, para a interlocução permanente com a Fundação e para definir prioridades na implementação e execução dos projetos, acompanhando, monitorando e fiscalizando os resultados.

Segundo o IBAMA (2017), um dos membros que compõe o CIF, em novembro de 2017, foi determinado que as indenizações por danos morais e materiais a 14 mil atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão deveriam ser negociadas até dezembro de 2017, com pagamento até 31 de março de 2018. Entretanto, o avanço nas negociações não foi significativo. A Fundação Renova, criada para gerenciar e executar os programas previstos no TTAC, é a responsável pelo pagamento das indenizações.

De acordo com o IBAMA (2017), as indenizações preveem a reparação de danos associados a mortes, lesões corporais, estragos em residências, seus conteúdos e veículos e prejuízos à produção agropecuária, ao acesso à água, a obtenção de renda, entre outros. Categorias profissionais como pescadores, azeiteiros, comerciantes, agricultores, garimpeiros, lavadeiras, barqueiros e empresários individuais devem ser igualmente compensadas pelos obstáculos ao exercício de suas atividades.

No Relatório Anual de atividades do ano 2018 (Fundação Renova, 2019) e em dados disponíveis no site da entidade, foi informado o desembolso de 5,37 bilhões de Reais em ações de reparação de danos, sendo que o orçamento total previsto é de 11,6 bilhões. Somente em valores de indenizações de danos gerais foram pagos 338 milhões de Reais. Foram 11,9 mil pessoas atendidas, sendo 8.301 acordos firmados e 8.147 indenizações pagas, até 2018.

As principais questões colocadas sobre as indenizações dos atingidos dizem respeito a forma como essas perdas são mensuradas, muitas vezes sendo informadas pelo próprio indivíduo, como exposto no Jornal Nacional em 3 de outubro de 2018. Esse fato tem levado a discordância de valores indenizatórios e suspeitas de fraudes no recebimento de indenizações, como relatou o Jornal O Globo em 08 de novembro de 2018.

Outra questão preocupante, segundo o Jornal Estado de Minas em setembro de 2017, é o término do prazo para requerer reparação que, legalmente, se deu quando a tragédia completou três anos. Para evitar isso, o Ministério Público recomendou que as pessoas prejudicadas ingressassem em ações coletivas.

1.1 JUSTIFICATIVA

Esse trabalho buscou, através do exercício de modelagem, estimar os danos econômicos ocasionados pelo rompimento da barragem de Fundão. Em virtude da dificuldade e complexidade de se mensurar as perdas advindas do contato direto com a lama e quantificá-las monetariamente, tanto em rupturas hipotéticas, como em casos onde o evento ocorreu, faz-se necessária a utilização de metodologias de identificação e classificação de danos associados, com aplicação para modelos espacialmente explícitos, como o HEC-FIA.

Se por um lado o conhecimento dos danos decorrentes de rompimentos de barragens serve de subsídio para auxiliar no planejamento territorial do vale a jusante, por outro lado, pressupõe-se que é de relevante importância social, pois pode auxiliar e orientar a determinação, pelo poder público, do pagamento de indenizações aos atingidos.

Segundo o Banco Mundial (2014), a análise dos danos associados a uma ruptura de barragem fornece informações cruciais para a tomada de decisão e para o desenvolvimento de políticas de controle e remediação. Entre seus principais propósitos pode-se citar a composição do Plano de Ações Emergenciais (PAE).

Como exposto no capítulo VI da Portaria DNPM nº 70.389, de 17 de maio de 2017 (DNPM, 2017), o PAE para barragens de mineração deve conter, entre outros estudos, um relatório de causas e consequências, com a descrição dos danos materiais, à vida e à propriedade, no caso de ocorrer a falha da estrutura.

De acordo com o Banco Mundial (2014), a estimativa dos danos associados à ruptura de barragens pode contribuir para: formular e priorizar medidas de redução de riscos; justificar decisões sobre restrições à operação; identificar oportunidades de melhorias dos planos de alerta e evacuação; identificar melhores relações custo-benefício na redução dos riscos; justificar as despesas com melhorias em segurança da barragem para os proprietários; criar a base para defender ou demonstrar a segurança frente a empreendedores e reguladores; avaliar a adequação da cobertura por seguros e fortalecer o empreendedor no exercício de cuidar, zelar e defender sua propriedade no caso de ruptura da barragem.

Trabalhos que fornecem a comparação de análises preditivas de danos com os resultados de eventos reais são raros, e apesar dos inúmeros estudos já produzidos sobre o rompimento de 5 de novembro de 2015, ainda não foram realizadas pesquisas nesse sentido.

Assim sendo, esse trabalho visa responder as seguintes questões: É indicado utilizar o modelo de análise de impactos de enchente - HEC-FIA para estimar danos causados por inundação proveniente de rompimento de barragens? Sua aplicação é compatível com o cenário legal do Brasil? O modelo pode contribuir para a gestão de risco nos vales a jusante? A aplicação do modelo em um evento conhecido, como o caso do rompimento da barragem de Fundão, possibilita melhorias na calibração do modelo, utilizando as condições reais em que ocorreu o desastre? É possível comparar os resultados da simulação com os dados efetivamente observados após o desastre? E por fim, essa comparação possibilita a verificação da aplicabilidade dos métodos e a determinação dos melhores parâmetros e variáveis utilizadas na modelagem?

1.2 OBJETIVOS GERAIS

Diante do apresentado, esse trabalho realizou uma modelagem para estimativa dos danos diretos nos domicílios associados à ruptura da barragem de Fundão e das perdas de vida humana e comparou os resultados obtidos pelo modelo com os danos observados no evento. O trabalho foi desenvolvido por meio da modelagem computacional utilizando o software HEC-FIA.

Para que esse objetivo fosse alcançado, foi necessária a propagação da onda de inundação no vale a jusante da barragem utilizando o software HEC-RAS, seguindo as recomendações adotadas para a realização desse tipo de estudo. Assim, o hidrograma de ruptura sintetizado por Matos (2018), de acordo com as características geotécnicas, hidrológicas e hidráulicas relativas ao processo de ruptura, foi propagado para o vale a jusante. A área estudada compreende os municípios mineiros de Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce, onde foi observada a inundação, até o reservatório da UHE Risoleta Neves.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar o mapeamento da mancha de inundação observada por meio de interpretação de imagens de satélite obtidas após o rompimento da barragem;
- Realizar um mapeamento de uso e ocupação do solo da área afetada por meio de interpretação de imagens de satélite obtidas antes do rompimento da barragem;
- Aplicar o modelo hidrodinâmico (HEC-RAS) para propagação da onda de inundação da barragem no vale à jusante;
- Elaborar um inventário de estruturas domiciliares da área afetada e estimar os valores das edificações e seus conteúdos;
- Calcular o valor das edificações e conteúdos considerando os domicílios na mancha de inundação observada;
- Aplicar o modelo de estimativa de danos (HEC-FIA);
- Levantar informações sobre os danos e as perdas de vida causados pelo rompimento da barragem de Fundão;

- Comparar os valores estimados das edificações e conteúdo dos domicílios na mancha de inundação observada, os valores de danos estimados pelo HEC-FIA e os danos observados no evento;
- Avaliar os resultados e as variáveis utilizadas frente as possíveis divergências encontradas na comparação dos dados.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação é subdividida em seis capítulos. O presente capítulo contempla a natureza e contextualização do problema, o tema geral a ser analisado, a justificativa e objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo constitui uma revisão bibliográfica onde são abordados conceitos fundamentais sobre mineração e disposição de rejeitos, uma breve apresentação da legislação brasileira atual sobre o tema, o histórico dos casos de rompimento de barragens no Brasil, os riscos inerentes as barragens de rejeito e suas principais causas. Também são apresentados os danos associados a esse tipo de evento, as práticas em gestão de risco à luz da legislação vigente e os modelos para estimativa de inundações e danos utilizados nesse trabalho.

O terceiro capítulo aborda o rompimento da barragem de Fundão. São apresentadas as características gerais do complexo do Germano e da barragem, a descrição do rompimento, as principais características da área afetada pela lama de rejeitos e as consequências e medidas adotadas após o rompimento.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia de trabalho e no quinto capítulo, os resultados obtidos e discussões. Por fim, o sexto capítulo apresenta a síntese das principais conclusões sobre o desenvolvimento do trabalho e sugestões para pesquisas futuras. Ao final da dissertação, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

2. BARRAGENS DE MINERAÇÃO E GESTÃO DE RISCO

2.1 MINERAÇÃO E DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

De acordo com Enríquez *et.al.* (2011), a mineração faz parte da ocupação territorial e da história do Brasil, sendo que a partir dos anos 1960 foi um dos setores econômicos escolhidos como estratégicos e uma das principais alavancas para dinamizar o crescimento nacional. Os diferentes cenários para o setor mineral indicam que a demanda global por bens minerais ainda permanecerá bastante aquecida, tendo em conta a dinâmica de crescimento populacional, com a previsão de alcançar nove bilhões em 2050, segundo a Organização das Nações Unidas (ONU).

Segundo o IBRAM (2018), a atividade minerária representa 1,4% do PIB nacional, empregando cerca de 180 mil trabalhadores diretamente. É um importante fomentador da indústria nacional, pois é o segmento fornecedor de matéria-prima para todos os tipos de indústrias existentes no país. A pauta dos bens minerais exportados pelo Brasil no ano de 2017 atingiu um volume de 403 milhões de toneladas e representou US\$ 28,3 bilhões, o que corresponde a 30% do saldo da balança comercial. Os principais produtos exportados foram: minério de ferro, ouro, ferronióbio, cobre, bauxita e manganês.

De acordo com IBRAM (2018), ao final de 2017 o setor de mineração empregava 651 mil trabalhadores diretamente, e ao longo da cadeia industrial, o segmento extrativo mineral atinge o fator multiplicador de um para onze postos de trabalho. Sendo assim, o setor gerou quase 2 milhões de vagas de emprego de forma direta, indireta ou induzida no período analisado.

Dessa forma, é inegável a relevância da mineração para a economia do país e para a geração de bens e riquezas que atraíam olhares para o mercado nacional. Porém, devido ao grande impacto causado por essa atividade, existem questões socioambientais que devem ser avaliadas e ponderadas.

Para Enríquez *et.al.* (2011), o desenvolvimento da mineração no Brasil se deu em bases não sustentáveis e os seus efeitos perduram até os dias atuais. Um amplo trabalho é necessário, com base nos conceitos e diretrizes da sustentabilidade definidos na Agenda 21 da ONU e ampliados em várias conferências e acordos que se sucederam para reconhecer e enfrentar as externalidades geradas pela atividade de mineração.

Segundo Vasconcelos (2016), os impactos causados pelas atividades de mineração estão relacionados, principalmente, a alteração que ocorre na região minerada e no entorno. O depósito de rejeitos em barragens, as pilhas de estéreis e o uso de produtos químicos durante o processo de beneficiamento do minério estão entre as ações que mais apresentam riscos de impactos ambientais negativos.

De acordo com Machado (2017), o processo de beneficiamento do minério envolve operações como a britagem, moagem e secagem, processos que dão origem ao rejeito, que é o material não aproveitado economicamente. Esse material é disposto em grandes estruturas de contenção, as barragens.

Para Neves (2018), as barragens fazem parte de sistemas de produção relevantes para o desenvolvimento de qualquer sociedade, pois podem ser utilizadas como armazenamento de água para os diversos usos ou atuar na regularização de vazão de cursos d'água evitando enchentes a jusante, na geração de energia e na retenção de resíduos minerais e/ou industriais. Contudo, essas estruturas podem aumentar a exposição da sociedade a níveis de riscos considerados relevantes.

De acordo com Neves (2018), durante as décadas de 1970 e 1980 foram construídos grandes empreendimentos de barragens, porém a grande maioria para armazenamento de água e produção de energia. Muitas obras de barragens foram executadas com esse intuito, ao mesmo tempo que diversos projetos de mineração alavancaram nessa mesma época, com barragens de rejeitos de mineração inseridos neste contexto.

Atualmente, o Brasil possui 769 estruturas de contenção de rejeitos cadastradas, segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019). Nas últimas duas décadas, foram registrados dez eventos com rompimento de barragens no Brasil, com média de um desastre a cada dois anos. São muitas as iniciativas e interesse pelo tema da segurança dessas estruturas, pois esse grande passivo socioambiental necessita de regulamentação e fiscalizações eficientes, a fim de se evitar novos desastres.

2.2 LEGISLAÇÃO BRASILEIRA EM SEGURANÇA DE BARRAGENS

De acordo com Neves (2018), a inserção legal do Brasil no tema da segurança de barragens se deu com a promulgação da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Essa lei estabeleceu 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 e criou o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

O artigo 1º da PNSB (BRASIL, 2010) delimita as estruturas que estão sob a jurisdição da lei. São definidas as barragens cuja altura do maciço, contada do ponto mais baixo da fundação à crista, forem maior ou igual a quinze metros, as estruturas com capacidade total do reservatório maior ou igual a três milhões de metros cúbicos; os reservatórios que contenham resíduos perigosos e as barragens com categoria de dano potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Das 769 barragens de rejeito de mineração cadastradas na Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019), 425 estão inseridas na PNSB, como mostra a Figura 2.1 a seguir.

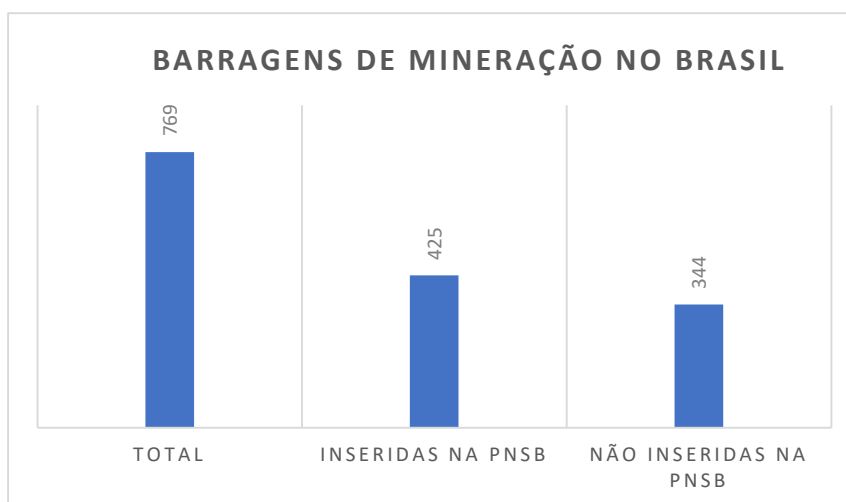


Figura 2.1 Barragens de Mineração no Brasil
Fonte: ANM (2019)

No artigo 2º são expostos os incisos que estabelecem as seguintes definições que norteiam a PNSB:

- I. Barragem: qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas;
- II. Reservatório: acumulação não natural de água, de substâncias líquidas ou de mistura de líquidos e sólidos;
- III. Segurança de barragem: condição que vise a manter a sua integridade estrutural e operacional e a preservação da vida, da saúde, da propriedade e do meio ambiente;
- IV. Empreendedor: agente privado ou governamental com direito real sobre as terras onde se localizam a barragem e o reservatório ou que explore a barragem para benefício próprio ou da coletividade;
- V. Órgão fiscalizador: autoridade do poder público responsável pelas ações de fiscalização da segurança da barragem de sua competência;
- VI. Gestão de risco: ações de caráter normativo, bem como aplicação de medidas para prevenção, controle e mitigação de riscos;
- VII. Dano potencial associado à barragem: dano que pode ocorrer devido a rompimento, vazamento, infiltração no solo ou mau funcionamento de uma barragem.

De acordo com o artigo 3º, a PNSB (BRASIL, 2010) tem como objetivos garantir a observância de padrões de segurança, regulamentar, promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, junto à população potencialmente afetada. Na PNSB, diversos órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Águas (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) foram inseridos com o papel de criar resoluções e portarias para regulamentar alguns artigos da lei federal.

Segundo Neves (2018), a Agência Nacional de Águas (ANA) foi a que recebeu mais atribuições. A agência é responsável por fiscalizar a segurança das barragens de usos múltiplos em corpos d'água federais, promover a articulação entre os órgãos fiscalizadores na implementação da PNSB, organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Segurança de Barragens (SNISB), coordenar a elaboração do Relatório de Segurança de Barragens (RSB) e encaminhá-lo ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

No artigo 6º, ficou estabelecido como instrumentos da PNSB o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado, o Plano de Segurança de Barragem e o Relatório de Segurança de Barragens. O artigo 7º especifica que as barragens serão classificadas pelos agentes fiscalizadores, com base em critérios gerais estabelecidos pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH).

Dessa forma, com o intuito de regulamentar o artigo 7º da PNSB, a Resolução do CNRH nº 143 e 144 de 10 de julho de 2012 (CNRH, 2012), instituiu um Grupo de Trabalho (GT) para a definição dos parâmetros e critérios para a classificação por categoria de risco (CRI) e por dano potencial associado (DPA) de barragens em alto, médio ou baixo, que deve ser feita em função das características técnicas da barragem e do potencial de perdas de vidas humanas e impactos econômicos, sociais e ambientais.

Segundo Neves (2018), a resolução CNRH nº 143/2012 foi a mais trabalhada no âmbito do GT, pois foi necessário discutir os itens e padrões que seriam usados para classificar todas as barragens brasileiras. Já a resolução CNRH nº 144/2012, estabeleceu os critérios para o envio de informações pelos empreendedores à ANA, para que esta proceda com a elaboração do RSB que posteriormente deve ser submetido à apreciação e aprovação do Congresso Nacional.

Posteriormente, a Resolução nº 91, de 02 de abril de 2012 (ANA, 2012), definiu no artigo 3º que, as barragens fiscalizadas pelo órgão devem ser classificadas de acordo com a análise integrada da categoria de risco (CRI) e do dano potencial associado (DPA), denominada matriz de risco, que agrupa as estruturas em classes A, B, C, D e E.

Em 19 de maio 2017, o Departamento Nacional de Pesquisa Mineral (DNPM) publicou a Portaria nº 70.389 (DNPM, 2017) criando o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração e dispoendo sobre o Plano de Segurança, a Revisão Periódica de Segurança e inspeções regulares e especiais de segurança das barragens de mineração além do Plano de Ações de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM).

Em fevereiro de 2019, e após o rompimento da barragem do Córrego do Feijão, a Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou a Resolução nº 4 (ANM, 2019b) que estabeleceu medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração construídas ou alteadas pelo método a montante ou por outro método declarado como desconhecido. Segundo a publicação, todos os episódios recentes de rompimento envolveram barragens de rejeitos construídas e alteadas pelo método, cuja eficiência e segurança são controversas. Além de estabelecer medidas regulatórias e cautelares às barragens existentes, a Resolução ainda proíbe novas construções ou alteamento de estruturas utilizando esse método.

Em março de 2019, foi submetido à câmara dos deputados, o Projeto de Lei nº 550 (BRASIL, 2019), que altera a PNSB a fim de definir de forma mais clara os responsáveis pela fiscalização e pela maior rigidez das obrigações dos empreendedores, nos aspectos preventivos e nas medidas de atuação em emergências. O PL também propõe a obrigação de contratar seguro ou apresentar garantia financeira para o caso de danos causados por rompimento de barragens, além de sanção penal de indivíduos nos casos em que ficar comprovado que as suas ações contribuíram para o desastre.

2.3 HISTÓRICO DE ACIDENTES E INCIDENTES COM BARRAGENS

Segundo Neves (2018), desde os primórdios da história da mineração que a segurança de barragens tem sido alvo de preocupações. Uma das barragens mais antigas do mundo, a *Sadd Al-Kafara*, construída há mais de 5.000 anos, encontra-se localizada a cerca de 32 quilômetros ao sul da cidade do Cairo. Imediatamente após a sua construção, a barragem sofreu uma ruptura parcial devido ao galgamento da sua parte central, inundando grandes áreas ocupadas. Algo semelhante se registrou em Portugal na antiguidade, onde se encontram vestígios de barragens romanas que foram destruídas por ruptura, provavelmente devido a galgamento em situações de cheia.

De acordo com Caballero (2019), nas últimas duas décadas foram registrados dez desastres com rompimento de barragens no Brasil. Porém os eventos que ocorreram nos últimos anos tem sido de grande porte e maior gravidade, muitos deles com um número alto de vítimas fatais. A Tabela 2.1 mostra os principais eventos registrados com barragens de rejeito em 20 anos no Brasil.

Tabela 2.1: Rompimento de barragens no Brasil nos últimos 20 anos

Evento	Data	Descrição
Nova Lima - MG	22 de junho de 2001	A Barragem de rejeitos da mineradora Rio Verde rompeu causando a morte de cinco pessoas no distrito de São Sebastião das Águas Claras em Nova Lima - MG.
Cataguases - MG	29 de março de 2003	Uma barragem de rejeitos industriais rompeu contaminando o Rio Paraíba do Sul. Houve mortandade de animais e desabastecimento de energia para uma população de mais de 600 mil pessoas.
Alagoa Nova - PB	17 de junho de 2004	O rompimento da Barragem de água Camará causou a morte de cinco pessoas e deixou cerca de 3 mil desabrigadas nas cidades de Alagoa Nova, Areia, Mulungu e Alagoa Grande.
Miraf - MG	10 de janeiro de 2007	Diques da mineradora Rio Pomba/Cataguases cederam e despejaram rejeitos de minério nas águas no Rio Muriaé. Mais de 4 mil pessoas ficaram desabrigadas.
Vilhena - RO	9 de janeiro de 2008	A barragem de água da usina hidrelétrica de apertadinho rompeu causando diversos danos ambientais.
Buriti dos Lopes - PI	27 de maio de 2009	A Barragem de Algodões rompeu despejando 50 milhões de metros cúbicos de água, causando a morte de nove pessoas e deixando milhares desabrigadas no Piauí.
Laranjal do Jari - AP	29 de março de 2014	Uma barragem da hidrelétrica de Santo Antônio cedeu, deixando quatro operários mortos.
Itabirito - MG	10 de setembro de 2014	O rompimento da barragem da mineradora Herculano matou três pessoas. Investigação da Polícia Civil apontou omissão na prevenção da tragédia.
Mariana - MG	5 de novembro de 2015	O rompimento da barragem da Samarco deixou 19 mortos, milhares de desabrigados e afetou todo o ecossistema da bacia do Rio Doce.
Brumadinho - MG	25 de janeiro de 2019	A barragem B1 da mina Córrego do Feijão rompeu deixando 249 mortos e 21 desaparecidos. A maioria das vítimas eram funcionários da mineradora Vale.

Fonte: Adaptado de Caballero, 2018

O Relatório de Segurança de Barragens (RSB) de 2016 (ANA, 2017), instrumento de gestão e informação sobre segurança de barragens, que trata, dentre outros assuntos, do acidente da barragem de Fundão, aponta que foram relatados cinco acidentes e dezessete incidentes com barragens no Brasil, entre 1º de outubro de 2015 e 31 de dezembro de 2016.

Nesse sentido, se faz necessário diferenciar os termos incidente e acidente, no âmbito legal. De acordo com a Resolução nº 144/2012 do CNRH (CNRH, 2012), considera-se acidente o comprometimento da integridade estrutural com liberação incontrolável de conteúdo de um reservatório ocasionado pelo colapso parcial ou total da barragem ou de estrutura anexa. O incidente é caracterizado por uma anomalia que afete o comportamento da barragem ou estrutura anexa que, se não for controlada, pode causar um acidente.

Para Machado *et.al.* (2018), no caso de um incidente, entende-se um episódio imprevisto que altera o desenrolar dos acontecimentos, mas sem consequências desastrosas, enquanto o acidente se refere a um desastre, a um acontecimento inesperado e desagradável, com consequências graves e lamentáveis. Dessa forma, é possível afirmar que um incidente seria o causador primário de um acidente. A Tabela 2.2 mostra os eventos relatados no período de abrangência do RSB 2016.

Tabela 2.2: Acidentes e Incidentes com barragens no RSB 2016

Data	Evento	Nome da barragem	UF	Empreendedor	Causa Provável
05/11/2015	Acidente	Fundão	MG	Samarco S.A.	Liquefação de efluentes
04/01/2016	Acidente	Alto Grande	BA	PM de Araci	Cheia
20/02/2016	Acidente	Fazenda Felícia (2 barragens)	GO	Alcides Basílio de Oliveira	sem informação
24/08/2016	Acidente	Fazenda Gabirova	PR	Ivo Apolinário	Cheia
sem informação	Acidente	Balneário Ayrton Senna	MS	Sem informação	Cheia
05/11/2015	Incidente	Germano	MG	Samarco S.A.	Rompimento da barragem a montante
05/11/2015	Incidente	Santarém	MG	Samarco S.A.	Rompimento da barragem a montante
05/11/2015	Incidente	UHE Risoleta Neves	MG	Novelis do Brasil Ltda	Rompimento da barragem a montante
12/02/2016	Incidente	Jucazinho	PE	DNOCS	Fissuras

Data	Evento	Nome da barragem	UF	Empreendedor	Causa Provável
02/03/2016	Incidente	Dique B3	MG	Emicon Mineração e Terraplanagem LTDA	sem informação
10/03/2016	Incidente	Itabiruçu	MG	Vale S.A.	sem informação
Março de 2016	Incidente	Canoas	AL	Usina Sta. Clotilde	falta de manutenção
Março de 2016	Incidente	Bosque IV	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	insuficiência do vertedor
26/07/2016	Incidente	Taboca	TO	SEAGRO/TO	carregamento de material
setembro de 2016	Incidente	São Francisco	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	insuficiência do vertedor
setembro de 2016	Incidente	Prado	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	insuficiência do vertedor
setembro de 2016	Incidente	Gualandim	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	insuficiência do vertedor
setembro de 2016	Incidente	Piauí	AL	Usinas Reunidas Seresta S/A	insuficiência do vertedor
06/12/2016	Incidente	Botoporã	BA	PM de Botoporã	Cheia
sem informação	Incidente	Chã dos Pereira	PB	SERHMACT-PB	falta de manutenção
sem informação	Incidente	Saulo Maia	PB	PM de Areia	falta de manutenção
sem informação	Incidente	Capa Zero	RO	San Martins	carregamento de material

Fonte: Adaptado de ANA, 2017

No período de vigência do RSB 2016, em relação ao reportado no RSB 2015, houve um aumento razoável do número de acidentes (4 acidentes referentes ao RSB 2015 e 6 referentes ao RSB 2016), com destaque para o acidente de Fundão, não só pelo número de vítimas, mas pelos severos danos ambientais, econômicos e sociais causados na bacia do Rio Doce. A lama proveniente da barragem atingiu 35 municípios no estado de Minas Gerais e três no Espírito Santo.

Ressalta-se o número expressivo de vítimas fatais no período do RSB: 20 mortes, sendo que 19 ocorreram no acidente de Mariana. Segundo o RSB 2016 (ANA, 2017), o número é quase o dobro de todas as mortes reportadas nos RSB's 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015.

Fonseca (2019) afirma que, desde 2011, quando o primeiro relatório foi produzido, até 2017, a ANA registrou 24 acidentes. Contudo, o número real é maior. Segundo o autor, a própria agência reconhece que há acidentes não relatados e mesmo barragens que não foram informadas ao governo federal. A Figura 2.2 mostra os registros de acidentes e incidentes em barragens brasileiras indicados nos RSB's de 2011 a 2017.

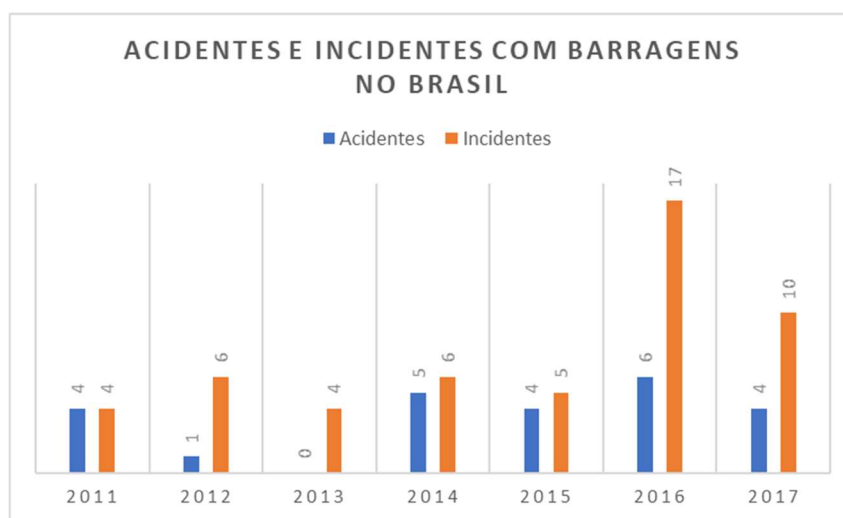


Figura 2.2 Registros de acidentes e incidentes em barragens brasileiras
Fonte: Adaptado de Fonseca (2019)

Podem ser apontados dois fatores principais como causa primária dos rompimentos de barragens: o advento de um fenômeno natural intenso responsável por abalar a estrutura da barragem ou o seu mau planejamento que, independentemente de fatores externos, entra em colapso em razão de erros de engenharia.

2.4 CATEGORIA DE RISCO DAS BARRAGENS DE REJEITO

Considerado o maior desastre com barragem em volume de rejeito despejado da história do Brasil, o rompimento da barragem da Samarco em Mariana expôs os riscos do armazenamento desses resíduos.

Para Menezes (2016), o risco é um indicador de segurança, inversamente proporcional à mesma, que está relacionado com a possibilidade de ocorrência de perturbações que alteram o estado existente ou previsto de uma estrutura e que tem o potencial de causar danos ao meio ambiente e a sociedade.

Mota (2017) explica que as falhas em barragens resultam de forças externas e internas. Estudos de caso mostram que o rompimento da barragem pode surgir devido a razões diferentes, que variam de infiltração, erosão interna, galgamento, liquefação devido a escorregamentos de taludes e liquefação devido a terremotos.

Zhang *et.al. apud* Mota (2017) realizaram um levantamento de 593 casos de falhas em barragens em diversos países, com o objetivo de analisar quais as maiores causas observadas. Os autores concluíram que, as maiores causas de rompimento de barragens se dão por galgamento e erosão. A Tabela 2.3 apresenta as causas levantadas. A Figura 2.3 apresenta o resultado do levantamento.

Tabela 2.3: Causas de rompimento de barragem

Causa	Subcausa
Galgamento	Capacidade insuficiente do vertedor
	Vazão superior à de projeto
Erosão e deslizamento	Erosão interna do corpo da barragem
	Deslizamento no corpo da barragem
	Erosão interna da fundação
	Qualidade do vertedor
Má gestão	Diminuição da capacidade de controle de inundações nos reservatórios
	Má manutenção e operação
Desastres	Terremoto
	Ataque terrorista
	Rompimento de barragem a montante
Outros	Bloqueio do vertedor
	Planejamento deficiente do projeto
Desconhecido	-

Fonte: Mota (2017)

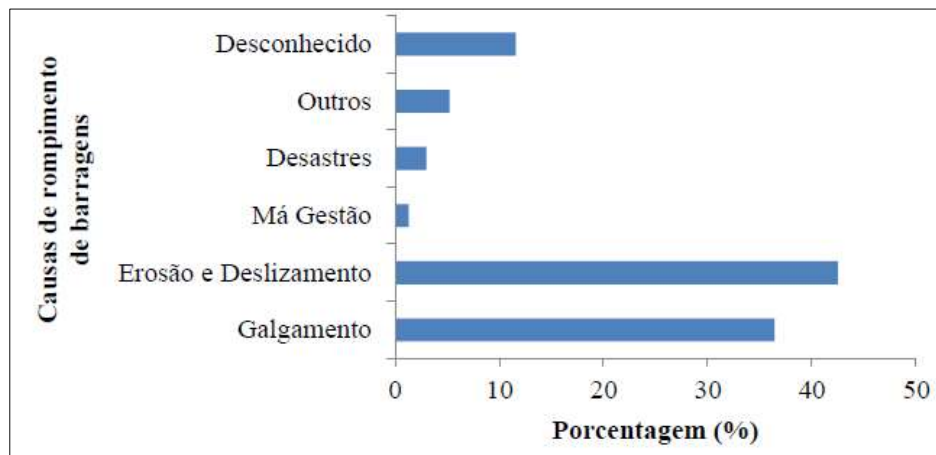


Figura 2.3 Causas de rompimento de barragens
 Fonte: Mota (2017)

Lauriano *et.al.* (2017), explicam que o galgamento ou *Overtopping* é um mecanismo de ruptura de barragens que ocorre quando o vertedouro não tem capacidade suficiente frente a uma cheia de projeto e a água verte sobre a crista da barragem. Inicia-se então, a erosão do talude de jusante da barragem que pode resultar na formação da brecha de ruptura de forma regressiva até a ruptura total do barramento.

De acordo com Fusaro *et. al.* (2017), a erosão interna ou *Piping* se caracteriza como uma falha por infiltração que gera a remoção de partículas de solo de estruturas de terra e das suas fundações para jusante pelo fluxo de percolação.

Fatores como suscetibilidade do material da barragem, carga hidráulica e condição de tensão crítica afetam o início da erosão interna e sequencialmente definem qual o mecanismo final de falha, podendo este ser: colapso por alargamento, colapso por instabilização de talude, colapso por abatimento da crista e galgamento da barragem. A Figura 2.4 mostra a evolução dos dois principais modos de falha de barragens apontadas anteriormente.

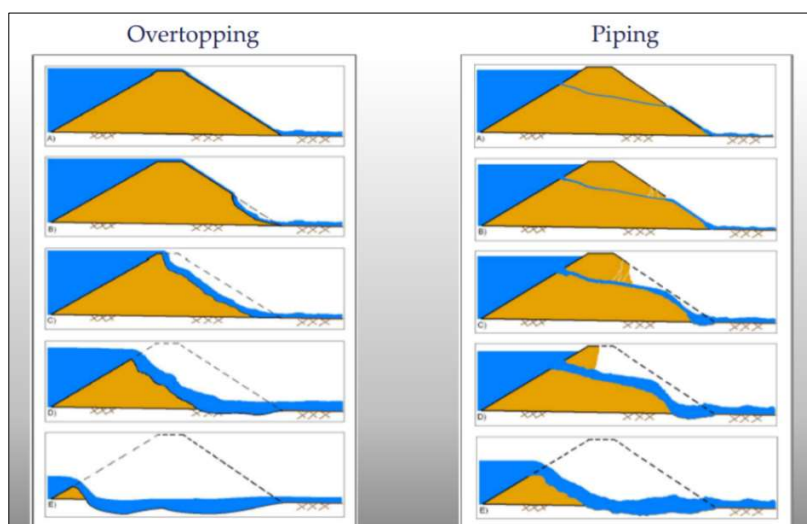


Figura 2.4: Formas de rupturas do tipo galgamento e liquefação
 Fonte: SINDSEMA, 2019

Outro modo de falha em barragens de rejeitos é a liquefação. Silva (2010) explica que liquefação é o fenômeno da perda da resistência de um material, induzida por acréscimos de poropressões, sob solicitações não drenadas. Este fenômeno pode ser potencialmente mobilizado tipicamente em solos finos, com baixa coesão, saturados e que apresentam tendência à contração sob esforços de cisalhamento.

Em outras palavras, a liquefação, apontada como a causa para o rompimento da barragem de Fundão, ocorre quando um material rígido passa a se comportar como fluido, pois o fluxo de água presente nesse material exerce uma força que anula o peso e a aderência de suas partículas, fazendo com elas fiquem soltas.

De acordo com Silva (2010), a construção de diques ou aterros sobre uma fundação contendo rejeitos fofos e saturados pode induzir aumentos rápidos nos níveis de tensões em condições não drenadas. Além disso, a disposição de rejeitos a montante destes diques, usualmente realizada por meio da técnica de aterro hidráulico, implica acréscimos contínuos de rejeitos saturados no âmbito da estrutura. Estes elementos condicionam a possibilidade de eventos catastróficos, associados a uma possível liquefação destes materiais sob solicitações estáticas e/ou dinâmicas.

Outro fator a ser analisado na ruptura de uma barragem de rejeito, conforme observado nos últimos desastres em Minas Gerais, é o método construtivo utilizado. Segundo Silva, (2010), considerando o uso dos próprios rejeitos na construção e ampliação das estruturas, as barragens podem ser caracterizadas por três tipos de métodos: alteamento a montante, alteamento a jusante e alteamento por linha de centro. Estas denominações referem-se ao deslocamento que o eixo da barragem apresenta durante as etapas de alteamento.

O método de alteamento a montante, empregado na barragem de Fundão, como explica Silva (2010), é feita a partir de um dique de partida geralmente construído com solo compactado. Em seguida os rejeitos são dispostos até a crista da barragem, formando uma praia de rejeitos que se torna a fundação dos próximos alteamentos.

Segundo Silva (2010), apesar da concepção e execução do método montante ser o mais simples e econômico, este método está associado à maioria dos casos de rupturas de barragens de rejeitos. O principal modo de falha de barragens de rejeitos alteadas para montante ocorre por processos de liquefação induzidos por carregamentos estáticos e transientes e isto está diretamente relacionado às baixas densidades dos rejeitos dispostos na barragem e à gestão inadequada da operação nestas estruturas.

Para Castro (2008), a construção dos alteamentos deve observar a sedimentação dos rejeitos sobre os quais serão construídos, para redução dos riscos de falha. Entretanto, o aumento da produção de minério e conseqüentemente maior geração de rejeitos levam a necessidade de construção de novos alteamentos, que são realizados muitas vezes sem a observância da sedimentação necessária. Caso esta não ocorra adequadamente, poderão surgir problemas no reservatório, causadas pela variação da percolação de água armazenada.

De acordo com Silva (2010), o risco de rompimento nesse tipo de estrutura refere-se a uma ação potencial devido a carregamentos rápidos, como a execução de dique de alteamento e uma rápida elevação da superfície freática. Segundo o autor, excessos na velocidade do alteamento para montante podem gerar o gatilho para a liquefação, no qual tem sido a causa de várias rupturas em barragens de rejeitos com método de alteamento para montante. A Figura 2.5 ilustra os três métodos citados.

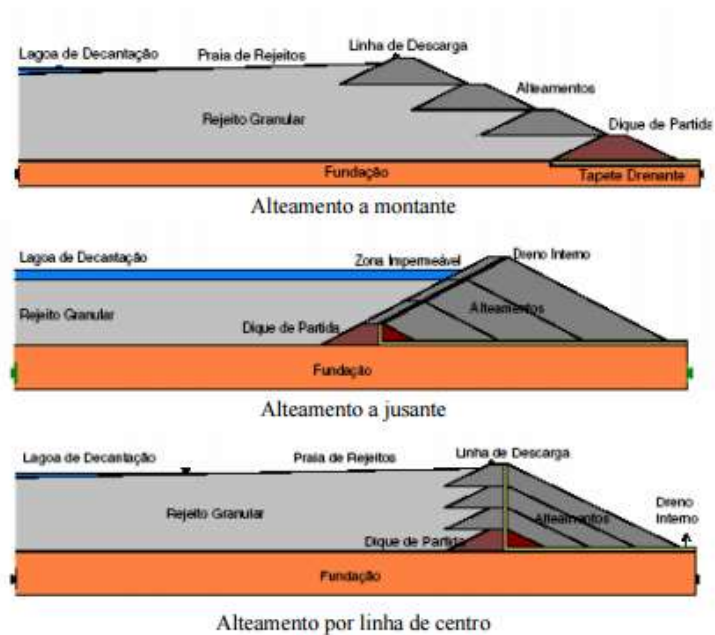


Figura 2.5: Barragens de rejeito com alteamentos sucessivos
 Fonte: Silva (2010)

De acordo com a ANM (2019), das 425 barragens inseridas na PNSB cadastradas, 84 possuem método de alteamento à montante ou desconhecido, como mostra a Figura 2.6 a seguir.

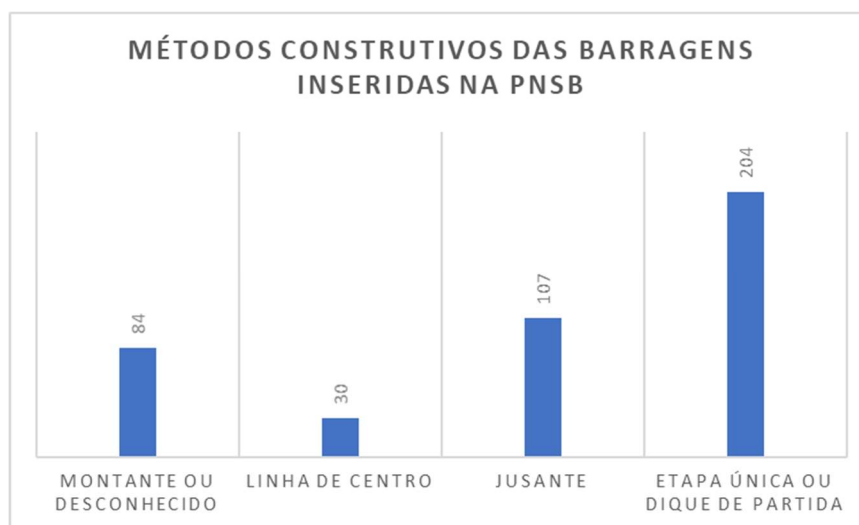


Figura 2.6: Métodos construtivos das barragens inseridas na PNSB
 Fonte: ANM (2019)

Embora as conclusões apontem para o alto risco de rompimento de barragens com o método construtivo a montante, a legislação brasileira não incluía essa característica como um critério específico para classificar a estrutura como sendo de alto risco até a publicação da Resolução ANM n°4 de fevereiro de 2019, como citada anteriormente.

Cabe ressaltar que as barragens com maiores riscos potenciais apontadas pela PNSB são aquelas em que a altura do maciço, do ponto mais baixo ao mais alto, for maior ou igual a 15 metros; as que armazenam resíduos industriais perigosos, as que possuem capacidade de armazenar volumes superiores a 3 milhões de metros cúbicos e as que foram categorizadas como tendo dando potencial associado médio ou alto, em termos econômicos, ambientais sociais ou de perdas de vidas.

As classificações por categoria de risco de acidentes com barragens, expostas no artigo 4º da Resolução CNRH nº 143/2012 (CNRH, 2012), são determinadas de acordo com os seguintes critérios que podem influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente em uma barragem: características técnicas (altura, comprimento e vazão de projeto), estado de conservação da barragem e existência do plano de segurança da barragem. Cada critério se decompõe em vários parâmetros e cada parâmetro se divide em níveis com pesos ponderados.

O Banco Mundial (2014), com o apoio da ANA produziu um relatório de avaliação dos critérios gerais da metodologia para a classificação de risco de barragem expostos na Resolução CNRH nº 143/2012. De acordo com o relatório, quanto maior a ponderação de um parâmetro, mais crítico ele será. A categoria de risco se obtém somando os pesos de todos os parâmetros para cada critério, e ao final somando os subtotais dos três critérios. A Tabela 2.4 mostra como é realizado o cálculo da categoria de risco para uma barragem, de acordo com as instruções do CNRH.

Tabela 2.4: Cálculo da categoria de risco

Critérios da barragem que afetam a possibilidade de um acidente	Pontos
Características Técnicas (CT)	XX
Estado de Conservação (EC)	XX
Plano de Segurança de Barragens (PS)	XX
Pontuação total (CRI) = CT + EC + OS	XX

Fonte: CNRH, 2012

Uma vez determinada a pontuação final da categoria de risco para uma barragem, essa será classificada como de risco alto, médio ou baixo. Um Estado de Conservação (EC) ≥ 8 em qualquer coluna dos critérios implica automaticamente uma categoria de risco muito alta e medidas imediatas devem ser adotadas pelo empreendedor da barragem. A Tabela 2.5 mostra as categorias de risco e suas respectivas pontuações finais.

Tabela 2.5: Categoria de risco segundo o CNRH

Categoria de Risco	CRI
Alto	≥ 60 ou $EC \geq 8$
Médio	35 a 60
Baixo	≤ 35

Fonte: CNRH, 2012

De acordo com a ANM (2019), até fevereiro do mesmo ano, das 425 barragens cadastradas e enquadradas na PNSB, apenas duas foram consideradas de alto risco, 61 de médio risco e 362 foram consideradas de baixo risco, conforme mostra a Figura 2.7 a seguir.

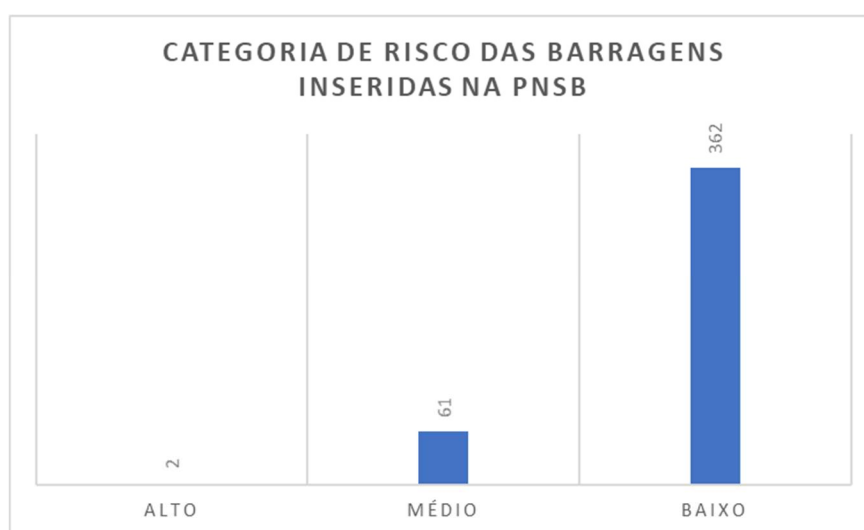


Figura 2.7: Categoria de risco das barragens inseridas na PNSB
Fonte: ANM (2019)

2.5 DANOS POTENCIAIS ASSOCIADOS À RUPTURA DE BARRAGENS

De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA, 2017), diferente da categoria de risco que diz respeito aos aspectos da própria barragem que possam influenciar na probabilidade de uma ruptura, o Dano Potencial Associado (DPA) é aquele que pode ocorrer devido à falha ou mau funcionamento da estrutura, independentemente da sua probabilidade de ocorrência, podendo ser graduado de acordo com as perdas de vidas humanas e impactos sociais, econômicos e ambientais.

Após a avaliação do risco deve ser iniciada a fase de estimativa das consequências e classificação dos danos decorrentes da ruptura da barragem a fim de identificar a necessidade de adoção de medidas específicas. De acordo com o Banco Mundial (2014), essa classificação contribui para o processo decisório de alocação de recursos, uma vez que ela fornece uma indicação de quais barragens e quais vales apresentam maiores danos e requerem, conseqüentemente, mais atenção e planejamento de ações.

Nesse sentido, torna-se imprescindível o conhecimento das consequências da ruptura de barragens, para que seja feita uma gestão adequada do risco e ações de prevenção possam ser tomadas.

Machado (2005) elaborou uma tipologia dos danos potenciais associados no caso de enchente em áreas urbanas. Para a autora, os danos são classificados em dois níveis. O primeiro nível divide-os em tangíveis ou intangíveis e o segundo nível classifica-os em diretos ou indiretos.

De acordo com Machado (2005), os danos tangíveis caracterizam-se como os passíveis de mensuração no contexto monetário, usualmente balizado através do preço praticado pelo mercado. Já os danos intangíveis são aqueles relacionados a bens de difícil quantificação, seja por questões morais ou ideológicas. Os danos intangíveis estão relacionados aos danos pessoais, como saúde ou efeitos relativos a estresse e à angústia, até mesmo à degradação da saúde coletiva relativo a condições sanitárias inadequadas. Objetos de valor sentimental, bens arqueológicos, de valor histórico e até a vida humana, são exemplos de bens intangíveis.

Segundo Machado (2005), os danos diretos e indiretos são classificados de acordo com sua causa. Sendo assim, os danos diretos ocorrem pelo contato físico com a água, destroços, solos e sedimentos com o bem atingido. Os danos indiretos são causados pelos transtornos ao sistema produtivo, levando à redução da atividade, assim como diminuição da arrecadação de impostos, custos de serviços de emergência, custo de limpeza, desvalorização das propriedades, desemprego, entre outros. A Tabela 2.6 exemplifica alguns danos que podem ocorrer em caso de inundação e suas tipologias.

Tabela 2.6: Tipologia de danos decorrentes de inundações em áreas urbanas

Setor	Danos tangíveis		Danos intangíveis	
	Diretos	Indiretos	Diretos	Indiretos
Habitacional	Danos físicos à construção; Danos físicos ao conteúdo.	Custos de limpeza; Alojamento; Medicamentos.	Ferimentos e perdas de vidas humanas; Doenças pelo contato com a água; Perda de objetos de valor sentimental; Perda de animais de estimação.	Estados psicológicos de estresse e ansiedade; Danos de longo prazo à saúde.
Comércio e Serviços	Danos físicos à construção; Mobiliário, estoques, mercadorias em exposição etc.	Custos de limpeza; Lucros cessantes; Desemprego; Perda de base de dados; Perda de renda.	Ferimentos e perdas de vidas humanas; Doenças pelo contato com a água.	Estados psicológicos de estresse e ansiedade; Danos de longo prazo à saúde; Inconvenientes de interrupção de serviços; Falta de motivação para o trabalho.
Industrial	Danos físicos à construção; Estoques de matéria prima, produtos e equipamentos.	Custos de limpeza; Lucros cessantes; Desemprego; Perda de base de dados; Perda de renda.	Ferimentos e perdas de vidas humanas; Doenças pelo contato com a água.	Estados psicológicos de estresse e ansiedade; Danos de longo prazo à saúde;
Equipamentos públicos e serviços	Danos físicos à construção; Conteúdo.	Custos de limpeza e de interrupção de serviços; Custo dos serviços de emergência.	Ferimentos e perdas de vidas humanas; Doenças pelo contato com a água.	Estados psicológicos de estresse e ansiedade; Danos de longo prazo à saúde; Inconvenientes de interrupção de serviços.

Setor	Danos tangíveis		Danos intangíveis	
	Diretos	Indiretos	Diretos	Indiretos
Infraestrutura	Danos físicos ao patrimônio.	Custos de limpeza e de interrupção de serviços; Paralisação e congestionamento nos serviços; Custos adicionais de transportes.	Ferimentos e perdas de vidas humanas; Doenças pelo contato com a água.	Inconvenientes de interrupção de serviços.
Patrimônio Histórico e Cultural	Danos físicos ao patrimônio.	Custos de limpeza e de interrupção de serviços.	Ferimentos e perdas de vidas humanas; Doenças pelo contato com a água.	Inconvenientes de interrupção de serviços.

Fonte: Adaptado de Machado (2005)

Para além da classificação dos danos, o trabalho de Machado (2005), estabelece relações entre os danos diretos e variáveis hidráulicas associadas à enchente, tais como a profundidade, a duração e a velocidade de escoamento. A autora investigou esse tipo de perda no setor habitacional da cidade de Itajubá - MG que teve mais de 70% da sua área urbana atingida por uma inundação que durou três dias e chegou a mais de três metros de profundidade de submersão.

Segundo Machado (2005), no setor habitacional, as perdas diretas causadas por inundação são caracterizadas pelo dano à edificação e seu conteúdo. O primeiro caso está relacionado, entre outros fatores, à qualidade e estado de conservação da construção e à área construída. O conteúdo, por sua vez, é caracterizado pela quantidade, tipo, qualidade e idade de bens duráveis expostos, tais como, móveis, eletrodomésticos e elementos de decoração. Como esses fatores estão relacionados ao poder aquisitivo dos moradores, espera-se que o valor do dano apresente uma certa dependência da variável profundidade.

Dessa forma, a partir do levantamento dos valores das construções e seus conteúdos e a associação desses valores às classes econômicas, Machado (2005), definiu diferentes curvas de danos versus profundidade, como mostram as Figura 2.8 e Figura 2.9. Esse trabalho tem sido utilizado como referência para adoção de curvas de dano, no contexto brasileiro, em diversos trabalhos técnicos e acadêmicos sobre o tema (Cançado, 2009; Pádua et. al., 2017; Matos, 2018; entre outros).

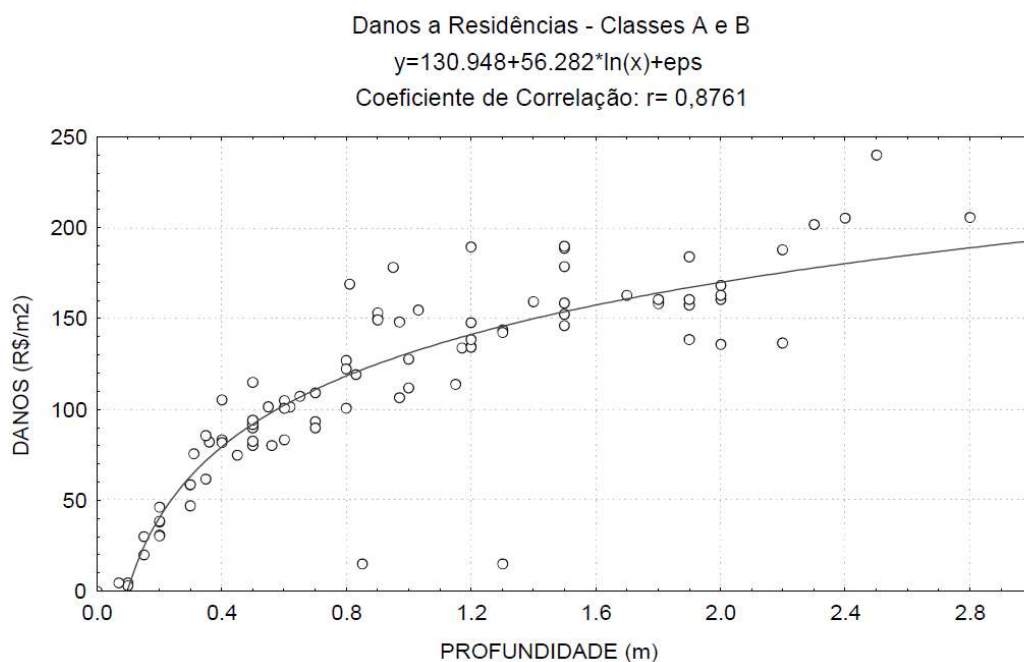


Figura 2.8: Curvas de danos versus profundidade para as classes sociais A e B
 Fonte: Machado *et. al.* (2005)

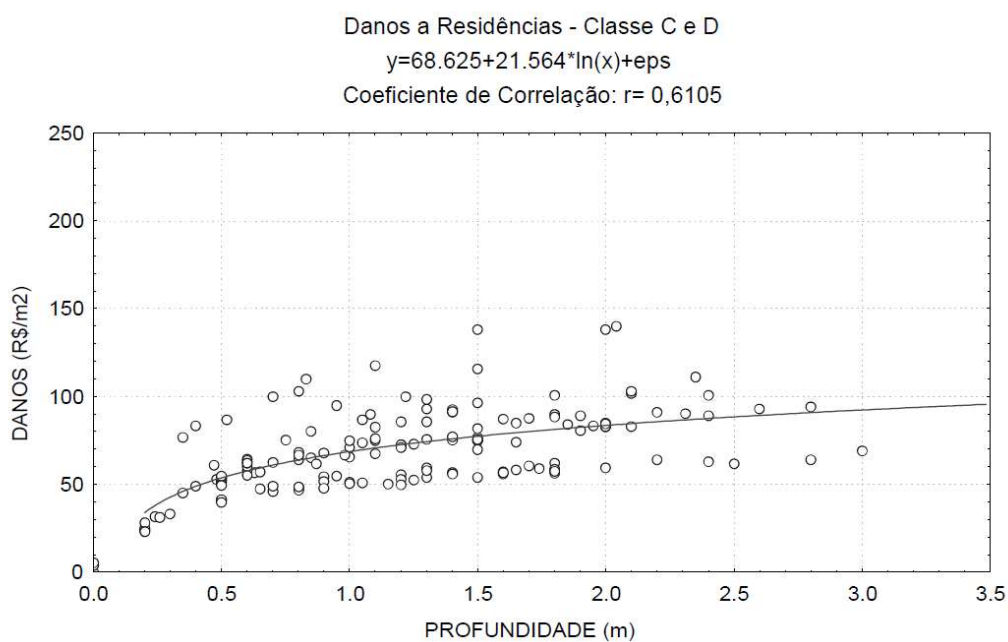


Figura 2.9: Curvas de danos versus profundidade para as classes sociais C e D
 Fonte: Machado *et. al.* (2005)

Quanto a classificação do dano potencial associado (DPA) exposta no artigo 5º da Resolução CNRH nº 143/2012, esta é feita em função do potencial de perda de vidas humanas e dos impactos econômicos, sociais e ambientais e resulta em classes de alto, médio ou baixo para a estrutura avaliada.

Como no caso da classificação por categoria de risco, cada parâmetro se divide em níveis, com pesos ponderados. Novamente, quanto maior a ponderação de um parâmetro, mais crítico ele será. A Tabela 2.7 mostra como é realizado o cálculo do dano potencial associado. A Tabela 2.8 mostra as categorias de dano potencial associado e suas pontuações finais definidas no pelo CNRH.

Tabela 2.7: Cálculo do dano potencial associado

Critérios da barragem que afetam o dano potencial associado (DPA)	Pontos
Volume do reservatório (a)	xx
Potencial de perdas de vidas humanas (b)	xx
Impacto ambiental (c)	xx
Impacto socioeconômico (d)	xx
Pontuação total (DPA) = a + b + c + d	xx

Fonte: CNRH, 2012

Tabela 2.8: Classificação por dano potencial associado

Categoria	DPA
Alto	≥ 16
Médio	$10 < DPA < 16$
Baixo	≤ 10

Fonte: CNRH, 2012

De acordo com a ANM (2019), as barragens cadastradas e enquadradas na PNSB são classificadas por dano potencial associado de acordo com a Figura 2.10 a seguir.

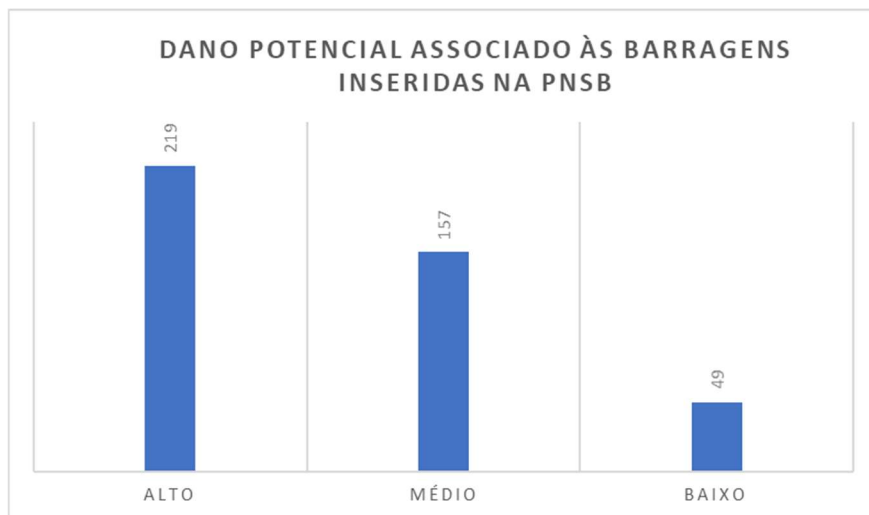


Figura 2.10: Dano potencial associado das barragens inseridas na PNSB
 Fonte: ANM (2019)

Os critérios definidos pelo CNRH (2012) para a classificação de dano potencial associado seguem muitos sistemas internacionais para o mesmo fim, porém a forma de mensuração de cada critério e dos fatores que o influenciam, devem ser amplamente estudados. Para Menezes (2016), o uso de ferramentas que permitam prever esses danos, avaliá-los e classificá-los, torna-se importante e necessário.

Segundo o Banco Mundial (2014), a perda de vidas humanas é o parâmetro mais importante em qualquer sistema de classificação de dano potencial. Se for plausível o potencial para a perda de vidas, então a barragem é automaticamente classificada com o maior potencial de dano.

Para o Banco Mundial (2014), o número de óbitos resultantes de um rompimento ou mau funcionamento de barragem é o fator que mais pesa na classificação do dano e é usualmente influenciado pelos seguintes fatores: o número de pessoas que ocupam a planície do rompimento da barragem; o tempo de alerta para as pessoas expostas e a gravidade da inundação. No entanto, o CNRH (2012) considera somente o primeiro caso.

A avaliação dos danos causados por rompimento de barragens tem sido objeto de estudos e desenvolvimento de diversas metodologias para sua identificação e classificação no Brasil e no mundo. Menezes (2016) realizou uma pesquisa que avalia algumas metodologias disponíveis na literatura, com destaque para o índice de risco e a classificação de risco.

O trabalho da autora compara as metodologias em relação a três premissas para a avaliação dos danos: o risco hidrodinâmico, que expressa a relação entre profundidade e velocidade do escoamento e nesse sentido, representa a gravidade da inundação; o número de vidas em perigo permanente e temporário e o julgamento do especialista em situação de risco obvio. A Tabela 2.9 apresenta o resultado da comparação realizada em Menezes (2016).

Tabela 2.9: Comparação das premissas das metodologias de avaliação de danos

Metodologia	Premissas			
	Risco hidrodinâmico	Vidas em risco		Julgamento do especialista
		Permanente	Temporário	
Índice de risco	Não	Sim	Não	Não
Classificação de risco	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Adaptado de Menezes (2016)

A metodologia do Índice de Risco foi elaborada por Teresa Viseu em 2006, com apoio do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal. A metodologia de Classificação do Risco foi desenvolvida pela *United States Bureau of Reclamation* (USBR) em 1988.

Cabe ressaltar que ambas as metodologias discutidas a seguir, consideram que o dano deve ser mensurado partindo de uma base incremental, ou seja, buscam separar os danos provenientes de uma cheia natural dos danos efetivamente causados pela ruptura da barragem.

A metodologia de Índice de Risco (VISEU, 2006) é a que mais se assemelha aos critérios estabelecidos pelo CNRH (2012) pois não considera o risco hidrodinâmico, tendo como premissa que tudo que é inundado pela cheia será dano ou perda. Esse índice é obtido através da soma ponderada do número total de pessoas em risco, considerando a população residente, do valor da área agrícola e industrial, da importância da infraestrutura atingida (pontes, rodovias, sistema de abastecimento de água e esgoto etc.) e da importância dos recursos naturais na área afetada. Por considerar todo o vale a jusante com igual potencial para perdas de vida e consequências econômicas, o índice de risco pode ser considerado um tipo de metodologia com abordagem mais conservadora.

Por outro lado, a metodologia de Classificação de Risco (USBR, 1988) considera como vidas em risco, os residentes na área impactada (risco permanente) e os indivíduos possivelmente presentes nas áreas públicas e de lazer (risco temporário). A classificação dos danos nessa metodologia deve ser enquadrada em alta, média ou baixa e deve traduzir o potencial de perdas de vida e perdas econômicas através dos danos potenciais às residências, edifícios comerciais, indústrias, terras agrícolas, pastos, rodovias, e os danos aos recursos naturais em áreas protegidas por legislação.

Na metodologia desenvolvida pela USBR (1988), a análise é feita considerando que os danos potenciais dependem da relação entre a profundidade e a velocidade do escoamento - o risco hidrodinâmico, pois baixas profundidades e velocidades do escoamento podem não caracterizar uma ameaça.

Para USBR (1988), a classificação de risco a jusante não está associada à condição existente de uma barragem e suas estruturas pertinentes ou ao desempenho ou operação prevista para a estrutura. Em vez disso, a classificação de perigo é uma declaração de potencial do impacto adverso na vida humana se uma barragem falhar. A Tabela 2.10 mostra o sistema de classificação de perigo a jusante baseado no dano potencial causado por um rompimento de barragem pela USBR (1988).

Tabela 2.10: Sistema de classificação de perigo pela USBR

Classificação	Vidas em perigo	Perdas econômicas
Baixa	0	Mínimo (agricultura não desenvolvida, estruturas desabitadas ocasionais ou recursos naturais pendentes mínimos)
Significante	1 a 6	Apreciável (área rural com notável agricultura, indústria ou locais de trabalho ou recursos naturais excelentes)
Alta	maior que 6	Excessivo (área urbana, incluindo comunidade extensiva, indústria, agricultura ou recursos naturais pendentes)

Fonte: USBR (1988)

A USBR (1988) explica que os valores na Tabela 2.10 ("1 a 6" e "maior que 6" para significante e alto, respectivamente) são puramente arbitrários. Tais valores são apresentados com a intenção de quantificar os critérios anteriores, que se resumiam em "poucos" e "mais do que poucos". De acordo com o censo de 1980 nos Estados Unidos, a família média nesse país era de três ocupantes; portanto, "poucos" foram quantificados em duas famílias e "mais do que poucos" foram consideradas mais do que 2 famílias. As vidas em risco para a classificação de baixo risco, que havia sido "nenhuma esperado", foi quantificado como "zero".

Para a USBR (1988), em determinados casos a classificação de risco a jusante é óbvia, ou seja, uma análise não é necessária porque vidas estão em risco e/ou danos à propriedade ocorreriam, com pouca dúvida. Porém essa análise nem sempre prova que um possível perigo é um risco confirmado. Uma residência pode ser inundada por 0,3 metros de água, mas isso resultará em perda de vidas? Se uma inundação causada por uma ruptura de barragem ultrapassar uma ponte em uma rodovia, a ponte será destruída? Caso contrário, um veículo será transportado pela água da enchente ou perderá o controle?

Dessa forma, a USBR (1988) estabelece que deve ser feito um zoneamento do risco em função da profundidade e velocidade do escoamento para a estimativa dos danos e perdas de vida. As relações entre o nível de perigo da inundação e o produto da velocidade e profundidade podem ser divididas em três zonas explicadas a seguir.

- Zona de baixo perigo: Nesta zona o produto da velocidade pela profundidade da inundação é baixo e por isso, o número de vidas em risco será assumido como zero.
- Zona de alto perigo: Se a combinação de profundidade e velocidade for alta, presume-se que todas as vidas estejam em risco.

- Zona de julgamento: As zonas de baixo e alto perigo representam os dois extremos de certeza razoável em relação à ocorrência de vidas em risco. Entre esses dois extremos, existe uma zona de incerteza em relação à essa avaliação. Como toda situação de inundação é única, é impossível considerar todas as variáveis que podem resultar em vidas em risco se a magnitude da inundação (profundidade e velocidade) ocorrer nessa zona. Portanto, nesse caso, cabe ao analista determinar vidas em risco. Existem muitos fatores possíveis a serem considerados nesse caso, como: número de pessoas expostas a inundação, tempo de duração da onda, material utilizado na fabricação das residências, o horário da ruptura, entre outros.

Esse zoneamento varia para residências construídas sobre fundações, casas móveis, veículos em vias públicas e pedestres. Também são detalhados zoneamentos diferentes de acordo com a idade das pessoas em risco, pois considera-se a capacidade de mobilização do indivíduo frente a uma enchente.

Assim, a fim de complementar a metodologia de classificação de danos potenciais associados definida pela CNRH (2012), o Banco Mundial (2014), recomenda usar as relações de nível de perigo de inundação propostas por USBR (1988), tanto para a identificação de população de risco quanto para estimar os danos econômicos potenciais.

Balbi (2008) propôs um zoneamento simplificado da mancha de inundação em função do produto da profundidade pela velocidade da inundação (HxV). Essa divisão possibilita a criação de um mapa de risco hidrodinâmico na área afetada a jusante, representando o perigo que se modifica ao longo do vale. A Tabela 2.11 mostra essa proposta de zoneamento.

Tabela 2.11: Proposta de classificação de risco hidrodinâmico

HxV (m ² /s)	Nível de perigo
< 0,5	reduzido
0,5 - 1	Alto para pessoas
1 a 5	Alto para pessoas e médio para edificações
>5	Alto para pessoas e para edificações

Fonte: Balbi, 2008

Outro fator que deve ser considerado na estimativa de perdas de vidas em decorrência de uma ruptura de barragem é o tempo entre a emissão do alerta da emergência nos locais habitados a jusante e o tempo de chegada da onda. As cheias provocadas por rompimento de barragens são caracterizadas por grandes profundidades e altas velocidades de escoamento, o que reduz o tempo disponível para aviso e evacuação da população a jusante. A Tabela 2.12 mostra o número esperado de vítimas em função do tempo de alerta do rompimento da barragem em USBR (1988).

Tabela 2.12: Número esperado de vítimas em função do tempo de alerta

Tempo de aviso	Perdas de vida	Número esperado de vítimas (NEV)
0 a 15 min	Significante	NEV = 50% do número de pessoas em risco
15 a 90 min	Potencialmente significativa	NEV = (número de pessoas em risco) ^{0,6}
mais que 90 min	perdas de vida eliminada	NEV = 0,0002 X número de pessoas em risco

Fonte: USBR, 1988

Segundo Balbi (2008), os Planos de Ações Emergenciais (PAE) definem duas zonas de perigo principais: a próxima à barragem, onde as ações da defesa civil são mais limitadas dado o tempo de aviso reduzido, e aquelas mais distantes. A zona próxima à estrutura corresponde à área onde a população deverá estar preparada para sua própria evacuação ao ser alertada pela operação da barragem ou pela defesa civil. Nas zonas mais distantes considera-se que há tempo para que as autoridades orientem a evacuação.

A zona mais próxima e de maior risco é denominada Zona de Autossalvamento (ZAS). Segundo o Artigo 2º, inciso XL da Portaria nº 70.389/2017 (DNPM, 2017), a ação dos agentes de proteção civil se torna mais difícil devido à rapidez com que essa área é inundada. Por isso, os avisos de alerta à população são da responsabilidade do empreendedor. O mesmo texto define que a ZAS deve delimitada pela maior das seguintes distâncias: 10 quilômetros a jusante da barragem ou a distância que corresponda a um tempo de chegada da onda de inundação igual a trinta minutos.

2.6 GESTÃO DE RISCO DE BARRAGENS

De acordo com a Norma Brasileira NBR ISO 31000:2009 (ABNT, 2009), o risco é expresso em termos de uma combinação de consequências de um evento e a probabilidade de ocorrência deste. Assim, a gestão do risco é entendida como um conjunto de atividades coordenadas para conhecer tais probabilidades e consequências e dirigir e controlar ações que buscam reter, assumir ou afastar-se do risco.

Em Balbi (2008), a segurança é um dos deveres básicos da engenharia e deve constituir o objetivo principal no projeto, construção e operação das obras construídas, em especial nas barragens. Mesmo sendo o projeto e a construção adequados, existe um risco remanescente a ser controlado, pois por melhor que sejam essas práticas, elas não são suficientes para garantir o risco nulo de um acidente.

Segundo Menezes (2016) *apud* Bowles *et. al.* (1997), existe uma tendência mundial em nortear o processo de tomada de decisão pela gestão do risco de ruptura de barragens, considerando situações de emergências e envolvendo todas as partes interessadas (órgãos de controle, empreendedor e população com vidas e/ou bens em exposição). Além disso, a correção de todas as deficiências da obra pode ser inviável, devendo-se implementar a gestão do risco remanescente/residual.

Para Almeida (2001), os riscos de rompimento dessas estruturas não podem ser eliminados totalmente, logo devem ser geridos. A gestão de risco em barragens inclui o controle ou mitigação dos danos potenciais induzidos por acidentes ou incidentes e sua estrutura deve priorizar a avaliação do risco, a decisão e o controle e mitigação. Assim, a avaliação do risco consiste na análise integrada da probabilidade de o evento ocorrer e das consequências potenciais decorrentes dele. A partir dessa análise, as medidas mitigadoras devem ser tomadas, incluindo a comunicação do risco ao público e órgãos reguladores. A Figura 2.11 mostra um exemplo de estrutura de gestão de risco.

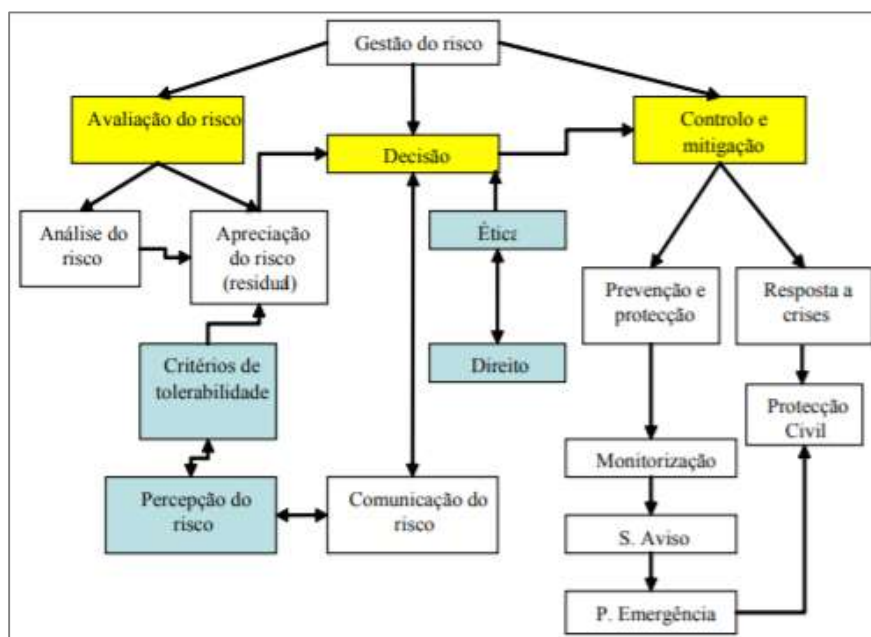


Figura 2.11: Exemplo de estrutura de gestão de risco
 Fonte: Almeida, 2006

Nesse contexto, a gestão do risco de barragens, consiste no conjunto de ações que visam minimizar a possibilidade de ocorrência de acidentes em todas as fases (projeto, obra e operação), assim como a vulnerabilidade das áreas potencialmente atingidas, tendo como foco a prevenção e mitigação dos riscos.

Com o mesmo entendimento, a ANA, através da Resolução nº 91, de abril de 2012 (ANA, 2012), definiu cinco classes de risco para as barragens sob sua jurisdição a partir da análise integrada do CRI e DPA expostos em CNRH (2012), conforme Tabela 2.13 a seguir.

Tabela 2.13: Matriz de análise risco x dano

Categoria de Risco (CRI)	Dano Potencial Associado (DPA)		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	A	B	C
Médio	A	C	D
Baixo	A	C	E

Fonte: ANA, 2012

De acordo com Anderáos *et. al.* (2013), a matriz da Resolução ANA foi concebida conforme os preceitos da NBR ISO 31000:2009 (ABNT, 2009), que relaciona probabilidade e consequência e que constitui um meio de combinar classificações qualitativas ou semiquantitativas das mesmas, a fim de produzir um nível de risco ou classificação de risco. Estabelecendo-se a correspondência entre os conceitos e definições da Lei e da Norma, a categoria de risco representaria a probabilidade, o dano potencial associado seria a consequência e as cinco classes A, B, C, D e E seriam os níveis de risco.

Para cada nível de risco, devem ser adotados procedimentos diferentes em relação a gestão das barragens, como o escopo do Plano de Segurança, a obrigatoriedade do Plano de Ações Emergenciais e outras ações mitigadoras. Segundo a ANM (2019), as barragens cadastradas e enquadradas na PNSB estão classificadas quanto ao risco de acordo com a Figura 2.12.

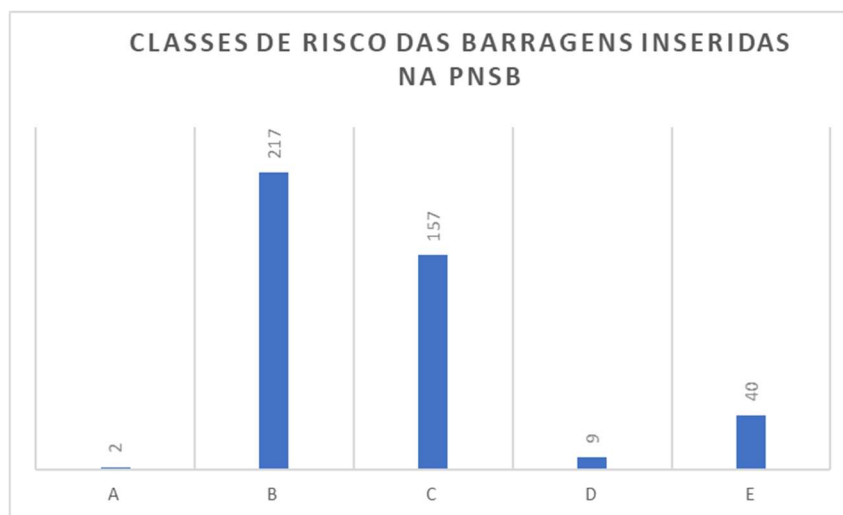


Figura 2.12: Classes de risco das barragens inseridas na PNSB
Fonte: ANM (2019)

Para Almeida (2001), as principais medidas mitigadoras do risco são: a implementação de um sistema de aviso à população interligado à equipe de controle e operação da barragem; a elaboração de um plano de evacuação com base no mapa de inundação fornecido pelo proprietário da barragem e elaboração de um plano de emergência para gestão da possível crise contendo ações de socorro, recuperação e a realização de treinos, exercícios e ensaios dos sistemas de aviso e alerta.

Em Almeida (2006) é apresentada em exemplo de matriz de risco, a partir de uma análise quantitativa, consideradas cinco classes de probabilidade e cinco classes de consequências, conduzindo a um conjunto de apreciação do risco associado, como mostra a Tabela 2.14.

Tabela 2.14: Matriz probabilidade x consequência

Probabilidade	Consequência				
	Quase nula	Marginal	Séria	Crítica	Catástrofe
Frequente	Indesejável	Indesejável (deve ser evitado / Controle necessário)	Inaceitável	Inaceitável	Inaceitável
Provável	Aceitável se controlado	-	Indesejável	Inaceitável	Inaceitável
Ocasional	Aceitável	Aceitável	-	Indesejável	Inaceitável
Remota	Desprezível	-	Aceitável	-	Indesejável
Improvável	-	Desprezível	-	Aceitável	-

Fonte: Almeida, 2006

Menezes (2016) ressalta que a aceitabilidade do risco tem sido associada cada vez mais à avaliação dos danos decorrentes da propagação da onda no vale a jusante, sendo de suma importância o desenvolvimento de metodologias para avaliação desses danos. Dessa forma, devido à sua relevância no processo de tomada de decisão, mitigação e controle do risco nos vales a jusante de barragens, a avaliação dos danos precisa ser minuciosamente estudada.

2.7 MODELAGEM

2.7.1 Modelo Hidrodinâmico – HEC-RAS

Para avaliar os danos nos vales a jusante de barragens é indispensável realizar estudos prévios, como a estimativa dos parâmetros de ruptura, a simulação da propagação da onda de cheia e a elaboração do mapa de inundação, para então se obter as informações necessárias referentes aos danos.

De acordo com Menezes (2016), uma problemática na estimativa dos danos decorrentes da ruptura de barragens, é a necessidade de estimar o hidrograma de ruptura com o uso de equações empíricas que envolvem muitas incertezas. Embora as equações utilizadas para estimativa da brecha, da vazão de pico e do tempo de ruptura tenham sido geradas a partir de casos observados, elas foram elaboradas para barragens distintas com causas de colapso diferentes.

Segundo Rocha (2015), a abordagem hidráulica para ruptura de uma barragem de contenção de rejeitos pode ser dividida em três etapas: a determinação do hidrograma de ruptura, a propagação deste no vale a jusante e a sinterização do resultado em mapas com a delimitação da envoltória de inundação.

Viseu *et. al.* (2011), esclarecem que para simular cheias induzidas por ruptura de barragens é necessário realizar previamente a modelagem do processo de formação dessa cheia, ou seja, o desenvolvimento da brecha de ruptura e a determinação do seu hidrograma. Os modelos existentes para esse fim podem ser baseados em equações empíricas de previsão, em métodos físicos ou modelos paramétricos.

Tanto Viseu *et. al.* (2011) quanto Rocha (2015) afirmam que os modelos empíricos utilizam uma base de dados de casos históricos de ruptura e estimam, por meio de regressão entre as variáveis observadas, os parâmetros da brecha de ruptura. Os modelos físicos analisam o desenvolvimento da brecha e a formação do hidrograma resultante utilizando princípios da hidráulica, de transporte de sedimentos e de mecânica de solos. Por fim, os modelos paramétricos utilizam como dado de entrada os parâmetros da brecha estimados a partir das equações de previsão (modelos empíricos) e determinam o hidrograma utilizando princípios da hidráulica.

Rocha (2015) ressalta que, dentre os modelos paramétricos para a obtenção do hidrograma de ruptura de uma barragem, o modelo HEC-HMS, desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), é recomendado pela facilidade de aplicação, versatilidade e embasamento teórico. Porém, segundo o autor, uma vez que os modelos paramétricos utilizam os parâmetros geométricos obtidos por meio de equações de previsão, a exatidão do hidrograma de ruptura resultante está atrelada à confiabilidade da equação empregada.

De acordo com Matos (2018), o cálculo de previsão da brecha de ruptura depende de diversos fatores, como a geometria do maciço, a composição dos materiais, o método construtivo, os alteamentos, a inclinação dos paramentos de montante e jusante, as dimensões do reservatório, o tipo de falha, entre outros. Com base nos estudos de Machado (2017), a autora simulou a ruptura da barragem de Fundão utilizando o modelo paramétrico HEC-HMS, onde os dados da brecha, a curva cota-volume do reservatório da barragem e a inclinação dos taludes de montante e de jusante resultaram no hidrograma de ruptura da barragem.

Machado (2017) realizou um estudo de retroanálise da ruptura da barragem de Fundão, incorporando os parâmetros reológicos e geotécnicos do rejeito, necessários para a simulação hidráulica de fluidos não-Newtonianos. Segundo a autora, o fluxo Newtoniano consiste em líquidos sem resíduos ou baixas concentrações de sólidos em suspensão enquanto os fluxos não-Newtonianos caracterizam-se pela viscosidade do material, proveniente da alta concentração de sedimentos.

Após a obtenção do hidrograma de ruptura da barragem, é realizada a propagação desse no vale a jusante. Existem na literatura alguns modelos para esse fim, considerando os diversos fluxos de escoamento (aquoso ou hiperconcentrado). Em Viseu *et. al.* (2011), os modelos existentes para simular a propagação da onda induzida por ruptura de barragens constituem aplicações de modelos gerais de propagação de cheias naturais. A formulação matemática que está na base desses modelos é obtida a partir de equações da hidrodinâmica, correspondentes ao escoamento em superfícies livre (dinâmico e variáveis). Dentre os modelos mais utilizados está o HEC-RAS (USACE, 2016).

Segundo Rocha (2015), o RAS - *River Analysis System*, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* (HEC) do *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE) utiliza as equações de Saint-Venant, típicas para escoamento de fluidos newtonianos. Para a sua utilização é necessário definir alguns dados de entrada, como: o hidrograma de ruptura, descrito anteriormente, a topografia no vale a jusante, o coeficiente de rugosidade do terreno, as condições de contorno de jusante e o intervalo de tempo para convergência do modelo.

A topografia é obtida comumente por meio de modelos digitais de terreno (MDT) ou modelos digitais de elevação (MDE) representados por dados matriciais em formato raster. Rocha (2015) diferencia os dois tipos de modelo em relação ao valor altimétrico do pixel do raster. Enquanto o MDE considera a elevação de objetos posicionados sobre a superfície da terra, por exemplo, o topo de um prédio ou copa de uma árvore, o MDT refere-se a cota altimétrica do nível do solo.

Segundo Rocha (2015), a topografia é o dado de entrada mais importante para a propagação da onda no vale a jusante, devido à alta sensibilidade apresentada pelo modelo em relação a essa variável. O autor conclui que, dados que possuem uma precisão menor, tendem a aumentar consideravelmente a mancha de inundação estimada. Sendo assim, é recomendável que estudos de previsão de inundação, principalmente em áreas densamente ocupadas, sejam feitos com a aquisição de topografia de alta precisão.

A utilização do MDE em estudos hidráulicos tem avançado constantemente, uma vez que diversos órgãos e instituições tem disponibilizado, por um baixo custo, esse tipo de modelo. Destacam-se entre eles, o MDE gerado pelo *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), ambos com resolução espacial de 30 metros, e o mais recente *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS Palsar), com resolução espacial de 12,5 metros.

Em relação à rugosidade, esta é responsável pelo atrito ou resistência a passagem do fluido por um canal ou superfície. Segundo Rocha (2015), o coeficiente de rugosidade do terreno é importante para a previsão da perda de energia do escoamento não permanente, podendo inclusive ser utilizada para representar a viscosidade do próprio fluido a ser propagado. Devido à simplicidade de sua forma e dos resultados satisfatórios em aplicações práticas, é calculada pela equação de resistência de Manning e é usualmente determinada a partir da classificação do uso e cobertura do solo da área à jusante.

O coeficiente de Manning é um parâmetro fundamental para descrição da vazão sobre uma superfície. Rocha (2015) explica que sua influência está mais relacionada ao tempo de chegada da onda do que à extensão da mancha de inundação.

Segundo Brasil (2005), para áreas rurais, a presença de árvores, arbustos e capinzais nas planícies deve ser avaliada de forma a pesar a influência para o escoamento da rugosidade desses elementos. Em particular, para áreas urbanas torna-se importante avaliar locais com obstruções específicas, como edifícios ou paredes que se interpõem ao fluxo gerando uma perda de quantidade de movimento.

Para as condições de contorno de jusante, Rocha (2015) explica que esse parâmetro é importante em todos os modelos hidráulicos e pode ser uma fonte de erro e instabilidade numérica. Em estudos de ruptura de barragem, dada a magnitude da vazão em trânsito, geralmente superiores às vazões das cheias naturais, as relações vazão e nível de água não são conhecidas em nenhum local do trecho simulado. Por isso, USACE (2016) recomenda utilizar a profundidade normal do rio, com o intuito de minimizar erros.

De acordo com Rocha (2015), a acurácia de um modelo não permanente depende do intervalo de tempo adotado na simulação. Intervalos de tempos muito pequenos podem resultar em aumento de tempo computacional necessário para o término da simulação e também em instabilidade numérica. Já intervalos de tempo muito grandes podem resultar em perda de precisão, instabilidade e difusão numérica com maior atenuação da vazão de pico.

2.7.2 Modelo de Estimativa de Danos – HEC-FIA

Segundo Lehman *et. al.* (2018), ao longo dos anos os modelos hidrodinâmicos, as técnicas de modelagem, os métodos de estimativa de parâmetros e os recursos de saída foram desenvolvidos usando diversos programas de computador para simulação de rompimento de barragens. A maioria dos modelos de ruptura de barragens existentes, desenvolvida durante a década de 1980, tinha o objetivo principal de elaborar mapas de inundações para os Planos de Ação Emergenciais (PAE). Para o autor, esses modelos geralmente não são adequados para a avaliação de danos, pois estão desatualizados, não tratam de toda a gama de eventos associados às falhas de barragens e não podem ser prontamente incorporados a uma estrutura GIS para interação com os modelos atuais de estimativa de consequências.

Lehman *et. al.* (2018) explicam que o desenvolvimento de estimativas de danos para cenários de falha de barragens teve uma prioridade relativamente baixa para o USACE, até o início da década de 2010. As estimativas detalhadas de consequências raramente eram necessárias para apoiar a gestão do risco de ruptura de barragens, uma vez que uma modificação na segurança da barragem poderia ser justificada simplesmente demonstrando o potencial de uma ou mais fatalidades.

A gestão de risco de barragens no cenário brasileiro mostra que o processo não foi diferente e como resultado, as estimativas de danos causados por ruptura de barragens não existem, estão desatualizadas ou carecem de detalhes e compatibilidade com uma estrutura em SIG.

Segundo o Banco Mundial (2014), embora a maioria das decisões tomadas em relação a segurança de barragens esteja relacionada principalmente à segurança da vida humana, a necessidade de estimar consequências econômicas precisas, rápidas e confiáveis e a capacidade de pesar essas perdas econômicas na avaliação do risco de ruptura de uma barragem são uma necessidade para os programas de gestão de risco, à medida que a ocorrência de ruptura dessas estruturas se torna mais recorrente e os vales a jusante mais ocupados.

De acordo com Lehman *et. al.* (2018), o *Flood Impact Analysis* (HEC-FIA) é um modelo autônomo compatível com GIS, desenvolvido e utilizado pela USACE para estimar impactos das inundações. Seu desenvolvimento objetivou primeiramente estimar as consequências de um evento de inundação e quantificar o dano direto evitado em uma determinada área por projetos implementados para o controle de vazão dos rios. Porém, essa ferramenta tem sido muito utilizada para estimar danos potenciais associados à ruptura de barragens ou quantificar tais danos no caso de um evento ocorrido.

Em USACE (2014), no HEC-FIA, o dano direto é descrito pela magnitude do dano às estruturas e seus conteúdos, os valores do veículo e perda de vidas resultantes de um evento de inundação. A partir de um conjunto de dados econômicos e populacionais, o software calcula os danos econômicos urbanos e agrícolas em uma área inundada, o número de estruturas inundadas, a população em risco e as perdas de vidas. Esses resultados apresentam grande potencial de utilização para embasar as avaliações de risco nos programas de segurança de barragens.

Segundo USACE (2014), para que o HEC-FIA calcule os danos à estrutura e ao conteúdo, o usuário deve inserir, além de um inventário detalhado de estruturas, os dados da inundação, caracterizado pelos rasters de profundidade, risco hidrodinâmico e chegada da onda de inundação e uma função de dano versus profundidade.

O inventário de estruturas detalhado é representado por um arquivo shapefile na forma de ponto, com todas as informações das estruturas atribuídas a cada ponto. Os atributos necessários para a construção desse inventário são a altura de fundação, o tipo de estrutura, o valor da edificação e do conteúdo, a categoria da estrutura e um nome ou código identificador único.

Após a importação dos dados da estrutura para o projeto HEC-FIA, são requeridos os dados de inundação. Embora a profundidade seja o único dado necessário ao modelo para representar o evento, a adição de um raster que represente o risco hidrodinâmico, produto máximo de profundidade e velocidade alcançada em uma simulação, permitirá um cálculo mais detalhado dos danos à estrutura.

De acordo com USACE (2018), o HEC-FIA examinará cada estrutura e identificará a profundidade na mesma a partir dos valores nas células do raster e associará essa profundidade à curva de dano versus profundidade definida pelo tipo da estrutura, o que resultará em danos a cada estrutura impactada. A Figura 2.13 ilustra a associação de um raster de profundidade de inundação às estruturas analisadas.

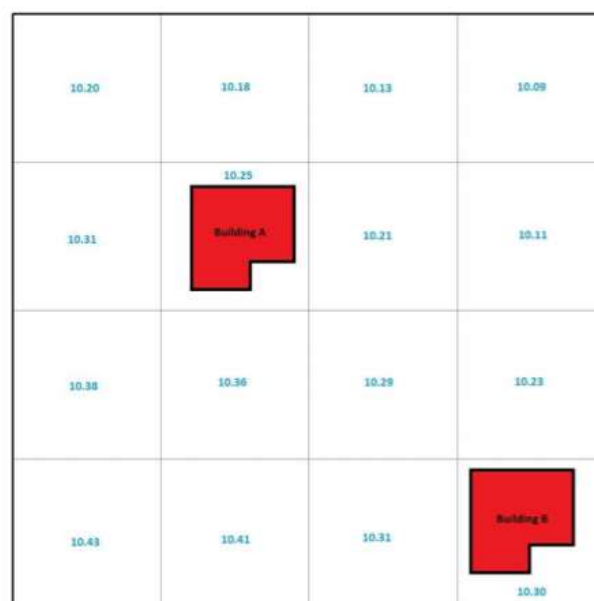


Figura 2.13: Associação de profundidade de inundação às estruturas
Fonte: USACE (2018)

Dessa forma, uma característica hidráulica é atribuída à estrutura com base no valor da célula do raster na qual o ponto que a representa está contido. Os resultados desse procedimento de computação incluem profundidade da água acima do solo; profundidade da água acima da fundação em cada estrutura, hora de chegada de limites críticos de profundidade, duração da água acima dos limites críticos, máximo do produto de profundidade e velocidade e o número de estruturas inundadas.

A relação dano versus profundidade pode ser expressa em valores monetários ou percentuais. Assim, à medida que a profundidade aumenta, a porcentagem de dano também aumenta. Essas funções são definidas no HEC-FIA para cada tipo de estrutura e para cada profundidade entre as ordenadas.

Segundo Lehman *et. al.* (2014), o HEC-FIA também é capaz de analisar os benefícios de segurança à população no caso de medidas não estruturais de redução de danos de inundação, incluindo instalação de sistemas de alerta de inundação, campanhas de educação pública e impermeabilização ou elevação das estruturas. Essas estimativas podem ser computadas para que os tomadores de decisão possam estar cientes de quais parâmetros contribuem com mais incerteza para tais estimativas.

Para Lehman *et. al.* (2014), a capacidade de calcular esses resultados com várias alternativas permite ao usuário identificar os parâmetros que mais impactam as estimativas de consequências e permitir que os planejadores apresentem a maneira mais apropriada de reduzir o risco associado às barragens. A análise de medidas não estruturais permite ao usuário encontrar maneiras de reduzir o risco de perdas econômicas e de vidas na planície de inundação.

De acordo com USACE (2018), o cálculo da perda de vidas no HEC-FIA considera a eficácia dos sistemas de alerta, as respostas da comunidade ao alerta e a evacuação da população. Porém são adotadas algumas premissas simplificadoras: (1) a resposta da população ao aviso é homogênea; (2) a rota de evacuação é uma linha reta da estrutura para o local seguro mais próximo; (3) a população para de evacuar assim que a profundidade atingir 0.61 metros e não permitir mais a evacuação; (4) no caso da profundidade não atingir 0.61 metros, a população tem conhecimento que sua localização é segura e não se mobiliza para evacuar a estrutura.

Para o cálculo de população em risco e das perdas de vida, USACE (2018) explica que são requeridas as seguintes entradas no HEC-FIA: modelo digital de elevação (MDE); inventário de estruturas com população residente e o risco hidrodinâmico.

O modelo digital de elevação, que deve ser o mesmo utilizado para realizar a propagação da onda de inundação, é usado para atribuir elevações a estruturas, assim como a elevação do local seguro para a evacuação da população. Cada estrutura deve ter uma elevação em relação ao solo, que será calculada pelo HEC-FIA a partir do MDE.

De acordo com USACE (2018), o número de pessoas residentes na estrutura deve ser informado nos períodos dia e noite e separada pela faixa etária acima e abaixo dos 65 anos de idade, além do número de andares para a estrutura. O tipo de construção e o tipo de fundação da estrutura também é necessário para atribuir taxas de mortalidade no caso em que o risco hidrodinâmico está contribuindo para a destruição de estruturas e, portanto, impactando o cálculo geral da perda de vida.

Lehman *et. al.* (2014) explicam que o número de pessoas em uma estrutura geralmente varia entre dia, noite, dia da semana e fins de semana em áreas residenciais, comerciais e industriais. A população ocupante de uma estrutura ou área também pode variar significativamente em relação à sazonalidade, considerando período de férias, eventos culturais ou esportivos, entre outros. Portanto, é desejável considerar uma variedade de casos de exposição diferentes para capturar as variações temporais do número de pessoas em uma estrutura.

Ainda, as populações diurnas e noturnas estimadas pelo HEC-FIA levam em consideração o deslocamento da população em uma área devido ao trabalho dentro ou fora da área impactada durante o dia e ao retorno para casa durante a noite e outras considerações semelhantes. Além disso, divide a população em faixas etárias igual ou superior a 65 anos, uma vez que esses indivíduos com mais de 65 anos apresentam maior risco de perda de vidas em eventos de inundação, devido a deficiência de mobilidade e diminuição da capacidade de tomada de decisão.

Para o cálculo de perdas de vida, Lehman *et. al.* (2014) expõem os parâmetros utilizados pelo HEC-FIA, descritos a seguir.

A) Tempo de chegada da onda de inundação

O tempo de chegada representa o fim da oportunidade de evacuar uma estrutura e, por padrão, é definido no HEC-FIA quando a profundidade se torna maior que 2 pés (0.61 metros). Supõe-se que nessa profundidade, as pessoas escolham evacuar verticalmente em uma estrutura em vez de tentar se mover horizontalmente para um local mais seguro, uma vez que essa profundidade seja alcançada em uma estrutura. O raster de tempo de chegada da onda pode ser computado diretamente através do HEC-RAS. Assim, cada célula no raster deve conter o tempo em que a profundidade dessa célula inicialmente se torna maior que 0.61 metros.

B) Tempo de emissão do alerta da ruptura

O tempo de emissão do alerta é definido como o horário em que uma ordem de evacuação da população é dada e devem ser determinados pela estimativa inicial do tempo em que um grande problema é reconhecido em relação ao tempo da falha da barragem.

Esse é o momento em que o proprietário de uma barragem determinaria que uma falha na estrutura é iminente e decide que o processo de aviso e evacuação da área a jusante deve ser iniciado mediante notificação às autoridades responsáveis. As estimativas de perda de vida são altamente sensíveis ao tempo de emissão de aviso e a outros relacionamentos que afetam a eficácia dos processos de aviso e evacuação para a população em risco.

C) Tempo do sistema de alerta

O tempo que leva para que a população em risco receba o alerta emitido pelo órgão responsável depende do sistema ou processo de aviso usado. Por exemplo, o primeiro grupo de pessoas normalmente seria alertado através do processo de aviso primário (sistema de alerta de emergência), mas um processo de aviso secundário seria iniciado, incluindo equipes de emergência e a população em geral divulgando o aviso via “boca-a-boca”. A velocidade com que um aviso se dispersaria pela população dependeria do tipo de aviso e do período do dia que o aviso foi emitido.

D) Tempo de mobilização

O tempo de mobilização é definido a partir do tempo de recebimento do aviso e a mobilização da pessoa avisada, ou seja, o tempo que ela leva para deixar a estrutura a ser impactada. O tempo de mobilização é definido no HEC-FIA por uma curva de mobilização. A curva de mobilização contém duas informações importantes para determinar o número de pessoas que evacuaram suas estruturas quando a inundação chega: a porcentagem de pessoas avisadas que se mobilizam ao longo do tempo; e o percentual máximo de mobilização.

A porcentagem máxima de mobilização define a maior porcentagem de pessoas mobilizadas, dadas as características da falha da barragem, a mensagem de aviso e muitos outros fatores, incluindo considerações culturais e, em alguns casos, os efeitos de experiências anteriores de evacuação. Cem por cento menos a porcentagem máxima de mobilização produz a porcentagem de pessoas que são incapazes ou optam por não se mobilizar após receber o aviso.

E) Tempo de evacuação

O tempo necessário para evacuar depende de muitos fatores, incluindo a mobilidade, a localização dos abrigos e a capacidade da rota de evacuação. Modelos complexos que incluem recursos mais detalhados, como o LifeSim, (Aboelata *et. al.*, 2005) podem ser aplicados, desde que as informações estejam disponíveis. Dentre essas informações, podem ser acrescentadas ao modelo, o sistema viário e as rotas de fuga, o número de veículos e sua capacidade e outros dados considerados relevantes. No caso do HEC-FIA, o tempo necessário para a evacuação é calculado considerando um deslocamento em linha reta, a uma velocidade pré-determinada pelo usuário, a partir de cada estrutura até uma zona onde a profundidade máxima seja inferior a 0.61 metros.

F) Zonas de letalidade

As zonas de letalidade são definidas pela interação entre a proximidades de áreas abrigáveis e a facilidade de evacuação dado o risco hidrodinâmico da inundação, conforme resumido abaixo. Dessa forma, as zonas de letalidade diferem das zonas de risco hidrodinâmico, que é o produto simples da profundidade pela velocidade da inundação. As zonas de letalidade podem ser exemplificadas na Figura 2.14 a seguir.

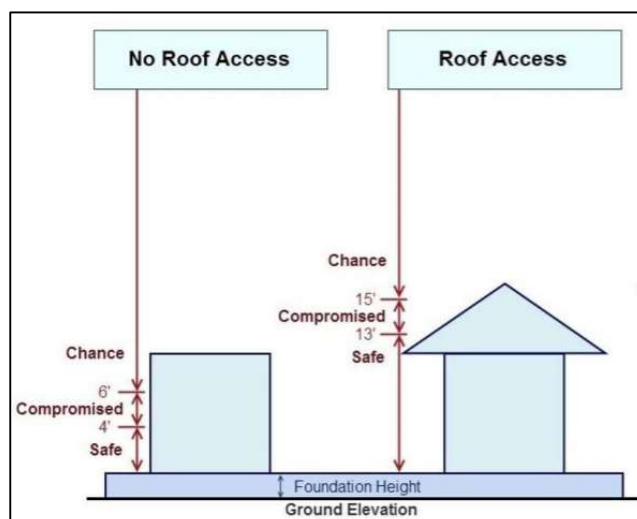


Figura 2.14: Zonas de letalidade de inundação no HEC-FIA
 Fonte: USACE (2018)

De acordo com Lehman *et. al.* (2014), as zonas de chance são aquelas nas quais as vítimas da inundação são arrastadas ou presas debaixo d'água. Nesse caso, a sobrevivência depende muito do acaso; isto é, da ocorrência aparentemente aleatória de detritos flutuantes que podem ser agarrados ou de encontrar refúgio em segurança.

A taxa de fatalidade histórica nas zonas de chance varia de cerca de 38% a 100%, com uma taxa média acima de 91%. Já as zonas comprometidas são as áreas nas quais o abrigo disponível foi severamente danificado pela enchente, aumentando a exposição das vítimas às inundações violentas. Um exemplo pode ser quando a frente de uma casa é arrancada, expondo os cômodos a inundações. A taxa histórica de fatalidade nas zonas comprometidas varia de zero a cerca de 50%, com uma taxa média próxima a 12%. Por fim, as zonas seguras são normalmente secas, expostas a inundação relativamente rasas que dificilmente arrastarão as pessoas. Podem incluir o segundo andar de residências e regiões protegidas de remanso. A taxa de mortalidade em zonas seguras é praticamente zero e tem uma média de 0,02%.

Segundo USACE (2014), o HEC-FIA utiliza a velocidade para determinar se uma estrutura é capaz de sobreviver ao evento de inundação. Portanto, a atribuição a uma zona de letalidade para uma determinada estrutura é baseada no risco hidrodinâmico observado na estrutura, dada a capacidade desta de fornecer refúgio devido sua altura. Ao incluir a altura da estrutura, o impacto da evacuação vertical é significativo e é contabilizado na metodologia do HEC-FIA.

USACE (2014) explica que o HEC-FIA atribui zonas de letalidade com base no resultado da evacuação para pessoas na estrutura e a altura dessa estrutura. Após a determinação do resultado da evacuação, são determinadas as zonas de letalidade. A lógica seguida pelo HEC-FIA para a atribuição de categorias dos resultados de evacuação é descrita abaixo.

- Limpo: as pessoas que evacuam com segurança não recebem uma atribuição de zona de letalidade.
- Pego: as pessoas que são pegas em evacuação são designadas para a zona de chance.
- Não mobilizados: as pessoas que permanecem em estruturas são designadas para zonas de letalidade com base na profundidade máxima de inundação em todo o evento e na altura da estrutura. A suposição é que as pessoas evacuam para o nível acima do nível habitável mais alto da estrutura (por exemplo, o telhado ou um sótão).

Neste caso o HEC-FIA toma algumas decisões sobre a população na estrutura:

- Se o evento tiver profundidade máxima menor que 0.61 metros ou menor que a altura do primeiro andar da estrutura, nenhuma atribuição de zona de letalidade de inundação será feita e as pessoas serão agrupadas na categoria de evacuação Limpa.
- Se a estrutura for de um andar com população abaixo de 65 anos serão avaliados três casos diferentes: 1) profundidade menor que 13 pés (aproximadamente 4 metros): se a estrutura resistir totalmente, será atribuída à Zona Segura. Se a estrutura resistir parcialmente, será atribuída à zona comprometida. 2) profundidade entre 13 e 15 pés (aproximadamente 4 a 4.5 metros): se a estrutura resistir totalmente ou parcialmente será atribuída à zona comprometida. 3) profundidade maior que 15 pés: será atribuída à zona de chance.

Para Lehman *et. al.* (2018), a abordagem utilizada pelo HEC-FIA fornece uma metodologia consistente e compatível para o desenvolvimento de modelos de ruptura de barragens e para a estimativa dos danos correlatos em vários níveis de detalhes e precisão. Esses modelos podem ser atualizados e aprimorados com dados adicionais e técnicas de modelagem refinadas para oferecer suporte a avaliações mais detalhadas. O uso de conjuntos de dados e ferramentas GIS existentes facilitam o desenvolvimento dos modelos para apoiar a avaliação inicial e a atualização rotineira dos modelos.

3. O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO

3.1 A BARRAGEM DE FUNDÃO

Segundo MT-MG (2016), a barragem de Fundão, a pilha de rejeitos da cava do Germano e a barragem de rejeitos do Germano integravam o sistema de disposição de rejeitos da Samarco, na Unidade Germano, localizada em Mariana - MG. O projeto das estruturas de disposição de rejeitos, implantadas no vale do córrego de Fundão foi concebido para conter todo o rejeito a ser gerado na usina de beneficiamento de Germano e na nova planta de beneficiamento de Alegria (Mina de Alegria pertencente à Vale S/A). O rejeito depositado na barragem de fundão era composto aproximadamente por 70% de rejeitos arenosos e 30% de rejeitos finos/lama.

De acordo com Machado (2017) *apud* SETE (2013), a Barragem de Fundão faz parte do complexo minerário Germano e localiza-se na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte, afluente pela margem esquerda do rio do Carmo, cuja confluência com o rio Piranga dá origem ao rio Doce. A barragem de Germano localiza-se no córrego Germano e a barragem de Fundão, sobre o córrego Fundão, que por sua vez, são afluentes do córrego Santarém. O córrego Santarém deságua na margem esquerda do rio Gualaxo do Norte, a aproximadamente 500 metros a leste do povoado de Bento Rodrigues.

Segundo o PAE da barragem de Fundão (Pimenta de Ávila Consultoria LTDA, 2015), a estrutura está localizada a jusante do dique Sela/Tulipa e adjacente à barragem de Germano, sendo a principal estrutura da unidade industrial de Germano para disposição de rejeitos. A Figura 3.1 apresenta o mapa de localização da barragem de Fundão e as principais estruturas do complexo Germano.

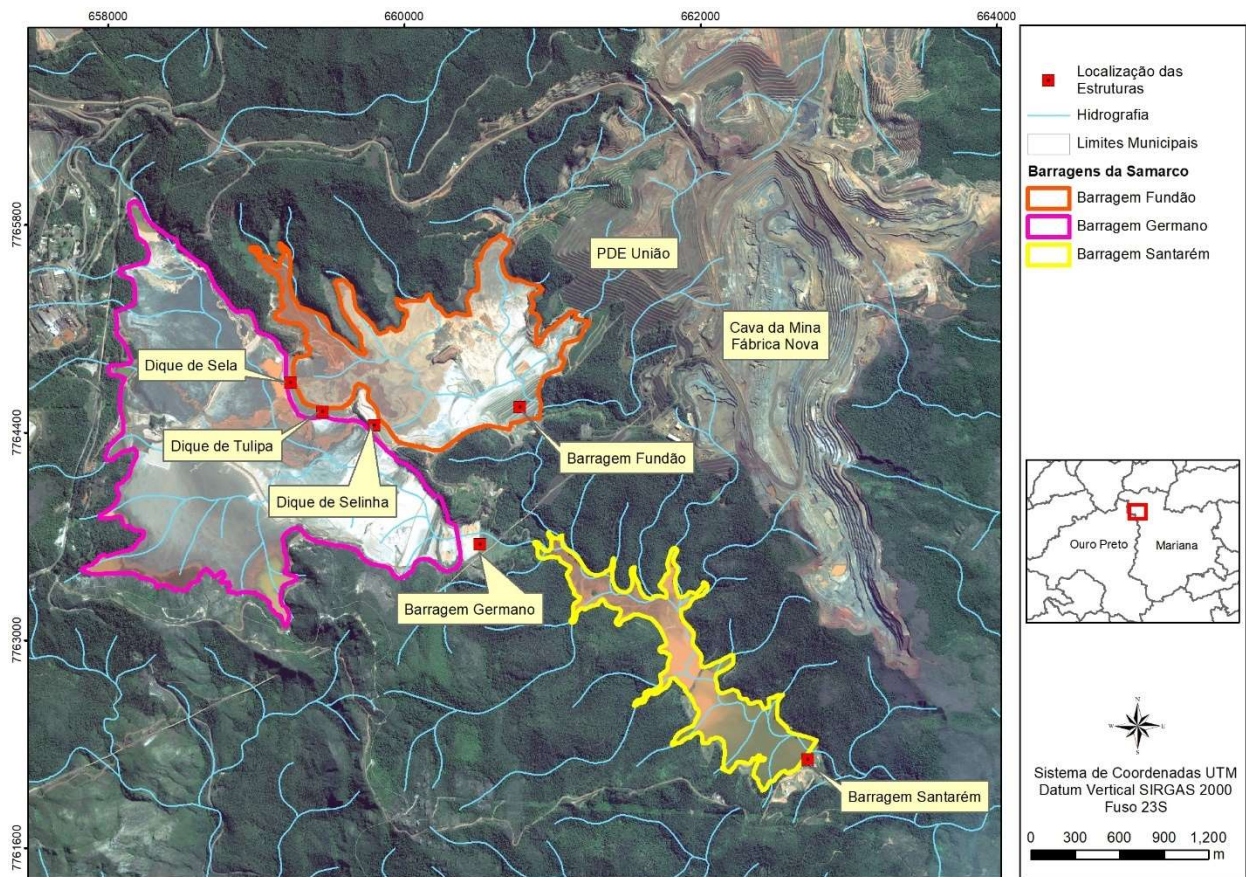


Figura 3.1: Mapa de localização das estruturas da mina Germano
 Fonte: Autora (2019)

De acordo com o PAE da barragem de Fundão (Pimenta de Ávila Consultoria LTDA, 2015), a seção do maciço era composta por um dique de partida em aterro compactado homogêneo dotado de tapete horizontal a partir da elevação 828 metros e diques de alteamento em rejeitos granulares. A previsão de elevação final da crista era de 920 metros, alcançando um volume do reservatório de 938.732,32 metros cúbicos. Na época da elaboração do PAE, a cota da crista era de 894,5 metros, perpassando um comprimento de 384,65 metros.

Segundo dados informados pela Mineradora Samarco (SAMARCO, 2019), a barragem de Fundão mantinha um volume de rejeitos de aproximadamente 55 milhões de metros cúbicos. Em extensão e volume depositado, Fundão era a segunda maior barragem da empresa, atrás, apenas, da barragem de Germano. A Figura 3.2 detalha as estruturas que compõe a barragem de Fundão.

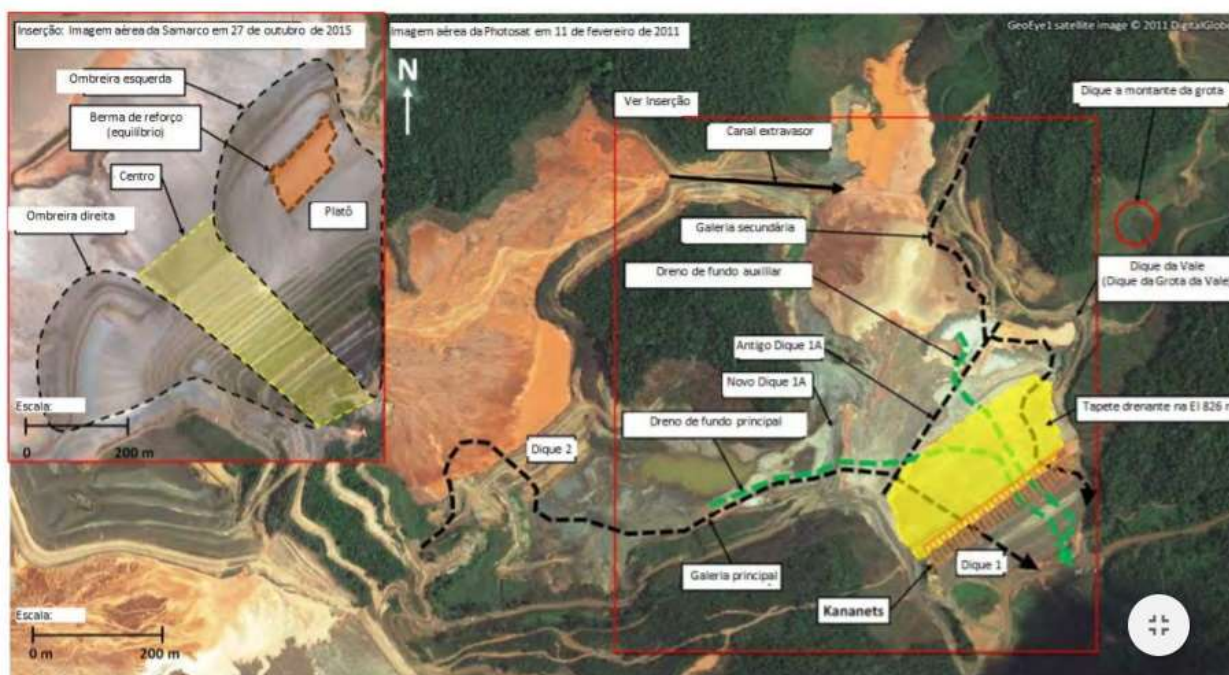


Figura 3.2: Estruturas da barragem de Fundão
 Fonte: Morgenstern *et.al.*, (2016)

Machado (2017) afirma que, a disposição de rejeitos no complexo Germano, dava-se pela separação do rejeito em arenoso e fino (lama). O rejeito arenoso era proveniente da flotação convencional, possuindo alta permeabilidade, conferindo-lhe satisfatória resistência em condições drenadas.

Segundo Machado (2017) *apud* BRANDT (2005), este tipo de rejeito era depositado na barragem do Germano e do Fundão, Dique 1 e na cava exaurida do Germano, sendo, após a drenagem, utilizado para o alteamento das barragens pelo método de montante e na implantação de demais estruturas. O rejeito fino (lama), proveniente da deslamagem e do processo de recuperação de minério de ferro nas colunas 're-cleaner', devido às baixas permeabilidades e resistência, era depositado no reservatório da barragem do Germano (Baia 3) e no Dique 2 da barragem de Fundão.

Matos (2018) explica que, em específico, no reservatório da barragem do Fundão, a disposição dos rejeitos era realizada separadamente, em reservatórios específicos. Na porção mais a jusante do córrego do Fundão, encontrava-se o dique de partida para o Empilhamento de Rejeitos Arenosos (ERA). Mais a montante, existiam outros dois Diques de Contenção de Lama (DCLs). Entre o dique de partida do ERA e os dois DCLs, existia um reservatório para disposição do rejeito arenoso, e, a montante dos DCLs, eram formados reservatórios para disposição da lama.

Desse modo, a barragem do Fundão tinha como objetivo atender à demanda de controle ambiental para disposição dos resíduos sólidos, gerados no processo de produção minério, provenientes das plantas de beneficiamento de minério de ferro (BRANDT, 2005 *apud* Machado, 2017).

Segundo a Samarco (2019), a jusante da barragem do Fundão, estava localizada a barragem de Santarém, com maciço de altura igual a 32 metros, comprimento da crista de 268 metros e volume de cerca de 440.000 metros cúbicos. O reservatório possuía uma altura de 29,5 metros e um volume de 6,7 milhões de metros cúbicos.

3.2 O ROMPIMENTO

De acordo com o Relatório de Análise de Acidente do Ministério do Trabalho e Previdência Social (MT-MG, 2016), o rompimento da barragem, no dia 05 de novembro de 2015, iniciou-se por volta das 15:45 horas, próximo a ombreira esquerda, no pé do talude do recuo do eixo do dique 1, apoiado no platô de elevação 860 metros, em dinâmica consistente com o fenômeno de liquefação. Testemunhas relataram que houve movimentação do talude e dos rejeitos armazenados, com levantamento de poeira. Descreveram que viram todo o talude movimentando-se sobre o platô, carregando consigo veículos que estavam sobre ele, ao mesmo tempo em que desmoronava. Alguns descreveram um estalo ou estouro no momento do rompimento e uma percepção de tontura nos segundos que o precederam.

No Relatório sobre as causas imediatas da ruptura da barragem de Fundão, Morgenstern *et. al.* (2016) relatam que, em algum momento após as 14:00 horas do dia 05 de novembro de 2015, muitas pessoas que trabalhavam no complexo das instalações de Germano sentiram um tremor que durou vários segundos. Às 15:45 horas, gritos foram ouvidos nos rádios avisando que a barragem estava desmoronando. Uma nuvem de pó se formou sobre a ombreira esquerda, e pessoas próximas à área chamada de "recuo" podiam ver trincas se formando no tapete drenante recém-construído. O talude acima, estava começando a se mover "como uma onda" como se estivesse "derretendo", trazendo a crista da barragem para baixo. Os rejeitos, que eram considerados terreno firme, se transformaram em um rio turbulento, galgando a barragem de Santarém logo a jusante para, em seguida atingir o povoado de Bento Rodrigues.

De acordo com Machado (2017), o controle de alteamento realizado pela Samarco demonstra que a crista da barragem se encontrava na elevação 898m, na data de 26/10/2015. No entanto, Morgenstern *et. al.* (2016) afirmam que a crista se encontrava na elevação 900m, com 110m de altura, no dia da ruptura em 05/11/2015.

Segundo Morgenstern *et. al.* (2016), o depoimento de testemunhas oculares e vídeos esclareceram algumas questões. A primeira delas é que a ruptura da barragem de Fundão teve início na ombreira esquerda. A segunda questão elucidada é que a ruptura ocorreu devido à liquefação dos rejeitos, um processo pelo qual as pressões da água nos vazios intersticiais entre as partículas dos rejeitos aumentaram a tal ponto que a massa de material perdeu resistência e fluiu como um líquido. A última questão é que essa transformação de sólido para líquido foi completa e abrupta, formando em segundos um fluido com viscosidade aparente e comportamento hidráulico muito semelhante ao da água.

O rompimento provocou o vazamento de aproximadamente 33 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério, segundo dados informados pelo site da mineradora Samarco, o que corresponde a 60% do volume total do reservatório. A lama despejada no córrego Santarém atingiu o rio Doce percorrendo 670 quilômetros de extensão, impactando 39 municípios até a foz no estado do Espírito Santo.

Diversos levantamentos realizados (Samarco, 2019; Matos, 2018; Machado, 2017; Morgenstern *et. al.*, 2016; MT-MG, 2016), além de fontes jornalísticas, possibilitaram a identificação do horário da ruptura, aproximadamente às 15:30 horas, e da chegada da inundação nos principais pontos a jusante da barragem, como mostra a Figura 3.3.

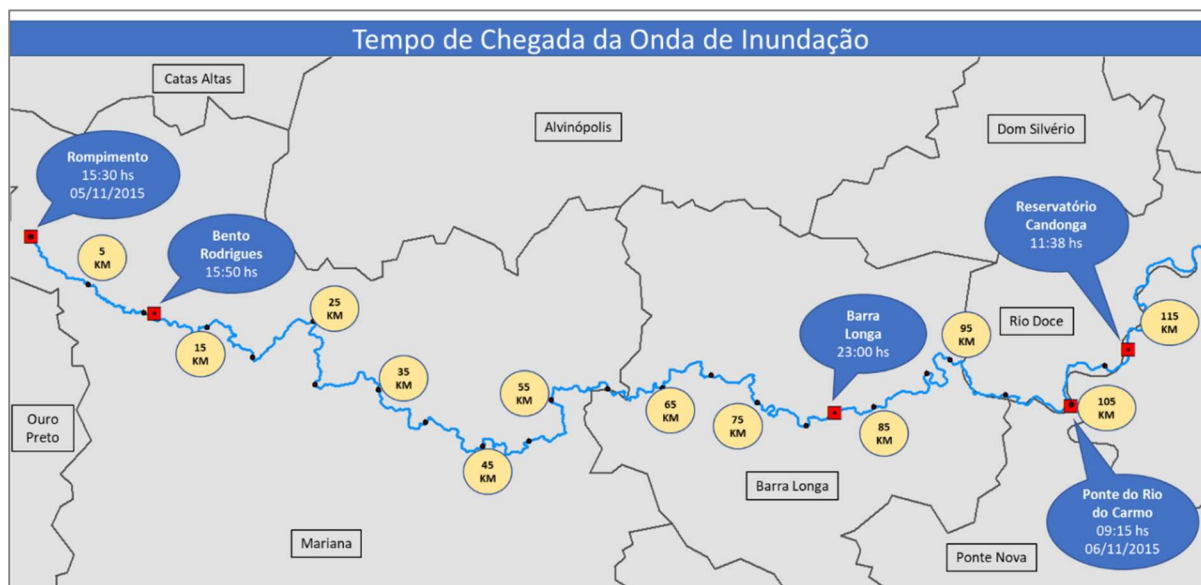


Figura 3.3: Cronologia da chegada da onda
Fonte: Autora (2019)

Segundo MT-MG (2016), os rejeitos formaram uma onda de lama que desceu o vale a jusante e galgou a barragem de Santarém. Apesar de ter sofrido danos, não houve rompimento desta barragem, que conteve a lama por tempo suficiente para que a população de Bento Rodrigues fosse informalmente avisada e pudesse evacuar o local, minimizando a perda de vidas nesta comunidade.

De acordo com Morgenstern *et. al.* (2016), a lama de rejeitos chegou no povoado de Bento Rodrigues, localizado a aproximadamente 10 quilômetros da barragem, às 15:50 horas do dia 05/11/2015, 20 minutos após o rompimento. A inundação seguiu por mais 75 quilômetros até atingir a cidade de Barra Longa, às 23:00 horas do mesmo dia. Na manhã do dia 06/11/2015, às 09:15 horas, a onda atingiu a ponte sobre o rio do Carmo e seguiu em direção ao rio Doce, atingindo o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves às 11:38 horas. Não foram encontradas informações precisas sobre o horário de chegada da onda nos povoados de Paracatu de Baixo e Gesteira, que foram destruídos pelo impacto da lama.

O boletim da CPRM (2015) fez o mapeamento dos tempos de chegada da onda de cheia considerando a vazão de pico, em toda bacia hidrográfica do rio Doce, até a sua foz no Estado do Espírito Santo, como mostra a Figura 3.4.

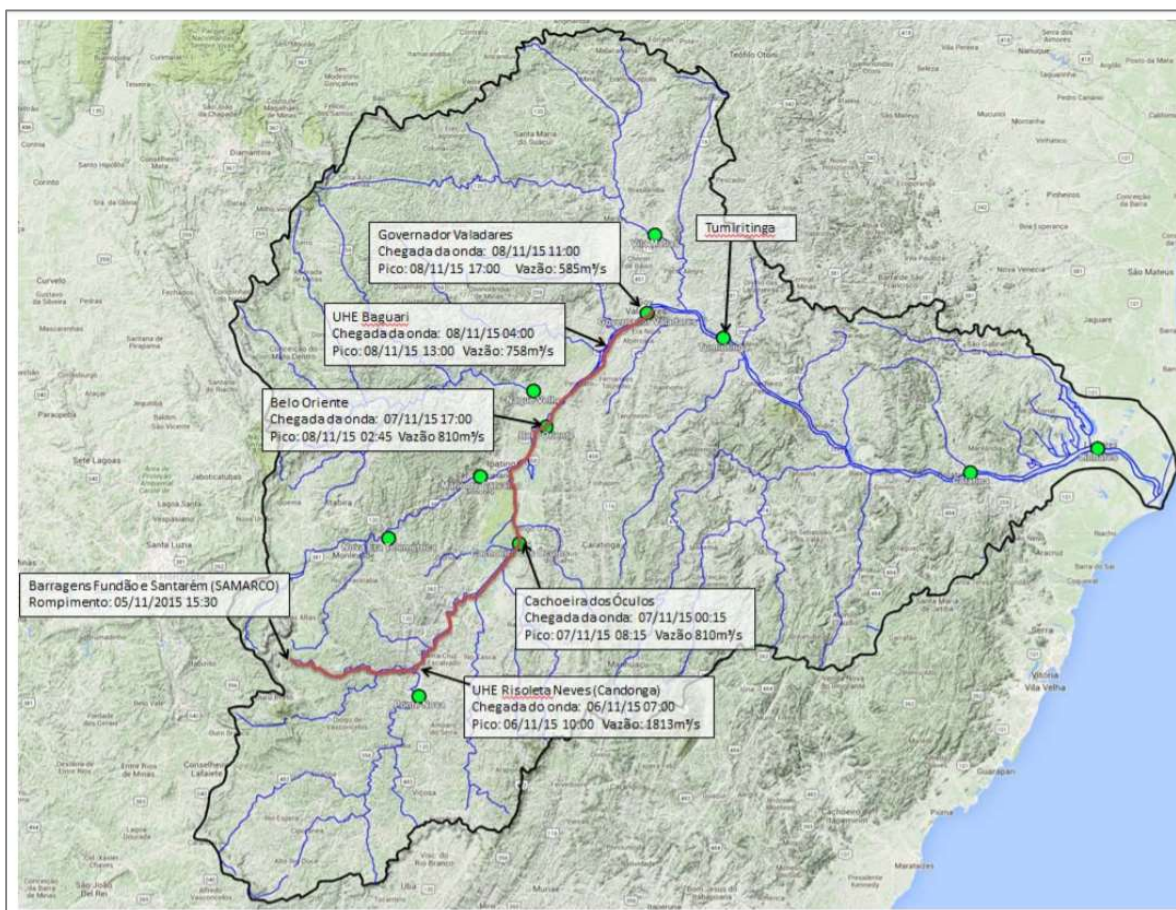


Figura 3.4: Passagem da onda de cheia (vazão de pico)
 Fonte: CPRM (2015)

3.3 A ÁREA AFETADA

A Área diretamente afetada pela onda de rejeitos, localiza-se nos municípios de Mariana, Barra Longa, Ponte Nova, Santa Cruz do Escalvado e Rio Doce, até o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Risoleta Neves. As localidades mais afetadas pela lama proveniente da barragem foram Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, Gesteira e Barra Longa.

Localizada a 24 quilômetros da cidade de Mariana e aproximadamente 6 quilômetros da barragem de Fundão, o povoado de Bento Rodrigues, pertencente ao distrito de Santa Rita Durão, foi a primeira a ser atingida pela lama da barragem de Fundão. Segundo Camargo (2018), o local era considerado tranquilo e com belezas naturais, mas seu potencial turístico era pouco explorado. A Cachoeira do Ouro Fino, no rio Gualaxo do Norte, era um dos principais pontos turísticos da região. Tinha ainda duas igrejinhas: Nossa Senhora das Mercês e São Bento, construídas no século 18, e que abrigavam importante acervo de arte sacra.

De acordo com Camargo (2018), Bento Rodrigues tinha uma população de 600 pessoas que habitavam aproximadamente 200 casas. As casas do povoado eram simples, mas amplas e de bom padrão construtivo. A Figura 3.5 apresenta uma visão geral da Rua São Bento, principal rua de Bento Rodrigues. Pode-se observar que o tipo de residência predominante são casas de um andar.



Figura 3.5: Vista Geral da Rua São Bento em Bento Rodrigues
Fonte: Camargo (2018)

Segundo Camargo (2018), a população, basicamente rural, sobrevivia da agricultura familiar, cultivando roças de feijão, milho e frutas, além de criar porcos, galinhas, patos, cavalos, e possuir horta e pomar no quintal. Ainda segundo os levantamentos feitos pela autora, a mineradora Samarco possuía uma representatividade econômica muito grande em toda a região, empregando pessoas direta e indiretamente. As Figura 3.6 e Figura 3.7 mostram a situação do povoado de Bento Rodrigues após a passagem da lama de rejeitos.



Figura 3.6: Bento Rodrigues após a passagem da lama de rejeitos
Fonte: Jornal O Tempo (2015)



Figura 3.7: Vista aérea de Bento Rodrigues após a passagem da lama
Fonte: Jornal o Tempo (2015)

Paracatu de Baixo, que também foi soterrado, pertencencia ao distrito de Monsenhor Horta, no Município de Mariana. Segundo Camargo (2018), o povoado contava com uma população aproximada de 300 pessoas. A comunidade vivia da roça de feijão e milho, hortifrútis e criação de galinha, porcos e gado. A Figura 3.8 mostra a situação de Paracatu de Baixo após a passagem da onda de rejeitos.



Figura 3.8: Paracatu de Baixo após a passagem da lama de rejeitos
Fonte: SINDSEMA (2019)

Afastado aproximadamente 62 quilômetros da barragem de Fundão e 18 quilômetros da sede do município de Barra Longa, o povoado de Gesteira teve, segundo a Fundação Renova (2019), ao todo vinte famílias, oito residências, um comércio, onze lotes, uma igreja católica, um campo de futebol e uma escola atingidos pelo rompimento da barragem. A Figura 3.9 mostra a situação do povoado após a passagem da lama.



Figura 3.9: Gesteira após a passagem da lama de rejeitos
Fonte: Agência Brasil (2015)

A cidade de Barra Longa, situada às margens do rio Gualaxo do Norte, no encontro com o rio do Carmo, teve parte da sua área urbana atingida pelo rompimento da barragem. Segundo Milanez *et. al.* (2016), a população local relatou que foi impactada pelos rejeitos aproximadamente quatorze horas após o rompimento, sem ser adequadamente avisada. Por volta de quatro horas da manhã do dia 6 de novembro, o rejeito liberado pelo rompimento da barragem atingiu a parte baixa da cidade, causando perdas significativas e impondo situações de grande exposição a riscos. As Figura 3.10 e Figura 3.11 mostram a área urbana de Barra Longa após a passagem da lama, evidenciado a profundidade da onda nessa localidade.



Figura 3.10: Barra Longa após a passagem da lama de rejeitos
Fonte: Agência Brasil (2015)



Figura 3.11: Vista aérea de Barra Longa após a passagem da lama
Fonte: Agência Brasil (2015)

3.4 CONSEQUÊNCIAS E MEDIDAS TOMADAS APÓS O ROMPIMENTO

O rompimento da barragem de Fundão trouxe consequências socioeconômicas e ambientais irreparáveis para os municípios afetados. Principalmente nas localidades de Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, Gesteira e Barra Longa, um número considerável de famílias perdeu suas casas. Devido ao desastre, dezenove pessoas morreram, entre trabalhadores e moradores das comunidades. De acordo com BRASIL (2020), a Organização das Nações Unidas enquadrou o desastre como um evento violador dos direitos humanos.

As consequências do evento tiveram grande repercussão na sociedade, resultando na paralisação das atividades da empresa e fomentando a discussão sobre a segurança dos empreendimentos minerários, os impactos negativos que estes causam no meio ambiente e na sociedade e a responsabilidade de ressarcimento dos danos causados por esse tipo de desastre.

Em resposta ao desastre, o Governo de Minas publicou, no dia 20 de novembro de 2015, o Decreto nº 46.892/2015, que instalou uma Força-Tarefa para avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da barragem. Os trabalhos reuniram representantes de órgãos e entidades do Estado e de municípios afetados, e foram coordenados pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional de Política Urbana e Gestão Metropolitana – SEDRU (MINAS GERAIS, 2016).

Esse documento (MINAS GERAIS, 2016) consolidou o levantamento dos danos causados pelo rompimento da barragem, realizado por diversos órgãos públicos e privados, e fez sugestões de medidas corretivas e restauradoras para a recuperação dos municípios atingidos e da bacia do rio Doce. Os impactos citados foram divididos em duas escalas: micro e macrorregional. Essa última, tratou dos impactos nos municípios ao longo da calha do Rio Doce, até a foz.

Na escala microrregional, foi considerado os efeitos da onda de lama sobre as comunidades atingidas nos municípios de Mariana, Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado. Os danos ambientais apontados em MINAS GERAIS (2016) foram: o dano a qualidade e disponibilidade da água e do solo, os danos à biodiversidade e a modificação da paisagem.

Os danos materiais apontados em MINAS GERAIS (2016) referem-se aos danos a economia regional e local, aos prejuízos públicos de infraestrutura e às perdas materiais da população atingida. O dano à economia regional foi caracterizado principalmente pela interrupção da produção minerária e conseqüentemente a paralização de arrecadação de impostos impactando na base tributária. O dano sobre a base produtiva e comercial local inclui a paralização de empresas, a perda de áreas produtivas e lavouras, a morte de animais ou impossibilidade de dessedentação dos mesmos, a perda de maquinário, entre outros.

Os prejuízos econômicos públicos contabilizados são vinculados a ações emergenciais que os órgãos públicos necessitaram tomar para mitigar o impacto do desastre sobre a população e a perdas de receitas decorrentes da interrupção de alguns serviços, como o de abastecimento de água, esgotamento sanitário e geração de energia elétrica.

Segundo MINAS GERAIS (2016), os danos à infraestrutura públicas e privadas, impossibilitaram o acesso por terra em diversas localidades, em função da queda de pontes e excesso de lama nas estradas. Também houve danos à estabelecimentos de ensino, estabelecimentos de saúde, áreas de lazer, e sedes de associações comunitárias. Os danos às unidades habitacionais chegaram ao número de 483 domicílios destruídos ou danificados pela lama, segundo dados informados pelas prefeituras dos municípios atingidos. Consideram-se nesse grupo, os danos ao conteúdo das residências, incluindo objetos pessoais e de valor sentimental para os moradores.

O relatório aponta também outros danos intangíveis, como a destruição de formas de subsistência e modos de vida. Considerando que diversas comunidades dependiam da produção rural de base familiar para prover pequenos serviços e para consumo próprio, com a destruição de lavouras e pastos, as populações restaram sem alternativa para seu próprio sustento e sem perspectiva de retomada de suas formas de subsistência no curto prazo (MINAS GERAIS, 2016).

De acordo com MINAS GERAIS (2016), os danos do evento tiveram como aspecto drástico, seus impactos diretos sobre as pessoas. O número de mortos, feridos, enfermos e desabrigados indicam a dimensão do desastre. Também foram sentidos os efeitos sobre a saúde pública e às condições fundamentais de segurança, os danos sobre os elementos simbólicos e culturais das populações atingidas, o acesso à educação e os impactos sobre as formas de organização social.

Diante da constatação desses danos, os Governos dos Estados de Minas Gerais e Espírito Santo junto com a União, ingressaram com uma ação judicial de vinte bilhões de reais contra a Samarco e sugeriram a criação de um fundo privado controlado pela Justiça, cuja gestão fosse feita por um conselho ou comitê (MINAS GERAIS, 2016).

Após diversas ações judiciais em busca de responsabilização dos autores do desastre e no sentido de pôr fim ao litígio, em 02 de março de 2016, foi celebrado um acordo denominado Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC) entre duas partes: a União e diversas autarquias públicas federais e estaduais, representados pela Advocacia Geral da União (AGU) e a Samarco e suas acionistas, a Vale e a BHP Billiton (MPF, 2016).

Para Milanez *et. al.* (2016b), o acordo (TTAC) pode ser considerado um instrumento extrajudicial para solução de conflitos e sua justificativa é o caráter de urgência ante um desastre ecológico, uma vez que a morosidade dos processos judiciais pode causar o agravamento das consequências do dano ambiental, dificultando a reparação.

De acordo com a AGU (2016), dentre outras resoluções, esse acordo estabeleceu a formação de uma Fundação para gerenciar e executar projetos e programas socioambientais e compensatórios para reparação, recuperação e reconstrução da área afetada pelo rompimento da barragem. Nesse acordo também foi estabelecido a formação de um Comitê Interfederativo (CIF), composto por cerca de 70 instituições federais, estaduais e municipais, para a interlocução permanente com a Fundação e para definir prioridades na implementação e execução dos projetos, acompanhando, monitorando e fiscalizando os resultados.

Nesse sentido, criou-se a Fundação Renova, responsável pela execução dos programas socioambientais para reparação dos municípios atingidos previstos no TTAC. Segundo a entidade (Fundação Renova, 2019), os 42 programas executados são divididos em três eixos temáticos que agrupam os principais focos de atuação: Pessoas e Comunidades, Terra e Água e Reconstrução e Infraestrutura. No primeiro eixo estão os programas de cadastramento dos impactados e ressarcimento e Indenização, enquanto o terceiro eixo engloba, entre outros programas, a construção de novas comunidades para o reassentamento da população que ficou desabrigada.

Segundo a Fundação Renova (2019), o programa de reassentamento tem como objetivo a implantação das localidades destruídas em uma nova área, com projetos específicos para cada uma delas, além de um projeto específico para reconstrução da escola de Gesteira. Esse programa envolve 432 famílias das comunidades de Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo e Gesteira.

De acordo com o relatório anual de atividades de 2018 (Fundação Renova, 2019), o cadastro de atingidos é a base para o reconhecimento das perdas sofridas por cada indivíduo. Tem por finalidade levantar informações quanto às perdas materiais e das atividades econômicas através da realização do cadastro individualizado de pessoas físicas e jurídicas (apenas micro e pequenas empresas) impactadas na área de abrangência socioeconômica do TTAC. As informações levantadas pelo cadastro são utilizadas para a realização de estudos e avaliações socioeconômicas voltados para apoiar a implementação de ações de reparação e compensação dos impactos socioeconômicos. Até o fim do ano de referência, o cadastro contabilizava 28 mil famílias, cerca de 91 mil pessoas e 32 mil propriedades.

O Programa de Indenização Mediada (PIM), principal instrumento da Fundação Renova na reparação pecuniária dos danos a pessoas físicas e a micro e pequenas empresas atingidas, registrou mais de 313 mil indenizações por Danos à Água (para indivíduos afetados por desabastecimento decorrente do rompimento), totalizando R\$ 262 milhões, e de 8 mil por Dano Geral (referente a perda de bens ou de renda), que chegou à R\$ 338 milhões.

4. METODOLOGIA

A metodologia proposta para a realização do trabalho foi dividida em 8 etapas descritas a seguir.

4.1 MAPEAMENTO DA MANCHA DE INUNDAÇÃO OBSERVADA

A mancha de inundação observada foi mapeada por meio de interpretação visual de imagem de satélite WorldView, com resolução espacial de 0.5 metros, obtidas logo após o rompimento da barragem de Fundão. O mapeamento foi realizado na escala 1:1.000 metros, utilizando ferramentas de criação e edição de feições no software ArcGIS.

4.2 MAPEAMENTO DO USO DO SOLO DO VALE A JUSANTE

O mapeamento do uso do solo do vale a jusante da barragem é importante para o reconhecimento da configuração da paisagem afetada e para a escolha dos coeficientes de rugosidade de Manning, parâmetro utilizado na modelagem hidrodinâmica para a propagação da onda de inundação.

O mapeamento foi realizado no software ArcGIS por meio de classificação manual e interpretação visual de imagens de satélite WorldView. Com resolução espacial de 0.5 metros, as imagens são compatíveis com a escala 1:1.000 metros e foram obtidas antes do rompimento da barragem de Fundão. A área mapeada correspondeu a um buffer de 500 metros a partir da mancha de inundação observada.

4.3 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrodinâmica foi realizada com o intuito de reproduzir a velocidade, a profundidade e o tempo de chegada da onda de inundação nas localidades afetadas. Esses parâmetros são essenciais para a avaliação dos danos diretos causados pelo rompimento da barragem. Cabe ressaltar que os dados de entrada do modelo foram obtidos em levantamentos secundários, destacando os trabalhos de Machado (2017) e Matos (2018), que calcularam o hidrograma de ruptura da barragem de Fundão.

O modelo foi desenvolvido por meio do software HEC-RAS 5.0.6, de forma bidimensional, em regime não-permanente, no qual a velocidade e a pressão são variantes com o tempo, variando também de um ponto a outro. Essa etapa foi dividida em 5 sub-etapas mostradas no fluxograma na Figura 4.1 e descritas a seguir.

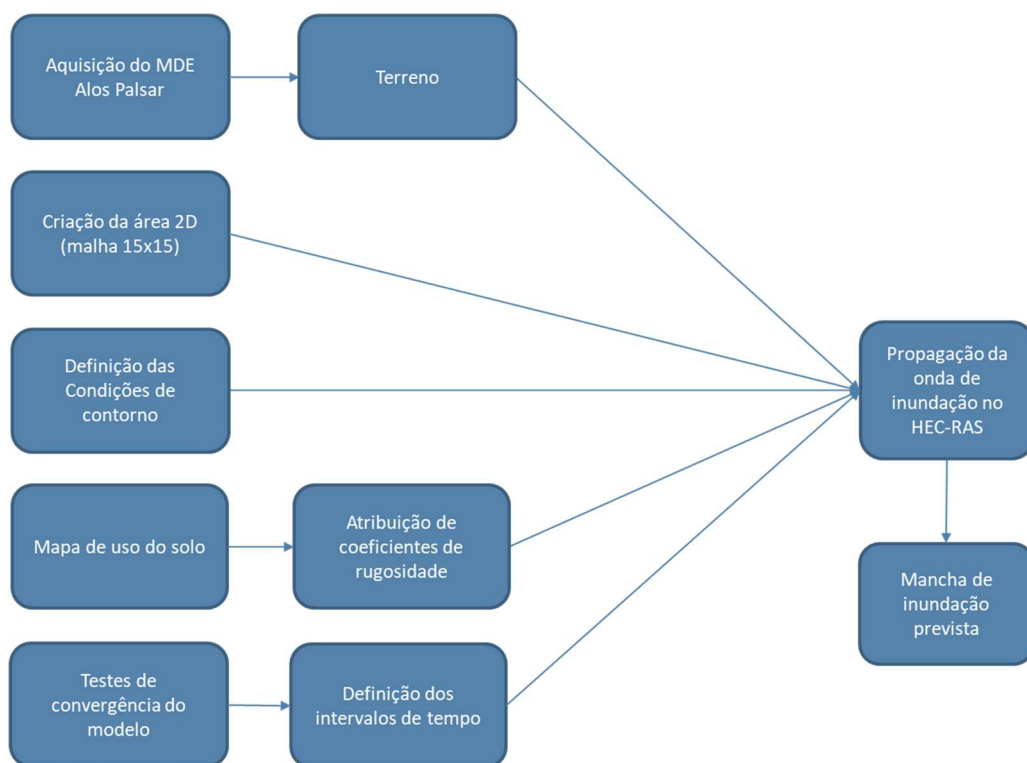


Figura 4.1: Fluxograma da modelagem hidrodinâmica
 Fonte: Autora (2019)

4.3.1 Topografia do Terreno

A topografia do terreno utilizada na modelagem foi gerada por meio do MDE Alos Palsar obtidos gratuitamente no site <https://search.earthdata.nasa.gov>. As cenas adquiridas foram: AP_26285_FBS_F6770_RT1 e AP_26708_FBS_F6770_RT1, ambas do ano de 2006.

O MDE Alos Palsar representa a nova geração dos modelos digitais de elevação obtidos por sensores remotos e entrega uma resolução espacial de 12,5 metros sendo registrada/capturada com resolução de 10 metros. No entanto, os dados sofreram um *downsampling*, ou seja, foram reamostrados para a resolução 30 metros, a fim de corrigir geometricamente os dados, sendo em seguida reamostrados novamente, por meio de um *upsampling*, para a resolução 12,5 metros. Após o tratamento, mosaico e recorte da imagem resultante, o MDE foi inserido no software HEC-RAS 5.0.6. A Figura 4.2 mostra o terreno utilizado e a mancha de inundação observada.

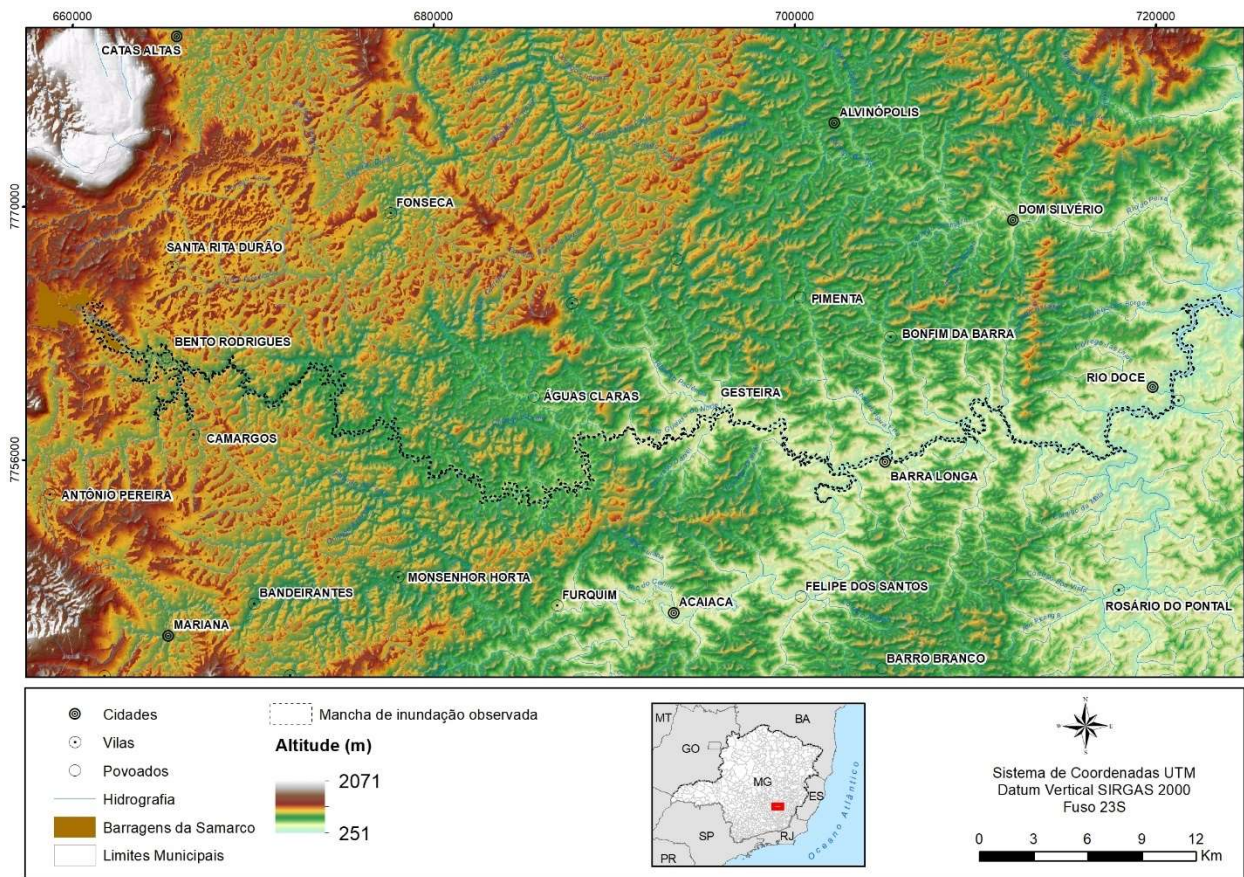


Figura 4.2: Topografia do terreno utilizado na modelagem
 Fonte: Autora (2019)

4.3.2 Área 2D

A área 2D representa o ambiente onde o modelo foi simulado. Para a sua definição, foi considerado um buffer de 500 metros a partir da mancha de inundação observada e foi criada uma malha de 15x15 metros de resolução abrangendo toda a área.

4.3.3 Condições de Contorno

Como condição de contorno de montante, foi utilizado o hidrograma de ruptura da barragem de Fundão, sintetizado por Matos (2018), com base nos estudos de Machado (2017). Por meio dos parâmetros calculados da brecha, considerando a hipótese de ruptura por liquefação, a autora, definiu a vazão do escoamento pelo tempo, como mostrado na Figura 4.3. Como condição de contorno a jusante, foi utilizada a declividade do fundo do canal de aproximadamente 0,5%.

Matos (2018) conclui que houve um amortecimento significativo da vazão de pico do hidrograma de ruptura ($36.146,3 \text{ m}^3$ às 00:14h), porém a propagação se dá de forma bastante acelerada, ocorrendo o pico de vazão afluente à seção a montante de Bento Rodrigues às 00:16 horas. Esse efeito decorre da desconsideração das características reológicas do rejeito, implicando em baixa viscosidade do fluido e elevadas velocidades de escoamento, acarretando um pico antecipado. Esse resultado é mais conservador que o apresentado por Machado (2017) que, para modelagem bidimensional com fluido aquoso, encontrou um tempo de chegada de pouco mais de 30 minutos para uma seção a montante de Bento Rodrigues.

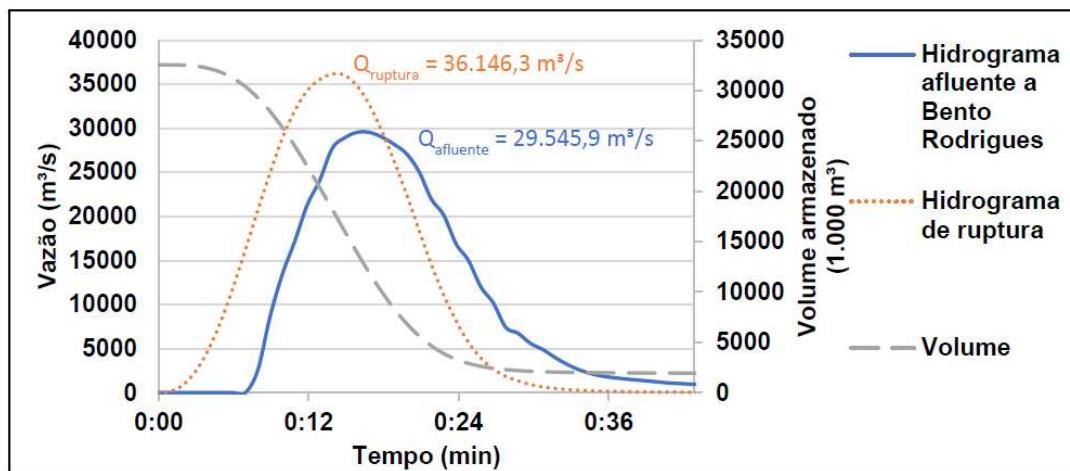


Figura 4.3: Hidrograma de ruptura
Fonte: Matos (2018)

4.3.4 Atribuição dos Coeficientes de Manning ao Mapa de Uso do Solo

Para o coeficiente de Manning (n), foram adotados os valores sugeridos por NRCS (2019) para as classes de cobertura do solo identificadas na imagem de satélite. A Tabela 4.1 mostra as classes mapeadas e posteriormente agrupadas e os respectivos valores adotados.

Tabela 4.1: Valores de Coeficiente de Manning para as classes de uso do solo

Uso do solo	Valores para o Coeficiente de Manning (n)
Vegetação densa	0,160
Vegetação esparsa	0,035
Solo exposto	0,025
Área urbanizada	0,100
Afloramento rochoso	0,025

Fonte: NRCS (2019)

4.3.5 Parâmetros de Convergência do Modelo

Por fim, os parâmetros de convergência do modelo no HEC-RAS funcionam com esquema implícito de cálculo, no qual o intervalo de cálculo é estipulado pelo modelador. Assim, após diversos testes para garantir a estabilidade do modelo, foi adotado o intervalo de tempo igual a 10 segundos. É importante ressaltar que o tempo computacional é inversamente proporcional ao intervalo computacional.

4.4 CRIAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESTRUTURAS DOS DOMICÍLIOS

A criação do Inventário de estruturas dos domicílios consiste no mapeamento e caracterização de todas as estruturas na área afetada quanto ao número de moradores por grupo de risco e à classe econômica estimada, com o intuito de estimar o valor do imóvel e dos seus conteúdos. Esta etapa foi subdividida em sub-etapas mostradas na Figura 4.4 e detalhadas a seguir.

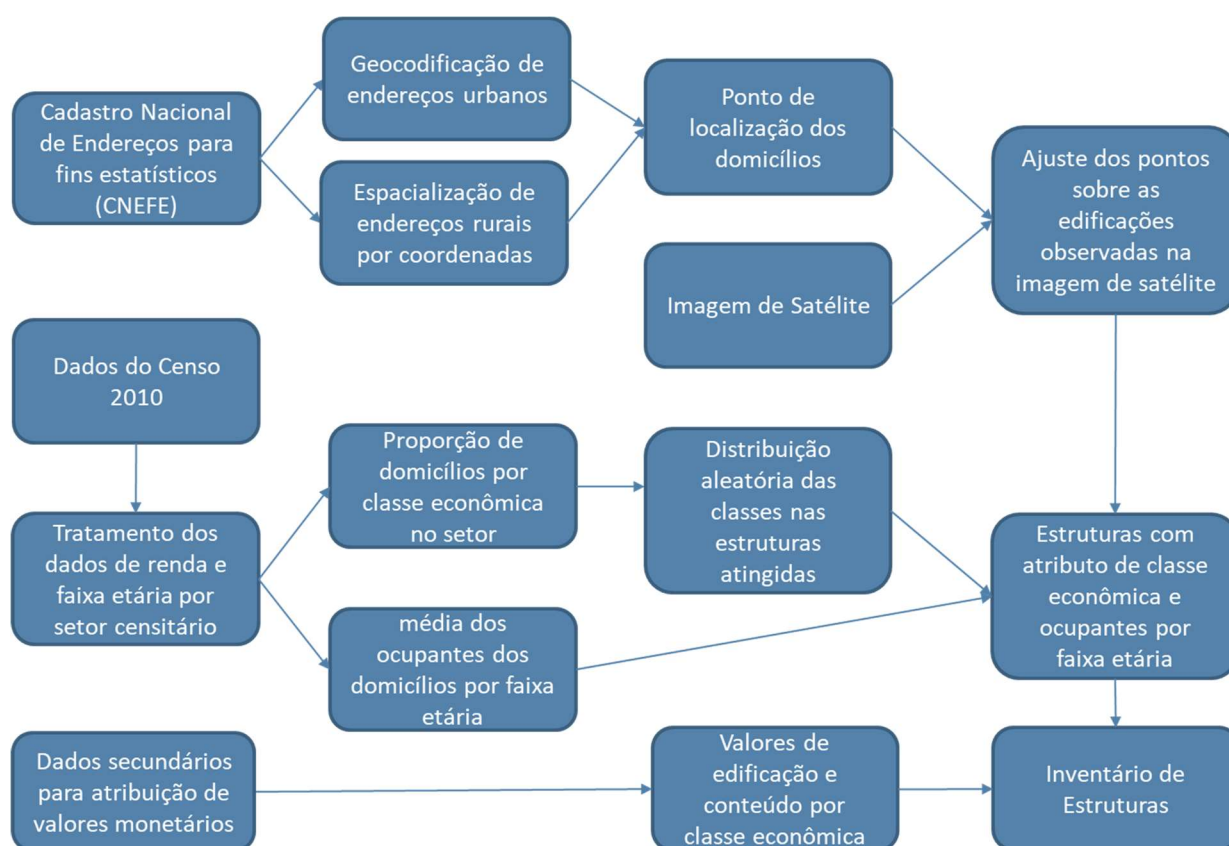


Figura 4.4: Fluxograma da etapa de criação do inventário de estruturas
Fonte: Autora (2019)

4.4.1 Espacialização de Endereços do CNEFE

O Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE) é um produto do Censo 2010 que conta com cerca de 78 milhões de endereços urbanos e rurais do Brasil. Segundo o IBGE (2011), foi disponibilizado para a sociedade civil em 2011 no intuito de ajudar prefeituras, secretarias estaduais e municipais de planejamento e empresas públicas e privadas de estatística a produzir pesquisas, realizar levantamentos, executar ações emergenciais, entre outras finalidades.

O CNEFE é integrado à Base Territorial (mapas digitais urbanos e rurais) do IBGE, o que possibilita a aquisição dos endereços por uma consulta espacial dos setores censitários. Assim, os setores atingidos diretamente pelo rompimento da barragem de Fundão foram identificados pelo cruzamento da base territorial com a mancha de inundação observada e o cadastro foi obtido a partir do código do setor.

A espacialização dos pontos de endereços do CNEFE foi realizada de duas formas distintas, de acordo com o tipo de informação coletada. Os endereços dos setores urbanos contêm o nome do logradouro, a numeração e o nome da localidade. Já os endereços dos setores rurais são fornecidos por meio de pares de coordenadas geográficas.

O primeiro caso foi tratado a partir da base de dados do *Open Street Maps*, por meio do plugin *mmqgis*, disponível no software Quantum GIS. No segundo caso, as coordenadas foram convertidas em graus decimais e, posteriormente em coordenadas UTM no software ArcGIS. Esse procedimento gerou dois arquivos na extensão shapefile, que foram unidos e ajustados sobre as edificações observadas na imagem de satélite anterior ao rompimento.

A vantagem de se utilizar a base de dados do CNEFE é que esta fornece o tipo de uso da estrutura (domicílios, estabelecimentos comerciais, de saúde, de educação ou agropecuários e edificações em construção). Foram selecionados apenas os endereços correspondentes aos domicílios.

Outra informação relevante fornecida pelo cadastro é o tipo de edificação (sobrado, casa ou prédio) o que possibilita estimar o número de andares da edificação. Quando a espacialização dos endereços retorna pontos sobrepostos no mapa, assume-se que aquela estrutura possui mais de um domicílio, portanto é uma residência do tipo multifamiliar. Nesses casos, os domicílios foram agregados em uma única estrutura e um atributo informando o número de domicílios foi incorporado a base.

Nessa etapa, também foi analisado, a partir de registros fotográficos disponíveis, o número de andares das edificações do tipo casa. Constatou-se que a maioria delas possuíam apenas 1 andar, com exceção da cidade de Barra Longa, onde as casas afetadas possuíam 2 andares, como mostra a Figura 3.10.

Com o número total de endereços domiciliares cadastrados por setor censitário foi possível atribuir classes econômicas às estruturas e posteriormente, os valores estimados da construção e seus conteúdos, conforme descrito a seguir.

4.4.2 Tratamento dos dados do Censo 2010 e Obtenção da Proporção de Domicílios por Classe Econômica

O Critério de Classificação Econômica Brasil (ABEP, 2012) tem a função de estimar o poder de compra das pessoas e famílias urbanas por meio do levantamento da quantidade de itens de bens de consumo nos domicílios e do grau de instrução do responsável. A obtenção da proporção dos domicílios no setor censitário por classe econômica buscou apenas a atribuição dos valores das edificações e conteúdos e assim proceder com a estimativa de danos causados pelo contato direto com a lama na área afetada.

Para obtenção da proporção de domicílios por classe econômica, foram utilizados os resultados do universo agregados por setor censitário da base de informações do Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2010). As variáveis que entraram no cálculo dessa proporção foram: domicílios particulares permanentes, moradores em domicílios particulares permanentes, variância do rendimento nominal mensal das pessoas responsáveis por domicílios particulares permanentes (com e sem rendimento) e o valor do rendimento nominal médio mensal das pessoas de 06 anos ou mais de idade (com e sem rendimento).

Como os dados agregados por setores censitários do Censo Demográfico de 2010 não informa os valores sobre o rendimento familiar per capita diretamente, este foi estimado a partir dos valores das variáveis acima. Para tanto, assumiu-se os seguintes pressupostos: as médias dos rendimentos familiares per capita não são significativamente diferentes das médias dos rendimentos domiciliares per capita; a variância dos rendimentos domiciliares per capita é semelhante ao do rendimento dos responsáveis pelos domicílios; e por fim, a distribuição dos rendimentos domiciliares per capita, dentro dos setores censitários, obedece a uma distribuição normal.

Uma vez calculados os desvios padrões das rendas médias dos responsáveis pelos domicílios, bem como as médias dos rendimentos domiciliares per capita dos setores censitários, empregou-se a função da distribuição de probabilidade normal acumulada para se estimar a proporção de domicílios contidos entre os valores de rendimentos da classificação Brasil mostrado na Tabela 4.2. A função de distribuição de probabilidade normal pode ser definida de acordo com a Equação 01 a seguir.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Eq.01}$$

A Tabela 4.2 mostra a classificação econômica adotada pela ABEP para 2010 (ABEP, 2012) em função da renda média familiar.

Tabela 4.2: Classificação econômica Brasil 2010

Classificação		Renda Média Familiar
		(Valor Bruto em R\$)
A	A1	12.926,00
	A2	8.418,00
B	B1	4.418,00
	B2	2.565,00
C	C1	1.541,00
	C2	1.024,00
D/E	D	714,00
	E	477,00

Fonte: ABEP (2012)

Os limites das faixas de renda das classes econômicas utilizadas para a distribuição normal de probabilidade estão indicados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Limites das classes econômicas

Classe	Limite inferior	Limite superior
A	4.418	e+
B	1.024	4.418
C	714	1.024
D/E	0	714

Fonte: Autora (2019)

4.4.3 Distribuição Aleatória das Classes Sociais nos Domicílios Afetados

A partir dos percentuais de domicílios por classe econômica no setor, foi realizada uma distribuição aleatória das respectivas classes para as estruturas mapeadas. O uso de uma distribuição aleatória se deve à impossibilidade de reconhecer, por meio de interpretação de imagem de satélite, a que classe econômica um determinado domicílio possa pertencer. A distribuição aleatória visa, tão somente, à imparcialidade na alocação espacial das classes econômicas e à solução de uma necessidade topológica: a associação de classe econômica a cada ponto do inventário de estruturas.

4.4.4 Atribuição de Valores às Edificações e ao Conteúdo dos Domicílios

Devido a inviabilidade de obtenção de informações em campo acerca das características das edificações, buscou-se uma associação entre as classes econômicas definidas pela ABEP (2012) e as classes estabelecidas pela NBR 12.721/2005 (ABNT, 2005). Esta norma estabelece os critérios para avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições e informa a categoria da edificação, o padrão construtivo e a área base da construção. O procedimento para atribuição de valores das edificações e conteúdos por classe econômica foi baseado nos estudos de Machado (2005).

A Figura 4.5 mostra as características principais dos projetos de residências unifamiliares e a Figura 4.6 mostra as características principais dos projetos para residência multifamiliares, como dispostos na NBR 12.721/2005.

Residência Unifamiliar		
Residência Padrão Baixo (R1-B)	Residência Padrão Normal (R1-N)	Residência Padrão Alto (R1-A)
Residência composta de dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque.	Residência composta de três dormitórios, sendo um suíte com banheiro, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda (abrigo para automóvel).	Residência composta de quatro dormitórios, sendo um suíte com banheiro e closet, outro com banheiro, banheiro social, sala de estar, sala de jantar e sala íntima, circulação, cozinha área de serviço completa e varanda (abrigo para automóvel).
Área Real: 58,64 m²	Área Real: 106,44 m²	Área Real: 224,82 m²
Residência Popular (RP1Q)		
Residência composta de dois dormitórios, sala, banheiro e cozinha.		
Área Real: 39,56 m²		

Figura 4.5: Características principais dos projetos de residências unifamiliares
Fonte: ABNT (2005)

Residência Multifamiliar	
Projeto de Interesse Social (PIS)	
Composição do edifício:	Pavimento térreo e quatro pavimentos tipo.
Descrição dos pavimentos:	
Pavimento térreo:	Hall, escada e quatro apartamentos por andar com dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área de serviço. Na área externa estão localizados o cômodo da guarita com banheiro e central de medição.
Pavimento tipo:	Hall, escada e quatro apartamentos por andar com dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área de serviço.
Área Real:	991,45 m²
Prédio Popular - Padrão Baixo (PP- B)	
Composição do edifício:	Pavimento térreo e três pavimentos tipo.
Descrição dos pavimentos:	
Pavimento térreo:	Hall de entrada, escada e quatro apartamentos por andar com dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área de serviço. Na área externa estão localizados o cômodo de lixo, guarita, central de gás, depósito com banheiro e dezesseis vagas descobertas.
Pavimento tipo:	Hall de circulação, escada e quatro apartamentos por andar com dois dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área de serviço.
Área Real:	1.415,07 m²
Prédio Popular - Padrão Normal (PP - N)	
Composição do edifício:	Garagem, pilotis e quatro pavimentos tipo.
Descrição dos pavimentos:	
Garagem	Escada, elevadores, trinta e duas vagas de garagem cobertas, cômodo de lixo, depósito e instalação sanitária.
Pilotis	Escada, elevadores, hall de entrada, salão de festas, copa, dois banheiros, central de gás e guarita
Pavimento tipo:	Hall de circulação, escada, elevadores e quatro apartamentos por andar com três dormitórios, sendo um suíte, sala estar/jantar, banheiro social, cozinha e área de serviço com banheiro e varanda.
Área Real:	2.590,35 m²

Figura 4.6: Características principais dos projetos de residências multifamiliares
Fonte: ABNT (2005)

Após a associação entre as classes econômicas definidas pela ABEP (2012) e o padrão construtivo da edificação, foi possível atribuir um valor monetário a estrutura domiciliar através do Custo Unitário Básico (CUB) (SINDUSCON/MG, 2010).

Segundo a NBR 12.721/2005 (ABNT, 2005), o CUB representa o custo por metro quadrado de construção do projeto e é calculado pelo Sindicato da Indústria da Construção Civil do Estado de Minas Gerais (Sinduscon/MG). Esse valor serve de base para a avaliação dos custos de construção das edificações, os quais devem ser arquivados no ofício de registro de imóveis. Dessa forma, o CUB foi definido com base na publicação do Sinduscon/MG em 2010, mostrado na Figura 4.7.

		Valores em R\$/m²			
PROJETOS - PADRÃO RESIDENCIAIS					
PADRÃO BAIXO		PADRÃO NORMAL		PADRÃO ALTO	
R-1	844,89	R-1	1.018,63	R-1	1.258,59
PP-4	785,99	PP-4	970,76	R-8	1.029,02
R-8	752,46	R-8	843,49	R-16	1.064,49
PIS	550,27	R-16	816,86		
PROJETOS - PADRÃO COMERCIAIS					
CAL (Comercial Andares Livres) e CSL (Comercial Salas e Lojas)					
PADRÃO NORMAL			PADRÃO ALTO		
CAL - 8	969,03	CAL - 8	1.047,94		
CSL - 8	837,11	CSL - 8	917,84		
CSL - 16	1.116,00	CSL - 16	1.222,67		
PROJETOS - PADRÃO GALPÃO INDUSTRIAL (GI) E RESIDÊNCIA POPULAR (RP1Q)					
RP1Q	824,76				
GI	456,94				

Figura 4.7: Valores definidos para o CUB em janeiro de 2010
Fonte: Sinduscon/MG (2010)

Assim, o valor da estrutura foi obtido pelo produto da área de uma edificação típica em função da classe econômica e o valor do CUB. O resultado dessa associação encontra-se apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Valores atribuídos às edificações por classe econômica

Classe ABEP	Categoria NBR 12.721	Padrão Construtivo	Área Base (m²)	Curso Unitário Básico - CUB (R\$/m²) 2010	Valor da Construção (R\$) 2010
A	R1-A Residência unifamiliar	Alto	224,82	1.258,59	282.956,20

Classe ABEP	Categoria NBR 12.721	Padrão Construtivo	Área Base (m ²)	Curso Unitário Básico - CUB (R\$/m ²) 2010	Valor da Construção (R\$) 2010
A	R8-A Residência multifamiliar	Alto	5.917,79	1.029,02	6.089.524,27
B	R1-N Residência unifamiliar	Normal	106,44	1.018,63	108.422,98
B	PP-N Residência multifamiliar	Normal	2.590,35	970,76	2.514.608,17
C	R1-B Residência unifamiliar	Baixo	58,64	844,89	49.544,35
C	PP-B Residência multifamiliar	Baixo	1.415,07	785,99	1.112.230,87
D/E	RP1Q Residência unifamiliar	Popular	39,56	824,76	32.627,51
D/E	PIS Residência multifamiliar	Popular	991,45	550,27	545.565,19

Fonte: Autora (2019)

A profundidade da fundação das estruturas também deve ser definida, pois é um dado de entrada importante para o cálculo do dano no HEC-FIA. Porém, devido à ausência dessas informações, foi utilizado como padrão, fundações rasas, que variam entre 1 e 3 metros de profundidade. Assim, adotou-se, para todas as construções de 1 andar, como cota de assentamento da fundação, uma profundidade igual a 1 metros e para as estruturas de 2 e 4 andares, adotou-se 1,5 metros.

Os valores dos conteúdos das edificações foram definidos com base nos estudos de Cançado (2009), que considera o valor do bem sem depreciação. A Tabela 4.5 apresenta esses valores.

Tabela 4.5: Valores para conteúdos por classe econômica

Classe	Valor Do Conteúdo Novo (R\$)
A	77.685,9
B	32.613,6

Classe	Valor Do Conteúdo Novo (R\$)
C	10.053,5
D/E	7.936,95

Fonte: Cançado (2009)

4.4.5 Atribuição de população residente por grupo de risco nos domicílios

O grupo de risco é uma classificação necessária para estimar as perdas de vidas. Considerando que a população apresenta respostas diferentes em situações de emergência e pode ter maior ou menor dificuldade de evacuar a área de acordo com a idade, foram definidos dois grupos para a análise: risco e não-risco.

Para atribuir a população residente nos domicílios e separá-las por grupo de risco, foram utilizadas as variáveis sobre idade total da população dos resultados do universo agregado por setores censitários do Censo 2010. As variáveis separam os residentes em domicílios particulares permanentes por setor de acordo com a idade.

Para compor o grupo de risco, foram somadas as variáveis que correspondem às idades de 0 a 5 anos e as variáveis com indivíduos maiores que 65 anos. As demais variáveis foram agrupadas em não-risco. Cabe ressaltar que o HEC-FIA difere a população em dois grupos: “over65” e “under65”. No entanto, de forma mais conservadora, optou-se por acrescentar ao grupo de risco, os indivíduos menores de 5 anos por possuir mobilidade reduzida e capacidade de decisão de evacuação em situações de emergência menor em relação aos indivíduos do grupo não-risco.

4.5 CÁLCULO DO DANO DOS DOMICÍLIOS NA MANCHA DE INUNDAÇÃO

O cálculo do dano nos domicílios dentro da mancha de inundação observada foi realizado desconsiderando os parâmetros hidrodinâmicos da inundação calculados pelo HEC-RAS. O intuito nessa etapa foi a obtenção do dano causado a partir de uma abordagem conservadora, de acordo com a metodologia de Índice de Risco proposta por Viseu (2006), tendo como premissa que tudo que é inundado pela cheia será dano ou perda. Esse cálculo também buscou obter resultados de valores de danos em consonância com os critérios estabelecidos pelo CNRH (2012).

Dessa forma, foram somados os valores totais estimados para as edificações e seus conteúdos nos domicílios que se encontram dentro dos limites da envoltória observada. Da mesma forma, toda a população residente foi considerada como população em risco.

4.6 APLICAÇÃO DO MODELO HEC-FIA

Toda a etapa foi realizada utilizando o software HEC-FIA, versão 3.0. O fluxo de dados dessa etapa é apresentado na Figura 4.8.

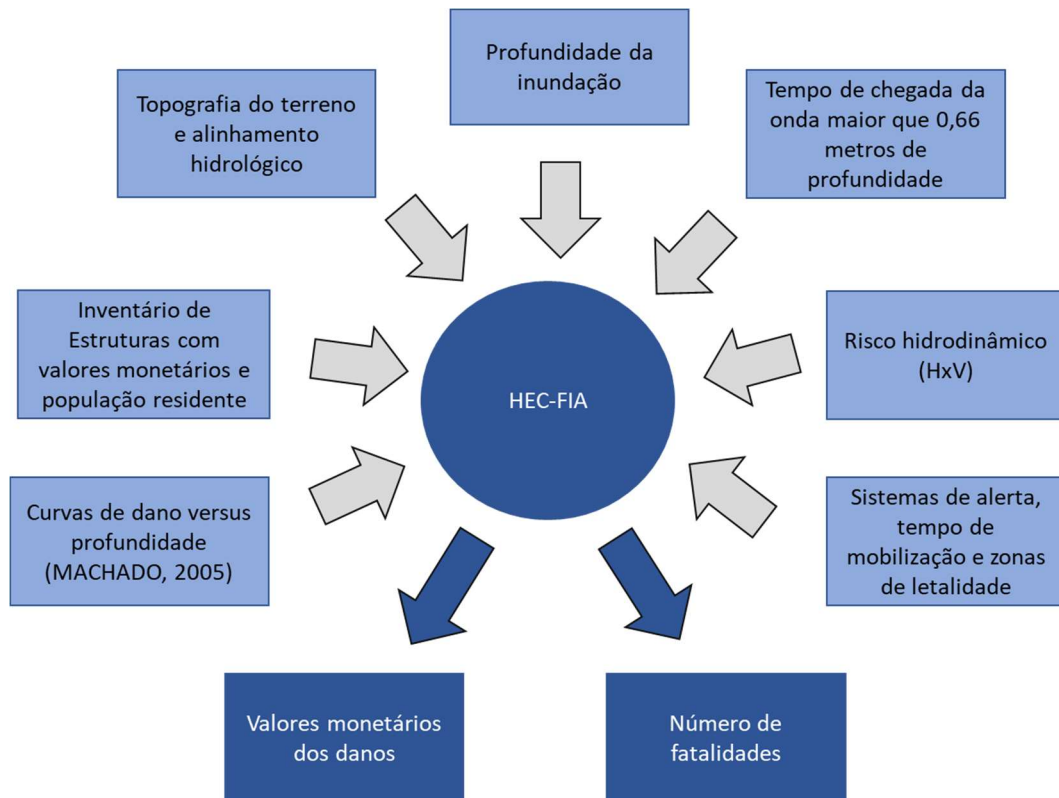


Figura 4.8: Fluxo de dados para a estimativa de danos diretos e perdas de vida
Fonte: Autora (2019)

O programa requer que o ambiente seja modelo segundo as variáveis e parâmetros descritos a seguir.

4.6.1 Alinhamento hidrológico

Corresponde a um arquivo ESRI shapefile do tipo linha representando o curso d'água principal que receberá a vazão de cheia. Essa feição foi vetorizada na imagem de satélite antes do rompimento, respeitando o sentido do fluxo do rio (montante – jusante).

4.6.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Corresponde a um arquivo raster representando a topografia do terreno e deve ser o mesmo utilizado na modelagem hidrodinâmica.

4.6.3 Dados da inundação

Corresponde aos arquivos rasters de profundidade da inundação, de tempo de chegada da onda informando o tempo em que a inundação atinge as estruturas com profundidade maior a 0.61 metros e de risco hidrodinâmico (HxV), resultantes do modelo hidrodinâmico.

4.6.4 Limites e bordas

Esse item é representado pelos limites dos setores censitários em formato ESRI shapefile do tipo polígono, que é utilizado para a definição de área de impacto no modelo e para agregação dos resultados.

4.6.5 Inventário de estruturas

Esse item corresponde às estruturas domiciliares com atributos de identificação individual e por classe econômica, número de andares, altura da fundação, valores das edificações e conteúdos e população residente por grupo de risco.

Durante essa etapa, alguns pontos do inventário foram espacialmente deslocados. A necessidade desse procedimento se deu, devido aos resultados obtidos pelo modelo hidrodinâmico, que ora superestimou a mancha de inundação em relação ao observado, ora subestimou-a, como será discutido nos próximos capítulos.

Esse ajuste ocorreu em 55% das estruturas na cidade de Barra Longa. A decisão pelo deslocamento justifica-se pelo fato de que todas as estruturas mapeadas na mancha de inundação observada devem ser analisadas quanto ao dano direto e o HEC-FIA somente irá proceder com a análise se os pontos estiverem dentro dos limites da mancha de inundação simulada.

A importação do inventário de estruturas para o ambiente de modelagem do HEC-FIA requer a definição dos campos na tabela de atributos que contenham as informações necessárias para o cálculo do dano direto e das perdas de vida. A Figura 4.9 mostra esse procedimento no HEC-FIA.

Structure Inventory Name:

Shapefile:

First Floor Elevation Source

First Floor Elevation

Use Terrain + Foundation Height

Data Assignments

Inventory Field	Shapefile Field
Structure ID:	ID
Damage Category:	DMG_CAT
Occupancy Type:	CLASSE
Replacement Value:	VALOR_CONS
User Supplied First Floor Elevation:	

Optional Data

Inventory Field	Shapefile Field
Content Value	VALOR_CONT
Construction Type	E_TIPO
Foundation Height	ALTURA_FUN
Population Day Over 65	POP_RISCO
Population Day Under 65	POP_N_RISC

Figura 4.9: Importação do inventário no HEC-FIA
 Fonte: Autora (2019), extraído do HEC-FIA 3.0

4.6.6 Curvas de danos versus profundidade de submersão

Essa informação deve ser diferenciada para edificações e conteúdo, uma vez que pressupõe que o dano difere em relação a profundidade de submersão.

As curvas de dano versus profundidade correspondem às funções definidas por Machado (2005) e diferenciadas por classes econômicas do Critério Brasil (ABEP, 2012), conforme a Tabela 4.2. As Figura 4.10 e Figura 4.11 mostram o resultado desse procedimento no HEC-FIA.

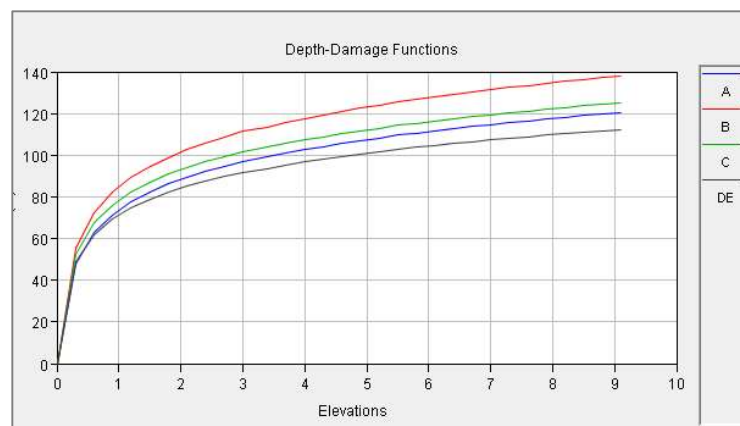


Figura 4.10: Curvas de Dano versus profundidade para conteúdos
 Fonte: Autora (2019), extraído do HEC-FIA 3.0

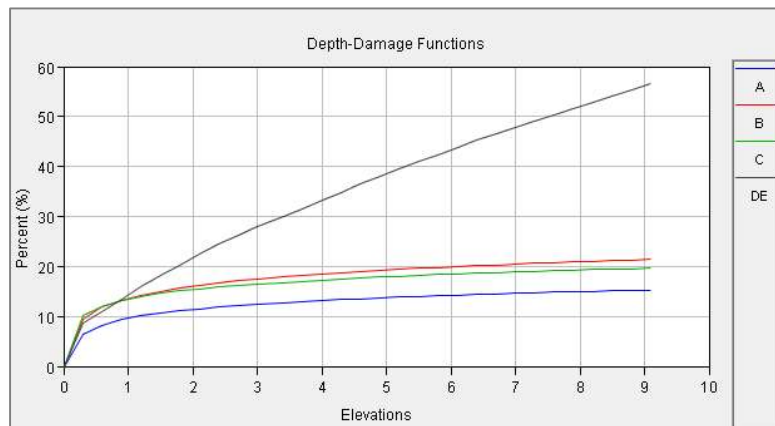


Figura 4.11: Curvas de Dano versus profundidade para edificações
 Fonte: Autora (2019), extraído do HEC-FIA 3.0

4.6.7 Tipo de sistema de alerta e tempo de mobilização

No caso do evento de ruptura da barragem de Fundão, em que não havia sistema de alerta de enchente, a população de Bento Rodrigues foi alertada por funcionários da mineradora por telefone e pessoalmente. Em Morgenstern *et.al.* (2016) foi relatado por moradores que, um funcionário da Samarco, residente de Bento Rodrigues, se deslocou de moto até a comunidade, alertando os habitantes do povoado sobre a ruptura durante o trajeto. Dessa forma, a população teve um tempo de mobilização rápido e sofreu poucas fatalidades, dada a magnitude do evento.

Para representar essa situação, foi adotado o sistema de alerta do tipo “sirene”, com tempo de mobilização “acima da média”. Assim, o programa considerou que em 20 minutos, tempo estimado da chegada da onda em Bento Rodrigues, aproximadamente 55% da população havia recebido o aviso e dado início a mobilização. A Figura 4.12 mostra a definição desses parâmetros no ambiente da modelagem.

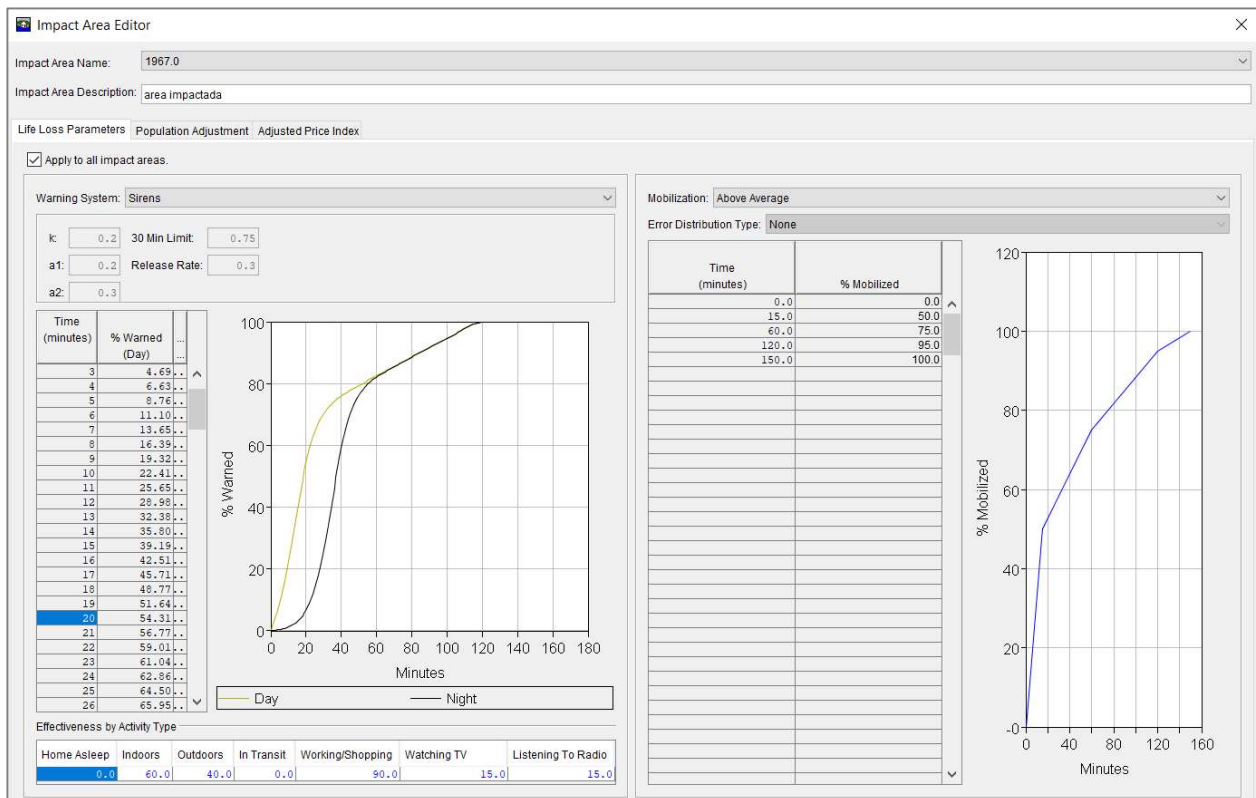


Figura 4.12: Parâmetros de tempo de alerta e mobilização utilizados
 Fonte: Autora (2019), extraído do HEC-FIA 3.0

4.6.8 Profundidade considerada para a não-evacuação

A profundidade de não-evacuação pode ser definida como a altura da onda em que, supostamente, a população decide não evacuar e permanece dentro da estrutura. Esse valor foi definido como 0,61 metros.

4.6.9 Limite das zonas de letalidade

Os limites das zonas de letalidade são parâmetros em que se determinam as condições de maior ou menor chance de fatalidade da população que não evacuaram. Uma vez que o tempo de mobilização do indivíduo depende das suas condições de reação e capacidade de tomada de decisão, esse parâmetro foi analisado por grupo de risco.

Os limites superiores para o grupo não-risco das zonas de segurança e zona comprometida adotados foram 0,61 metros e 2,5 metros, respectivamente. Para o grupo de risco foram adotados para as mesmas zonas, os valores 0,2 metros e 1,6 metros. Dessa forma, buscou-se representar o nível de dificuldade que os indivíduos de cada grupo apresentam ao se locomover em uma situação em que a onda de inundação atingiu a estrutura.

4.6.10 Limite das zonas de risco hidrodinâmico

Os limites das zonas de risco hidrodinâmico também devem ser estabelecidos no HEC-FIA para cada tipo de estrutura. Porém, observou-se que no contexto da área afetada, as edificações não diferem pelo tipo de construção, mesmo que sejam considerados padrões construtivos diferentes por classe econômica, sendo elas majoritariamente do tipo alvenaria, concreto e aço. Assim, foi adotada a mesma classificação para todos os tipos de estrutura, proposta por Balbi (2008), de acordo com a Tabela 2.11. A Figura 4.13 mostra essas definições no ambiente de modelagem do HEC-FIA.

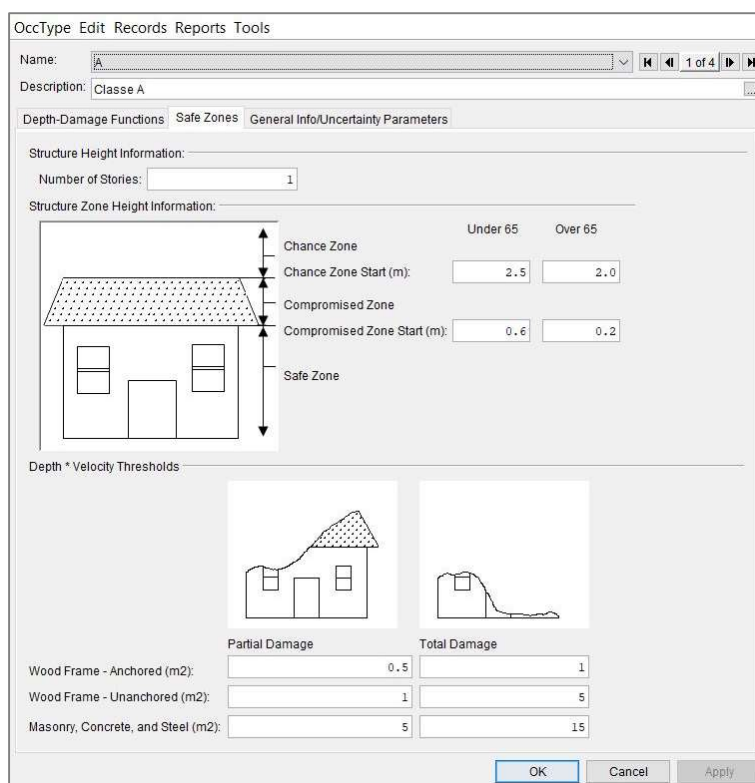


Figura 4.13: Limite das zonas de letalidade e risco hidrodinâmico no HEC-FIA
Fonte: Autora (2019), extraído do HEC-FIA 3.0

As seguintes taxas médias de mortalidade foram usadas com base nas distribuições de probabilidade para cada zona de letalidade descritas em Lehman *et. al.* (2014). As distribuições de probabilidade das taxas de mortalidade são usadas no HEC-FIA quando a opção de análise de incerteza é selecionada.

- Zona segura: 0.0002
- Zona comprometida: 0.12
- Zona de chance: 0.91

4.7 LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES SOBRE O EVENTO DE FUNDÃO

O levantamento das informações sobre os danos diretos causados pelo rompimento da barragem de Fundão foi realizado a partir de pesquisas em órgãos oficiais, que desenvolveram estudos sobre a área afetada logo após o evento, com destaque para o Relatório dos efeitos dos desdobramentos do rompimento da barragem de Fundão, de fevereiro de 2016 (MINAS GERAIS, 2016) e o Relatório de Análise de Acidente, publicado pelo Ministério do Trabalho e Previdência Social em abril de 2016 (MT-MG, 2016).

Segundo MINAS GERAIS (2016), o documento é baseado, entre outros estudos, no relatório sobre as perdas causadas pelo contato com a lama, produzido pela Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais (EMATER) e em formulários enviados pelas prefeituras dos municípios diretamente afetados.

O levantamento do número de fatalidades observadas no evento foi realizado também, por meio de consulta em fontes jornalísticas e sites oficiais das empresas envolvidas.

4.8 ANÁLISE COMPARATIVA

A análise comparativa dos resultados obtidos exigiu a realização de três procedimentos anteriores. Em primeiro lugar, os resultados obtidos para edificações e conteúdos foram somados, pois as fontes de pesquisa dos danos observados não fizeram distinção desses valores. Posteriormente, os resultados obtidos por setor censitário foram agregados por município, que é a unidade territorial de análise utilizada pela SEDRU no Relatório dos efeitos dos desdobramentos do rompimento da barragem de Fundão (MINAS GERAIS, 2016) .

Em terceiro lugar, os valores obtidos pelo cálculo dos danos na mancha de inundação observada e os resultados da simulação no HEC-FIA, ambos realizados com base nos dados socioeconômicos referente ao ano de 2010, foram atualizados para o ano de 2015, a partir do Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) (IBGE, 2019) acumulado nesse período. Os resultados foram comparados por meio de tabelas e gráficos, em valores monetários e percentuais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MAPEAMENTO DA MANCHA DE INUNDAÇÃO OBSERVADA

No processo de quantificação dos danos causados pelo rompimento da barragem é fundamental conhecer a área diretamente afetada. No caso do objeto em análise, a lama presente na onda de inundação deixou marcas facilmente identificáveis na imagem de satélite, ao longo de todo trecho mapeado.

A extensão e os limites da mancha de inundação dependem de diversos fatores, dentre os quais as características do material armazenado na barragem e a topografia do vale a jusante. Na Figura 5.1 é apresentada a mancha de inundação observada. Pode-se verificar facilmente os limites da inundação no encarte de ampliação na localidade de Bento Rodrigues. A área total da mancha de inundação observada é de aproximadamente 2.209 hectares, com uma extensão de 110 quilômetros.

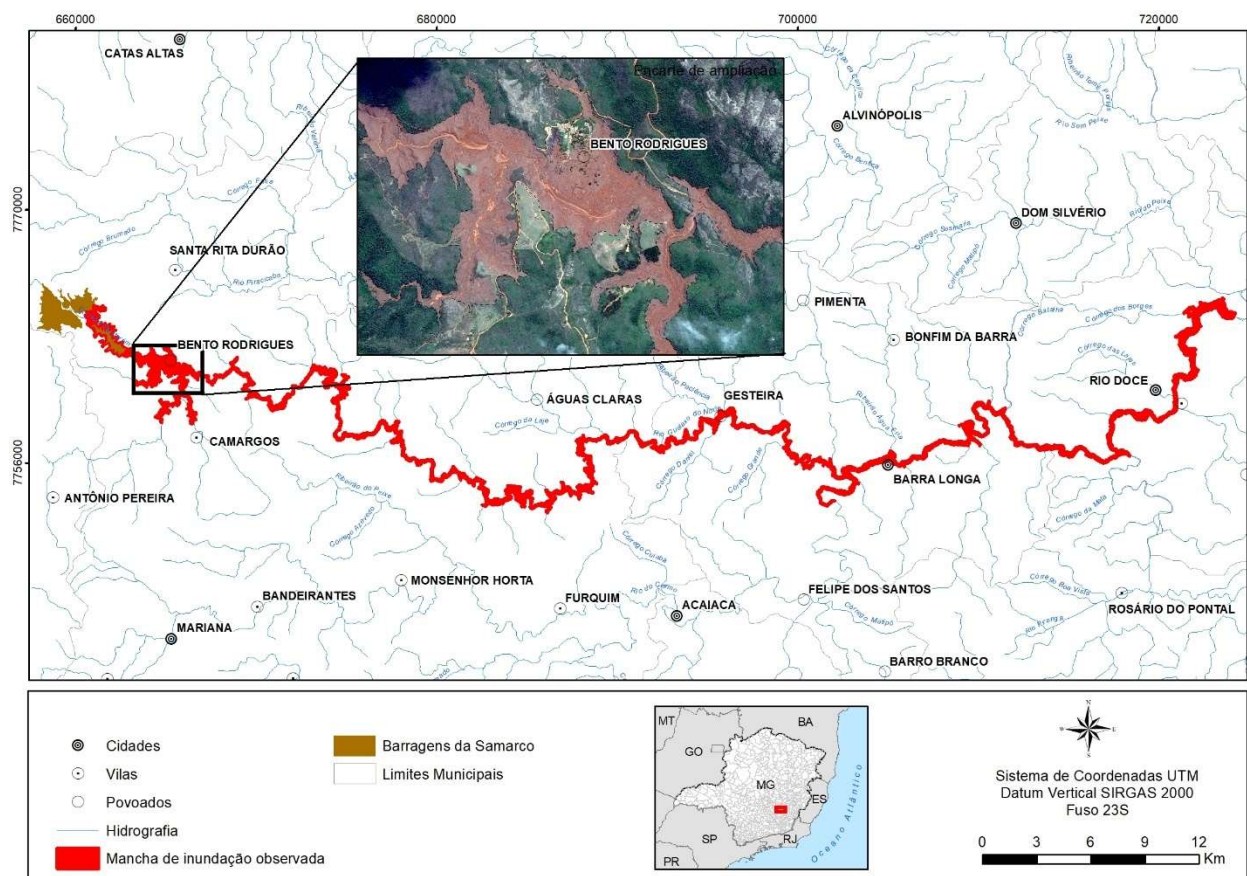


Figura 5.1: Mancha de inundação observada
Fonte: Autora (2019)

5.2 MAPEAMENTO DO USO DO SOLO

Devido à alta resolução da imagem de satélite foi possível identificar e diferenciar as feições de uso do solo. As imagens, que datam de janeiro a agosto de 2015, representam um retrato da paisagem na época da sua obtenção. Desse modo, é possível afirmar que o uso do solo mapeado é uma aproximação da configuração da paisagem no dia da ruptura da barragem. Algumas classes como solo exposto, pastagem, áreas de cultivo e florestas são mais dinâmicas no espaço e no tempo e podem ter sido modificadas no intervalo entre a captura das imagens e o rompimento da barragem. Na Figura 5.2 é apresentado o resultado do mapeamento do uso do solo.

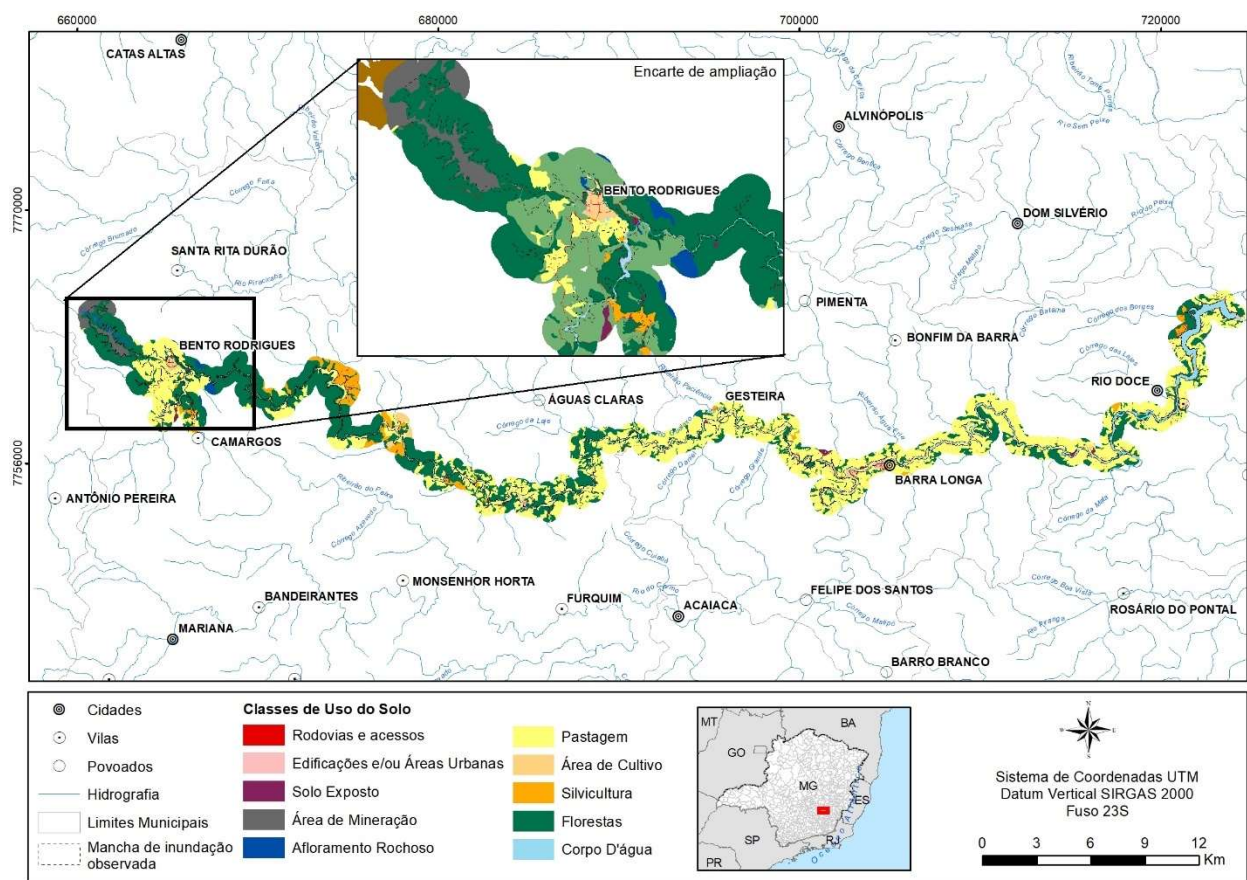


Figura 5.2: Mapa de uso do solo
Fonte: Autora (2019)

Para além da obtenção dos coeficientes de rugosidade, o mapeamento do uso do solo pode contribuir no conhecimento dos danos causados pelo rompimento da barragem.

Grandes áreas de cultivo e pastagem (890 hectares) foram atingidas diretamente evidenciando a perda de áreas produtivas e a perda de animais domésticos. Os corpos d'água atingidos (648 hectares) mostram a dimensão do desastre e a inviabilidade de utilização dos recursos hídricos na região após o rompimento. Os acessos e rodovias afetados evidenciam a grande perda de infraestrutura no local, acarretando outros danos, como a paralização de circulação de pessoas e mercadorias, a paralização de atividades produtivas, o lucro cessante de empresas, comércio e serviços, e conseqüentemente, a diminuição na arrecadação de impostos pelos municípios. A Tabela 5.1 mostra os usos do solo mapeados e suas respectivas áreas, em hectares, atingidas pela lama da barragem.

Tabela 5.1: Usos do solo mapeados na mancha de inundação observada

Classes de uso do solo	Área (hectares)
Afloramento Rochoso	2,00
Área de Cultivo	79,03
Área de Mineração	88,35
Corpo D'água	648,35
Áreas urbanas	30,55
Florestas	475,30
Pastagem	807,84
Rodovias e Acessos	31,23
Silvicultura	32,41
Solo Exposto	13,61
Total	2.208,68

Fonte: Autora (2019)

Após essa análise, as feições mapeadas foram agrupadas em seis classes, com o intuito de atribuir o coeficiente de rugosidade de Manning: Água, Vegetação Densa; Vegetação Espessa, Afloramento Rochoso, Solo Exposto e Área Urbanizada, como mostra a Tabela 4.1 do Item 4.3.4.

5.3 PROPAGAÇÃO DA ONDA DE INUNDAÇÃO

A propagação da onda de inundação foi realizada no programa HEC-RAS 5.0.6 com as condições de contorno descritas no capítulo de metodologia. Essa etapa foi necessária para se obter as características hidrodinâmicas da inundação e proceder com a estimativa de danos diretos e perdas de vida. Para apresentação dos resultados, foram traçadas 12 seções transversais ao longo do trecho simulado. As profundidades e velocidades máximas, o risco hidrodinâmico e os tempos de chegada nas seções são apresentados na Tabela 5.2. As Figura 5.3, Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6 mostram a evolução dos parâmetros analisados por seção transversal.

Tabela 5.2: Resultados do modelo hidrodinâmico nas seções transversais

Nome da Seção	Distância da barragem Km)	Profundidade Máxima (m)	Velocidade Máxima (m/s)	Tempo de chegada (hh: min)	Risco Hidrodinâmico Máximo (m ² /s)
ST-01	0.3	24.66	6.59	00:08	138.94
ST-02	4.0	22.79	16.69	00:19	249.92
ST-03	6.3	8.23	10.40	00:25	15.49
ST-04	16.2	6.88	1.96	01:55	8.29
ST-05	21.4	5.16	0.81	03:13	1.74
ST-06	29.3	5.02	0.91	06:13	1.89
ST-07	40.4	3.36	0.48	12:10	0.62
ST-08	46.7	3.50	0.25	18:45	0.54
ST-09	59.5	3.34	0.70	30:40	1.26
ST-10	73.7	2.20	0.33	44:55	0.58
ST-11	97.2	1.46	0.27	76:58	0.27
ST-12	109.4	8.07	0.39	87:34	0.36

Fonte: Autora (2019)

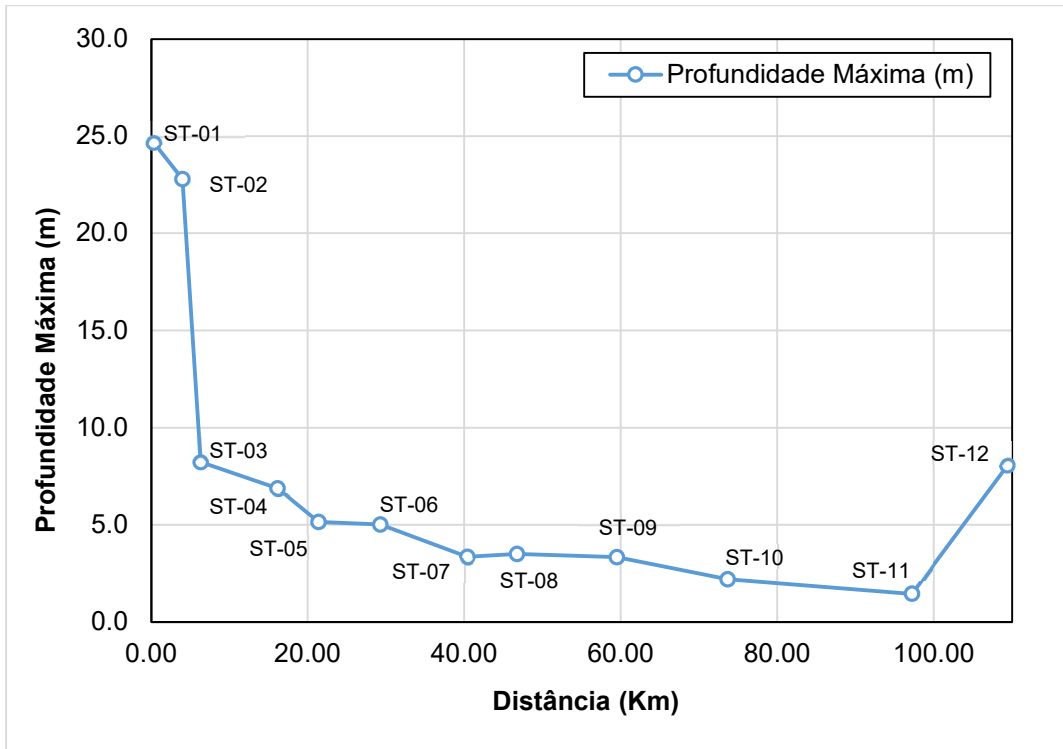


Figura 5.3: Profundidade máxima da inundação nas seções
 Fonte: Autora (2019)

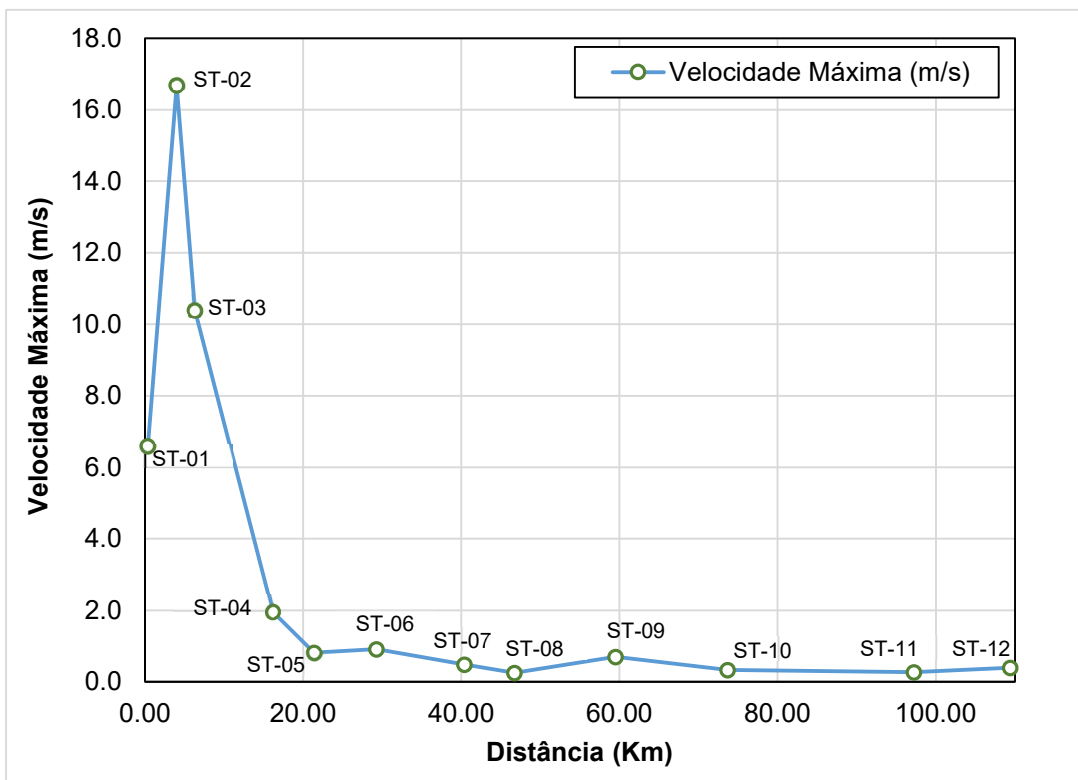


Figura 5.4: Velocidade máxima da inundação nas seções
 Fonte: Autora (2019)

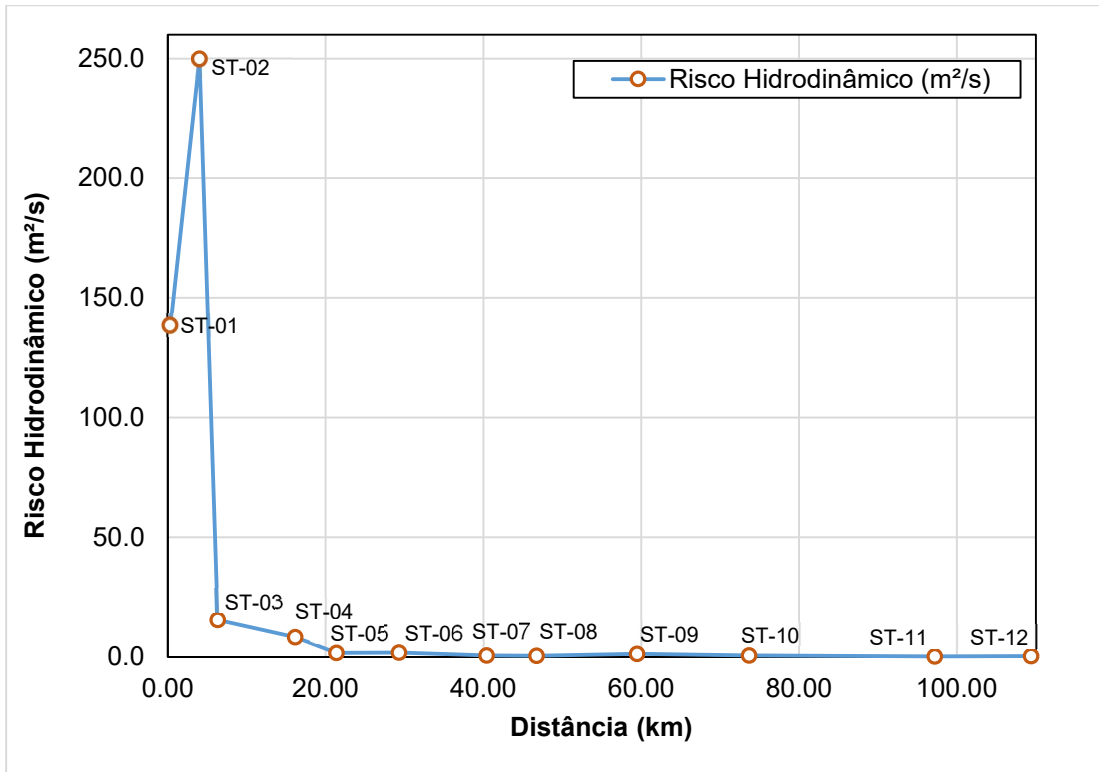


Figura 5.5: Risco hidrodinâmico da inundação nas seções
Fonte: Autora (2019)

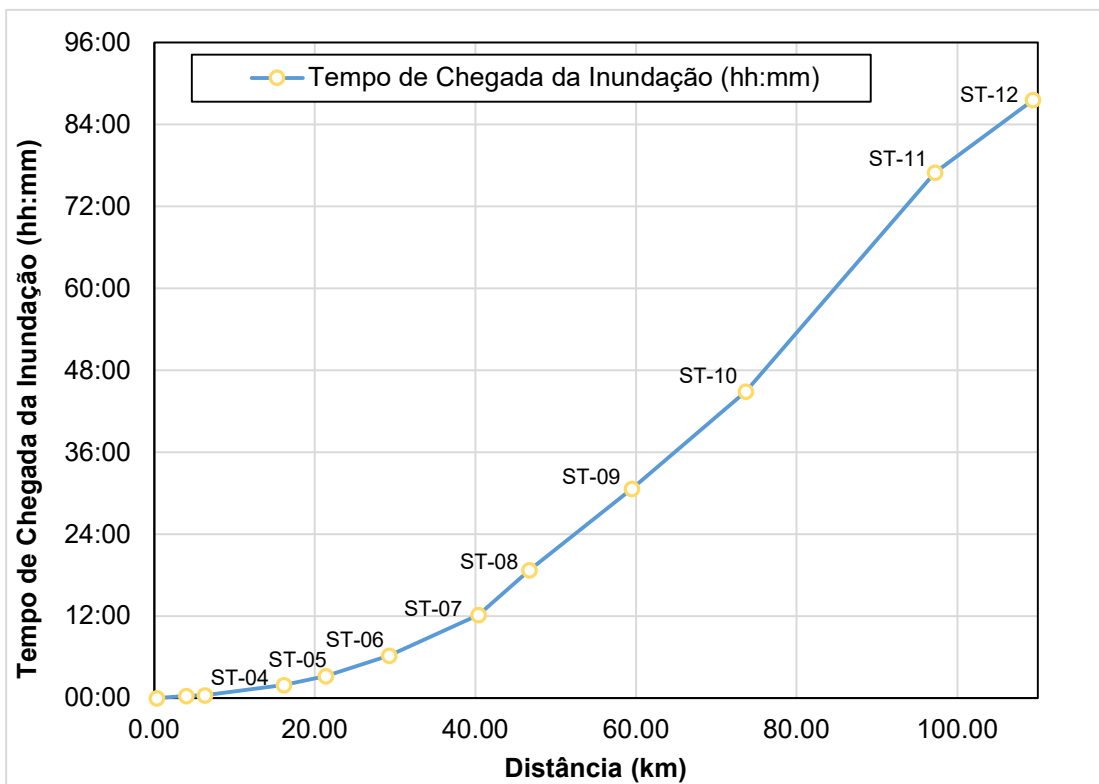


Figura 5.6: Tempo de chegada da onda de inundação nas seções
Fonte: Autora (2019)

As Figura 5.7, Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram os resultados de profundidade máxima, velocidade máxima, risco hidrodinâmico e tempo de chegada da onda, respectivamente.

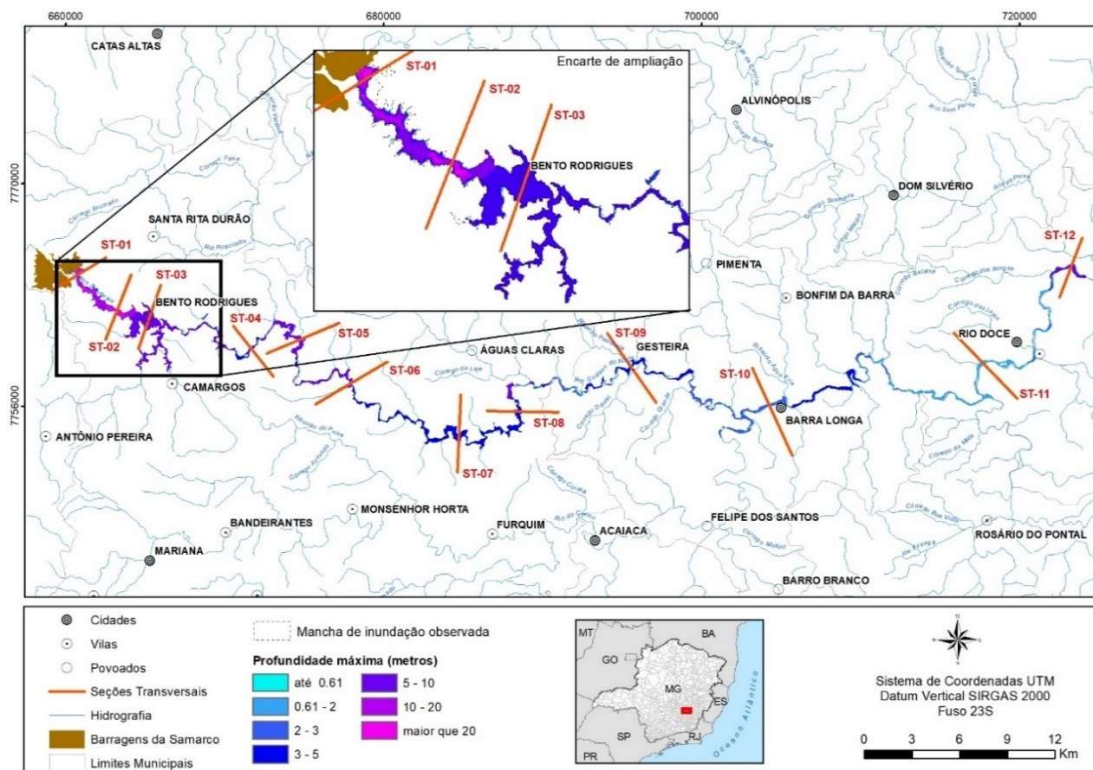


Figura 5.7: Profundidade máxima da inundação simulada
Fonte: Autora (2019)

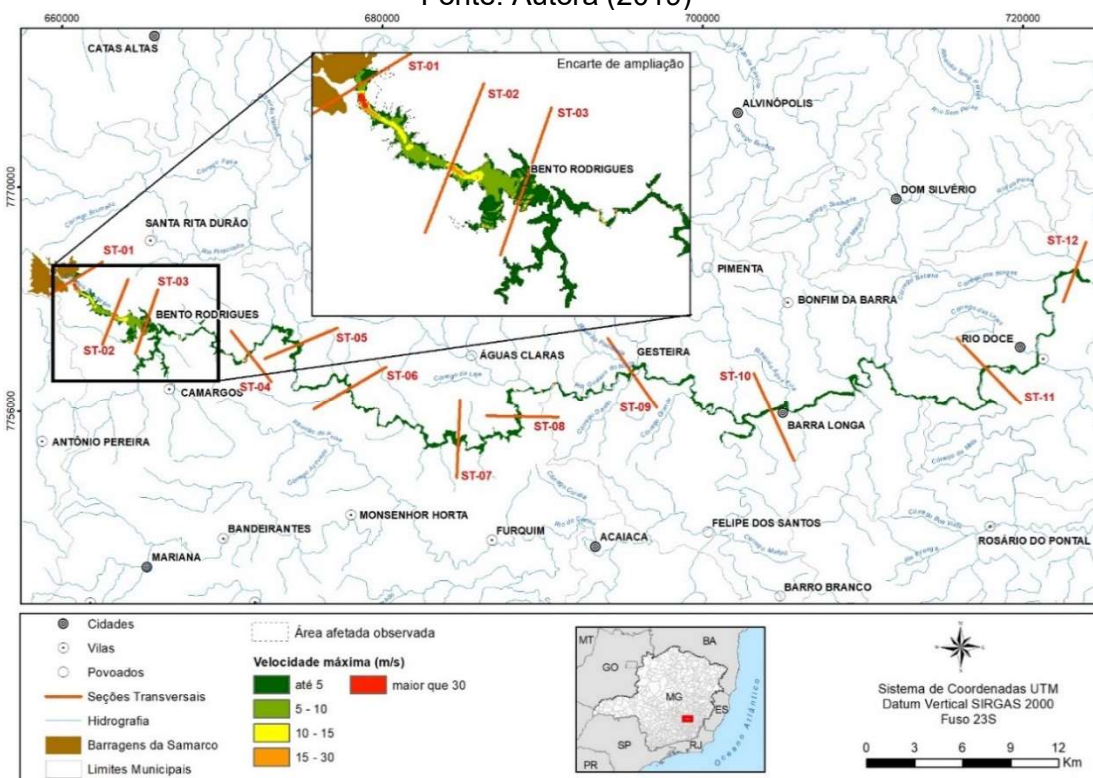


Figura 5.8: Velocidade máxima da inundação simulada
Fonte: Autora (2019)

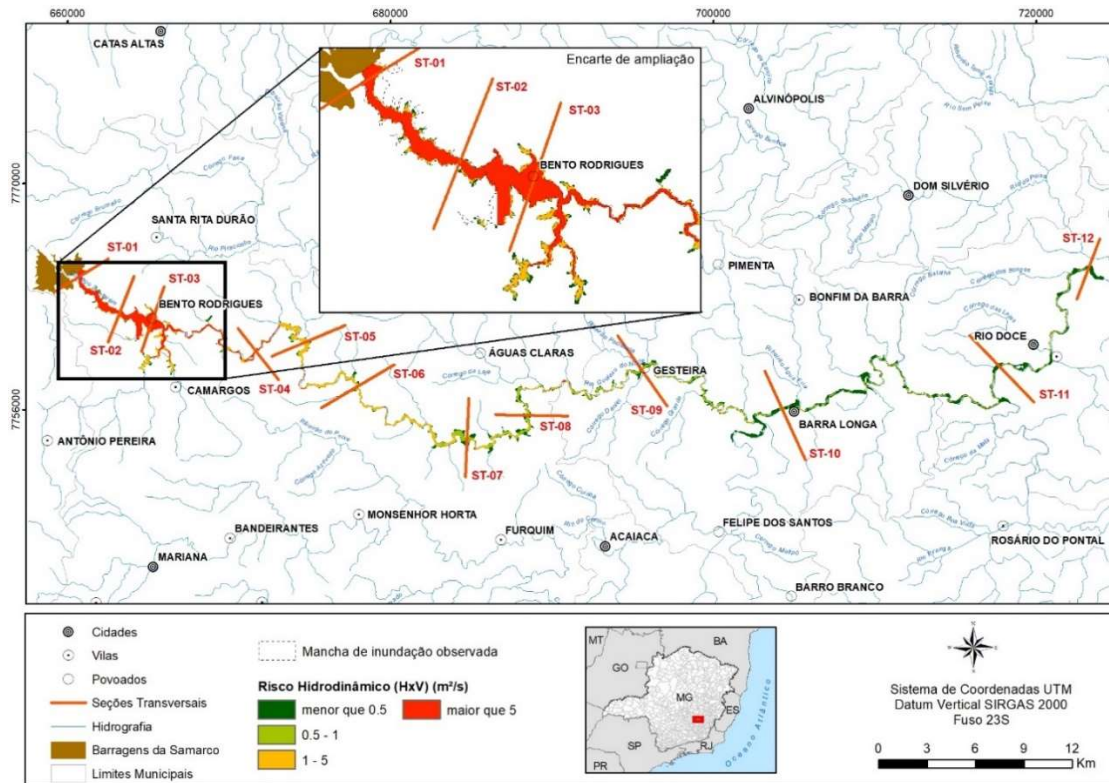


Figura 5.9: Risco hidrodinâmico da inundação simulada
 Fonte: Autora (2019)

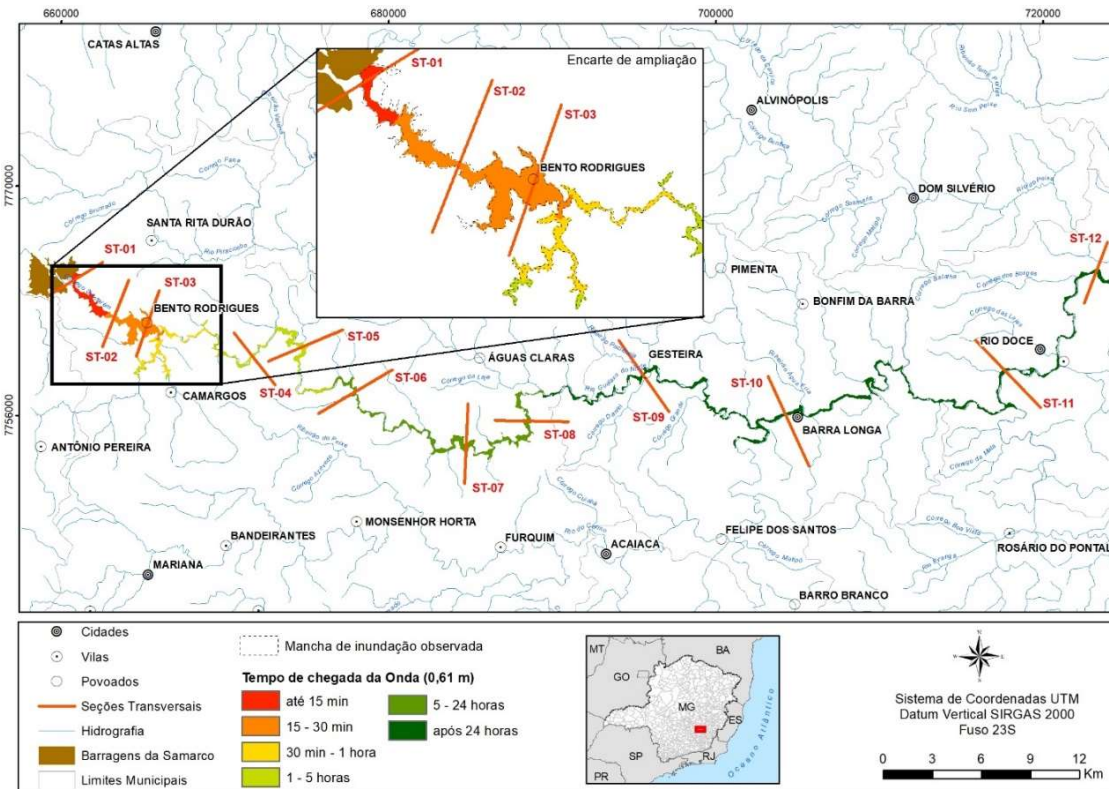


Figura 5.10: Tempo de chegada da onda de inundação simulada
 Fonte: Autora (2019)

O desempenho da simulação foi avaliado por meio da comparação das manchas de inundação simulada e observada. As larguras medidas nas seções transversais são apresentadas na Tabela 5.3. A Tabela 5.4 apresenta a comparação geral entre elas.

Tabela 5.3: Largura das manchas de inundação nas seções transversais

Largura (m)			
Seções Transversais	Mancha de Inundação		
	Observada	Simulada	Diferença
ST-01	944,95	569,20	-375,75
ST-02	138,65	185,32	46,67
ST-03	1018,67	1094,84	76,17
ST-04	114,96	116,00	1,04
ST-05	297,15	333,12	35,97
ST-06	605,60	635,85	30,25
ST-07	662,69	701,28	38,59
ST-08	453,86	484,12	30,26
ST-09	141,73	104,54	-37,19
ST-10	179,38	167,43	-11,95
ST-11	275,38	241,55	-33,83
ST-12	452,58	269,97	-182,61

Fonte: Autora (2019)

Tabela 5.4: Comparação geral entre as manchas de inundação

	Mancha de Inundação Observada	Mancha de inundação simulada
Área (ha)	2.208,68	2.180,47
Largura média nas seções (m)	440,47	408,60
Comprimento (Km)	120,45	120,45

Fonte: Autora (2019)

As Figura 5.11, Figura 5.12, Figura 5.13 e Figura 5.14 detalham as manchas de inundação observada e simulada nas seções correspondentes às localidades mais afetadas: Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, Gesteira e Barra Longa, respectivamente.

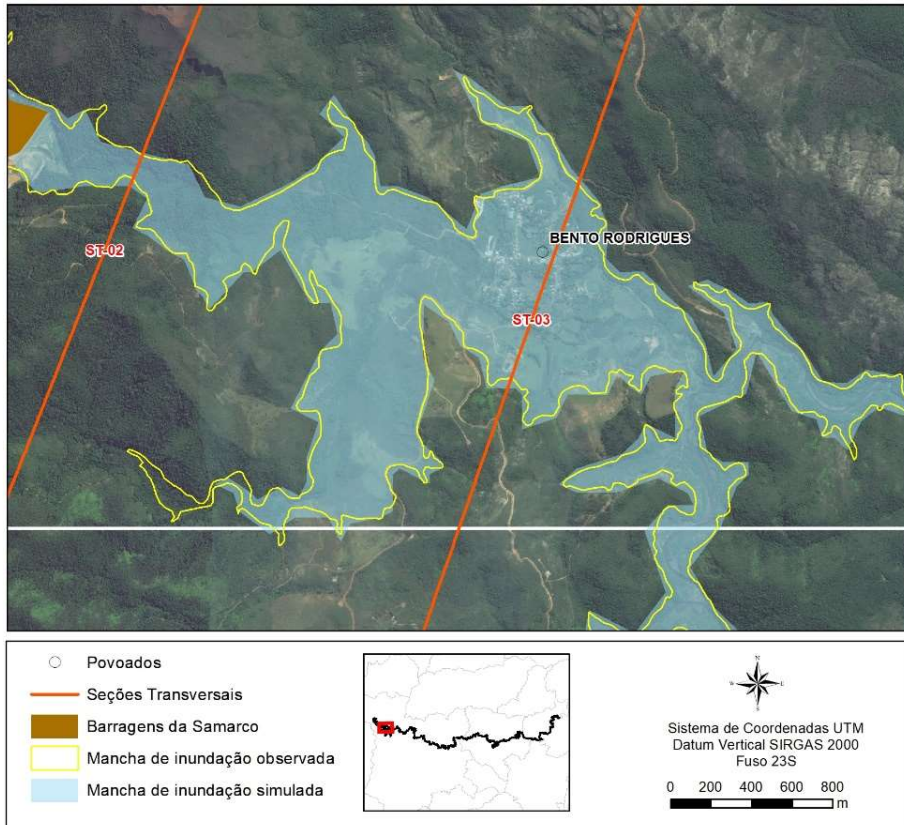


Figura 5.11: Comparação das manchas de inundação em Bento Rodrigues
Fonte: Autora (2019)

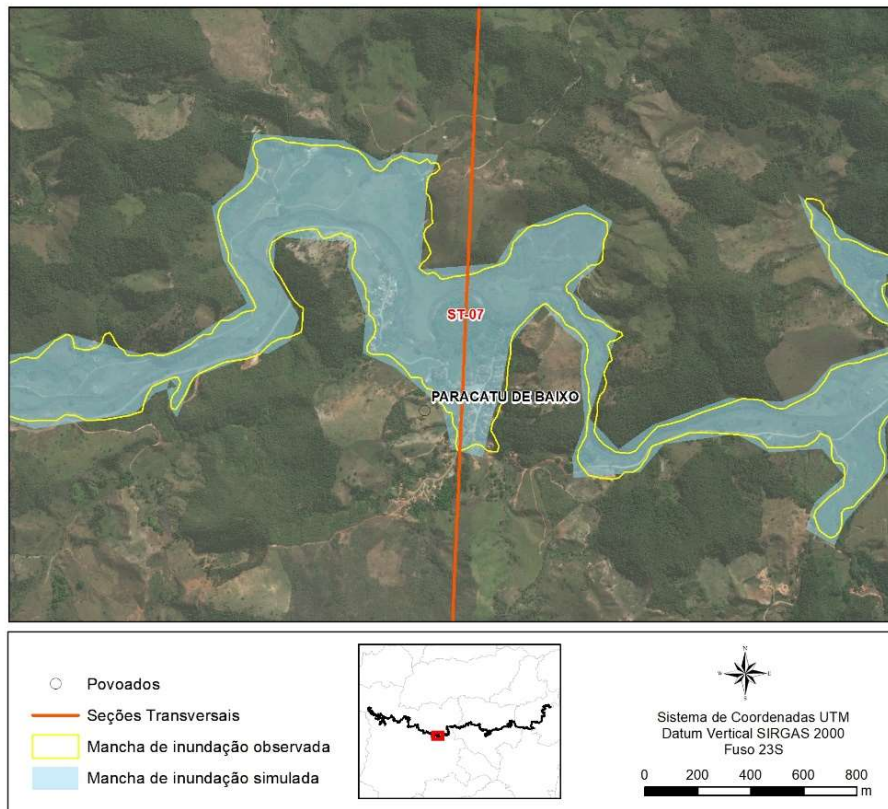


Figura 5.12: Comparação das manchas de inundação em Paracatu de Baixo
Fonte: Autora (2019)

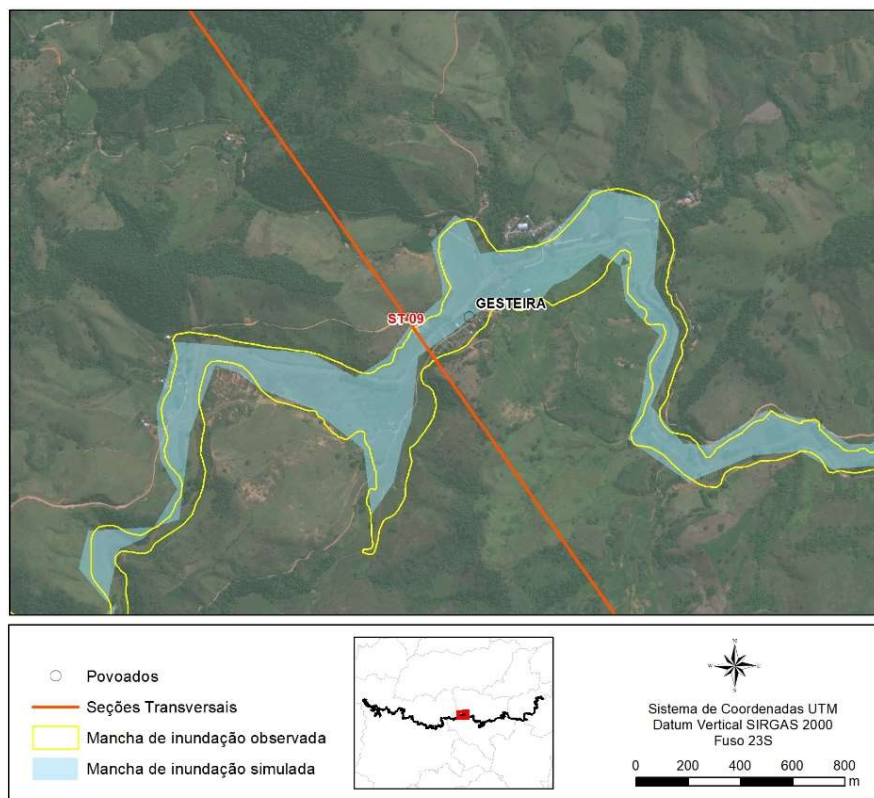


Figura 5.13: Comparação das manchas de inundação em Gesteira
 Fonte: Autora (2019)

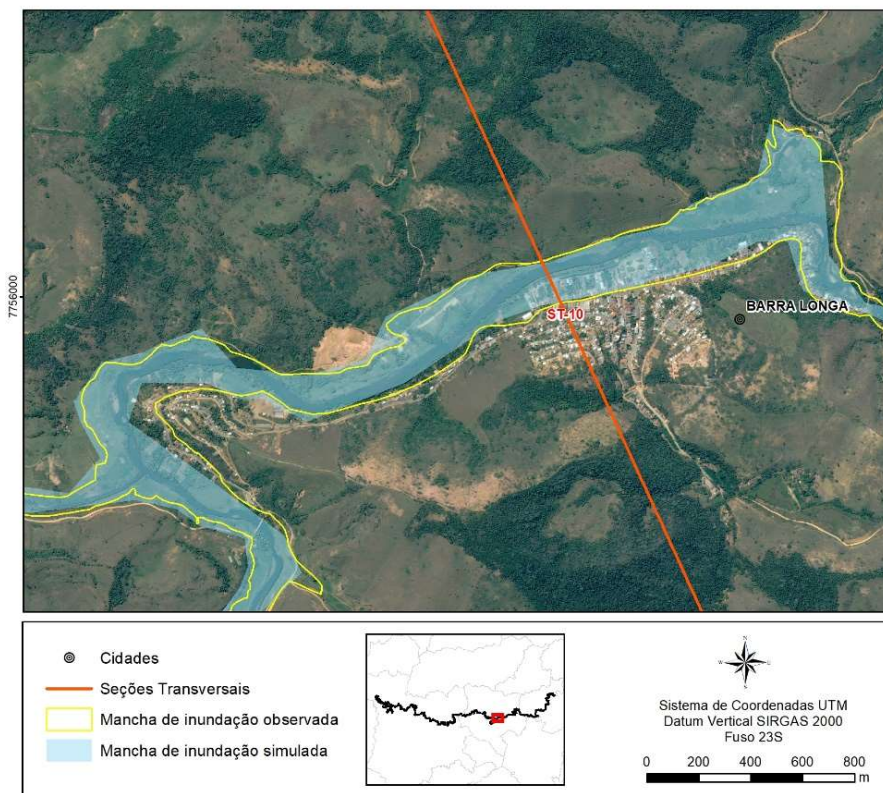


Figura 5.14: Comparação das manchas de inundação em Barra Longa
 Fonte: Autora (2019)

5.4 CRIAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESTRUTURAS DOMICILIARES

A Tabela 5.5 mostra o número total de domicílios nos setores censitários que interceptam a mancha de inundação observada e o número de domicílios afetados em cada setor. A fim de facilitar a leitura dos resultados, os setores correspondentes às localidades mais atingidas (Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo, Gesteira e Barra Longa), estão destacados nas tabelas a seguir.

Tabela 5.5: Porcentagem de domicílios afetados por setor censitário

Código do setor censitário	Total de domicílios	Número de domicílios afetados	% domicílios afetados
310570705060001 (Barra Longa)	403	116	28,78
310570705060002 (Barra Longa)	354	29	8,19
310570705060003 (Barra Longa)	236	55	23,31
310570705060004	196	7	3,57
310570705060005	225	7	3,11
310570705060006	194	16	8,25
310570705060007	175	0	0,00
310570705060008 (Gesteira)	15	12	80,00
310570715000002	176	0	0,00
310570715000003	125	0	0,00
310570715000005	118	1	0,85
310570715000006	56	0	0,00
314000120000002	35	10	28,57
314000125000002	192	6	3,13
314000130000002	111	3	4,50

Código do setor censitário	Total de domicílios	Número de domicílios afetados	% domicílios afetados
314000130000003	179	5	2,79
314000135000002 (Paracatu de Baixo)	149	71	47,65
314000150000002	8	2	25,00
314000150000003 (Bento Rodrigues)	148	148	100,00
314000150000004	5	0	0,00
315210513000003	217	1	0,46
315500905000003	188	1	0,53
315500905000004	128	0	0,00
315740110000001	129	0	0,00
315740110000002	195	0	0,00
315740110000003	226	0	0,00
Total	4.183	490	11,71

Fonte: Autora (2019)

A Tabela 5.6 mostra o resultado do cálculo da proporção de classes econômicas nos setores censitários, excluindo aqueles onde o número de domicílios atingidos é igual a zero.

Tabela 5.6: Proporção das classes econômicas por setor censitário

Código do setor censitário	Domicílios	Distribuição dos domicílios por classe econômica ABEP			
		A	B	C	D/E
310570705060001 (Barra Longa)	403	18%	7%	72%	3%
310570705060002 (Barra Longa)	354	20%	10%	21%	49%

Código do setor censitário	Domicílios	Distribuição dos domicílios por classe econômica ABEP			
		A	B	C	D/E
310570705060003 (Barra Longa)	236	19%	25%	42%	15%
310570705060004	196	28%	23%	34%	14%
310570705060005	225	25%	28%	38%	9%
310570705060006	194	44%	11%	18%	27%
310570705060008 (Gesteira)	15	0%	0%	100%	0%
310570715000005	118	7%	33%	56%	4%
314000120000002	35	16%	16%	35%	33%
314000125000002	192	25%	33%	37%	5%
314000130000002 (Paracatu de Baixo)	111	12%	21%	45%	22%
314000130000003	179	24%	27%	39%	11%
314000135000002	149	42%	44%	14%	0%
314000150000002	8	0%	0%	1%	99%
314000150000003 (Bento Rodrigues)	148	4%	22%	61%	12%
315210513000003	217	16%	23%	43%	18%
315500905000003	188	25%	12%	22%	41%

Fonte: Autora (2019)

Após a definição de proporção dos domicílios por classe econômica no setor censitário e a aplicação da distribuição aleatória, o inventário de estruturas resultou em 478 pontos agrupados por classe: 89 estruturas pertencentes a classe econômica A, 99 estruturas pertencentes a classe econômica B, 239 estruturas pertencentes a classe econômica C e 51 estruturas correspondentes a classe econômica D/E.

Das 478 estruturas mapeadas, foram identificadas 476 estruturas unifamiliares e 2 estruturas multifamiliares. No primeiro caso, 467 estruturas são do tipo casa, sendo que 405 possuem 1 andar e 18 possuem 2 andares. Ainda como estrutura unifamiliar, foram identificados pela espacialização do CNEFE, 9 sobrados de 2 andares. As estruturas multifamiliares mapeadas na área afetada foram 2 prédios de 4 andares, com 6 e 8 domicílios. A Figura 5.15 mostra as estruturas por número de andares.

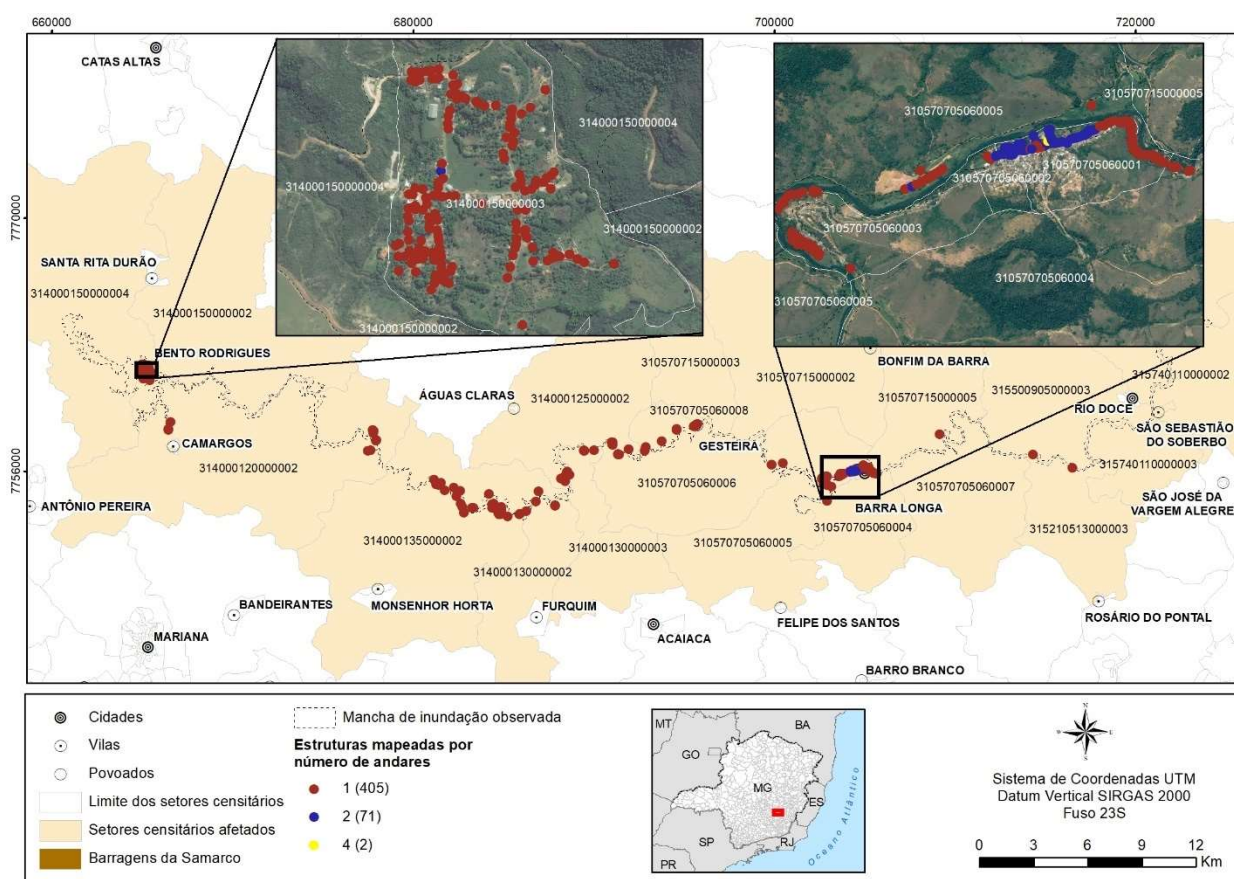


Figura 5.15: Estruturas mapeadas por número de andares

Fonte: Autora (2019)

Para caracterização das estruturas quanto a população residente foi calculada a média da população nos domicílios por setor censitário, conforme metodologia descrita no Item 4.4.5. A Tabela 5.7 mostra o resultado desse procedimento por grupo de risco.

Tabela 5.7: Média de moradores nos domicílios por grupo de risco

Código do setor censitário	Média de moradores por domicílio	Média de pessoas do grupo de risco por domicílio	Média de pessoas do grupo não- risco por domicílio
310570705060001 (Barra Longa)	2,89	0,61	2,28

Código do setor censitário	Média de moradores por domicílio	Média de pessoas do grupo de risco por domicílio	Média de pessoas do grupo não- risco por domicílio
310570705060002 (Barra Longa)	3,13	0,57	2,57
310570705060003 (Barra Longa)	3,24	0,46	2,79
310570705060004	2,99	0,62	2,38
310570705060005	3,43	0,53	2,90
310570705060006	3,16	0,63	2,53
310570705060008	2,33	0,83	1,50
310570715000005	3,68	0,68	3,00
314000120000002	3,58	0,67	2,92
314000125000002	3,08	0,61	2,47
314000130000002 (Paracatu de Baixo)	3,72	0,88	2,84
314000130000003	3,56	0,72	2,84
314000135000002	4,01	0,62	3,39
314000150000002	4,00	0,95	3,05
314000150000003 (Bento Rodrigues)	4,07	1,00	3,97
315210513000003	3,44	0,61	2,82
315500905000003	3,43	0,59	2,83

Fonte: Autora (2019)

5.5 CÁLCULO DOS DANOS NA MANCHA DE INUNDAÇÃO

O cálculo de danos e população em risco foi calculado pela soma dos valores das edificações e conteúdos e da população residente na área, estimados de acordo com os procedimentos descritos no Item 4.5. Os valores totais encontrados foram: R\$ 58.308.603,75 para edificações, R\$ 12.950.362,45 para conteúdos e 1.717 pessoas residentes na área afetada. A Tabela 5.8 mostra os resultados obtidos por setor censitário.

Tabela 5.8: Valores estimados na mancha de inundação observada

Código do setor censitário	Valor da edificação (R\$)	Valor do conteúdo (R\$)	População total
310570705060001 (Barra Longa)	16.273.944,12	2.461.755,00	335
310570705060002 (Barra Longa)	5.242.695,11	784.747,80	91
310570705060003 (Barra Longa)	7.199.596,42	1.919.923,90	178
310570705060004	388.772,24	90.818,05	21
310570705060005	756.858,19	205.687,20	24
310570705060006	2.150.558,29	576.511,20	51
310570705060008 (Gesteira)	594.532,20	120.642,00	28
310570715000005	49.544,35	10.053,50	4
314000120000002	736.983,46	184.377,85	36
314000125000002 (Paracatu de Baixo)	614.601,53	168.840,50	18
314000130000002	148.633,05	30.160,50	11
314000130000003	714.545,45	185.532,30	18
314000135000002	12.635.429,69	3.509.718,10	285
314000150000002	65.255,02	15.873,90	8

Código do setor censitário	Valor da edificação (R\$)	Valor do conteúdo (R\$)	População total
314000150000003 (Bento Rodrigues)	10.404.154,08	2.597.981,25	602
315210513000003	49.544,35	10.053,50	3
315500905000003	282.956,20	77.685,90	3
Total	58.308.603,75	12.950.362,45	1.717

Fonte: Autora (2020)

5.6 MODELO DE ESTIMATIVA DE DANOS – HEC-FIA

Essa seção apresenta os valores obtidos pela modelagem de estimativa de danos realizada no software HEC-FIA, de acordo com os procedimentos descritos no Item 4.6. O valor obtido para danos às edificações foi de **R\$ 29.818.378,10** e para dano ao conteúdo o resultado foi de **R\$ 11.378.876,00**. A Tabela 5.9 apresenta os resultados por setor censitário em valores monetários e percentuais.

Tabela 5.9: Resultado da simulação de danos diretos

Código do setor censitário	Dano a edificação (R\$)	Dano ao conteúdo (R\$)	Dano a edificação (%)	Dano ao conteúdo (%)
310570705060001 (Barra Longa)	4.713.754,73	1.762.188,19	28,97	71,58
310570705060002 (Barra Longa)	2.344.314,00	549.539,24	44,72	70,03
310570705060003 (Barra Longa)	2.429.354,34	1.619.393,58	33,74	84,35
310570705060004	263.747,60	70.684,21	67,84	77,83
310570705060005	182.306,84	178.770,33	24,09	86,91
310570705060006	1.716.648,96	564.590,44	79,82	97,93
310570705060008 (Gesteira)	454.074,40	100.113,72	76,38	82,98

Código do setor censitário	Dano a edificação (R\$)	Dano ao conteúdo (R\$)	Dano a edificação (%)	Dano ao conteúdo (%)
310570715000005	7.652,84	9.389,39	15,45	93,39
314000120000002	400.242,88	193.156,98	54,31	100,00
314000125000002 (Paracatu de Baixo)	401.714,58	165.402,91	65,36	97,96
314000130000002	65.504,58	29.833,24	44,07	98,91
314000130000003	627.196,35	178.720,12	87,78	96,33
314000135000002	5.453.089,34	3.258.072,95	43,16	92,83
314000150000002	65.255,02	15.873,90	100,00	100,00
314000150000003 (Bento Rodrigues)	10.404.154,03	2.597.981,23	100,00	100,00
315210513000003	6.411,44	7.479,67	12,94	74,40
315500905000003	282.956,19	77.685,90	100,00	100,00
Total	29.818.378,10	11.378.876,00		

Fonte: Autora (2020)

Para a estimativa de perdas de vida, o HEC-FIA calculou, a partir das variáveis e parâmetros apresentados no Item 4.6, as porcentagens das pessoas evacuadas em segurança, das pessoas pegas em evacuação, das pessoas que não evacuaram e o número de fatalidades. O número obtido foi 34 fatalidades em uma população de 1.717 pessoas, aproximadamente 2% do total da população na área afetada. O resultado é apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10: Resultado da simulação de perdas de vida

Código do setor censitário	População total	Pessoas que evacuaram em segurança (%)	Pessoas pegas em evacuação (%)	Pessoas que não evacuaram (%)	Número de Fatalidades
310570705060001 (Barra Longa)	335	93	0	7	0
310570705060002 (Barra Longa)	91	82	0	18	0
310570705060003 (Barra Longa)	178	91	0	9	0
310570705060004	21	98	0	2	0
310570705060005	24	98	0	2	0
310570705060006	51	98	0	2	0
310570705060008 (Gesteira)	28	92	0	8	0
310570715000005	4	98	0	2	0
314000120000002	36	78	1	21	2
314000125000002 (Paracatu de Baixo)	18	98	0	2	0
314000130000002	11	98	0	2	0
314000130000003	18	98	0	2	0
314000135000002	285	97	0	3	0
314000150000002	8	100	0	0	0
314000150000003 (Bento Rodrigues)	602	71	4	25	32
315210513000003	3	98	0	2	0
315500905000003	3	98	0	2	0
Total	1.717				34

Fonte: Autora (2020)

5.7 LEVANTAMENTO DE INFORMAÇÕES DO EVENTO

A Tabela 5.11 mostra os danos às unidades habitacionais em valores monetários expostos no Relatório dos efeitos dos desdobramentos do rompimento da barragem de Fundão, de fevereiro de 2016 (MINAS GERAIS, 2016), conforme exposto no Item 4.7. Embora esses valores também sejam estimados pelas prefeituras dos municípios diretamente afetados, foram utilizados a título de comparação como: danos observados.

Os valores na Tabela 5.11 correspondem aos valores informados para a infraestrutura perdida ou danificada. Isso não quer dizer que correspondem à reconstrução ou reforma total dos bens, uma vez que isso envolve outros fatores, tais como a possibilidade de utilização do mesmo terreno, melhorias relacionadas à técnica de construção, entre outros (MINAS GERAIS, 2016).

Tabela 5.11: Danos observados no evento

Municípios atingidos pela barragem	Unidades Habitacionais		
	Destruídas	Danificadas	Valor (R\$)
Mariana	349	0	51.756.700,00
Barra Longa	40	93	2.657.600,00
Rio Doce	0	0	0,00
Santa Cruz do Escalvado	0	1	60.000,00
Total	389	94	54.474.300,00

Fonte: MINAS GERAIS (2016)

Além do relatório dos efeitos dos desdobramentos do rompimento da barragem de Fundão, de fevereiro de 2016 (MINAS GERAIS, 2016), as fatalidades observadas no evento foram levantadas em fontes jornalísticas e no site da Samarco, com destaque para a reportagem do site do G1, publicada em 07/11/2015 (G1, 2015), que divulgou a lista oficial dos mortos e desaparecidos pelo desastre da barragem de Fundão.

De acordo com a reportagem (G1, 2015), até a data da publicação, 18 corpos haviam sido identificados e duas pessoas estavam desaparecidas. Entre os moradores de Bento Rodrigues, foram confirmados os óbitos de uma criança de 5 anos, uma criança de 7 anos, uma mulher de 64 anos e um homem de 73 anos, totalizando quatro pessoas. Uma mulher de 60 anos, que visitava o local no dia do desastre, foi levada pela lama enquanto pescava às margens do rio e também faleceu. Dentre os trabalhadores na área da mina, foram confirmados o óbito de um funcionário da mineradora e 12 funcionários terceirizados.

Segundo a Samarco (2019), dos óbitos confirmados, 13 foram de profissionais que trabalhavam na área da barragem, quatro de moradores e uma pessoa que visitava Bento Rodrigues. Uma pessoa permanece desaparecida até a data atual. A Tabela 5.12 mostra o resumo dos danos humanos diretos expostos em MINAS GERAIS (2016).

Tabela 5.12: Resumo dos danos humanos diretos

Atingidos pela barragem	Danos humanos diretos				
	Mortos	Feridos	Enfermos	Desabrigados	Desalojados
	19	256	380	644	716
Total de afetados diretos					
2.015					

Fonte: Adaptado de MINAS GERAIS (2016)

5.8 ANÁLISE COMPARATIVA

A análise comparativa dos danos diretos partiu dos valores monetários estimados para todas as edificações e seus conteúdos na área afetada, dos resultados do modelo de estimativa de danos (HEC-FIA) e dos danos observados.

Para que essa comparação fosse viável, foram necessários três procedimentos: a soma dos valores estimados para edificações e conteúdo, a agregação dos resultados por setores censitários em municípios e a atualização destes para o ano de referência dos valores observados: 2015. O índice utilizado para esse último procedimento foi obtido na série histórica do Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), disponibilizada pelo IBGE (IBGE, 2019), segundo os cálculos apresentados na Tabela 5.13.

Cabe ressaltar que o índice anual de 2010 calculado corresponde aos meses de agosto a dezembro (a data de referência do Censo 2010 é 31 de julho de 2010) e o índice anual de 2015 calculado corresponde aos meses de janeiro a outubro (a data do evento é 5 de novembro de 2015). Assim, buscou-se aproximar os valores estimados aos valores reais na data do evento.

Tabela 5.13: Índice IPCA utilizado na atualização dos valores

Ano	Índice Anual	Índice Acumulado
2010 (agosto a dezembro)	1,01465	-
2011	1,065	1,0806
2012	1,0584	1,143712
2013	1,0591	1,211305
2014	1,0641	1,28895
2015 (janeiro a outubro)	1,0962	1,4129471

Fonte: Autora (2020)

Assim, os valores de edificações e conteúdos por município foram multiplicados pelo índice acumulado até outubro de 2015: **1,41**. A Tabela 5.14 mostra o resultado da comparação.

Tabela 5.14: Comparação entre os valores estimados e observados para danos

Município	Domicílios estimados	Valor das edificações e conteúdo estimado (R\$)	Valor do dano estimado (R\$)	Domicílios observados	Valor do dano observado (R\$)
Mariana	245	45.231.383,52	33.707.544,81	349	51.756.700,00
Barra Longa	243	54.859.985,94	23.972.798,38	133	2.657.600,00
Rio Doce	1	509.568,19	509.568,17	0	0,00
Santa Cruz do Escalvado	0	0,00	0,00	1	60.000,00
Ponte Nova	1	84.208,61	19.627,40	0	0,00

Município	Domicílios estimados	Valor das edificações e conteúdo estimado (R\$)	Valor do dano estimado (R\$)	Domicílios observados	Valor do dano observado (R\$)
Total	490	100.685.146,26	58.209.538,76	483	54.474.300,00

Fonte: Autora (2020)

A comparação entre os valores globais estimados e observados mostram que, ambos são muito próximos (58 milhões e 54 milhões, aproximadamente). Da mesma forma, a diferença do número de domicílios estimados para o número observado foi de apenas 7 unidades. No entanto, quando se compara os mesmos valores por município, é possível notar divergências consideráveis. A Figura 5.16 mostra a comparação em gráfico, dos valores estimados e observados para os municípios citados.

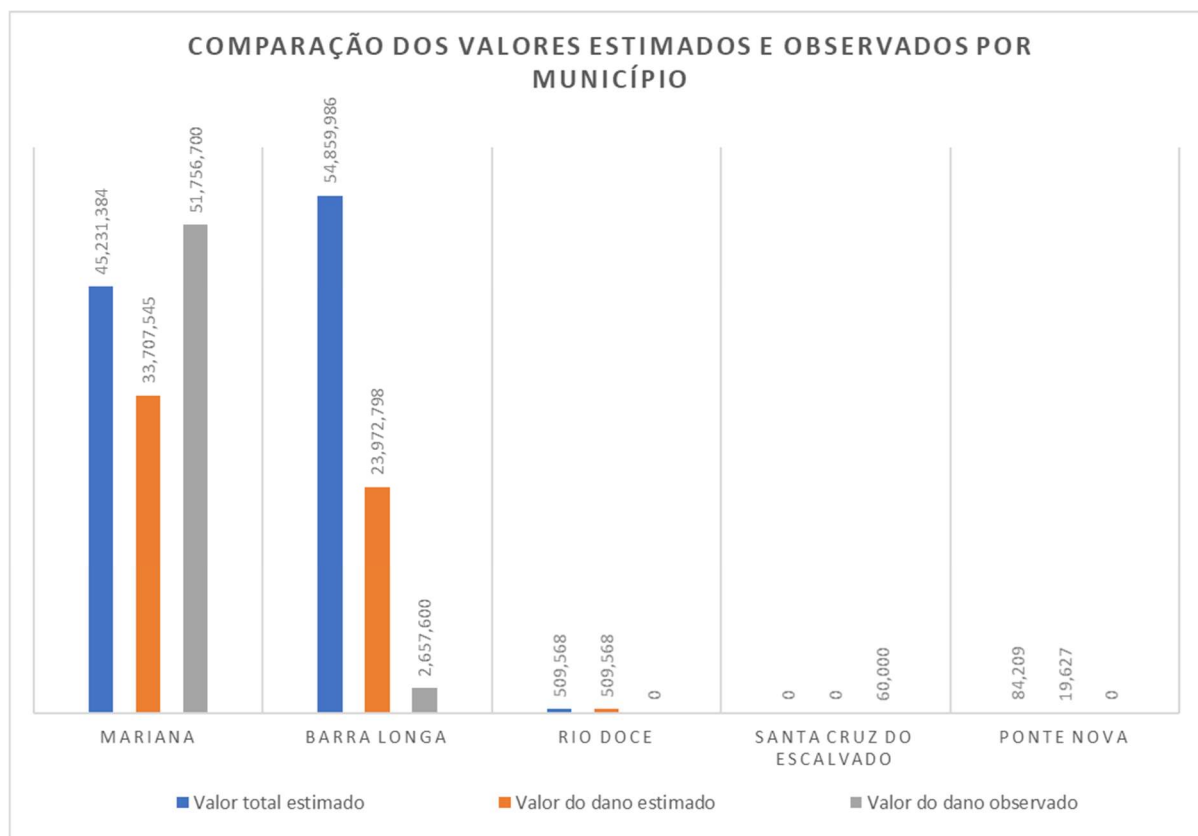


Figura 5.16: Comparação dos valores estimados e observados
Fonte: Autora (2020)

Para o município de Mariana, a diferença entre os valores dos danos estimados e observados foi de **R\$ 18.049.155,19**. Também houve uma divergência no número de domicílios afetados. O valor informado pela prefeitura de Mariana foi de 349 unidades habitacionais, enquanto o número estimado foi de 245, indicando uma diferença de 104 domicílios.

A prefeitura de Barra Longa informou que o dano às unidades habitacionais foi de **R\$ 2.657.600,00**. Porém, o modelo estimou um dano significativamente maior: **R\$ 23.972.798,38**. A diferença do número de domicílios afetados nesse município foi de 110 unidades.

As prefeituras dos municípios de Rio Doce e Ponte Nova não informaram danos às unidades habitacionais nesses municípios, porém foi estimado pelo modelo uma unidade habitacional danificada em cada um deles, com os valores para os danos causados de **R\$ 509.568,17** e **R\$ 19.627,40**, respectivamente. A Prefeitura de Santa Cruz do Escalvado informou o valor de **R\$ 60.000,00** para dano a uma unidade habitacional. O modelo não estimou dano para esse município, pois não foi encontrada nenhuma unidade habitacional na mancha de inundação observada.

Cabe ressaltar que os valores observados foram informados pelas prefeituras dos municípios diretamente afetados à Força-Tarefa (MINAS FERAI, 2016) e não foram encontradas informações a respeito da metodologia para estimativa desses valores.

Para os danos humanos diretos, foram estimadas 1.717 pessoas residentes na área afetada pela lama, enquanto MINAS GERAIS (2016), informou 1.360 pessoas entre desabrigados e desalojados de suas residências. As perdas de vida observadas no evento, correspondentes aos moradores de Bento Rodrigues, foram de quatro óbitos. No entanto, o modelo estimou um número muito maior: 34 fatalidades sendo que 32 ocorreram em Bento Rodrigues e outras duas, em uma comunidade rural (setor 314000120000002) logo a jusante do povoado.

Essa diferença pode ser explicada por uma simplificação do modelo: na modelagem no HEC-FIA, os moradores foram alocados dentro das estruturas, pois não foi considerado o movimento pendular dos residentes, como o deslocamento para o trabalho, escola ou outras atividades. No momento da ruptura da barragem de Fundão, que ocorreu aproximadamente às 15:45 horas do dia 05 de novembro de 2015, quinta-feira, muitas pessoas não se encontravam em suas casas. Para o refinamento do modelo, é necessário conhecer a porcentagem de residentes que exerciam suas atividades fora da área afetada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho realizado nessa dissertação apresentou uma estimativa dos danos econômicos diretos causados nos domicílios pelo rompimento da barragem de Fundão, por meio de modelagem computacional. O objetivo da dissertação consistiu em comparar os resultados obtidos com os danos observados no evento. Esse exercício buscou responder algumas questões sobre os modelos utilizados e sobre o evento ocorrido. Foram elas:

- É possível utilizar modelos de previsão de mancha de inundação e de análise de impactos de enchente para estimar os danos causados por rompimento de barragens?
- Esse exercício pode contribuir para a gestão de uma crise instaurada, como por exemplo, na obtenção de valores de referência para indenizações aos atingidos por rompimento de barragens?
- A utilização do HEC-FIA pode contribuir para a gestão de risco nos vales a jusante? E o emprego desse tipo de modelo é compatível com o cenário legal de gestão de riscos no Brasil?
- A sua aplicação em um evento conhecido, como o caso do rompimento da barragem de Fundão, possibilita melhorias na calibração do modelo, utilizando as condições reais em que ocorreu o desastre?
- É possível comparar os resultados da simulação com os dados efetivamente observados após o desastre?
- Essa comparação possibilita a verificação da aplicabilidade dos métodos e a determinação dos melhores parâmetros e variáveis utilizadas na modelagem?

Dessa forma, a dissertação consistiu em uma revisão bibliográfica, na qual foram apresentadas a legislação brasileira em segurança de barragens, dados estatísticos de rompimento de barragens no Brasil, suas principais causas, os danos potenciais associados, as práticas de gestão de risco de barragens de mineração e os modelos utilizados para a estimativa de inundação e danos correlatos. Nessa revisão, buscou-se destacar temas que nortearam a metodologia empregada e influenciaram os resultados dos modelos.

O emprego de técnicas de geoprocessamento no desenvolvimento do trabalho se mostrou de grande importância, desde o tratamento dos dados até análise e apresentação dos resultados, evidenciando sua importância em estudos territoriais.

A estimativa da mancha de inundação e a comparação com a área afetada observada mostrou que, apesar das incertezas inerentes ao processo de ruptura e propagação da onda de inundação, os resultados são satisfatórios e o modelo se mostrou capaz de prever a mancha de inundação no caso do rompimento de uma barragem. É importante destacar que os resultados obtidos são sensíveis aos dados utilizados para a modelagem, como a topografia do terreno, o hidrograma de ruptura, o tempo de simulação empregado e o coeficiente de rugosidade. A sensibilidade do modelo às variáveis utilizadas deve ser avaliada caso a caso, em estudos mais aprofundados sobre o tema, como realizou Rocha (2005), Machado (2017), Matos (2018), entre outros trabalhos citados nessa dissertação.

A estimativa de valores monetários para edificações e seus conteúdos foi uma tentativa de utilização de informações secundárias, na falta de dados detalhados, que possam balizar os estudos e fazer inferências às populações afetadas. Embora os dados do Censo Demográfico sejam um produto de qualidade para esse fim, é importante reconhecer que existem várias incertezas nos procedimentos utilizados, como por exemplo, a distribuição aleatória das proporções de classes econômicas nos domicílios do setor censitário. Esse tipo de distribuição buscou apenas atribuir um valor monetário a estrutura, na impossibilidade de reconhecer seu padrão construtivo por imagens de satélite e mesmo em loco, uma vez que após o evento, muitas edificações foram destruídas.

Dessa forma, a metodologia utilizada não é indicada para determinar valores indenizatórios no caso de um dano sofrido por ruptura de barragem. No entanto, os valores estimados pelo modelo encontram-se na mesma ordem de grandeza dos valores informados pelas prefeituras dos municípios atingidos, indicando que os métodos empregados na pesquisa podem ser utilizados para a tomada de decisão em crises instauradas, considerando uma escala regional.

A partir da análise da legislação brasileira para segurança de barragens e gestão de risco, incluindo os critérios estabelecidos pelo CNRH (2012), os modelos de previsão de mancha de inundação e de estimativa de danos podem contribuir significativamente para a classificação de risco e dano potencial das barragens brasileiras. Inclusive, como exposto no capítulo VI da Portaria DNPM nº 70.389, de 17 de maio de 2017 (DNPM, 2017), o PAE para barragens de mineração deve conter, entre outros estudos, um relatório de causas e consequências, com a descrição dos danos materiais, à vida e à propriedade, no caso de ocorrer a falha da estrutura.

Para além das exigências legais, a padronização da metodologia empregada nesse trabalho e a sua aplicação nos estudos de risco de barragens podem contribuir para que as empresas mineradoras tenham ferramentas que possibilitem a comparação entre as diversas barragens, contribuindo para uma gestão do risco eficiente.

A estimativa de população em risco e de perdas de vida em casos de rompimento de barragem é um dado importante para o planejamento de rotas de fuga e evidenciam a importância de implantação de sistemas de alerta de enchente eficientes nas áreas de risco.

A aplicação dos modelos preditivos HEC-RAS e HEC-FIA à um evento ocorrido possibilitou um melhor entendimento das variáveis e parâmetros utilizados na modelagem. Observou-se, por exemplo, que o cálculo de perdas de vida é mais sensível ao período do dia em que ocorreu a ruptura e as atividades da população no momento da ruptura do que ao sistema de alerta de enchente empregado. Por outro lado, este é altamente dependente do tempo de chegada da onda informado nas células do raster. Dessa forma, a aplicação do modelo de impacto de enchentes em diferentes cenários hipotéticos deve contribuir mais efetivamente para esse entendimento, do que a sua utilização em um evento ocorrido.

Por fim, a comparação dos resultados obtidos indicou que os modelos empregados são satisfatórios para a previsão de inundações por ruptura de barragens e estimativa de danos correlatos e podem contribuir muito para a gestão do risco de barragens no Brasil, como já acontece em outros países. A disseminação dessas modelos, em órgãos públicos de fiscalização, em empresas que precisam lidar com esses grandes passivos que são as barragens de rejeito e na sociedade acadêmica é de grande importância para o desenvolvimento dos mesmos e a sua utilização cada vez maior na gestão do risco de barragens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEP – Associação Brasileira de Empresas de Pesquisa. Critério de Classificação Econômica Brasil para o ano de 2010. Nota Técnica. São Paulo, 2012.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12721:2005. Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios e edifícios. Rio de Janeiro, 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISSO 31000:2009. Gestão de Riscos – Princípios e Diretrizes. Rio de Janeiro, 2009.

ABOELATA, M. A.; BOWLES, D.S. LIFESim: A Model for Estimating Dam Failure Life Loss. Institute for Water Resources, US Army Corps of Engineers and Australian National Committee on Large Dams by Institute for Dam Safety Risk Management. Article.2005.

AGÊNCIA BRASIL. Enxurrada de lama atinge cidade de Barra Longa. Reportagem publicada em 08/11/2015. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/foto/2015-11/enxurrada-de-lama-atinge-cidade-de-barra-longa>. Acessado em: 02/01/2020.

AGU – Advocacia Geral da União. Termo De Transação e de Ajustamento de Conduta - TTAC. Comissão Externa destinada a acompanhar os desdobramentos do rompimento da barragem na região de Mariana/MG (CEXBARRA). Brasília, 2016.

ALMEIDA, A. B., Emergências e gestão do risco. In: INAG. Curso sobre operação e Segurança de Barragens. 1. ed. Lisboa: INAG, 2001. Cap. 7, 115 p.

ALMEIDA, A. B., Emergências e gestão do risco. Aula do Curso sobre operação e Segurança de Barragens. Lisboa, 2016. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~joana/DFA-riscos-net/riscos-curso-seguran%C3%A7a-2006-nova%20versd%C3%A3o.pdf>. Acessado em 01/12/2019.

ALVES, H.R., O rompimento de barragens no Brasil e no mundo: desastres mistos ou tecnológicos? 2015. Disponível em: http://www.domhelder.edu.br/uploads/artigo_HRA.p Acessado em: 02 de setembro de 2019.

ANA – Agência Nacional das Águas. Resolução Nº 91, 02 de abril de 2012. Seção 1. D.O.U de 11 de abril de 2012. Brasília, 2012.

ANA – Agência Nacional das Águas. Relatório de Segurança de Barragens – Ano de referência: 2016. Brasília, 2017.

ANA – Agência Nacional das Águas. Relatório de Segurança de Barragens – Ano de referência: 2017. Brasília, 2018.

ANDERÁOS, A., ARAUJO, L., NUNES, C. Classificação de Barragem quanto à categoria de risco e dano potencial associado – um exercício. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Bento Gonçalves – RS. Novembro de 2013.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Classificação de Barragens de Mineração. Artigo publicado 19/02/2019. Disponível em:
<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/pasta-classificacao-de-barragens-de-mineracao/plano-de-seguranca-de-barragens>. Acessado em: 21/11/2019.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Resolução Nº 4, De 15 De Fevereiro De 2019. Publicado em: 18/02/2019 | Edição: 34 | Seção: 1 | Página: 58. Brasília, 2019. b.

ANM - Agência Nacional de Mineração. Perguntas e Respostas sobre barragens de mineração e o caso de Brumadinho. Disponível em:
<http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/perguntas-e-respostas-sobre-barragens-de-mineracao-e-o-caso-de-brumadinho>. Acessado em: 10/05/2019.

BALBI, D. A. F., Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti – MG. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008, 337 p.

BANCO MUNDIAL - Banco Mundial no Brasil, Serviços Analíticos e Consultivos em Segurança de Barragens para a Agência Nacional de Águas (ANA), Produto 4: Classificação de Barragens: Avaliação dos Critérios Gerais Atuais, Metodologia Simplificada para Áreas Inundadas a Jusante e Diretrizes para a Classificação. Brasília, maio de 2014.

BERMANN, C., Desafios sociais e ambientais da mineração no Brasil e a sustentabilidade. Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Capítulo V Ambiente e Sustentabilidade. Adolpho José Melfi, Aroldo Misi, Diogenes de Almeida Campos e Umberto Giuseppe Cordani (orgs). – Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. 420p.

BRASIL. LEI Nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Brasília, 20 de setembro de 2010.

BRASIL. Projeto de Lei Nº PL 550/2019. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2194912>. Acessado em: 7/01/2020.

BRASIL. Resolução Nº 14, de 11 de dezembro de 2019. Publicado em: 03/01/2020, Edição: 2. Seção: 1. Página: 276. Brasília, 2020.

BRASIL, L. S. S., Utilização de Modelagens Uni e Bidimensional para a Propagação de Onda de Cheia Proveniente de Ruptura Hipotética de Barragem. Estudo de Caso: Barragem Rio de Pedras. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005, 203 p.

BRUNNER, G., Using HEC-RAS for Dam Break Studies, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, U. S. Corps of Engineers, Estados Unidos, agosto de 2014, 74 p.

CABALLERO. M. Com Brumadinho, Brasil tem um rompimento de barragem a cada dois anos desde 2000; veja lista. Blog Politicando. Disponível em: <https://blogs.oglobo.globo.com/politicando/post/brumadinho-e-o-10-rompimento-de-barragem-no-brasil-desde-2000-veja-lista.html>. Acessado em: 20/06/2019.

CAMARGO, C. O. S. F. A., O Município de Mariana. Artigo. 2017. Vozes e Silenciamentos em Mariana – Crime ou Desastre Ambiental? Graça Caldas (org.) Laboratório de Estudos Avançados em Jornalismo (Labjor). Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. Campinas – SP. 2017. 356p.

CANÇADO, V. L., Consequências Econômicas das Inundações e Vulnerabilidade: Desenvolvimento de metodologia para avaliação do impacto nos domicílios e na cidade. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009, 394 p.

CNDH – Conselho Nacional de Direitos Humanos. Relatório sobre o rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Samarco e seus efeitos sobre o vale do rio Doce. Brasília, maio de 2017.

CASTRO, L. V. P. DE. Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas). Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução Nº 143, De 10 De Julho De 2012. Publicada No D.O.U Em 04/09/2012. Brasília, 2012.

CPRM – Sistema Geológico do Brasil. Sistema de Alerta de Cheias da Bacia do Rio Doce. Boletim de acompanhamento da onda de cheia ao longo do rio Doce causada pela Ruptura da Barragem em Mariana – MG. Belo Horizonte, 2015.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria Nº 70.389, De 17 De Maio De 2017 . Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/portaria-dnpm-no-70-389-de-17-de-maio-de-2017-com-alteracoes-resolucao-13-2019-n.pdf>. Acessado em 11/09/2019.

EGM - Generic Depth-Damage Relationships, Economic Guidance Memorandum (EGM) 01-03. 2003. Disponível em: <https://docplayer.net/11881191-Subject-economic-guidance-memorandum-egm-04-01-generic-depth-damage-relationships-for-residential-structures-with-basements.html>

ENRÍQUEZ, M. A., FERNANDES, F., ALAMINO, R. A mineração das grandes minas e as dimensões da sustentabilidade. Recursos Minerais e Sustentabilidade Territorial. Vol. I Grandes Minas. FERNANDES et. al. (Org.). Rio de Janeiro, 2011. 343p.

FONSECA, B. Faltam dados básicos no sistema nacional que orienta as políticas de segurança contra acidentes como o de Brumadinho. Notícia publicada em 30 de janeiro de 2019. Disponível em: <https://apublica.org/2019/01/brasil-registra-mais-de-tres-acidentes-em-barragens-por-ano/>. Acessado em: 03/03/2019.

FUNDAÇÃO RENOVA, Relatório Anual de Atividades. Ano 2018. Belo Horizonte, janeiro de 2019. Disponível em: <https://www.fundacaorenova.org/wp-content/uploads/2019/01/renovaanual-1.pdf>. Acessado em: 12/11/2019

FUSARO, Teresa Cristina; ÁVILA, Joaquim Pimenta; CAMPELLO, Izabela Couto; PIMENTA FILHO. Marcos de Ávila. Avanços no entendimento do risco de erosão interna. In: II SGBR Seminário de Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeito. 2017.

G1 – Site G1. Veja lista dos mortos e desaparecidos no rompimento de barragem em Minas Gerais. Notícia publicada em: 07/11/2015. Disponível em: <http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2015/11/veja-lista-de-desaparecidos-no-rompimento-de-barragens.html>. Acessado em: 04/01/2020.

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis. CIF determina prazo para indenização a atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão. Notícia publicada em: 04 de outubro de 2017. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/noticias/422-2017/1209-cif-determina-prazo-para-indenizacao-a-atingidos-pelo-rompimento-da-barragem-de-fundao>. Acessado em: 10/03/2019

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Laudo Técnico Preliminar: Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Brasília, 2015. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/phocadownload/barragemdefundao/laudos/Laudo_tecnico_preliminar_ibama.pdf. Acessado em: 12/03/2019

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base de Informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por Setor Censitário. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>. Acessado em: 15/01/2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cadastro Nacional de Endereços para Fins Estatísticos (CNEFE). 2011. Disponível em:

<https://censo2010.ibge.gov.br/cnefe/> . Acessado em: 10/10/2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) – Série Histórica. 2019. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9256-indice-nacional-de-precos-ao-consumidor-amplo.html?=&t=downloads>. Acessado em: 03/01/2020.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração. Brasília, 2016. 128p.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Relatório Anual de Atividades: julho de 2017 a junho de 2018. São Paulo, 2018. Disponível em:

http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/07/Diagrama%C3%A7%C3%A3o_Relat%C3%B3rioAnual_vers%C3%A3oweb.pdf

JORNAL ESTADO DE MINAS. Atingidos por barragem alertam para a falta de importância que vem sendo dada aos danos da tragédia. Notícia publicada em 20/09/2017. Disponível em: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2017/09/20/interna_gerais,902231/atingidos-por-barra-gem-alertam-para-falta-de-importancia-que-vem-sendo.shtml. Acessado em: 02/02/2019

JORNAL O TEMPO. Tragédia: 30 dias, 30 fotos. Veja imagens que resumem o mês da tragédia em Mariana. Publicado em: 05/12/2015. Disponível em:

<https://www.otempo.com.br/galeria-de-fotos/tragedia-30-dias-30-fotos-1.1185001>. Acessado em: 12/12/2019.

JORNAL NACIONAL. Justiça homologa acordo para indenizar atingidos por barragem da Samarco. Notícia publicada em: 03/10/2018. Disponível em:

<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2018/10/03/justica-de-minas-homologa-acordo-para-indenizar-atingidos-por-barra-gem-da-samarco.ghtml>

JORNAL O GLOBO. Dois anos depois de tragédia, vítimas de Mariana aguardam indenizações. Notícia publicada em 29/10/2017. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/brasil/dois-anos-depois-de-tragedia-vitimas-de-mariana-aguardam-indenizacoes-22006567>. Acessado em: 05/04/2019.

LAURIANO, A., PIMENTA DE ÁVILA, J., CORTEZ, J.; SILVA, A. Discussões Sobre Os Modos De Falha E Risco De Galgamento De Barragens De Rejeitos. Apresentação. Belo Horizonte: II SGBR, 2017.

LEHMAN, W., DUNN, C., LIGHT, M. Using Hec-Fia To Identify the Consequences of Flood Events. 6º International Conference on Flood Management. São Paulo, 2014.

LEHMAN, L.; NEEDHAM, J., Consequence Estimation for Dam Failures. US Army Corps of Engineers. Article. 2018.

MACHADO, M. L., Curvas de Inundação versus Profundidade de Submersão: Desenvolvimento de Metodologia – Estudo de Caso da Bacia do Rio Sapucaí, Itajubá, MG. 2005. Tese. (Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MACHADO, M. L., NASCIMENTO, N., BAPTISTA, M., GONÇALVES, M., SILVA, A., LIMA, J., DIAS, R., SILVA, A., MACHADO, E., Curvas de Danos de Inundação Versus Profundidade de Submersão: Desenvolvimento de Metodologia. Artigo. Rega – Revista de Gestão de Água da América Latina. Volume 2. Nº 1. janeiro de 2005.

MACHADO, N. C., Retroanálise da Propagação Decorrente da Ruptura da Barragem do Fundão com Diferentes Modelos e Numéricos e Hipóteses de Simulação. 2017. 188 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MACHADO, L. V. T., AZEEZ, D. G., Incidentes e Acidentes em Barragens. 7º Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade. Anais do Evento. Rio de Janeiro, julho de 2018. Disponível em: <http://itr.ufrj.br/sigabi/anais>

MATOS, A. C. S., Modelagem Hidrodinâmica de Perdas de Vidas Humanas associadas à ruptura da barragem do Fundão, para o subdistrito de Bento Rodrigues, Mariana (MG). 2018. 79 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

MELO, L. P. R., Análise Comparativa de Metodologias de Previsão de Inundação Decorrente da Ruptura de barragens de Rejeitos: Caso Hipotético da Barragem Tico-Tico. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013, 197p.

MENEZES, D. S., Classificação dos danos decorrentes da ruptura de barragens de acumulação de água. Estudo de Caso: Barragem de Santa Helena – BA. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente, Águas e Saneamento) – Escola Politécnica. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2016. 160p.

MILANEZ, B.; WANDERLEY, L.; MANSUR, M.; PINTO, R.; GONÇALVES, R.; SANTOS, R.; COELHO, T. Antes fosse mais leve a carga: Reflexões sobre o desastre da Samarco/Vale/BHP Billiton. A questão Mineral no Brasil – Vol.2 ZONTA, M.; TROACTE, C. (org.). Editorial Guana. Outubro de 2016. 230p.

MILANEZ, B., PINTO, R. G., Considerações sobre o Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta firmado entre Governo Federal, Governo do Estado de Minas Gerais, Governo do Estado do Espírito Santo, Samarco Mineração S.A, Vale S.A. e BHP Billiton Brasil LTDA. Artigo. Revista Poemas - Política, Economia, Mineração, Ambiente e Sociedade. Abril, 2016.

MINAS GERAIS, Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da barragem de Fundão em Mariana – MG. Grupo Força-Tarefa. Belo Horizonte, 2016. 287p.

MORGENSTERN, N. R.; VICK, S. G.; VIOTTI, C. B.; WATTS, B. D. Fundão Tailings Dam Review Painel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. 2016. 88 p. Disponível em: <<http://fundaoinvestigation.com/>>. Acesso em: 15 de dezembro 2018.

MONTE-MOR, R. C. A., Mapeamento de áreas inundáveis associadas à ruptura de barragens; estudo de caso: barragem de Ninho de Águia – MG. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004, 141 p.

MOTA, K. R. R., Rompimento Hipotético e Delimitação da Área de Inundação da Barragem Salto Moraes em Ituiutaba/MG. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2017. 117p.

MPF – Ministério Público Federal. Ação Civil Pública Com Pedido De Liminar Inaudita Altera Pars. Autos nº 60017-58.2015.4.01.3800 e 69758.61-2015.4.01.3400. Belo Horizonte, 26 de abril de 2016. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/docs/acp-samarco>. Acessado em: 14/01/2020.

MT-MG – Ministério do Trabalho e Previdência Social – Superintendência Regional do Trabalho e Emprego em Minas Gerais. Relatório de Análise de Acidente. Rompimento da Barragem de Fundão em Mariana – MG. Belo Horizonte, abril de 2016. 138p.

NEVES, L. P., Segurança de barragens – Legislação Federal Brasileira em Segurança de Barragens Comentada. E-book. Brasília, 2018. 67p. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/e-book-livre-legislacao-federal-brasileira-em-seguranca-de-barragens-autor-luiz-paniago-neves>

NRCS - National Water and Climate Center. Manning's n Values for Various Land Covers to Use for Dam Breach Analyses by NRCS in Kansas. Disponível em: <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/HecRAS/NEDC/lectures/docs/Manning%20n-values%20for%20Kansas%20Dam%20Breach%20Analyses%20-20Adopted%20071216.pdf>. Acessado em: 12/03/2019.

PADUA, L. H. R., CAMPOS, R. G. D., Quantificação de danos e custos advindos de cheias urbanas e geração de curvas de vulnerabilidade utilizando HEC-FIA Estudo de Caso: Rio Arrudas – Belo Horizonte / MG. Artigo. XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Florianópolis – SC. Dezembro de 2007.

PIMENTA DE ÁVILA CONSULTORIA LTDA. Plano de Ações Emergenciais (PAE) da Barragem de Rejeitos do Córrego do Fundão. Relatório Técnico. Nova Lima, 2008. 47p.

ROCHA, F. F., Retroanálise da Ruptura da Barragem São Francisco – Mirai, Minas Gerais, Brasil. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2015, 176 p.

SAMARCO, O rompimento de Fundão. Disponível em:
<https://www.samarco.com/rompimento-de-fundao/>. Acessado em: 29/12/2019.

SÁNCHEZ, L. E., Riscos em Barragens de Rejeitos. Café com Sustentabilidade. Abril de 2016. Edição 46. Federação Brasileira de Bancos – FEBRAN. São Paulo, 2016.

SILVA, W. P., Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP) – Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2010, 141p.

SILVA, G. A.; BOAVA, D. L. T.; MACEDO, F.M.F. Refugiados de Bento Rodrigues: o Desastre de Mariana, MG. Artigo. Pensamento Contemporâneo em Administração. Rio de Janeiro – RJ. Maio de 2017.

SINDSEMA – Sindicato dos Servidores Públicos do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais. Clipping - Entenda o que é a liquefação, fenômeno que pode levar barragens ao colapso. Reportagem Publicada em: 7 de fevereiro de 2019. Disponível em:
<http://sindsemamg.com.br/entenda-o-que-e-a-liquefacao-fenomeno-que-pode-levar-barragens-ao-colapso/>. Acessado em: 15/06/2019.

SINDUSCON/MG – Sindicato da Industria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais. Custo Unitário Básicos de Construção – CUB (NBR 12.721:2006 – CUB 2006. Mês/ ano: janeiro/ 2010. Disponível em: http://www.sinduscon-mg.org.br/wp-content/uploads/2016/11/tabela_cub_janeiro_2010.pdf. Acessado em: 30/07/2019.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. HEC-FIA – User’s manual Version 3.0. 2014.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS – User’s manual Version 5.0.3. 2016.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. HEC-FIA Flood Impact Analysis – Technical Reference Manual. Version 3.0. February 2018.

USBR - United States Bureau of Reclamation. Downstream Hazard Classification Guidelines. Denver: U.S. Department of the Interior, 1988.

USBR - United States Bureau of Reclamation. A Procedure for Estimating Loss of Life Caused by Dam Failure, Dam Safety Office, September 1999

USBR - United States Bureau of Reclamation. III-1 Consequences of Flooding, Dam Safety Office, November 2014.

VASCONCELOS, E., Impactos Ambientais negativos provocados pela mineração. Lógica Ambiental. Macapá-AP. Artigo. 2016. Disponível em: <http://www.logicambiental.com.br/impactos-ambientais-negativos-mineracao/>. Acessado em: 10/09/2018.

VEIGA-PINTO, A. Gestão de Risco e Segurança de Barragens. 3º Simpósio de Segurança de Barragens e Riscos Associados. Apresentação. Novembro de 2008.

WISEU, T. Segurança dos vales a jusante de barragens: Metodologias de apoio à gestão do risco. Tese Doutorado – Departamento de Hidráulica e Ambiente, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2006. 385p.

WISEU, T.; ALMEIDA, A. B. Gestão do risco nos vales a jusante de barragens. Revista Territorium, n. 18, Lisboa, 2011. p. 33 – 42.